



内蒙古畜牧业温室气体减排策略 与路径研究报告

**Research on Strategies and Pathways of
Greenhouse Gas emission reduction about animal
husbandry in Inner Mongolia**

内蒙古自治区农牧业科学院
2023.12.22

**Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal
Husbandry Sciences
December 22, 2023**

关于主要作者

金海，内蒙古自治区农牧业科学院，研究员，博士，日本筑波大学博士，内蒙古自治区农牧业科学院博士生导师，二级研究员，国家现代肉羊产业技术体系首席科学家，“百千万人才工程”国家级人选，内蒙古自治区产业创新人才团队首席专家；中国畜牧业协会羊业分会会长。

李长青，内蒙古自治区农牧业科学院动物营养与饲料研究所肉羊研究室主任，研究员，博士，国家肉羊体系岗位专家，中国畜牧兽医学会养羊学分会常务理事，内蒙古第十三届政协委员，内蒙古知联会第三届理事，自治区“草原英才”，“新世纪 321 人才工程”二层次人选，国家科技特派团专家成员。邮箱：lcqeg@126.com

郭二果，内蒙古自治区生态环境科学研究院，正高级工程师博士，国家环境影响评价工程师、国家清洁生产审核师，内蒙古自治区新世纪 321 人才工程二层次人才。完成课题曾获国家梁希林业科学技术奖、自治区第七届哲学社会科学优秀成果政府奖、自治区科技进步奖、呼和浩特市科技进步奖。邮箱：474249984@qq.com。

ABOUT THE AUTHORS

Pro. Jin Hai, researcher of Inner Mongolia Autonomous Region Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Ph.D., PhD from University of Tsukuba, Japan, professor of Inner Mongolia Autonomous Region Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, second-level researcher, chief scientist of the National Modern Mutton Sheep Industry Technology System, national-level "Hundred Thousand Talents Project" Candidate, chief expert of the Inner Mongolia Autonomous Region Industrial Innovation Talent Team; president of the Sheep Industry Branch of the China Animal Husbandry Association.

Li Changqing, director of the Lamb Research Office of the Institute of Animal Nutrition and Feed, researcher of Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences of the Inner Mongolia Autonomous Region, Ph.D., expert in the national mutton system, executive director of the Sheep Branch of the Chinese Society of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, member of the 13th CPPCC Inner Mongolia CPPCC, Inner Mongolia intellectual The third session director of the

Federation, a “Grassland Talent” of the autonomous region, a second-level candidate for the “New Century 321 Talent Project”, and an expert member of the National Science and Technology Mission.

Guo Erguo, Inner Mongolia Autonomous Region Ecological and Environmental Science Research Institute, is a Ph.D. senior engineer, National Environmental Impact Assessment Engineer, National Cleaner Production Auditor, and a second-level talent in the New Century 321 Talent Project of Inner Mongolia Autonomous Region. The completion of the project has won the National Liang Xi Forestry Science and Technology Award, the 7th Autonomous Region Government Award for Outstanding Achievements in Philosophy and Social Sciences, the Autonomous Region Science Technology Progress Award, and the Hohhot City Science and Technology Progress Award.

致谢

本研究由【内蒙古自治区农牧业科学院】统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

本研究是【能源基金会环境管理项目/工作组下的课题，是内蒙古畜牧业温室气体减排策略与路径研究】。

本项目研究过程中，研究团队得到了内蒙古自治区生态环境研究院、中国农业科学院饲料所的大力支持，在此向他们表示诚挚感谢。

研究团队同时感谢以下专家在项目研究过程中作出的贡献：

- 【张树礼 原内蒙古自治区生态环境厅】
- 【屠 焰 中国农业科学院饲料研究所】
- 【马 涛 中国农业科学院饲料研究所】
- 【田彦锋 内蒙古悠然牧业有限责任公司】

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product written by [Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences in Inner Mongolia Autonomous Region] ,funded by Energy Foundation China.

This report is [part of the research project under Energy Foundation China's Environmental Management Task Force/Program, which is Research on the Inner Mongolia Animal Husbandry Greening Gas Discharge Strategy and Path]

The team is grateful for the generous support it received throughout this research from Inner Mongolia Autonomous Region Ecological Environment Research Institute, Feed of the Chinese Academy of Agricultural Sciences.

The team would like to thank the following experts for their contribution to this research:

[Zhang Shuli, Former Inner Mongolia Autonomous Region Ecological Environment Department]

[Tu Yan, Institute of Feed of the Chinese Academy of Agricultural Sciences]

[Ma Tao, Institute of Feed of the Chinese Academy of Agricultural Sciences]

[Tian Yanfeng Inner Mongolia Youran Husbandry Co., Ltd.]

目 录

摘 要	1
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 温室气体引起的气候变化给人类生存发展带来危机	1
1.1.2 甲烷等非二氧化碳温室气体对气候变化的贡献不容忽视	6
1.1.3 国际社会积极做出甲烷减排承诺并采取务实行动计划	8
1.1.4 控制畜牧业甲烷排放是内蒙古温室气体减排的重要途径	12
1.2 研究方法与技术路线	17
1.2.1 典型养殖场、牧户调查和相关单位走访	17
1.2.2 数据处理与统计分析	18
1.2.3 研究内容概述与技术路线	19
第二章 内蒙古畜牧业温室气体排放现状	20
2.1 内蒙古畜牧业发展现状	20
2.1.1 畜牧业发展政策不断完善	20
2.1.2 内蒙古畜牧业发展稳中向好	21
2.2 内蒙古畜牧业温室气体排放	26
2.2.1 畜牧业温室气体排放计算方法	26
2.2.2 内蒙古畜牧业碳排放分析	27
第三章 内蒙古畜牧业温室气体本地化排放因子及核算方法	31
3.1 温室气体的产生机制	31
3.1.1 肠道甲烷产生	31
3.1.2 排泄物（粪便）产生甲烷及影响因素	34
3.1.3 排泄物（粪便）产生氧化亚氮机制及影响因素	35
3.1.4 畜禽排放 CO ₂ 的机制	36
3.2 温室气体的排放途径	37
3.3 温室气体的测定方法	37
3.3.1 直接测定法	38
3.3.2 间接测量法	47

3.3.3 群体和大规模尺度上的测定方法.....	51
3.4 温室气体排放量的计算与预测	51
3.4.1 肠道 CH ₄ 排放量计算.....	51
3.4.2 家畜粪便管理系统甲烷 (CH ₄) 排放的估算.....	55
3.4.3 家畜粪便管理系统氧化亚氮 (N ₂ O) 排放的估算.....	56
3.4.4 IPCC 预测模型.....	56
3.4.5 畜牧业非二氧化碳温室气体预测模型.....	58
3.5 小结.....	61
第四章 内蒙古畜牧业甲烷排放特征及调控措施	63
4.1 放牧对甲烷排放特征	63
4.1.1 内蒙古双峰驼.....	63
4.1.2 内蒙古白绒山羊.....	63
4.2 生理阶段对甲烷排放特征	65
4.2.1 羊.....	65
4.2.2 奶牛.....	67
4.3 饲料组成对甲烷排放的影响	70
4.3.1 精粗比.....	70
4.3.2 碳水化合物结构.....	72
4.4 饲料添加剂对甲烷排放的影响	73
4.4.1 植物提取物.....	73
4.4.2 微生态制剂.....	74
4.4.3 不同甲烷减排策略的比较.....	74
4.5 遗传因素对甲烷排放的影响	76
4.6 粪污管理温室气体排放特征及影响因素	77
4.6.1 不同处理方式对粪污温室气体排放的影响.....	77
4.6.2 日粮组成对粪污温室气体排放的影响.....	78
4.7 圈舍养殖环境对温室气体排放的影响	78
4.8 饲料种类、饲养方式及养殖规模对温室气体排放的影响...	79
4.9 小结	80
第五章 养殖场减污降碳协同效应及措施	81
5.1 粪便管理减污降碳效应及影响因素.....	81

5.2 奶牛场恶臭污染物与温室气体排放相关性	85
5.2.1 规模化奶牛场厂界恶臭浓度与温室气体排放关系	85
5.2.2 规模化奶牛场堆肥车间恶臭污染物与温室气体排放相关性	87
5.3 内蒙古畜牧业恶臭污染物与温室气体协同控制措施	89
5.4 内蒙古典型养殖场减污降碳技术应用案例	98
5.4.1 奶牛场案例	98
5.4.2 肉牛场案例	102
5.4.3 羊舍饲养案例	104
5.5 养殖场减污降碳协同效应及措施研究小结	105
第六章 内蒙古畜牧业碳排放影响因素实证分析	107
6.1 畜禽养殖碳排放趋势评价及影响因素	107
6.1.1 畜禽养殖碳排放过程及评价	107
6.1.2 畜禽养殖碳排放评价模型	108
6.2 内蒙古农业碳排放时序变化与影响因素	109
6.3 内蒙古农业碳排放的影响因素分析	111
6.4 内蒙古畜牧业碳排放影响因素实证分析	112
6.5 内蒙古畜牧业温室气体减排实例分析	117
6.5.1 伊利集团零碳未来计划模式	117
6.5.2 优然牧业绿色低碳发展模式	125
6.5.3 华颐乐“光伏发电+种草+养羊”空间立体式全产业链模式	126
6.5.4 牧区肉羊夏季放牧+冬季暖舍舍饲模式	129
第七章 内蒙古畜牧业温室气体减排技术路径措施	135
7.1 内蒙古畜牧业温室气体控制措施调研	135
7.2 内蒙古畜牧业温室气体控制措施及效果	136
7.2.1 品种改良	136
7.2.2 精准调控日粮	137
7.2.3 提高畜禽单产水平	139
7.2.4 日粮中添加甲烷抑制剂	140
7.2.5 提高畜禽粪污处理与利用水平	145
7.2.6 合理规划场区建设和配套设施设备	149
7.2.7 应用免疫法	150

7.3 内蒙古畜牧业温室气体控制技术路径措施	153
7.3.1 短期技术措施.....	153
7.3.2 中期技术措施.....	159
7.3.3 长期技术措施.....	162
7.3.4 内蒙古畜牧业甲烷等温室气体减排路径措施总结.....	163
第八章 内蒙古畜牧业温室气体减排管理策略	166
8.1 制定完善甲烷等温室气体减排政策法规	166
8.2 优化养殖管理模式顶层规划设计	166
8.3 推进畜牧业温室气体减排的技术创新	167
8.4 制定畜牧业温室气体减排的市场财税金融政策	168
8.5 加强畜牧业温室气体减排的宣传培训	169
第九章 结 论	170
参考文献	173

摘要

温室气体与气候变化是国际社会广泛关注的焦点，我国秉持人类命运共同体理念，积极参与和引领全球气候治理，提出碳达峰、碳中和“3060”目标。内蒙古深入贯彻落实双碳战略目标政策，印发实施了自治区《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》《碳达峰实施方案》，出台了包括农牧业在内的 17 项分领域分行业实施方案。畜牧业是温室气体排放的主要来源之一，温室气体主要是反刍动物肠道发酵、粪便管理过程产生的甲烷、氧化亚氮等。甲烷具有减排成本低、响应速度快、协同效益明显的特点，减少甲烷排放是应对气候变化的有效手段。所以，作为我国重要的农畜产品生产基地、全国反刍动物生产基地的内蒙古，反刍动物甲烷减排成为内蒙古畜牧业温室气体控制的主要方向。

因此，本项目聚焦奶牛、肉牛、羊三种反刍动物，以规模化养殖场为重点，以现场调研、收资综述为主，辅以实际验证性监测，了解内蒙古畜牧业发展和温室气体排放现状，重点分析肠道发酵甲烷等温室气体排放特征及影响因素，研究粪污处理过程中减污降碳协同效应及协同措施，在此基础上，结合典型案例剖析，提出内蒙古畜牧业温室气体减排策略与路径措施、管理政策建议，为内蒙古畜牧业绿色转型提供支撑。

一、体现三大研究创新点

一是系统梳理了当前内蒙古畜牧业和温室气体排放特征，为后续绿色低碳发展应用提供基础。二是全面、系统开展了内蒙古畜牧业技术减碳路径，减污降碳措施。三是尝试性开展本地化碳排放因子及核算方法，提出了畜牧业低碳发展的策略建议，为政府管理决策提供参考。

二、调研内蒙古碳排放的主要结论

经课题组核算分析，2021 年内蒙古畜牧业温室气体排放总量中，肠道发酵排放二氧化碳当量占比 81.68%，粪便管理排放二氧化碳当量占比 18.32%。其中粪便管理系统中，折合二氧化碳当量甲烷占 4.41%，氧化亚氮因增温潜势高，折合二氧化碳当量占 13.91%。

从不同牲畜的碳排放来看，2021 年内蒙古畜牧业碳排放中，养殖数量最多的羊，二氧化碳排放当量占碳排放总量的比例最高，为 47%，其次是肉牛，占比 32%，奶牛占 14%，猪占 4%，骆驼、马、驴、骡等其他大牲畜占 3%。对肠道发酵甲烷排放、粪便管理甲烷排放、粪便管理的氧化亚氮排放二氧化碳当量占比最高的分别是羊、猪、羊，其次肉牛占比也均较高。

三、提出六个方面十五条甲烷减排技术路径

从品种改良、调控日粮营养、调控饲养管理、调控粪污处理、调控设施设备、甲烷收集利用与碳汇**六个方面**，提出改良遗传性状、选育和推广高繁快长品种、优化日粮饲料原料、调控饲粮营养成分、添加甲烷生成抑制剂、优化养殖场饲养管理技术、草原畜牧业转型升级和优化管理、粪污减排储存技术、粪污高效利用技术、使用可再生能源、使用环保设施设备、建设绿色低碳养殖园区、甲烷收集与利用、碳汇、种养结合与碳肥的 **15 条畜牧业低碳技术路径措施**。

四、提出五项甲烷减排政策建议

一是畜牧业行业深入实施甲烷减排行动，完善政策建议；二是技术创新，实现 CCU、CCUS 技术深度减排；三是顶层规划，优化结构布局；四是完善绿色金融，支持深度脱碳；五是加大宣传，扩大影响。

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 温室气体引起的气候变化给人类生存发展带来危机

自工业革命以来，由于太阳辐射的变化、地球轨道的变化、火山活动、大气与海洋环流变化等自然因素，以及化石能源、砍伐热带森林等人类活动，排放了大量温室气体，造成全球气候变化。能源消费和生产是人为温室气体排放的主要来源之一，约占全球温室气体排放量的 78%（GC，2020）。

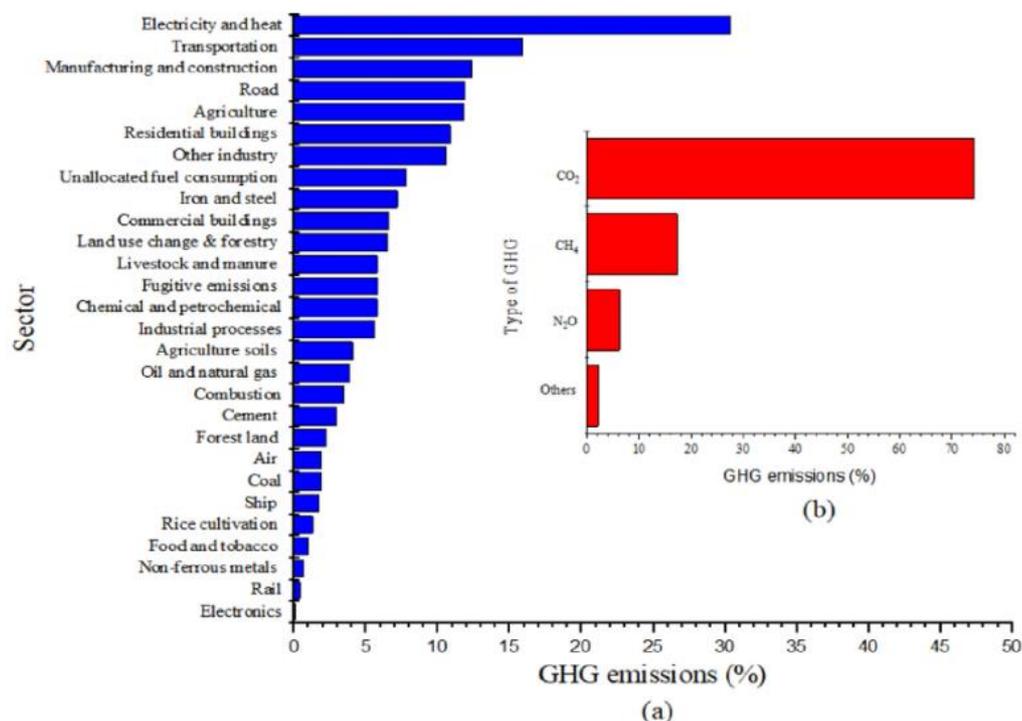


图 1-1 全球温室气体排放量的百分比 (Saad 等, 2022)

根据世界气象组织 (WMO) 全球大气观测计划 (GAW) 站网观测，全球大气中 CO₂ 浓度由有记录以来的 280ppm 增加到 2020 年的 413.2 ppm，较工业化之前增长了 43%，CO₂ 浓度上升到过去 300 万年以来的新高。位于中国青海瓦里关的欧亚大陆唯一的 GAW 全球本底站观测到大气 CO₂ 浓度在 2020 年也达到 414.3 ppm，是自 1990 年我国在瓦里关开始全球大气温室气体观测以来的最高值，表明人类活动排放的温室气体持续在大气中累积。

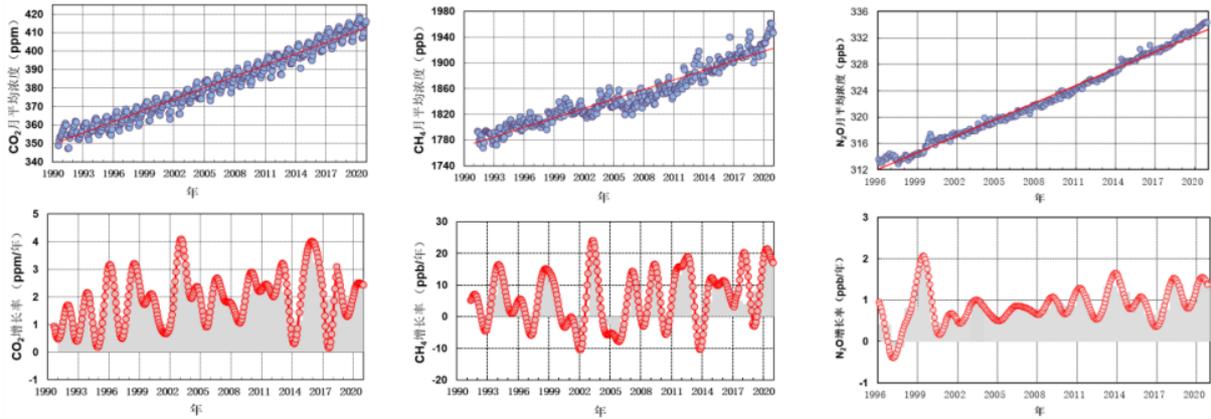


图 1-2 1990 年以来瓦里关站大气 CO₂、CH₄、N₂O 浓度（上图）及其增长率（下图）
（2022 年 9 月中国气象局气候变化中心）

注：蓝点表示月平均值，红线为其线性拟合曲线；红点表示月增长率，灰色柱为增长率年平均

表 1-1 全球和瓦里关站主要温室气体浓度和增量

（2022 年 9 月中国气象局气候变化中心）

	CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	全球	瓦里关	全球	瓦里关	全球	瓦里关
2020 年的年平均浓度	413.2±0.2ppm	414.3±0.2ppm	1889±2ppb	1944±0.7ppb	333.2±0.1ppb	333.8±0.1ppb
2020 年相对于 1750 的百分比	149%		262%		123%	
2020 年相对于 2019 的绝对增量	2.5ppm	2.5ppm	11ppb	17ppb	1.2ppb	1.2ppb
2020 年相对于 2019 的相对增量	0.61%	0.61%	0.59%	0.88%	0.36%	0.36%
过去 10 年的年平均绝对增量	2.40ppm yr ⁻¹	2.43ppm yr ⁻¹	8.0ppb yr ⁻¹	8.5ppb yr ⁻¹	0.99ppb yr ⁻¹	1.02ppb yr ⁻¹

根据《全球逐日二氧化碳排放报告 2023》，受疫情影响，我国及内蒙古地区 2020 年 2 月份 CO₂ 排放量显著下降，而 2022 年各月份整体 CO₂ 排放量呈较平衡现象。2022 年全国日平均 CO₂ 排放量在 23-35 Mt CO₂ 之间，而内蒙古地区日平均 CO₂ 排放量在 1.5-2.2 Mt CO₂ 之间，且三年间的日碳排放量呈升高态势。



图 1-3 2020-2022 年我国及内蒙古地区 CO₂ 排放情况

来源：《全球逐日二氧化碳排放报告 2023》

大气中二氧化碳排放浓度每增加 1ppm 就相当于 78 亿吨二氧化碳排放。二氧化碳排放导致全球平均气温逐步上升，会造成全球气候系统发生了前所未有的变化。气候变化已成为国际各界关注的热点问题之一，也是当今全球面临的重大挑战。

1993 年，世界气象组织发布了首份气候状况报告，敲响了全球气候遭受变化危机的警钟。至今已累计发布了 28 份气候状况报告，连续不断对全球气候状况、变化趋势及其影响进行评估。这些报告明显表现出一个令人吃惊又担忧的问题：人类对气候系统产生了前所未有的影响，地球环境正在发生着一系列影响人类和生物活动的变化，地球已处于“气候临界点”的关键转折期，表现在以变暖为主要特征的大气组成改变、温度显著升高、海平面上升、海冰和冰川融化以及暴雨等。

《中国气候变化蓝皮书（2023）》显示，2022 年全球平均温度较工业化前水平高出 1.13℃，为 1850 年有气象观测记录以来第六高值，2015 年至 2022 年是有气象观测记录以来最暖的八个年份。中国升温速率高于同期全球水平，2022 年中国地表平均气温较常年值偏高 0.92℃。

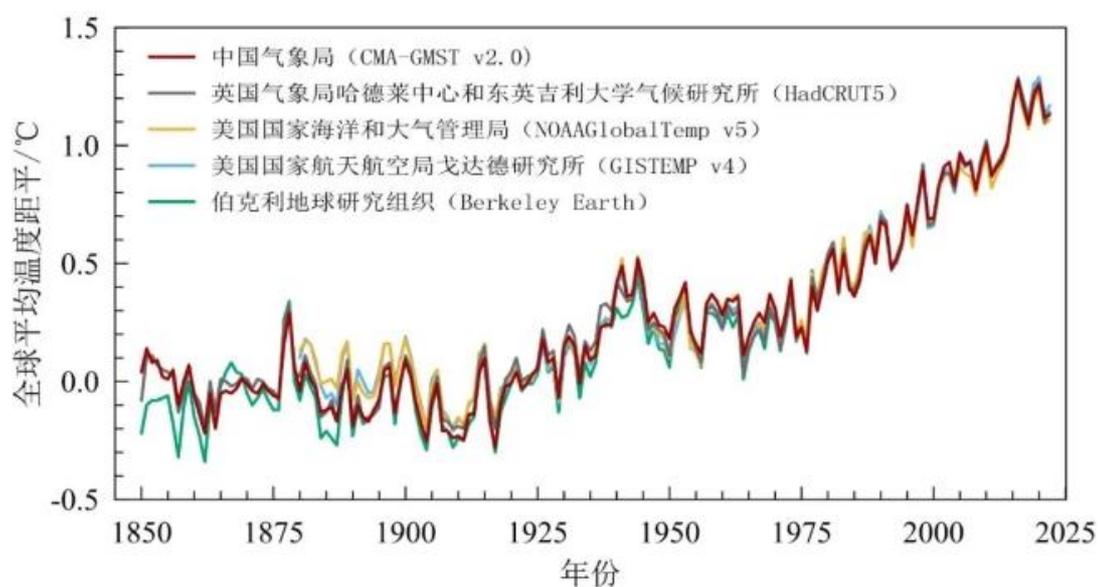


图 1-4 1850~2022 年全球平均温度距平（相对于 1850~1900 年平均值）

资料来源：《中国气候变化蓝皮书（2023）》

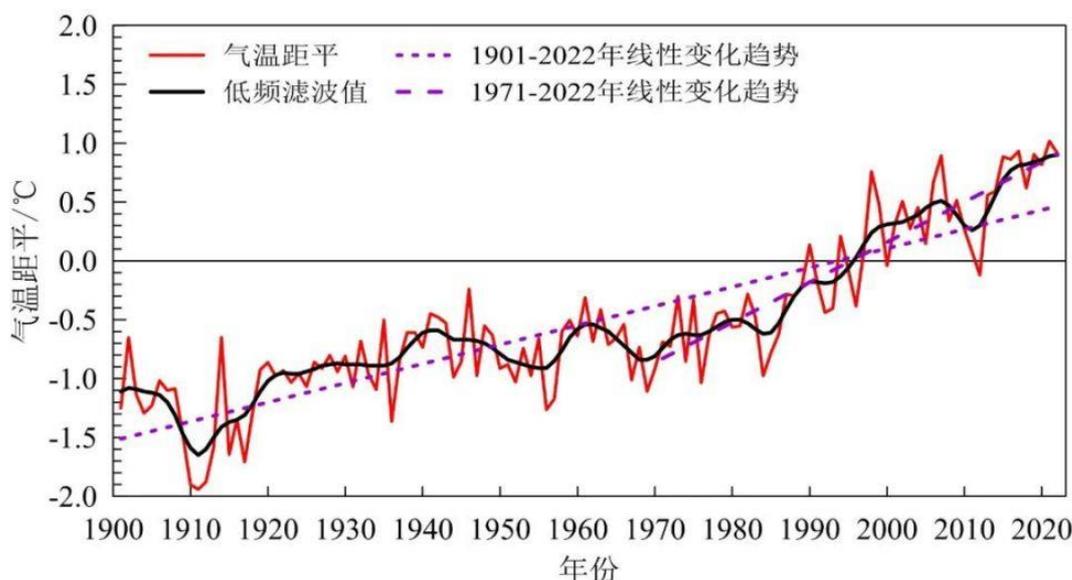


图 1-5 1901~2022 年中国地表年平均气温距平

资料来源：《中国气候变化蓝皮书（2023）》

随着全球气候变暖，气候风险逐渐增加，给人类生存带来危机。极端高温事件频发趋强，极端强降水量事件增多，气候风险指数呈升高趋势，1961—2022 年，中国极端日降水量事件平均每 10 年增多 18 站日，2022 年高温和干旱风险指数均为 1961 年以来最高值。全球海洋变暖显著加速，平均海平面持续上升，2022 年全球平均海平面达到有卫星观测记录以来的最高位。冰川消融退缩加速，冻土退化、地表水资源量年际变化明显，2022 年乌鲁木齐河源 1 号冰川和老虎沟 12 号冰川末端退缩距离均为有观测记录以来的最大值，中国青海湖水位连续 18 年回升，青藏公路沿线 2022 年多年冻土区平均活动层厚度为 256 厘米，是有连续观测记录以来最高值。北极海冰范围 1979—2022 年呈一致下降趋势，南极海冰范围创新低，2022 年 2 月南极海冰范围较常年偏小 27.9%。冰山融化等这些变化，影响了人类赖以生存的淡水来源，直接威胁到低海拔地区的小岛国以及沿海城市的安全。全球气温升高会使沿海地区形成大型台风、飓风、海啸，导致其他自然灾害发生；使内陆地区大面积干旱、火灾频发，影响农业和畜牧业等发展；导致动植物的生长期、地理分布以及物种组成发生重大改变，使生物多样性减少，特别是一些脆弱物种灭绝的风险增大，自然界食物链崩溃；使海洋酸化，大量海洋生物死亡，释放大量温室气体，加速全球变暖，形成恶性循环；一些靠病菌、食物、水传播的传染性病原对气候变化十分敏感，气

气候变化可能造成传染性疾病增加；气温升高会给人类生理机能造成影响，生病几率将越来越大，生理疾病将快速蔓延，甚至滋生出新疾病。

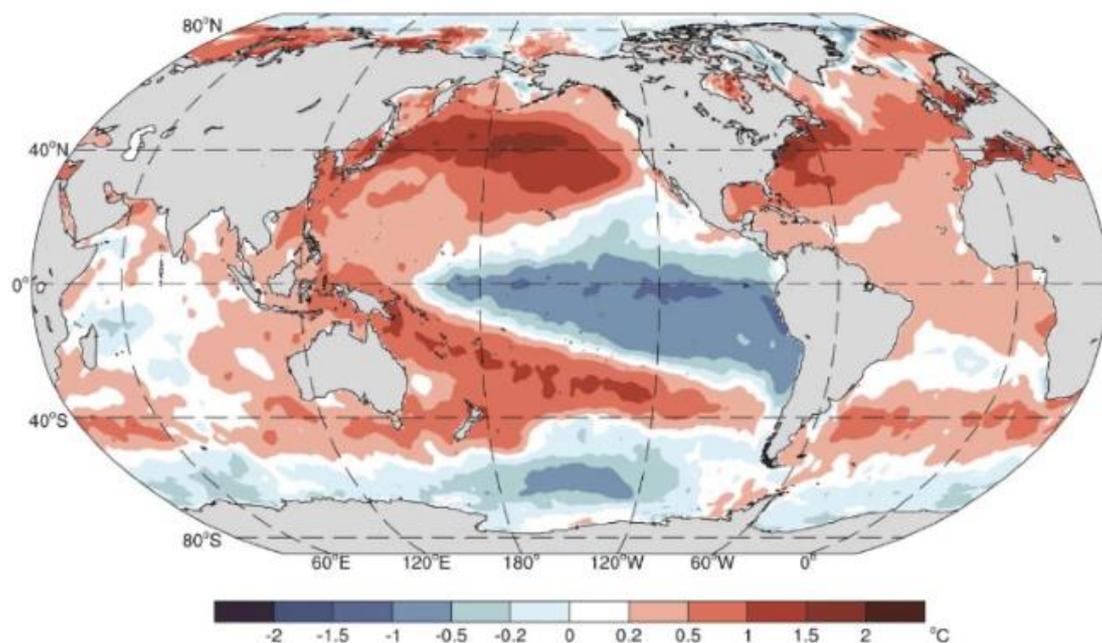


图 1-6 2022 年全球海表温度距平分布

图片来源：IPCC 第六次评估报告综合报告《气候变化 2023》

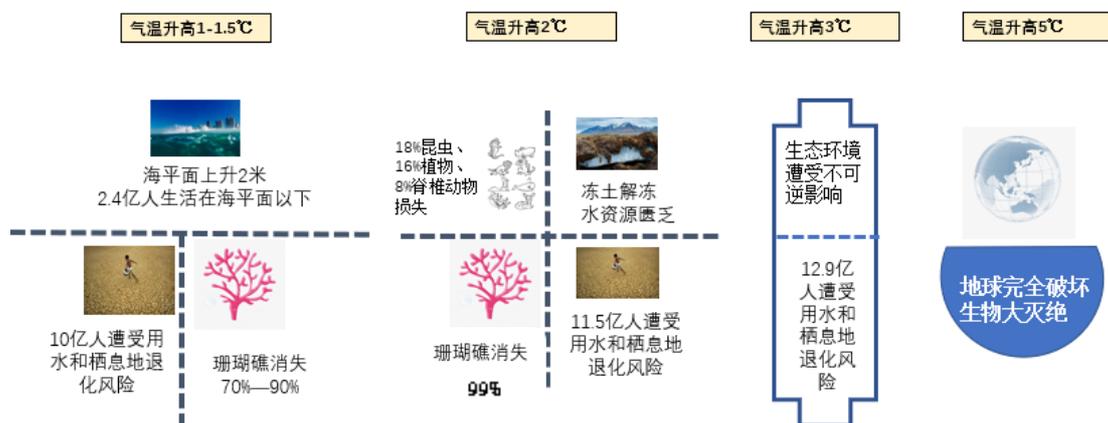


图 1-7 气候变化给人类带来危机示意图

图片来源于：蔡常青等编撰《内蒙古绿色低碳转型发展》，2023 年

综上，气候变化是一场持久、深远、不可逆转的慢性病，它正在广泛影响着全球自然和人类社会，成为威胁世界环境、人类健康和全球经济最危险的因

素之一，如不采取措施控制温室气体，到 21 世纪末，全球气温可能会升高 3.3°C 至 5.7°C（IPCC，2021），自然生态系统和人类生存发展将面临灭顶之灾。

1.1.2 甲烷等非二氧化碳温室气体对气候变化的贡献不容忽视

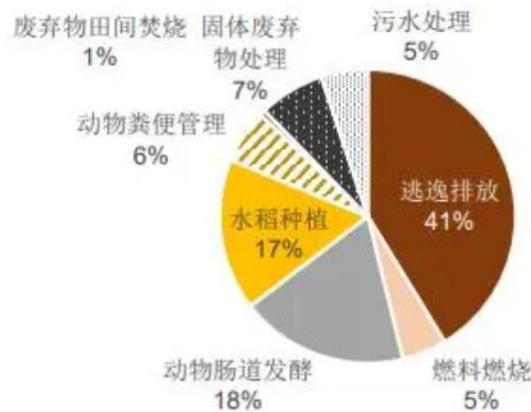
温室气体（GHG，Greenhouse Gas）是指任何会吸收和释放红外线辐射并存在大气中的气体。根据《京都议定书》界定，温室气体主要包括二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）和六氟化硫（SF₆）。《京都议定书多哈修正案》将三氟化氮纳入管控范围，使受管控的温室气体达到 7 种。除二氧化碳外的其他温室气体统称为非二氧化碳温室气体。非二氧化碳温室气体因增温潜势大越来越受到关注，成为减缓气候变化的新焦点。

甲烷是仅次于二氧化碳的第二大温室气体，是非二氧化碳温室气体中对温室效应贡献最大的。甲烷的人为排放源主要包括煤炭开采、石油和天然气泄漏、水稻种植、反刍动物消化、动物粪便管理、燃料燃烧、垃圾填埋、污水处理等。在过去的两个多世纪，大气中的甲烷浓度增加了两倍多，其中人为源甲烷排放的大幅增加是主要成因。2022 年全球甲烷排放量 35580.13 万吨，甲烷最大排放源为农业活动，占比 39.90%，其次能源活动排放量占比 37.48%。甲烷在我国温室气体排放总体构成中占有重要地位。《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》显示，2014 年我国甲烷排放量已经高达 5529 万吨，排放结构中逃逸排放最高占比 41%，其次动物肠道发酵占比 18%，动物粪便管理占比 6%。2022 年我国甲烷排放量 5567.61 万吨，占全球比重为 15.65%。最大甲烷排放源为能源活动，占比 45.57%；农业活动排放 1850.19 万吨，占比 33.23%；废弃物处理排放占比 18.27%。与 2014 年相比，我国甲烷排放总量和行业排放结构相差不大。



数据来源：EDGAR (2020)

图 1-8 我国甲烷排放量变化



数据来源：中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告 (2018)

图 1-9 我国甲烷排放结构 (2014 年)

甲烷是一种“强效温室气体”，具有增温潜势高、寿命短的特点，对全球气候变化贡献大。甲烷比二氧化碳在大气中更加活跃，属于痕量气体，其排放量的微小增加将会导致大气中甲烷浓度的明显升高。联合国世界气象组织 (WMO) 在其第 19 份年度温室气体公报中表示，大气中的甲烷是导致气候变化的第二大因素，其对变暖的影响比二氧化碳大得多。根据政府间气候变化专门委员会 (以下简称 IPCC) 的第五次评估报告，甲烷 20 年水平的全球增温潜势 (或称暖化效应) 是二氧化碳的 84 倍，100 年水平则是二氧化碳的 28 倍。IPCC 第六次评估报告指出，在百年尺度下甲烷的全球增温潜势是二氧化碳的 27.9 倍，二十年尺度下为 81.2 倍。甲烷对当前经历的全球变暖的贡献率高达四分之一，仅

次于二氧化碳。IPCC 第五次评估报告指出，非二氧化碳温室气体（尤其是甲烷）的深度减排是将全球平均升温控制在 1.5° C 以下的必要条件，IPCC 第六次评估报告又指出，要实现《巴黎协定》目标，全球需在 2030 年大幅削减甲烷排放水平。

甲烷还是“空气污染的帮凶”，大气中甲烷浓度增加还会影响空气质量。甲烷影响对流层大气氧化性能，大气中 90%的甲烷被羟基自由基氧化，促发大气臭氧生成。大气对流层臭氧浓度升高，不仅危害人体健康，影响植物和农作物生长，而且会诱发光化学烟雾。

然而，甲烷也是优质气体燃料，被回收后可以作为清洁能源利用；甲烷也是制造合成气和许多化工产品的重要原料。

因而，控制甲烷的排放，不仅具有减缓短期气候升温速度带来的气候效益，协同控制空气污染的环境效益，还具有提早收获天然气作为替代燃料和工业原料所产生的经济效益。而且由于甲烷在大气中的寿命只有 12 年左右，大气中甲烷浓度可以相对迅速地对甲烷减排活动做出响应。所以，减少甲烷排放是二氧化碳减排的重要补充，也是短期内减缓气候变暖速度的最直接和有效的途径，且减排协同效益明显，对实现双碳目标和空气质量改善目标的意义重大。

1.1.3 国际社会积极做出甲烷减排承诺并采取务实行动计划

各国积极关注甲烷减排。近年来，国际社会对全球甲烷减排的关注程度明显增强，越来越多的国家正在将其转化为国家战略。欧美发达国家已经出台多项专门性的甲烷减排战略或油气行业甲烷减排等专门性的行动计划，并不断更新相关减排目标。美国自上世纪 90 年代起陆续发布《甲烷减排战略》《甲烷减排行动方案计划》，发起了天然气和农业之星自愿减排行动，制修订油气和废弃物排放标准，实施强制的企业温室气体排放报告制度。加拿大和墨西哥在 2018 年已将控制油气行业甲烷排放纳入实现本国国家自主贡献中的甲烷减排承诺。美国乳制品行业承诺到 2050 年实现温室气体净零排放的目标。爱尔兰政府也在其《2019 年气候行动计划》中设定了到 2030 年将农业温室气体排放量比预计的 2030 年减少 10%至 15%的目标（Frank, 2021）。

欧盟大力推进退煤政策，不断推动甲烷排放的监测、核算和报告，2020 年发布《欧盟甲烷减排战略》，明确了在欧盟和国际范围内减少甲烷排放的措施，

重点覆盖能源、农业和废弃物处理行业，其中特别提出“欧盟与中日韩三国建立买家联盟，推动建立国际甲烷 MRV（即监测、报告与核查）标准”。2023 年欧盟通过了关于减少能源部门甲烷排放的法规，强制石油和天然气企业 MRV，开展泄漏检测与修复，并考虑禁止甲烷放空及火炬点燃。联合国环境署和欧委会正加快推进独立的国际甲烷排放观测站的规划，以监控全球范围内甲烷排放或泄漏情况。此外，2021 年美欧还发起了“全球甲烷承诺”，承诺到 2030 年全球甲烷排放量较 2020 年集体减排 30%，并于 2022 年 11 月召开年度部长级会议审查承诺进展。

根据美国和欧盟提交给《联合国气候变化框架公约》秘书处的温室气体清单，2021 年美国 and 欧盟甲烷排放量分别较 1990 年下降约 14%和 37%，发达国家 2020 年甲烷排放量较 1990 年总体下降 29%。

自 2021 年第 26 届联合国气候变化大会（COP26）以来，全球 156 个国家和地区签署“全球甲烷承诺”，共同承诺到 2030 年将全球甲烷排放量控制在 2020 年的基础上减少至少 30%。

我国高度重视甲烷控排工作。早在 2007 年我国制定了《中国应对气候变化国家方案》，提出降低畜产品的甲烷排放强度，明确“努力控制甲烷排放增长速度”等目标。国务院发布的“十二五”“十三五”的控制温室气体排放工作方案中均提出控制甲烷等非二氧化碳温室气体相关措施，“十四五”规划首次将控制甲烷排放写入五年规划。2021 年，生态环境部发布的《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》提出，在重点排放点源层面试点开展石油天然气、煤炭开采等重点行业甲烷排放监测，在区域层面，探索大尺度区域甲烷等非二氧化碳温室气体排放监测；同年印发的《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《中共中央、国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》等文件，均提出要加强甲烷等非二氧化碳温室气体管控。各行业层面也开展了一系列行动，发布煤矿瓦斯排放限值标准，出台补贴政策鼓励煤矿瓦斯回收利用，成立“中国油气企业甲烷控排联盟”，推进畜禽养殖废弃物资源化利用，加快垃圾焚烧处置大规模代替填埋等，并取得了积极的成效。

2019 年以来，习近平主席在多个重大国际场合表示中国将加强甲烷等非二氧化碳温室气体管控，相关应对气候变化负责人也在不同会议场合对甲烷控制

具体计划进行阐述。2019年6月，在全国低碳日活动中首次召开了甲烷减排与监测专题研讨会，生态环境部应对气候变化司副司长蒋兆理在会上表示，有效控制甲烷排放对协同控制空气污染和应对气候变化具有重要的作用，以甲烷为主的非二氧化碳控制将作为生态环境部应对气候变化司的工作重点，未来两到三年是推动甲烷减排工作的关键年份。12月，在第二十五届联合国气候大会上，中国政府在中国角举办“非二氧化碳温室气体排放控制国际经验与中国实践”边会，中国代表团团长、生态环境部副部长赵英民首次在国际场合阐述控制包括甲烷在内的非二氧化碳温室气体的重要意义。“2020中国甲烷论坛”上，生态环境部应对气候变化司司长李高表示，中国将更好地利用市场机制进一步推动甲烷的减排工作；2021年4月习近平主席出席领导人气候峰会，再次提出中国将加强对非二氧化碳排放的管控。11月生态环境部发布了《中美关于在21世纪20年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》，中美计划聚焦强化甲烷测量和减排具体事宜，中方计划在其近期通报的国家自主贡献之外，制定一份全面、有力度的甲烷国家行动计划，几天后，生态环境部应对气候变化司副司长陆新明在生态环境部例行新闻发布会上详细阐述我国甲烷行动计划的五个方面的安排和打算。最终在2023年11月，生态环境部等11部门联合发布《甲烷排放控制行动方案》，是我国第一份全面、专门的甲烷排放控制政策性文件，是对未来一段时期我国甲烷排放控制工作的顶层设计和系统部署，对进一步控制甲烷排放具有重要指导意义，是我国积极应对气候变化的自主行动，也是对全球气候治理的积极贡献。

表 1-2 我国甲烷控制相关政策

时间	相关政策
2007年6月	制定《中国应对气候变化国家方案》，提出降低畜产品的甲烷排放强度，以及控制甲烷排放的其他相关要求。
2008年4月	原国家质量监督检验检疫总局同原环境保护部共同发布并实施《煤层气（煤矿瓦斯）排放标准》，对煤层气行业提出部分有关于甲烷排放的参考性指导和浓度标准。
2012年3月	发布《石油天然气开采业污染防治技术政策》，对油气行业提出部分有关于甲烷排放的参考性指导和浓度标准。
2012年1月	国务院印发《“十二五”控制温室气体排放工作方案》，通过改良作物品种、改进种植技术，努力控制农业领域温室气体排放；加强畜牧业和城市废弃物处理和综合利用，控制甲烷等温室气体排放增长。

时间	相关政策
2016年10月	国务院发布《“十三五”控制温室气体排放工作方案》，进一步明确要控制农田甲烷排放，开展垃圾填埋场、污水处理厂甲烷收集利用及与常规污染物协同处理工作。
2017年2月	国家发改委与农业部联合印发《全国农村沼气发展“十三五”规划》，解决大规模畜禽养殖场粪污处理和甲烷资源化利用问题。
2019年6月	全国低碳日活动中首次召开了甲烷减排与监测专题研讨会。生态环境部应对气候变化司副司长蒋兆理在会上表示，有效控制甲烷排放对协同控制空气污染和应对气候变化具有重要的作用，以甲烷为主的非二氧化碳控制将作为生态环境部应对气候变化司的工作重点，未来的两到三年是推动甲烷减排工作的关键年份。
2019年10月	生态环境部发布“关于进一步加强石油天然气行业环境影响评价管理的通知”，提出加强油气行业甲烷及挥发性有机物的泄漏检测。
2019年12月	在第二十五届联合国气候大会上，中国政府在中国角举办“非二氧化碳温室气体排放控制国际经验与中国实践”边会。中国代表团团长、生态环境部副部长赵英民表示，非二氧化碳温室气体具有减排成本低、响应速度快、协同效益明显的特点，减少甲烷排放是控制气候变化的有效手段。这是中国气候变化负责人首次在国际场合阐述控制包括甲烷在内的非二氧化碳温室气体的重要意义。
2020年1月	“2020中国甲烷论坛”在北京召开，生态环境部应对气候变化司司长李高在会上表示，中国非常重视甲烷的减排和利用工作。“十四五”是我国控制温室气体排放的关键期，中国将进一步加强包括甲烷在内的非二氧化碳温室气体排放控制，更好地利用市场机制进一步推动甲烷的减排工作。
2020年11月	生态环境部、国家发展和改革委员会、国家能源局联合发布了《关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知》，首次提出煤炭资源开发中对温室气体排放的管控。通知提出，“提高煤矿瓦斯利用率，控制温室气体排放……甲烷体积浓度大于等于8%的抽采瓦斯，在确保安全的前提下，应进行综合利用。鼓励对甲烷体积浓度在2%（含）至8%的抽采瓦斯以及乏风瓦斯，探索开展综合利用”。
2021年1月	生态环境部发布《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》，指出要在重点排放点源层面试点开展石油天然气、煤炭开采等重点行业甲烷排放监测；在区域层面，探索大尺度区域甲烷等非二氧化碳温室气体排放监测。
2021年3月	首次将控制甲烷排放写入五年规划。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出，要加大甲烷等其他温室气体管控力度，“十四五”期间，中国将采取进一步的措施，结合相关规划和政策的制定和落实，推动开展中国控制甲烷排放行动。
2021年4月22日	习近平主席出席领导人气候峰会时提出，中国将加强对非二氧化碳排放

时间	相关政策
	的管控。
2021年10月	《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》提出加强甲烷等非二氧化碳温室气体管控。
2021年11月	《中共中央、国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》提出加强甲烷等非二氧化碳温室气体排放管控。
2021年11月11日	中华人民共和国生态环境部发布了《中美关于在21世纪20年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》，提到中美双方认为加大行动控制和减少甲烷排放是21世纪20年代的必要事项。中美计划在2022年上半年共同召开会议，聚焦强化甲烷测量和减排具体事宜，包括通过标准减少来自化石能源和废弃物行业的甲烷排放，以及通过激励措施和项目减少农业甲烷排放。中方计划在其近期通报的国家自主贡献之外，制定一份全面、有力度的甲烷国家行动计划，争取在21世纪20年代取得控制和减少甲烷排放的显著效果。
2021年11月25日	生态环境部应对气候变化司副司长陆新明在生态环境部例行新闻发布会上表示，目前我国甲烷行动计划主要有五个方面的安排和打算：一是开展甲烷排放控制研究；二是推动出台中国甲烷排放控制行动方案；三是加强重点领域甲烷排放的监测、核算、报告和核查体系建设；四是鼓励先行先试；五是加强国际合作。
2022年1月	发改委和能源局发布《“十四五”现代能源体系规划》，指出要加大油气田甲烷采收利用力度，推进化石能源减排。
2023年11月	生态环境部等11部门联合发布的《甲烷排放控制行动方案》是国第一份全面、专门的甲烷排放控制政策性文件，是对未来一段时期我国甲烷排放控制工作的顶层设计和系统部署，对进一步控制甲烷排放具有重要指导意义。

1.1.4 控制畜牧业甲烷排放是内蒙古温室气体减排的重要途径

畜牧业温室气体减排是绿色低碳转型的重要内容。畜牧业是导致温室气体排放的主要来源之一，其中反刍动物每年排放1亿吨CH₄，约占年排放总量的20%（Uriel et al., 2022）。预计到2050年，全球对畜产品的需求量将会翻一番（FAO, 2009），而反刍动物肠道甲烷排放量将以每年0.9%-5%的速度增长（刁其玉, 2023）。因此，探索绿色低碳的畜牧业管理方式，减少畜牧业温室气体排放，对经济社会绿色低碳转型和应对气候变化具有重要的现实意义。

反刍动物的CH₄产量受肠道发酵的影响，具体取决于饮食（谷物和饲料）、饲料的消化率、先前的加工和饲喂频率。自1990年以来，美国乳制品行业的直接温室气体排放总量不断增加，其中肠道CH₄排放量增加了11%，粪便CH₄排放

量增加了119%，粪便 N_2O 排放量增加了16%（美国EPA，2021b）。据估计，美国奶牛生产约占9900万至1.72亿吨二氧化碳当量，约占美国温室气体年排放量的1.9%至2.5%（Capper和Cady，2020；Rotz等，2021；Uddin等，2022）；新西兰2018年的农业排放占总排放量的48%（新西兰环境部，2020）；爱尔兰2019年农业排放占温室气体排放总量的35.3%（EPA，2021）；澳大利亚牲畜排放量约占直接排放量的10%（Henry等，2021）；巴西2016年牲畜肠道发酵和粪便管理产生的直接排放量占全国排放量的20.8%，占农业排放量的62%（巴西科学部，2021）。

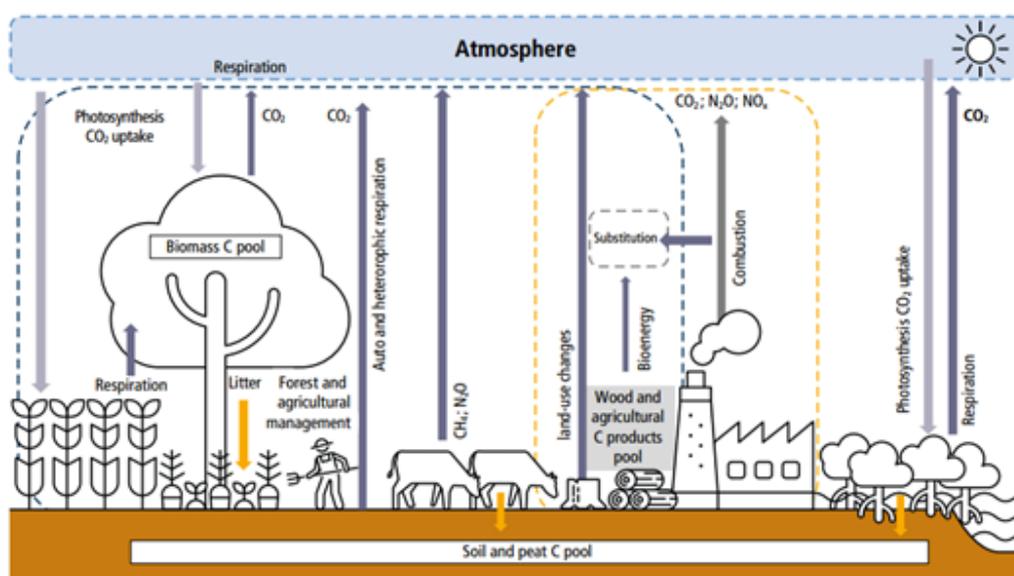


图 1-6 畜牧业与温室气体排放示意图

来源：气候变化 2022，IPCC

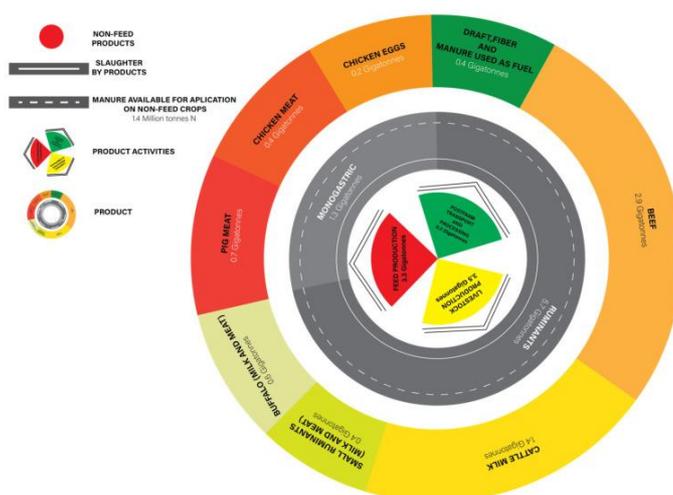


图 1-10 供应链、生产活动和产品的全球牲畜排放情况（Sari NF 等，2022）

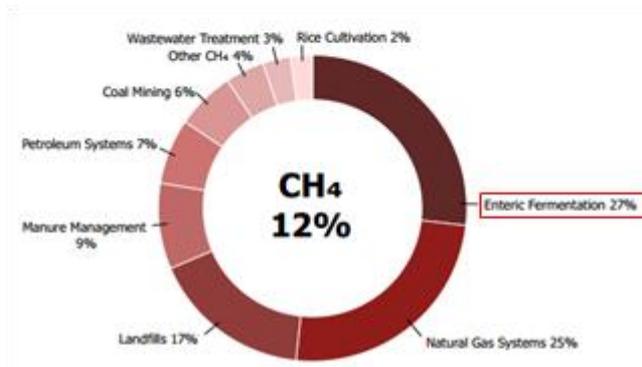
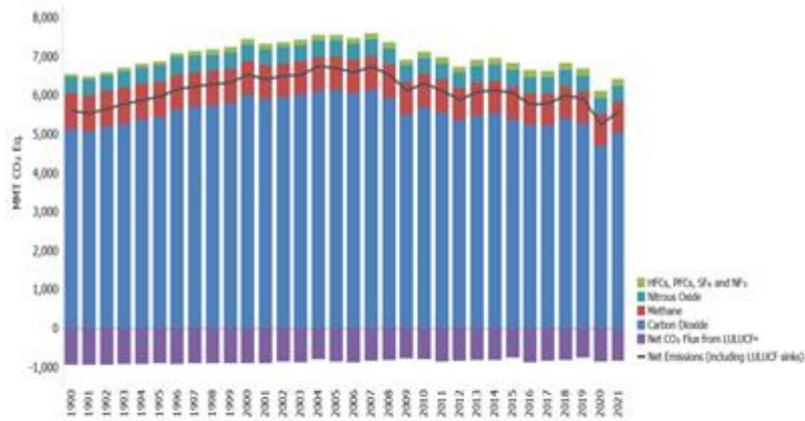


图 1-11 美国 2021 年温室气体排放与甲烷排放来源

数据来源：美国环保署

我国为贯彻落实碳达峰碳中和重大决策部署，推进经济社会发展绿色低碳转型，制定实施了一系列标准框架和政策体系，覆盖了包括农牧业在内的重点行业和领域。2011年国家出台包括畜牧业在内的农业等五个领域的省级温室气体清单编制指南。2021年，农业农村部农业生态与资源保护总站发布了农业农村减排固碳十大技术模式，这是我国首次以减排固碳为主题发布的农业农村领域相关技术模式。2022年，农业农村部、国家发展改革委联合印发了《农业农村减排固碳实施方案》，推进农业农村绿色低碳发展，且在“畜禽低碳减排行动”和“监测体系建设行动”中，提出降低单位畜禽产品肠道甲烷排放强度、提高畜禽粪污处理水平、降低畜禽粪污管理的甲烷和氧化亚氮排放、开展甲烷、氧化亚氮排放监测等内容。同年，生态环境部等七部门联合印发了《减污降碳协同增效实施方案》，对重点行业减污降碳协同控制提出要求，作为碳达峰、碳中和政策体系的重要组成部分。

对畜牧业温室气体排放的相关研究，近年来国内外越来越多的专家学者和科研机构开始注重并做了一些开创性研究，取得一些理论和实证研究成果。我国已利用 GreenFeed 系统探明了荷斯坦泌乳牛及干奶牛的甲烷排放特征，对荷斯坦及娟珊泌乳牛的甲烷减排的营养调控措施做了研究（贾鹏等，2020）。陈瑶等（2016）运用数据包络分析方法（DEA）对我国各区域畜牧业温室气体排放效率进行分析，发现经济发展水平和自然条件是影响我国畜牧业生产效率的主要因素。刘宇新等（2023）通过 STIRPAT 模型分析江西省养殖业温室气体排放变化。张李康（2022）采用 Tapio 脱钩模型探究了新疆农业源温室气体脱钩特征，运用 Kaya 模型和 LMDI 分解法对新疆农业源温室气体排放进行了影响因素分析，新疆 2019 年动物肠道发酵和粪便管理温室气体排放量占农业排放总量的比例分别为 60.1% 和 8.62%。我国畜牧业温室气体排放效率，畜牧业中部发达地区效率水平最高，东部其次，西部地区畜牧业产值在当地大农业产值中占比较大，但经济技术水平较低，是温室气体排放效率的主要制约因素。大力发展规模养殖、科学养殖、清洁养殖是提高畜牧业温室气体排放效率，推进低碳可持续畜牧业发展的主要途径。

内蒙古畜牧业温室气体减排研究意义重大。内蒙古是我国重要的农畜产品生产基地，是全国反刍动物生产基地，草原畜牧业既是一大优势产业，也是一大支柱产业，家畜牲畜存栏量连续13年超过1亿头/只，牛奶、羊肉、羊绒等畜产品产量均居全国首位，牛肉产量位居全国第三。全区每年稳定向外调出500万吨牛奶和150万吨肉类，全国1/4的羊肉、1/5的牛奶均来自内蒙古，是名副其实的“肉库奶罐”。2022年，内蒙古畜牧业产值占全国畜牧业总产值的4.9%，羊饲养业产值占全国羊饲养总产值的20.3%，在各省（区）中排名高居第一。

畜牧业作为利国利民的大产业，在 2018 年《内蒙古关于实施乡村振兴战略的意见》中被指定为重点发展的现代畜牧业和优势区域畜牧业，可有效促进我国藏粮于民，藏粮于技，保证国家食物安全，增加农民收入，促进三产融合，对实现农牧业和农村牧区经济高质量发展具有长远的、重大的战略意义。党的十八大以来，随着草原生态保护投入力度和监管力度不断加大，国家自上而下推出政策组合，将生态优先作为内蒙古牛羊产业发展的基本约束条件，促进牛羊产业的健康发展。所以，内蒙古牛羊产业的发展，是国家对内蒙古提出的走好生态优先、绿色发展为导向的新路子，全面实行农牧业产业高质量发展的代

表性典范。内蒙古牛羊产业的良性发展保障了牛羊肉、皮革、奶制品等畜产品的稳定供给，对于保障社会稳定，推动社会和谐具有重要作用。

因此，内蒙古畜牧业特别是牛羊产业的良性健康发展，对于祖国北疆社会稳定、人民生活安定幸福，是内蒙古筑牢国家农畜产品生产基地、我国北方重要生态安全屏障、祖国北疆安全稳定屏障的重要基础。

然而，畜牧业温室气体排放与畜牧业发展之间存在矛盾关系，焦点在于畜牧业温室气体排放强度（畜牧业温室气体排放量与畜牧业产值之比），即需要创造单位畜牧业产值的过程中排放尽可能少的温室气体。所以，畜牧业温室气体排放和减排技术越来越受到关注，成为内蒙古温室气体减排、畜牧业高质量发展的重要途径。



甲烷减控是内蒙古畜牧业温室气体减排的主攻方向。畜牧业温室气体主要来源于反刍动物肠道发酵、动物粪污管理，全球畜禽养殖业产生的甲烷有96%以上来源于牛羊等反刍动物，反刍动物消耗饲料能量的12%用在甲烷的合成过程。反刍动物释放的温室气体中80%以上是甲烷气体，还有少量的氧化亚氮。内蒙古主要畜种是奶牛、肉牛和羊，牛、羊养殖数量占总牲畜存栏量的90.7%。因此，牛、羊等反刍动物肠道发酵、粪污管理甲烷减排成为内蒙古畜牧业温室气体控制的主要方向。

然而，目前内蒙古在畜牧业甲烷减控方面的研究尚未全面开展，存在如下问题：一是当前内蒙古地区还没有一份详细的、针对不同排放源的畜牧业源温室气体排放清单，对全区畜牧业源温室气体排放现状尚不明确。二是畜牧业温室气体排放清单中排放因子本地化特色不明显，理论核算不能准确反映内蒙古畜牧业温室气体产生情况。三是内蒙古家畜品种繁多，饲养方式多样、东西部差异大，在碳排放核算、减碳对策方面具有很多的片面性。四是缺乏具体可操作的甲烷减排措施和路径。

综上，绿色低碳转型是实现碳达峰碳中和目标的重要内容，转型的关键在于各行业领域的温室气体减排技术路径与策略上。本课题聚焦奶牛、肉牛、羊三种反刍动物，研究内蒙古畜牧业温室气体减排策略与路径，调研分析内蒙古畜牧业温室气体排放情况的基础上，深入研究不同饲养方式、粪污管理模式牛羊反刍动物以甲烷为主的温室气体排放特征，有针对性地提出甲烷等温室气体减排技术路径、减污降碳协同措施和政策建议，对内蒙古畜牧业高质量发展、实现双碳目标与应对气候变化具有重要意义。

1.2 研究方法与技术路线

本课题采用实地调研、文献查阅、统计数据、模型计算、对标研究、专家咨询等方法开展。

1.2.1 典型养殖场、牧户调查和相关单位走访

广泛搜集相关的国内外文献资料、畜牧业年鉴、统计年鉴，通过比较分析和归纳分析，对国内外的畜牧业的发展状况和相关研究成果进行比较全面的了解；通过数据收集和整理，探寻内蒙古畜牧业发展、饲喂方式、粪污处理以及温室气体排放现状，对温室气体排放量、排放因子以及排放规律进行分析。

组织了3次集中调研，10次分组调研，涉及10个盟市35个规模化养殖场和31个家庭牧场和牧户、5个地方科研院所及农牧业、生态环境等相关厅局单位。实地走访调查典型代表性地区的畜牧业状况，包括典型养殖场中饲养动物种类及品种、饲养量、饲养方式、饲草料特点、粪便处理方式等，对甲烷等温室气体的排放进行摸底调查，对不同草原类型区典型养殖场温室气体减排技术、方法进行调研。

表 1-3 实地调研养殖场和牧户名录

盟市	旗县	养殖场（户）
巴彦淖尔市	乌拉特中旗	乌拉特中旗褐草生物科技有限公司 内蒙古北平纺织有限责任公司 德日素戈壁羊专业合作社 温更薛金贵种养合作社 川井苏木蒙古马养殖基地 家庭牧场 20 个

盟市	旗县	养殖场（户）
	乌拉特前旗	内蒙古高能牧草公司 青松草业公司
	五原县	内蒙古金草原公司 内蒙古春满园科技公司 巴美养殖基地
	临河区	内蒙古富川饲料科技股份有限公司 内蒙古草原宏宝羊业 棋盘井肉羊养殖园区
鄂尔多斯市	杭锦旗	北羊牧业科技公司
包头市	达茂旗	内蒙古蒙源科技集团有限公司
呼和浩特市	和林格尔县	内蒙古盛健生物科技有限责任公司 内蒙古华颐乐奶山羊养殖场
	土左旗	内蒙古伊利集团奶牛养殖场 内蒙古悠然牧业有限责任公司哈沙图牧场
	赛罕区	呼和浩特金河优然牧业有限公司
乌兰察布市	四子王旗	四子王旗现代肉羊养殖示范场 内蒙古赛诺种羊科技有限公司 四子王旗格日勒图雅合作社 内蒙古希牧泰科技有限公司
	丰镇市	丰镇丰隆肉牛养殖场
锡林郭勒盟	苏尼特右旗	苏尼特羊种羊场 3个养殖户
	阿巴嘎旗	额尔敦肉业
	锡林浩特市	养殖户布仁吉日嘎拉家庭牧场等5个
通辽市	开发区	蒙鑫羊业养殖专业合作社
赤峰市	克旗	内蒙古草原金峰牧业公司
兴安盟	扎赉特旗	内蒙古杜美牧业生物科技有限公司 10万只肉羊养殖园区 牧户3个
呼伦贝尔市	牙克石市	特泥河农牧场有限公司
	呼伦贝尔	谢尔塔拉农牧场有限公司
	呼伦贝尔	哈达图农牧场公司

1.2.2 数据处理与统计分析

数据处理采用定量与定性相结合的方法。运用理论分析、碳排放增长分析、时间与空间分析相结合等方法对内蒙古畜牧业发展与温室气体控制情况进行定性描述；运用 LMDI、相关性分析、回归分析等方法对不同情境下甲烷排放特征进行量化分析研究。

1.2.3 研究内容概述与技术路线

本课题聚焦内蒙古畜牧业，着眼于牛羊反刍动物，从当前碳排放现状分析入手，紧密结合以甲烷为主的温室气体减排技术需求，从营养饲喂到粪污管理的养殖周期全过程角度，研究内蒙古畜牧业温室气体减排技术路径和策略。

首先通过资料收集和趋势分析法，了解内蒙古畜牧业温室气体排放规律和发展趋势。其次重点研究不同饲养方式反刍动物甲烷排放特征、养殖场减污降碳协同效应，设计适合内蒙古经济技术发展水平和畜牧业发展特点的碳减排技术路径措施。在此过程中，尝试校核内蒙古畜牧业甲烷本地化排放因子及核算模型，总结建立一套适合内蒙古本地化实际的甲烷测试方法。最后提出内蒙古畜牧业绿色低碳发展的保障机制和制度创新建议。

技术路线示意图如下：

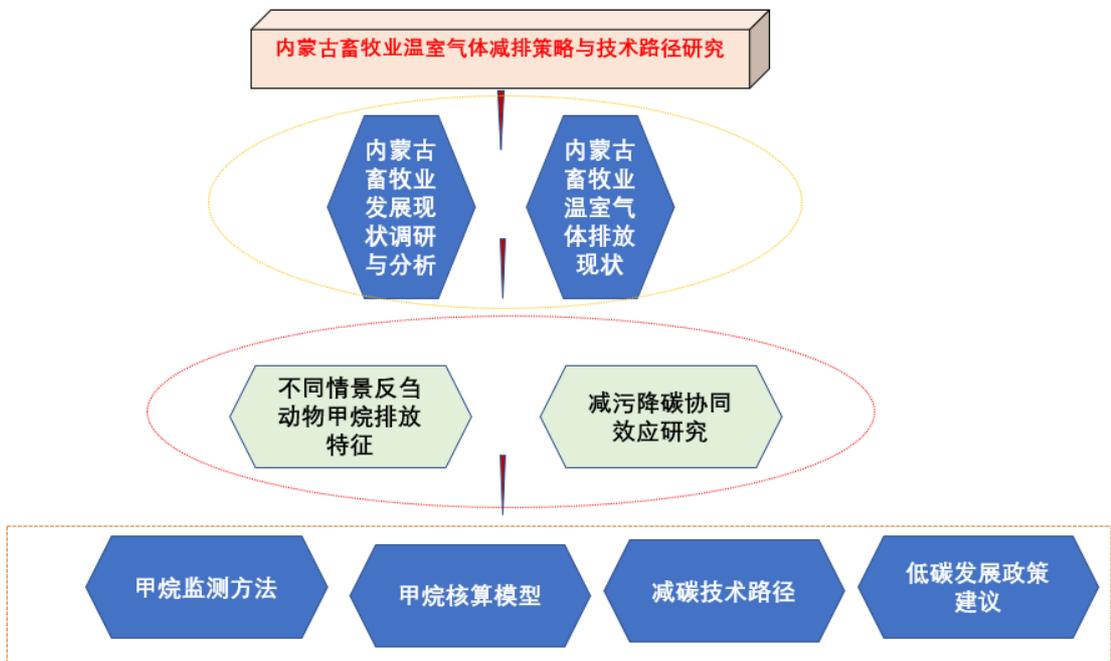


图 1-12 课题研究技术路线示意图

第二章 内蒙古畜牧业温室气体排放现状

2.1 内蒙古畜牧业发展现状

2.1.1 畜牧业发展政策不断完善

内蒙古位于我国最北端，由东北向西南斜伸，呈狭长形。东起东经 126°04'，西至东经 97°12'，南起北纬 37°24'，北至北纬 53°23'，全区总面积 118.3 万 km²，占中国总国土面积的 12.3%，是中国第三大省区。气候以温带大陆性季风气候为主，年平均气温 0℃~8℃。辽阔的地域和温差带，内蒙古牧草种类丰富，是我国最主要的畜牧生产区域之一。在中国畜牧业中占有重要地位，为中国畜牧业的长足发展做出了卓越贡献，产能贡献不断增高，产业影响大大提高，良种工程受到重视，技术创新不断改进，碳减排前景持续向好。

党和国家始终关心并支持内蒙古牛羊等畜牧业产业发展，畜牧业发展政策不断完善。随着内蒙古农牧业生产要素体制改革、公共服务支持、产业化政策支持等产业政策的革新，畜牧业也形成了一整套产业政策组合，包括产业扶持政策、产业规制政策、结构调整政策、生态奖补政策与公共服务政策等五大类别，每一大类政策又包含的若干子政策。牛羊产业政策是一个自上而下的政策制定与实施体系，涉及中央和地方多个层面的施政主体，生产、流通、加工屠宰、科研等环节构成了牛羊产业政策的实施客体，现有的牛羊产业政策由于增加了决策监督与反馈控制单元，为政策调整提供了途径。

1988 年农业部提出建设“菜篮子工程”奠定了内蒙古畜牧业在中国的地位，在 1998 年以后，内蒙古畜牧业发展的结构性、地区不平衡问题突出，对畜牧业的结构进行调整成为大势所趋。2012 年以后，随着生态文明建设摆在了突出位置，推动内蒙古畜牧业生态健康发展。走出了以质量与数量并重，生态健康发展为核心的发展之路。通过实行“禁牧”“休牧”“轮牧”“草畜平衡”“生态补偿”，实现了一种“去库存、提质量、增效益”的发展方式。

进入新时代以来，中国牛羊产业发展迅速，产值不断增加，产业化水平持续提高，前景一片光明。内蒙古作为我国重要绿色农畜产品生产加工基地，拥有广阔的天然草场，优良的牛羊品种，养殖经验丰富的农牧民等禀赋优势，牛羊产业健康发展。随着人民消费水平不断提高，膳食结构发生改变，羊肉作为

营养价值高、绿色无污染的中高档消费品逐渐受到市场青睐，为内蒙古牛羊产业的发展创造了条件。

2.1.2 内蒙古畜牧业发展稳中向好

内蒙古是我国重要的畜牧业生产基地，是牛羊养殖大省，其牛奶、羊肉、羊绒等畜产品产量均居全国首位，牛肉产量位居全国第三。内蒙古全区每年稳定向外调出 500 万吨牛奶和 150 万吨肉类，全国 1/4 的羊肉、1/5 的牛奶均来自内蒙古，是名副其实的“肉库奶罐”。近年来，内蒙古畜牧业综合生产能力稳步提升，农牧业结构逐步调整优化，畜产品加工产业体系初步形成，畜牧业相关产业联动推进，一二三产稳步融合发展。2022 年，畜牧业产值占全国畜牧业总产值的 4.9%，羊饲养业产值占全国羊饲养总产值的 20.3%，在各省（区）中排名高居第一。在内蒙古农牧业发展两区三带中具有重要的

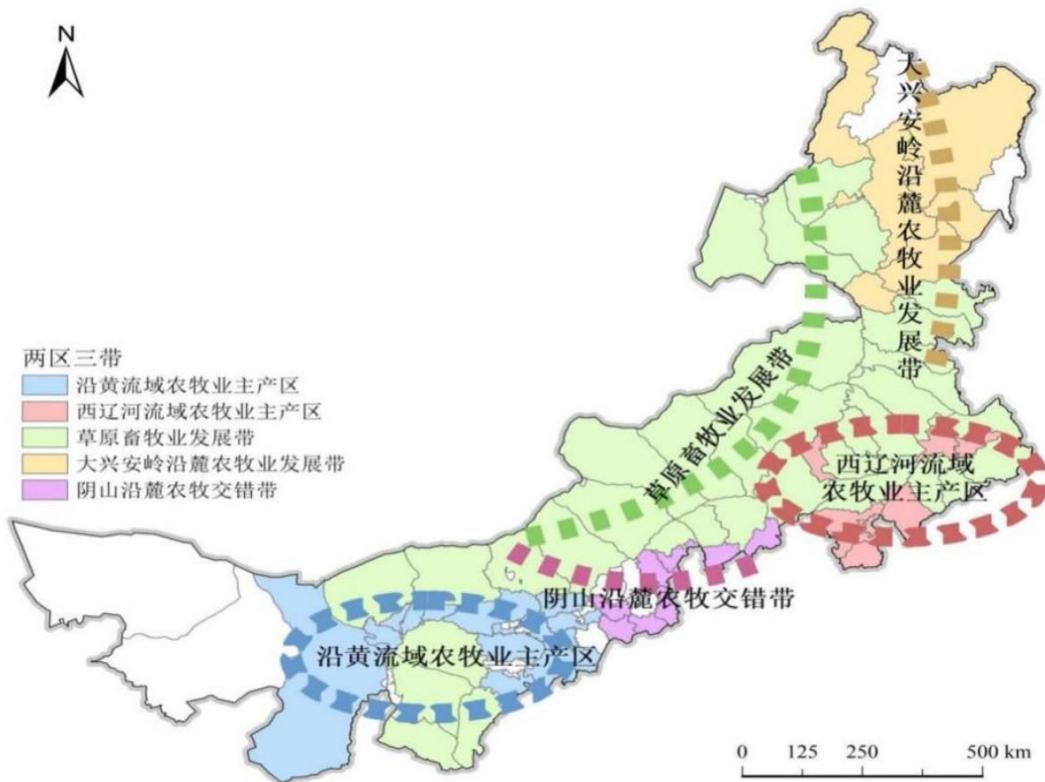


图 2-1 内蒙古畜牧业空间分布图

多年来良好的政策引导内蒙古畜牧业发展取得良好成效。近年来内蒙古畜牧业产值不断增加，畜产品供给能力稳步提升。2021 年牲畜存栏 7574.69 万头，

其中牛 732.47 万头，羊 6138.17 万只，牛、羊养殖数量占总牲畜存栏量的 90.7%，即内蒙古畜牧业牲畜以牛羊为主。

近 10 年内蒙古牛羊年底存栏数整体处于上升趋势，根据国家统计局数据显示，2003 年牛年底存栏数为 409.73 万头，2021 年为 732.47 万头，上升了 78.77%。羊 2003 年年底存栏数为 4450.15 万只，2021 年为 6138.17 万只，上升了 37.93%。

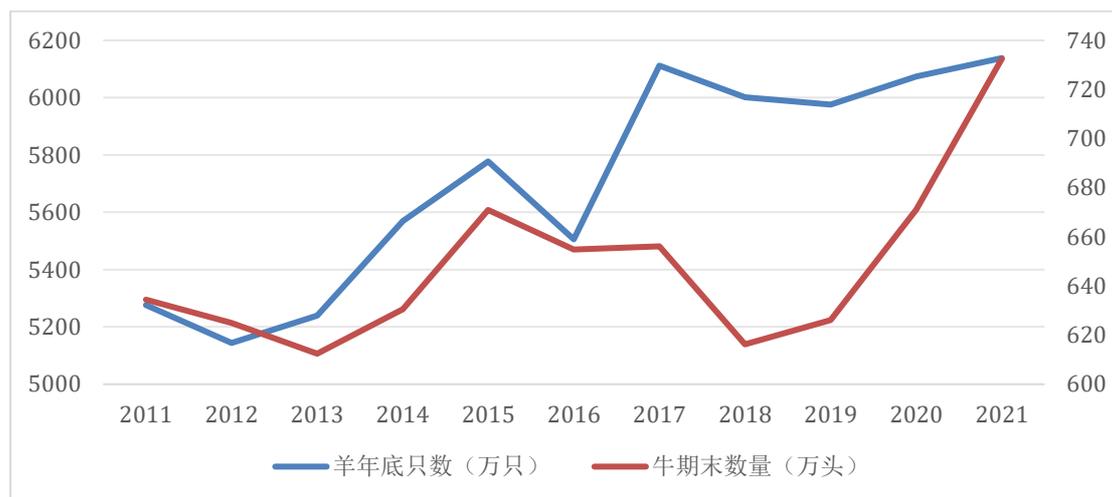


图 2-3 2011-2021 年内蒙古地区牛羊年底存栏数

数据来源：国家统计局

近 10 年内蒙古牛羊年底出栏数整体处于上升趋势，根据国家统计局数据显示，2003 年牛年底出栏数为 149.07 万头，2018 年牛年底出栏数为 375.1 万头，上升了 151.63%。羊 2003 年年底出栏数为 2867.74 万只，2020 年年底出栏数为 6674.12 万只，上升了 132.73%。

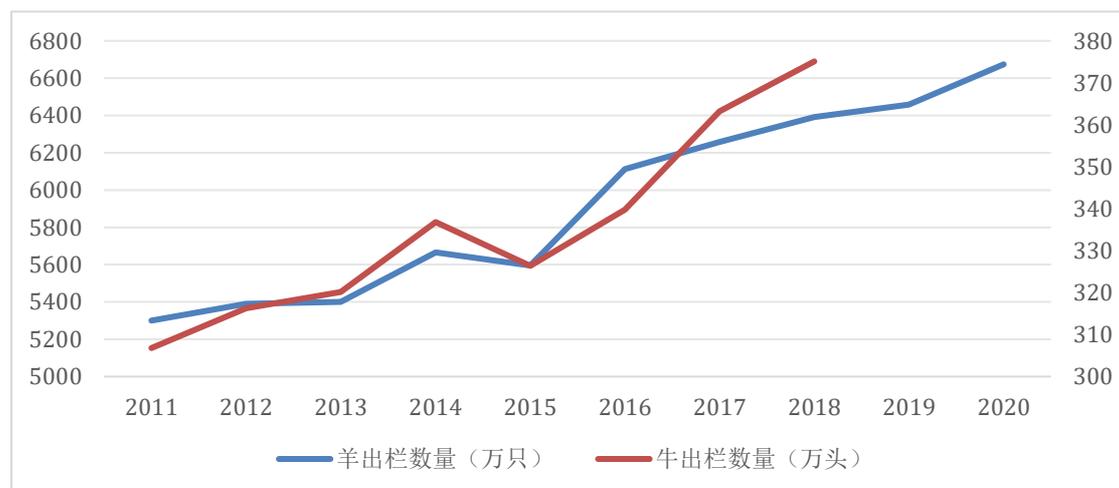


图 2-4 2011 年-2020 年内蒙古地区牛羊出栏数

数据来源：国家统计局

内蒙古近年来牛羊养殖量均位居我国前列，2022 年牛年底存栏量位居我国各省排名第 3，占全国总存栏量的 7%。羊存栏量位居我国首位，占比达到 19%。近年来我国牛羊出栏量占比均位居全国首位，2018 年牛出栏量占全国总出栏量 9%，2022 年羊出栏量在全国占比 21%。

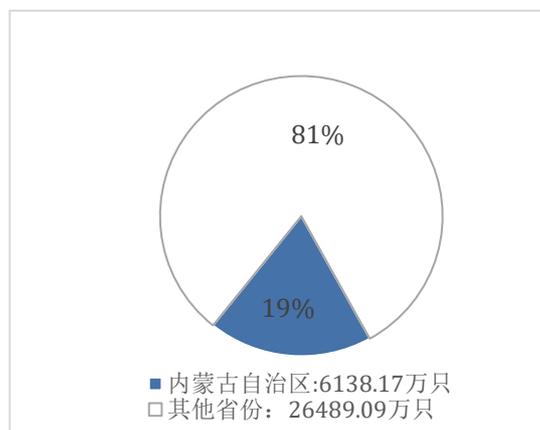


图 2-5 2022 年内蒙古牛年底存栏数占比

图 2-6 2022 年内蒙古羊年底存栏数占比

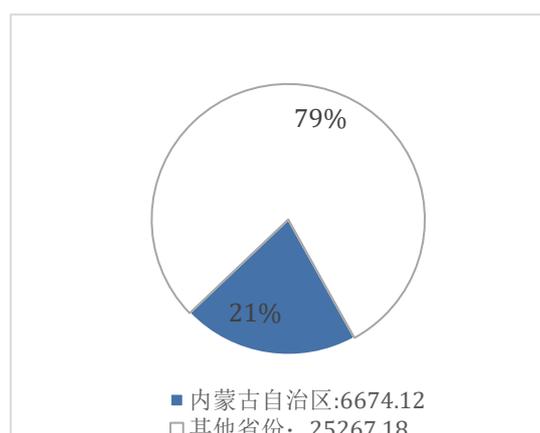
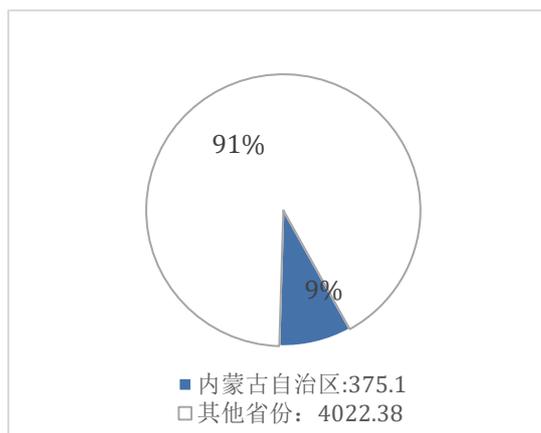


图 2-7 2018 年内蒙古牛年底出栏数占比

图 2-8 2020 年内蒙古羊年底出栏数在全国占比

数据来源：国家统计局

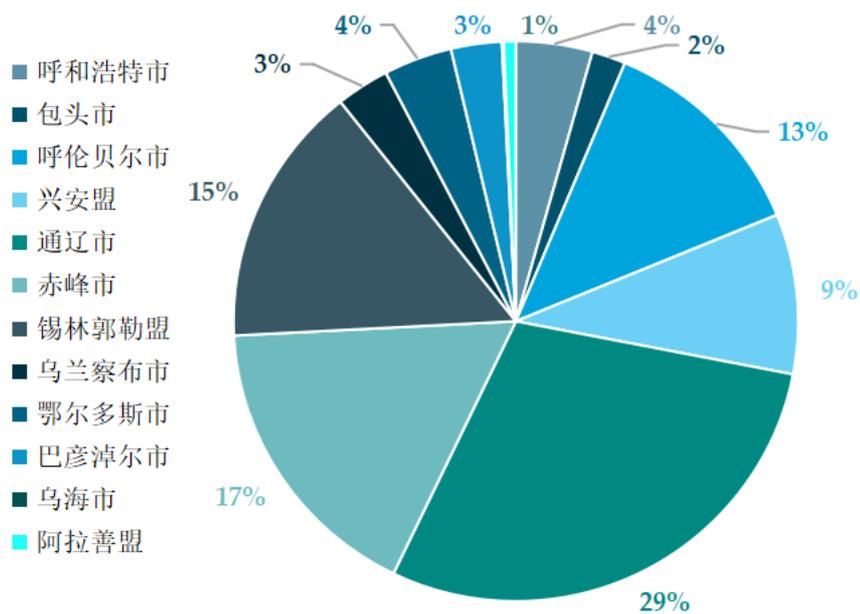


图 2-9 2021 年全区牛存栏量各盟市占比图

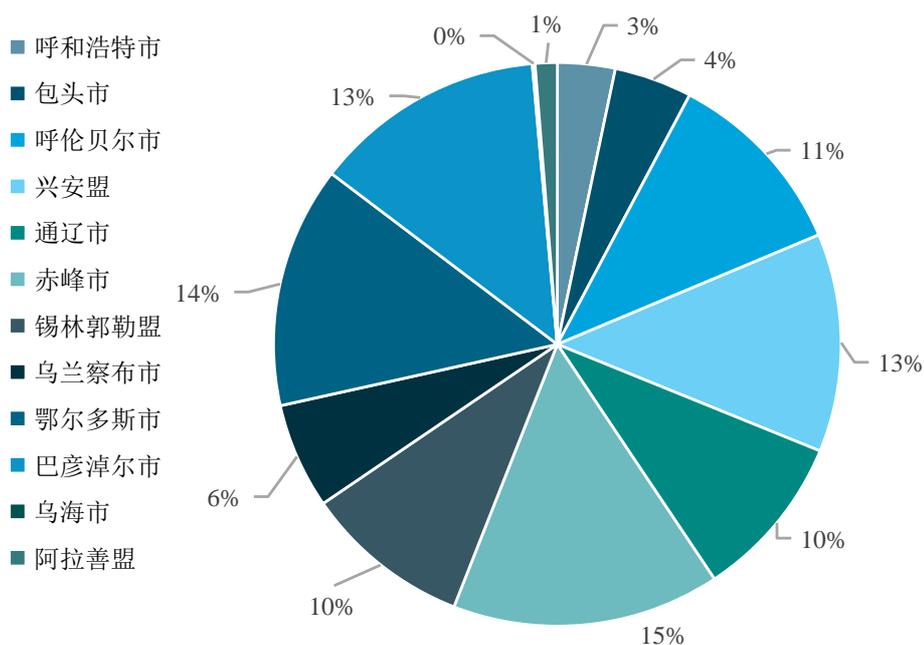


图 2-10 2021 年全区羊存栏量各盟市占比图

就内蒙古畜牧业三大主流产品牛肉、羊肉及牛奶产业，肉牛养殖业主要集中在通辽及赤峰一带的东部地区，肉羊养殖业主要集中在东部五盟市及中部巴彦淖尔市及锡林郭勒盟等地区，乳业聚集区主要分布在呼和浩特、巴彦淖尔、锡林郭勒及呼伦贝尔地区，而西部区因自然资源禀赋较差，缺少天然草场及农区规模化舍饲条件，畜牧业产品相对最少。

表 2-1 内蒙古各盟市羊肉、牛肉及牛奶产量（吨）

地区	盟市	羊肉产量（吨）	牛肉产量（吨）	牛奶产量（吨）
东部	呼伦贝尔市	98691	92208	715773
	兴安盟	142660	47252	530165
	通辽市	82130	170098	395164
	赤峰市	116669	122274	356667
	分区总量	440150	431832	1997769
中部	呼和浩特市	54734	37922	1852494
	包头市	78014	36142	496318
	锡林郭勒盟	114976	114242	809005
	乌兰察布市	100567	20572	283201
	鄂尔多斯市	94302	23799	299656
	分区总量	442593	232677	3740674
西部	巴彦淖尔市	243174	18309	882143
	乌海市	2700	493	1005
	阿拉善盟	7931	3788	110809
	分区总量	253805	22590	993957

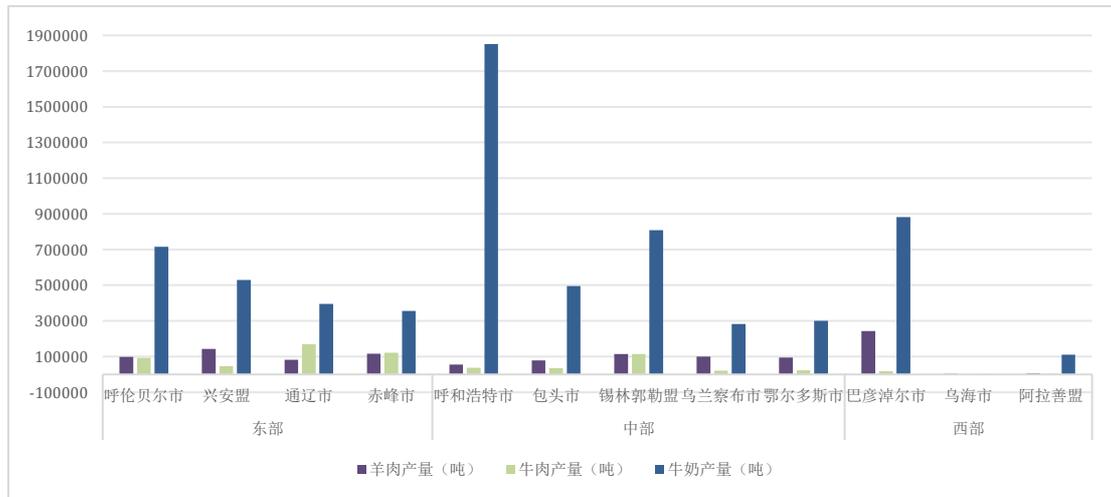


图 2-9 2021 年内蒙古各盟市主要畜产品产量（吨）

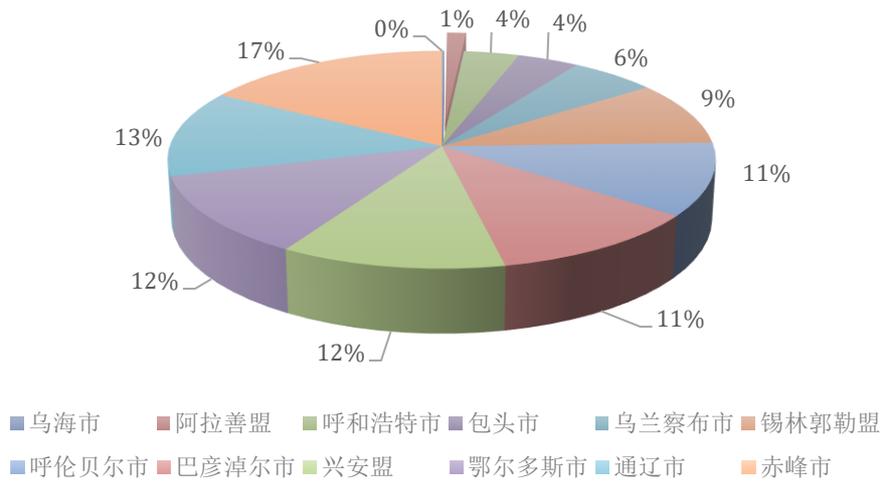


图 2021 年内蒙古牲畜存栏量总数各盟市占比

2.2 内蒙古畜牧业温室气体排放

2.2.1 畜牧业温室气体排放计算方法

畜牧业生产过程碳排放主要包括牲畜胃肠发酵释放的 CH_4 、以及牲畜粪便“氨-氧化”释放的 CH_4 和 N_2O ，并将其单位转换为碳当量。采用直接估算方法的碳排放系数法，公式如(1)-(4)式所示：

$$\text{NC}=\text{C1}+\text{C2}+\text{C3} \quad (1)$$

$$\text{C1}=\sum 6.8182 \times \text{Mi} \times \text{Xi} \quad (2)$$

$$\text{C2}=\sum 6.8182 \times \text{Mi} \times \text{Yi} \quad (3)$$

$$\text{C3}=\sum 81.2727 \times \text{Mi} \times \text{Zi} \quad (4)$$

上式中，NC 为畜牧业碳排放总量，C1 为牲畜胃肠发酵排放的 CH_4 ，C2 为牲畜粪便“氨-氧化”排放的 CH_4 ，C3 为牲畜粪便“氨-氧化”排放的 N_2O ，Mi 为第 i 类牲畜年平均饲养量，Xi 为第 i 类牲畜胃肠发酵 CH_4 年排放系数，Yi 为第 i 类牲畜粪便“氨-氧化” CH_4 年排放系数，Zi 为第 i 类牲畜粪便“氨-氧化” N_2O 年排放系数。6.8182 为 CH_4 转化为 C 的当量系数，81.2727 为转化为 N_2O 的当量系数。考虑内蒙古 12 个盟市畜牧业现状，引用选取牛、马、驴、骡、骆驼、猪、山羊、绵羊 8 种牲畜，核算内蒙古畜牧业的碳排放量，如表 2-1。

表 2-2 内蒙古不同种类牲畜 CH₄ 和 N₂O 年排放系数 单位：t/千头

碳排放 牲畜种类	肠道发酵 CH ₄	粪便排放 CH ₄	粪便排放 N ₂ O
牛	54.33	7	1.24
马	18	1.64	1.39
驴	10	0.9	1.39
骡	10	0.9	1.39
骆驼	46	1.72	1.39
猪	1	4	0.53
绵羊	5	0.17	0.33
山羊	5	0.15	0.33

数据来源：联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告

牲畜年平均饲养量计算公式借鉴胡向东等(2010)的研究方法如下：

$$\rho = \psi_{ikt} \times \sigma_{ikt} / 365, \lambda \geq 1$$

$$\rho = (\theta_{ikt} + \gamma_{ikt}) / 2, \lambda < 1 \quad (5)$$

式中： ρ 为牲畜年平均饲养量， ψ 为年均生长周期， σ 为出栏量， λ 为出栏率(其中猪的出栏率 ≥ 1 ，年均生长周期分别为 200 天)， θ 上年末存栏量， γ 为本年末存栏量， k 为地区， t 为时期， i 为牲畜种类。

2.2.2 内蒙古畜牧业碳排放分析

(1) 内蒙古畜牧业碳排放总量

内蒙古畜牧业温室气体排放总量总体呈现波动增长的趋势，增长趋势变化大致可分为三个阶段：2001-2008 年增排量较多，变化的趋势明显，增长率达到 80%，这主要是因为各类畜禽出栏量持续增加；2008 年，温室气体排放量达到峰值，2008-2015 年，受经济危机影响，物价水平下降，牧民减少了牲畜的养殖，温室气体排放量有所下降，但其下降率不明显仅 10%左右，直至 2015-2022 年又回到了较高水平。

经课题组核算分析，2021 内蒙古畜牧业总量中，肠道发酵甲烷排放二氧化碳当量占比 81.68%，粪便管理排放二氧化碳当量占比 18.32%，其中粪便管理排放甲烷折合成二氧化碳当量占 4.41%，排放氧化亚氮折合成二氧化碳当量占 13.91%。就粪便管理系统，氧化亚氮因增温潜势高，在粪便管理系统中占比较高（75.93%）。

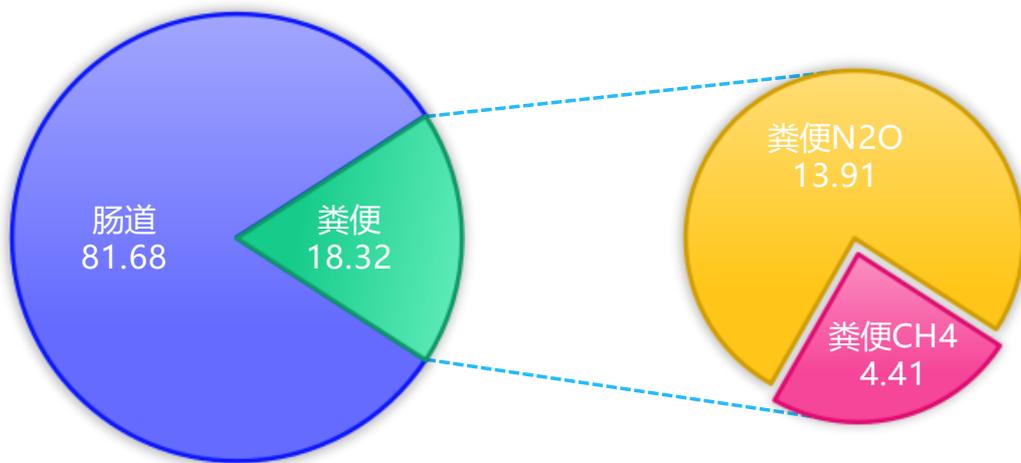


图 2-10 内蒙古畜牧业肠道和粪便二氧化碳当量排放占比 (单位: %)

(2) 内蒙古畜牧业碳排放畜种结构差异

从不同牲畜的碳排放来看, 2021 年内蒙古畜牧业碳排放中, 养殖数量最多的羊, 二氧化碳排放当量占碳排放总量的比例最高, 为 47%, 其次是肉, 占牛 32%, 奶牛占 14%, 猪占 4%, 骆驼、马、驴、骡等其他大牲畜占 3%。

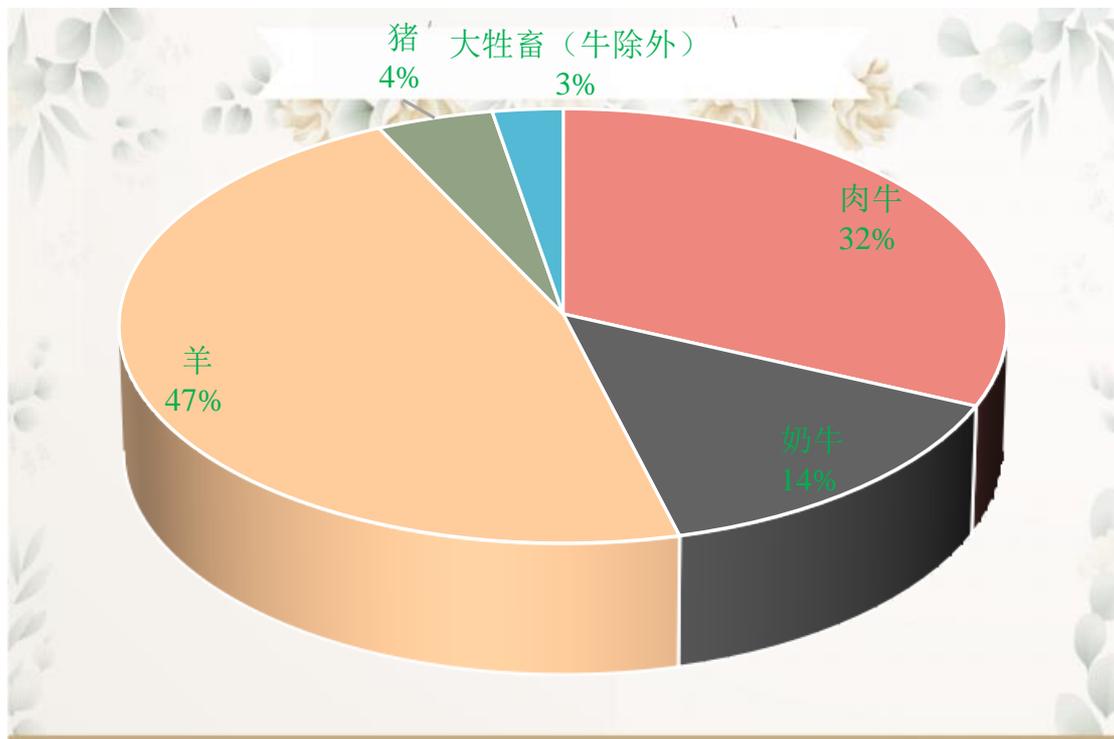
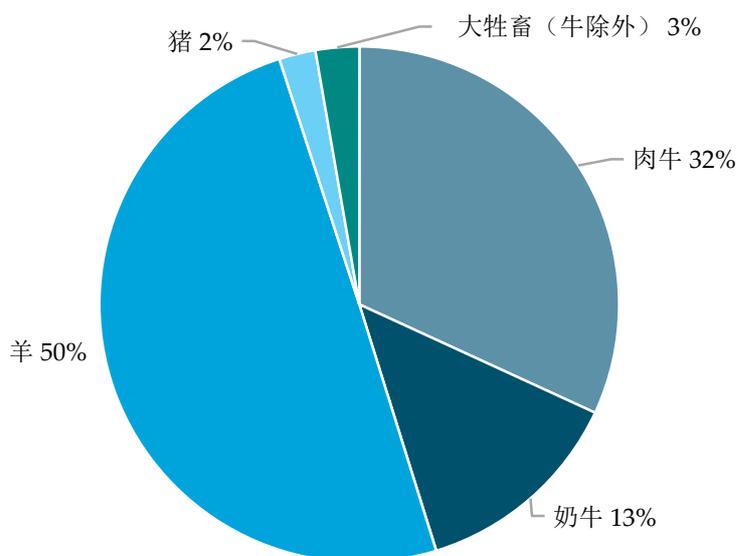


图 2-13 2021 年内蒙古各类畜种温室气体排放二氧化碳当量占比

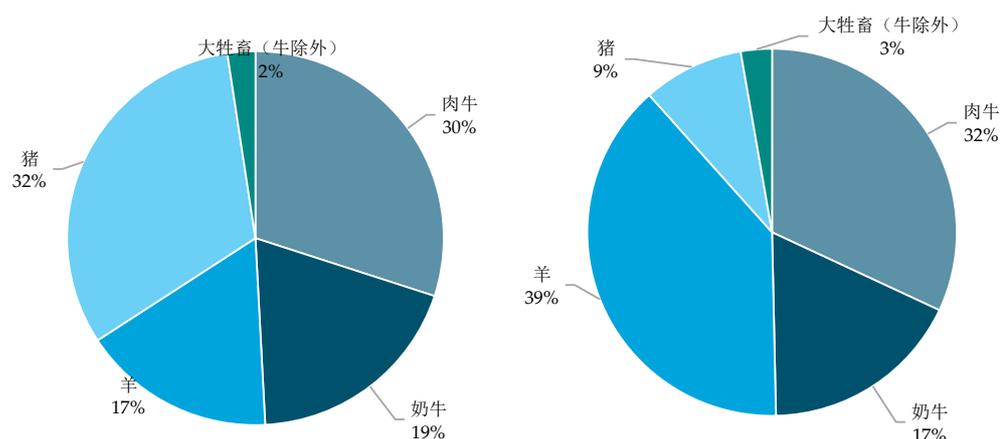
对肠道发酵甲烷排放, 羊的肠道发酵甲烷排放量最高, 占总牲畜排放总量的50%, 肉牛占32%, 奶牛13%, 驴、马、骡、骆驼等其他大牲畜和猪各占5%。

粪便管理的甲烷排放总量不同畜种之间相比较, 猪和肉牛占比最高, 分别为32%和30%, 奶牛和羊占比较高, 分别占19%和17%。

粪便管理的氧化亚氮排放总量不同畜种之间相比较, 羊和肉牛的占比最高, 分别占39%和32%, 奶牛次之, 占17%, 猪和其他大牲畜分别占9%和3%。



2021 年全区畜牧业畜种肠道甲烷排放占比图



2021 年全区畜牧业畜种粪便甲烷(左)和氧化亚氮(右)排放占比图

(3) 内蒙古各盟市畜牧业碳排放差异

由呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市及赤峰市组成的东部区是内蒙古牛肉产量的主导地区，2021 年产量为 43.1 万吨，占全区牛肉总产量的 62.73%。同时，其羊肉产量与中部区的呼和浩特市、包头市、锡林郭勒盟、乌兰察布市及鄂尔多斯市五盟市几乎相当，为 44.01 万吨，占全区羊肉总产量的 38.7%。



图 2-15 2021 年内蒙古各盟市温室气体二氧化碳当量对比

第三章 内蒙古畜牧业温室气体本地化排放因子及核算方法

3.1 温室气体的产生机制

在整个农业生产系统中，温室气体最大的来源便是动物胃肠道产生的 CH_4 气体（Gerber, et al. 2013; 董利锋, 等, 2019），其中，反刍动物(特别是牛、羊、骆驼等)在消化代谢过程中，其肠道在厌氧条件因发酵下所产生的大量 CH_4 气体是主要贡献者，约占人为 CH_4 排放的 12%~37%，其中仅奶牛胃肠道产生的 CH_4 排放就约占全球农业温室气体排放量的 18%（Martin, et al. 2010）。反刍动物是主要的甲烷排放源，而反刍动物 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 等温室气体的排放是一个非常复杂的过程，以下内容将对肠道甲烷和粪尿产生途径及机制进行介绍。

3.1.1 肠道甲烷产生

动物肠道甲烷指动物在正常代谢过程中，其消化道内的微生物发酵饲料而产生的甲烷，从动物口、鼻和直肠排出体外。反刍动物的瘤胃占总胃容量的 70% 以上，羊和牛的瘤胃容积分别为 15 L 和 100~150 L（Masaki, et al. 2010），相当于一个连续的恒温（39℃）发酵系统，而且瘤胃中含有大量的细菌、原虫以及厌氧真菌。研究表明，瘤胃内容物中细菌的含量约为 $10^9\sim 10^{10}$ 个/克，瘤胃原虫的含量约为 $10^5\sim 10^6$ 个/克，而厌氧真菌的含量较少（冯仰廉, 2004）。反刍动物之所以能够有效的消化所采食的大量粗饲料，主要就是依靠瘤胃微生物的厌氧性发酵作用。因此，反刍动物与其他动物消化代谢特点不同的根本原因就在于其瘤胃对饲料的发酵。 CH_4 的产生主要就来自于瘤胃水解碳水化合物的微生物发酵，且被认为是宿主的一种能量损失（Kristensen, et al. 2011）。

反刍动物排放的瘤胃 CH_4 是其在消化代谢过程中，在产甲烷菌的发酵作用下而产生的副产物。产甲烷菌是一类完全不同于细菌且系统进化独特的微生物，又称古菌或古细菌。产甲烷菌是一种严格意义上的厌氧性菌，既可自养，也可混养，并能够将 CO_2 、 H_2 、甲酸、甲醇、乙酸、甲胺及其他化合物经过一系列生化反应，进一步转化成 CH_4 或 CH_4 和 CO_2 ，并从中获取能量。所以反刍动物由于 CH_4 排放而损失的能量占到了其摄入总能量的 2%~12%（Moss, et al. 2000;

Johnson, et al. 1995)。因此从这点上看,反刍动物排放的肠道 CH_4 其实不仅是饲料能量利用的一种损失,也是饲料利用效率低下的一种表现。

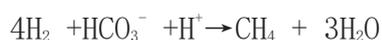
产甲烷菌在自然界的陆地、海洋、湖泊及矿物质中广泛存在。而且几乎所有的产甲烷菌都具有把 H_2 和 CO_2 转化成 CH_4 的能力,其通过还原 CO_2 而将 H_2 、 CO_2 和甲酸生成 CH_4 ,因此,产生 CH_4 的主要底物被认为就是 H_2 和 CO_2 和甲酸这三个物质。产甲烷菌也是所有反刍动物瘤胃中的一类重要微生物,目前分离得到的瘤胃中的产甲烷菌包括甲烷短杆菌属、甲烷细菌属、甲烷微菌属以及甲烷八叠球菌属等多个种类。产甲烷菌在瘤胃中的发酵速率和类型受到动物日粮种类、咀嚼速度、唾液分泌和消化动力学等多因素的影响。

瘤胃生态系统是一种严格的厌氧环境,与湿地、河口等其他厌氧生态系统相比,植物物质的降解时间非常短,发酵产物也不同,一些微生物物种与反刍动物和后肠发酵哺乳动物共同进化,这种情况在其他环境中是不可能发生的(淡瑞芳,等,2009)。反刍动物的瘤胃相当于一个大的厌氧发酵罐,大量的酶和厌氧微生物(如甲烷菌)相互作用且共存于其中,当反刍动物采食的日粮到达瘤胃后,日粮中难以降解的纤维素和半纤维素等结构性糖类在厌氧条件下,发酵降解为机体所需的各类营养物质,在伴随着产生 CO_2 和 H_2 的同时,还会产生乙酸、丙酸、丁酸等挥发性脂肪酸(VFA),这些 VFA 最后作为动物的能量来源而被加以利用。而产生的气体 H_2 和 CO_2 随后在瘤胃内产甲烷菌的作用下,在多种酶和辅酶的催化作用下,经过一系列上述生化反应后,被之前产生的 H_2 和甲酸还原而产生 CH_4 气体,由于甲烷不能被动物机体所利用从而以气体的形式排出体外。反刍动物的盲肠和结肠也会发生上述类似的发酵反应而产生甲烷,但产生的量非常少(Janssen, et al. 2008; Thau, et al. 2010; Krause, et al. 2013)。肠道甲烷是产甲烷微生物及其古生菌在发酵或产甲烷过程中产生反刍动物消化代谢的副产物。肠道甲烷主要产生于瘤胃(87%-90%),其次是大肠(13%-10%)(Dini, et al. 2012)。目前已知的反刍动物瘤胃甲烷产生途径有以下几种:

(1) $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 还原途径

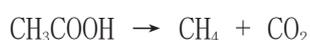
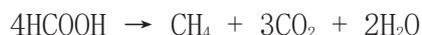
在反刍动物瘤胃发酵的最初阶段及旺盛阶段主要以 $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 还原途径为主^[28]。反刍动物通过瘤胃微生物发酵利用其他动物不能利用的纤维素、半纤维素等结构性碳水化合物的过程中产生 CO_2 和 H_2 ,在瘤胃中产甲烷菌的作用下还原为 CH_4 ,

这是降低瘤胃发酵过程中产生氢浓度的重要途径：首先辅酶甲烷呋喃(MF)活化CO₂，将其还原为甲酰基碳；甲酰基从MF转移至辅酶四氢甲烷喋呤(MP)，随后在电子载体F₄₂₀参与下由氢化酶将甲酰基转化为亚甲基，接着被还原为甲基；甲基从MP转移至辅酶H；甲基-辅酶M通过甲基还原酶系还原成甲烷。最后阶段中有电子载体F₄₃₀和HS-HTP参与。



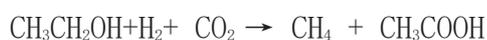
(2) 由甲酸、乙酸、丁酸等参与的反应

在反刍动物体内乙酸首先被磷酸化生成乙酰磷酸，乙酰磷酸再转化为乙酰辅酶A，乙酰辅酶A在乙酰辅酶A脱羧酶(ACDS)的催化下形成1分子甲基四氢甲基喋呤(methyl-H₄Spt)和1分子一氧化碳，一氧化碳在一氧化碳脱氢酶(CODH)的催化下脱氢形成CO₂，同时形成还原型的铁氧环蛋白。还原型的铁氧环蛋白通过细胞膜的细胞色素蛋白将氢质子泵出细胞膜形成质膜内外的质子梯度差，甲基四氢甲基喋呤在methyl-THMP: HS-CoM甲基转移酶的作用下将甲基转移给HS-CoM，形成甲基辅酶M(CH₃-CoM)，随即利用CODH，在氧化CO为CO₂时产生的电子将CH₂-CoM还原为CH₄。

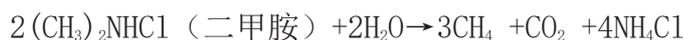


(3) 由甲醇、乙醇等参与的反应

在反刍动物体内甲醇转变为甲烷和碳酸，乙醇在二氧化碳的参与下产生乙酸和甲烷。



(4) 甲胺生成途径



孙维斌等(1999)研究结果表明，瘤胃中CH₄的生成在发酵初期和旺盛期，主要以CO₂-H₂还原途径为主，而在消化后期，与脂肪酸和醇等相联系的还原途径则生成较多的CH₄。Gerber等[30]研究表明，反刍动物瘤胃内经产甲烷菌生成

甲烷的主要途径为 $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 还原途径，途径 2) 和 3) 产生的甲烷量较少，仅有大约 3%~5% 的甲烷是通过途径 2) 产生的。而且，最近的研究发现，新发现的产甲烷菌（如瘤胃簇 C）能够使用一些甲烷供体化合物与二氧化碳结合后产生 CH_4 ，表明还有其他的产 CH_4 途径有待进一步研究和探索（Poulsen, et al. 2013）。由此可见，反刍动物的排放的甲烷主要是由瘤胃内的产甲烷菌以氢、 CO_2 和 VFA 等为底物，经过一系列酶的催化反应后的形成的一种必然产物。

3.1.2 排泄物（粪便）产生甲烷及影响因素

畜禽排泄物中含有大量的有机物，其中猪粪、牛粪、羊粪和鸡粪的有机碳含量分别达 414、368、301 g/kg（全国农业技术推广服务中心，1999）。排泄物甲烷排放是指在畜禽粪便施入到土壤前，在贮存和处理过程中所产生的甲烷，由排泄物在无氧状态下分解而成，主要分为 3 个阶段：

（1）水解过程：畜禽粪便中的有机物首先被微生物分解为有机酸、 H_2 和 CO_2 ；

（2）产酸过程：第一阶段产生的单糖被厌氧和嫌氧性细菌发酵后形成简单有机酸。产酸菌生长快并可在较大的温度和 pH 值范围内存活；

（3）产生甲烷：产甲烷细菌发酵单链有机酸产生 CH_4 和 CO_2 ，以及利用 H_2 还原 CO_2 成 CH_4 （Dangal, et al. 2017）。

生成甲烷的途径因底物不同而有差异，但最终都是在甲基转移酶的作用下将甲基转移到辅酶 M（HS-CoM），生成甲基辅酶 M，甲基辅酶 M 在甲基辅酶 M 还原酶催化下接受电子生成甲烷（Ferry, et al. 1999）。Wackett 等（2006）整理了 H_2 还原 CO_2 生成甲烷的完整步骤。甲醇和甲胺生成甲烷时发生甲基歧化，一部分甲基被氧化为 CO_2 并提供电子，另一部分甲基被还原为甲烷；当以乙酸为底物时，其甲基被还原成甲烷，羧基被氧化为 CO_2 并提供电子（曾波等，2009）。环境温度和湿度对排泄物产生甲烷的速度有重要的影响，低温干燥的环境能大大降低微生物的繁殖和分解速度。在养殖场建设沼气池，把甲烷加以应用，也能降低大气中甲烷浓度。

畜禽排泄物在贮存和处理过程中 CH_4 的排放因子取决于不同的动物类型、饲料特性、粪便管理方式、气候因素等，具体介绍如下

（1）饲料特性

不同动物在不同饲料喂养方式下粪便 CH₄ 的生产潜力 (*Bo*) 差异很大, 饲料的能量和消化率越高, 粪便 CH₄ 生产潜力越大。其中, 肉牛的 *Bo* 范围为 0.17~0.33 m³/kg; 猪粪便 *Bo* 的范围为 0.32~0.52 m³/kg。

(2) 粪便管理方式

当粪便以液体方式储存时, 粪便趋于厌氧分解, 产生大量 CH₄; 当粪便以固体方式管理时, 粪便趋于有氧分解, 几乎不产生 CH₄。在美国, 以液体形式储存的粪便量占粪便产生总量的 10%, 但这部分粪便产生的 CH₄ 排放量占甲烷排放总量的 80%。

(3) 气候因素

影响甲烷产生量的因素还有气候因子, 主要包括温度和湿度, 低温干燥的环境能大大降低微生物的繁殖和分解速度。温度保持在 4~75°C 之间时, 都有 CH₄ 产生, 且当温度保持在 40~60°C 之间时, 甲烷产生量最大。在寒冷的条件下, 绵羊瘤胃甲烷的产量会降低 30%。湿度则会影响粪便中的水分含量, 对于非液态的粪便管理系统, 粪便的含水量则主要取决于降雨量和环境的相对湿度, 进而影响粪便甲烷的产生量。

不同类型家畜每年胃肠道和粪尿排泄物甲烷产量见表 1。

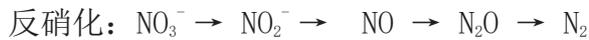
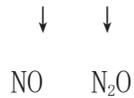
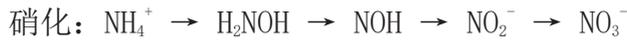
表 3-1 不同类型家畜每年胃肠道和粪尿排泄物的甲烷产量 (kg / (头·年))

	肠道甲烷产量	粪尿排泄物甲烷产量
泌乳奶牛	63~102	21
肉牛	87~102	15
猪	1.5	3.3
禽	0	0.26

注: 资料来源于 Monteny 等 (2001)

3.1.3 排泄物 (粪便) 产生氧化亚氮机制及影响因素

Li 等 (2000) 研究表明, 畜禽排泄物中产生氧化亚氮主要是生物硝化和反硝化两个主要过程, 其基本通式如下:



在生物硝化过程中，蛋白质水解产生氨基酸，氨基酸在微生物作用下氨化分解产生氨气，氨气遇水形成 NH_4^+ ， NH_4^+ 通过一系列的中间反应形成 NO_3^- ，同时某些中间体自身化学分解产生 N_2O 。而反硝化作用是指在通气不良的条件下，将 NO_3^- 作为电子受体进行呼吸代谢产生 N_2O 。这些过程受许多外界条件制约，受排泄物氮素状况、水分含量、内部通风状况、温度、pH 等影响，比较复杂。谢军飞等（2002）在研究密闭箱处理鸡粪的 N_2O 排放时发现，有机质的氮碳比是影响 N_2O 排放的重要因素。氮碳比影响微生物分解有机质，若 C/N 比大于（25~30）：1，有机质分解慢，微生物活性弱， N_2O 排放受到抑制；如 C/N 比小于（25~30）：1，微生物活性强，促进 N_2O 排放。此外，动物废弃物内部干湿交替，能促进 N_2O 的排放。含水量大时，易处于厌氧气环境，反硝化作用会有所增强。此外，动物粪便内部干湿交替，能促进 N_2O 的排放。

3.1.4 畜禽排放 CO_2 的机制

畜牧源 CO_2 主要来自呼吸代谢作用，其中包括动物自身的呼吸、动物胃肠道微生物发酵、微生物发酵分解畜禽粪尿和病畜尸体。在畜禽废弃物生成甲烷的过程中也伴随着 CO_2 的生成；呼吸作用产生的 CO_2 是有机体活细胞内在相应酶的催化下，以葡萄糖和氧为原料，经过三羧酸循环（TAC）等一系列的氧化还原反应生成的终产物，同时为机体提供能量（ATP），是机体正常生理活动的终产物。其总反应式如下：



影响畜禽 CO_2 排放量的因素主要有畜禽总量、反刍动物占畜禽总数的比例、环境温度和牧场废弃物的处理方式等。

3.2 温室气体的排放途径

反刍动物消化道 CH_4 形成后主要通过三个途径排出体外：（1）瘤胃和下消化道产生的 CH_4 被血液吸收后，通过呼气从肺部经由口鼻呼出（呼吸），这一途径是反刍动物产生的 CH_4 气体排放的主要途径，一般占到整个排放量的 90% 左右。（2）经瘤胃发酵后直接排出（打嗝），约占总排放的 7%~8%。（3）产生胃肠胀气后从后肠排出，约占总排放量的 2%~3%。研究发现，在羊的消化系统中，前两种途径 CH_4 的排放量约占肠道 CH_4 总排放量的 98% 左右（Moe, et al. 1979）。因此，对反刍动物肠道 CH_4 的排放测定方法主要就是想办法从口鼻处收集其呼出的气体，然后通过分析检测计算得出 CH_4 的排放量。

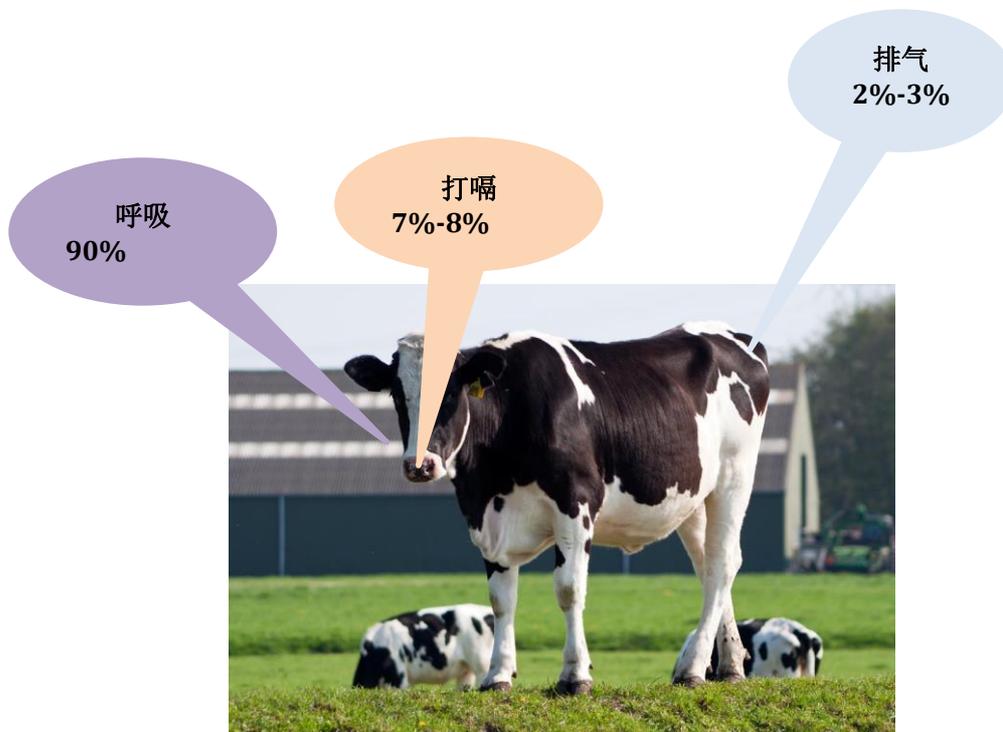


图 3-3 反刍动物消化道 CH_4 排出途径及比例

3.3 温室气体的测定方法

基于此，目前测定反刍动物肠道 CH_4 排放量的方法和手段主要有直接测定法、间接测定法、群体测定法以及模型法。

直接测定法包括呼吸室法、半封闭（头罩或面罩法）、示踪法以及 GreenFeed 系统。间接测定法包括 CO₂ 示踪法、嗅探器法和激光检测器法等。群体测定法包括开放式傅里叶红外光谱变换法（FTIR）、开放式激光技术、与微气象模型相关联的质量平衡与流量梯度变换法、逆向离散法等。模型法包括呼吸室法、自由采食量、饲料消化率、动物表型以及动物生产性能等信息构建的 CH₄ 排放量的预测模型，根据预测模型计算出 CH₄ 排放量。

3.3.1 直接测定法

直接测定法包括呼吸室法、半封闭（头罩或面罩法）、示踪法以及 GreenFeed 系统。这几种测定方法均有利弊，下面我们逐一进行介绍分析，选择适合自己的测定方式进行 CH₄ 排放量的测定。

呼吸室法和头罩或面罩法这两种方式的基本原理都是把动物置于一个相对密闭的空间内，通过专用设备检测一定时间内密封舱 CH₄ 气体的浓度变化，然后计算出动物的肠道 CH₄ 排放量（Storm, et al. 2012）。呼吸室法也叫呼吸代谢室法，在校正准确和操作正确的前提下，得到的结果通常被作为“黄金标准”，但其测量周期长、测定动物数量少，代表性差。

3.3.1.1 呼吸室法

呼吸室已有 100 多年历史，起初被用作间接测热，以测量反刍动物在呼吸和 CH₄ 排放过程中造成的能量损失。目前，最常用的是开路式呼吸室。其原理为：吸入的空气通过在室内循环，使室内空气中的 CH₄ 混合均匀，同时以进气相同速率排出空气，并对吸入和排出气体进行采样分析。CH₄ 排放量为气流量和排出气体与吸入气体之间浓度差的乘积。

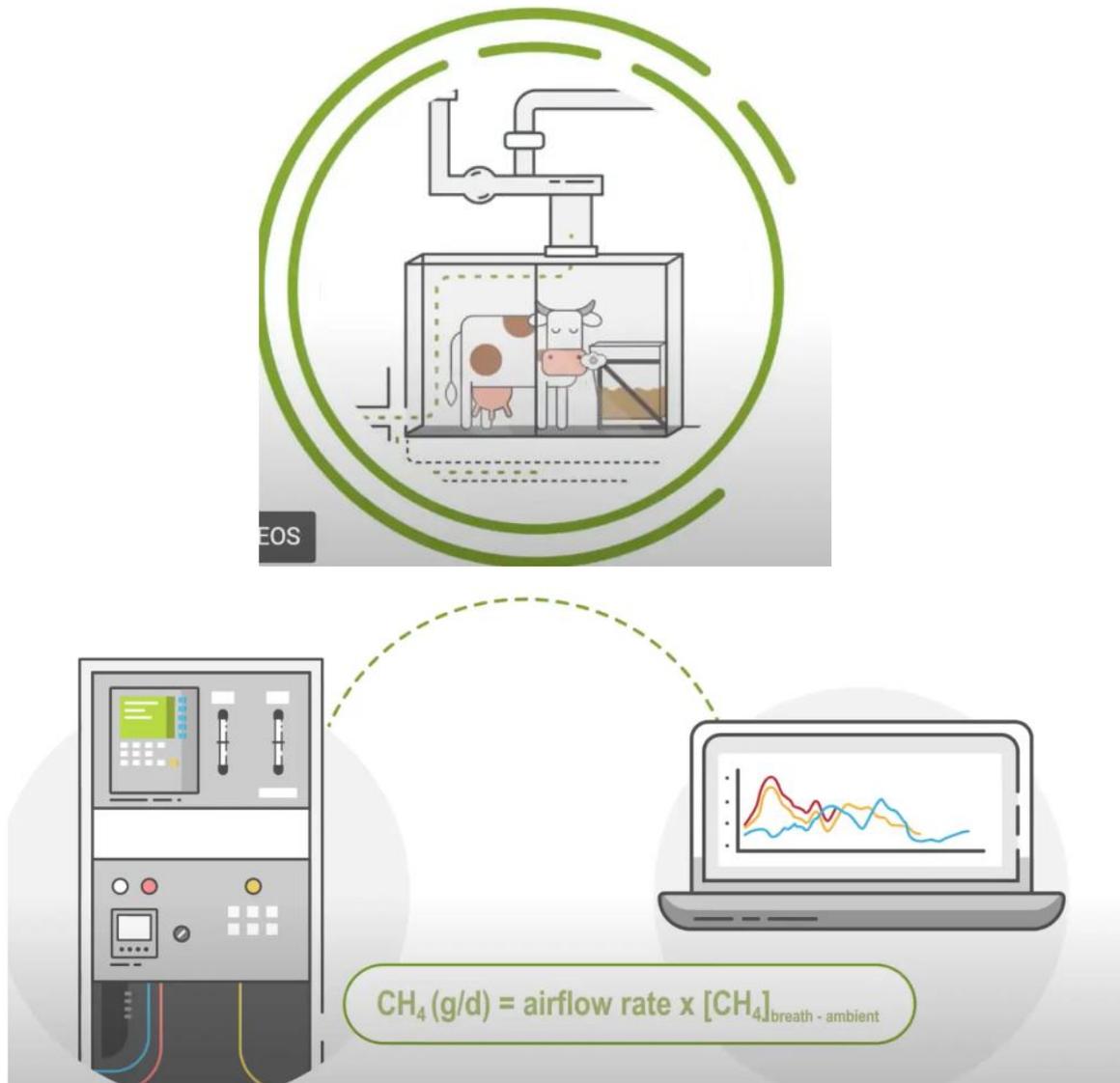


图 3-4 呼吸室法测定甲烷排放量

此方法不能用于正常的动物生产条件，测量期间动物要一直处于呼吸室内。每个呼吸室通常只能测量 1 只动物，而且动物需要较长时间的训练以适应室内的密闭空间。另外，呼吸代谢室的仪器精密度高和操作复杂，对研究人员要求高。呼吸代谢室法因具有对动物排放的 CH_4 全面采样、测量周期长和仪器精密的特点，并因其结果准确，常被作为“黄金标准”，用于建立预测方程和模型，以估算温室气体清单中的反刍动物 CH_4 排放量（Pinares-Patiño, et al. 2011）。此方法不仅能够完全测量出 CH_4 的生产、气体交换（ O_2 消耗和 CO_2 生产）以及其他微量气体，而且能对动物机体产生的热量进行测定并最终估算出整个机体的代

谢率。不仅如此，利用呼吸室的设计，还可以通过粪尿全收集的方法，同步测定出动物总的消化率与气体交换量，从而确定动物的生产净能和饲料利用效率。

但此法的缺点在于，动物的采食量和采食条件受到了严格的限制，且测量时间较短（从几个小时到3天以上），因而不能充分反映动物在自然放牧条件下的行为与CH₄排放量（Kroeze, et al. 1997）。再加上缺乏对动物自由饮水、瘤胃微生物及内环境稳定性的了解，致使这一方法的实用性明显降低，并导致4%~7%的变异率（Pinares-Patiño, et al. 2011）。

3.4.1.2 头罩或面罩法

此法的基本原理与呼吸室法基本相似，但使用头罩或面罩的方法估算放牧动物的甲烷排放量主要依赖于“现场取样”的实际情况在野外测量装置上的动物饲料消耗（Garnsworthy, et al. 2012），通过在几分钟的采样时间内测量呼出气体中的CH₄浓度来估算其总的排放量。但所有的“现场采样”情况都会产生高度可变的数据集，并且只提供一个短期的排放率（Hammond, et al. 2015）。但如果能从大量的动物身上收集到足够的数量，那么在24小时的测量中，样本的频率就会更加均匀，就可以计算出一个具有代表性的CH₄气体通量，并最终建立其排放清单。

3.4.1.3 示踪法

示踪法的原理是：将已知释放速率的示踪物放入瘤胃中，示踪物与甲烷一起呼出，测定示踪物与甲烷的浓度之间的比例，就可以算出甲烷的释放速率。应用示踪技术时，有效测定甲烷释放量所用的标记物必需满足几个条件：①渗透管的释放率必须稳定和可测。②标记物必须对瘤胃发酵无影响。③标记物在低浓度时可测。④标记物必需是惰性和无毒。示踪法包括同位素示踪法和非同位素示踪法。

（1）同位素示踪法

同位素示踪法是指通过³H和¹⁴C标记的甲烷的稀释度来测定动物甲烷产生量的方法，其准确度取决于示踪气体和被测气体混合的均匀性。但此方法的主要缺点是不利于在生产实践中推广。因为该技术的实施影响人类健康。

（2）非同位素示踪法

Johnson等人（1994）于1994年最早发现了一种行之有效的示踪物质—六氟化硫（SF₆），后来有人发现氘化甲烷（¹³CH₃D）也具有相同的效果（Machmüller,

et al. 2006), 两种方法的基本原理都是基于示踪气体与甲烷的性质相似, 且在瘤胃中具有恒定的释放速率, 当把其作为示踪物置入反刍动物的瘤胃内时, 就可以在口鼻处与动物呼出的 CH_4 一起收集, 然后通过分析计算得出反刍动物肠道 CH_4 的排放量。从理论上讲, $^{13}\text{CH}_3\text{D}$ 是通过干扰非微生物的产甲烷作用(例如煤层气体)而形成的, 而瘤胃内的 CH_4 是通过微生物的发酵作用而产生的, 因此, 二者容易被区分, 如果用 $^{13}\text{CH}_3\text{D}$ 作为示踪物质, 可以较好的模拟 CH_4 在瘤胃内产生、释放的具体过程, 也容易被追踪标记, 是理想的示踪物质, 然而, $^{13}\text{CH}_3\text{D}$ 昂贵的费用令人望而却步, 因此没有得到广泛采用 (Wang, et al. 2015)。非同位素示踪法现在主要用的是六氟化硫 (SF_6)。

SF_6 气体无色无味, 无毒无腐蚀性, 在常温常压下成不可燃烧状态, 极难溶于水, 是化学稳定性最好的非金属氟化物。 SF_6 能随大气运动, 与周围气体的混和速度较快, 无沉降, 大气中本底浓度低, 为 10~15 ppt 级, SF_6 本身就是一种在低浓度下易于测量和追踪的气体, 在环境中的释放浓度仅 6 pmol/天

(Rigby, et al. 2008), 该气体物理特征与甲烷相似, 并且它在起源上也是合成的, 而不是作为任何生化反应的一部分而生成的。因此, SF_6 被认为是一种较好的气体示踪剂。 SF_6 纯气体的凝华点是在 -63.8°C , 即在此温度以下, 常压下的 SF_6 气体可直接转变为固体, 将 SF_6 纯气体以体积较小的固体形态装入渗透管内, 测定渗透管的释放速率。将已知渗透率的 SF_6 渗透管置入瘤胃, 使其以稳定的低速释放 SF_6 , 具体测定时, 将预先制备好的、已知浓度的、装有 SF_6 示踪气体的渗透管经口腔置入动物的瘤胃中, 在反刍动物的呼吸过程中随甲烷气体一起排出, 然后在动物的口鼻处收集其呼出的 SF_6 和 CH_4 , 由于 SF_6 的排放速率已知, 当测得 SF_6 和 CH_4 的浓度后, 可计算出 CH_4 的排放速率, 再根据背景浓度进行测量和校正, 就可以计算出每个动物肠道 CH_4 的排放量 (Boadi, et al. 2003)。尽管 SF_6 和 CH_4 的稀释程度变化与动物头数和周围空气运动有关, 但由于 CH_4 和 SF_6 同时被排出, 且在同一点用同一个采样器采样, 所以假定 CH_4 和 SF_6 被空气稀释的程度相同。

该技术避免了监禁或围栏动物的必要性, 允许动物相对自由活动。即使动物周围空气浓度发生变化也不会导致标记物相对稀释度改变, 因此不影响测定的准确性。反刍动物瘤胃产生甲烷的大部分以嗝气的方式排出, 因此动物口鼻周围收集的气体可认为是瘤胃甲烷排放的准确样本。与其它方法相比, SF_6 示踪

法最大的优点是能够在生产条件下测定动物的甲烷排放量。它不但可以测定单个动物的甲烷排放量，也能用于群体动物的测定。

综上所述 SF₆ 示踪技术是一种比较先进的动物甲烷测定方法、以操作简单、费用低、对动物应激小和取样测试方便等优点，近几年被许多研究者所应用。

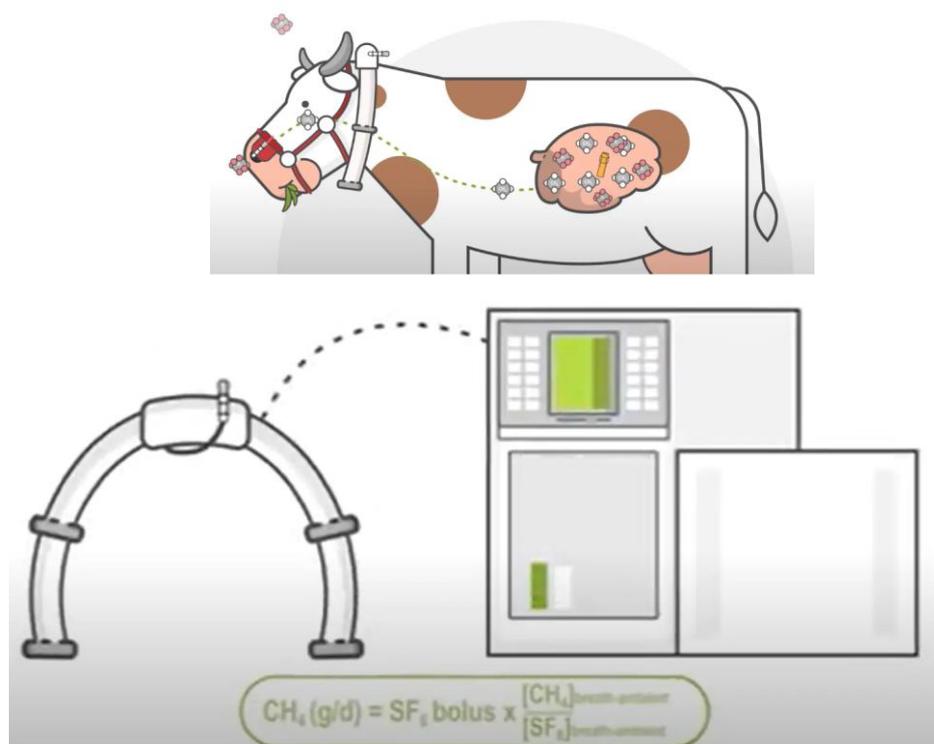


图 3-5 SF₆ 测定甲烷排出装置

3.4.1.4 GreenFeed 系统

自动头室系统（GreenFeed）（Huhtanen, et al. 2015）是直接测量反刍动物 CH₄ 排放量的最新技术，由美国宾夕法尼亚州立大学研制。在头室内放置饲料补充剂诱导动物自愿访问，由研究人员设置两次测量间隔。当动物访问系统单元时，传感器对动物头部定位，抽气扇将空气经过动物的口鼻从其头顶抽入排气管，对动物呼吸和暖气现场采集。收集的空气经过混合、过滤，并使用热膜风速计测量气流速度，样品中 CH₄ 的浓度用非色散红外分析法测量。计算公式如下：

$$Fc (i) = [Cp (i) \times (Conc (i) - Bconc (i)) \times Fair (i)] / 10^6$$

其中： C_p 是在任何时间（ i ）对空气的采样率； $Conc$ 是采集气体中的 CH_4 浓度（ppm）； $BConc$ 是 CH_4 的环境浓度（ppm）； F_{air} 以干燥气体为基础测得的气流量（L/min）。

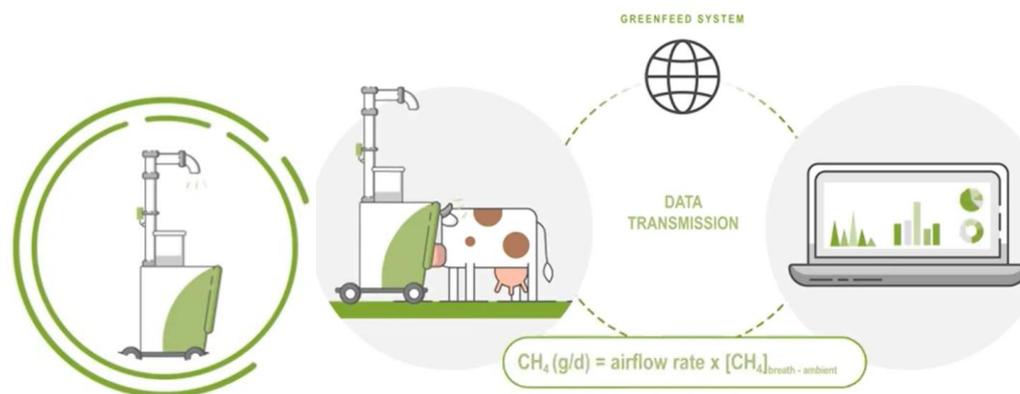


图 3-6 GreenFeed 系统测定甲烷排放

3.4.1.5 直接测定法的特点及应用

呼吸室法、半封闭（头罩或面罩法）、示踪法以及 GreenFeed 系统均有优点和缺点，下面简要介绍（见表 2），使用时需根据养殖场规模、操作性及费用等综合确定所用方法。

与呼吸代谢室法相比， SF_6 示踪法能够在较多动物和不改变动物饲养状态的条件下应用，改进了呼吸代谢室法的测定动物数量少的问题，但也具有测量周期长的弊端并且结果可变性高。而 GreenFeed 系统是目前直接测定反刍动物 CH_4 排放量的最新技术，具有无创伤、非侵入式、测量时间短和可用于大群动物的优点，应用前景广阔。

与 SF_6 示踪技术相同，GreenFeed 系统也可用于放牧、散栏和拴系式牛舍等饲养条件，能够用于大群动物，在拴系式牛舍条件下更易操作。测量周期根据研究目的制定，最多为 3~5 周（Hristov, et al. 2018）。对每只动物在特定时间点进行连续几天的采样，可提高测量结果的精确度；但如果此时间点不能代表全天 CH_4 排放规律，将不能在时间点和访问次数之间较难达到平衡，在特定时间点和不同时间点分别为动物提供饲料补充剂来诱导动物访问单元，特定时间的到访次数往往高于不同时间点，并受到所提供饲料类型的影响（Hammond, et al. 2015; Hammond, et al. 2016; Hammond, et al. 2016）。Arthur 等人（2017）对肉牛开展了 2 项研究，研究发现不一定要解决全天 CH_4 排放量变化

与访问分布不平衡的问题，只要每次测量时间 ≥ 3 min 并且总共测量次数达到 30 次，无论每天获得多少次测量均可获得可靠的 CH_4 排放数据。目前，通常连续测量 3 d 共 8 个测量时间点，两次测量间隔大约 6 h，每次先采集 5 min 动物气体再采集 2 min 环境气体（Hristov, et al. 2016）。

表 3-2 反刍动物 CH_4 排放量的直接测定方法及其应用特点

测量方法	优点	缺点	费用	发现、使用者
呼吸室法	活体动物个体实际测量值，数据准确，是“黄金标准”。	采食量和采食条件受到了严格的限制，测量时间短，无法测量放牧动物排放量。	高	Pinares-Patiño 等, 2011
头罩或面罩法	易佩戴、便于操作	不能测量动物后肠部分的 CH_4 排放量；佩戴头罩需要适应过程；无法测定自由放牧条件下的动物 CH_4 排放。	中高，低于呼吸室法	Garnsworthy 等, 2012)
示踪法-同位素法		准确度取决于示踪气体和被测气体混合的均匀性，由于该技术的实施影响人类健康，不利于在生产实践中推广。	高	
示踪法-非同位素示踪法 (SF_6 法)	精确度高；收集的气体样品纯度高，杂质少；动物可以自由活动，可用于群体性放牧家畜 CH_4 排放量的测定。	SF_6 是温室气体，若不能全部回收易造成污染；向瘤胃中投放渗透管，影响动物正常行为；渗透管中 SF_6 的释放速率对 CH_4 排放量的测定结果影响较大；测量过程中需要每隔 24h 就更换一次采气罐，容易对动物采食行为造成干扰。	适中	Zimmerman, 1993 Johnson, 1994
GreenFeed 系统	可用于放牧、散栏和栓系式牛舍等饲养条件，能够用于大群动物大群动物；短期测量；无侵入性	动物需要提前训练；受访问量影响大；采样时保证是同种动物	适中	Huhtanen 等, 2015

并不是所有动物都能频繁地访问系统单元（Waghorn, et al. 2013），与其他 CH_4 测量技术相似，动物需要训练。与呼吸室不同，该系统不推荐用于瘤胃

瘻管动物 (Garnett, et al. 2012), 因为通过瘻管可能会损失 CH_4 以及瘻管手术和 CH_4 泄漏将影响暖气峰形。虽然 GreenFeed 系统推出了适用于瘻管牛的“瘻管附件”, 能够成功地捕获通过瘤胃瘻管损失的气体, 并将气体引导至主气流, 但在使用瘻管附件时必须限制动物的活动。

动物访问系统单元时, 头部与取样口之间的距离由红外传感器确定, 头部相对于气流的位置对于成功测量 CH_4 非常重要。因动物可以自由移动, 所以只保留对头部位置准确定位和不间断测量的数据进行统计分析。GreenFeed 系统需要为动物提供饲料补充剂或其他“诱饵”, 诱使其访问系统单元。通过诱饵的种类和预计的访问时间确定饲喂量, 虽然控制了饲喂量, 但也有可能造成采食过多, 干扰试验结果 (Hammond, et al. 2015; Waghorn, et al. 2013; Dorich, et al. 2015)。在室外研究中, 风是另外一种影响 GreenFeed 装置的因素, 风速和风向的变化将影响气体采样率 (Huhtanen, et al. 2015)。但可安装风速仪记录测量期间的风速, 使用校正系数校正风对气体回收的影响, 排除风对 CH_4 排放速率测量的影响。在青年肉牛中的研究表明, 白天 CH_4 排放量 (263 g/d) 显著高于夜间 (216 g/d), CH_4 排放量与 DMI 呈明显的相关变化规律, 夜间采食量低时则 CH_4 排放量低, 在采食后和反刍期间 CH_4 浓度较高 (Hammond, et al. 2016)。因此, 需要在全天适当分配动物的访问量, 以准确测量全天 CH_4 排放量。访问的次数和时间点根据动物类型、日粮和 DMI 而有所不同, 如对于在一天内的访问次数少且不规律的动物, 则需要更长的访问时间 (Hammond, et al. 2016)。在拴系式牛舍中可以控制访问时间和次数, 在放牧条件下可通过延长 2 次测量的时间间隔来提高结果准确性 (Hristov, et al. 2018)。另外, 当动物正在访问系统单元时, 应避免其他动物靠近单元, 保证采样气体为单一动物源。所有试验动物访问系统单元充足的时间, 是能够测定出全天 CH_4 排放量以及降低测量值不确定性的一个重要前提。

从试验条件来看, 呼吸室改变了动物正常饲养状态, SF_6 示踪法虽然根据动物体型调整相应采样设备的尺寸、重量以及附件, 可以降低气体收集设备对动物的干扰, 但需要向瘤胃中投放渗透管, 并不可避免的经常与动物接触, 这将影响动物的正常行为 (Hammond, et al. 2016)。Green Feed 系统和 SF_6 方法均可用于大批量试验动物, 但 SF_6 示踪法的渗透管测试等前期准备工作较为繁琐, 而且 Green Feed 系统具有不影响动物行为的特点 (Miller, et al. 2015)。呼吸

室和 SF₆ 技术通常用于连续测量 24 h 以上的 CH₄ 排放量，而 Green Feed 系统测量时间短。因此，Green Feed 系统具有自动化、无创、非侵入性、测量时间短和可用于大批量动物的优点。虽然呼吸室和安装“瘻管附件”的 Green Feed 系统可以用于瘻管牛，但是 Moate 等人 (Moate, et al. 2013) 发现与非瘻管牛相比，瘻管牛的瘤胃上部空间气体成分发生了变化，CH₄ 产量降低了 10%。因此，瘤胃瘻管对所有的测定方法均有影响。

从试验数据来看，一项 Meta 分析显示，在同一试验中使用呼吸室法和 Green Feed 法测得的 CH₄ 排放量之间具有很强的相关性 ($R^2=0.92$) (Murray, et al. 1976)。Hammond 等人 (Hammond, et al. 2015) 表明使用 GreenFeed 系统测得的后备奶牛 CH₄ 排放量与呼吸室的测量值无差异，但低于 SF₆ 示踪法。而 Dorich 等 (Dorich, et al. 2015) 人发现，使用 GreenFeed 系统和 SF₆ 示踪法测量的泌乳牛的平均 CH₄ 排放量相似，但 SF₆ 示踪法在 CH₄ 排放速率和 DMI 之间的关系上显示出更高的可变性，SF₆ 测量结果的高可变性可能归因于环境气体的高浓度和牛舍通风不良。但 Hristov 等人 (Hristov, et al. 2015) 在带隧道通风的栓系式牛舍中，使泌乳奶牛在规定时间内访问 GreenFeed 系统，得出相似结果，即 SF₆ 示踪法平均标准偏差 (SD, g/kg DMI, 5.60 vs 3.63) 和变异系数 (CV%, 35.3 vs 27.2) 均高于 GreenFeed 系统。

GreenFeed 系统与 SF₆ 示踪法相比，其结果稳定性较强。Hammond 等人 (Hammond, et al. 2015) 发现使用呼吸室和 SF₆ 技术检测到的显著的处理间差异和个体动物间 CH₄ 排放差异，在 GreenFeed 系统数据中没有显现。这归因于使用 GreenFeed 装置获得的测量数量有限，导致测量时间不能代表 CH₄ 排放的日变化，突出了使用 GreenFeed 系统时获得足够测量数量的重要性。GreenFeed 法与 SF₆ 示踪法相似，所获得的测量值均不包括来自直肠排气的 CH₄ 排放量，但这些排放量较低，只占总排放量的 1%~3% (Muñoz, et al. 2012; Madsen, et al. 2010)。GreenFeed 法与 SF₆ 示踪法在正确使用和校准的前提下，均可产生准确的瘤胃 CH₄ 排放量测量值，对方法和装置改进的重视将会继续提高二者的准确性。

呼吸代谢室、SF₆ 示踪法和 GreenFeed 系统在正确、合理地使用情况下，均能产生准确的数据。通过三种方法的直接比较，表明各个方法仍然存在不确定

性。应当根据试验条件和目的选用合适的测量方法，严格遵守操作规范，获得精确及准确的结果。我国对呼吸代谢室（周艳，2018）和 SF₆ 示踪法（李斌昌，2019；王贝，2019）已有大量应用，然而 GreenFeed 系统具有无创伤、非侵入式和可用于大群动物的特点，有助于 CH₄ 减排措施的研究。

基于以上分析，对于内蒙古地区，散养户与规模化牧场并存的状态下，对于散养户家畜进行甲烷排放测定时，应用呼吸代谢室法比较困难，费用昂贵，使用头面罩和 SF₆ 示踪法等比较易于操作；而对于规模化牧场，经过对家畜进行驯化、增加家畜对 GreenFeed 的访问量的情况下，推荐使用 GreenFeed，提高 CH₄ 排放量测定的准确性。

3.3.2 间接测量法

间接法具有成本低、操作简单、短时间内可重复测量和适用范围广的优点，因此间接法也是一种选择，其主要分为 CO₂ 示踪法、嗅探器法和激光检测器法等。

3.4.2.1 CO₂示踪法

Madsen 等人（Madsen, et al. 2010）提出了用估算的 CO₂ 排放量和测量的呼出气体中 CH₄:CO₂ 的比值来测算动物 CH₄ 排放速率的方法。CO₂ 的排放量可以基于能量代谢、产热和呼吸熵或碳平衡来估算，呼出气体中 CH₄:CO₂ 的比值可通过便携式设备测量。

计算公式为：

$$\text{CH}_4 \text{ (g/d)} = \text{CO}_2 \times ([\text{CH}_4]_{\text{M}} - [\text{CH}_4]_{\text{BG}}) / ([\text{CO}_2]_{\text{M}} - [\text{CO}_2]_{\text{BG}})$$

式中，CO₂ 是估算的动物生产量（g/d）；[CH₄]_M 和 [CO₂]_M 分别为测定的呼出气体样品中 CH₄ 和 CO₂ 的浓度；[CH₄]_{BG} 和 [CO₂]_{BG} 是背景空气浓度。

CH₄:CO₂ 比值对结果至关重要，CH₄ 和 CO₂ 的排放量与 DMI 密切相关。另外，动物 CO₂ 的排放量即使在 DMI 相同的情况下，也会受到消化和代谢活动变化以及饲料利用率差异和瘤胃发酵变化的影响（Huhtanen, et al. 2015）。因此，CO₂ 示踪法与 GreenFeed 法相同，应当有足够的采样次数和时间点。样品气体的来源（呼出气体、直肠排气、粪便或卧床垫料的发酵等），以及由于动物活动和与饲料颗粒大小以及饲喂频率相关的发酵速率的差异而导致的 CH₄:CO₂ 比值的日变化，都会影响此方法的准确性（Madsen, et al. 2010）。

CH₄:CO₂比值的应用在某些方面与 SF₆示踪法相似，但与 SF₆示踪法相比，其示踪气体（CO₂）的排放量为估算值，而 SF₆示踪法采用瘤胃内渗透管中的示踪气体（SF₆）的释放率为已知并经校准。另外，此方法估算的 CO₂产量只能代表某个时间点，并不是全天综合测量。Haque 等（Haque, et al. 2017）分别用此方法估算和用呼吸室法测量的 CO₂产量计算 CH₄产量，结果表明，与呼吸室法相比，此方法的 CH₄产量的组间差异较小并改变了处理组间的显著差异性。Hellwing 等（Hellwing, et al. 2012）将此方法与呼吸室法相比，此方法显著低估了 CH₄的排放量（降低了 17%）。需要改进对动物因素引起的 CO₂排放量的日变化的预测，以获得更加准确的个体动物 CH₄排放量估算值。虽然 CO₂示踪法不及“黄金标准”的呼吸代谢室法准确，但其操作简单也不受场地限制，具有更强的灵活性。

3.4.2.2 嗅探器法

Garnsworthy 等（Garnsworthy, et al. 2012）提出了另一种间接法—嗅探器法，通过估算动物的暖气频率和暖气中的 CH₄含量，进而算出 CH₄排放量。在自动挤奶系统的喂料槽中安装取样口，每隔 1 s 对料槽空气中的气体浓度进行连续取样、分析和记录。程序识别和量化 CH₄浓度峰值（暖气）和峰值频率（暖气频率），计算每只动物每次挤奶时的 CH₄排放速率（MER），即每分钟暖气次数乘以暖气峰面积。使用经校准的气体释放量，在每个采样周期结束时估算暖气稀释率。计算公式如下：

$$\text{CH}_4 \text{ (mg/L)} = (\text{暖气峰面积} \times \text{暖气频率}) \times \text{稀释因子}$$

对于测量呼出气体中气体浓度的嗅探器技术，动物头部距采样点的距离对 CH₄和 CO₂浓度的影响巨大。即使是头部位置的微小变化也会在测量的气体浓度上产生很大的差异，CH₄浓度的变化与头部移动和位置的差异以及喂料槽几何形状产生的可变空气混合状态相关联，而不是 CH₄排放量（Hristov, et al. 2018）。Wu 等人（Wu, et al. 2018）还提出了牛只呼气速率之间的差异也可导致系统误差。呼出气体中 CH₄浓度的重复性与每次挤奶过程中头部位置和行为的重复性具有简单的关联性。比如测得牛只的 CH₄排放量较低，其实质原因可能是牛只在挤奶过程中不安宁或者习惯将头部远离采样管。另外需要关注的是，单个牛只在每次挤奶时由于产奶量、胎次、同时挤奶的奶牛数量和牛群社会优势等因素造成的行为差异，采食量和饲喂方式的差异（Lyons, et al. 2018），以及采样时

间的差异，将影响结果的重复性和准确性。牛只呼出气体中的 CH_4 相对于 CH_4 总产生量的比例，在动物之间有一定的变化范围，这也将对试验结果造成影响。

有研究表明，同一动物在牧场挤奶期间的 MER 与在呼吸室内测得的每日总 CH_4 排放量之间存在正相关关系 ($R^2=0.79$, $P<0.001$) (Garnsworthy, et al. 2012)。但 Huhtanen 等人 (Huhtanen, et al. 2015) 发现，在两项奶牛试验中其可变性均较大，并且与 GreenFeed 系统法的结果没有相关性。Van Engelen 等人 (Van Engelen, et al. 2018) 在自动挤奶系统中使用嗅探器法测出空气中 $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ 的平均值和变异系数分别比 Aubry 等人 (Aubry, et al. 2015) 的结果高出约 2 倍和 5 倍，在生物学上都是不现实的，其原因有待进一步探究。该方法遗漏了呼气中的 CH_4 排放量；另外，奶牛间 CH_4 排放量的真实变化太小，嗅探器方法精度较低，所以需要进一步改进以得到可靠的测量值。但是嗅探器法在长时间条件下，只需较少的费用就可进行数百次的重复测量。

3.4.2.3 激光检测器法

激光 CH_4 检测器基于 CH_4 的红外吸收光谱原理，在距动物大约 1~3 m 范围内，可以测量出装置与动物间的空气中的 CH_4 浓度。数据采集程序为连续 2~4 min 的短时间测量，结果由一系列代表动物呼吸周期的峰值组成。仅使用由于呼气或暖气导致 CH_4 浓度增加的峰值进行分析，测量的气体浓度根据采样距离和背景空气浓度进行调整 (Ricci, et al. 2014)。

激光检测器法没有采集气体样品，而是对动物呼吸的实时测定。结果为由于呼吸的生物力学和测量装置的正常波动而产生的自然波动，波动除了正常的呼吸周期外，还包括阵发性的反刍片段以及微小的波峰和波谷。呼吸周期从最大峰值中获得，微小的波峰和波谷不会影响测量结果，完整呼吸周期内的波动可以用滚动平均法或数据平滑方法来调整 (Chagunda, et al. 2013)。虽然激光检测器法可以很容易地获得 CH_4 浓度的平均值，但为了改进激光检测器法数据与呼吸室数据之间的相关性，并提高检测单个动物之间 CH_4 排放差异的技术灵敏度，需要将收集的数据分为呼气 and 暖气 CH_4 (Hammond, et al. 2016)。可用每个测定周期的标准差作为阈值，从而将反刍片段从呼吸周期中分离。风向会影响测量结果，导致测量值由大到小的风向分别为顺风、侧风和逆风，并且风速与测量值呈显著逆相关。激光检测器法与呼吸代谢室法之间只存在较弱的正

相关关系 (Ricci, et al. 2014; Chagunda, et al. 2013)。其准确性受温度、风速、湿度和邻近动物等因素的影响, 并且研究人员需要频繁地接触动物也将带来差异。但是该方法不受头部位置影响且测量速度快, 可以在饲养场和大群试验动物条件下应用, 只要动物保持足够时间的静止, 在挤奶和采食等情况下均可测量。

3.4.2.4 间接测定法的特点及应用

CO₂示踪法、嗅探器法和激光 CH₄检测器法的特点简要介绍如下表 3: CO₂示踪法是估算的动物生产量 (g/d), 其 CH₄和 CO₂受呼出气体样品中 CH₄和 CO₂的浓度和背景空气浓度的影响, 而且 CH₄和 CO₂的排放量与 DMI 密切相关。嗅探器法动物头部距采样点的距离对 CH₄和 CO₂浓度的影响巨大。激光 CH₄检测器法基于 CH₄的红外吸收光谱原理, 测量的气体浓度根据采样距离和背景空气浓度发生改变。对于内蒙古地区, 散养户大量存在的状况下, 间接法不易广泛使用; 规模化养殖场内激光 CH₄检测器法更易于使用。

表 3-3 反刍动物 CH₄排放量的间接测定方法及其应用特点

测量方法	优点	缺点	费用	发现/使用者
CO ₂ 示踪法	操作简单, 成本低	CO ₂ 产量为估计值; 饲料利用率差异和瘤胃发酵变化、动物活动、饲料颗粒大小以及饲喂频率等影响, 精确度低	低	Madsen, 2010
嗅探器法	操作简单, 短时间内可重复测量	忽略了呼气中 CH ₄ 排放量; 动物头部距采样点的距离对 CH ₄ 和 CO ₂ 浓度的影响巨大, 单个牛只在每次挤奶时由于产奶量、胎次、同时挤奶的奶牛数量和牛群社会优势等因素造成的行为差异、采食量和饲喂方式的差异以及采样时间的差异, 将影响结果的重复性和准确性。因此, 精确度低。	低	Garnsworthy 等, 2012; Bell 等, 2014
激光检测器法	适用范围广, 不受头部位置影响且测量速度快, 可以在饲养场和大群试验动物条件下应用。	准确性受温度、风速、湿度和邻近动物等因素的影响, 并且研究人员需要频繁地接触动物也将带来差异, 因此精确度低。	低	Ricci 等, 2014

3.3.3 群体和大规模尺度上的测定方法

目前在牧场或大规模群体放牧条件下使用，测量放牧家畜肠道 CH₄ 排放量的方法主要有：开放式傅里叶红外光谱变换法（FTIR）、开放式激光技术、与微气象模型相关联的质量平衡与流量梯度变换法、逆向离散法等，这些技术主要适用于 0.2-2.0 公顷牧场环境范围内或放牧率超过 30 只/公顷的，可长达 2 周测量期的放牧家畜肠道 CH₄ 排放量的测定（Dengel, et al. 2011; Mcginn, et al. 2015）。

而针对群体动物肠道排放测定的开放式微气象学测量法，则容易受到动物个体肠道 CH₄ 排放量、动物个体和群体行为过程，以及当地气候条件变化的影响，而这些变化可能不是生物过程，而是小气候效应，如温度、饱和蒸汽压以及低风速变化等（Flesch, et al. 2004）。所以如果在计算动物肠道甲烷每日总排放量时，因缺乏适当的数据质量程序，每只动物的总排放量就可能被夸大。因此需要进一步在控制条件下，进行气体排放量的测定验证性研究（如呼吸室法、示踪法），以便对现场排放测量技术的准确性进行评价。

3.4 温室气体排放量的计算与预测

3.4.1 肠道 CH₄ 排放量计算

反刍动物瘤胃甲烷产生量估测模型的建立国内外已经进行了大量的研究并得到广泛的应用。内蒙古属于我国重要的畜牧业地区，畜牧业温室气体的排放对我国碳排放量的贡献度不可忽视。由于内蒙古地域辽阔，不同地区水土资源、草原类型、牧草种类、环境等都存在差异，因此，了解内蒙古地区反刍动物甲烷产生量的估测方法，对进一步提出符合本地区的甲烷调控措施很有必要。

目前，一些国家通常使用 IPCC Tier 2 方程来评估动物胃肠道 CH₄ 排放量，计算公式： $CH_4 = Y_m \times GEI$ 。

式中，CH₄ 是胃肠道 CH₄ 排放量，单位为 MJ/头·d；Y_m = CH₄ 转换因子，定义为 GEI 的百分比；GEI 是摄入总能。

虽然总能（GE）可以用氧弹法测定，但这种分析方法繁琐。IPCC 指南通过确定机体维持净能来估算 GEI，然后使用估算的能量消化率和可消化能量利用效率将其与 DMI 联系起来。确定 GEI 和 Y_m 所涉及的步骤在估算胃肠道 CH₄ 排放

量时会引起误差。将 Y_m 作为恒定值是主要原因，因为它随着 DMI 和 DM 消化率的变化而发生较大变化 (Charmley, et al. 2016)，它可以是 3%到 10%之间的任意值 (Mills, et al. 2003)。饲料质量、生产水平 (与 DMI 相关) 和饲料结构等因素均影响以 CH_4 形式造成的能量损失比例 (Moraes, et al. 2014; Jayasundara, et al. 2016)。因此，设定一个常数 Y_m 可能会导致 CH_4 排放量估算中相当大的不确定性，特别是在具有不同生产系统的地区。如北美奶牛的平均 Y_m 为 5.4%至 5.7%，欧洲 Y_m 在 6.0%到 6.9%之间，澳大利亚和新西兰该值 (6.6%) 更接近 IPCC 推荐值 (Hristov, et al. 2018)。近年来国内已有相关研究，王贝等 (王贝等, 2019; 王贝等, 2019) 试验表明泌乳中期荷斯坦奶牛的 Y_m 高于泌乳高峰期荷斯坦奶牛，董利锋和李斌昌等 (董利锋, 等. 2020; 李斌昌, 等. 2019) 研究表明日粮结构显著影响荷斯坦泌乳后备牛的 Y_m 。因此， CH_4 排放因子估算内蒙古地区家畜胃肠道 CH_4 排放量的模型，不能一层不变，应该根据地域、品种、生育期、饲料等多种因素考虑，推断出符合本地区的 Y_m 值，以期准确估算出本地区 CH_4 排放量。为此，郭雪峰 (2008) 利用内蒙古白绒山羊进行了甲烷排放量的研究，通过测定内蒙古荒漠化草原上内蒙古白绒山羊经常采食的 4 科 31 种牧草常规营养成分，并按照康乃尔净蛋白碳水化合物体系 (CNCPS) 的指标对饲料营养素进行进一步划分，同时利用体外培养技术 (IVGPT) 在体外培养条件下测定每种牧草的甲烷产生量，结果表明：甲烷产生量与牧草中蛋白质含量、体外干物质消化率、体外干物质消失率均呈正相关关系，但蛋白质的中速降解部分除外。甲烷产生量与牧草中的纤维部分、碳水化合物、碳水化合物中的各部分均呈负相关关系；蛋白中的中速降解部分可能含有某种抑制甲烷产生的物质。菊科和禾本科牧草中含有的可利用细胞壁部分与甲烷产生量呈正相关关系。经过数据分析建立由饲草营养指标估测内蒙古白绒山羊甲烷产生量的如下数学模型：

$$\text{豆科} : Y = -3.108 - 1.594CP + 0.855NDF - 1.193ADF - 0.102IVDMR + 1.266IVDMD$$

$$(n=7, R^2 = 0.999)$$

$$\text{藜科} : Y = 69.544 - 1.059CP - 0.473NDF + 0.618ADF + 0.812ADL - 1.333NFE + 0.349IVDMD$$

$$(n=10, R^2 = 0.940)$$

$$\text{菊科} : Y = 100.117 + 0.687CP - 1.139ADF - 0.224IVDMR - 0.575IVDMD \quad (n=6, R^2 = 0.995)$$

禾本科： $Y=199.864+1.140CP-3.172NDF+1.417ADF-1.725ADL-0.845IVDMR$
 $+0.178IVDMD$ (n=8, $R^2=0.984$)

式中，CP 是牧草粗蛋白含量 (%)；NDF 是牧草中性洗涤性纤维含量 (%)；ADF 是牧草酸性洗涤性纤维含量 (%)；IVDMR 是干物质消失率；IVDMD 体外消化率；ADL 是酸性木质素含量 (%)；NFE 是无氮浸出物。

同时，利用 CNCPS 划分指标的相关性分析得知：甲烷产生量与蛋白质部分、体外干物质降解率及消化率呈正相关性关系，而与碳水化合物除 CB2 外均呈负相关关系。通过牧草常规营养成分建立体外法估测甲烷产生量的模型分别为：

豆科： $Y=88.501-3.234CA+0.577CB1-1.731CC+6.249PB1+40.381PB3-43.412PC$
(n=7, $R^2=0.999$)

藜科： $Y=54.5924+0.828CB1-0.193CC-2.130PA-0.565PB1+16.082PB3-15.717PC$
 $-0.161CHO-0.431NFC$ (n=10, $R^2=0.986$)

菊科： $Y=38.783+0.130CB1-0.124CB2-0.529CC+1.051PB3-1.714PC$
(n=6, $R^2=0.999$)

禾本科： $Y=-410.282+0.530CA+3.613CB2+19.284CC-161.365PA+54.942PB1$
 $-89.731PB3+45.747PC$ (n=8, $R^2=0.999$)

式中，CA 指快速降解糖含量；CB1 指中速降解淀粉和果胶含量；CC 指不可利用的细胞壁碳水化合物；PB1 指在瘤胃中的快速降解蛋白质部分；1PB3 指在瘤胃中的慢速降解蛋白质部分；PC 指不可利用的蛋白质部分；PA 指非蛋白氮部分；CHO 指碳水化合物；NFC 指非纤维性碳水化合物；CB2 指慢速降解的细胞壁碳水化合物。

内蒙古地区放牧白绒山羊甲烷排放量的核算因子中，牧草种类、营养含量、干物质消失率、体外消化率以及无氮浸出物含量都是影响甲烷生成的因素。在掌握牧草种类的情况下，分析出对应的指标就可以估算出甲烷排出量。或者能够分析出快速降解糖含量、中速降解淀粉和果胶含量、不可利用的细胞壁碳水化合物、在瘤胃中的快速降解蛋白质部分、在瘤胃中的慢速降解蛋白质部分、不可利用的蛋白质部分、非蛋白氮部分、碳水化合物、非纤维性碳水化合物、慢速降解的细胞壁碳水化合物等含量，也可以估算出甲烷排出量。

李霞（2007）利用体外培养法，结合双峰驼采食牧草的营养成分和甲烷产生量的数据进行分析统计，建立了内蒙古双峰驼甲烷产生量的预测模型：

$$\text{CH}_4 (\text{g/kgDM}) = 36.47 - 0.25\text{NFE} + 0.26\text{NDF} - 0.90\text{CP} \quad (R^2 = 0.824) \quad (p < 0.01)$$

$$\text{CH}_4 (\text{g/kgDM}) = 49.881 - 0.037\text{Hemi} - 1.055\text{CP} + 0.201\text{Ce1} - 0.462\text{NFE} \\ (R^2 = 0.781) \quad (p < 0.01)$$

式中，NFE 是无氮浸出物含量 (%)；NDF 是牧草中性洗涤性纤维含量 (%)；CP 是牧草粗蛋白含量 (%)；Hemi 是半纤维素含量 (%)；Ce1 是纤维素含量 (%)。

内蒙古地区双峰驼甲烷排放量的核算因子中，饲料中无氮浸出物、中性洗涤性纤维含量、粗蛋白含量、半纤维素含量、纤维素含量是影响双峰驼甲烷生成量。

目前内蒙古地区对白绒山羊和双峰驼肠道甲烷的排出量进行了研究并建立了预测模型，而对于奶牛和肉牛的肠道甲烷排放量的估算采用 IPCC 建议的方法 2，基于家畜总能摄入计算肠道 CH₄ 排放因子。

计算公式如下： $EF = GE \times (Y_m / 100) \times 365 / 55.65$

式中：EF 为排放因子，kg / 头 · a 即每个动物每年排放的甲烷重量；GE 为摄入总能，(10⁶J/d)；Y_m 为 CH₄ 转化因子；55.65 为 (10⁶J/kgCH₄) CH₄ 的能量含量。内蒙古全区奶牛和肉牛肠道 CH₄ 排放因子分别采用了杨彦明等人(2011)的计算结果，见表 4。

表 3-4 内蒙古奶牛和肉牛肠道 CH₄ 排放因子 (EF)

畜禽种类	奶牛	肉牛
体重 (kg/头)	686.00	375.00
平均日增重 (kg/头 d)	0.00	0.45
平均产奶量 (kg/d)	4.50	0.00
乳脂率 (%)	3.60	0.00
平均日工作量 (h/d)	0.00	0.96
维持净能 (MJ/d)	51.74	31.53
活动净能 (MJ/d)	0.00	5.36
生长净能 (MJ/d)	0.00	5.92
泌乳净能 (MJ/d)	13.09	0.00
挽力净能 (MJ/d)	0.00	3.03
妊娠净能 (MJ/d)	5.174	3.153
总能 (MJ/d)	169.09	121.35
CH ₄ 转化因子 (Y _m)	6.58	6.61
CH ₄ 排放因子 (kg/头 a)	72.98	52.61

(注：资料来源于《内蒙古自治区主要畜禽甲烷排放现状及对策》，杨彦明等，2011)

家畜肠道发酵甲烷排放量计算公式如下：

$$\text{CH}_4 \text{ 肠道} = \Sigma (\text{EF}(\text{T}) \times \text{N}(\text{T})) / 10^6$$

式中： CH_4 肠道：肠道发酵 CH_4 排放量，Gg/a，即肠道发酵的甲烷重量（ $1\text{Gg}=10^9\text{g}$ ）； $\text{EF}(\text{T})$ 为来自某种限定家畜的排放因子， $\text{kg}/\text{头} \cdot \text{a}$ ； $\text{N}(\text{T})$ 为家畜类别 T 的数量；T 为家畜的类别。

绵羊、山羊和非反刍动物（马、骡、驴）及非家禽单胃家畜（猪）等非关键排放源采用 IPCC 方法 1。IPCC 方法 1 建议的肠道发酵的缺省排放因子见表 5。排放因子间的差别主要来自于采食量和饲料特征。

表 3-5 IPCC 推荐肠道发酵排放因子（ $\text{kg}/\text{头 d}$ ）

家畜	发达国家	发展中国家	活体重（kg）
绵羊	8	5	65（发达）45（发展）
山羊	5	5	40
骆驼	4646	570	
马	18	18	550
驴/骡	10	10	245
猪	1.5	1	

注：资料来源于 IPCC（2006）

3.4.2 家畜粪便管理系统甲烷（ CH_4 ）排放的估算

家畜粪便中的有机质在厌氧条件下，被微生物分解会产生大量的 CH_4 。粪便量、温度、存留时间及粪便管理形式是影响其排放的主要因素。源自家畜粪便管理甲烷排放量计算公式如下：

$$\text{CH}_4 \text{ 粪便} = \Sigma (\text{EF}(\text{T}) \times \text{N}(\text{T})) / 10^6$$

式中： CH_4 粪便为某种限定种群粪便管理中的 CH_4 排放，G g/a； $\text{EF}(\text{T})$ 为某种限定家畜种群的排放因子， $\text{kg}/\text{头} \cdot \text{a}$ ； $\text{N}(\text{T})$ 为家畜类别 T 的数量；T 为家畜的类别。

根据现有数据，计算出我国不同动物在不同区域下，粪便管理 CH_4 排放因子，见下表。

表 3-6 粪便管理 CH_4 排放因子

区域	奶牛	非奶牛	绵羊	山羊	马	驴/骡	骆驼
华北	7.46	2.82	0.15	0.17	1.09	0.60	1.28

注：资料来源于低碳发展及省级温室气体清单编制培训教材（2013）

3.4.3 家畜粪便管理系统氧化亚氮 (N₂O) 排放的估算

粪便管理系统 N₂O 的排放产生于粪便中氮素的硝化和反硝化作用。排放量取决于粪便中的氮和碳含量，以及储存的时间和管理方式。源自家畜粪便管理氧化亚氮排放量计算公式如下：

$$E_{N_2O}(T) = EF_{N_2O}(T) \times N(T) \times 10^{-6}$$

式中：E_{N₂O}(T) 为家畜类别 T 粪便管理 N₂O 排放量，G g/a；EF_{N₂O}(T) 为家畜类别 T 粪便管理 N₂O 排放因子，kg/头·a；N(T) 为家畜类别，T 为数量（头或只）。根据现有数据，计算出我国不同动物在不同区域下，粪便管理 N₂O 排放因子。见表 7。

表 3-7 粪便管理 N₂O 排放因子

区域	奶牛	非奶牛	绵羊	山羊	马	驴/骡	骆驼
华北	1.846	0.794	0.093	0.093	0.330	0.188	0.330

注：资料来源于低碳发展及省级温室气体清单编制培训教材（2013）。

3.4.4 IPCC 预测模型

内蒙古白绒山羊和双峰驼肠道甲烷排出量进行了本地的排放因子及预测模型的建立，而对于其他家畜甲烷排放量的估算，还未见有完整的预测模型，还是采用比较使用广泛的 IPCC 预测模型估算。

3.4.4.1 IPCC 计算方法 1

IPCC 给出的反刍动物肠道 CH₄ 排放因子及其计算方法（表 8），其通常都是根据动物类别、日采食量以及日粮的营养成分进行计算的。

$$E = \sum EF_T \cdot N_T / 10^{12} EF$$

其中，E 为反刍家畜胃肠道的 CH₄ 排放总量（Tg/年）；EF_T 为 T 类反刍家畜的胃肠道 CH₄ 排放系数（kg/头/年）；N_T 为反刍家畜 T 的年末存栏量（万头或万只）；T 为反刍家畜的种类。

表 3-8 主要反刍家畜胃肠道 CH₄ 排放系数

家畜种类	肠道 CH ₄ 排放系数
奶牛	68
黄牛	47.8
绵羊	5
山羊	5

注：资料来源于 IPCC（2006）。

IPCC 推荐使用 6.5%作为 CH₄ 排放因子并给出了一个假定的 GE 值，而且根据计算过程可以看出，CH₄ 排放量是根据各个国家和地区的反刍动物数量进行计算的，因此，每类动物数量的不确定性是造成计算结果出现差异的主要原因（Mccartney, et al. 2014; Herrero, et al. 2016）。

3.4.4.2 IPCC 计算方法 2

IPCC 计算方法 2，需要更多的信息来确定 CH₄ 排放因子，如饲料的消化率和营养含量。目前，CH₄ 排放因子主要是通过呼吸室代谢室中进行具体的试验测量后进行确定的，但随着新技术的使用，这些 CH₄ 排放因子将会得到持续的更新。同时模型还需要确定与特定地区/国家的牛的生产有关的饲料和能量摄入。而且从 CH₄ 排放因子的计算过程可以看出，IPCC 引入了家畜采食总能这一重要变量，从而使计算过程中所考虑的对 CH₄ 排放的影响因素更加全面，但仍然会因每类动物的采食特征和动物生长曲线不同而产生较大偏差。因此 IPCC 认为，方法 1 估算的全球不确定性为±50%，方法 2 比方法 1 显著改善，其不确定性仅为±20%。采用方法 2 计算出的主要反刍动物牛、羊的 CH₄ 排放因子的计算公式如下所示：

$$EF = GE_x (Y_m / 100) \times D / 55.65$$

$$GE = [(NE_m + NE_a + NE_l + NE_{mob} + NE_p / REM) + (NE_g / REG) / (DE\% / 100)]$$

式中，EF 是不同反刍家畜胃肠道的 CH₄ 排放系数（kg/头/年），GE 是每类家畜的日均采食总能（MJ/头/天），Y_m/100 为饲料中 GE 转化为甲烷能的百分比，Y_m 值的大小取决于动物对日粮中各营养物质的消化率，IPCC 建议牛的 Y_m 值为 2%~7.5%，对应的消化率为 45%~85%。D 为测定的天数，55.65 为甲烷能的转换系数（MJ/kg）；GE 的计算过程中，NE_m、NE_a、NE_l、NE_{mob}、NE_p、NE_g 分别为家畜的维持净能、活动净能、泌乳净能、劳役净能、妊娠净能以及生长净能，REM 为动物日粮中可供维持的净能与可消化能的比值；REG 为日粮中可供生长的净能与可消化能的比值，DE%/100 为日粮的可消化能占 GE 的比例（Doyle, et al. 2019）。此外，在方法 2 中，反刍家畜胃肠道 CH₄ 排放因子是基于动物日均采食总能（GE，MJ/d）和 CH₄ 之间的转化效率进行计算的。比如牛 CH₄ 排放量的计算过程中，将牛分为两个主要类别，即奶牛和其他品种的牛（包括肉牛，公牛，育肥牛和牛犊），但这些其他品种牛则根据性别、年龄和喂养情况进一步

进行细分。因此，GE 的默认值是由动物体重、平均日增重、日粮消化率、妊娠状态、饲喂水平和不同区域内奶牛产奶量的值生成的。对于以饲草料为基础日粮的奶牛和其他牛，奶牛 GE 与 CH₄ 之间假定的转化效率为 6.5%±1%，而育肥牛则为 3%±1%，据此估算出的奶牛 CH₄ 排放量，其变换范围也从非洲和中东的 40 kg/头/年到北美洲的 121 kg/头/年，而其他品种的牛默认的区域 CH₄ 排放因子的变化范围则从印度次大陆的 27 kg/头/年到大洋洲的 60 kg/头/年。此外，在方法 2 中，则对 GE 值中涉及的国家和或次区域/省级值等相关参数进行了量化。

3.4.5 畜牧业非二氧化碳温室气体预测模型

3.4.5.1 干物质采食量

在全球网络数据库中显示，CH₄ 预测模型中的变量越多，其结果越准确。然而，Fernández 等 (Fernández, et al. 2020) [96] 和 Hristov 等人 (Hristov, et al. 2017) 研究发现，仅 DMI 的简单预测模型与较复杂模型相比，预测能力无差异。因此，国际上很多研究者认为测定 DMI 就可以预测胃肠道 CH₄ 排放清单。而 Appuhamy 等 (Appuhamy, et al. 2016) 使用包含实测的 DMI 和饲料特征属性的数据评估了 40 个预测方程。然后再使用估测的 DMI 重新评估每个区域 (北美、欧洲、澳大利亚和新西兰) 中表现最好的模型，并与使用实测 DMI 得到的预测值进行比较。对于北美地区，DMI 估测值可以一样能够很好地预测 CH₄ 排放量；对于欧洲，使用 DMI 估测值比 DMI 测量值能够更好地预测 CH₄ 排放量；而对于澳大利亚和新西兰，DMI 估测值预测 CH₄ 排放量的效果不佳。可能因为预测模型是根据北美地区数据得到的，无法适用于澳大利亚和新西兰采食牧草较多的放牧牛只。还有研究者认为 CH₄ 排放量实测值与 DMI 之间的决定系数是高度可变的，受 DMI 数据值范围和 CH₄ 排放量检测方法等因素的影响。DM 数据值范围方面，Charmley 等 (Charmley, et al. 2016) 选择来自澳大利亚的肉牛及奶牛共 1033 个测量数值作为数据集，研究表明 CH₄ 排放量和 DMI 之间具有较强的相关性 ($R^2=0.92$)。当 DMI 数据值范围定为 2~28 kg/d 时，截距接近于零；当数据值范围缩小为 DMI > 15 kg/d 时，CH₄ 排放量和 DMI 之间关系 R^2 降低至 0.41，RMSPE 增加至 68.2。DMI 数据值范围越广，他们之间的关系越强 (Charmley, et al. 2016; Hristov, et al. 2013)；DMI 数据值范围越窄，关系越弱 (Hristov, et

al. 2015)。CH₄排放量检测方法也会影响决定系数 R²，Grainger 等（Grainger, et al. 2007）对奶牛数据进行了 Meta 分析，采用 SF₆ 技术测量的 CH₄ 排放量和 DMI 之间的决定系数 R² = 0.56，而采用呼吸测热室测量的 CH₄ 排放量和 DMI 之间的决定系数 R²=0.39。在 Hristov 等（Hristov, et al. 2015）的奶牛试验中表明，GreenFeed 系统与 SF₆ 技术之间具有差异，得到的 CH₄ 排放量和 DMI 之间的 R² 分别为 0.47 和 0.08。Niu 等（Niu, et al. 2018）研究发现，与呼吸测热室相比，采用 GreenFeed 系统与 SF₆ 技术得到的 CH₄ 排放量和 DMI 之间的相关性较弱。

基于以上结果，对于中国地区用 DMI 值预测 CH₄ 排放量，还需要进一步进行验证后再使用。

3.4.5.2 血液胰岛素及乳中脂肪酸浓度

反刍动物 CH₄ 排放量和血液代谢产物均受到日粮类型和 DMI 的影响，所以 CH₄ 排放量和血液代谢产物之间可能存在某些相关性。Ornelas 等（Ornelas, et al. 2019）在奶牛试验中表明，高 CH₄ 产量组牛只与低 CH₄ 产量组相比，其具有较高的血液胰岛素浓度（39.8 vs 30.6 μIU/mL）和较低的葡萄糖/胰岛素比值（0.13 vs 0.17 mmol/L/μIU/mL）。在随后的相关性分析中显示，牛只 CH₄ 产量与血液胰岛素浓度和葡萄糖/胰岛素比值均具有中等强度的相关性，R² 分别为 0.54 和 0.52，认为血液胰岛素浓度具有作为奶牛 CH₄ 排放量标志物的潜力，具体关系还有待进一步探究。瘤胃中的发酵还导致产生挥发性脂肪酸（VFA），VFA 是乳腺中合成短链和中链脂肪酸的前体物质。此外，某些 VFA 产生途径（例如乙酸或丁酸）会导致 H₂ 的产生，而丙酸产生途径会使用 H₂，产 CH₄ 菌也会利用 H₂ 产生 CH₄。因此，瘤胃发酵和 CH₄ 生成与牛奶脂肪酸成分之间存在直接的相互作用。Van Lingen 等（Van Lingen, et al. 2014）采用 Meta 分析法得出牛奶脂肪酸成分与瘤胃 CH₄ 排放量之间呈中等强度关系。

3.4.5.3 其他预测模型

反刍动物肠道甲烷排放量的估算，除了上述 IPCC 推荐的方法之外，还有许多国家和地区肠道甲烷的排放清单是以本区域为基础所开发的数学预测模型进行计算的，这些模型对预测 CH₄ 的产量和制定缓解策略产生了非常重要的作用。这些预测反刍动物肠道 CH₄ 排放量的模型，大多数是基于单个或者几次试验室的测定数据而建立的。经过不断摸索，现在已经建立了不同的计算模式（见表

9)，这些模型中，有的只需要使用家畜的采食量即可，有的需要结合采食量与营养成分的比例。因此，没有一个是预测模型完美的，对于这些预测模型的使用都需要仔细考虑之前的应用实践和使用条件，因而深入了解这些方法的优缺点，对于我们开展后续的试验研究，理解和解释试验结果，并与其他研究进行比较后得出正确的结果是非常重要的。因此，如何使用合理的预测模型准确动物估计肠内 CH₄ 排放量，既取决于研究对象、目标、设备等基本情况，也取决于研究时的知识储备、时间以及可用资金等因素，但如果在研究开始前能够详细了解并掌握这些预测模型的优缺点，则可以起到事半功倍的效果，从而得到正确的研究结果。

表 3-9 不同家畜 CH₄排放量预测模型

预测方程	参考文献	家畜种类	R ²
$CH_4(g/d) = (18 + 22.5 \times DMI) \times 0.013$ (Mcal/g of methane)	(Kriss, 1930)	牛	0.94
$CH_4(g/d) = 1.30 + 0.112 \times D - L \times (2.37 - 0.05 \times D)$	(Blaxter and Clapperton, 1965)	牛、羊	-
$CH_4(MJ/d) = 0.51 \times NFC + 2.14 \times HC + 2.65 \times C + 3.38$	(Moe and Tyrrell, 1979)	奶牛	-
$CH_4(g/d) = 79 \times CF + 10 \times NFE + 26 \times CP - 212 \times Cfat + 63$	(Kirchgeßner 等, 1995)	牛	0.69
$CH_4(MJ/d) = 0.92 \times DMI + 5.93$	(Mills 等, 2003)	奶牛	0.60
$CH_4(MJ/d) = 0.07 \times ME + 8.25$	(Mills 等, 2003)	奶牛	0.55
$CH_4(MJ/d) = 10.27 \times forage(\%) + 0.87 \times DMI + 1.06$	(Mills 等, 2003)	奶牛	0.61
$CH_4(MJ/d) = 13.13 \times N + 2.04 \times ADF + 0.33 \times Starch + 7.30$	(Mills 等, 2003)	牛	0.57
$CH_4(L/d) = 0.34 \times BW + 19.7 \times DMI + 12$	(Yan 等, 2006)	奶牛	0.77
$CH_4(L/d) = 47.8 \times DMI + 0.76 \times DMI^2 + 41$	(Yan 等, 2006)	奶牛	0.75
$CH_4(MJ/d) = 0.14 \times forage(\%) + 8.6$	(Ellis 等, 2007)	牛	0.5
$CH_4(kJ/d) = 1.62 \times d CP - 0.38 \times d Cfat + 3.78 \times d CF + 1.49 \times d NFE + 1142$	(Jentsch 等, 2007)	牛	0.90
$CH_4(g/d) = 18.5 \times DMI - 9.5$	(Grainger 等, 2007)	奶牛	0.56
$CH_4(g/d) = 16.7 \times DMI + 3.1$	(Zhao 等, 2016)	羊	0.86
$CH_4(g/d) = 18.8 \times DMI + 5.0 \times DE - 4.9 \times ME - 9.9$	(Zhao 等, 2016)	羊	0.93
$CH_4(g/d) = 0.34 \times BW + 151 \times DM + 24.5 \times GE - 463 \times OM - 1.124 \times N - 23$	(Zhao 等, 2016)	羊	0.63
$CH_4(g/d) = 36.31 \times d DMI(kg/d) - 3.9$ ，(春季)	(Demarchi 等, 2013)	牛	0.92
$CH_4(g/d) = 18.11 \times d DMI(kg/d) + 53.64$ ，(冬季)	(Demarchi 等, 2013)	牛	0.53
$CH_4(g/d) = 22.4 \times DMI(kg/d) + 26.4$ ，(春季)	(颜志成等, 2015)	奶牛	0.90
$CH_4(g/d) = 17.0 \times DMI(kg/d) + 11.1$ ，(冬季)	(颜志成等, 2015)	奶牛	0.30

预测方程	参考文献	家畜种类	R ²
$CH_4(g/d) = 61.7 + 9.25 \times NDS(kg/d) + 48.0 \times Cel(kg/d) + 31.5 \times Hemi(kg/d)$	(Moe and Tyrrell, 1979)	奶牛	0.67
$CH_4(g/d) = 33.3 + 20.7 \times d NDS(kg/d) + 106 \times d Cel(kg/d) + 38.8 \times d Hemi(kg/d)$	(Moe and Tyrrell, 1979)	奶牛	0.73
$CH_4(L) = 0.297 \times FNDF(kg) + 60.46 \times FOM(kg)$, (R ² = 0.97) ;	(冯仰廉, 2000)	肉牛	0.97
$CH_4(L/d) = -26.58 \times NFC/NDF + 92.7$, (早期)	(周艳等, 2019)	肉羊	0.772
$CH_4(L/d) = -26.58 \times NFC/NDF + 92.7$, (早期)	(周艳等, 2019)	肉羊	0.772
$CH_4(L/d) = 2.71 \times DNDF - 2.45 \times DDM - 0.97 \times DCP + 124.46$, (早期)	(周艳等, 2019)	肉羊	0.846
$CH_4(L/d) = -57.00 \times GE(MJ/kg) + 1076.0$, (后期)	(周艳等, 2019)	肉羊	0.581
$CH_4/BW0.75(L/kg0.75) = -0.013 \times NDFI(g/d) - 0.13 \times CPI(g/d) + 0.02 \times DMI(g/d) + 0.84$, (后期)	(周艳等, 2019)	肉羊	0.652
$CH_4(L/d) = -26.94 \times NFC/NDF + 90.71$, (整个生长期)	(周艳等, 2019)	肉羊	0.655
$CH_4/BW0.75(L/kg0.75) = 0.005 \times DNDFI(g/d) + 0.011 \times DDMI(g/d) - 0.097 \times DCPI(g/d) - 4.78$, (整个生长期)	(周艳等, 2019)	肉羊	0.722

注：D，动物在维持代谢水平上的日粮表观消化率；L，饲喂水平；DMI，动物的干物质采食量（kg/d）；NFC，日粮中非纤维性碳水化合物含量（g/d），HC，半纤维素（g/d），C，纤维素（g/d）；CF，粗纤维（g/d），NEF，无氮浸出物（g/d），CP，粗蛋白（g/d），Cfat，粗脂肪（g/d）；GEI，采食总能（MJ/d）；ME，代谢能（MJ/d）；forage(%)，日粮中牧草的占比；BW，活体重（kg）；N，日粮中氮含量（g/d）；ADF，日粮的酸性洗涤纤维含量（g/d）；Starch，日粮的可溶性淀粉含量（g/d）；DE，消化能（MJ/d）；GE，日粮的能量含量（MJ/d）；OM 日粮的有机物含量（g/d）。

理想的经验模型，应该从包括 1000 个以上动物或处理组平均测量值中建立，并有影响动物 CH₄ 排放量的饲料和动物信息。目前，CH₄ 排放数据主要来自欧洲、北美、澳大利亚和新西兰，全球数据来源并不均匀，因此，使用模型的时候应该多角度考察再使用。

3.5 小结

(1) 在内蒙古，散养户与规模化牧场并存，测定散养户家畜甲烷排放时，应用呼吸代谢室法比较困难，费用昂贵，使用头面罩和 SF₆ 示踪法等比较易于操作，而且费用适中；而对于规模化奶牛场，经过对家畜进行驯化、增加家畜对 GreenFeed 系统的访问量的情况下，推荐使用 GreenFeed 系统，提高 CH₄ 排放量测定的准确性。对于散养户大量存在的状况下，间接法不易广泛使用；规模化养殖场内激光 CH₄ 检测器法更易于使用。

(2) 内蒙古地区放牧白绒山羊和双峰驼甲烷排放量的核算因子中，牧草种类、营养含量、干物质消失率、体外消化率以及无氮浸出物含量都是影响甲烷生成量。在掌握牧草种类的情况下，分析出对应的指标即可估算出甲烷排出量。

(3) 对于其他家畜甲烷排放量，以 IPCC 预测方法 1 和 2 为计算公式，结合家畜的排放的影响因子，能够比较准确计算出温室气体的排放量。

(4) 对于粪便管理过程中温室气体排放量的核算因子，内蒙古还未见有本地化排放因子相关的研究。

第四章 内蒙古畜牧业甲烷排放特征及调控措施

4.1 放牧对甲烷排放特征

4.1.1 内蒙古双峰驼

利用 SF₆ 示踪技术测定内蒙古双峰驼分别采食 5 种牧草的甲烷排放量见表 4-1，内蒙古双峰驼甲烷排放量平均为 20.8 g/kg DMI（李霞，2007）；其中以玉米秸秆为主要饲料的双峰驼甲烷排放量最高，以发酵柠条为主要粗饲料的甲烷排放量最低；甲烷能占能总的比例平均为 6.25%，以冰草为主要粗饲料的双峰驼甲烷能/总能比例最高，以苏丹草为主要粗饲料的双峰驼甲烷能/总能比例最低（陈木兰，2010）。

表 4-1 放牧对内蒙古双峰驼甲烷排放的影响

牧草	CH ₄ 排放量 (g/kg DMI)	甲烷能/总能
冰草	21.0	7.02
发酵柠条	16.2	4.73
驼绒藜	21.4	6.20
玉米秸秆	27.1	7.99
苏丹草	18.2	5.31
均值	20.8	6.25

4.1.2 内蒙古白绒山羊

采食不同牧草的内蒙古白绒山羊甲烷排放见表 4-2，其中苜蓿的甲烷产生量 (L/kg DMI) 最高，秸秆产量最低，沙打旺、冰草和青贮的甲烷产量居于中间且差异不显著（郭雪峰，2008）；甲烷能占总能比例方面，秸秆与青贮差异极显著，分别为 7.19% 和 5.01%，苜蓿、沙打旺和冰草的甲烷能占总能比例分别为 5.94%、6.25% 和 6.27%，差异不显著；不同放牧期的

绒山羊甲烷排放量 (g/d) 不同, 其中枯黄期最高, 但换算成单位 DMI 的甲烷排放量后, 三个时期差异不显著 (表 4-3; 李华伟, 2008)。

表 4-2 不同牧草类型下内蒙古白绒山羊甲烷排放量

牧草	CH ₄ 排放量 (g/d)	CH ₄ 排放量 (L/kg DMI)	CH ₄ 排放量 (g/kg DMI)	甲烷能/总能
苜蓿	12.3	29.4 ^a	28.9 ^a	5.94 ^b
沙打旺	10.8	27.1 ^b	24.1 ^c	6.25 ^b
冰草	12.0	28.4 ^b	26.6 ^b	6.27 ^b
玉米青贮	11.1	28.5 ^b	27.6 ^b	5.01 ^a
玉米秸秆	10.1	25.2 ^c	23.8 ^c	7.19 ^c
均值	11.3	27.7	26.2	6.13

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4-3 牧草不同生长期内蒙古白绒山羊甲烷排放量

生长期	CH ₄ 排放量 (g/kg DMI)	CH ₄ 排放量 (L/kg DMI)	CH ₄ 排放量 (g/d)
幼嫩期	17.1	30.8	22.0
旺盛期	19.8	32.8	23.4
枯黄期	34.1	29.2	20.9
均值	23.7	30.9	22.1

目前, 内蒙古白绒山羊被分为 3 个类型, 分别为阿尔巴斯型、二狼山型、阿拉善型。内蒙古白绒山羊常年处于贫瘠的荒漠及半荒漠地带, 主要以放牧为主, 冬季白天放牧, 夜晚自由采食且适当补饲。牧草的生长及营养价值都易受季节的影响, 间接对绒山羊瘤胃发酵特性产生较大影响, 从而使其形成了适应性强且耐粗饲的瘤胃发酵特点, 有利于分解难以利用的粗纤维类物质。从季节来看, 阿尔巴斯型甲烷产生量以春、冬季较高, 并显著高于夏、秋季节; 二狼

山型秋、冬季较高，极显著高于其他季节；阿拉善型春、秋季较高，极显著高于冬季。从类型来看，阿拉善型在春、夏、秋季均显著高于其他季节，冬季显著低于其他季节。总体上看，阿尔巴斯型平均甲烷产生量为 8.77 mol/L，二狼山型为 8.64 mol/L，阿拉善型最高，为 14.67 mol/L（韦玥瑞，2020）。

4.2 生理阶段对甲烷排放特征

4.2.1 羊

(1) 育肥期

维持水平下，内蒙古白绒山羊的甲烷排放量显著低于自由采食水平的羊，甲烷能占总能的比例显著高于自由采食水平的羊，但单位 DMI 的甲烷排放量差异不显著（郭雪峰，2008）。

表 4-4 不同饲喂水平对内蒙古白绒山羊甲烷排放的影响

项目	饲喂水平		P 值
	限饲	自由采食	
DMI, kg/d	0.581	0.839	<0.05
CH ₄ 排放量 (g/d)	10.43	15.07	<0.05
CH ₄ 排放量 (g/kg DMI)	18.06	17.71	>0.05
甲烷能/总能	8.98	6.28	<0.05

(2) 空怀、妊娠和泌乳期

杜蒙杂交母羊空怀期、妊娠前期（40 天）、中期（70 天）和末期（120 天）、哺乳前期（20 天）、中期（50 天）、后期（80 天）甲烷排放量见表 4-5（崔璨，2017）。随采食水平的降低，空怀和妊娠期甲烷排放量显著降低，甲烷能占总能比例在空怀期差异不显著，妊娠 40d 时自由采食和 80% 自由采食组最高，妊娠 120d 时 60% 自由采食组最高。随采食水平的降低，哺乳 20d、50d 甲烷排放量显著降低，但哺乳 80d 甲烷排放量各组

间差异不显著；甲烷能占总能比例在哺乳 20d、50d 差异不显著，在哺乳 80d 时，60%自由采食组最高。

表 4-5 杜蒙杂交肉羊育肥期甲烷排放量

生理阶段	自由采食	80%自由采食	60%自由采食
CH ₄ 排放量 (g/d)			
空怀	31.4 ^a	28.0 ^a	22.4 ^b
妊娠 40d	39.1 ^a	28.3 ^b	17.4 ^c
妊娠 70d	30.0 ^a	23.2 ^b	19.4 ^b
妊娠 120d	23.0 ^a	21.1 ^a	17.4 ^b
哺乳 20d	43.8 ^a	28.5 ^b	24.1 ^b
哺乳 50d	51.9 ^a	36.8 ^b	30.2 ^b
哺乳 80d	21.9	20.5	20.1
甲烷能/总能			
空怀	5.13	5.13	5.13
妊娠 40d	7.01 ^a	6.50 ^a	5.44 ^b
妊娠 70d	5.15	4.77	5.15
妊娠 120d	4.66 ^b	4.93 ^{ab}	5.21 ^a
哺乳 20d	5.28	5.19	5.37
哺乳 50d	4.95 ^c	5.28 ^a	5.15 ^b
哺乳 80d	2.16 ^c	2.75 ^b	3.22 ^a

注：同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

4.2.2 奶牛

(1) 后备牛

目前内蒙古自治区奶牛规模化养殖以荷斯坦奶牛为主要品种，对不同月龄荷斯坦后备牛的 CH₄ 排放量，结果表明，9、12、15 月龄后备牛平均 CH₄ 排放量分别是 107.4、137.4、212.8 g/d（李斌昌，2019；表 4-6）；18、21、24 月龄后备牛平均 CH₄ 排放量分别是 207.8、275.1、321.1 g/d（刘卓凡，2022；表 6）。从结果来看，后备牛 CH₄ 排放量随月龄的增长而逐渐增加，另外，测定结果也饲料组成以及检测分析方法的影响，如李斌昌（2019）采用的是 SF₆ 示踪技术进行的测定，而刘卓凡（2022）采用的是 GreenFeed 系统进行测定，后续研究有必要基于同一测定方法来研究不同月龄后备牛的甲烷排放量。

表 4-6 后备牛甲烷排放量

月龄	CH ₄ 排放量 (g/d)
9 月龄	107.4
12 月龄	137.4
15 月龄	212.8
18 月龄	207.8
21 月龄	275.1
24 月龄	321.1

(2) 泌乳牛

贾鹏（2023）使用 GreenFeed 系统测量 153 头荷斯坦泌乳牛 CH₄ 排放量为平均为 332 g/d，CH₄/干物质采食量（DMI）为 14.4 g/kg，CH₄/能量校正乳（ECM）为 9.18 g/kg（表 4-7）。

表 4-7 我国荷斯坦奶牛泌乳期甲烷排放量

项目	平均值	最小值	最大值	标准差
动物参数				
月龄	51.7	36.3	89.9	12.7
胎次	2.8	2.0	5.0	1.0
泌乳天数 (d)	138	104	182	19
代谢体重 (kg)	136.5	116.4	160.1	9.5
干物质采食量 (kg/d)	23.1	17.6	33.7	2.6
产奶量及乳成分				
产奶量 (kg/d)	38.1	25.9	53.7	6.9
饲料效率 (kg/kg)	1.65	0.62	2.32	0.29
乳脂产量 (kg/d)	1414	545	2222	272
乳蛋白产量 (kg/d)	1247	446	1991	236
总乳固体产量 (kg/d)	4720	1811	6295	786
乳脂校正乳产量 (kg/d)	36.4	29.8	54.8	6.6
能量校正乳产量 (kg/d)	37.2	31	55.1	6.7
温室气体排放量				
CH ₄ 排放量 (g/d)	332	215	448	46
CH ₄ 排放量 (g/kg DMI)	14.4	9.1	19.7	1.9
CH ₄ /ECM (g/kg)	9.18	5.99	18.20	1.92

本试验的数据是在奶牛场的正常饲养条件下获得的，因此具有更强的可靠性和代表性 (Huhtanen 等, 2019)。Niu 等 (2018) 总结了来自欧洲、美国和澳大利亚的 2566 个数据，奶牛的 CH₄ 产量为 369 g/d，CH₄ 产率为 20.1 g/kg DMI，CH₄ 排放强度是 13.5 g/kg ECM，该研究结果高于本试验的结果，可能是因为我国荷斯坦泌乳牛日粮的精粗比较高，比如较低的 NDF (32.8% vs 35.4%)

和较高的 EE (5.5% vs 3.5%) 含量降低了 CH₄ 排放量 (Moss 等, 2000; Knapp 等, 2014;)。或者是由于 CH₄ 检测方法和奶牛的特征不同, Niu 等 (2018) 研究中的数据来自荷斯坦牛、爱尔夏牛、娟珊牛、瑞士褐牛、西门塔尔牛和杂交奶牛, CH₄ 检测方法包括呼吸测热室、GreenFeed 系统和 SF₆ 示踪技术。Oh 等 (2019) 的研究也采用了 GreenFeed 系统检测方法, 并且奶牛特征与本试验相似。试验开始时荷斯坦泌乳牛的平均产奶量为 39.8 kg/d, DMI 为 25.3 kg/d, 泌乳天数为 115 d, BW 为 624 kg。Oh 等 (2019) 的结果与本研究的结果相似, 表明奶牛的 CH₄ 产量为 337 g/d, CH₄ 产率为 13.3 g/kg DMI, CH₄ 排放强度为 9.26 g/kg ECM, 总 CO₂ 产量为 20644 g/d。本研究结果表明, 我国华北地区的荷斯坦泌乳牛每年排放的总 CO₂ 为 7008 kg/头。DMI 是影响奶牛 CH₄ 排放量的主要因素 (Hristov 等, 2018), 利用 DMI 预测 CH₄ 排放量较为准确, 但是很难获得大群的奶牛个体 DMI 数据。此外, 不同类型的饲料也会对 CH₄ 排放量产生影响。因此, 本研究重点关注了更加容易测量的荷斯坦泌乳牛的自身变量, 如胎次、BW、产奶量和乳成分; 并研究了它们对奶牛温室气体排放量的影响。

(3) 干奶牛

采用 Greenfeed 测定系统研究不同胎次的干奶期奶牛瘤胃温室气体排放量、体况以及后续泌乳期内产奶性能的特征, 选用 48 头处于干奶期的荷斯坦奶牛, 分为 4 个处理组: 一胎组 (I 组)、二胎组 (II 组)、三胎组 (III 组)、四胎及以上胎次组 (IV 组), 每组 12 头奶牛。试验期 45 d, 包括 5 d 预试期和 40 d 正试期, 并记录奶牛进入后续泌乳期内的产奶量和乳成分。结果表明: III 组和 IV 组的体重和代谢体重显著高于 I 组和 II 组。III 组和 IV 组牛奶中的体细胞数显著高于 I 组和 II 组, 各个胎次产奶量、4% 校正乳产量、乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和尿素氮差异不显著。III 组和 IV 组中 CO₂-eq 排放量显著高于 I 组, 但与 II 组没有显著差异。干奶期奶牛瘤胃 CO₂-eq 排放量与奶牛的胎次和体重呈极显著的正相关关系, 相关系数分别为 0.44 和 0.74。综上所述, 干奶期奶牛瘤胃温室气体的平均排放量为 18 419.83 g/d, 不同胎次的干奶期荷斯坦奶牛的瘤胃温室气体排放量存在差异, 其中一胎牛的瘤胃温室气体排放量最低 (表 4-8; 刘志豪)。

表 4-8 干奶期奶牛瘤胃温室气体排放量

项目	平均值	最小值	最大值	中位数
CO ₂ -eq 排放量, g/d	18 419.83	14 022.85	22 386.66	18 530.91
CO ₂ -eq 排放量, g/kg	127.95	103.65	147.79	127.90
CO ₂ -eq 排放量/校正乳产量, g/kg	497.63	325.84	472.89	111.85

4.3 饲料组成对甲烷排放的影响

4.3.1 精粗比

我国北方奶牛上的研究表明, 饲喂精料水平为 30%、40%和 50%的日粮对应 9 月龄后备牛 CH₄ 排放量分别为 117 g/d、107 g/d、97 g/d, CH₄-E 占总能比例为 6.1%、5.0%和 4.2% (王贝, 2019); 对应 12 月龄后备牛 CH₄ 排放量为 159 g/d、133 g/d、119 g/d, CH₄-E 占总能比为 6.7%、5.0%和 4.4%; 对应 15 月龄后备牛 CH₄ 排放量为 230 g/d、215 g/d、194 g/d, CH₄-E 占总能比例为 7.7%、6.7%和 5.7% (李斌昌, 2019; 表 4-9)。

表 4-9 不同精料水平对我国北方不同月龄后备牛甲烷排放的影响

项目	精料水平			SEM	P 值
	30%	40%	50%		
9 月龄					
CH ₄ 排放量 (g/d)	117.70 ^a	107.10 ^b	97.46 ^c	2.347	<0.0001
甲烷能/总能	6.10 ^a	5.05 ^b	4.24 ^c	0.214	<0.0001
12 月龄					
CH ₄ 排放量 (g/d)	159.70 ^a	133.43 ^b	119.11 ^c	5.075	0.0001
甲烷能/总能	6.69 ^a	4.98 ^b	4.39 ^b	0.003	0.0001
15 月龄					
CH ₄ 排放量 (g/d)	229.58 ^a	214.86 ^b	193.77 ^c	4.170	<0.0001
甲烷能/总能	7.69 ^a	6.65 ^b	5.68 ^c	0.003	0.0002

我国北方杜寒杂交肉羊上的研究表明，给肉羊饲喂精粗比分别为 8:92、16:84、24:76、32:68、40:60、48:52、56:44 和 64:36 的饲料，对应的 CH₄ 排放量分别为 81.64、87.22、77.42、61.87、52.19、54.90、57.07 和 58.72 L/kg 可发酵有机物（FOM）；CH₄-E 占代谢能比例分别为 12.27%、11.04%、10.72%、9.52%、7.89%、8.17%、7.71%和 8.92%（表 4-10），说明随着精料比例提高，CH₄ 排放量和 CH₄-E 占消化能逐渐降低（赵一广，2012）。

表 4-10 不同精料水平对我国北方肉羊甲烷排放的影响

精粗比	甲烷排放量 (L/d)	甲烷能 (MJ)	可发酵有机物 (g)	消化能 (MJ/kg)	甲烷/可发 酵有机物	甲烷能/ 消化能
8:92	26.45±1.23	1.05±0.05	323.97±0.02	9.45±0.43	81.64	12.27
16:84	29.00±2.27	1.15±0.09	332.51±0.01	11.52±0.55	87.22	11.04
24:76	28.41±1.93	1.12±0.08	366.97±0.03	11.74±0.65	77.42	10.72
32:68	26.11±2.94	1.03±0.12	422.03±0.61	11.85±0.72	61.87	9.52
40:60	23.76±1.32	0.94±0.05	455.29±0.01	12.84±0.41	52.19	7.89
48:52	24.23±0.81	0.96±0.03	441.32±0.04	12.87±0.06	54.90	8.17
56:44	24.32±3.70	0.96±0.15	426.18±0.03	13.64±0.24	57.07	7.71
64:36	25.37±2.74	1.00±0.11	432.04±0.05	12.48±0.33	58.72	8.92

我国北方肉牛上研究表明，随着日粮精粗比的提高，秦川肉牛公牛、阉牛和母牛的 CH₄ 排放量均显著下降。精粗比为 30:70 条件下，公牛、阉牛和母牛在 CH₄ 排放量之间没有显著差异，精粗比为 50:50 条件下，公牛 CH₄ 排放量显著高于阉牛和母牛，阉牛与母牛之间无显著差异，精粗比为 70:30 条件下，公牛 CH₄ 排放量显著高于阉牛，阉牛又显著低于母牛（表 4-11；崔安，2016）。

表 4-11 不同精料水平对我国北方肉牛甲烷排放的影响

精粗比	公牛	阉牛	母牛
30: 70	975.97 ^{ax}	985.9 ^{ax}	993.9 ^{ax}
50: 50	454.5 ^{ay}	421.6 ^{by}	407.8 ^{by}
70: 30	373.8 ^{az}	334.9 ^{bz}	353.1 ^{cz}

注：同行不同小写字母（a、b、c）表示差异显著（ $P < 0.05$ ），同列不同小写字母（x、y、z）表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。

4.3.2 碳水化合物结构

饲料碳水化合物结构通常用中性洗涤纤维（NDF）和非纤维性碳水化合物（NFC）的比例来体现，饲料 NDF/NFC 和纤维物质含量等都是引起奶牛生产性能以及 CH₄ 排放量差异的重要因素。例如，饲料中 NDF/NFC 分别为 1.82、1.55 和 1.30 时，泌乳前期、中期和后期奶牛 CH₄-E、甲烷排放量（g/kg DMI）和甲烷能占总能比例均显著降低（王贝，2019；表 4-12）。

表 4-12 不同碳水化合物组成对奶牛甲烷排放的影响

	NDF/NFC = 1.82	NDF/NFC = 1.55	NDF/NFC = 1.30
泌乳前期			
CH ₄ -E (MJ/d)	22.5 ^a	18.5 ^b	14.5 ^c
CH ₄ 排放量（g/kg DMI）	34.5 ^a	24.9 ^b	17.1 ^c
甲烷能/总能	11 ^a	8 ^b	5 ^c
泌乳中期			
CH ₄ -E (MJ/d)	21.8 ^a	19.3 ^{ab}	18.2 ^b
CH ₄ 排放量（g/kg DMI）	25.4 ^a	18.9 ^b	15.6 ^c
甲烷能/总能	8 ^a	6 ^{ab}	5 ^b
泌乳后期			
CH ₄ -E (MJ/d)	22.0 ^a	18.3 ^b	13.5 ^c
CH ₄ 排放量（g/kg DMI）	26.2 ^a	20.6 ^b	15.7 ^c
甲烷能/总能	8 ^a	6 ^{ab}	4 ^b

注：同行不同小写字母（a、b、c）表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。

肉羊上的研究表明，NFC/NDF = 0.78 组的甲烷排放量为 79.32 L/d，显著高于 NFC/NDF = 1.03 组（60.58 L/d）和 NFC/NDF = 2.17 组（36.07 L/d）。单位代谢体重的甲烷排放量随着饲料 NFC/NDF 比例的增加而显著上升，其中

NFC/NDF = 0.78 组、NFC/NDF = 1.03 组和 NFC/NDF = 2.17 组的甲烷排放量分别为 5.79、4.36 和 2.57 L/kg^{0.75}。与此同时，单位干物质采食量甲烷排放量、单位有机物采食量、单位可消化有机物采食量和单位可消化中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量随着饲料 NFC/NDF 的增加显著降低。NFC/NDF = 0.78 组和 NFC/NDF = 1.03 组单位总能摄入量的甲烷能排放量分别为 10.25 和 9.35，显著高于 NFC/NDF = 2.17 组的 6.32（表 4-13；周艳，2018）。

表 4-13 不同碳水化合物组成对肉羊甲烷排放的影响

项目	NFC/NDF			SEM	P 值
	0.78	1.03	2.17		
甲烷日排放量 (L·d ⁻¹)	79.32 ^a	60.58 ^b	36.07 ^c	5.48	<0.001
单位代谢体重的甲烷日排放量 (L·kg ^{-0.75})	5.79 ^a	4.36 ^b	2.57 ^c	0.41	<0.001
单位日增重的甲烷产量 (L·g ⁻¹)	0.42	0.33	0.29	0.03	0.251
单位干物质采食量的甲烷排放量 (L·kg ⁻¹)	46.85 ^a	43.36 ^a	30.23 ^b	2.75	0.020
单位有机物采食量的甲烷排放量 (L·kg ⁻¹)	51.69 ^a	47.97 ^a	33.58 ^b	3.02	0.022
单位中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量 (L·kg ⁻¹)	91.32	95.76	70.14	5.27	0.082
单位可消化有机物采食量的甲烷 (L·kg ⁻¹)	104.39 ^a	88.74 ^a	55.76 ^b	6.57	0.001
单位可消化中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量 (L·kg ⁻¹)	248.9 ^a	247.2 ^a	170.1 ^b	14.00	0.012
单位总能摄入量的甲烷能排放量 (%)	10.25 ^a	9.35 ^a	6.32 ^b	0.62	0.012
单位消化能摄入量的甲烷能排放量 (%)	12.307 ^a	12.21 ^a	8.57 ^b	0.768	0.062
单位代谢能摄入量的甲烷能排放量 (%)	16.69 ^a	15.41 ^a	10.10 ^b	1.14	0.030

注：同行不同小写字母（a、b、c）表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。

4.4 饲料添加剂对甲烷排放的影响

4.4.1 植物提取物

植物提取物也被称作植物次级代谢物，是以物理、化学或生物学手段从植物中提取的活性成分，通常具有抗菌、促生长、提高免疫力和抗氧化等功能。天然植物提取物白藜芦醇、大蒜素、桑叶黄酮、茶皂素均能够降

低甲烷产量，其中白藜芦醇和茶皂素均显著提高了丙酸产量，白藜芦醇、大蒜素、桑叶黄酮均显著降低了总产甲烷菌数量（陈丹丹，2014）。

表 4-14 不同植物提取物下肉用绵羊瘤胃丙酸摩尔比例、甲烷产量和总产甲烷菌数量

植物提取物	丙酸摩尔比例	甲烷产量	总产甲烷菌数量降
	提高比例	降低比例	低比例
白藜芦醇	33.6%	20.5%	36.1%
大蒜素	无差异	8.4%	103.7%
桑叶黄酮	无差异	7.4%	45.2%
茶皂素	29.9%	11.3%	无差异

4.4.2 微生态制剂

微生态制剂作为一种新型的绿色添加剂，近年来在动物生产上的应用越来越广泛，且生产效益显著。地衣芽孢杆菌具有抗逆特性，是芽孢杆菌中具有应用潜力的菌种之一，能够调节动物胃肠道菌群平衡，促进有益菌的生长，降低病原菌的数量，提高饲料利用率。肖怡（2016）研究表明，地衣芽孢杆菌在饲料中的添加水平为 2.4×10^8 和 2.4×10^9 CFU/（只·d）时，肉羊 CH₄ 排放量分别降低了 5.18% 和 9.33%（表 4-15）。

表 4-15 地衣芽孢杆菌对肉羊甲烷排放的影响

指标	对照组	低剂量组	中剂量组	高剂量组
CH ₄ 排放量 (L/d)	42.58 ^a	40.86 ^{bc}	39.69 ^c	42.04 ^{ab}
CH ₄ 排放量 (L/kg DMI)	33.84 ^a	32.48 ^{bc}	31.56 ^c	33.84 ^a
CH ₄ 排放量 (L/kg W ^{0.75})	2.43 ^a	2.31 ^b	2.20 ^c	2.40 ^a

注：同行不同小写字母（a、b、c）表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。

4.4.3 不同甲烷减排策略的比较

在各种 CH₄ 减排策略中，营养干预是最有效且研究较多的。表 4-16 总结了近年来各种饲料添加剂对 CH₄ 和瘤胃发酵特性的影响。总结前人研究进展，目前来看，海藻、脂肪酸、3-NOP 是降低反刍动物瘤胃甲烷排放最有效的三种添

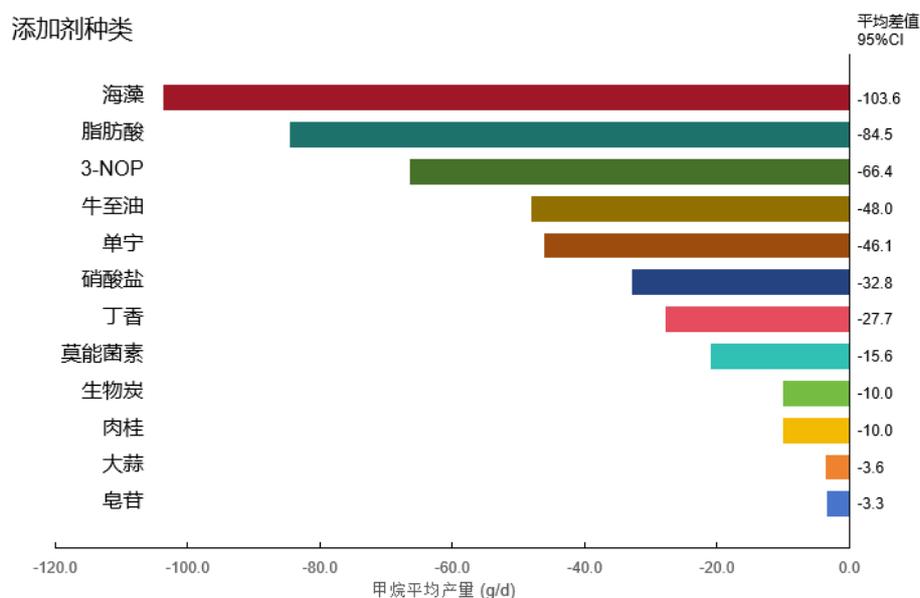
加剂，此外，牛至油、丁香、肉桂、皂甙、等天然植物或植物提取物，以及硝酸盐或莫能菌素等化学合成物质或抗生素也能不同程度降低甲烷排放（图 4-1）。

表 4-16 不同添加剂的甲烷减排效果

添加剂	添加剂量	动物	对 CH ₄ 排放的影响
椰子油	4%	山羊	34% ↓
椰子油	2%	山羊	>50% ↓
玉米油	30 g/kg DM	山羊	15.1% ↓
玉米油	5%	肉牛	~30% ↓
拉沙里菌素	200 mg/头/d	肉牛	30.91% ↓
莫能菌素	30 mg/kg 体重	阉牛	16.67% ↓
莫能菌素	22 mg/kg 体重	山羊	28% ↓
莫能菌素	0.6 mg/kg 体重	水牛	8-9% ↓
硝酸盐	11 g/kg DM	奶牛	8% ↓
硝酸盐	23 g/kg DM	奶牛	15% ↓
3-NOP	60 mg/kg DM	奶牛	31% ↓
地衣芽孢杆菌	2.5×10^8 CFU	绵羊	6% ↓
地衣芽孢杆菌	2.5×10^9 CFU	绵羊	12% ↓
酿酒酵母	$(1.2-2.3) \times 10^7$ CFU/g	绵羊	10% ↓
延胡索酸	117 g/kg 体重	绵羊	76% ↓
苹果酸	7.5%	肉牛	9% ↓
银合欢	350 g/kg DM	绵羊	14.1% ↓
海门冬藻	0.2% OM	肉牛	98% ↓
海门冬藻	0.5% DM	奶牛	34% ↓

添加剂	添加剂量	动物	对 CH ₄ 排放的影响
海门冬藻	0.5% DM	山羊	30%-40% ↓
泡叶藻	113 g/d	奶牛	11.5 ↓

饲料添加剂对甲烷产生的影响



4.5 遗传因素对甲烷排放的影响

多年来，动物育种一直用于选择反刍动物理想的生产性状，目前已进行大量的关于培育低 CH₄ 排放动物的研究。Goopy 等（2014）对 160 只成熟母羊的 CH₄ 排放量进行测定，发现低 CH₄ 的绵羊具有较小的瘤胃体积（图 4-2）。CH₄ 产率具有遗传性，遗传力范围在 0.12 到 0.45 之间（Dillon 等人，2021 年），因此可针对性地选育低 CH₄ 的品种。目前，新西兰已成功选育出低 CH₄ 产率的绵羊，该育种策略已在其放牧系统中实施（Jonker 等，2018）。



图 4-2 甲烷排放量较高（左）和较低（右）的绵羊瘤胃的体积比较

4.6 粪污管理温室气体排放特征及影响因素

4.6.1 不同处理方式对粪污温室气体排放的影响

不同处理方式下内蒙古畜牧业粪污发酵产生的 CH_4 和 N_2O 排放量见下表。不同处理方式对粪污发酵产生的 CH_4 和 N_2O 影响较大，其中，混合发酵和沼气池（全封闭）或每天清理情况下， CH_4 排放量较低，而沼气池（全封闭）处理情况下， N_2O 排放量最低（Cao 等，2023）。在实际生产中，应根据圈舍实际情况采取适宜的粪污处理方式，从而减少粪污非二氧化碳温室气体的排放。

表 4-17 不同处理方式下粪污温室气体排放

温室气体排放量 (kg/万头只/年)	沼气池 (全封闭)	混合粪污 (露天)	干粪 (露天)	混合 发酵	每天 清理	草原自 然降解
CH_4 排放	13.30	62.30	39.90	6.65	6.65	17.25
N_2O 排放量	0.05	1.16	0.65	1.29	0.71	0.82

4.6.2 日粮组成对粪污温室气体排放的影响

日粮组成、动物品种对于粪污贮存过程中的温室气体均具有显著影响调节（图 4-3），因此需要通过合理设计日粮配方、选育品种，能够有效降低粪污非二氧化碳温室气体排放量。

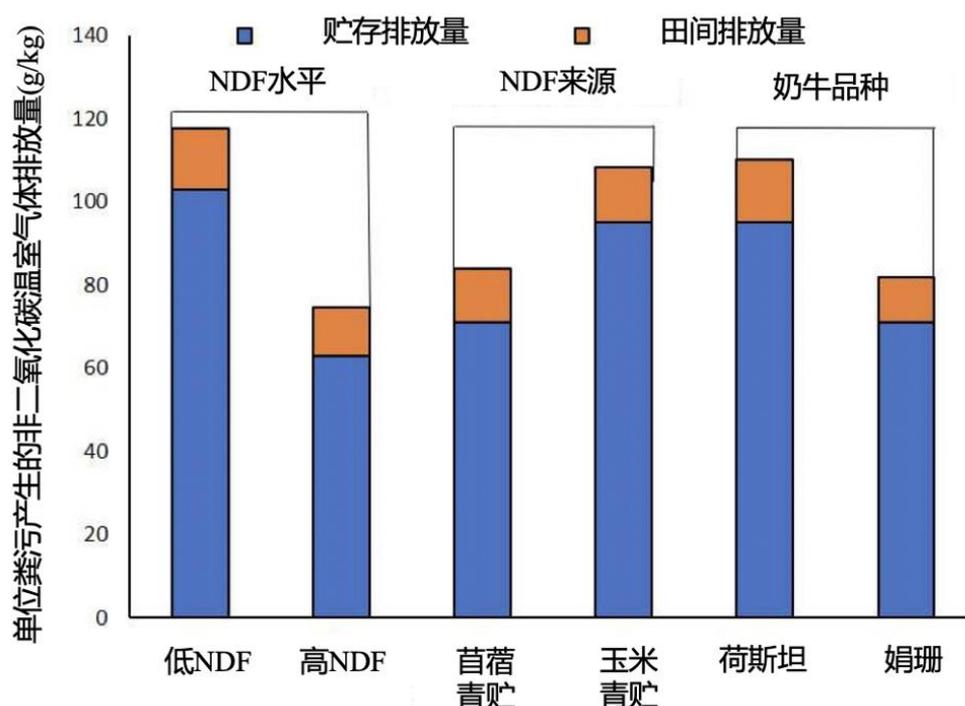


图 4-3 不同饲料和品种对粪污非二氧化碳温室气体排放的影响

4.7 圈舍养殖环境对温室气体排放的影响

奶牛生产性能有 20%-30%取决于所处的环境，良好的饲养环境可以提高奶牛免疫力、日增重与饲料转化率。当环境温度降到 5℃时，饲料消耗量增加 7%;当环境温度降到-10℃时，饲料消耗量增加 20%。环境温度为 29.7℃和 31.4℃时，奶牛平均直肠温度为 39℃(轻度体温过高)和 39.5℃(体温过高)，奶牛产奶量受到严重影响。在生产中，应根据奶牛养殖场本身容纳力与实际环境情况，控制牛舍养殖规模，保证饲养空间，同时采用低碳建筑材料，封闭式奶牛养殖场在冬季保证牛舍温度的同时，定期进行牛舍通风换气以保持舍内空气清新，改善养殖场的饲养环境，有助于提升奶牛生产性能，增加饲料转化率，间接减少奶牛养殖过程中温室气体的排放。

研究表明，冬季气温在-20℃条件下，一只体重在 50kg 绵羊总维持需要量为 7557.6MJ，比 0℃时增加 930.6MJ，相当于增加了 195g 青干草的能量。而且冬季放牧羊一般饮用冰水，成年羊日饮水量平均 3kg，喝进的冰水在体内升高到体温的 38℃耗能 104 千卡，相当于消耗 100g 中等质量青干草的维持净能；绵羊每水平移动 1km，平均每 kg 代谢体重多消耗净能 10.5KJ，放牧羊每天游走超过 10km 路程，平均体重 50kg 的绵羊其运动消耗净能为 1974 KJ/d，相当于 413g 中等青干草的净能值。特别在冬春季枯草期，北方草原产草量低，放牧羊采食不到足够的牧草，刨食践踏草场，行走的距离更长，浪费的能量更多，对草场造成的破坏也更大。北方牧区冷季保温圈舍的缺失不仅造成了羊只大量的能量损失，寒冷的饲养环境也导致羔羊成活率低和养殖户保羔的劳动强度增大，造成碳排放增加。

4.8 饲料种类、饲养方式及养殖规模对温室气体排放的影响

饲料的选择与饲养方式的改变也会在很大程度上影响家畜温室气体的排放。不同种类的饲料和不同饲养方式会直接影响牛羊的生长和代谢过程，从而对温室气体排放产生不同的影响。

首先，饲料种类对牛羊的生长和代谢有着直接的影响。不同的饲料含有不同的营养成分，例如粗蛋白、纤维素含量等，因而会对牛羊体内菌群的种类和数量产生影响，从而对温室气体排放产生影响。例如，饲料中含有大量的纤维素，会导致羊只发酵中产生甲烷的数量增加，进而增加羊养殖过程中温室气体的排放量。

其次，饲养方式也会对温室气体排放产生影响。在不同的饲养方式下，牛羊的代谢过程会发生不同的变化，因而会对温室气体排放产生不同的影响。例如，饲养方式为放牧时，羊只需要通过采食地上的植被来获取养分，因此温室气体的排放量相对较低；而饲养方式为圈养时，由于饲料来源单一，羊只产生的温室气体排放量会增加。

另外，养殖规模与温室气体的排放量也有关。规模化养殖方式能在很大程度上提高养殖的生产效率，获得更高的经济效益，但产生的大量废弃物也给环境治理造成巨大压力。目前，内蒙古羊养殖主要集中在舍饲和放

牧+补饲两种方式。相比于舍饲，放牧+补饲方式能够更好地控制牛羊的粪便排放，减少温室气体的排放量。一般来说，在相同养殖规模的情况下，放牧+补饲方式能够实现更高效的粪便处理和更好的温室气体控制。总的来说，养殖规模对温室气体排放的影响主要体现在粪便数量和处理方式上。

综上所述，饲料种类和饲养方式对羊养殖温室气体排放有着直接和重要的影响。为了减少温室气体排放量，应当选择营养成分合理的饲料，并结合最优的饲养方式。养殖规模是影响羊养殖温室气体排放的重要因素之一。一般而言，较大规模的养殖场往往排放的温室气体更多。这是因为较大规模的养殖场往往需要养殖更多的羊只，导致粪便数量增加，粪便的处理难度也相应增加，从而促进了温室气体排放。在内蒙古，农牧民养殖主要集中在小规模的家庭农场和放牧生产方式。这些小规模养殖场因为规模较小，一般没有集中处理粪便的设备，粪便处理的方法主要是堆肥和散粪。这种情况往往导致粪便处理不及时，氨的挥发会进一步加剧温室气体的排放量。

4.9 小结

畜牧业产生的温室气体主要来源于动物消化道发酵以及粪污处理。消化道发酵产生的温室气体以 CH_4 为主，受养殖模式（放牧 vs 舍饲）、生理阶段（育肥、妊娠、泌乳）、饲料组成（精粗比、碳水化合物结果）以及宿主因素的影响，目前调控消化道 CH_4 产生的最有效方式是使用饲料添加剂，以植物提取物和微生物制剂为主，也有人工合成物，需根据不同的养殖模式和成本控制等选择适宜的添加剂。

粪污发酵产生的温室气体主要是 CH_4 和 N_2O ，受粪污处理方式以及动物因素（饲料组成、品种）的双重影响。此外需要考虑的是，由于 CH_4 是在厌氧条件下产生的，而 N_2O 的产生需要足够的氧气水平，因此一些减少 CH_4 产量的做法往往会增加 N_2O 排放量。鉴于影响粪污中 N_2O 和 CH_4 的不同代谢条件，很难实施同时针对这两种气体的有效缓解替代方案，因此需要根据实际条件采取适应的减排措施。

第五章 养殖场减污降碳协同效应及措施

5.1 粪便管理减污降碳效应及影响因素

粪便处理和资源化是畜牧养殖的重要环节，也是温室气体重要排放源。粪便在堆肥等处理过程中，随着有机质的降解，腐殖质的形成，会释放出 CH_4 、 N_2O 等温室气体。研究畜禽粪便管理恶臭污染物和温室气体排放变化及其影响因素，对提高畜禽粪便管理和推进畜禽粪污资源化利用，实现畜禽低碳养殖具有重要意义。

动物粪便中含有大量的有机物，如牛粪有机碳含量达 368g/kg （**全国农业技术推广服务中心，1999**），粪便中有机物分解会产生甲烷，每千克粪便挥发性固体将产生约 0.29m^3 甲烷（**Kashyap D R, 2003**）。LUO 等（**LUO T, 2015**）开展了四川省畜禽养殖过程中的饲料投入、农场管理、肠道发酵、粪便管理的碳排放，就家庭农场的牛奶生产而言，肠道发酵在总碳足迹中的温室气体排放贡献为 43%，粪便管理和草料投入对总碳足迹的贡献分别为 27%和 29%。所以，畜禽粪污管理环节是畜牧业 CH_4 和 N_2O 的主要排放源。全球动物粪便排放的 CH_4 约占 CH_4 排放总量的 51.5%-81.0%，排放的 N_2O 约占全球排放总量的 7%（**李泱孜，2014**）。内蒙古牧场粪便管理过程的碳排放量占畜牧业碳排放量的 41%左右（**刘子瑜，2022**）。

畜禽粪污所导致的温室气体排放量主要取决于粪便产生气体的潜力、粪便的处理方式和气候条件，受饲养规模、养殖环境、清粪方式、堆肥模式等粪污处理工艺的影响。

（1）畜禽种类个体差异

一般动物采食饲料的能量和消化率越高，粪便甲烷产生潜力越大，猪粪的甲烷产生潜力大于牛粪，山西省奶牛个体的温室气体排放量从低到高的顺序为犊牛 < 育成牛 < 青年牛 < 干奶牛 < 泌乳牛（**刘翌晨，2020**），其排序与牛的体重成正相关，个体大的牛，摄入日粮和排泄粪便的量都大，因而排放温室气体的量也大。青海省养殖场单位牛个体年均氨排放系数为 $56.96\text{g} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ ，二氧化碳排放系数为 $5.03\text{kg} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ ，甲烷排放系数为 $210.79 \pm 19.73\text{g} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ （**马华青，2022**）。内蒙古几种牲畜中，牛的碳排放因子最大，

一头牛的粪便可排放甲烷 7kg，一只绵羊的粪便可排放甲烷 0.17kg（刘子瑜，2022）。

表 5-1 山西省奶牛个体碳排放差异

参数	犊牛	育成牛	青年牛	干奶牛	泌乳牛
排放因子 /kgCH ₄ •头 ⁻¹ •a ⁻¹	21.9	68.7	124.9	131.1	224.8

表 5-2 内蒙古不同种类牲畜 CH₄ 和 N₂O 年排放系数单位：t/千头

碳排放 牲畜种类	肠道发酵	粪便排放	粪便排放
	CH ₄	CH ₄	N ₂ O
牛	54.33	7	1.24
马	18	1.64	1.39
驴	10	0.9	1.39
骡	10	0.9	1.39
骆驼	46	1.72	1.39
猪	1	4	0.53
绵羊	5	0.17	0.33
山羊	5	0.15	0.33

数据来源：联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告

（2）养殖规模和养殖方式

LUO 等（LUO T, 2015）基于 2012 年对四川省家庭和综合农场的问卷调查数据，对畜禽养殖业生产的碳足迹进行表征和量化，发现家庭农场的碳足迹高于综合农场，从而发现综合农场管理对碳排放的缓解作用，同时采用合理的膳食结构与粪便管理方式，提高饲料生产中氮的利用效率也是减少碳排放的有效途径。且发酵床养殖的温室气体排放较传统养殖舍内温室气体排放少 26.3%（郭海宁，2014）。

（3）储存时间和环境条件

——堆存时间：减少粪便堆放时间，既可减少环境污染，也能减少动物粪便 CH₄ 的排放。室内培养模拟试验发现，露天奶牛场下垫面施加牛粪后，CH₄ 排放通量比未施粪之前大 25-62 倍，清除粪便，甲烷排放量就会下降（李泱孜，2014），这说明粪便在养殖场储存时间越长，排放的温室气体量越多。所以养殖场应定期清粪，减少粪便堆放时间，从而减少温室气体的排放，特别是在温度较高的夏季，可适当加大粪污的处理频率以减少温室气体的排放。另有研究

发现(刘羽, 2018), 如果奶牛运动场每天除了定时清粪以外, 再对运动场进行耙犁一遍, 导致 N_2O 、 CO_2 和 NH_3 排放通量增高, 这从另一方面说明清粪活动会加快气体的排放速率。所以, 养殖场舍内、运动场粪便清理要科学合理, 过多清除或长时间堆存粪污对温室气体和 NH_3 的排放都有影响。经对内蒙古牧场调研, 一般牛舍粪便一天清理一次, 运动场半年清理一次为宜。

——温度环境: 高温环境下甲烷排放速率大于低温环境。粪便存储温度保持在较低的温度, 可有效减少甲烷的排放(高娇等, 2022; 周静等, 2013)。夏季高温易于导致温室气体的排放, 若通风换气, 可温室气体浓度降低一些(董红敏等, 2010)。夏季粪便的 CH_4 排放量明显高于冬季, 且环境温度与 CH_4 排放量呈正相关, 当温度超过 $15^\circ C$ 时, 即使在较短的储存期内也会产生大量 CH_4 (菅瑞珍, 2022)。

(4) 粪便储存工况或条件

——垫料: 猪养殖场在躺卧区以及排泄区地面上铺设玉米秸秆做垫料, 垫料型猪舍能够减少舍内氨气和二氧化碳浓度, 但由于畜舍垫料的厌氧发酵, 畜舍内甲烷气体高于传统猪舍(董红敏等, 2010), 所以垫料对温室气体和氨气的影响作用不同。

——舍内通风等条件: 粪便进行无氧降解时可产生甲烷, 以铵态氮为主的粪便氧化亚氮的产生和排放需要以有氧条件下的硝化作用为前提, 即环境的氧气含量充足, 粪便水分含量较少时促进了氧化亚氮的产生而阻碍了甲烷的排放, 同一粪便处理模式中甲烷和氧化亚氮的排放因子存在相互影响。江苏规模化猪舍 NH_3 和 CO_2 浓度在时空分布上呈一定的规律, 湿帘和风机开启后 NH_3 和 CO_2 浓度显著降低, 猪舍内的中部位置 NH_3 、 CO_2 浓度显著高于四周, 通风量、温湿度及猪体活动量等是影响猪舍 NH_3 和 CO_2 浓度分布的主要因素(吴胜等, 2018)。

——粪便性状: 液体粪便的贮存大于固体粪便的甲烷排放率, 畜禽粪便以固体方式储存, 并与空气接触, 无法进行无氧分解, 不利于 CH_4 的形成(高娇等, 2022; 周静等, 2013); 且透气性好, 不利于发生反硝化作用, 进而不利于 N_2O 的形成。而液体粪便的贮存大于固体粪便的甲烷排放率。因此在畜禽粪便处理过程中, 尽可能采取固体方式储存, 减少温室气体的产生, 同时可减少畜禽粪污对大气和土壤的污染。

——遮盖：粪便表面覆盖会影响温室气体的排放量。Sommer 等的研究表明（Sommer S G, 2000），表面覆盖可减少液态粪便 38%的 CH₄排放量，减排效果受温度、覆盖材料、技术的影响。自然形成的硬壳、小鹅卵石、稻草对降低 CH₄排放量有显著的效果，特别是覆盖稻草，甲烷减排效果最好（高娇等，2022；周静等，2013），但是覆盖粪便表面会增加 N₂O 的排放。

（5）粪便堆存时添加抑制剂

硝化抑制剂对露天奶牛场下垫面氧化亚氮的排放产生明显的抑制作用（李泱孜，2014）。室内原位测定显示（马华青，2022），脲酶抑制剂、榄仁叶浸提液、硝化细菌、榄仁叶+硝化细菌处理条件下，牛粪尿的氨气平均排放速率分别下降了 20%、47%、23%、56%，CO₂ 排放速率分别下降 3%、16%、2%和 23%，CH₄ 排放速率分别下降 48%、62%、53%和 12%。喷洒脲酶抑制剂后，可有效降低氨挥发，牛棚地面春夏秋冬季氨浓度分别降低了 35%、17%、38%、41%，养殖场单位牛个体年均氨气排放系数下降了 29.5%。猪粪经酸化处理能够降低温室气体排放，而沼液酸化处理则一定程度上增加了温室气体排放，但可有效降低氨气排放，同时保留沼液中氮养分（李路路，2016）。

（5）粪污处理工艺模式

粪污处理利用方式有清粪方式、厌氧发酵、固液分离、发酵加工有机肥、发酵制作沼气等。

畜禽舍清粪方式决定畜禽粪污以何种形式进行后续的贮存和处理，通过干清粪和固液分离改变粪便状态，不仅可以减少污水产生量，而且可以提高粪便收集率，减少进入厌氧环境的有机物总量，从而减少 CH₄ 排放。机械刮板清粪是常见的粪污清理方式，机械刮板清粪比水冲清粪模式可减少 100%~150%的粪污排放量和无害化处理量，粪污处理碳减排效果显著（李志才等，2023）。

固液分离、厌氧发酵等处理工艺可以有效减少温室气体的排放，Aguirre-Villegas 等通过研究发现，厌氧消化和固液分离的组合方式使得温室气体减排率最高可达 41%（菅瑞珍，2022）。

养殖粪便的厌氧硝化制取沼气，既可回收利用甲烷，又能减少大气污染，沼气利用全过程中 CH₄ 泄漏可控制在总产气的 1.0%以下，减污降碳效果显著。我国南方年出栏万头猪的养猪场粪便发酵沼气工程每年获得的温室气体减排效益为 781tCO₂ 当量（汪开英，2010）。将奶牛粪水液体贮存的方式全部更改为

沼气处理后，污染物减排了 21.5%（董红敏等，2010）。XUE 等采用 LCA 方法比较了传统养殖和基于沼气的养猪循环经济模式的差异，将原本堆积的猪粪转移用于沼气生产可以有效降低 309.2 万 tCO₂当量。根据《2019 年全国农产品成本资料收益汇编》，规模化奶牛养殖场平均电量消费水平约 600kW·h/（头·年），根据《IPCC 指南》方法估算一头奶牛年产粪便的沼气生产潜力约 800m³，发电潜力达到 1600kW·h/（头·年）（郑永辉等，2021）。厌氧条件下存储的粪使其 N₂O 排放量也远低于直接储存和放牧条件下的排放量（高娇等，2022；周静等，2013）。

发酵堆肥过程中，好氧堆肥的温室气体排放量远低于自然堆放的排放量，猪粪在充分好氧条件下，二氧化碳排放量仅占自然堆存的 19%-25%（王健等，2019）。翻抛可减少 CH₄ 等温室气体排放，牛粪翻堆堆肥相对于传统的粪污储存可实现 CH₄ 减排 71%，N₂O 减排约 49%。堆肥中添加外源性物质、菌剂可减少温室气体排放，添加 9%的生物炭能够减少 12.5%的氧化亚氮和 29.9%和 CH₄ 排放量（王义祥，2021）；鸡粪中添加具有固氮产酸特性的芽孢杆菌和沸石、过磷酸钙组成的化学添加剂，N₂O 减排 25%~26%（顾沈怡，2022），牛粪中接种 3%的复合微生物菌剂，CH₄ 排放减少 33%，N₂O 排放减少 45%（卢彬，2018）；猪粪堆肥过程中气体排放 CH₄ 损失占初始总碳的 4.3%，N₂O 损失占初始总氮的 0.72%，通过添加 10%的生物炭可同步降低 19.0%的 CH₄ 和 37.5%的 N₂O 的排放（朱志平，2020）。

粪污堆肥后还田，相对于养殖场粪尿常规管理方式，“种—养”结合可显著降低奶牛场氨挥发，氨减排率达到 66.5%（张祎，2020）。

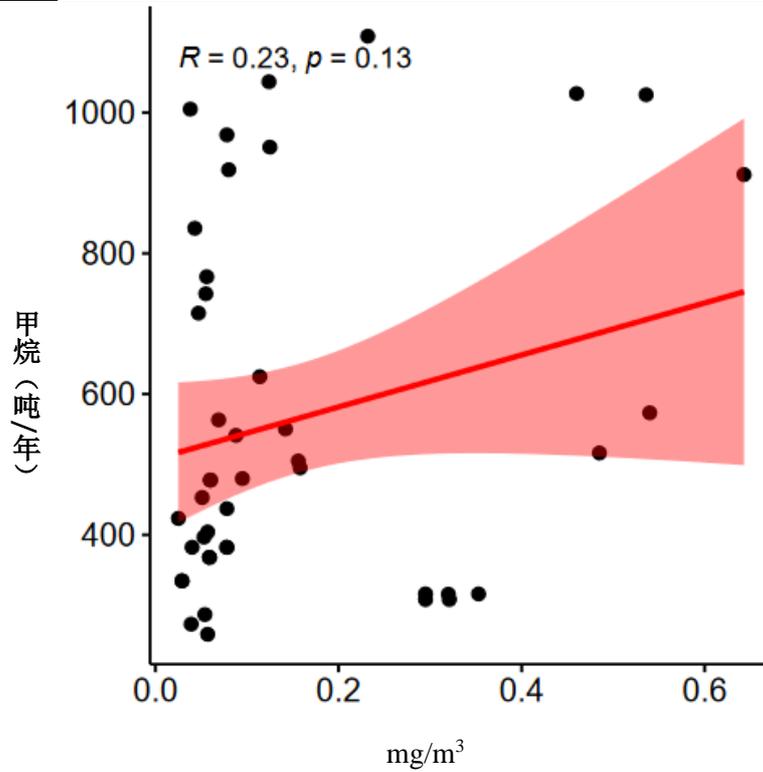
5.2 奶牛场恶臭污染物与温室气体排放相关性

5.2.1 规模化奶牛场厂界恶臭浓度与温室气体排放关系

收集调度内蒙古地区 32 家规模化奶牛养殖场，计算温室气体甲烷和氧化亚氮排放量，分析 2022-2023 年养殖场厂界臭气浓度平均值与温室气体排放量的相关关系，共 128 个样本量。养殖场厂界氨气浓度分别与氧化亚氮排放量、甲烷排放总量均呈不显著正相关。

表 5-3 奶牛场厂界氨气浓度与甲烷排放量、氧化亚氮排放量的相关性

	甲烷排放量		氧化亚氮排放量	
	相关系数(r)	P 值(p-value)	相关系数(r)	P 值(p-value)
厂界氨气浓度	0.236	0.123	0.233	0.127



奶牛场厂界氨气浓度与甲烷排放量的相关关系图

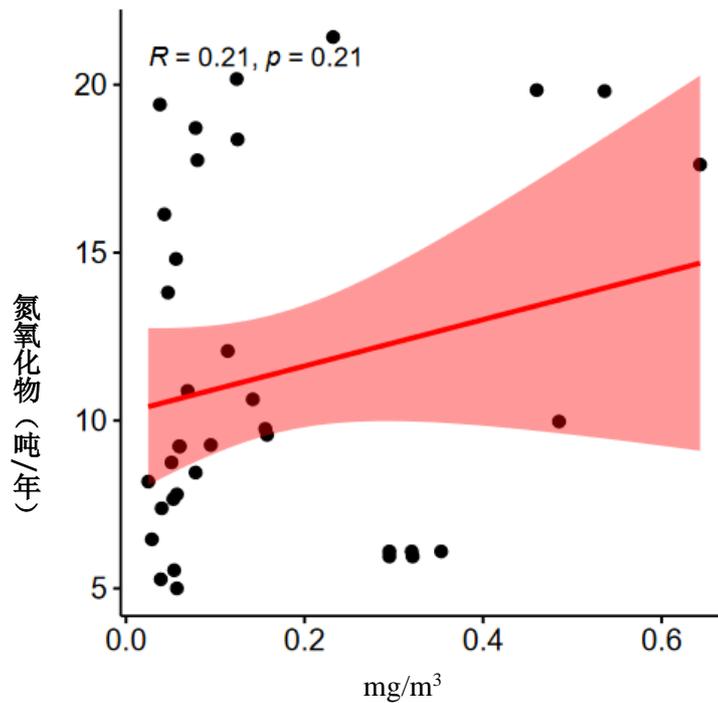


图 5-1 奶牛场厂界氨气浓度与氧化亚氮排放量的相关关系图

5.2.2 规模化奶牛场堆肥车间恶臭污染物与温室气体排放相关性

选取呼和浩特市某典型规模化奶牛场，同步监测一体化智能好氧发酵系统的氨气浓度和温室气体排放浓度，在一个发酵周期内，每天昼夜连续监测，每2h监测一次，连续监测8天，分析氨气污染物和甲烷、氧化亚氮的相关性。

氨气采用纳氏试剂分光光度法，根据需要设定采样流量0.50-1.0L/min，使采样器抽气泵保持恒速，采样完成后根据仪器的累计采样时间计算出采样体积，本次采样流量设定为0.50L/min，采样时间1小时。

甲烷和氧化亚氮采用气相色谱法测定，采用真空箱负压方式采集气态样品，利用气体采集器内的真空泵将真空箱内的空气抽出，使气体样品袋外的压力低于样品袋内的压力，被采集的气体就进入气体样品袋内。

监测分析发现，氨气、甲烷分别与氧化亚氮无相关性。氨气与甲烷之间具有显著的负相关性， $Y=-0.24X+5.8$ （ P 值 <0.05 ）。

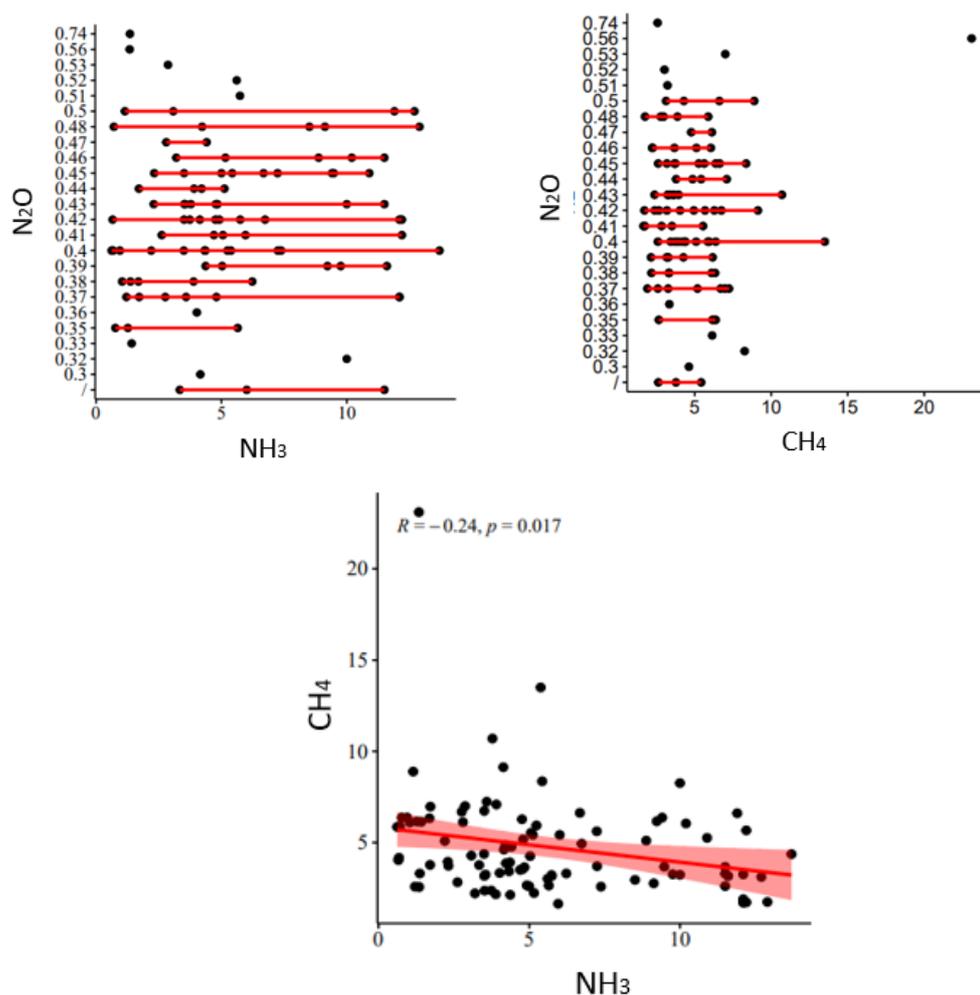


图 5-2 氨气、甲烷与氧化亚氮的相关性

简单线性回归分析预测，氨气、甲烷的关系： $y = -0.3123x + 7.0319$ 。

表 5-4 氨气、甲烷简单线性回归分析结果

	Coefficients	标准 误差	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
Intercept	7.031874018	0.709674695	9.908587786	2.87439E-16	5.622798274	8.440949761	5.622798274	8.440949761
X Variable 1	-0.312325335	0.128178717	-2.436639578	0.016707296	-0.566827183	-0.057823488	-0.566827183	-0.057823488

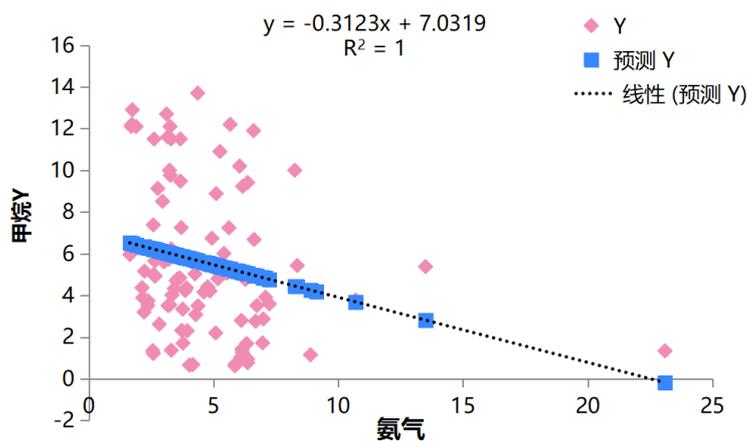
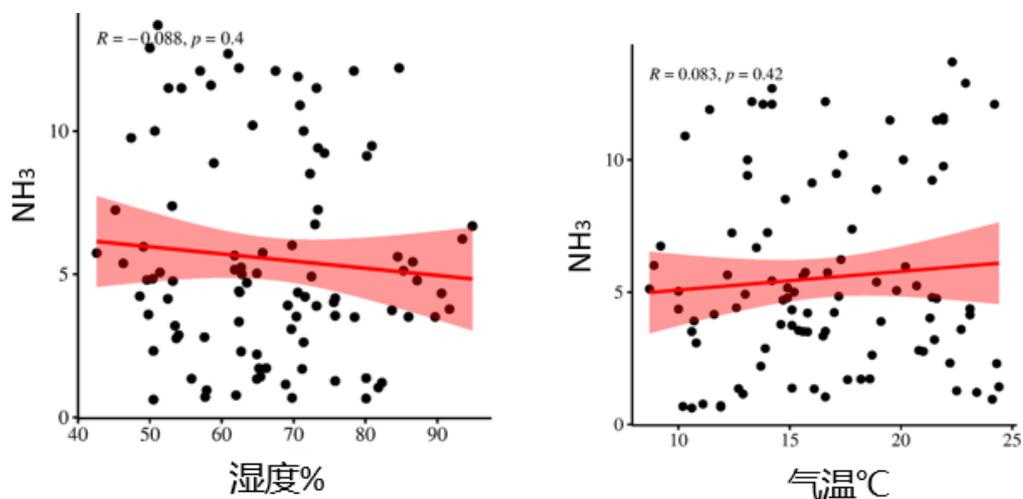


图 5-3 简单线性回归分析

同步监测了发酵仓内空气温度、湿度，分析影响氨气和甲烷、氧化亚氮气体的主要气象因子。氨气浓度随着空气温度的升高而有所增加，随空气湿度的增加而降低，但这种相关性均不显著（P 值>0.05）。甲烷和氧化亚氮均与空气温度和湿度之间具有不显著的负相关性。



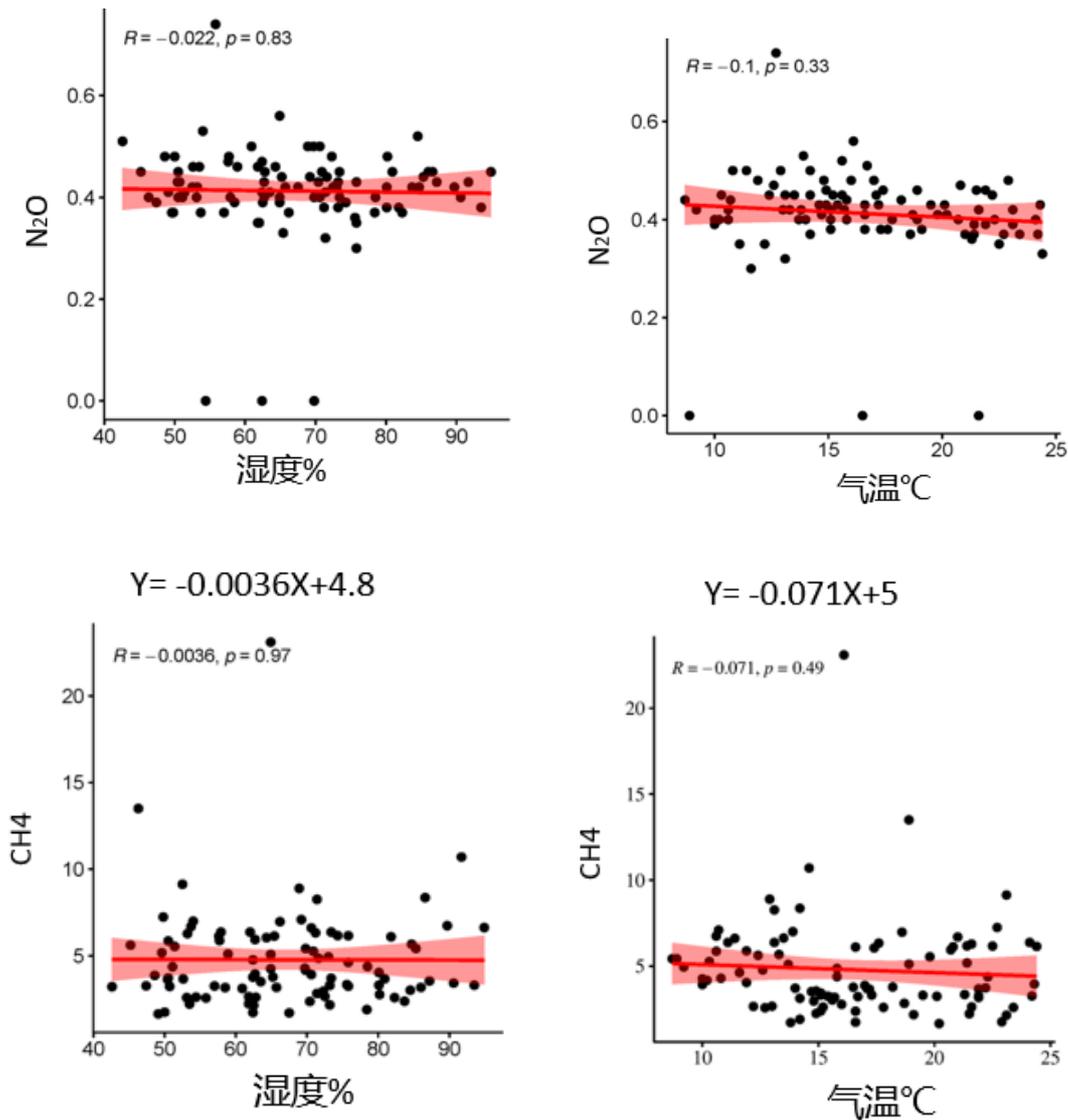


图 5-4 氨气、甲烷与氧化亚氮的影响因素

5.3 内蒙古畜牧业恶臭污染物与温室气体协同控制措施

鉴于养殖场恶臭污染和碳排放具有一定的同根同源性，需要采取适宜的模式方法处理畜禽粪污，实现粪污无害化处理并综合利用的同时，有效减少温室气体的排放。减少温室气体和臭气污染物的重要途径是源头控制，即通过调节动物饮食、添加抗产甲烷菌等化学抑制剂、电子受体（硝酸盐）、离子载体（莫能菌素）等抑制肠道发酵 CH₄ 产生，也可以通过膳食脂质、提高饮食消化率、密集畜舍、改善健康、提高饲养效率和繁殖效率、优化育种等措施来降低 CH₄ 排放强度。缓解 N₂O 排放的方案措施主要涉及饮食干预（降低蛋白含量、

补充浓缩单宁或盐等）、提高生产效率（育种、改善健康和繁殖效率）、加强粪便储存和粪便管理、提高肥料利用率（添加硝化抑制剂）、控制地下水位、减少放牧及翻耕操作， N_2O 缓解需要同时关注对 CH_4 或者 CO_2 的影响。

这些措施中部分内容在其他章节详细介绍，这里着重从粪便管理端，提出畜牧业减污降碳协同措施。单一的缓解方案能达到一定的减排效果，但综合不同排放控制策略，才能更大程度减少畜禽养殖的碳排放。

（1）舍内粪便干法清理

粪便进行有效管理是降低奶牛场温室气体排放的关键，在粪污收集阶段，优先使用干清粪技术减少粪污的产出量，推广应用机械刮板干清粪生产技术，可采用固定链式刮粪板、机械铲车、清粪罐车和滑移装载机清粪工艺将污水和粪便分离开来，减少液体粪污的产出，粪便直接堆积发酵，污水进一步发酵处理。若 100 头泌乳牛每天约产生 5 吨粪尿，如采用水冲清粪模式会形成 10~15 吨粪污，而采用“机械刮板清粪”模式，会比水冲清粪模式减少 100%~150% 的粪污排放量和无害化处理量，粪污处理碳减排效果显著。

同时科学合理设计清粪频率，降低粪便在养殖区域滞留时间，进而减少粪便处理前的温室气体产生量。一般牛舍粪便一天清理一次，运动场半年清理 1~2 次为宜。

（2）厂内实现雨污分流

养殖场内部构建完善的污水系统，用于收集粪便、尿液和初期雨水，排污管道设置在地下，实行封闭化的收集排放。在养殖场内部和周围构建完善的雨水导流和排灌系统，降雨后快速将雨水排出养殖场，不增加养殖场的污水总量。

（3）粪污科学合理储存

建设集粪池、粪污混合储存池或者污水处理沉淀池，开启混合搅拌旋切泵，将粪污中秸秆、长草切碎并搅拌均匀，输送到固液分离机进行粪污固液分离。对于经济能力较差的小规模养殖场，可以建设沉沙池，用于污水沉淀分离，定期清掏固体沉淀物进行堆肥，减少污水产生量及污染物排放总量。粪污混合池和沉沙池均要进行遮盖管理，并适当喷洒臭气抑制剂。

（4）选择适宜的粪污处理工艺

根据牲畜种类、养殖规模和当地气候条件、土地利用便利性等因素，科学合理选择粪污处理工艺。本项目提出几种主流的粪污处理方式，奶牛有“固液

分离+固体发酵堆肥+液肥还田”，“固液分离+沼气发电+沼渣垫料+沼液还田”，实现粪污的资源化利用。肉牛粪污处理方式为：粪污收集+堆肥+垫料和还田。羊的粪污处理方式为：粪便收集+堆肥+还田。

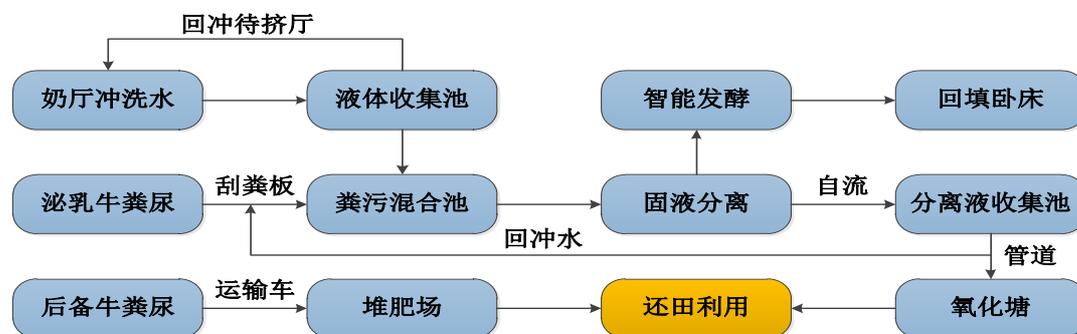


图 5-5 奶牛典型粪污处理工艺一

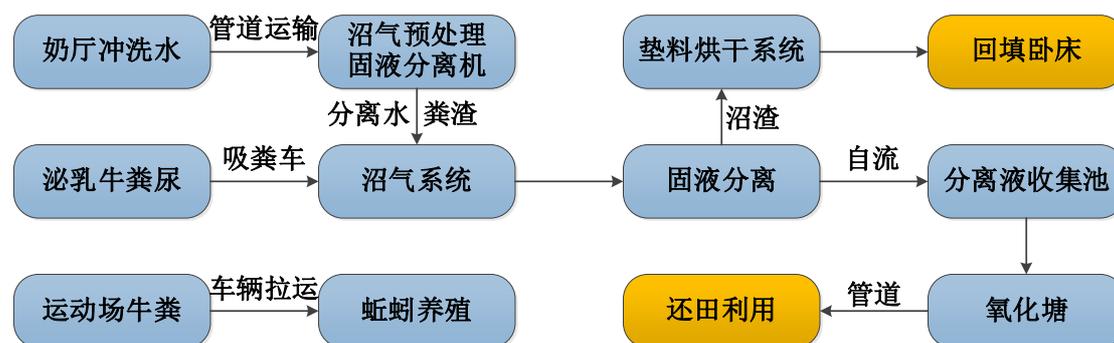


图 5-6 奶牛典型粪污处理工艺二

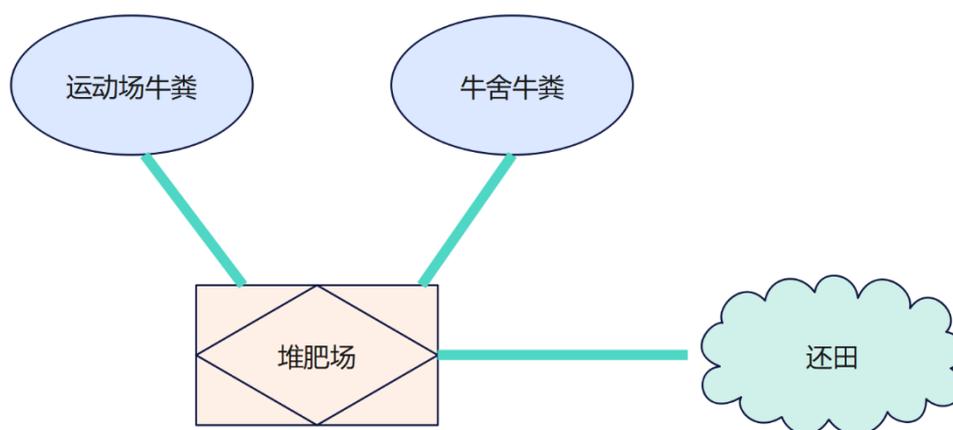


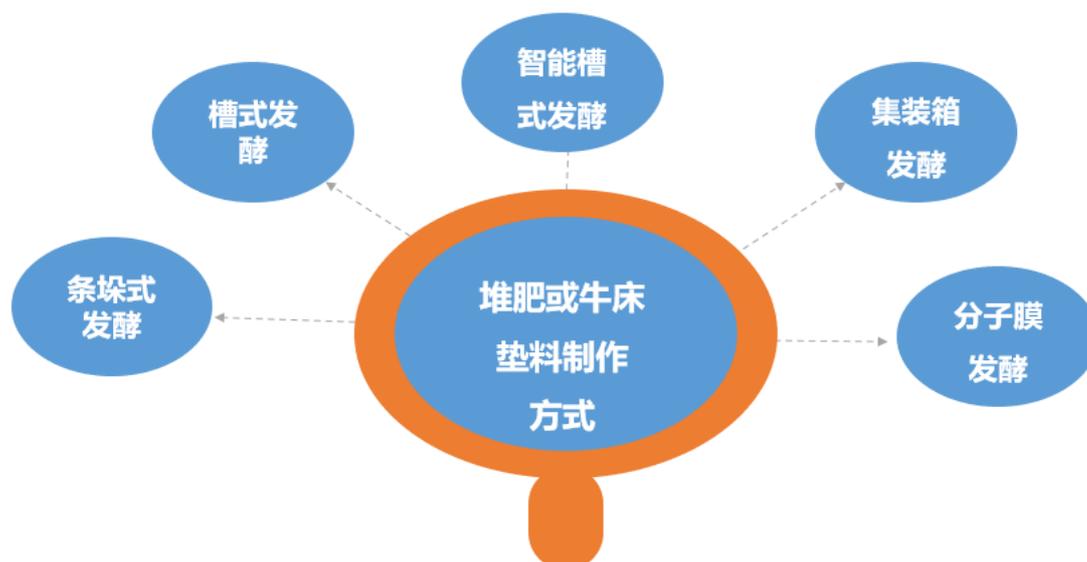
图 5-7 肉牛和羊的粪污处理模式

——**固液分离**。主要功能是将粪污混合物进行干湿分离，分离完的粪渣和液体再各自进入对应系统进行有效的无害化处理。较为先进的德国 GEA、美国 USFarm 的镜面分离机，以及奥地利保尔、意大利威尔姆、意大利 CRM 的螺旋挤压机。根据粪污收集方式、分离液浓度、卧床垫料、分离后粪渣的指标要求等技术参数进行选型匹配。

——**固体粪便堆肥**。粪污经固液分离机进行固液分离后，固体粪使用好氧发酵堆肥技术杀死病原菌、分解有机质，生产有机肥或牛卧床料，实现固废的资源化利用和污染物减排。翻堆堆肥相对于传统的粪污储存可实现 CH₄ 减排 71%，N₂O 排放可实现减排约 49%。

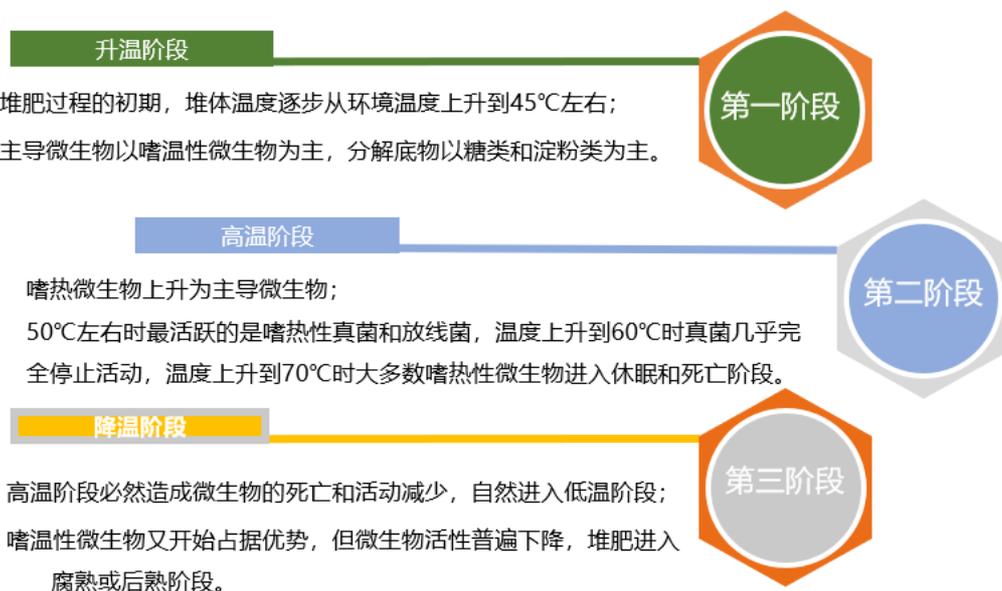
好氧堆肥是通过好氧微生物自身的生命活动，把一部分被吸收的有机物氧化成简单的无机物，同时释放出可供微生物生长活动所需的能量，而另一部分有机物则被合成新的细胞质，是微生物不断生长繁殖，产出更多生物体的过程。

目前内蒙古主流的堆肥方式有条垛式、槽式、分子膜、集装箱、智能机器人等。

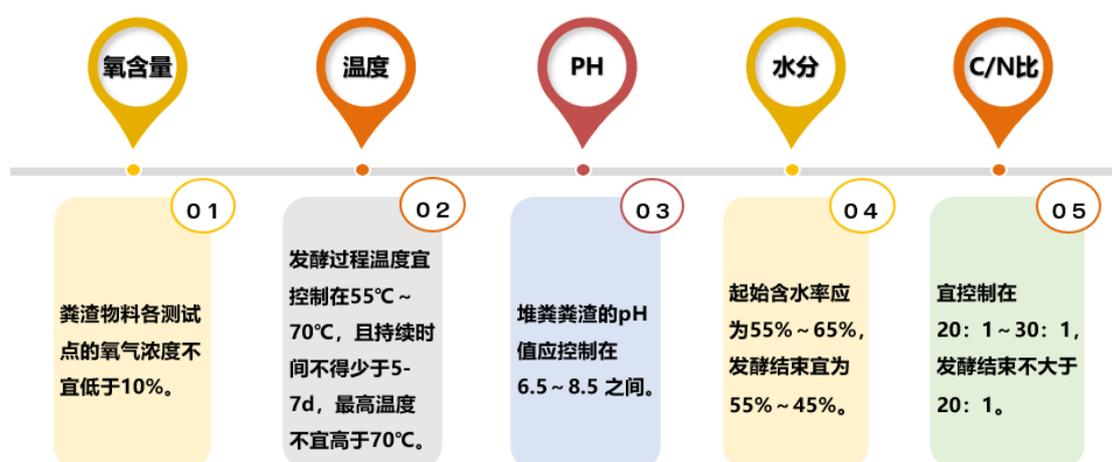


堆肥好氧发酵要经过三个阶段：升温阶段、高温阶段、降温阶段。升温阶段是堆肥过程的初期，堆体温度逐步从环境温度上升到 45℃左右；主导微生物以嗜温性微生物为主，分解底物以糖类和淀粉类为主。高温阶段，嗜热微生物上升为主导微生物；50℃左右时最活跃的是嗜热性真菌和放线菌，温度上升到 60℃时真菌几乎完全停止活动，温度上升到 70℃时大多数嗜热性微生物进入休

眠和死亡阶段。高温阶段必然造成微生物的死亡和活动减少，自然进入低温阶段；嗜温性微生物又开始占据优势，但微生物活性普遍下降，堆肥进入腐熟或后熟阶段。



好氧发酵受氧含量、温度、OH、水分、C/N 的影响，一般氧气浓度不宜低于 10%，发酵温度控制在 55°C~70°C，且持续时间不得少于 5-7 天，pH 值应控制在 6.5~8.5 之间，起始含水率不高于 55%~65%，C/N 宜控制在 20: 1~30: 1。



各种堆肥工艺特点比较如下表。

表 5-5 内蒙古几种不同粪便堆肥方式特征比较

发酵方式	技术参数	发酵天数	翻抛频次	鼓风曝气	优点	缺点
条垛式	条垛高度 1.2~1.5 米, 宽 1.5~3.2 米	夏季 10 天, 冬季 20--30 天或更长, 确保 55℃ 以上维持 5--7 天	55℃ 以上每天翻堆一次, 70℃ 以上立即翻堆		投资少, 运行成本低, 操作简单	受气候条件影响较大, 发酵均匀度不足, 升温慢, 占地面积大, 有效利用率低, 臭气浓度高
槽式	槽体高度 1.8 米, 宽 5 米	夏季 10 天, 冬季 15--20 天, 甚至更长, 确保 50 度以上维持 5--7 天	堆体温度 50℃ 以上后翻堆一次, 55℃ 以上后每天翻堆一次, 70 度以上立即翻堆		投资较少, 运行成本低, 操作简单	受气候条件影响较大, 冬季升温慢, 占地面积大, 土建投资高。发酵仓内气味重
分子膜	工艺系统包括分子膜, 发酵曝气系统, 压边系统、远程数据传输和控制系统等。单张膜 35 米×10 米, 堆体高度 1.8 米。单堆发酵垫料量 320m ³	发酵天数 10-15 天, 发酵温度 55~65℃		堆体 40℃ 以下不曝气, 40℃ 以上间歇式曝气, 70℃ 以上 24 小时曝气	投资少, 便携式, 随时随地可以发酵, 受外界温度影响较小。堆体上覆盖分子膜可让水蒸气从空隙中散发出来, 但能确保发酵温度和臭气不散发, 周边臭气浓度低	占地面积大, 极冷天气下散发出的水蒸气预冷后立即冰冻会将分子膜空隙堵塞, 影响水蒸气散发, 延长发酵时间
集装箱	现场手动控制或远程控制, 集输送、发酵、供氧、监测、控制等功能于一体。单台最大处理能力 48 m ³ /d, 装	发酵时间为 24 小时, 可实现自动化运行, 发酵仓温度 65~75℃		24 小时负压抽风, 确保发酵仓内氧气需求量不低于 8%	自动化程度高, 无害化处理速度快, 24 小时无害化处理后即可出料, 出料含水率约 60%。臭气经治理后达标排放	投资成本高, 无害化处理后含水率在 60% 左右还需要晾晒至 45% 以下。需要配套晾晒场或者掺和稻壳使用

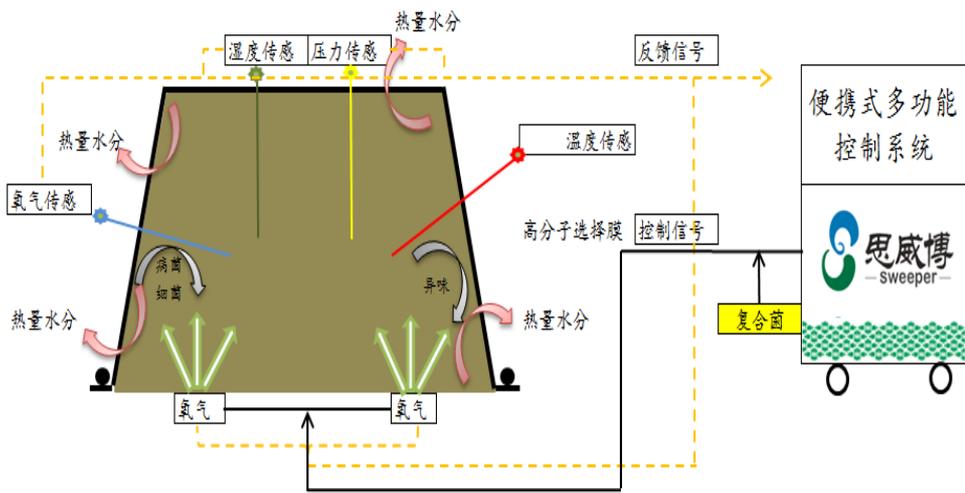
发酵方式	技术参数	发酵天数	翻抛频次	鼓风曝气	优点	缺点
	机功率 18.2kW, 占地面积 16.5m × 5.5m, 檐 口高度不 低于 5.2m					
智能发酵仓	单台最大 处理能力 34 t/d, 装机功率 168 kW, 外形尺寸 60m×16m ×8m	一般 8-12 天, 50 度 以上维持 5--7 天	建堆后温 度升至 50 度以上后 翻堆一 次, 温度 上升至 70 度以上立 即翻堆。	每个 槽体 布置 鼓风 曝气, 间歇 式曝 气, 90 分 钟曝 气 3- 5 分 钟	自动化程 度高, 整个 发酵仓无 需人工进 入, 自行 进料、建 堆、翻堆 、曝气、 出料, 不 受外界环 境影响, 可 全年运行。 占地面 积小, 臭 气经治理 后达标排 放, 环保 效益好	投资成本 高, 设备 费用高, 对 人工素质 要求较高



条垛式



槽式



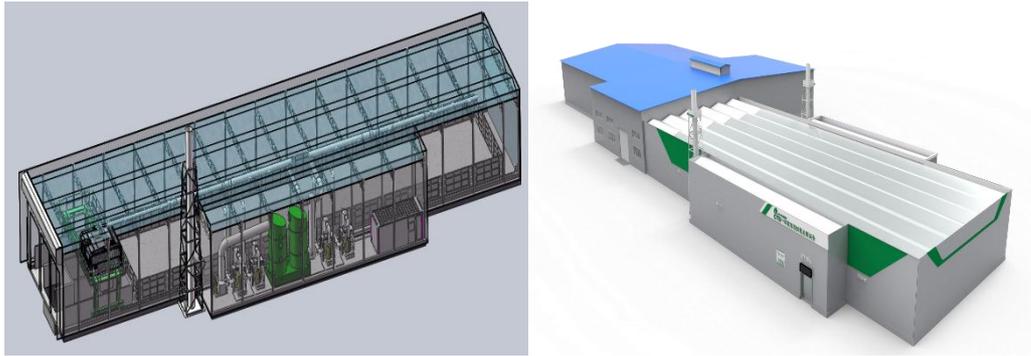
“生物+分子膜”发酵工作原理图



分子膜发酵



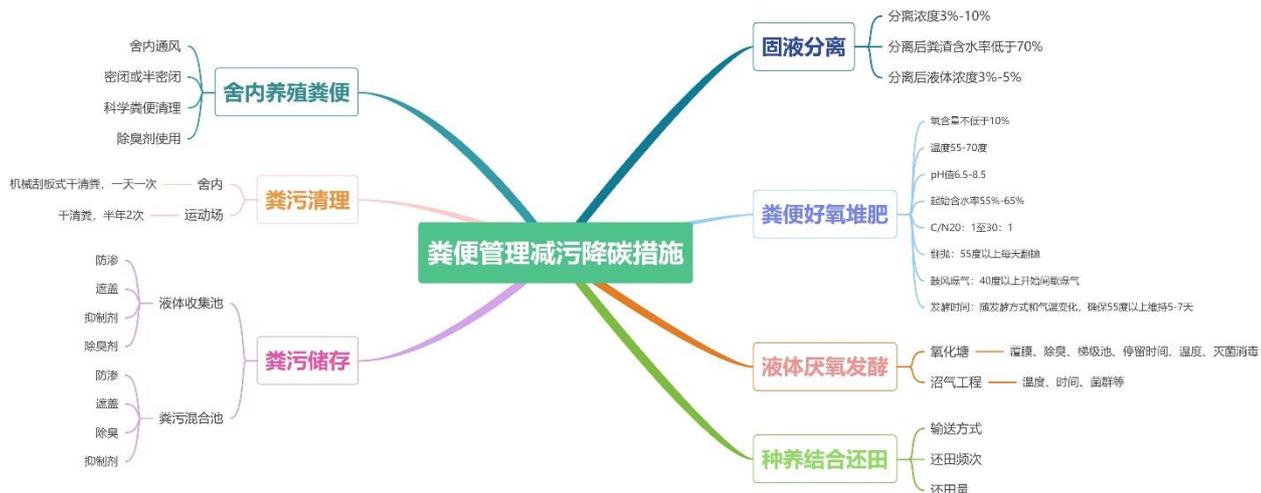
集装箱发酵



智能一体化发酵

——**液体粪污无害化处理**。奶牛粪污经固液分离后，固体粪污生产有机肥、牛床垫料和农田消纳等；液体粪污一般多采用絮凝沉淀、好氧发酵和自然净化综合方法、厌氧发酵等进行无害化处理。厌氧发酵是在厌氧环境下通过厌氧性微生物的代谢活动，将大分子量的有机物分解成较小分子量的有机物并将其中一部分的有机物转化成甲烷等。

——**沼气工程**。养殖较为密集的区域，可以联合多个养殖户构建大型的沼气工程。将沼气池和各个养殖场的排污渠道连接，收集粪便、尿液、污水，通过厌氧发酵将粪便污水当中的各种有机物进行分解。厌氧发酵产生的沼液、沼渣是优质有机肥，施入农田或发展设施蔬菜种植，增加土壤有机质，促进土壤固碳。同时，厌氧发酵产生的沼气发电用于养殖场的生活照明，也可以燃烧加热用于厌氧发酵的热源，进而减少奶牛场外部的能源投入。根据《2019 年全国农产品成本资料收益汇编》，我国规模化奶牛养殖场平均电量消费水平约 $600\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{头}\cdot\text{年})$ ，根据《IPCC 指南》方法估算一头奶牛年产粪便的沼气生产潜力约 800m^3 ，发电潜力达到 $1600\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{头}\cdot\text{年})$ ，即养殖场所有电力可由沼气工程发电全部提供，且沼气利用全过程中 CH_4 泄漏可控制在总产气的 1.0% 以下，减污降碳效果显著。



牧场减污降碳措施示意图

5.4 内蒙古典型养殖场减污降碳技术应用案例

5.4.1 奶牛场案例

将畜牧业绿色低碳技术应用到内蒙古呼和浩特市地区内蒙古优然牧业有限公司，集成一套适合内蒙古地区的环保友好型粪污处理工艺，即“固液分离+智能发酵+液肥还田”工艺，实现粪污的资源化利用以及减污降碳协同增效。

关键环节1——废水和粪污收集、混合系统

奶厅废水收集系统:奶厅冲洗水通过管道收集到液体收集池。利用挤奶厅地面的冲洗水回收后冲洗待挤厅地面，起到节约用水的作用。待挤厅地面安装冲洗阀，将收集池的上清液提升至冲洗阀，用于冲洗待挤厅地面。



待挤厅地面冲洗水



自控冲洗阀

牛舍粪污收集：牛舍清粪有刮板清粪、铲车清粪、吸粪车清粪三种清粪方式，根据牧场地势、垫料以及后端粪污处理模式选择合适的清粪方式。清理的粪污和奶厅废水收集到粪污混合池。



刮粪板清粪



铲车清粪



吸粪车清粪

粪污混合系统：包含粪污混合池、搅拌机、搅拌输送泵、回冲泵等设备。该系统主要功能是将奶厅废水和牛舍粪尿混合均匀，提升至固液分离系统进行分离。混合池的有效容积一般按照每天粪污量的 1/3 考虑，最大不超过一天的粪污量，减少废水因储存时间长厌氧发酵产生的臭气。



粪污输送渠



运输车



粪污混合池

关键环节 2——固液分离系统

主要功能是将粪污进行干湿分离，分离完的粪渣和液体再各自进入对应系统进行有效的无害化处理。引入德国 GEA、美国 USFarm 的镜面分离机，以及奥地利保尔、意大利威尔姆、意大利 CRM 的螺旋挤压机，对粪污混合物进行分离。根据粪污收集方式、分离液浓度、卧床垫料、分离后粪渣的指标要求等技术参数进行选型匹配。



分离浓度: 3%--8%
处理能力: 50--90立方/小时, 单台分离机可以处理约3000头奶牛的粪污量。
分离完粪渣含水率: 低于70%。
分离完液体浓度: 3%-5%
适应范围: 沙垫料卧床、回冲水、以及规模大于5000头的奶牛场。

镜面分离机



分离浓度: 5%--10%
处理能力: 20--30立方/小时, 单台分离机可以处理约1000头奶牛的粪污量。
分离完粪渣含水率: 低于70%。
分离完液体浓度: 3%-5%
适应范围: 有机卧床、回冲水少、以及规模小于5000头的奶牛场。

螺旋挤压机

关键环节3—— 一体化智能好氧发酵系统

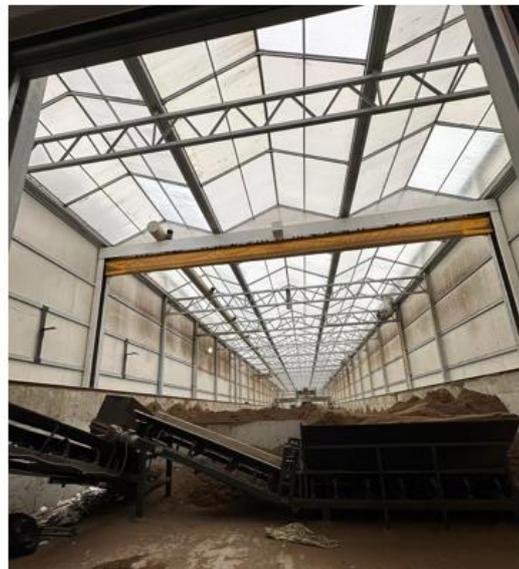
固液分离后, 固体粪便采用一体化智能好氧发酵系统进行堆肥, 该系统集输送、发酵、供氧、匀翻、除臭、监测、控制等功能于一体, 由发酵舱、智能机器人、生物反应器、净化单元、智能中心以及进出料系统等六部分组成, 可实现连续生产, 全过程智能化控制。

关键技术参数: 单台最大处理能力34 t/d, 现场手动控制或远程自动控制, 装机功率 168 kW, 外形尺寸单台 60m×16m×8m。

发酵天数: 达到粪渣的无害化一般需要8-12天, 50度以上时间需要维持5--7天。

翻抛次数: 建堆后温度升至50度以上后翻堆一次, 温度上升至70度以上立即翻堆, 其余时间翻抛根据曝气量、发酵温度、水分等情况而定。

鼓风次数: 每个槽体布置鼓风曝气, 根据物料温度和含水率情况间歇式曝气, 一般在90-120分钟内曝气3--5分钟。





一体化智能好氧发酵仓

关键环节 4—— 养殖水氧化塘处理系统

固液分离后废水进入氧化塘系统进行无害化处理，牧场配套氧化塘不少于三座，可以满足 6 个月以上的厌氧、兼氧、好氧发酵过程。为了清塘方便，一般一号氧化塘为设计成两座并联塘且带有下塘斜坡，定期进行池底清淤，确保氧化塘正常运行。



氧化塘

氧化塘覆膜

关键环节 5—— 粪肥还田

目前还田方式有四种，分别是 U 型渠还田、管道还田、罐车还田、注入式还田，根据周边农田的距离、农田的平整度等因素选择合适的还田方式。U 型渠、管道以及罐车还田均属于漫灌式还田，还田量和还田均匀度不可控，可能造成局部积水污染环境，同时漫灌时会释放一定的臭气，运行投资成本低。注

入式还田属于精准还田的一种，能够均匀还田，且不产生臭气，对环境几乎无污染，投资成本较大。



5.4.2 肉牛场案例

以丰镇丰隆肉牛养殖场为例，介绍肉牛养殖场绿色技术应用情况。

关键环节 1—— 饲养粪污清理

肉牛养殖多采用散栏式饲养结合运动场散养技术，肉牛可在不拴系、无固定床位的牛舍中自由采食、自由饮水和自由运动。用碎秸秆、干粪作为牛舍及运动场垫料，运动场和牛舍均采用干清粪工艺，一般采用刮粪板清粪、半机械清粪。



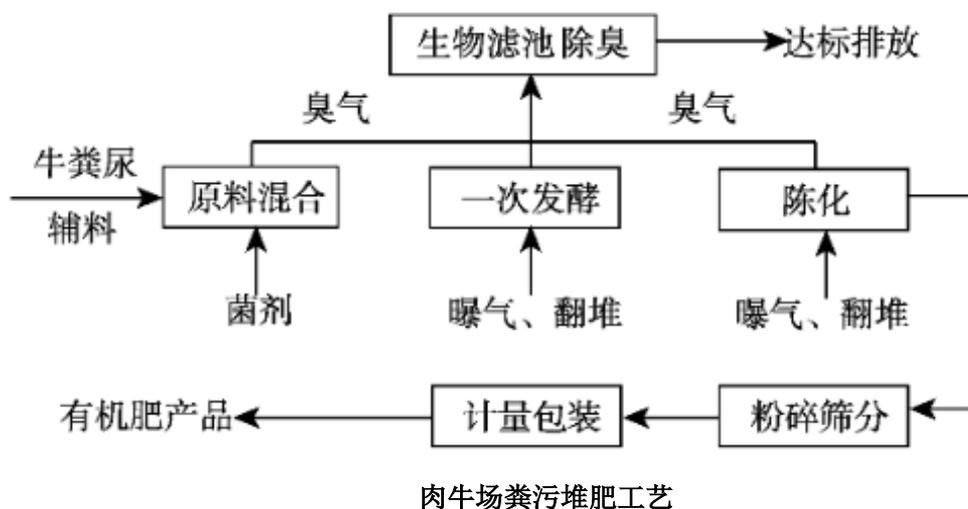
肉牛运动场

关键环节 2—— 粪污暂存

粪污经清粪车铲出后，运至粪污暂存间。粪污暂存车间采取封闭半封闭结构，采取防渗漏、防流失措施，并喷洒生物除臭剂，降低 H_2S 、 NH_3 、臭气浓度。

关键环节 3—— 粪污堆肥

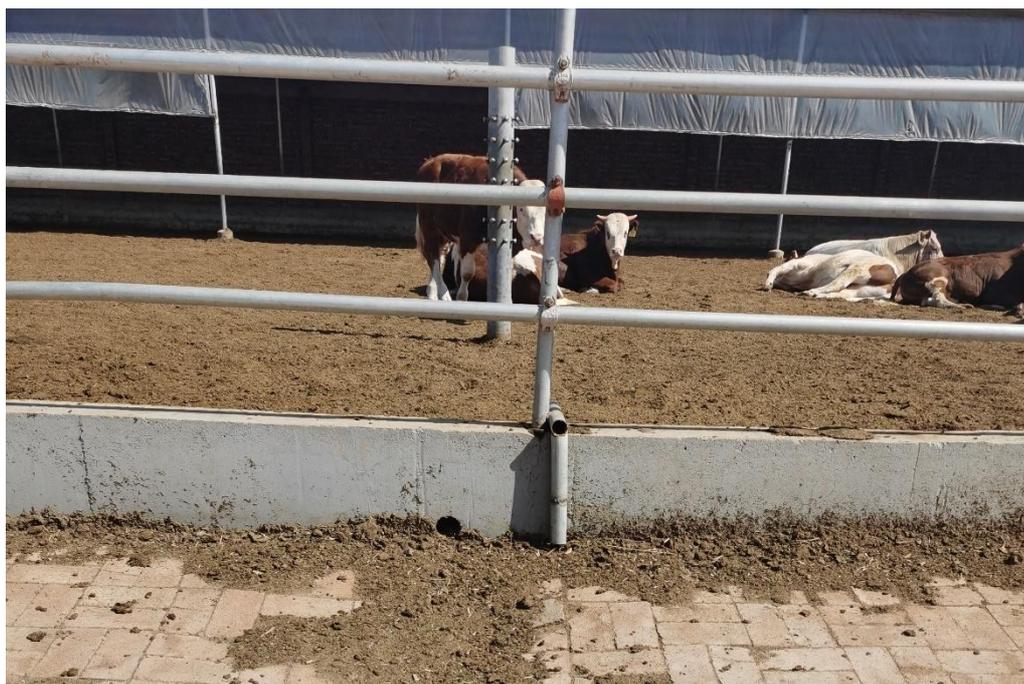
粪污由暂存间移送到堆肥车间，发酵制作有机肥，施入农田或作为牛床垫料。肉牛堆肥一般采用高温好氧堆肥工艺。肉牛粪便配秸秆辅料，调整碳氮比为 20—30，水分 60%-65%，加入适量堆肥发酵菌剂进行堆肥。堆肥过程有一次发酵和陈化过程，时间分别为 15-20d 和 10-20d，中间采用间歇式通风供氧、翻抛机翻拌物料，最终堆肥腐熟时含水量下降至 35% 左右。



肉牛场粪污堆肥工艺

关键环节 4—— 雨污分流

肉牛场采用雨污分流管理，运动场周围的初期雨水收集到沉淀池，沉淀处理。为减少肉牛运动场暴雨冲刷，场内设置雨水管道，输送到污水沉淀池。

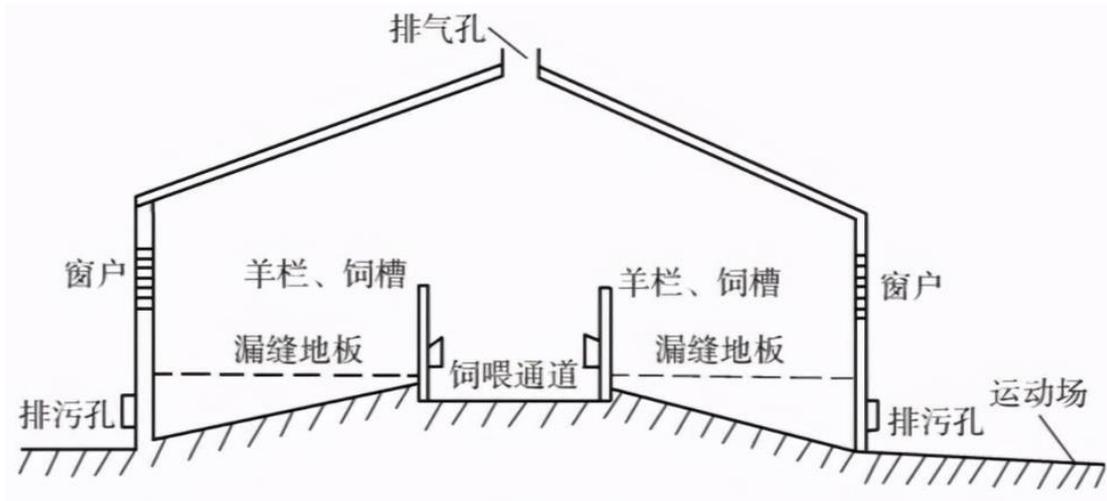


5.4.3 羊舍饲养殖案例

以四子王旗赛诺种羊养殖场等为例，介绍羊舍饲养殖污染防治和绿色发展措施应用情况。羊舍通过自然通风、喷洒抑臭剂等措施减少臭气，恶臭治理后通过羊舍房顶排风扇排出，每天清理羊舍粪便，以减少堆存时间和臭气产生。有些羊场羊舍设置漏缝地板，干燥、通风、粪便易于清除等优点。一般氨最大浓度为 $0.008\text{mg}/\text{m}^3$ ，硫化氢最大浓度为 $0.001\text{mg}/\text{m}^3$ ，恶臭 16，远低于恶臭污染物排放标准限值要求。种羊粪便清理后堆肥还田。



牧场羊舍及排风扇实拍图



羊舍漏缝地板设置示意图

5.5 养殖场减污降碳协同效应及措施研究小结

(1) 动物粪便处理和资源化利用环节是温室气体的重要排放源，粪便中有机物分解会产生甲烷，内蒙古牧场粪便管理过程的碳排放量占畜牧业碳排放量的41%左右。

(2) 畜禽粪污所导致的温室气体排放量主要取决于粪便产生气体的潜力、粪便的处理方式和气候条件，受饲养规模和方式、养殖环境、清粪方式、堆肥模式等粪污处理工艺的影响。

内蒙古几种牲畜中，牛的碳排放因子最大，一头牛的粪便可排放甲烷 7kg，一只绵羊的粪便可排放甲烷 0.17kg；养殖规模化程度越高，碳排放水平越低，发酵床、高位床等养殖方式温室气体排放较传统养殖舍内减少 20%以上；一般而言，粪污堆存时间越长温室气体排放量越大，但过分得清理粪便会加快温室气体的排放速率，一般牛舍粪便一天清理一次，运动场半年清理一次为宜；粪便暂存环境温度升高（超过 15℃），臭气和 CH₄排放量均会增加；环境的氧气含量充足，粪便水分含量较少时，氧化亚氮的产生增多，甲烷的排放降低；通风会降低温室气体的排放量；粪便以液体形态储存时温室气体和臭气排放速率大于固体形态的粪便；舍内垫料对温室气体的影响研究结论不同；表面覆盖可减少液态粪便 30%以上的 CH₄排放量；粪便暂存添加硝化抑制剂可对二氧化碳、甲烷和氨气产生明显的抑制作用，降低效果分别在 12%、3%、20%以上。

(3) 粪污处理工艺模式不同，甲烷等产生量不同。机械刮板清粪等干清粪和固液分离可有效减少 CH_4 和臭气的排放；固液分离和厌氧消化的组合方式可减排温室气体 40%左右；粪便厌氧条件下存储 N_2O 排放量远低于直接储存和放牧排放，奶牛粪水液体贮存的方式全部更改为厌氧沼气处理后，污染物可减排 20%以上；好氧堆肥的温室气体排放量远低于自然堆放；翻抛可减少 CH_4 等温室气体排放，牛粪翻堆堆肥可实现 CH_4 减排 71%， N_2O 减排约 49%；堆肥中添加外源性物质、菌剂可减少温室气体排放至少 10%；粪便堆肥后实现种养结合模式还田可实现氨减排 60%以上。

(4) 对奶牛粪便堆肥车间空气中温室气体和氨气监测后预测，氨气、甲烷存在关系： $y = -0.3123x + 7.0319$ 。氨气浓度随着空气温度的升高而有所增加，随空气湿度的增加而降低，这种相关性均不显著（P 值>0.05），甲烷和氧化亚氮均与空气温度和湿度之间具有不显著的负相关性。

(5) 提出牧场减污降碳协同措施：

厂内实现雨污分流

舍内粪便干法清理：机械刮板清粪。

粪污储存：粪污混合储存池，防渗，遮盖，并适当喷洒臭气抑制剂。

粪污处理工艺：奶牛采用“固液分离+固体发酵堆肥+液肥还田”、“固液分离+沼气发电+沼渣垫料+沼液还田”，堆肥方式可选用：条垛式、槽式、分子膜、集装箱、智能机器人堆肥。肉牛粪污处理方式采用：粪污收集+堆肥+垫料和还田。羊的粪污处理方式采用：粪便收集+堆肥+还田。

第六章 内蒙古畜牧业碳排放影响因素实证分析

6.1 畜禽养殖碳排放趋势评价及影响因素

6.1.1 畜禽养殖碳排放过程及评价

畜禽养殖的 CH_4 排放主要来自于牲畜消化道气体和粪便。其中，动物消化道发酵是全球认为 CH_4 排放的主要贡献者，其排放量约占总排放量的三分之一。反刍动物在喂食一段时间后将胃中半消化的食物返回嘴里再次咀嚼，并伴随产生 CH_4 。 CH_4 生成过程中导致 2%~12% 的总能量损失，据估测，反刍过程产生的 CH_4 对温室气体贡献较大，约占全球人为温室气体排放量的 5%。畜禽粪便产生 CH_4 主要是在对动物粪便储存和处理过程中发生化学反应产生的，约占人为 CH_4 排放量的 6%。畜禽粪便中的 CH_4 主要是在厌氧条件下，有机物经微生物降解而产生。畜禽粪便中 CH_4 产生过程涉及四个主要步骤。首先，碳水化合物、蛋白质和脂肪等大分子在细菌产生的外切酶作用下水解成较小的水溶性化合物。其次，在产酸细菌的催化下，水溶性化合物进一步分解为挥发性脂肪酸，酸化过程的副产物是 CO_2 、 H_2S 和 NH_3 。然后，挥发性脂肪酸被转化为乙酸、 CO_2 、 H_2 。最后，产甲烷菌以乙酸、 CO_2 、 H_2 等产物为原料合成 CH_4 。

畜禽养殖的 N_2O 排放主要来自于畜禽粪便经微生物硝化和反硝化过程，以及畜禽粪便在堆肥过程中经挥发、淋溶径流产生的排放。畜禽粪便中含有大量氮素，在堆肥过程中氮素会发生硝化作用、反硝化作用、氨化、挥发、淋溶和径流等，其中硝化作用和反硝化作用是畜禽粪便好氧堆肥产生 N_2O 的主要途径。在氧浓度较高条件下，堆肥原料中的 NH_4^+-N 和有机氮转化形成的 NH_4^+-N ，通过不完全硝化途径产生 N_2O ；在供氧不足条件下，堆肥原料中的 NO_x-N 和硝化作用生成的 NO_x-N ，通过不完全反硝化途径产生 N_2O ，由于好氧堆肥堆体中氧浓度分布不均，畜禽粪便堆肥过程产生的 N_2O 可同时来源于堆肥堆体表面的硝化途径和堆肥堆体内部的反硝化途径。在畜禽粪便堆积过程中，产生的堆肥渗滤液会以 NH_3 、 NO_x 形式挥发到大气，也会通过淋溶和径流排放到环境中。

畜禽养殖的 CO₂ 排放主要与养殖过程的能源消耗有关。畜禽养殖过程中需要用到加热、冷却、通风等多种机械设备，并消耗化石燃料和电力。能耗消耗代表一定量的 CO₂ 排放。

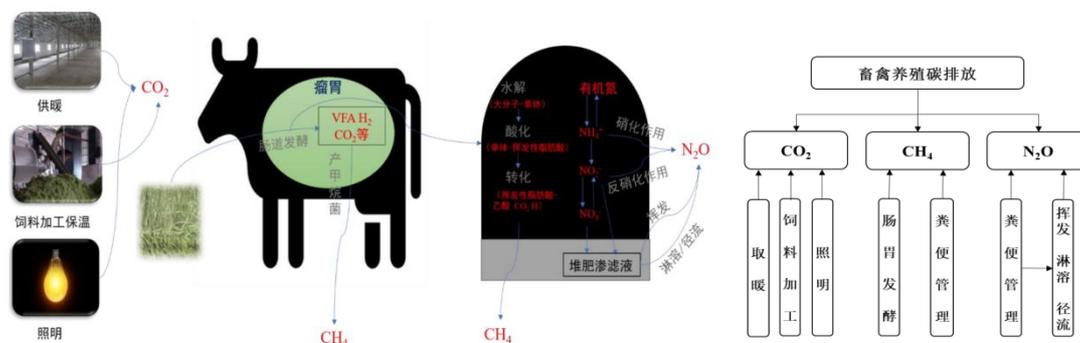


图 6-1 畜禽养殖碳排放环节示意图

6.1.2 畜禽养殖碳排放评价模型

根据（黄佳佳，2023）中国畜禽养殖碳排放趋势评价及影响因素研究，畜禽养殖碳排放评价理论框架，构建畜禽养殖碳排放模型。以温室气体升温潜势为依据，按照不同气体对大气温度的贡献大小，将 CH₄、N₂O 转化为 CO₂ 当量进行计算，根据华北地区主要养殖畜种包含奶牛、肉牛、绵羊、山羊，同时对畜种平均养殖周期，年末存栏量进行了统计。同时涉及了畜禽养殖过程能源消耗造成的 CO₂ 排放。根据畜禽养殖过程中对三种主要温室气体排放做环节分解。根据不同温室气体对大气温度的贡献度，将 CH₄、N₂O 转化为 CO₂ 当量进行计算。

$$Q_{eq} = Q_c + 28Q_m + 256Q_n$$

Q_c 畜禽养殖碳排放的 CO₂e 值, 单位 t

Q_c 、 Q_m 、 Q_n 分别为畜禽养殖 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量, 单位 t, 28 和 265 分别为 CH₄ 和 N₂O 的增温潜势差异及 CO₂e 转换系数。

畜禽养殖 CO₂ 排放量评价模型: $Q_c = Q_{ce} + Q_{cb}$

畜禽养殖 CH₄ 排放评价模型: $Q_m = Q_{md} + Q_{me}$

畜禽养殖 N₂O 排放评价模型: $Q_n = Q_{ne} + Q_{na} + Q_{nl}$

根据建立的畜禽养殖模型对碳排放进行评价，进一步确定畜禽养殖参数。选择奶牛、肉牛、绵羊、山羊进行评价，四个品种养殖周期均大于一年，年末存栏量更加能够反应年内该品种的养殖规模。

表 6-1 动物肠道发酵 CH₄ 排放因子 (kg /头/年)

饲养方式	奶牛	肉牛	绵羊	山羊
规模化饲养	88.1	52.9	8.2	8.9
农户散养	89.3	67.9	8.7	9.4
放牧饲养	99.3	58.3	7.5	6.7
平均	92.2	59.7	8.1	8.3

数据来源：《省级温室气体清单编制指南（试行）》 国家发展和改革委员会应对气候变化司

表 6-2 粪便管理 CH₄ 排放因子 (kg /头/年)

区域	奶牛	肉牛	绵羊	山羊
华北	7.46	2.82	0.15	0.17

表 6-3 粪便管理 N₂O 排放因子 (kg /头/年)

区域	奶牛	肉牛	绵羊	山羊
华北	1.85	0.79	0.09	0.09

不同温室气体对碳排放的贡献来看，CH₄ 排放的贡献占比为 48.2%~61.2%，N₂O 排放的贡献占比为 8.8%~13.3%，CO₂ 排放的贡献占比为 26.4%~43%。不同畜禽品种对碳排放的贡献来看，肉牛、奶牛、山羊、绵羊反刍动物排放占比较大，历年平均达 57.7%；山羊、绵羊碳排放量占比呈现缓慢上升趋势，奶牛、肉牛、牲畜碳排放量占比呈现逐年下降的趋势。内蒙古自治区畜禽养殖碳排放占比，总占比在 40%左右。

6.2 内蒙古农业碳排放时序变化与影响因素

以内蒙古 2000—2020 年省级数据为基础，对农业碳排放进行测算并分析其时序变化，运用 LMDI 指数分解法分析内蒙古农业碳排放驱动与抑制因素，并在此基础上分析影响因素的贡献率。

$$C = \frac{C}{AZ} \times \frac{AZ}{AG} \times \frac{AG}{P} \times P$$

$$\frac{C}{AZ} = EI, \quad \frac{AZ}{AG} = SI, \quad \frac{AG}{P} = EL$$

C, AZ, AG 及 P 分别表示农业碳排放总量、农业与畜牧业总产值、农林牧渔总产值及农业劳动力人数。EI, SI 及 EL 分别表示农业生产效率因素(若 EI 下降, 代表农业生产效率提高)、农业结构因素、农业经济发展水平因素。

$$\Delta C_{tot} = C^t - C^0 = \Delta C_{EI} + \Delta C_{SI} + \Delta C_{EL} + \Delta C_P,$$

其中, ΔC_{tot} 表示从基准年到目标年(0 到 t)农业碳排放总量的变化; C_t 为目标年农业碳排放总量; C_0 为基准年农业碳排放总量; ΔC_{EI} , ΔC_{SI} , ΔC_{EL} 及 ΔC_P 分别代表从基准年到目标年之内的农业生产效率变化、农业结构变化、农业经济发展水平变化及农业劳动力变化对农业碳排放的影响。

$$\Delta C_{EI} = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times (\ln C_{EI}^t - \ln C_{EI}^0)$$

$$\Delta C_{SI} = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times (\ln C_{SI}^t - \ln C_{SI}^0)$$

$$\Delta C_{EL} = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times (\ln C_{EL}^t - \ln C_{EL}^0)$$

$$\Delta C_P = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times (\ln C_P^t - \ln C_P^0)$$

$$\Delta C = \Delta C_{EI} + \Delta C_{SI} + \Delta C_{EL} + \Delta C_P.$$

- (1) 农业生产效率因素
- (2) 农业结构因素
- (3) 农业经济发展水平因素
- (4) 农业劳动力规模因素

表 6-4 内蒙古 2018—2020 年农业结构表

年份	农林牧渔总产值/万元	农业		林业		畜牧业		渔业总产值/万元占比/%
		总产值/万元	占比/%	总产值/万元	占比/%	总产值/万元	占比/%	
2018	29363637	15124986	51.5	1003117	3.4	12943050	44.1	2924841.0
2019	31255197	16063407	51.4	1008945	3.2	13904597	44.5	2782480.9
2020	34199330	16990067	49.7	897800	2.6	16033558	46.9	2779050.8

数据来源: 内蒙古自治区统计局

表 6-5 畜牧业碳排放系数

牲畜	肠道/CH ₄ 系数	粪便/CH ₄ 系数	粪便/N ₂ O系数
奶牛	85	7.46	1.846
肉牛	71	2.82	0.794
绵羊	8.6	0.15	0.093
山羊	8.9	0.17	0.093

数据来源：省级温室气体清单编制指南(试行)

表 6-6 2011—2020 年内蒙古自治区农业碳排放总量、结构以及强度

年份	水稻种植		牲畜养殖		农地利用		秸秆焚烧		总量/ 万 t	强度/(t/ 万元)
	碳排放量/ 万 t	比重/%	碳排放量/ 万 t	比重/%	碳排放量/ 万 t	比重/%	碳排放量/ 万 t	比重/%		
2011	55.58	1.45	3057.77	79.61	246.74	6.42	480.68	12.52	3840.77	1.74
2012	56.75	1.47	3004.14	78.04	267.54	6.95	521.15	13.54	3849.58	1.57
2013	47.97	1.22	2968.49	75.73	287.00	7.32	616.41	15.73	3919.87	1.45
2014	50.31	1.23	3093.93	75.45	314.09	7.66	642.15	15.66	4100.48	1.47
2015	51.48	1.20	3235.19	75.34	327.86	7.63	679.85	15.83	4294.38	1.56
2016	63.77	1.53	3103.09	74.62	333.22	8.01	658.66	15.84	4158.74	1.48
2017	71.37	1.63	3324.91	76.10	330.19	7.56	642.72	14.71	4369.19	1.55
2018	87.75	2.05	3187.70	74.30	319.30	7.44	695.59	16.21	4290.34	1.44
2019	94.19	2.20	3166.77	74.08	313.44	7.33	700.20	16.38	4274.60	1.35
2020	94.19	2.20	3186.60	74.32	302.89	7.06	704.09	16.42	4287.77	1.23

6.3 内蒙古农业碳排放的影响因素分析

农业生产效率因素、劳动力规模因素为负值，对农业碳排放起到了抑制作用，其中农业生产效率因素起到的抑制作用较劳动力规模因素强。由此可知，农业生产效率因素较劳动力规模因素起到的减排效果更好。具体而言，随着乡村振兴战略以及一系列惠农政策的实施，农业获得更多财政支持，有利于完善农业基础设施，提高农业生产效率。与此同时，高效率的农业设备与逐渐成熟的农业技术改变了传统农业多人合作的耕种模式，使得大量农村劳动力得到解放，农业劳动力规模变小，进而减少农业碳排放，在实现经济增长的同时推进了农业低碳化发展。

表 6-7 LMDI 模型影响因素分解结果

年份	农业生产效率因素	农业结构因素	经济发展水平因素	劳动力规模因素	总效应
2011—2012	-406.90	10.62	534.25	-129.15	8.82
2012—2013	-328.86	18.24	520.82	-139.91	70.29
2013—2014	54.62	3.49	272.31	-149.81	180.60
2014—2015	244.88	-13.21	138.73	-176.51	193.89
2015—2016	-197.43	-1.97	274.34	-210.57	-135.63
2016—2017	197.53	-2.24	190.50	-175.34	210.46
2017—2018	-351.86	16.42	474.62	-218.03	-78.87
2018—2019	-296.23	14.88	545.55	-279.93	-15.74
2019—2020	-402.52	34.20	681.86	-300.39	13.17
2000—2020	-4592.29	62.31	7551.20	-1041.12	1980.10

表 6-8 影响因素贡献率

年份	农业生产效率因素 /%	农业结构因素 /%	经济发展水平因素 /%	劳动力规模因素 /%
2011—2012	-4615.80	120.42	6060.37	-1464.99
2012—2013	-467.84	25.95	740.94	-199.05
2013—2014	30.24	1.93	150.78	-82.95
2014—2015	126.30	-6.81	71.55	-91.04
2015—2016	145.56	1.45	-202.27	155.26
2016—2017	93.86	-1.06	90.51	-83.31
2017—2018	446.14	-20.81	-601.77	276.44
2018—2019	1882.52	-94.55	-3466.92	1778.95
2019—2020	-3055.51	259.68	5176.09	-2280.26
2000—2020	-231.92	3.15	381.35	-52.58

6.4 内蒙古畜牧业碳排放影响因素实证分析

畜牧业是农业碳排放的主要来源，也是影响温室效应的重要因素，然而畜牧业的温室效应与畜牧业发展存在相互冲突。特别是内蒙古自治区在畜牧业发展的过程中，甲烷（CH₄）等温室气体排放量也不断增加，如何有效控制其增长成为政府与学界关注的重点。如何在保证牲畜饲养量的基础上降低甲烷（CH₄）气体排放量成为难题。基于上述背景，系统且准确的分析内蒙古畜牧业碳排放影响因素是当前研究的热点。

目前在碳排放影响要素中，研究方法主要有 LMDI 模型、STIRPAT 模型、格兰杰检验等。在畜牧业碳排放问题主要集中在一是宏观上的测算，揭示时间变

化与空间分布的差异；二是微观层面研究畜牧业碳排放产生机理问题；三是畜牧业碳排放与经济增长之间的关系。多项研究表明 LMDI 分解法及其变性应用最为广泛，也常被用做对畜牧养殖业碳排放与经济发展水平之间的关系进行实证分析，但分解时各变量间直接关联性过强，使其对碳排放影响因素的判断有一定的局限性。STIRPAT 模式虽然可以从某种意义上解决 IPAT 的变数问题，但是它的扩展模式也会产生内生问题。本研究构建 LMDI 分解模型，并基于 LMDI 分解分析了内蒙古畜牧业碳排放影响因素；在此基础上利用 STIRPAT 扩展模型进一步检验并分析了内蒙古畜牧业碳排放影响因素。

1) LMDI 分解模型构建

LMDI 分解法及其变性应用最为广泛，各变量间直接关联性强，同时其分解法具备相互转换性，参数估计准确性强，在畜牧业碳排放领域应用广泛。LMDI 分解法包含两种不同的分解模型 LMDI— I 与 LMDI— II，区别于权重系数的计算方法不同，多项研究表明 LMDI— I 模型更适用于农业生产。

地区发展的主要代表因素之一是人口。地区发展水平的提升与人口增长、区域人口空间聚集性增加等密切相关。人口的增长会促使地区发展水平的提升，从而增加了对畜禽养殖产品的需求。消费者对肉类、乳制品等畜禽产品的需求不断增加，推动了畜禽产品的快速发展，带动了畜禽养殖行业的强劲发展。人口聚集对劳动力和消费市场也有一定程度的影响，可以形成地区优势，有效地节省了生产成本和一些畜禽养殖布局。因此，以人口要素为代表的地区发展水平的提高，对畜禽产品的需求有不同程度的影响，从而显著影响与畜禽碳排放相关的畜禽养殖的品种、结构和规模。地区经济水平与碳排放之间的关系向来是研究重点。一方面，随着地区经济的快速发展和国民收入的增长，消费水平大幅增加，这就提高了对畜禽产品的数量和质量的要求，从而增加了对畜禽产品的消费需求，对区域畜禽养殖规模的提升、碳排放量的增加都具有重要的影响。另一方面，更高的经济水平更可能采取先进的技术实现规模化养殖，其先进的粪便管理和处理技术会降低各类畜禽品种的碳排放系数。同时，经济发展水平的提高会促进专业养殖户和规模化养殖场的出现，从而促进畜禽养殖专业化、集约化和区域化，也有利于畜禽养殖产业结构的调整，使得内部生产结构和地区生产结构得到优化，从而淘汰落后工艺、提升畜禽养殖行业的清洁生产水平，减少碳排放。然后，经济发展水平的提升也有利于畜禽养殖产业的优化

布局，能够从生态环境承载力较低的地区向生态环境承载力较高的地区迁移，从而减少环境影响。并且，经济发展水平的提升，也一定程度上提升了公众的环境意识和对优良人居环境的需求，增进了畜禽养殖行业减少碳排放的动力。

畜禽养殖业的产业结构也是经济水平的代表因素之一。畜禽养殖业的产业结构一般用畜牧业产值占农林牧渔总产值的比重的高低来表示，是衡量一个地区农业现代化程度的标志之一。优化畜禽养殖产业结构有利于创建畜禽标准化示范，大力发展标准化规模养殖，实现从分散养殖到规模养殖的历史性转变，使种养结合、绿色发展成为新导向。这不仅会大大增加畜禽产品的质量，增加畜禽产品的需求，还会大力推进畜禽养殖废弃物资源化利用，减小畜禽品种的碳排放系数，让畜禽养殖业朝着节水、节粮、节地的环境友好型产业发展。因此，畜禽养殖业的产业结构的提高有利于推动畜禽养殖业向着养殖更多的畜禽，提供更高质量的畜禽产品，排放更少的 CO₂ 的现代化产业发展。畜禽养殖业的产业结构的提升也可以提升技术水平。技术水平的提升可有效减少各畜禽品种粪便的 CH₄ 和 N₂O 系数，肠道 CH₄ 排放系数。一方面，在畜禽粪便管理和处理过程中，不同的粪便储存方式、粪便温度、粪便湿度以及粪便处理方式等都会产生不同量的 CH₄ 和 N₂O，先进的技术水平可帮助选择恰当的无害化、减量化、资源化的粪便管理和处理方法，从而减小粪便 CH₄ 和 N₂O 系数。另一方面，技术水平的提升可规范采食数量和质量，从而在根本上减小了各畜禽种类的肠道 CH₄ 排放系数。在地区发展水平、地区经济水平两类因素的共同作用下，不同区域的畜禽养殖数量及碳排放系数均受到不同程度的影响，导致碳排放呈现出不同的时序变化特征；而各省市之间的发展差异，则造成了碳排放空间格局的变化。为了定量分析主要影响因素对畜禽养殖碳排放时空变化的影响。

将畜牧业温室气体排放因素进行分解，通常关注在碳强度、能源强度与产出规模等，二氧化碳排放量则是源于人的行为与能量消耗，根据内蒙古经济发展水平、人口规模以及畜牧业特征，将内蒙古自治区畜牧业碳排放量分为**畜牧业生产效率、畜牧业结构、农林渔牧业经济水平、农林渔牧业从业（第一产业）规模和人口规模**等畜牧业因素引起的碳排放量和，以“加和分解”计算内蒙古自治区畜牧业碳排放分解流程为：

扩展 Kaya 分解模型设立公示（参照刘子瑜，内蒙古自治区畜牧业碳排放影响因素研究）

$$TXmc = (TXmc/XG) * (XG/NG) * (NG/NP) * (NP/ZP) * ZP$$

转化为: $Xmcq = TXmc/XG$; $Xmjg = XG/NG$; $Cyjpg = NG/NP$; $Czhp = NP/ZP$; ZP

构建 LMDI 分解总表达式:

$$\Delta TXmc = TXmc_t - TXmc_0 = \Delta Xmcq + \Delta Xmjg + \Delta Cyjpg + \Delta Czhp + \Delta ZP$$

构建 LMDI 分解各影响因素表达式:

$$\Delta Xmcq = \sum_i \frac{(Txmc_i^t - Txmc_i^0)}{(\ln Txmc_i^t - \ln Txmc_i^0)} \ln \left(\frac{Xmcq_i^t}{Xmcq_i^0} \right)$$

$$\Delta Xmjg = \sum_i \frac{(Txmc_i^t - Txmc_i^0)}{(\ln Txmc_i^t - \ln Txmc_i^0)} \ln \left(\frac{Xmjg_i^t}{Xmjg_i^0} \right)$$

$$\Delta Cyjpg = \sum_i \frac{(Txmc_i^t - Txmc_i^0)}{(\ln Txmc_i^t - \ln Txmc_i^0)} \ln \left(\frac{Cyjpg_i^t}{Cyjpg_i^0} \right)$$

$$\Delta Czhp = \sum_i \frac{(Txmc_i^t - Txmc_i^0)}{(\ln Txmc_i^t - \ln Txmc_i^0)} \ln \left(\frac{Czhp_i^t}{Czhp_i^0} \right)$$

$$\Delta ZP = \sum_i \frac{(Txmc_i^t - Txmc_i^0)}{(\ln Txmc_i^t - \ln Txmc_i^0)} \ln \left(\frac{ZP_i^t}{ZP_i^0} \right)$$

式中: TXmc 为畜牧业碳排放总量, XG 为畜牧业总产值, NG 为农林牧渔业总产值, NP 为农林牧渔业劳动力规模; ZP 为人口规模。Xmcq 为畜牧业碳排放总量对畜牧业总产值的比值, 表示单位畜牧业产值的碳排放强度, 可引申为畜牧业生产效率变化对碳排放的影响, 即影响畜牧业碳排放的效率因素; Xmjg 为畜牧业总产值对农林牧渔业总产值的比值, 为农林牧渔业产业结构对碳排放的影响, 即影响畜牧业碳排放的结构因素; Cyjpg 为农林牧渔业产业总产值对农林牧渔业产业从业人口的比值, 表示农林牧渔业产业经济发展水平对碳排放的影响, 即影响畜牧业碳排放的经济因素; Czhp 为农林牧渔业产业从业人口对社会总人口的比值, 表示农林牧渔业劳动力规模水平对碳排放的影响, 即影响畜牧业碳排放的劳动力规模因素。ZP 为社会总人口的数量, 代表人口增长导致畜牧业碳排放的增加, 即影响畜牧业碳排放的人口因素。

2) LMDI 分解内蒙古畜牧业碳排放影响因素分析

本文收集了 2000 年来内蒙古自治区畜牧业总产值、农林渔牧总产值、从事农林渔牧行业就业人员数及内蒙古自治区总人口数等基础数据, 利用 LMDI 分解

总表达式和各影响因素表达，参照刘子瑜，内蒙古自治区畜牧业碳排放影响因素研究公式与内蒙古自治区统计年鉴数据（表 1）计算结果如（表 2），其中 2021 年“从事第一产业从业人员数量”与“总人口数”参照前 10 年变化估算。

表 6-9 2000-2021 年内蒙古自治区畜牧业基础情况

年份	畜牧业总产值 (万元)	农林渔牧总产值 (万元)	第一产业从业人员数 (万人)	总人口数 (万人)
2011	9759935	22052434	678.2	2470
2012	10889659	24502560	655.8	2464
2013	11708651	27026896	632.6	2455
2014	11628846	27865379	609.4	2449
2015	11146265	27615600	584.3	2440
2016	11497481	28035460	555.9	2436
2017	12005587	28135356	533.5	2433
2018	12943050	29853157	507.3	2422
2019	13904597	31763422	475.2	2415
2020	16033558	34723600	443	2403
2021	17552655	38151191	450 (估)	2400 (估)

2011-2021 年内蒙古自治区畜牧业碳排放变化幅度较低。在各项影响因素中，增量效应最大的是经济因素，经济因素导致的畜牧业碳排放累积增量达到 300.18 万吨碳当量，而减量效应最大的是效率因素，其导致的畜牧业碳排放累积减量达到 321.78 万吨碳当量。此外，结构因素、人口因素和劳动力规模因素依次减少畜牧业碳排放累积增量-12.88、-0.3 和 14.46 万吨碳当量。各影响因素的差异较大。2012-2013 年出现了-274.17，结构因素在内蒙古碳排放变化中起到了显著作用。可能是该时间国家出台了一系列发展政策，提高了畜牧业产业水平，同时随经济增长，人民生活水平提高，进一步推动了畜牧业发展。而 2012 年内蒙古自然灾害频发，造成了 159 亿元的直接经济损失，其中畜牧业受灾严重，可能是该阶段结构因素出现负值的原因。效率因素的增强能够对畜牧业碳排放形成很强的抑制效应，效率因素贡献度高达-321.78%，是核心减量因素，该指标基本均为负值，说明随畜牧业科研水平不断提高，带动了畜牧业生产效率，有效降低了碳排放。经济因素贡献度较低，但是主要的增量影响因素，对累积增量的影响极大。说明经济利益的驱动下，牲畜饲养量快速增长。随着人民生活水平提高对牛和羊的产品需求增大，导致牛和羊的饲养占比迅速上升。由此产生大量牲畜粪便，大多数饲养者因缺乏环保意识，更为降低养殖成本，

不对牲畜粪便处理，从而导致碳排放大量增加。劳动力规模因素效应贡献度也在一定程度上增强了畜牧业碳排放的增长，但其导致的累积增量较小。内蒙古畜牧业的发展已经进入现代化畜牧业时期，集约化、规模化和集中饲养成为主流，劳动力的作用正在逐渐削弱。

表 6-10 2000-2021 年内蒙古畜牧业碳排放影响因素分解表（单位：万吨·C）

年份	效率因素 ΔX_{mcq}	结构因素 ΔX_{mjg}	经济因素 ΔC_{yjg}	劳动力规模因素 ΔC_{zhp}	人口因素 ΔZP	综合效应
2011-2012	-45.50	12.06	24.65	17.75	1.40	10.36
2012-2013	-44.17	-274.17	46.40	-6.88	0.60	-278.22
2013-2014	-29.75	199.49	30.19	2.20	1.15	203.27
2014-2015	-13.63	14.28	10.7	20.12	0.89	32.45
2015-2016	-32.15	26.15	30.93	-4.12	2.05	22.76
2016-2017	-39.31	7.97	29.35	0.78	2.02	0.81
2017-2018	-27.71	-19.22	35.65	-10.59	1.53	-20.35
2018-2019	-31.58	1.55	33.88	-14.43	1.82	-8.76
2019-2020	-26.94	12.14	28.96	0.04	1.24	27.65
2020-2021	-31.04	6.87	29.47	-5.17	1.76	9.47
合计	-321.78	-12.88	300.18	-0.3	14.46	-0.56

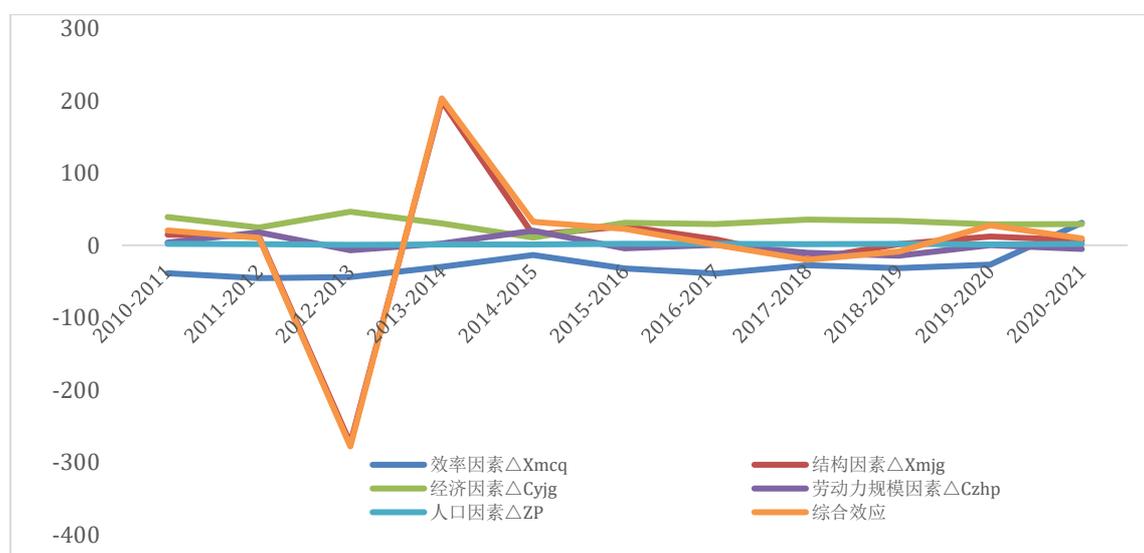


图 6-2 碳排放影响因素分解表

6.5 内蒙古畜牧业温室气体减排实例分析

6.5.1 伊利集团零碳未来计划模式

19 世纪以来，地球面临着因人类活动产生的大量二氧化碳所导致的气候变化，世界各地频发的极端天气时刻提醒着零碳之路刻不容缓。2015 年 12 月，

近 200 个缔约方共同通过了《巴黎协定》，达成控制升温的共识目标。2020 年 9 月 22 日，在第七十五届联合国大会一般性辩论上，习近平主席代表中国作出了二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和的庄严承诺。2021 年，“碳中和”首次写入政府工作报告，正式开启“双碳”进程元年。国家层面颁布的碳达峰碳中和“1+N”政策体系明确顶层设计和总体部署，指明碳达峰碳中和工作的路线图、施工图，为全球气候治理注入大国担当和新鲜动力。

碳中和是一场全经济社会的系统性绿色转型，企业作为实现“双碳”目标的关键主体，有责任勇担时代重任。中国乳业拥有食品行业中的最长产业链，上承广袤的草原牧场，下接千家万户餐桌。长且复杂的产业链条蕴藏着多个具有降碳潜力的环节，持续扩大的市场规模映射着充足的减排空间，因此乳业在低碳转型中的角色与意义均不可忽视。迈向碳中和，事关人类更长远的“健康”，伊利秉持“难而正确”的战略选择。2021 年，伊利正式发布“全面价值领先”目标，将通过率先实现碳达峰碳中和等重点举措追求“社会价值领先”，推动企业健康、绿色、可持续发展。从 2020 年联合国日率行业之先承诺实现碳中和，到获得中国乳业首张碳中和核查声明（PAS2060），再到伊利减碳行动入选联合国首份《企业碳中和路径图》和《走向零碳——在华企业可持续发展行动报告》，标志着我们的降碳战略、管理与实践全面系统地铺开。2022 年 4 月 8 日，伊利正式发布《伊利集团零碳未来计划》和《伊利集团零碳未来计划路线图》，面向世界宣示“已在 2012 年实现碳达峰，将在 2050 年前实现全产业链碳中和”的目标，以及 2030 年、2040 年、2050 年 3 个阶段的具体任务。伊利零碳未来计划已渐次铺开，正沿着覆盖全产业链、全生命周期的多维路径，发挥行业领导力和价值创造力，与伙伴共逐“全链减碳”的长期目标。

6.5.1.1 低碳目标

1) 联合产业链，全面开展低碳清洁

伊利作为中国乳制品行业的领导者，在激发行业绿色生机方面全面施力，支持产业链合作伙伴共同迈向清洁低碳。推进建立“国家乳制品产业计量测试中心”“可持续发展供应链全球网络”和信息化展示平台“EHSQ 管理信息系统”三大全链减碳平台，牵手 43 家全球战略合作伙伴启动行业首个“零碳联盟”，在阿鲁科尔沁旗牧场试点，伊利通过种植固碳能力强的紫花苜蓿、燕麦，累计

改良 5.5 万亩退化草原，每年可产生 5,500 吨的二氧化碳固定增量。同时，以这片牧场上的优质苜蓿草和燕麦干草作为奶牛主要养殖饲料，能够显著减少奶牛肠道发酵产生的甲烷排放。这种牧场“种养一体化”模式能够显著的降源增汇，为农牧业低碳发展提供了成功样本。

2) 建设“零碳工厂”，驱动节能

中游工厂是稳健经营最关键的一环，也是乳业实现绿色发展的关键环节。

《中国制造 2025》提出将“全面推动绿色制造”作为九大战略重点和任务之一，生产制造端的绿色节能已成为企业寻求价值链“净零”排放的关键路径。伊利遵从“盘查碳底、摸清潜力、实施减排、绿色转型”的科学降碳方法，实施了大量低碳基础设施的建设工作。我们自 2010 年起组建内部碳管理团队，连续 12 年对旗下所有企业和核心供应商开展碳盘查，持续提升能源使用效率和清洁能源使用率。截至 2021 年 12 月底，伊利累计减排 873 万吨二氧化碳当量，已有 23 家分（子）公司被国家工业和信息化部评为国家级“绿色工厂”。截至 2022 年 4 月，中国食品行业首个“零碳工厂”、中国奶粉行业前两家“零碳工厂”、中国冷饮行业首个“零碳工厂”相继在伊利诞生，伊利多产品线、全产业链迈向零碳的新征程。

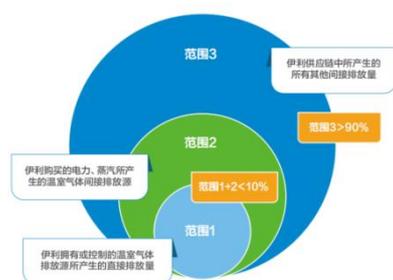
3) 推出“零碳产品”

在消费端，伊利提供蕴含“绿色价值”的“零碳产品”。森林作为陆地生态系统的主体，具有强大的固碳能力，是系统中最大的碳储存库。全球消费生产对木材产品需求持续上升的背景下，采购和使用包装材料成为保护森林、提升固碳量的关键解决方案。在全线产品采购经 FSC（森林管理委员会）认证的森林产品基础上，2021 年伊利金典在国内首次启动植物基梦幻盖，以甘蔗替代木材原料，减少森林采伐、守护固碳主力军。2022 年初，伊利成为中国首家推出“零碳牛奶”的企业，伊利金典 A2 β -酪蛋白有机纯牛奶和金典娟姗有机纯牛奶获得碳中和核查声明（PAS2060），标志着这两款产品在全生命周期达成温室气体“净零”排放。我们将以“零碳牛奶”为起点，为消费者提供更多绿色健康食品、为地球增添更多绿色风景。



伊利集团董事长兼总裁潘刚表示，伊利已在 2012 年实现碳达峰，将在 2050 年前实现全产业链碳中和，并制定了 2030 年、2040 年、2050 年绿色发展规划。

多年生产数据及连续 12 年的碳盘查结果表明，伊利在持续提升产能的情况下，同步实现了总碳排放量持续下降。2021 年伊利获得由国际权威检验认证机构颁发的碳中和核查声明（PAS2060），证实伊利已于 2012 年实现碳达峰。



伊利承诺于 2050 年前实现全产业链碳中和，是为中国乳业贡献“双碳”目标做出的创新探索。碳盘查结果表明，伊利自身生产过程的直接与间接排放（即“范围 1”和“范围 2”）占碳排放总量不到 10%，绝大多数的温室气体排放（>90%）来自于产业链活动（“范围 3”）。从饲草种植、奶牛养殖、原奶运输、加工灌装到储运销售等众多环节亦会带来不同程度的碳排放。实现全产业链、全生命周期的碳中和，对整个乳制品行业而言具有重大意义。



6.5.1.2 具体举措

1) 建立奶牛营养评估体系 (DNAS)，创新培育“低碳”奶牛

为降低奶牛养殖产生的温室气体排放量，伊利创新建立奶牛营养评估体系 (DNAS)，帮助合作牧场合理优化奶牛日粮配方，提升奶牛消化和吸收速率，有效减少奶牛肠道发酵产生的甲烷排放。2021 年，伊利在上游合作牧场积极推广奶牛饲料益生菌添加剂技术，通过发酵技术、酶工程等研究奶牛营养物质消化率提高的综合调控技术，提高奶牛对各类营养物质的消化利用，改良奶牛瘤胃微生物环境，研究奶牛低蛋白质日粮调配技术，在满足高产奶牛对蛋白质的需求前提下降低奶牛日粮蛋白的饲喂量，有效减少氮排泄和甲烷排放，打造伊利“低碳”奶牛。

2) 伊利“种养一体化”模式助力上游牧场绿色发展

伊利秉持“以养带种、以种促养”的发展原则，持续推进“种养一体化”的循环发展模式，推动牧场源头减碳增汇工作向纵深推进。截至 2021 年底，伊利“种养一体化”项目已覆盖 272 座合作牧场。其中，内蒙古阿鲁科尔沁旗

5.5 万亩优质牧草生产基地通过种植生态型人工草地植被、采用节水灌溉模式等方式，已经成为国内一流的生态型现代草牧业示范区。截至 2021 年底，该基地实现年生产优质紫花苜蓿、燕麦干草超 4 万吨，草产量是当地天然草场的 10 倍多，项目核心区植被覆盖率从 2008 年的不足 10% 提高到 95% 以上，有效提升了草场固定二氧化碳总量。

3) 伊利启动建设全国首个零碳五星示范区——“伊利现代智慧健康谷”

2021 年 12 月 31 日，伊利与呼和浩特市政府以及三家大型能源、电力、产业投资企业共同签署“呼和浩特·伊利现代智慧健康谷零碳五星示范项目”合作协议，携手打造中国首个零碳五星示范区。项目采用国际顶尖的零碳五星设计方案，严格按照零碳要求施工建设。伊利将打造新能源充电桩、屋顶光伏、工业节能、氢能等一大批新能源项目，未来将在这里建设中国规模最大的奶牛及奶山羊饲料种植、育种、养殖一体化示范基地，打造“天苍苍，野茫茫，风吹草低现牛羊”的人与自然和谐共生景象。示范区建成后每年可节约标煤约 130 万吨，为实现“双碳”战略目标作出贡献。

4) 源头减废物尽其用，龙游伊利建成“无废工厂”

2021 年 11 月，浙江龙游伊利工厂入选《浙江省第一批“无废工厂”评估结果》名单。通过构建源头减量、过程控制、物尽其用的发展体系，采用先进 FSC 森林认证绿色包材、EHSQ 系统集成，浙江龙游伊利工厂有效削减各类废弃物产生量，达成“污泥 0 排放、一般固体废物 100% 合规处置”目标，达到固废“减量化”“资源化”“无害化”的“无废工厂”要求。浙江龙游伊利工厂在源头、生产和废弃物处理环节的优秀表现都能有效减少温室气体的排放，为实现零碳目标助力护航。

5) 采购清洁能源，伊利获得全国首张电碳双认证“绿电交易凭证”

黄冈伊利酸奶工厂积极推进新型电力系统建设聚焦新能源发展，推动落地了光伏停车场、清洁能源等一系列低碳项目。2022 年 5 月，黄冈伊利酸奶工厂获得由湖北电力交易中心、湖北碳排放权交易中心共同认证的绿色电力交易凭证，这是全国首张电碳市场双认证的“绿电交易凭证”。在此次交易中，伊利共采购绿色电力 2.862 兆瓦时相当于减少二氧化碳排放 2,047 吨。

6) 深挖降碳潜能，率行业之先打造“零碳工厂”

2022年2月28日，云南伊利乳业有限责任公司获得了必维集团颁发的碳中和工厂核查声明（PAS2060），成为中国乳业乃至食品行业的首个“零碳工厂”。该工厂获得中国乳业乃至食品行业第一张“绿色用电凭证”，在2021年1月至12月的用电周期内绿色用电比例达89.90%。此后，中国奶粉行业前两家“零碳工厂”、中国冷饮行业首个“零碳工厂”相继在伊利诞生。我们将不断总结经验，持续提升工厂减碳能力，走出一条具有伊利特色的零碳未来之路。

7) 建设光伏发电设施，提升清洁能源使用占比

提高清洁能源的利用率，减少温室气体排放，伊利积极参与光伏电站项目建设和使用。2021年，潍坊伊利光伏供电项目顺利并网发电，工厂合同期内可享受折扣用电1,817.16万千瓦时，减少二氧化碳排放1.71万吨。2022年4月7日，肇东市伊利乳业有限责任公司5.99兆瓦分布式光伏电站项目成功并网发电，成为中国乳业分布式光伏装机规模最大的单体工厂。项目建成投运后，每年可减少二氧化碳排放15.6万吨。光伏发电设施的建成投产，能为伊利提供可持续的优质清洁能源，支持伊利迈向零碳生产。

8) 率先推出“零碳牛奶”，提供更可持续的消费选择

伊利通过切实开展碳足迹管理计划，严格落实一系列环节减碳措施，于2022年成功发布两款经碳中和核查（PAS2060）认证的“零碳牛奶”——伊利金典A2 β -酪蛋白有机纯牛奶和伊利金典娟姗有机纯牛奶。这两款牛奶在原料的获取、生产和运输以及产品的生产、运输、包装和废弃阶段均完成温室气体“净零”排放，为消费者购买牛奶产品提供了更加多样化、更具可持续价值的选择。

9) 研发低碳环保包装，减少包装木材依赖

2021年6月5日，金典推出中国首款植物基梦幻盖牛奶产品，其瓶盖包装原料来自于可再生资源甘蔗，可有效减少使用石油资源，降低碳足迹。同年12月，金典推出国内首个0铝箔低碳无菌纸基复合包装，该包装使用全新阻隔层替代铝箔，更加易于回收，有效提升循环利用效率，能够减少41.8%碳足迹。

10) “简碳轻生活”公益活动，与消费者一起守护森林

2021年4月23日，伊利举办畅轻焕新升级发布会暨联合公益活动，发布使用“简的刚好”减碳包材的产品。该包材获得FSC认证，相比普通包装可有

效减少碳足迹。伊利在发布会中为公众分享“简碳轻生活”理念，引领越来越多的消费者关爱地球、重视环保。

11) 形式多元，积极引导消费者参与环保回收

伊利通过多种形式号召公众积极参与、亲身实践废弃包装回收活动，将废弃物循环利用理念切实传递给每一位消费者，培养消费者形成节约资源的绿色环保观念。

推出“金典有机回收计划”

发起“金典空奶盒改造”活动

打造安慕希“物物交换”活动“

12) 元宇宙”创新引领，积极传达节能减排理念

2022年3月，伊利金典举行新品发布会，将低碳理念深度融入发布全过程。这场发布会创新使用元宇宙发布形式，有效减少实体发布过程中产生的碳排放。在这场发布会中，伊利还携手人民日报推出碳中和故事片《以低碳，致未来》，在展现绿色有机品牌形象的同时，向公众积极传达节能减排理念，倡导全民一同开启低碳新生活。

13) 保护湿地生态，增强碳汇能力

湿地是地球表层重要的碳汇生态系统。伊利集团自2016年起携手世界自然基金会（WWF）持续开展东北湿地保护项目。我们支持成立了黑龙江流域湿地保护网络，在东北松嫩平原乾安地区建立样点，开展农牧业可持续生产和湿地保护工作，不仅有效保护松嫩平原的生态平衡与生物多样性，还有效提升了湿地面积和固定二氧化碳的能力。

伊利的减排方式，一是有机肥料的养种结合、资源循环型的特色农业；二是因种施策，着手种植草场，对牲畜的饲喂优先选择紫花苜蓿、燕麦等原材料，减少高营养、深加工饲料的饲喂，降低肠道发酵产生的碳排放。三是结合内蒙古地区实际情况，鼓励开展区域合作与互助的协调发展机制，整合人才、资本、信息和技术；四是提高清洁能源占比；五是研发低碳环保包装。从效率、结构、经济、劳动力规模、人口多因素，全方面降碳减排。

6.5.2 优然牧业绿色低碳发展模式

优然牧业积极履行“双碳”责任，开展低碳减排研究，助力行业绿色低碳转型。在低碳饲料研发方面，研发了能氮平衡技术、酶工程营养调控技术、氨基酸平衡技术等健康、低碳养殖关键技术，自主研发低碳减排饲料添加剂，通过提高奶牛饲料利用率，减少奶牛瘤胃发酵过程的温室气体排放量，实现源头减碳。

1) 建设奶牛碳排放育种数据库 打造“超级奶牛”群

依托自身领先行业的育种技术，开始研究建设奶牛碳排放育种数据库，通过开展奶牛全基因组数据中甲烷等碳排放量相关的重要基因或分子标记挖掘研究，培育高产、长寿、低碳排放的超级奶牛育种核心群，结合性控技术进行快速扩繁，达到育种改良、提升生产性能、实现低碳减排的目的。

2) 利用体外仿生和过瘤胃技术开发应用低碳饲料

研究低碳饲料，通过体外仿生技术，评估不同生产条件下，不同品质饲料的碳排放量，通过氨基酸平衡技术及过瘤胃蛋白组合产品的研发，研究奶牛各阶段氨基酸需要量，提高蛋白利用效率。同时，将已经在 DHA 原料奶生产中已经成熟应用的过瘤胃技术应用于低碳饲料的研发上，将饲料中一些营养物质，如蛋白质、氨基酸、脂肪和淀粉等，经过特殊技术处理使其保存，减少瘤胃内的发酵、降解，直接进入小肠后再被消化吸收，不仅提高了饲料利用率，更大大减少了温室气体的排放。

3) 开发抑制甲烷产生的技术和产品降低甲烷生成量

研究通过添加精油、益生菌等产品改变瘤胃微生物区系，降低甲烷菌丰度，综合降低甲烷生成量。

4) 开发适宜南北方粪肥发酵工艺 坚持种养结合绿色发展

在奶牛养殖过程中，粪污问题一直是备受关注的焦点之一。坚持种养一体化的绿色发展模式，依据南北方的不同气候特点，研究了全混式沼气厌氧发酵工艺和智能好氧发酵工艺，固态部分无害化后作为卧床垫料回填卧床；液态部分经过发酵制成液态肥，还田至周边配套优质青贮地种植，抗碱增加土壤有机质，改良土壤肥力，在减少化肥使用量的同时，增产增效。通过两种工艺的高效运行，实现了环境友好、生态平衡的可持续发展。

沼气发电的万头牧场，年产沼气量约为 730 万立方，年发电量约 1460 万度，满足 60%的牧场用电。同时，配置光伏设备，光伏发电项目降低牧场建设的费用投入，同时解决牧场运营 40%的用电量。牧场通过配置沼气全量发电和光伏发电项目，推动了清洁能源发电，将实现绿电循环的零碳牧场。



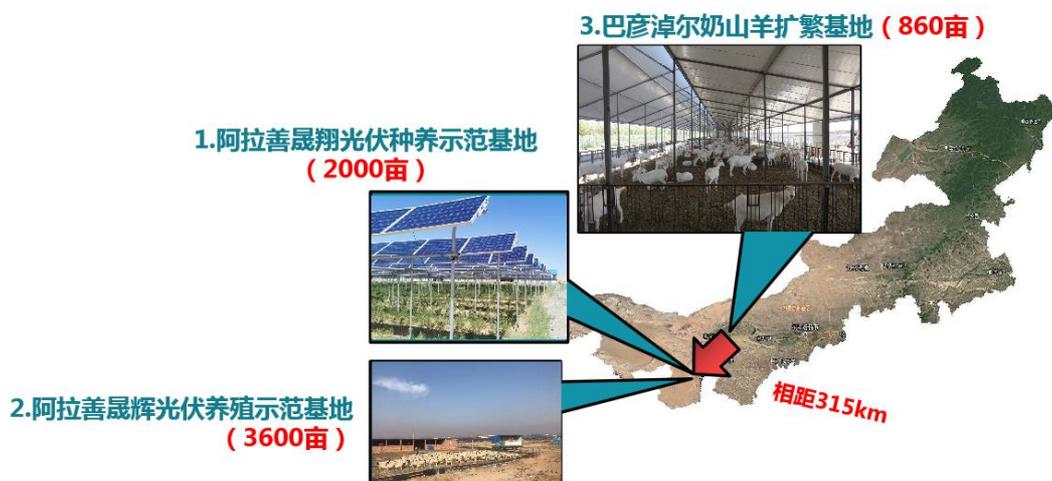
悠然牧业一是通过奶牛育种基因组选择、基因编辑生物育种技术实现育种改良、提升生产性能、实现低碳减排的目的；二是开发益生菌、发酵饲料、精油等改变反刍动物瘤胃微生物区系，降低甲烷生产量；三是建立合理粪污处理方式，满足场内用电需求。

6.5.3 华颐乐“光伏发电+种草+养羊”空间立体式全产业链模式

内蒙古华颐乐牧业科技有限公司成立于 2014 年 8 月，位于呼和浩特经济技术开发区沙尔沁工业区。经营范围为农产品种植及销售；乳制品加工及销售；生鲜乳销售、奶山羊及肉羊养殖；是内蒙古山路能源集团有限责任公司旗下的一家全资子公司。集团公司是内蒙古自治区唯一由国家发改委、教育部、财政部、国家旅游局四部委联合批准的国家循环经济教育示范基地，同时也是内蒙古自治区级扶贫龙头企业。华颐乐公司 2016 年被评为内蒙古自治区农牧业产业化重点龙头企业。

公司坚持以城镇化建设为龙头、以太阳能发电为支撑、以现代农牧业为基础、以信息化管理为手段的集团发展战略；本着光伏发电与农牧业设施一体化，光伏发电与农牧业生产养殖并重，充分提高土地利用效率的思路。从 2013 年开始建设到 2014 年建成，仅一年时间，华颐乐牧业占地 1200 亩，拥有 22 栋现代

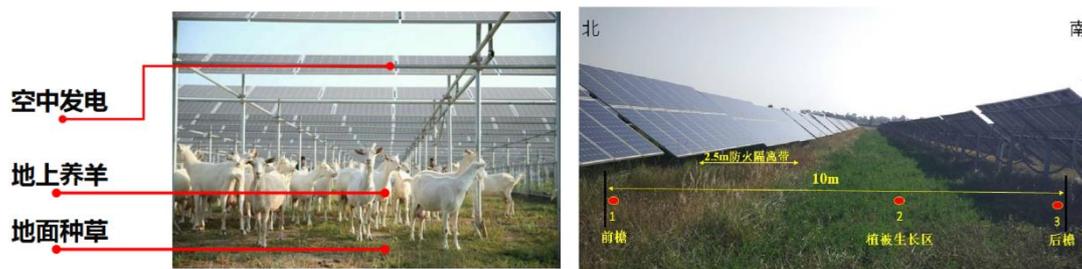
化标准羊舍，计划存栏 5 万只的奶山羊养殖基地就建成投产，其最后一座现代化的鲜羊奶加工工厂建成。与高校合作成立了奶山羊研究院，引进澳大利亚纯种萨能奶山羊进行杂交选育，全程机械化集中挤奶，全程冷链，无污染，无添加加工，自有线上线下直销。目前，阿拉善盟阿拉善左旗，巴彦淖尔市磴口县，鄂尔多斯市杭锦旗等三个地方的万只奶山羊基地都正在建设中，形成太阳能电池板下种植、养殖为一体的农牧业生产奶山羊养殖和羊奶制品的生产加工输出基地。现存栏量 13000 余只，明年预计产羔 8000 只，预计未来五年内达到 10 万只奶山羊养殖规模。



(1) 光伏与羊舍结合—实现“空中发电，地上养羊，地面种草”

光伏一体化羊舍，羊舍顶棚铺设保温棚膜，上方架设光伏板，南北墙采用优质棚膜与保温板，春夏秋暖季，南北墙棚膜卷起，实现良好通风，冬季棚膜放下，加覆保温板，利用电能供热保温，保证室外温度为 -30°C 时，夜间舍温依然能保持在 $3-5^{\circ}\text{C}$ 。将羊只维持消耗降到最低，不仅利于保证奶山羊产奶量及奶品品质，同时也有利于冬季夜间产羔保羔率，使羔羊免受极寒刺激，提高成活率。

光伏羊舍周边沙地可利用电力灌溉系统种植沙打旺、驼绒藜等沙生植物作为饲料，根据不同地区冬春季羊群营养物质盈缺的情况，利用其配制奶山羊全混合饲料，结合光伏一体化羊舍可进一步降低饲养成本，提高生产效率。



“光伏发电+种草+养羊”空间立体式全产业链模式

(2) 利用电能加设配套设施—实现奶山羊福利养殖

内蒙古夏季干旱少雨，冬季寒冷多风。奶山羊适应性差，恶劣天气容易导致生产性能低下、母羊流产、羔羊生长发育受阻等问题。光伏板可在夏季为奶山羊遮阴挡雨，冬季无需提供额外热源，可利用光伏发电供热保温的便利。同时光伏福利型羊舍可改善羊只舒适度，抵御极端天气对奶山羊集体的危害，提高产奶效率与产品质量。

舍内配置动力通风及有害气体检测系统，二者通过软件藕联，实时监控舍内氨气、硫化氢及二氧化硫等有害气体浓度，当浓度达到阈值时，自动开启动力风机，进行智能化自动换气。冬季利用电能加热系统，对舍内供水系统进行加热保温，让羊喝上温水，降低非必要能量消耗。



改善羊只舒适度



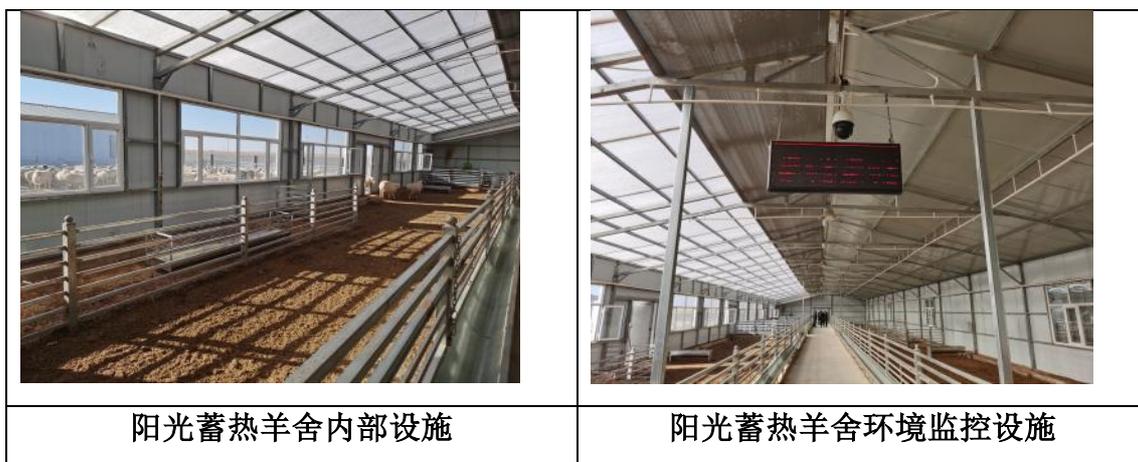
冬季舍内羊只情况

华颐乐牧业自成立以来以“修复沙漠生态系统，恢复绿色和谐共生”为企业目标；通过开展农业产业化活动、采取公司流转土地，吸纳农名工就业等方式，在呼和浩特市、巴盟五原、巴盟磴口、鄂尔多斯杭锦旗自建奶山羊养殖基地，一直致力于带动当地农户共同发展，使企业与农牧户的利益连结，确保企业增效、贫困农牧户受益取得了一定的成效。为当地、周边的农牧户提供了就业机会，带动农牧户 805 户。6000 亩光伏装机容量大概 20 千瓦的装机容量，全年利用小时大概 1600 小时，全年的发电量就是 3.2 亿千瓦时，我国电力系统碳强度为 640 克/千瓦时，仅光伏发电降低碳排放 20.48 万吨。

6.5.4 牧区肉羊夏季放牧+冬季暖舍舍饲模式

目前，在内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗、巴彦淖尔市乌拉特中旗、包头市达茂旗，广泛推行夏季放牧、冬季暖舍舍饲模式。该模式下，绵羊夏季在天然草原上放牧饲养，冬季在阳光蓄热圈舍中低成本舍饲饲养，建立采光保温羊舍，配套监控系统、监测和调节有毒有害气体等设备和自动饮水等。结合非常规饲料利用技术和低成本舍饲技术，可以提高羔羊出生重，提高母羊繁殖率。

该技术在北方牧区现代化冬季阳光蓄热羊舍及其配套设施设备的应用具有引领作用。



阳光蓄热羊舍外部设施

1) 提质增效情况

应用该模式饲养后，示范区母羊产前增重 32.41g/d, 而传统饲养方式母羊体重减少。产后母羊应用该技术饲养后体重损失约为传统养殖失重的 60%，羔羊的生长速度也高于传统养殖。

表 6-11 试验羊体重变化

类别	阶段	传统饲养	试验料+暖舍舍饲	试验料+冷舍
母羊	基础体重 (kg)	57.23	53.2	55.27
	产前变化 (g/d)	-77.25	32.41	-63.33
	产后变化 (g/d)	-47.78	-28.19	-45.48
羔羊	初生重 (kg)	3.19	4.18	4.53
	日增重 (g/d)	145.05	191.58	189.00

在示范区应用该技术饲养后，饲喂成本为 1.23 元/只/天，冬春季节暖舍舍饲成本为 184.50 元/只。而传统放牧母羊冬春季补饲成本为 285.70 元/只，低成本舍饲比放牧补饲降低了约 101.20 元/只。

经计算，传统放牧养殖冬季放牧羊损失的能量成本为：每天行走约 10km，能量消耗相当于 413g 青干草；每天饮用冰水，能量消耗相当于 100g 青干草，在-20℃条件下采食，能量消耗相当于 195g 青干草。整个冬季每天能量消耗相当于青干草 708g。损失的成本 $708\text{g}/\text{天} \times 90\text{天} \times 1.2\text{元}/\text{kg} = 76.5\text{元}$ ，而冷季舍饲养殖可以减少上述损失，同时可以减少放牧羊对冬春季天然草场的采食和践踏造成的生态破坏，冬春季舍饲可以更好的保护草原。另外，生态舍饲养殖还可在规模化饲养、劳动力减少方面降低成本，更加适应牧区当前的劳动力结构和牧区肉羊产业转型升级的要求。

2) 技术要点

基于团队多年的研究技术成果和示范推广经验，立足北方牧区繁殖母羊冬季放牧生产方式中存在的母羊能量消耗大和饲料成本高的现状，对牧区肉羊养殖关键技术进行集成，提出了“北方牧区冷季肉羊养殖转型升级关键技术”模式。

该模式包含三个关键技术。

技术一是利用阳光蓄热圈舍养殖肉羊。开发新型阳光蓄热圈舍，圈舍建设成本节约 200~300 元/平米，白天日光通过棚膜照射圈舍，给圈舍加热，夜晚通过保温被蓄热，保证圈舍处于舒适的温度。该圈舍实现了最大限度节约成本、保温、抗风雪。

技术二是充分利用廉价的灌木类和秸秆类非常规资源。对非常规饲料开展营养价值评价和加工利用方法研究，结合团队研究的地方品种肉羊的营养需要量，在阳光蓄热圈舍养殖中采用低成本日粮配方。在保证母羊繁殖性能的同时降低饲料成本。

技术三是改变传统的放牧方式，由冷季放牧养殖转变为舍饲养殖。在对不同季节牧草营养价值测定的和放牧羊营养盈亏分析的基础上，确定放牧补饲和舍饲时间，对繁殖期母羊在冬春季进行 4~5 个月的低成本舍饲养殖，可以最大限度的减少繁殖母羊冬春季抵抗寒冷、饮用冰水和放牧行走消耗的能量，有利

于节约饲养成本，同时杜绝了放牧羊冬春季对草场的过度采食和践踏，有利于春季牧草返青和草原生态恢复。

3) 核心技术

——专利阳光蓄热圈舍

开发的阳光蓄热圈舍依靠日光增温和棉帘保温，舍内温度可保持全天 4℃ 以上，夜间温度比传统圈舍高 10℃ 左右；氨气浓度除刚关闭通风和保温帘时出现短时见升高外，其余时间与传统圈舍相近，并符合国家标准，为羊只和养殖户提供了良好的养殖环境。

舍内温度：暖舍内温度在寒冷季节比舍外高 10℃ 以上。

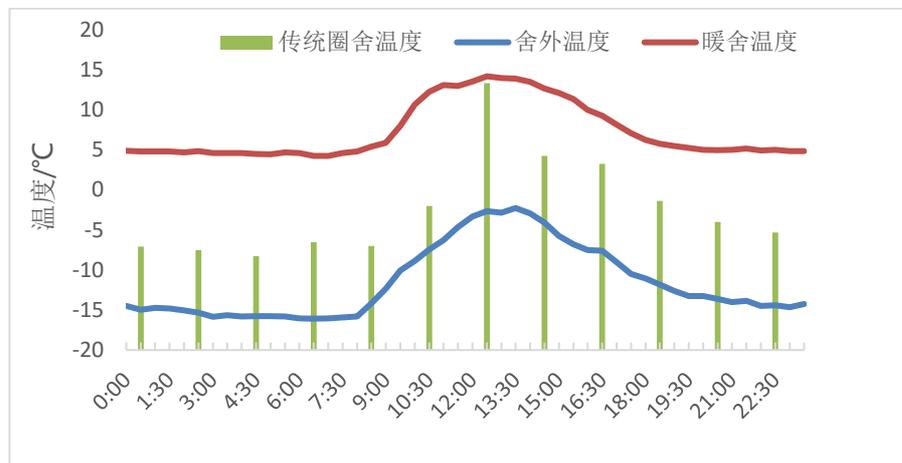


图 6-3 舍内外温度对比

舍内有害气体：圈舍内氨气和二氧化碳等有害气体浓度和传统圈舍无显著性差异。氨气浓度值在 16:00 开始升高，但至 20:00 后开始降低达正常水平。

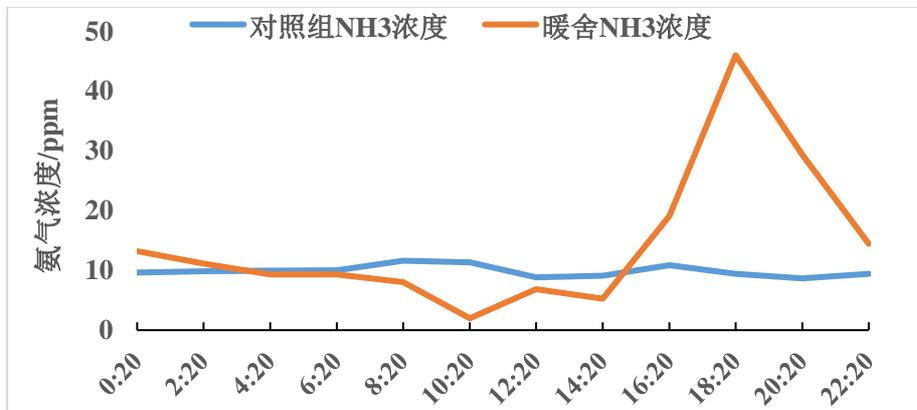


图 6-4 舍内氨气浓度变化

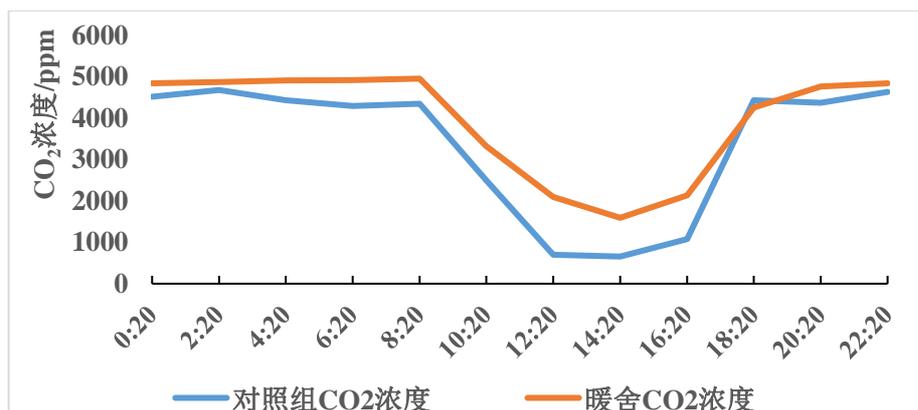


图 6-5 舍内二氧化碳 (CO₂) 浓度变化对比

使用阳光蓄热圈舍，由于省去了抵抗寒冷等营养需求，母羊的营养需要量降低，营养摄入量可以减少，可以节省饲养成本，饲养成本远低于放牧补饲；而且可以实现繁殖母羊产前冬季暖舍饲养不出现掉膘，产后哺乳期掉膘比放牧补饲小，大大提高了经济效益。新型圈舍不用夜间巡视，羔羊死亡率降低，母羊暖舍舍饲比放牧方式下羔羊初生重增加约 0.99kg，日增重增加 46.53g/天，广大牧户技术接受程度高。新型圈舍还有抗灾保畜，缓解生态压力的作用，符合国家和当地政府的政策。

——非常规饲料加工利用技术

对地源性饲料资源及农副产品玉米秸秆、灌木植物（沙柳、柠条、沙棘等）、棉杆、甜菜渣、甘草和土豆渣等开展了饲料化加工技术与饲喂技术研究，通过物理和生物学处理方法，研究玉米秸秆、灌木植物、棉杆、甜菜渣、甘草、土豆渣等地源性饲料资源的生物发酵技术、膨化发酵技术、组合调制等技术，生产发酵饲料、全混合发酵饲料、膨化生物发酵饲料和颗粒饲料，研发了适宜的生产加工工艺、加工方法和饲喂方法。

通过体外日粮配方筛选与母羊体况动态监测，建立了北方牧区越冬母羊补饲最佳时间和优化补饲配方模型，通过合理化补饲降低肉羊越冬营养受限对繁殖性能的影响。通过微生物培养和营养调控剂筛选技术掌握瘤胃调控产品对越冬母羊瘤胃微生物区系变化影响，确定最适合肉羊冬季补饲的营养舔砖及补饲饲料配方。通过体外产气试验和微生态制剂发酵试验，筛选确定越冬母羊补饲的最佳高蛋白调控饲料和生物发酵饲料。

——放牧羊营养盈亏分析技术

通过分析研究天然牧草的营养价值动态变化和盈缺规律、当地饲料资源营养价值、肉羊的放牧采食量和其对天然牧草的消化率，并监测评价绵羊的营养状况，优化放牧补饲精补料和预混料配方，并通过饲养试验进行筛选、优化，改进精准放牧补饲方案和确定完全舍饲的时间，实现了放牧羊的精准化饲养。

第七章 内蒙古畜牧业温室气体减排技术路径措施

7.1 内蒙古畜牧业温室气体控制措施调研

2022 年，农业农村部制定了《农业农村减排固碳实施方案》，并提出畜牧业减排降碳的重点任务要求：推进品种改良，推广精准饲喂技术，提高畜禽单产水平和饲料报酬，降低反刍动物肠道甲烷排放强度。提升畜禽养殖粪污资源化利用水平，减少畜禽粪污管理的甲烷和氧化亚氮排放。结合任务要求，项目组赴内蒙古巴彦淖尔市、乌兰察布市、兴安盟、通辽市、锡林郭勒盟、呼和浩特市和鄂尔多斯市等地区，对内蒙古不同畜种的温室气体控制措施展开了调研。



图 7-1 调研现场

从项目组调研地区养殖情况来看，肉羊的饲养方式主要为放牧和舍饲养殖，两种方式各约占 50%。奶牛养殖基本为舍饲养殖，以规模化养殖为主。肉牛以繁殖母牛分散养殖和异地育肥模式为主，饲养方式主要分为全年舍饲和放牧+舍饲（半舍饲）两种方式，全年放牧的较少，其中全年舍饲约占 30%，放牧+舍饲的约占 70%。项目组调研了不同畜种和饲养方式的养殖场（户）对甲烷等温室气体的控制措施应用情况。

表 5-1 内蒙古畜牧业温室气体控制情况调研表

时间	地点	养殖品种	养殖数量	饲养方式	调控措施
2023.03.21	巴彦淖尔市	蒙古羊	220	放牧加舍饲	应用精准补饲技术和保温羊舍
2023.03.22	巴彦淖尔市	本地黄牛	91	放牧加舍饲	调控日粮营养，饲喂高品质粗饲料
2023.03.23	巴彦淖尔市	西门塔尔牛	452	舍饲	调控日粮营养，合理规划场区
2023.04.03	乌兰察布市	杜蒙羊	370	放牧加舍饲	应用保温羊舍和两年三产繁殖技术
2023.04.11	兴安盟	湖羊	1850	舍饲	缩短繁殖周期，提高单产水平
2023.04.14	通辽市	西门塔尔牛	143	放牧加舍饲	选择优良品种，调控日粮营养
2023.04.18	锡林郭勒盟	蒙古羊	160	放牧	应用补饲技术和两年三产繁殖技术
2023.04.20	呼和浩特市	荷斯坦奶牛	9200	舍饲	应用清洁养殖技术，调控瘤胃发酵
2023.04.21	呼和浩特市	小尾寒羊	327	舍饲	饲养多胎品种和两年三产繁殖技术
2023.04.24	鄂尔多斯市	阿尔巴斯绒山羊	230	放牧	应用补饲技术，调控日粮营养

7.2 内蒙古畜牧业温室气体控制措施及效果

7.2.1 品种改良

动物生产力水平在很大程度上取决于遗传因素，遗传性状改良可以改善动物的健康状况，减少甲烷排放，提高动物生产力，被认为是可以提高动物生产力并降低单位动物产品甲烷排放的非常有效的管理策略。通过培育高生产性能的动物，进而调高饲喂能量饲料的比例，减少甲烷的排放量，如培育低甲烷排放量的绵羊，减小瘤胃体积、增加食糜流出率、减少瘤胃发酵，从而减少温室气体的排放。通过实施畜禽遗传改良计划和现代种业提升工程，健全产学研联

合育种机制，支持国家级牛羊核心育种场建设，提高核心育种群质量，加快高繁快长品种的选育，加快优良品种推广和应用，从而提高畜禽的生产力水平，在生产相同单位动物产品（肉及奶制品）的情况下可以减少甲烷等温室气体的排放量。

以肉羊为例，北方牧区传统的肉羊养殖是一年一产的模式，养殖的母羊多为单胎羊，一只母羊一年通常只产一只羊羔。而养殖多胎肉羊，在同样一年一产的情况下，一只母羊一年可以生产两只以上的羔羊，年繁殖率提高一倍以上。同样生产一只羔羊，多胎羊需要的时间约为单胎羊的 50%~30%，不仅提高了生产效率，相比单胎羊，多胎羊的甲烷产生量也将极大的减少。

7.2.2 精准调控日粮

对于甲烷减排来说，调整日粮的营养结构与饲料质量是控制反刍动物甲烷排放和产甲烷菌丰度的重要手段。当日粮原料及组成发生改变时，其营养成分的代谢途径会发生变化，进而影响甲烷等温室气体的排放。反刍动物大量排放甲烷是对饲料资源的一种浪费，排放量大小是饲料瘤胃发酵能量损失的主要标志。反刍动物以甲烷的形式所损失的能量约占总摄入能的 5%~15%，减少甲烷排放，反刍动物就可以利用这些能量用于合成更多的肉、奶等，同时当生产单位产品时，如果排放更多的温室气体，意味着需要消耗更多的饲料，造成饲料资源的浪费和经济利润的降低，而精准调控日粮组成和营养成分，可以提高饲料的利用率，更高效的利用饲料中的碳源，减少甲烷的排放。

精准调控日粮营养主要通过应用精准饲喂技术来实现，精准饲喂技术是指在基于集群信息化系统基础上，为健康动物饲养实现特定生产性能、养殖效益、肉品特性及环境转归而提供最优化的营养需求。其根本目的是为动物达到目标生产性能提供精确的营养，从而达到营养供给与需求间的平衡。其营养需求计算需重点考虑动物个体之间和随日龄或生产阶段改变对营养需求改变的两个变量，而生产中则需确保动物的营养实际需求与营养实际摄入量相吻合。掌握反刍动物的营养需要，科学设计饲料配方，根据不同品种、体重阶段、生产阶段营养需要设计反刍动物日粮配方，一方面有利于反刍动物的健康和生产性能的发挥，提高单产水平，进而减少生产单位动物产品的甲烷排放量。另外一方面通过提高饲料原料品质和调整原料配比可提高饲料的消化率和饲料中碳源的

利用率,从而减少甲烷产生量。

粗饲料类型是影响反刍动物甲烷排放量的主要因素,饲料精粗比和能量摄入水平次之。刘树军等通过体外发酵试验发现供试饲草的单位干物质采食量的甲烷产量介于 56.85~74.63mL/g 之间,产甲烷量最高的为玉米秸秆,最低的为国产苜蓿干草。久米新一等报道发现,稻草青贮和紫花苜蓿青贮以 1:1 比例饲喂干奶期奶牛时的甲烷产量比单独饲喂稻草青贮减少了 7%。吴爽等试验将羊草与玉米秸秆混合饲喂荷斯坦干奶牛可降低其胃肠道甲烷产量。这说明提高粗饲料品质能够减少甲烷产生。另外,对品质良好的牧草通过遗传学进行菌株筛选,不仅可能改变瘤胃挥发性脂肪酸的产生模式,而且对提高营养物质消化率和能量利用率,增加干物质采食量和奶产量都具有积极影响。Knapp 研究得出,牧草选育能减少每千克矫正乳 4%的甲烷排放量。经过粉碎或制粒后的饲料,能提高瘤胃中丙酸比例,在采食量高时,能减少 20%~40%的甲烷产量,但在采食量较低时,效果不明显。在饲喂方式上普遍认为先粗后精,少量多次饲喂能减少甲烷产生,其原因可能是增加了过瘤胃物质的数量。对于舍饲动物而言,改善粗饲料品质,能降低反刍动物单位体重的甲烷产生量。

一般情况下,丙酸产生途径可以最大限度地利用乙酸发酵产生的氢气,从而降低甲烷的生成。在饲料结构层次上,非结构性多糖(non-fiber carbohydrate, NFC)的比例和中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)的种类与消化率是影响甲烷产生的主要因素,影响中性洗涤纤维(NDF)在瘤胃中的降解能够影响反刍动物的甲烷产生量。当 NDF 在瘤胃中降解率低时,进入后肠道 NDF 则会升高,相应也会增加甲烷产量。NDF 消化率变化程度对甲烷生成影响较大,因为半纤维素和纤维素产生的甲烷是非纤维碳水化合物(NFC)产生的 2~5 倍,而单位纤维素甲烷排放量等同于 3 倍半纤维素或 5 倍可溶性剩余物。调整 NFC/NDF 会影响饲料结构,进而改变 VFA 发酵模式。研究表明,低 NFC/NDF 时,有利于乙酸和丁酸发酵,增加甲烷的合成;高 NFC/NDF 会降低瘤胃 pH,即瘤胃 pH 与 NFC 浓度及消化率呈现负相关关系,低 pH 同时影响纤维分解菌和产甲烷菌的活性,从而抑制甲烷产量。马燕芬等研究饲料非纤维性碳水化合物和中性洗涤纤维比(NFC/NDF)对奶山羊的甲烷和二氧化碳排放量的影响发现,CH₄日排放量随奶山羊干物质采食量的增加而升高,随饲料 NFC/NDF 增加而降低;CO₂日排放量随饲料 NFC/NDF 增加而升高,饲料 NFC/NDF 对奶山羊的

CH₄和CO₂排放量有显著影响。近年来，日粮中NFC和NDF比例对甲烷排放量的影响得到了进一步的研究。有报道指出，日粮NFC每增加1%，甲烷可减少2%~15%。Sauvant和Giger-Reverdin应用Meta分析得出日粮精料浓度和甲烷产量呈曲线关系，日粮精料水平为30%~40%时，单位总能摄入量的甲烷损失为6%~7%，当日粮精料水平升至80%~90%时，单位总能摄入量的甲烷排放量降低2%~3%。这是由于以包含更多能量的NFC（淀粉、糖）高比例替代日粮中NDF（纤维素、半纤维素）时会提高瘤胃发酵速率，加快精料发酵，从而改变瘤胃物理化学条件和微生物数量。随着微生物发酵，VFA实现从乙酸发酵型到丙酸发酵型的转化，从而导致甲烷产量下降。

7.2.3 提高畜禽单产水平

提高畜禽的集约化、规模化和标准化养殖水平，提高单产水平，降低反刍动物养殖数量可以减少单位产品的温室气体排放量，同时由于单产水平提高，生产者的经济效益也得到提高。提高单产水平可通过几个方面入手：一是提高畜禽的繁殖性能，增加母畜的受胎率和产仔数，减短母畜的妊娠间隔，提高母畜的利用效率；二是加强饲养管理，提高动物的成活率，减少动物的疾病；三是采用现代繁育手段，如人工授精和胚胎移植，减少种公畜的饲养量，提高优良种源的后代数量。采用两年三产或一年两产和早期断奶技术，缩短母畜繁殖周期；四是加强优胜劣汰，及时淘汰低生产性能的畜禽，提高整体平均单产水平。

通过不断的技术创新，美国奶牛平均产奶水平不断得到提高。美国2007年的奶牛头数、饲料饲喂量和土地使用量分别只有1944年的21%、23%和10%，粪便排放和碳足迹只有1944年的24%和37%；而奶牛单产是1944年的443%。2007年美国单头奶牛的CO₂排放当量为26.2kg/头·d，为1944年13.5kg/头·d当量的约2倍，但是奶牛的单产大幅提高，奶牛饲养头数降低，每千克牛奶的温室气体为1.31kg，只有1944年的36%。奶牛的遗传育种和饲养管理也有大的改进，通过人工授精技术的广泛应用，提高了公牛的利用效率，降低了种公牛的饲养量，减少了温室气体的排放。美国在保证奶牛产奶量连年增长的同时，奶牛的饲养头数大幅降低，减少了粪便和温室气体的排放，同时由于饲养头数降低，饲料的相对消耗量也同样降低，减少因过度开垦而造成树林草原的退化。De-Ramus等确定，当采用由最佳管理实践

(bestmanagementpractices, BMPs)组成的轮换系统时,与连续放养系统相比,定期受精和频繁轮换动物,将会使动物肠道甲烷排放年均减少22%。在澳大利亚的放牧企业中采用BMPs可以提高约20%的生产率,同时减少约5%的甲烷排放。

7.2.4 日粮中添加甲烷抑制剂

胃肠道甲烷排放主要来自于瘤胃(87%~90%),其余来自大肠(10%~13%)。通过在反刍动物日粮中添加产甲烷菌的抑制剂可以有效降低甲烷产量,减少温室气体排放,同时可减少因产生甲烷造成的日粮能量损耗。日粮中添加产甲烷菌抑制剂是一种减排效果显著、操作简单和具有经济性的措施。传统甲烷抑制剂采用的是莫能菌素等抗生素,但是调查研究发现,添加植物提取物或其它功能性添加剂,会使瘤胃微生物的抗药性更低,而且在牛羊等反刍动物体内不会造成残留,即减少了甲烷的排放,又保证了肉奶的绿色健康。

(1) 植物次级代谢物

单宁、酚类单体和其他植物次级代谢物对原虫、纤维菌和产甲烷古生菌有毒害作用,因此,此类物质可以减少甲烷的生成。研究表明,温带和热带富含缩合单宁的豆科植物可有效降低瘤胃甲烷的排放量。Tiemann 等报道,一些富含单宁的热带饲料的纤维降解率较低,因此,在瘤胃降解过程中,氢的生成量较少,最终导致甲烷生成量降低。此外,单宁与蛋白质存在拮抗作用,能降低瘤胃内蛋白质的降解率,进而减少甲烷的生成量。Guglielmelli 等研究了4个生长阶段的红豆草(单宁含量不同)对反刍动物胃肠道甲烷生成量的影响,结果发现,单宁含量与甲烷产量呈负相关关系($r=-0.932$, $P=0.068$),这表明,随着单宁含量的增加,甲烷产量逐渐减少。富含单宁的豆科植物(百脉根和黑荆树)对反刍动物胃肠道甲烷排放均有抑制作用。单宁抑制甲烷生成的机制随单宁的来源不同而存在一定差异。Bhatta 等发现,来自印度榕树(*Ficus bengalensis*)和线叶花旗杆(*Autocarous integrifolis*)的单宁主要通过去原虫而达到降甲烷的目的,但是印度苦楝树(*Azadirachta indica*)则通过直接影响产甲烷菌的数量及活性而使甲烷生成量减少。浓度和化学结构是影响单宁抗甲烷作用的主要因素。

(2) 脂类

脂类对甲烷的抑制作用主要有2方面原因,一是脂类可以使不饱和脂肪酸

发生氢化，二是脂类直接抑制产甲烷菌的生长。增加反刍动物饲料中的脂类含量来降低甲烷产生的技术已经应用于生产实践中，但是，应根据具体情况确定脂类比例，因为，油脂的种类和含量也不同程度地影响动物的采食量和生产性能。在反刍动物饲料中每添加 1% 的油脂或脂肪酸可使甲烷降低 4%~5% (占干物质采食量的比例)。但是，当饲料中的脂类含量高于 6%~7% 时，动物的采食量和纤维降解率会有所下降，进而使动物的生产性能下降。通过体外模拟试验证实，添加不同种类的脂类(豆油、椰子油和菜籽油等)可使绵羊、肉牛和奶牛的甲烷排放量降低 19%~62%。研究发现，椰子油对原虫和产甲烷菌均有抑制作用。此外，月桂酸、肉豆蔻酸和亚油酸对甲烷产量的减排潜力较大，尤其是月桂酸可显著降低反刍兽甲烷短杆菌的活性。

近年来，精油对反刍动物甲烷排放量的影响逐步受到人们的关注。通过体外试验研究发现，精油(来源于大蒜、百里香、牛至、肉桂、大黄和鼠李皮等)对甲烷排放量的影响依赖于精油的使用剂量，并且，随着精油添加量的增加，VFA 生成量和饲料降解率会出现不同程度的降低。也有研究表明，较低剂量的大蒜精油($\leq 300\text{mg/L}$)仍然可以降低甲烷的生成量，并且对饲料发酵没有负面影响。与此相反，也有报道表明，大蒜精油对泌乳奶牛和育肥肉牛的甲烷排放量没有影响。可能是因为体外培养法模拟瘤胃发酵并不能完全真实地反映活体动物瘤胃发酵情况。但是，体外模拟发酵试验成功地证明了精油的不同添加水平对甲烷生成的影响存在差异。此外，黄江丽等通过体外培养法研究了 5 种精油对甲烷产量的影响，结果表明，桂皮油、薄荷油对甲烷排放存在显著的抑制作用，而生姜油、丁香油和辣椒油对甲烷产量没有显著影响。就目前而言，筛选适合在生产实践中应用的精油种类并制定使用方法，确定精油的抗甲烷效果的时效性和减少精油对饲料消化率和生产性能的负面影响是我们将要解决的问题。此外，精油昂贵的价格，可能是其未来在生产中广泛推广的瓶颈。

(3) 有机酸

有机酸或有机酸盐通过改变瘤胃发酵类型(从乙酸型向丙酸型转变)，以影响胃肠道甲烷生成量。在体外培养条件下，添加延胡索酸钠可使甲烷降低 2.3%~41.0%，同时增加了饲料消化率和总 VFA 产量。同样，在体外培养条件下，苹果酸也可以使瘤胃发酵向丙酸型转变，从而降低了甲烷生成量。但是，也有报道指出，苹果酸对体外发酵瘤胃液的甲烷产量没有显著影响。综合考虑前人

的研究成果，可以看出在体外培养条件下，有机酸对甲烷排放量的影响结果是不稳定的。Wood 等报道，在羔羊饲料中添加 100g/kg 的延胡索酸，可以使试验羊胃肠道的甲烷排放量降低 60%~70%。此外，Foley 等也报道，在肉母牛饲料中添加 37.50 和 75.00g/kg 的苹果酸，使其胃肠道甲烷排放量分别降低了 6%和 16%。但也有报道指出，反丁烯二酸和苹果酸对甲烷排放量没有显著影响。张振威等发现给西门塔尔肉牛基础饲料中添加 0.04g/(kg·d) 的异丁酸，可显著降低胃肠道甲烷排放量。牛文静等报道，延胡索酸二钠可以提高未处理和经过氨化处理的稻草体外发酵的总产气量，同时降低了甲烷的相对产量。

有机酸的降甲烷效果除受添加剂量的影响外，还可能受饲料中粗饲料的比例和谷物类型的影响。目前，有机酸价格昂贵，使其在生产实践中的应用受到很大限制。饲喂富含有机酸的粗饲料是解决这一问题的途径。Callaway 等通过研究苜蓿、百慕大草和高茅草的有机酸含量，发现不仅不同品种的牧草有机酸含量不同，而且同一品种的不同生长阶段的有机酸含量也有所不同，但是这些含有不同有机酸的牧草最终对动物胃肠道甲烷排放量的影响结果是不确定的。总之，有机酸对甲烷排放量的影响结果存在一定的差异性，并且有机酸的抗甲烷效果受添加剂量和饲料组成的影响而不同。

(4) 卤代化合物

多卤素化合物抑制剂(如水合氯醛、氯化甲烷、三氯乙炔、多氯化醇、溴氯甲烷、多氯化酸等)通过毒害产甲烷菌以降低甲烷合成量。Abecia 等研究发现，溴氯甲烷显著降低了泌乳山羊的甲烷排放量，但对瘤胃细菌、原虫和产甲烷菌没有显著影响。与此相反，Denman 等研究结果表明，溴氯甲烷使瘤胃产甲烷菌数量和甲烷产量分别降低了 34%和 30%。溴氯甲烷易挥发，但溴氯甲烷环糊精复合物性质稳定，因此，溴氯甲烷环糊精复合物的降甲烷效果优于溴氯甲烷。May 等报道，添加溴氯甲烷和 α -环式糊精的复合物可以长时间抑制牛、羊甲烷的生成。McCrabb 等报道，若给牛每隔 1h 饲喂 1 次溴氯甲烷，则试验牛胃肠道不再有甲烷排出，若每天饲喂 2 次，8 周后，试验牛胃肠道的甲烷排放量降低了 54%，但采食量也有所下降。由以上结果可以看出，卤代化合物对反刍动物瘤胃的甲烷排放存在一定的降低作用，但 Tezel 等证实，瘤胃产甲烷菌对季胺类化合物存在耐药性。因此，给动物长期饲喂，可能会失去抗甲烷的作用，这是在推广过程中需要解决的问题。

研究人员利用体外模拟发酵技术研究了 3-硝基丙醇(3-nitrooxypropanol)和乙基-3-硝基丙醇(ethyl-3-nitrooxypropanol)对瘤胃发酵和甲烷产量的影响,结果表明,以上 2 种物质均有减少瘤胃甲烷生成的潜力,且对瘤胃发酵不产生负作用,但这 2 种卤代化合物还处于试验研发阶段,目前在生产实践中很少被应用。此外,产甲烷菌抑制剂对产甲烷菌有特异性。因此,选择甲烷抑制剂时应有针对性。

(5) 硝酸盐

硝酸盐对氢的亲合力大于二氧化碳对氢的亲合力,因此,硝酸盐通过与产甲烷菌竞争氢和消耗电子以减少甲烷的生成,此外,在瘤胃中,硝酸盐在氧化还原反应过程中生成的氨可以作为瘤胃微生物的氮源合成微生物蛋白。硝酸盐具有一定毒性,通常通过以下途径避免硝酸盐中毒:1)有计划地逐渐增加添加剂量,使瘤胃微生物可以有一定的适应期;2)通过控制硫酸盐和硝酸盐的比例来降低硝酸盐转换成氨的量。研究表明,动物饲料中添加硝酸或硝酸盐可显著降低胃肠道甲烷排放量。同时,硝酸还原型微生物可利用硝酸获得更多的能量,从而加快了瘤胃微生物的生长速率。Nolan 等报道,在体外条件下,饲料中添加 4%的 KNO_3 ,使绵羊甲烷排放量降低 23%,而对干物质消化率没有显著影响。此外,硝酸盐和尿素均是微生物合成蛋白质的氮源。在低蛋白质饲料中添加硝酸盐,可以提高反刍动物的生产性能。Huyen 等在肉牛饲料中分别添加了等量的硝酸盐和尿素,结果发现,硝酸盐降低了试验牛的甲烷排放量,但对采食量、营养物质消化率和生长速度没有影响。

(6) 细菌素和细菌

细菌素是由许多细菌产生的小抗菌肽,在动物机体内,它不仅可以有效抑制病原体生长,还可以作为益生菌调节瘤胃内环境,细菌素可以作为一些抗生素的替代物应用于动物的生产实践中,具有降低甲烷产量的作用。乳酸链球菌肽对瘤胃发酵的影响和莫能菌素相似,并且在体外条件下,使甲烷产量降低了 36%。此外,一些外源菌可以在瘤胃中产生细菌素。Kalmokoff 等研究了 50 株丁酸弧菌,发现 50%的菌株具有抗菌活性。这可能因为许多乳酸菌均能产生细菌素,且细菌素能使瘤胃液 pH 降低,从而降低甲烷生成量。此外,瘤胃细菌的代谢产物将会成为一类新型瘤胃改良剂。例如一些古生菌群所产生的细菌素对某些特定微生物的生长有抑制作用。但是,由古生菌有机体产生的细菌素是

否对其他种类的古生菌的生长有抑制作用尚不清楚。

①产乙酸菌

厌氧分解纤维素的微生物分为产氢的细菌(目前称产氢或产乙酸菌)和产甲烷菌 2 大类。其中,产乙酸菌可与产甲烷菌竞争氢生成乙酸而不产生甲烷。鉴定分离自然界中可利用氢的产乙酸菌,并进行体外增殖培养后,将其补饲给动物,是一种降低甲烷排放措施的潜在途径。鉴定分离自然界中可利用氢的产乙酸菌,将其补饲给动物,是一种降低甲烷排放措施的潜在途径。例如,Gagen 等发现,尤金袋鼠前胃中存在一类新的产乙酸菌,且尤金袋鼠的甲烷排放量较少。如果证实这一类产乙酸菌竞争氢的能力高于产甲烷菌,并能进行体外分离培养,则为抑制瘤胃甲烷排放开辟了一条新途径。此外,瘤胃中接种利于产乙酸菌生长的菌体,也可以促进乙酸菌生长。例如,Chaucheyras 等报道,酵母可以使产乙酸菌利用氢的能力增强,进而增加乙酸合成量。因此,酵母已经在反刍动物饲料中被广泛使用,并得到了良好的效果。

②甲基营养菌

甲基营养菌又称甲基利用菌,是一群能够利用单碳原子(甲醇和甲胺)的革兰氏阴性细菌。它通过与产甲烷菌竞争底物以降低甲烷的合成量。大部分甲基营养菌和甲烷氧化菌都可以阻止瘤胃内的甲烷释放到大气中。了解甲基营养菌的代谢途径是缓解瘤胃甲烷释放的另一种新方法。关于瘤胃中甲基营养菌的研究还比较少见。仅有 Kajikawa 等报道,甲基营养菌在瘤胃中的含量为 0.2%~0.5%。在未来的研究中,发现能够在瘤胃中存活并起到能降低甲烷合成作用的甲基营养菌非常关键。Mitsumori 等在吸附于瘤胃上皮细胞的菌群中发现了亚硝化单胞菌。亚硝化单胞菌是一类氨氧化菌,在一定条件下,可以氧化甲烷。但是,这一类细菌在瘤胃中的存在具有一定的偶然性。此外,瘤胃基因文库中包含一些疣微菌门细菌。研究发现,这类细菌中的部分菌种在非瘤胃条件下能氧化甲烷,且甲烷是它们唯一的碳源和能量来源。但是,疣微菌门细菌已被证实主要存在于水生和土壤环境中,而在瘤胃环境中的含量和作用机制尚不清楚。

③嗜二氧化碳菌

嗜二氧化碳菌适宜生存在高浓度二氧化碳条件下。瘤胃呈厌氧环境,且二氧化碳是瘤胃所产生的主要气体之一。由此推测,瘤胃内的嗜二氧化碳菌可以通过消耗合成甲烷的底物而降低甲烷合成量。Dehority 报道,瘤胃细菌对二氧

化碳的利用主要包含 2 种途径：1) 通过生物合成作用，二氧化碳被用于细胞生长(如牛链球菌)；2) 在一类琥珀酸生成菌(如产琥珀酸放线杆菌、琥珀酸曼氏杆菌和琥珀酸弧菌)的作用下，将二氧化碳转化成琥珀酸。在这一系列的反应中，二氧化碳和氢被消耗的同时还生成了丙酸前体物。Kempton 等发现，坦玛小袋鼠单位可消化进食能所产生的甲烷量仅为反刍动物的 1/5。除了生理结构上的不同以外，坦玛小袋鼠前胃中所含有的特有菌群可能是低甲烷排放的重要原因之一。坦玛小袋鼠瘤胃菌群的基因文库中，嗜二氧化碳菌占 16SrRNA 总序列的 9%。但如何利用嗜二氧化碳菌降低反刍动物瘤胃甲烷排放量还需要做大量的进一步的研究。

7.2.5 提高畜禽粪污处理与利用水平

动物的粪便被排泄后, 并且粪便内存在大量的各种分解菌来分解粪便, 因粪便的处理方式和细菌的不同, 产生的气体成分也存在差异, 当大量产生甲烷、氧化亚氮等温室气体且直接排放到空气中时, 则加重温室效应。合理处理动物粪便, 可以有效减少温室气体的生成。粪污处理技术主要有:

(1) 沤肥技术

沤肥技术也称为堆沤技术是指将畜禽粪污、秸秆等有机废弃物混合后集中堆放, 在自然条件下通过生物降解作用将混合物料转化为相对稳定且富含腐殖质的物质。原料混合物料含水率宜为 45%~65%, 堆成条垛式, 表面铺设一层秸秆、腐熟料或塑料膜等遮盖物, 堆沤时间一般不少于 90 天。常见堆沤设施为半开放式堆沤池, 一般设置在养殖场内, 具有防雨、防渗等功能。该技术模式操作简单、建设和运行成本较低, 但发酵周期较长, 需采取臭气和蚊蝇控制措施。

(2) 反应器堆肥技术

反应器堆肥技术是指将畜禽粪污、秸秆等有机废弃物混合后, 置于密闭容器中进行好氧发酵处理, 实现快速无害化和肥料化。常见的反应器堆肥装置有箱式反应器、立式筒仓反应器和卧式滚筒反应器等。原料经除杂、粉碎、混合等预处理后, 调节含水率至 45%~65%, 随后置入反应器内进行高温堆肥, 反应器堆肥发酵温度达到 55℃ 以上的时间应不少于 5 天, 然后对发酵物料进行二次腐熟后, 可还田利用。该技术模式自动化水平较高, 便于控制臭气污染, 粪污处理效率较高, 但相比于简易堆沤模式投资成本稍大。

（3）条垛（覆膜）堆肥技术

条垛（覆膜）堆肥技术是指将物料堆制成长条形堆垛，通过专用翻堆机或翻斗车进行机械供氧的好氧发酵过程，是一种应用较为广泛的堆肥工艺。条垛式堆肥过程中，可以在堆体表面覆盖一层专用分子膜，使其形成一个密闭环境，减少污染气体排放，并在堆体底部通过曝气管道供给氧气，促进物料快速腐熟，这种堆肥工艺也称为覆膜堆肥。条垛式堆肥翻堆频率大约为每周 3~5 次，整个发酵过程需要 30~60 天。该技术模式工艺简单、操作简便、投资较少，但占地面积大，发酵时间长，臭气不易控制，产品质量不稳定。

（4）深槽异位发酵床技术

深槽异位发酵床技术是指在畜禽养殖舍外采用深槽发酵处理粪浆的一种方式，首先向发酵槽内一次性投放大量的干垫料，然后将每天收集到的粪浆（含固率 $\geq 5\%$ ）均匀喷淋到垫料上，再经机械翻耙和辅助曝气，实现高温好氧发酵、蒸发水分、保留养分，实现无害化处理。目前主要应用在缺少耕地配套的山区生猪养殖场和部分刮粪模式笼养蛋鸡、肉鸡场。深槽异位发酵床主要包括发酵槽、粪污池、翻耙机和曝气辅助系统，发酵槽内垫料高度应不低于 1.8 米，垫料容积大于日处理粪浆量的 60 倍，翻耙机宜采用小功率多层翻抛设备，菌种采用能快速分解粪浆中残留淀粉的高效降解菌株。垫料与粪浆混合均匀后含水率应控制在 50%~60%，每天可适量喷加粪浆 1 次、翻耙物料 1 次，夏季可适当增加翻耙次数，冬季可适当减少翻耙次数。该技术模式具有占地面积小、投资相对较少、运行成本较低和快速控制臭气的优点，能实现粪浆发酵全部转化为有机肥原料。

（5）臭气减控技术

臭气减控技术是指主要减少畜禽养殖产生的 NH_3 、 H_2S 、VOC 等臭气成分，其中最臭的气体成分各种挥发性脂肪酸。养殖过程中多个环节都有臭气产生，减少和控制臭气主要要从动物饲料、圈舍环境、清粪方式和粪污收集处理等方面综合治理，通过快速清理粪污、全量密封存贮、减少臭气外溢；添加发酵饲料（中草药）、减少动物肠道臭气产生；喷洒抑臭微生物菌剂、降低舍内环境臭气浓度；固体粪污快速进入好氧堆肥状态，形成腐熟堆肥，抑制臭气产生；液体粪污经过深度厌氧发酵过程，形成腐熟粪水，减少臭气排放。

（6）发酵垫料技术

发酵垫料技术是指将锯末、稻壳和秸秆等垫料经发酵后铺设到圈舍内的养殖层面或者养殖层面以下（漏粪板、漏粪网格）的一种养殖模式，在奶牛、肉牛、肉羊和肉鸡等中小规模养殖场均有使用。养殖过程中动物每天产生的粪便和尿液均落入预先铺设好的发酵垫料上，通过内源微生物或外源功能微生物作用进行中低温好氧发酵，实现畜禽粪污无害化处理和稳定化利用。发酵垫料含水量一般控制在40%~50%，垫料厚度以畜种、养殖模式以及每天产生粪尿量确定，每立方垫料应添加（接种）功能微生物菌种0.3~1kg，配置垫料应先预发酵，发酵温度需经过60℃的高温区，预发酵周期控制在5~7天。发酵垫料上床后要根据不同模式采用覆盖或翻耙等方式调节水分，并通过增减垫料厚度调控发酵进程，发酵垫料厚度应根据季节变化及时调整。发酵垫料使用一个周期后，根据氮磷钾养分富集情况和垫料腐解状况，确定是否更换垫料，更换的垫料可用于有机肥生产或作为农家肥直接还田使用

（7）基质化栽培技术

基质化栽培技术是利用畜禽粪便为原料，辅以菌渣及农作物秸秆，进行堆肥发酵，生产用于菌菇种植的基质、果蔬栽培基质、水稻育秧基质，具有较好经济效益。主要是畜禽粪便和粉碎秸秆按一定比例混拌后，经过10余天高温发酵，15天左右二次发酵，通常保持碳氮比为20~35:1，含水量控制在60%左右，经过多次发酵转化为腐熟栽培基质。若作为水稻或者蔬菜育苗基质，腐熟粪便堆肥与营养土、壮苗剂按一定比例混拌均匀即可；如果作为食用菌栽培基质，需要进一步经过巴氏灭菌、降温、接种培养后，按照食用菌栽培基质质量安全要求（NY/T1935-2010）进行包装备用。使用时适宜温度是25~28℃，期间需要注意通风换气、控制温度和水分，促进菌丝生长，可以在温室大棚中进行培养生产食用菌。

（8）动物蛋白转化技术

动物蛋白转化技术是指通过蚯蚓、黑水虻等腐食性动物对畜禽粪便进行生物处理，增殖转化的蚯蚓、黑水虻等可用作畜禽饲料中的动物蛋白原料，残余物质（虫沙）作为有机肥料进行还田利用。蚯蚓适宜生长温度为18~25℃，培养基料适宜含水量为30%~50%、pH值为6.5~7.5，碳氮比为35~42:1，养殖密度每平方米控制在10000~30000条幼蚓为宜，通过亲本选择、杂交、初筛、驯化、复筛、基质制备和增值培养等步骤完成。黑水虻适宜在28~32℃环境下

生长，种虫繁殖需要好的光照条件，但处理猪粪的场所不需要光照。黑水虻养殖模式可分为人工操作和机械化操作，全程转化时间一般在 35 天左右，食物转化率 15~20%，商品幼虫粗蛋白含量 42%（干基），营养价值高，对粪便中氮的消化能力可达到 25%，具有处理成本低、资源化效率高、无二次污染等特点，实现了生态养殖。

（9）贮存发酵技术

贮存发酵技术是将畜禽养殖场产生的畜禽粪、尿、外漏饮水、冲洗水及少量散落饲料等的混合物集中收集（液态粪污）或将粪污固液分离后的液体，在敞口、封闭或半封闭贮存条件下伴随好氧、兼氧或厌氧发酵的过程，以达到粪污稳定化、无害化效果，并减少有害气体排放。常见的贮存发酵设施有舍内深坑、氧化塘、密闭罐或覆膜塘（如黑膜厌氧塘）等。粪污在氧化塘和/或深坑中贮存发酵的时间总和不少于 6 个月，在封闭贮存设施中贮存发酵的时间不少于 3 个月；加入微生物菌剂或发酵后作为基肥使用时，可适当缩短贮存期。其操作简单，建设和运行成本较低，但要配套规范的贮存设施，保障贮存发酵全过程安全，合理设计农田施用工艺，并注意控制有害气体排放。

（9）厌氧发酵技术

厌氧发酵是将畜禽养殖粪污，经过除杂、调质等预处理后，置于密闭设施中在厌氧微生物作用下进行稳定化、无害化处理，所产生沼气作为能源、沼液沼渣作为肥料（沼肥）；需配套原料预处理、进出料、沼气贮存和净化、以及沼肥贮存设施等。影响厌氧发酵效果的因素主要有物料配比、总固体浓度、发酵温度、搅拌、发酵周期等。规模以下养殖场粪污厌氧发酵的总固体浓度以不超过 8%为宜，推荐采用常温（环境温度）和中温发酵（36℃左右）；常温发酵周期（水力停留时间）不少于 8 周、中温发酵周期不低于 3 周，可通过发酵设施保温和加温（如太阳能加温）保证发酵温度稳定。该技术对粪污稳定化无害化处理效果好，每方粪污产沼气 30m³ 以上，病虫害和杂草种子杀灭率可达 90% 以上，粪污养分损失小于 10%，甲烷减排 80% 以上；但对稳定运行、安全管理等技术要求较高，适宜粪污产生量稳定充足、清洁能源需求大、有害气体排放控制要求高的地区。

针对粪污的不同处理方式，研究人员研究的这些技术措施的甲烷和氧化亚氮减排效果。Ahn 等研究了静态堆肥与堆肥过程中混合的 2 种处理方式下奶牛

粪便堆肥过程中温室气体排放情况，发现混合 4 次的堆肥堆比不混合的堆肥堆多产生 20%的温室气体。另有研究发现泥浆储存的 CH₄减排潜力可达到 9%~88%，而 N₂O 排放量可通过合适的减排技术大幅减少 80%以上。由于产甲烷菌对温度非常敏感，较低的储存温度对 CH₄ 的排放有减少作用。在较低温度下储存的浆料可减少 15%~93%的 CH₄ 排放量，而从生产设施内去除浆料以降低其温度可使 CH₄ 排放量降低 23%~46%。此外，通过酸化原料猪浆，总温室气体（包括 CH₄ 和 N₂O）排放量减少了 31%~92%。

通过好氧堆肥减少温室气体排放。在堆肥过程中使用一些添加剂可以减少 CH₄ 和 N₂O 的排放。常见的添加剂包括改性赤泥、过磷酸酯、改性镁橄榄石、生物炭和微生物添加剂。添加剂的作用因目标和操作环境而异。添加磷石膏会释放 SO₄²⁻ 离子，SO₄²⁻ 离子对产甲烷菌有毒，导致 CH₄ 产量减少。添加生物炭可使堆肥的 CH₄ 排放量减少 78%~84%，还可增加堆肥的孔隙度，促进更好的通风以减缓 CH₄。在粪肥堆肥中加入镁盐和磷酸形成鸟粪石结晶，可使 N₂O 排放减少 9%~80%。

7.2.6 合理规划场区建设和配套设施设备

合理规划养殖场区建设可有效减少场区内饲料、粪污、畜产品转运能源消耗，避免粪污转运过程中排放温室气体。合理配套养殖设备可提高生产效率，配套养殖场尾气回收处理装置可有效降低养殖舍内温室气体排放。牧场棚舍顶铺设光伏组件，可有效降低棚舍内夏季温度，增加绿色能源使用量。配置沼气发电项目，提供牧场运营的用电量。推行安装空气源热泵，实施余热回收改造。

内蒙古巴彦淖尔市乌拉特中旗多个养殖场（户）采用新型日光保温羊舍，利用太阳能节省圈舍加热产生的能耗，同时降低动物体增热产生的能耗，进而降低非 CO₂ 温室气体排放。同时养殖场（户）利用颗粒饲料自动采食设备，不仅节省了人力，同时也减少了饲喂车辆产生的温室气体。

辽宁省鞍山市千山区果园养殖农场通过分析比较不同建筑围护结构材料的热工指标，对猪舍墙体、屋顶、窗户等进行节能保温改造。改造后的猪舍内，11 月中旬温度比改造前的猪舍内温度提高了约 3℃。同时节煤减煤效果显著，万头猪场在采暖季可节约能源利用 34%~65%，一个采暖季减少二氧化碳排放 10 吨~32 吨。改造后的猪舍保温性能提高，冬季猪舍内热量向舍外传递减少，达

到了降低供暖能耗、提高舍内温度、减少二氧化碳排放的目的。除了改造老旧猪舍，该养殖农场还新建节能环保猪舍。节能环保猪舍在冬季不用燃煤燃油燃气取暖的情况下，利用地窖地热和猪群余热猪舍取暖，母猪和育肥猪舍的舍内温度可稳定在 20~24℃，保育猪舍内温度可稳定在 24~26℃。以东北地区 300 头母猪的自繁自养猪场为例，节能环保猪舍比传统猪舍可减少耗煤约 151 吨，减少温室气体排放 65%。同时节能环保型猪舍虽比传统猪舍基础投资高 36 万元，但是年运行费用比传统猪舍低 32.3%，年运行费用节约 36.4 万元，不仅节能环保，还能降低运行成本。

7.2.7 应用免疫法

免疫法是降低反刍动物甲烷排放的一种环保型解决方案。Wright 等研制出 2 种疫苗：VF3(基于 3 种产甲烷菌 *Methanobrevibacter* spp. strains 1Y、AK-87 和 *Methanobrevibacter millerae* ZA-10) 和 VF7(基于 7 种产甲烷菌)。并通过试验表明，这 2 种疫苗可以使绵羊的单位干物质采食量所产甲烷降低 7.7%，并使宿主动物的产甲烷菌群降低了 20%。此外，他们还研制出了基于 5 种产甲烷菌疫苗。给动物进行 2 次免疫后，宿主动物的甲烷排放量却增加了 18%。因此，还需要对疫苗组成和作用效果进行进一步研究。

进行免疫时，疫苗可能被宿主降解并且瘤胃中的抗体存在时间较短，因此，大部分学者认为，通过免疫减少甲烷排放存在时效性。Williams 等发现，给绵羊进行原虫免疫后的 8h 内，免疫球蛋白 G 抗体持续产生，并能持续抑制原虫的活性和保持对靶细胞的作用。当动物品种、饲料构成和消化道部位不同时，产甲烷菌种类也会有很大差异，单一特异性的抗产甲烷菌疫苗的作用效果并不明显。Wedlock 等利用亚细胞组分(细胞质和细胞壁的衍生蛋白质)研制出了一种新的反刍兽甲烷短杆菌疫苗，利用离体试验发现，对 20 头绵羊进行免疫，并在 3 周后加大免疫剂量，出现抗体血清聚集现象，并且产甲烷菌数量和甲烷产量均有所下降。通过免疫以降低反刍动物胃肠道甲烷排放的方法还不成熟以及没有征收相应的反刍动物甲烷排放税费，目前，通过免疫法来降低反刍动物胃肠道甲烷排放的措施还没有在大范围应用。

表 7-2 畜牧业温室气体控制措施

类型	技术名称
调控瘤胃发酵	植物次级代谢物
	脂类
	有机酸
	卤代化合物
	硝酸盐
	抗生素替代物
	益生菌
调控日粮组成	改进饲料加工工艺
	饲喂含甲烷抑制成分的粗饲料
	增加日粮 NFC 含量
	应用能氮平衡技术
	应用氨基酸平衡技术
	应用酶工程营养调控技术
调控饲养管理	培育饲养具有高生产性能的畜种
	应用精准饲养技术
	应用精准补饲技术
	缩短繁育周期
	应用种养结合模式
	应用更加科学的放牧草场管理策略
	提高牧场牧草质量
	依据草场资源，调整每类牲畜的相对数量
调控粪污处理	固液粪肥分离
	反应器堆肥技术
	覆膜堆肥技术
	厌氧发酵技术
	添加甲烷和氧化亚氮生成抑制剂
	动物蛋白转化技术
	发酵垫料技术

类型	技术名称
	基质化栽培技术
	应用高效沼气工程
	应用草牧肥绿色循环模式
调控设施设备	使用可再生能源
	使用环保设施设备
	建设现代化养殖场区

表 7-3 部分甲烷等温室气体控制措施减排效果

控制措施	减排成效	数据来源
牧草选育	减少每千克矫正乳 4% 的甲烷排放量。	Knapp J, Laur G, Vadas P, et al. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions [J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(6):3231-3261
提高饲喂粗饲料品质	稻草青贮和紫花苜蓿青贮以 1:1 比例饲喂干奶期奶牛时的甲烷产量比单独饲喂稻草青贮减少了 7%。	久米新一, T Toharmat, M Ridla. Effects of High Potassium Intake from Alfalfa Silage on Mineral Status in Sheep and Periparturient Cows [J]. Research Bulletin of the National Agricultural Research Center for Hokkaido Region, 2004, (181):1-14.
提升日粮中精料水平	能够使甲烷的排放量减少 10%~30%。	Johnson KA, Johnson D E. Methane emissions from cattle. [J]. Journal of Animal Science, 1995, 73(8):2483-2492.
采用低蛋白日粮	温室气体减排量 (0.82±0.40) kgCO ₂ e/kg 增重。	黎学琴, 马文林, 邓柏林等. 低蛋白日粮对规模猪场温室气体减排效果研究 [J]. 家畜生态学报, 2014, 35(06):69-75.
增加日粮 NFC 含量	每增加 1%, 甲烷可减少 2%~15%。	Knapp J, Laur G, Vadas P, et al. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions [J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(6):3231-3261
日粮中添加 3-NOP	添加 60mg/kg 的 3-NOP 可以降低奶牛甲烷排放量和排放强度可达 27%~29%。	[1] Melgar A, Lage C, needle, et al. Enteric methane emission, milk production, and composition of dairy cows fed 3-nitrooxypropanol [J]. Journal of Dairy Science, 2020, 104. DOI:10.3168/jds.2020-18908.
日粮中添加海藻	当将海藻作为哺乳奶牛的饲料成分时, 甲烷排放量可以降低 67%; 作为肉牛的饲料添加成分, 海藻在日粮干物质的总混合配比中达 0.2% 时, 甲烷排放量可以下降 98%。	Roque B M, Salwen J K, Kinley R, et al. Inclusion of <i>Asparagopsis armata</i> in lactating dairy cows' diet reduces enteric methane emission by over 50 percent [J]. Journal of cleaner production, 2019 (Oct. 10):234.
日粮中添加柠檬草和波斯菊	在肉牛饲料中添加柠檬草可以降低 33% 的 CH ₄ 排放量, 添加波斯菊可以降低 28% 的	María Fernanda Vázquez-Carrillo, Hugo Daniel Montelongo-Pérez, Manuel González-Ronquillo, et al. Effects of Three Herbs on

控制措施	减排成效	数据来源
	CH ₄ 排放量。	Methane Emissions from Beef Cattle[J].Animals, 2020, 10(9).DOI:10.3390/ani10091671.
增加日粮油脂含量	每添加 1%的油脂或脂肪酸可使单位干物质采食量的甲烷排放量降低 4%~5%。	Dohme F, Machmuller A , Wasserfallen A, et al. Comparative efficiency of various fats rich in medium-chain fatty acids to suppress ruminai methanogenesis as measured with RUSITEC[J].Canadian Journal of Animal Science 2000,80(3):473-482.
日粮添加增加月桂酸	添加 50mg 未酯化月桂酸可使甲烷产量减少 22.2%。	李玉珠, 刘发央, 龙瑞军. 不同水平未酯化月桂酸对人工瘤胃发酵产气量的影响[J].草原与草坪,2005,(6):28-32.
日粮添加植物乳酸杆菌	添加水平为 5×10 ¹⁰ CFU/ 只时, 显著降低了单位可消化干物质采食量的甲烷排放量, 降幅为 15.28%.	肖怡. 三种益生菌对肉羊甲烷排放、物质代谢和瘤胃发酵的影响[D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学,2016.
日粮添加活性干酵母	基础日粮中添加 200mg/kg 活性干酵母对瘤胃内丙酸浓度和 VFA 浓度影响显著, 甲烷产量减少了 39.84%.	班志彬, 张国梁, 杨华明, 等. 活性干酵母和纤维素酶对草原红牛瘤胃挥发性脂肪酸浓度及甲烷排放的影响 [J]. 中国畜牧兽医,2013,40(2):57-61.
驱除瘤胃原虫	瘤胃甲烷排放平均下降 13%。	Yoon I K, Sterm M D.Influence of directfed microbials on ruminal fermentation and performanc of ruminant: a review [J]. Asian Austral J Anim Sci,1995,8: 533-555.
对露天储存粪污的表面覆盖	平均减少液态粪便 38% 的 CH ₄ 排放量。	Sommer S G, Peterm S O, Sogaard H T. Greenhouse gas emission from stored livestock slurry [J].Environ Qual,2000,29:744-751.
粪污厌氧发酵和固液分离	厌氧消化和固液分离均可减少温室气体排放, 两者的组合减排率最高可达 41%。	AGUIRRE - VILLEGAS H A , LARSON R A, SHARAR M A.Anaerobic digestion, solid - liquid separation, and drying of dairy manure: measuring constituents and modeling emission[J]. Science of the Total Environment,2019,696(12): 134059.

7.3 内蒙古畜牧业温室气体控制技术路径措施

基于前述内蒙古畜牧业甲烷等温室气体控制技术及其效果评估, 结合当前国家规划与政策要求, 通过分析内蒙古现有的基础条件和减排技术的研究方向和未来应用情况, 综合考虑方案的实用性, 筛选适宜的非 CO₂ 温室气体减排方案, 提出短期, 中期和长期的内蒙古畜牧业非 CO₂ 温室气体适宜的控制措施。

7.3.1 短期技术措施

短期来看, 主要针对规模化养殖场(户), 推广应用饲料加工、营养调控、环境控制、粪污处理等技术可以快速有效的减少畜牧业非 CO₂ 温室气体排放。

(1) 畜牧业养殖技术优化和科学管理

改进饲料加工工艺。通过除杂、发酵、膨化、制粒、蒸汽压片等环节处理，可减少霉菌、霉菌毒素含量，杀灭部分病原菌，提高饲料利用率，进而降低畜禽甲烷排放量。

饲养高繁快长品种，增加母畜的受胎率和产仔数，缩短母畜的繁殖周期，提高母畜的利用效率。提高动物的成活率，减少动物的疾病，提高单产水平，减少生产单位动物产品的甲烷排放。

应用能氮平衡技术、酶工程营养调控技术、氨基酸平衡技术等低碳养殖关键技术，通过提高畜禽饲料利用率，减少反刍动物瘤胃发酵过程的温室气体排放量，实现源头减碳。合理分群，按照养殖动物的年龄，性别、体重、繁殖状态、健康状态分群，便于精准饲喂技术的应用，进而减少甲烷排放。

精准调控畜禽饲养环境。在畜禽养殖过程中，畜舍环境、饲料品质和畜禽品种等因素相互作用影响畜禽生产力。舒适的饲养环境对非 CO₂ 温室气体的减排至关重要。保持畜舍的适宜温度在一定程度上可以减少甲烷排放。

科学合理的养殖场区建设可有效减少场区内饲料、粪污、畜产品转运能源消耗，避免粪污转运过程中排放非 CO₂ 温室气体。同时合理配套适宜的养殖设备可提高生产效率，减少资源的浪费。



图 7-2 秸秆颗粒饲料



图 7-3 混合发酵饲料



图 7-4 日光羊舍



图 7-5 羊自由采食槽

(2) 粪污处理与利用

畜禽粪污是甲烷和氧化亚氮的主要排放源之一，畜禽粪污所导致的温室气体排放受饲养规模、养殖环境、清粪方式、堆肥模式及粪污处理工艺等的影响。因此，采取适宜的方式处理畜禽粪污可以有效减少温室气体的排放。针对不同的养殖方式和规模，粪污的处理与利用主要有以下两种模式。

①集中加工利用循环模式

针对内蒙古农区、半农半牧区的大型规模养殖场或养殖场相对集中的地区，可以依托大型规模养殖场或第三方企业，将本场及周边养殖场产生的固体粪便集中收集，统一进行好氧堆肥无害化处理后，加工成有机肥就地农田利用或出售。

将粪污转化为有机肥加以利用，现种养结合循环发展。加强种养结合循环农业发展，推动农业生产过程减量化、资源化、再利用是遏制和减少畜禽养殖业温室气体排放的重要路径之一。内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗建立“草牧肥绿色循环”模式，以种植、养殖条件为依托，成立了草牧肥产业化循环联合体，运行方式为牧草种植企业、合作社给牧场提供牧草，牧场生产的粪污经第三方

粪污处理机构加工为有机肥，有机肥由牧草种植企业、合作社进行还田的产业循环链。正时草业、金泰禾、牧乐源、茂盛泉、顺沐隆等饲草种植企业，带动周边合作社、家庭农牧场、农户 500 余户发展饲草种植 50 万亩，为优然牧业、赛科星、骑士等大型标准化奶牛牧场提供饲草 120 万吨，由两宜生物科技公司负责消纳奶牛牧场所产生的养殖废弃物，并加工成有机肥，有机肥年加工能力达到 15 万吨（其中水肥 5 万吨），供给饲草种植主体，实现生态养殖、绿色种植循环经济。



图 7-6 鄂尔多斯市草牧肥绿色循环模式

②污水肥料化利用模式

针对周边配套一定面积农田的规模养殖场，可以将养殖污水通过氧化塘贮存进行无害化处理储存后，在农田需肥和灌溉期间，将无害化处理的污水与灌溉用水按照一定比例混合，进行水肥一体化施用，固体粪便进行堆肥发酵就近肥料化利用或委托第三方进行集中处理。

③粪便垫料回用模式

对于大型奶牛规模养殖场，可以将粪污进行固液分离，固体粪便经高温快速发酵和杀菌处理后作为牛床垫料，污水贮存后作为肥料进行农田利用。

在粪污利用方面，中农创达（北京）环保科技有限公司采用“奶牛粪转化牛床垫料整体解决方案”对粪污转化利用。将牧场粪污经固液分离后，液体粪经污水处理系统“厌氧+好氧”发酵产生沼气，转化为电能利用，还田利用；固

体粪经“CAC 智能牛床垫料系统”转化为牛床垫料，多余的垫料和沼渣经膜式堆肥好氧发酵形成有机肥料，连同沼液施用在牧场配套饲草种植基地，形成种养结合、农牧循环的模式。

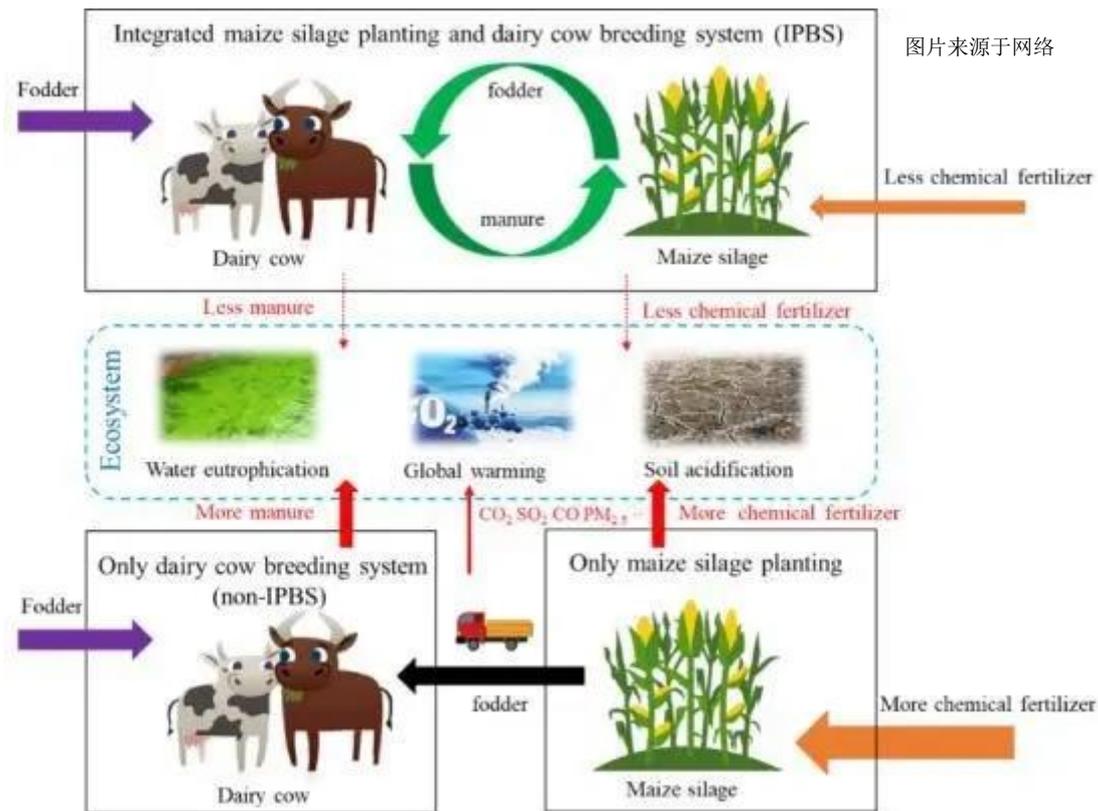


图 7-7 中农创达“奶牛粪转化牛床垫料整体解决方案”技术原理图

CAC 智能牛床垫料系统集成超干脱水、辅助升温系统、超高温发酵、过程检测、返料系统、自动控制等功能于一体，一键式操作，可全年连续生产，该系统通过微生物超高温发酵达到高效灭菌、生物干燥、去除臭味和有害病菌等功效，保证垫料的安全性、松软性和舒适性，犹如奶牛“席梦思”。该系统基于“超干脱水+超高温好氧发酵”原理，使得出料水分在 55%以下，维持 6~12 小时 55~75℃ 高温，实现粪污灭菌率达 99%，垫料水分低于 50%，满足作为牛床垫料使用要求。同时，可选配电加热快速升温系统或沼气热风辅助烘干系统，配合独创的返料系统带来大量活跃好氧菌，最大程度提高牛床垫料生产效率，单次垫料产量在 40~60m。

(3) 农区和农牧交错区种养结合养殖模式

养殖企业配套种植用地，将粪污堆肥处理施用耕地，实现种养结合循环发展。加强种养结合循环农业发展，推动农业生产过程减量化、资源化、再利用是遏制和减少畜禽养殖业非 CO₂ 温室气体排放的重要路径之一。中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业资源利用与区划创新团队通过调查研究与模型分析，揭示了种养结合模式下奶牛场的温室气体减排潜力。



图片来源于网络

图 7-8 种养结合模式减排潜力

青贮玉米种植与奶牛养殖一体化模式（IPBS）可实现养殖场内粪便、秸秆和青贮玉米的循环利用，减少种植环节中化肥使用，降低饲料和粪便运输能耗，是一种可持续的生产模式。该研究团队以山东省、黑龙江省奶牛场的调查数据为基础，运用生命周期分析（LCA）、最小二乘线性回归模型（OLS）、情景分析等方法，对种养结合模式（IPBS）和非种养结合模式（non-IPBS）在原奶生产过程中的温室气体排放、土壤酸化、水体富营养化、能源消耗、水消耗、土地占用等环境绩效进行评估。研究发现，与 non-IPBS 相比，IPBS 在养殖过程中能明显降低温室气体排放（14%）、土壤酸化（10%）、水体富营养化（18%）、能源消耗（10%）、水消耗（8%）和土地占用（13%）等。当我国约有 81%的奶牛场可采用 IPBS 时，奶牛养殖的温室气体排放将比目前减少约 21%。

目前，越来越多的规模化奶牛场和肉牛场正在实行种养一体化养殖模式，内蒙古伊利集团通过种植固碳能力强的紫花苜蓿、燕麦，累计改良 5.5 万亩退化草原，每年可产生 5500 吨的二氧化碳固定增量。内蒙古科左后旗哈拉嘎台嘎查采取统一种植、统一浇水、统一管理的方式，规划集中连片 2400 亩土地，种

植优质牧草，从整地、播种到收割全部采用机械化作业。全年产鲜草 9600 吨，为嘎查肉牛养殖提供优质饲草保障，推动肉牛种养结合模式健康发展。



图 7-9 内蒙古科左后旗哈拉嘎台嘎查肉牛养殖种养结合

7.3.2 中期技术措施

中期来看，筛选和培育具有高生产性能的畜种，实现草原畜牧业转型升级，农区种养结合模式和规模化养殖场清洁养殖模式，在未来可以有效减少非 CO₂ 温室气体排放。

(1) 筛选培育具有高生产性能的畜种

遗传选育被认为是可以提高动物生产力并降低单位动物产品甲烷排放的非常有效的管理策略。通过培育高生产性能的动物，提高动物饲料报酬，可以减少生产相同畜产品的甲烷排放量。如肉羊规模化养殖场可以培育饲养多胎品种，提高单个母羊的产羔率，在生产相同数量羔羊的条件下可以减少繁殖母羊的养殖数量，进而减少繁殖母羊的非 CO₂ 温室气体排放总量。同样，生长速度快，产肉率高的畜禽在生产相同数量畜产品的条件下，整个育肥期的非 CO₂ 温室气体排放总量也会有一定程度的减少。

以肉羊为例，在内蒙古牧区可以培育适合放牧的，对粗饲料利用率高，同时增重较快，产羔率为 150%左右的品种。内蒙古牧区可以培育体型较大，增重快，产羔率为 250%以上的肉用多胎品种。通过品种改良降低单位动物产品甲烷排放量。内蒙古杜美牧业生物科技有限公司通过培育的多胎肉羊，平均产羔率为 260%，且养殖的多胎羊采用两年三产的繁育模式，而北方牧区传统的肉羊养殖是一年一产的模式，养殖的母羊多为单胎羊，一只母羊一年通常只产一只羊羔，同样生产一只羔羊，杜美牧业的多胎羊需要的时间约为传统养殖单胎羊的四分之一，极大提高了生产效率，同时也极大的减少了甲烷产生量。

奶牛方面，内蒙古伊利实业集团股份有限公司在奶牛育种基因组选择、基因编辑生物育种、活体采卵胚胎生产等技术上开展研究，筛选低碳排放基因牛，研究生物育种技术扩繁低碳排放牛群。同时，建设奶牛碳排放育种数据库，通过开展奶牛全基因组数据中甲烷等碳排放量相关的重要基因或分子标记挖掘研究，培育低碳核心牛群并快速扩繁，打造高低碳的“超级奶牛”。



图 7-10 正在培育的杜美多羔羊



图 7-11 杜蒙羊新品种

(2) 草原畜牧业转型和优化管理

合理的放牧管理策略会降低甲烷排放。牧场管理策略包括饲草生长阶段控制、牧场的休牧和饲草恢复、牧草林的管理（制定放牧计划、放牧系统、围场设计、牲畜分布、豆科牧草）、具备放牧管理术语和计算的实用知识；放牧策略包括提高牲畜的活重与年龄的比率、降低畜群的平均年龄、减少畜群中非生产性动物的比例、改变每类牲畜的相对数量等。

在内蒙古草原牧区，按照牧草的产量和营养价值，确定适宜的载畜量，对牧草营养不平衡的地区实行精准放牧补饲的饲养方式，设计针对不同品种、不同阶段的补饲料配方，减少因牧草能蛋不平衡造成的家畜生产性能降低和饲草料资源的浪费。同时在圈舍条件较好的牧区可以饲养多胎品种的肉羊，结合繁殖母羊两年三产技术，可以极大提高母羊的年平均产羔数。指导养殖户做好生产记录，适时淘汰生产力差的繁殖母羊，在精养细养的条件下适当减少繁殖母羊的数量，进而降低畜群的非 CO₂ 温室气体排放总量。



图 7-12 测草补饲



图 7-13 两年三产同期发情

(3) 清洁养殖

清洁养殖主要体现在能源消耗和畜禽废弃物的清洁化处理方面。在能源消耗方面，一是使用清洁能源替代传统燃煤、燃油等燃料，减少非 CO₂ 温室气体排放，以新能源替代发展零碳智慧畜牧业。充分利用牧场棚舍顶，通过铺设光伏组件，有效降低棚舍内夏季温度，减少电费和喷淋用水，减少牧场运营用电量，同时配置沼气发电项目，提供牧场运营的用电量。推行安装空气源热泵，实施余热回收改造，积极引入电动生产车辆，实现新能源车的推广应用，加速能源结构转型。二是圈舍设备更新换代，采用节能减排的新型圈舍和养殖设备，节省能耗，降低非 CO₂ 温室气体排放。三是养殖舍采用热能循环利用设备，减少热能损失，提高能源利用效率。在畜禽废弃物清洁化处理方面，要建立合理的粪便管理措施，促进大中型养殖场的粪污就地无害化处理、资源化利用。高效合理利用粪污处理设施，可减少环境污染，同时减少非 CO₂ 温室气体排放。



图 7-14 牧场棚舍顶铺设光伏组件



图 7-15 牧场运动场铺设光伏组件



图 7-16 阳光蓄热羊舍内部监测系统



图 7-17 阳光蓄热羊舍外观图

7.3.3 长期技术措施

长期来看，可以从政府端，市场端和消费端逐渐引导养殖场（户）和畜禽产品消费者主动减少温室气体的排放。

（1）政府端减少畜牧业温室气体排放

自治区政府可以加强畜牧业全过程污染控制和碳减排的基础研究和应用技术的创新研究，综合运用现代信息技术，加强监测和评估，对非 CO₂ 温室气体排放进行全过程监测，对各环节非 CO₂ 温室气体排放和减排潜力进行科学评估。建立建立畜牧业减排和固碳标准化体系，制定非 CO₂ 温室气体减排监测、核算、评估和核查的方法和技术标准，建立可报告、可衡量、可核查的技术体系，提高非 CO₂ 温室气体排放数据的透明度和可靠性。在此基础上，建立奖励机制激励养殖户降低畜禽的甲烷排放。建立奖励机制有助于养殖户抵消其投入在非 CO₂ 温室气体减排技术上的成本，增加养殖户采纳缓解非 CO₂ 温室气体排放的经营措施，并且有助于激发养殖户提升畜禽的生产性能。

（2）市场端减少畜牧业温室气体排放

从结构因素和降低畜牧业碳排放强度方面考虑，现代化畜牧业低碳化发展应以气候交易所为平台，积极开展农业碳汇交易，鼓励农牧民通过改变牲畜饲养方式和粪便处理形式，形成低碳化的养殖，减少非 CO₂ 温室气体排放。通过碳交易市场及交易机制的建立，通过金融制度和金融产品的创新，将草地畜牧业生产形成的碳减排指标出售给企业获取利润，运用市场化手段实现低碳畜牧业外部性问题的内部化解决，实现低碳畜牧业的直接获利。内蒙古自治区可以尝试以畜牧业碳汇项目形式与碳金融市场对接形成促进碳减排良性循环，以畜

牧业领域的非 CO₂ 温室气体减排弥补非农领域的非 CO₂ 温室气体超量排放，同时获得低碳畜牧业的直接收益。首先，有效利用内蒙古自治区内市场资源，建立碳金融市场体系，为碳金融交易提供场所和平台。其次，发挥以商业银行为主的外部金融主体和合作社的作用，同时鼓励多元化主体参与碳金融业务，建立碳金融组织体系。再次，大力开发畜牧业碳汇资源，打造碳金融产品，形成碳金融产品体系。碳金融产品是碳金融市场发展的载体，在碳金融市场发展中至关重要。可以通过设立碳基金的做法来部分弥补财政资金的不足，为良种、精、青料结合、圈养、粪便处理、节能等技术研发、再生资源的回收利用、发展畜牧业碳汇项目等相关的科学研究推广提供资金支持。最后，建立碳金融政策体系，为碳金融市场的稳定、健康发展提供良好的政策环境。

(3) 消费者端减少畜牧业温室气体排放

大力宣传温室气体排放对环境以及气候变化的影响，增强民众的环保意识，让民众了解温室气体排放和生产畜产品之间的关系，同时制定适宜的措施来减少食物浪费现象，如对消费者在餐馆饭店浪费食物的行为实施惩罚措施，或者对没有发生食物浪费的个人和餐馆饭店实施奖励措施。不仅对我国粮食安全具有重要意义，也对减少反刍动物非 CO₂ 温室气体排放具有重要意义。

7.3.4 内蒙古畜牧业甲烷等温室气体减排路径措施总结

基于内蒙古畜牧业生产链分析，针对不同环节和不同饲养方式，按照目前技术实施效果和在不同阶段的可行性，分阶段提出内蒙古畜牧业温室气体减排路线。

表 7-4 内蒙古畜牧业非 CO₂ 温室气体减排技术路径

技术措施		2025 年	2030 年	2060 年
品种改良	改良遗传性状	改良遗传性状，改善动物健康状况	改良遗传性状，改善动物健康状况	改良遗传性状，改善动物健康状况
	选育和推广高繁快长品种	加快高繁快长品种的选育和推广，提高畜种生产力，降低单位畜种的温室气体排放强度	加快高繁快长品种的选育和推广，提高畜种生产力，降低单位畜种的温室气体排放强度	加快高繁快长品种的选育和推广，提高畜种生产力，降低单位畜种的温室气体排放强度
调控日粮营养	优化日粮饲料原料	改进饲料加工工艺	推广饲喂含甲烷抑制成分的粗饲料、饲喂低甲烷排放的牧草	培育种植低甲烷排放的可饲作物
	调控饲粮营养成分	应用能氮平衡技术、增加日粮 NFC 含量	应用氨基酸平衡技术、应用酶工程营养调控技术	进一步完善营养需要量指标，实现饲料碳源的高效利用

技术措施		2025 年	2030 年	2060 年
	添加甲烷生成抑制剂	推广规模化养殖场使用	使用组合型甲烷生成抑制剂，加大养殖场（户）使用比例	规模化养殖场基本实现甲烷生成抑制剂添加
调控饲养管理	优化规模化养殖场饲养管理技术	应用精准饲养技术、缩短畜禽的繁殖周期、应用种养结合模式	培育饲养高繁快长品种	培育饲养低甲烷排放品种
	草原畜牧业转型升级和优化管理	实行精准放牧补饲、推广两年三产繁育技术、降低畜群的平均年龄、减少畜群中非生产性动物的比例	推广应用更加科学的放牧草场管理策略，提高牧场牧草质量	进一步依据草场资源，改变每类牲畜的相对数量，牧场种植低甲烷排放的牧草
调控粪污处理	粪污减排储存技术	固液粪肥分离、反应器堆肥技术、覆膜堆肥技术、厌氧发酵技术、添加甲烷和氧化亚氮生成抑制剂	推广应用高效沼气工程和有机肥智能发酵技术	规模化养殖场基本具备粪污减排储存能力
	粪污高效利用技术	基质化栽培技术、动物蛋白转化技术、发酵垫料技术	推广草牧肥绿色循环模式	基本实现生态养殖
调控设施设备	使用可再生能源	推广使用电气化设备	加大电气化设备使用比例	规模化养殖场基本实现清洁能源替代传统能源
	使用环保设施设备	推广应用保温圈舍，加大环保建材使用比例	推广应用自动化设备。加大BIPV（光伏建材）使用比例	规模化养殖场基本实现环保设施设备的使用
	建设现代化养殖园区	建设和改造现代化养殖场	建设种养加一体化现代农业产业园	规模化养殖场基本完成现代化养殖园区建设
甲烷收集利用与碳汇	甲烷收集与利用	沼气锅炉作为热源利用	沼气甲烷利用	沼气甲烷深度利用
	碳汇	改进饲羊方式，提高草原质量，增强碳汇能力	持续提升草原质量，增强碳汇能力	持续提升草原质量，增强碳汇能力
	种养结合与碳肥	种养结合	种养结合，二氧化碳施肥	种养结合，二氧化碳施肥

减碳措施		2023年	2025年	2030年	2060年
减排技术	优化日粮饲料原料				
	调控饲料营养成分				
	添加甲烷生成抑制剂				
	应用保温节能圈舍				
	粪污减排储存技术				
	粪污高效利用技术				
	增强农田、草原碳汇功能				
品种培育与应用	饲养高繁快长品种				
	培育低碳家畜品种				
设施设备与管理	使用环保设施设备				
	使用可再生能源				
	规模化养殖场优化管理				
	种养结合、生态养殖				
	畜光互补				
生产方式转型升级	建设现代化养殖园区				
	草原畜牧业转型升级				
	构建零碳排放养殖模式				
	转变畜牧业生产方式				
标准化建设与金融	构建智慧牧场				
	制定低碳牧场标准				
	参与碳排放权交易市场				
宣传推广	减少浪费				
	提高甲烷减排意识				

第八章 内蒙古畜牧业温室气体减排管理策略

8.1 制定完善甲烷等温室气体减排政策法规

针对目前畜牧业甲烷监测标准和方法不完善、统计核算基础数据缺失等现状，建议研究制定畜牧业甲烷、氧化亚氮等温室气体排放的统计核算与规范测算标准，并加强温室气体排放的监测管理。推动建立养殖场甲烷排放核算和报告制度，结合国家和省级农牧业温室气体清单编制工作，逐步实现甲烷排放常态化核算，稳步提升甲烷排放数据质量。研究制定甲烷利用项目温室气体减排量核算方法。研究制订适用于内蒙古寒旱区牛羊养殖及粪污资源化利用甲烷排放控制技术规范、甲烷和恶臭污染物协同控制技术指南。

建议成立由内蒙古自治区农牧厅、生态环境厅等单位组织的畜牧业甲烷减排督导咨询帮扶组。建立畜牧业低碳养殖的门户网站，整合相关畜牧业低碳发展政策、低碳技术资源，建立低碳养殖的信息服务平台，通过建立明确的规章制度来形成一套良好运行的工作体制。

建立完善鼓励畜牧业甲烷等温室气体减排的财税、金融、技术创新机制。形成多元化多层次推动低碳养殖的发展态势。

8.2 优化养殖管理模式顶层规划设计

(1) 优化生态化、规模化的绿色养殖模式

在畜牧业发展规划时，改变牧区原始的管理方式，发展生态化、规模化养殖。一要改变养殖方式，实现由传统的养殖方式向清洁养殖方式转变。实施畜禽养殖场改造、干清粪改建、雨污分流管道改造、优化固体粪便有机肥厂及液体粪污大中型沼气工程或液氧发酵制造液肥等工艺手段，在生态环境污染防治的同时，实现碳减排。二要采取统一饲养标准、统一处理粪便和统一预防各种疫病等措施，结合现代微生物发酵处理技术发展生态发酵床等先进养殖方式，切实改进落后的生产方式，加快畜牧业的规模化、生态化发展。三要加快种养结合、畜光互补、冬季暖舍养殖等新型生态养殖模式，培养专业技术人才，对畜牧业进行转型升级。

(2) 做好粪便处理收集和资源化利用设施建设规划

畜禽粪便排放是温室气体的主要来源之一，利用畜禽粪便发展沼气已成为很多农村的共识。这样做不仅能有效减少农村面源污染，而且以替代薪柴和化石能源为途径的沼气开发，使得二氧化碳排放量大幅度降低。通过在不同区域建设分散收集处理中心，统一收集和处理对养殖场的粪便，以沼气工程为手段，将回收利用的粪便发酵后产生的甲烷转为沼气，它可以替代化石燃料，用作发电和动力的清洁燃料。通过将湿粪改为干粪的方式，不仅能减少污水产生量，还能减少甲烷排放量。通过在粪便上覆盖稻草来改变粪便储存方式，也可以减少甲烷的排放。

(3) 改善饲料质量减少动物甲烷排放

秸秆通过氨化和青贮等措施处理，提高秸秆的消化率，减少单个动物的甲烷排放量。合理搭配动物饲养的粗精度，在不影响动物生产健康的同时，减少单个动物甲烷排放。

(4) 优化畜禽养农和秸秆养畜的农牧结合模式

充分利用畜禽排泄物，制造有机肥，作为种植业的有机肥料，用种植业生产的秸秆作为饲料发展畜禽养殖，实现物种的良性循环。既有效利用了种植业副产品，而且使农产品的加工和服务业得到进一步的发展，还能有效减少温室气体的排放。

8.3 推进畜牧业温室气体减排的技术创新

鼓励科研院所、养殖企业等深入开展畜牧业温室气体减排的技术创新，并建立内蒙古畜牧业甲烷排放控制低碳技术名录，强化技术示范和推广应用。

开展科学遗传选育，健全产学研联合育种机制，实施牛羊遗传改良计划和现代种业提升工程，加快高繁快长品种的推广和应用，提高动物生产力并降低单位动物产品甲烷排放。

科学控制肠道发酵甲烷排放，以畜禽规模养殖场为重点，选育推广高产低排放畜禽品种，推广低蛋白日粮、全株青贮等技术，合理使用基于植物提取物、益生菌等饲料添加剂和多功能营养舔砖，改进畜禽饲养管理，实施精准饲喂，探索高产低排放技术模式，引导降低单位畜产品的肠道甲烷排放。

推进养殖场恶臭污染物与甲烷协同控制，推广畜禽养殖粪污固液分离、合理储存、分质处理、深施还田治理工艺。进一步优化奶牛养殖废水储存、处理和资源化利用方向，制定地方技术规范。改进肉牛和羊的粪污存储及处理设施装备，推广粪污密闭处理、气体收集利用或处理等技术，建立完善粪污资源化利用台账，探索实施畜禽粪污养分平衡管理，提高畜禽粪污处理及资源化利用水平。

深入开展畜牧业甲烷排放特征规律研究，持续开展畜禽资源化利用、高产低排放育种、甲烷监测等关键技术的研发创新，不断完善集成内蒙古畜牧业甲烷排放控制低碳技术名录，强化甲烷排放控制技术示范工程建设，推进低碳技术的集成化和产业化。

8.4 制定畜牧业温室气体减排的市场财税金融政策

控制畜牧业温室气体排放，需要有完善的财税金融政策作为资金保障。优化以命令和控制类为主的行政手段，建立以市场为导向，灵活性政策与约束性政策相结合的畜牧业多样化财政税收配套政策体系。

借鉴国外经验，对畜牧业温室气体排放实施征税，或使其参与碳市场提高畜牧产品市场价格。利用畜牧业温室气体征税手段，激励企业少排放温室气体的同时，鼓励人们适当减少肉食消费，降低肉牛、肉羊的甲烷排放量。充分利用碳排放权交易市场对养殖业温室气体排放进行控制，利用CCER项目获取生态补偿，实现养殖企业的环境效益和经济效益的协同发展。激励牧场使用低碳设备与低碳技术，对养殖场开发、引进的绿色低碳、清洁养殖项目进行资金扶持和税收减免，从融资、落户、财政贴息、税收等方面提供支持，积极扶持一批市场前景好、带动力强、生产效益好，具有示范效应的养殖企业，发挥其辐射效应，形成低碳畜牧业产业集群。

建立奖励机制激励农户降低农场的甲烷排放，奖励机制有助于农户抵消其投入在温室气体减排技术上的成本，促进农户采纳减缓甲烷排放的经营措施，并激发农户提升养殖产能的创造力。

创新完善经济激励政策。推进具有甲烷减排效益的项目纳入生态环境导向的开发项目库。探索研究反刍动物养殖甲烷减排奖补政策。完善温室气体自愿

减排交易机制，支持符合条件的甲烷利用和减排项目开展温室气体自愿减排交易。鼓励甲烷排放控制工程项目开展气候投融资。

8.5 加强畜牧业温室气体减排的宣传培训

加强畜牧业温室气体减排对减缓气候变化积极效应的宣传，意识到甲烷等温室气体主要来自工业、能源活动，畜牧业也是内蒙古甲烷的主要来源之一。通过宣传，增强人们对实施低碳畜牧业生产与低碳畜产品消费的意愿，适当改变膳食结构等消费观点。

在畜产品方面政府倡导推广，养殖企业积极实施，按科学营养及商业模式发展肉类销售，如按蛋白质含量、食物卡路里和温室气体排放量来销售肉类，帮助消费者做出更明智的低碳消费选择，从而减少因食物浪费带来的温室气体排放，使畜种达到最佳生产性能，又不致产生营养物质的浪费，既能节省资源，又能实现废弃物的减排。

从减少养殖数量入手，通过提高繁殖性能、提高成活率、选择优良性能牲畜等措施来提高单产水平，要向牧民分析和宣传碳汇的收益，使其积极配合实施禁牧、休牧、减畜和移民等措施，促进草地生态系统的恢复和草原的可持续发展。提高畜牧业养殖规模化和集约化程度，大力发展内蒙古畜牧业规模养殖、科学养殖、清洁养殖，提高畜牧业温室气体排放效率，推进低碳、清洁的畜牧业发展道路。

第九章 结论

畜牧业温室气体控制是内蒙古绿色转型和高质量发展的重要内容。经过资料收集、现场调研、座谈交流、实证监测，初步得出如下研究结论：

一、内蒙古畜牧业碳排放情况

内蒙古畜牧业养殖数量中 90.7%的畜种是牛和羊，羊的碳排放量最高，二氧化碳排放当量占全区畜牧业碳排放总量的 47%，其次是肉牛，二氧化碳排放当量占比 32%，奶牛占 14%，猪占 4%，骆驼、马、驴、骡等其他大牲畜占 3%。

2021 年内蒙古畜牧业温室气体排放总量中，肠道发酵排放二氧化碳当量占比 81.68%，粪便管理排放二氧化碳当量占比 18.32%。其中粪便管理系统中，折合二氧化碳当量甲烷占 4.41%，氧化亚氮因增温潜势高，折合二氧化碳当量占 13.91%。

二、反刍动物消化道发酵温室气体特征

畜牧业产生的非二氧化碳分别来源于动物消化道发酵以及粪污处理。消化道发酵产生的温室气体以 CH_4 为主，受养殖模式（放牧 vs 舍饲）、生理阶段（育肥、妊娠、泌乳）、饲粮组成（精粗比、碳水化合物结果）以及宿主因素的影响，目前调控消化道 CH_4 产生的最有效方式是使用饲料添加剂，以植物提取物和微生物制剂为主，也有人工合成物，需根据不同的养殖模式和成本控制等情况综述选择适宜的添加剂。

粪污发酵产生的温室气体以 CH_4 和 N_2O ，受粪污处理方式以及动物因素（饲粮组成、品种）等双重影响，影响粪污中 N_2O 和 CH_4 的代谢条件不同，需要根据实际条件采取适应的减排措施。

三、养殖场减污降碳协同效应及措施

（1）畜禽粪污所导致的温室气体排放量主要取决于粪便产生气体的潜力、粪便的处理方式和气候条件，受饲养规模和方式、养殖环境、清粪方式、堆肥模式等粪污处理工艺的影响。

（2）内蒙古几种牲畜中，牛的个体碳排放因子最大，一头牛的粪便可排放甲烷 7kg，一只绵羊的粪便可排放甲烷 0.17kg；养殖规模化程度越高，碳排放水平越低，发酵床、高位床等养殖方式温室气体排放较传统养殖舍内减少 20% 以上；粪便暂存环境温度升高（超过 15°C ），臭气和 CH_4 排放量均会增加；环

境的氧气含量充足，粪便水分含量较少时，氧化亚氮的产生增多，甲烷的排放降低；通风会降低温室气体的排放量；粪便以液体形态储存时温室气体和臭气排放速率大于固体形态的粪便；舍内垫料对温室气体的影响研究结论不同；表面覆盖可减少液态粪便 30%以上的 CH₄ 排放量；粪便暂存添加硝化抑制剂可对二氧化碳、甲烷和氨气产生明显的抑制作用，降低效果分别在 12%、3%、20%以上。

(3) 粪污处理工艺模式不同，甲烷等产生量不同。机械刮板清粪等干清粪和固液分离可有效减少 CH₄ 和臭气的排放；固液分离和厌氧消化的组合方式可减排温室气体 40%左右；粪便厌氧条件下存储 N₂O 排放量远低于直接储存和放牧排放，奶牛粪水液体贮存的方式全部更改为厌氧沼气处理后，污染物可减排 20%以上；好氧堆肥的温室气体排放量远低于自然堆放；翻抛可减少 CH₄ 等温室气体排放，牛粪翻堆堆肥可实现 CH₄ 减排 71%，N₂O 减排约 49%；堆肥中添加外源性物质、菌剂可减少温室气体排放至少 10%；粪便堆肥后实现种养结合模式还田可实现氨减排 60%以上。

(4) 对奶牛粪便堆肥车间空气中温室气体和氨气监测后预测，氨气、甲烷存在关系： $y = -0.3123x + 7.0319$ 。氨气浓度随着空气温度的升高而有所增加，随空气湿度的增加而降低。

(5) 提出牧场减污降碳协同措施：

舍内粪便干法清理：机械刮板清粪。厂内实现雨污分流。

粪污储存：粪污混合储存池，防渗，遮盖，并适当喷洒臭气抑制剂。

粪污处理工艺：奶牛采用“固液分离+固体发酵堆肥+液肥还田”、“固液分离+沼气发电+沼渣垫料+沼液还田”，其中粪便堆肥可推广智能一体化堆肥方式。肉牛粪污处理方式采用：粪污收集+堆肥+垫料和还田。羊的粪污处理方式采用：粪便收集+堆肥+还田。

四、内蒙古畜牧业温室气体减排路径措施

从品种改良、调控日粮营养、调控饲养管理、调控粪污处理、调控设施设备、甲烷收集利用与碳汇六个方面，提出改良遗传性状、选育和推广高繁快长品种、优化日粮饲料原料、调控饲粮营养成分、添加甲烷生成抑制剂、优化养殖场饲养管理技术、草原畜牧业转型升级和优化管理、粪污减排储存技术、粪污高效利用技术、使用可再生能源、使用环保设施设备、建设绿色低碳养殖园区、甲烷收集与利用、碳汇、种养结合与碳肥的 **15 条畜牧业低碳技术路径措施**。

五、推动内蒙古畜牧业温室气体减排的政策建议

一是畜牧业行业深入实施甲烷减排行动，完善政策建议；二是技术创新，实现 CCU、CCUS 技术深度减排；三是顶层规划，优化结构布局；四是完善绿色金融，支持深度脱碳；五是加大宣传，扩大影响。

参考文献

1. Abecia L ,Toral P ,Martín-García A , et al. Effect of bromochloromethane on methane emission, rumen fermentation pattern, milk yield, and fatty acid profile in lactating dairy goats[J].Journal of Dairy Science,2012,95(4):2027-2036.
2. Åby B A, Randby Å T, Bonesmo H, Aass L . Impact of grass silage quality on greenhouse gas emissions from dairy and beef production[J]. Grass and Forage Science,2019,74(3):525–534.
3. Aguirre-Villegas H, Larson R. Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools[J].Journal of Cleaner Production,2017,143(2):169-179
4. Agyarko-Mintah E, Cowie A, Van Zwieten L, Singh B P, Smillie R, Harden S, Fornasier F . Biochar lowers ammonia emission and improves nitrogen retention in poultry litter composting[J].Waste Management,2017,61:129–137
5. Ahn H K, Mulbry W, White J W, et al. Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting of dairy manure[J]. Bioresour Technol,2011,102(3):2904-2909.
6. Appuhamy JADR, France J, Kebreab E. Models for predicting enteric methane emissions from dairy cows in North America, Europe, and Australia and New Zealand[J].Global Change Biology,2016 22(9):3039-3056.
7. Arthur P F, Barchia I M, Weber C, et al. Optimizing test procedures for estimating daily methane and carbon dioxide emissions in cattle using short-term breath measures[J].Journal of Animal Science,2017,95(2):645-656.
8. Aubry A, Yan T. Meta-analysis of calorimeter data to establish relationships between methane and carbon dioxide emissions or oxygen consumption for dairy cattle [J].Animal Nutrition,2015,1(3):128-134.
9. Boadi D A, Wittenberg K M. Methane production from dairy and beef heifers fed forages differing in nutrient density using the sulphur hexafluoride (SF6) tracer gas technique[J].Canadian Journal of Animal Science,2002,82(2):201-206.
10. Bodirsky B L, PoppA, Weind I, et al. N₂O emissions from the global agricultural nitrogen cycle-current state and future scenarios[J].Biogeosciences,2012,9:4169-4197.
11. Brask M, Lund P, Weisbjerg M R, et al. Methane production and digestion of different

- physical forms of rapeseed as fat supplements in dairy cows[J].*Journal of Dairy Science*,2013,96(4):2356-2365.
12. Cao Y, Yang X, Yang F, et al. Analysis of greenhouse gas emissions characteristics and emissions reduction measures of animal husbandry in Inner Mongolia[J].*Processes*,2023,11:2335.
 13. Capper J L, Cady R A, Bauman D E. Dairy's environmental impact then and now[J].*Hoard's Dairyman*,2009(15):154.
 14. Cardena A , Ammon C , Schumacher B , et al. Methane emissions from the storage of liquid dairy manure: influences of season, temperature and storage duration[J].*Waste Management*,2021,121(2):393-402.
 15. CCAC, UNEP. Global Methane Assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions[R]. 2021.
 16. Chagunda M G G,Ross D ,Rooke J , et al.Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector[J].*Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science*,2013,63(2):68-75.
 17. Chagunda M G G. Opportunities and challenges in the use of the laser methane detector to monitor enteric methane emissions from ruminants [J].*Animal*,2013,7:394-400.
 18. Charmley E, Williams SRO, Moate PJ, et al. A universal equation to predict methane production of forage-fed cattle in Australia[J].*Animal Production Science*,2016, 56(3):169.
 19. Chowdhury M A, de Neergaard A, Jensen L S . Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting. *Chemosphere*, 2014, 97: 16–25
 20. Cottle D J, Nolan J V, Wiedemann S G. Ruminant enteric methane mitigation: a review [J].*Animal Production Science*,2011,51(6):491-514.
 21. Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions[J].*Nature Food*,2021,2(3):198–209
 22. Dangal S RS, Tian H, Zhang B, et, al. Methane emission from global livestock sector during 1890–2014: Magnitude, trends and spatiotemporal patterns[J].*Global Change Biology*,2017,23(10).
 23. Davidson E A, Semrau J D, Nguyen N K, et al. Improved scientific knowledge of methanogenesis and methanotrophy needed to slow climate change during the next 30

- years[J]. *mBio*,2023;14(5):e0205923.
24. Dengel S, Levy P E, Grace J, et. al. Methane emissions from sheep pasture, measured with an open path eddy covariance system [J].*Global Change Biology*,2011,17(12):3524-3533.
 25. Dillon JA, Stackhouse-Lawson KR, Thoma GJ, et al. Current state of enteric methane and the carbon footprint of beef and dairy cattle in the United States[J].*Animal Frontiers*,2021,11(4):57-68.
 26. Ding X Z, Long R J, Zhang Q, et al. Reducing methane emissions and the methanogen population in the rumen of Tibetan sheep by dietary supplementation with coconut oil[J].*Tropical Animal Health and Production*,2012,44(7):1541-1545.
 27. Dini Y, Gere J, Briano C, et. al. Methane Emission and Milk Production of Dairy Cows Grazing Pastures Rich in Legumes or Rich in Grasses in Uruguay [J].*Animals*,2012,2(2):288-300.
 28. DINI Y,GERE J,BRIANO C,et al.Methane emission and milk production of dairy cows grazing pastures rich in legumes or rich in grasses in uruguay[J].*Animals*,2012,2(2):288-300.
 29. Doreau M, Arbre M, Rochette Y, et al. Comparison of 3 methods for estimating enteric methane and carbon dioxide emission in nonlactating cows[J].*Journal of Animal Science*.2018,96(4):1559-1569.
 30. Dorich C D, Varner R K, Pereira A B D, et al. Short communication:use of a portable, automated, open-circuit gas quantification system and the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions in Holstein cows fed ad libitum or restricted [J].*Journal of Dairy Science*,2015,98(4):2676-2681.
 31. Doyle N, Mbandlwa P, Kelly W J, et. al. Use of Lactic Acid Bacteria to Reduce Methane Production in Ruminants, a Critical Review[J].*Frontiers in Microbiology*,2019,10:1-13.
 32. Fan Y, Fang C. GHG emissions and energy consumption of residential buildings-a systematic review and meta-analysis[J].*Environ Monit Assess*,2023,26:195(7):885.
 33. Fernández C, Hernando I, Moreno-Latorre E, et al. Development of a dynamic energypartitioning model for enteric methane emissions and milk production in goats using energy balance data from indirect calorimetry studies[J].*Animal*,2020,14:s382-s395.
 34. Ferry J G. Enzymology of one-carbon metabolism in methanogenic pathways [J].*FEMS Microbiol Rev*,1999,23(1):13-38.
 35. Flesch T, Wilson J D, Harper L A, et. al. Deducing ground-to-gir emissions from observed

- trace gas concentrations:A field trial[J].*Journal of Applied Meteorology*,2004,43(3):487-502.
36. Foley P A, Kenny D A, Callan J J, et al. Effect of DL-malic acid supplementation on feed intake, methane emission, and rumen fermentation in beef cattle[J].*Journal of Animal Science*,2009,87(3):1048-1057.
 37. Frank O, G K R, Laurence S, et al. Sustainability of ruminant livestock production in Ireland[J].*Animal Frontiers*,2021,11(4):32-43.
 38. Fukumoto Y, Suzuki K, Kuroda K, Waki M, Yasuda T . Effects of struvite formation and nitrification promotion on nitrogenous emissions such as NH₃, N₂O and NO during swine manure composting[J].*Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 1468–1474.
 39. Gagen E J, Denman S E, Padmanabha J, et al. Functional gene analysis suggests different acetogen populations in the bovine rumen and tammar wallaby forestomach[J].*Applied and Environmental Microbiology*,2010,76(23):7785-7795.
 40. Garnett E J. Evaluation of the GreenFeed system for methane estimation from grazing dairy cows [D].Palmerston North:Massey University,2012.
 41. Garnsworthy P C, Craigmiles J, Hernandez-Medrano J H, et, al. On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows[J].*Journal of Dairy Science*,2012, 95(6):3166-3180.
 42. Gerber P J, Hristov A N, Henderson B, et, al. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock:a review[J].*Animal*,2013,7(s2):220-234.
 43. Goopy JP, Donaldson A, Hegarty R, et al. Low-methane yield sheep have smaller rumens and shorter rumen retention time[J].*British Journal of Nutrition*,2014,111(4):578-585.
 44. Grainger C, Clarke T, McGinn SM, et al. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer and chamber techniques[J].*Journal of Dairy Science*,2007,90(6):2755-2766.
 45. Grainger C, Beauchemin K A. Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production?[J].*Animal Feed Science and Technology*,2011,166-177: 308-320.
 46. Groenestein K, Mosquera J, Van der Sluis S. Emission factors for methane and nitrous oxide from manure management and mitigation options[J].*Journal of Integrative Environmental Sciences*,2012,9(suppl. 1):139–146
 47. Guglielmelli A, Calabr S, Primi R, et al. In vitro fermentation patterns and methane

- production of sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) hay with different condensed tannin contents[J].*Grass and Forage Science*,2011,66(4):488-500.
48. Haisan J, Sun Y, Beauchemin K, et al. Effects of feeding 3-nitrooxypropanol, at varying levels, on methane emissions and rumen fermentation in lactating dairy cows[J].*Advances in Animal Biosciences*,2013,4:326.
 49. Hammond K J, Crompton L A, Bannink A, et al. Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants[J].*Animal Feed Science and Technology*,2016,219:13-30.
 50. Hammond K J, Humphries D J, Crompton L A, et al. Methane emissions from cattle: estimates from short-term measurements using a GreenFeed system compared with measurements obtained using respiration chambers or sulphur hexafluoride tracer[J].*Animal Feed Science and Technology*,2015,203:41-52.
 51. Hammond K J, Jones A K, Humphries D J, et al. Effects of diet forage source and neutral detergent fiber content on milk production of dairy cattle and methane emissions determined using GreenFeed and respiration chamber techniques[J].*Journal of Dairy Science*,2016,99(10):7904-7917.
 52. Haque M N, Hansen H H, Storm I M L D, et al. Comparative methane estimation from cattle based on total CO₂ production using different techniques[J].*Animal Nutrition*,2017,3(2):175-179.
 53. He J D, Cao D Q, Duan X N, Zhao T, Li Q F, Xiao Y, Liu Z M, Chen H S, Ding C B. Give full play to national strategic S&T force to provide vigorous support for carbon peak and carbon neutrality goals[J].*Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,2022,37(4):415–422
 54. Hellwing A L F, Lund P, Weisbjerg M R, et al. Technical note: test of a low-cost and animal-friendly system for measuring methane emissions from dairy cows[J].*Journal of Dairy Science*,2012,95(10):6077-6085.
 55. Herrero M, Henderson B, Havlík P, et al. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector[J].*Nature Climate Change*,2016,6:452-461.
 56. Hertwich E, Edenhofer O. Turning point for Europe's switch to low carbon[J].*Nature*,2023,615(7952):394.
 57. Hitaj C, Rehkamp S, Canning P, Peters CJ. Greenhouse Gas Emissions in the United States Food System: Current and Healthy Diet Scenarios[J].*Environmental Science &*

- Technology,2019,53(9):5493-5503.
58. Hoda K ,Y W V T ,Helen B , et al. Quantifying the effects of general waste reduction on greenhouse-gas emissions at public facilities[J].Journal of the Air Waste Management Association (1995),2019,69(10):1247-1257.
 59. Hristov A N, Harper M, Meinen R, et al. Discrepancies and uncertainties in bottom-up gridded inventories of livestock methane emissions for the contiguous united states[J].Environmental Science and Technology,2017,51(23):13668-13677.
 60. Hristov A N, Kebreab E, Niu M, et al. Symposium review:uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models[J].Journal of Dairy Science,2018,101(7):6655-6674.
 61. Hristov A N, Oh J, Giallongo F, et al. Short communication: comparison of the GreenFeed system with the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions from dairy cows [J].Journal of Dairy Science,2016,99(7):5461-5465.
 62. Hristov A N, Kebreab E, Niu M, et al. Symposium review: uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models[J].Journal of Dairy Science,2018,101(7):6655-6674.
 63. Hristov A N, Oh J, Giallongo F, et al. An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production [J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2015,112(34):10663-10668.
 64. Hristov A N, Ott T, Tricarico J, et al. Special topics—mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. a review of animal management mitigation options 1[J].Journal of animal science,2013,91(11):5095-5113.
 65. Huhtanen P, Cabezas-Garcia E H, Utsumi S, et al. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions[J].Journal of Dairy Science,2015,98(5):3394-3409.
 66. Huhtanen P, Ramin M, Hristov AN. Enteric methane emission can be reliably measured by the GreenFeed monitoring unit[J].Livestock Science,2019,222:31-40.
 67. Huyen L T N, Do H Q, Preston T R, et al. Nitrate as fermentable nitrogen supplement to reduce rumen methane production[J].Livestock Research for Rural Development,2010,22(8).
 68. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks:1990-2021[R].National Environmental Protection Agency,2021:2-3.

69. Janssen P H, Kirs M. Structure of the archaeal community of the rumen [J].*Applied and Environmental Microbiology*,2008,74(12):3619-3625.
- Jayasundara S, Ranga Niroshan Appuhamy J A D, Kebreab E, et al. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian dairy farms and mitigation options:an updated review [J].*Canadian Journal of Animal Science*,2016,96(3):306-331.
70. Jin S H, Min J K, Gyun D Y, et al. Impact of livestock industry on climate change :Case Study in South Korea.[J].*Animal bioscience*,2023.
71. Johnson K A, Johnson D E. Methane emissions from cattle [J].*Journal of Animal Science*,1995,73(8):2483-92.
- Johnson K, Huyler M, Westberg H, et, al. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique[J].*Environmental Science and Technology*,1994,28(2):359.
72. Jonker A, Hickey SM, Rowe SJ, et al. Genetic parameters of methane emissions determined using portable accumulation chambers in lambs and ewes grazing pasture and genetic correlations with emissions determined in respiration chambers[J].*Journal of Animal Science*,2018,96(8):3031-3042.
73. Judd M J, Kellier F M, et, al. Net methane emissions from grazing sheep [J].*Global Change Biology*,2010,5(6):647-657.
74. Kashyap D R, Dadhich K S, Sharma S K. Biomethanation under psychrophilic conditions: a review[J].*Bioresource Technology*,2003,87(2):147-153.
75. Knapp JR, Laur GL, Vadas PA, et al. Invited review:enteric methane in dairy cattle production:quantifying the opportunities and impact of reducing emissions[J].*Journal of Dairy Science*,2014,97(6):3231-3261.
76. Krause D O, Nagaraja T G, Wright A D G, et, al. Board-invited review:Rumen microbiology: leading the way in microbial ecology [J].*Journal of Animal Science*, 2013,91(1):331-341.
- Kristensen T, Mogensen L, Knudsen M T, et, al. Effect of production system and farming strategy on greenhouse gas emissions from commercial dairy farms in a life cycle approach [J].*Livestock Science*,2011,140(1-3):136-148.
77. Kroeze C, Mosier A, Nevison C, et, al. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories :Chapter 4. Agriculture.[J].*Australian Journal of Experimental Agriculture*,1997,46(10):1257-1262.

78. Li C S. Modeling trace gas emission from agricultural ecosystems[J].*Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2000,58:259-276.
79. Luo T ,Yue Q ,Yan M , et al. Carbon footprint of China's livestock system – a case study of farm survey in Sichuan province, China[J].*Journal of Cleaner Production*,2015,102:136-143.
80. Lyons N A, Kerrisk K L, Garcia S C. Milking frequency management in pasture-based automatic milking systems:a review[J].*Livestock Science*,2014,159:102-116.
81. Machmüller A, Hegarty R S. Alternative tracer gases for the ERUCT technique to estimate methane emission from grazing animals[J].*International Congress*,2006,1293(none):50-53.
82. Madsen J, Bjerg B S, Hvelplund T, et al. Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants[J].*Livestock Science*,2010,129(1-3):223-227.
83. Martin C, Morgavi D P, Doreau M. Methane mitigation in ruminants:from microbe to the farm scale[J].*Animal An International Journal of Animal Bioscience*,2010,4(3):351-365.
84. Masaki S, Fuminori T. Factors affecting methane production and mitigation in ruminants [J].*Animal Science Journal*,2010,81(1):2-10.
85. Mateos I, Ranilla J M, Tejido M L, et al. The influence of diet on the effectiveness of garlic oil and cinnamaldehyde to manipulate in vitro ruminal fermentation and methane production[J]. *Animal Production Science*,2013,53(4):299-307.
86. McCartney C A, Dewhurst R J, Bull I D. Changes in the ratio of tetraether to diether lipids in cattle feces in response to altered dietary ratio of grass silage and concentrates[J].*Journal of Animal Science*,2014,92(9):4095-4098.
McGinn S M, Flesch T K, Coates T W, et, al. Evaluating dispersion modeling options to estimate methane emissions from grazing beef cattle[J].*Journal of Environmental Quality*,2015,44(1):97-102.
87. Miller J, Schneider D, Holzwart M, et al. Grazing behaviour of cattle in rangeland grazing system with or without access to a GreenFeed emission monitor[J].*Recent Advance in Animal Nutrition Australia:Abstracts of Invited Papers and Posters*,2015,63–64.
88. Mills JAN, Kebreab E, Yates CM, et al. Alternative approaches to predicting methane emissions from dairy cows[J].*Journal of animal science*.2003,81(12):3141-3150.
89. Moate P J, Williams S R O, Deighton M H, et al. Influence of rumen cannulation on feed intake, milk production, enteric methane production and composition of rumen headspace gas

- [J].Advances in Animal Bioscience,2013,4:423.
90. Moe P W, Tyrrell H F. Methane Production in Dairy Cows[J].Journal of Dairy Science,1979,62(10):1583-1586.
 91. Monteny G J, Groenestein C M, Hilhors M A. Interactions and coupling between emissions of methane and nitrous oxide[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2001,60(1/3):123-132.
 92. Moraes L E, Strathe A B, Fadel J G, et al. Prediction of enteric methane emissions from cattle[J].Global Change Biology,2014,20(7):2140-2148.
 93. Moss R A ,Jouany P J ,Newbold J .Methane production by ruminants: its contribution to global warming[J].Annales de Zootechnie,2000,49(3):231-253.
 94. Muñoz C, Yan T, Wills D A, et al. Comparison of the sulfur hexafluoride tracer and respiration chamber techniques for estimating methane emissions and correction for rectum methane output from dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2012,95(6):3139-3148.
 95. Murray R M, Bryant A M, Leng R A. Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep[J].British Journal of Nutrition,1976,36(1):1-14.
 96. Niu M, Kebreab E, Hristov AN, et al. Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database[J].Global Change Biology,2018,24(8):3368–3389.
 97. Nolan J V, Hegarty E R S, Hegarty J, et al. Effects of dietary nitrate on fermentation, methane production and digesta kinetics in sheep[J].Animal Production Science,2010,50(8):801-806.
 98. Oh J, Harper M, Melgar A, et al. Effects of *Saccharomyces cerevisiae*-based direct-fed microbial and exogenous enzyme products on enteric methane emission and productivity in lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2019,102(7):6065-6075.
 99. Ornelas L T C, Silva D C, Tomich T R, et al. Differences in methane production, yield and intensity and its effects on metabolism of dairy heifers [J].Science of The Total Environment,2019,689:1133-1140.
 100. Patra A K, Yu Z T. Effects of essential oils on methane production and fermentation by, and abundance and diversity of, rumen microbial populations[J].Applied and Environmental Microbiology,2012,78(12):4271-4280.
 101. Pinares-Patiño C S, Lassey K R, Martin R J, et al. Assessment of the sulphur hexafluoride (SF₆) tracer technique using respiration chambers for estimation of methane emissions from sheep[J].Fuel & Energy Abstracts,2011,166(166):201-209.

102. Poulsen M, Schwab C, Jensen B B, et al. Erratum: Methylophilic methanogenic Thermoplasmata implicated in reduced methane emissions from bovine rumen[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(2): 66-78.
103. Ricci P, Chagunda M G G, Rooke J, et al. Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers[J]. *Journal of animal science*, 2014, 92(11): 5239-5250.
104. Richmond A S, Wylie A R G, Laidlaw A S, Lively F O. Methane emissions from beef cattle grazing on semi-natural upland and improved lowland grasslands[J]. *Animal*, 2014, 9(1): 130-137.
105. Sachdeva B, Puri S, Aeri BT. Environmental imprints of agricultural and livestock produce: A scoping review from South Asian countries[J]. *J Hum Nutr Diet*, 2023, 36(6): 2157-2169.
106. Sari NF, Ray P, Rymer C, et al. Garlic and Its Bioactive Compounds: Implications for Methane Emissions and Ruminant Nutrition[J]. *Animals (Basel)*, 2022, 12(21): 2998.
107. Sauvant D, Giger-Reverdin S. Modélisation des interactions digestives et de la production de méthane chez les ruminants[J]. *INRA Productions Animales*, 2009(5).
108. Shin S R, Im S, Mostafa A, et al. Effects of pig slurry acidification on methane emissions during storage and subsequent biogas production. *Water Research*, 2019, 152: 234–240
109. Sommer S G, Petersen S O, Sogaard H T. Greenhouse gas emission from stored livestock slurry[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 744-751.
110. Storm I M L D, Hellwing A L F, Nielsen N I J, et al. Methods for Measuring and Estimating Methane Emission from Ruminants[J]. *Animals*, 2012, 2(2): 160-183.
111. Thauer R K, Kaster A K, Goenrich M, et al. Hydrogenases from methanogenic archaea, nickel, a novel cofactor, and H₂ storage [J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2010, 79(1): 507-536.
112. Tiemann T T, Lascano C E, Kreuzer M, et al. The ruminal degradability of fibre explains part of the low nutritional value and reduced methanogenesis in highly tanniferous tropical legumes[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88(10): 1794 -1803.
113. Van Engelen S, Bovenhuis H, Van der Tol PPJ, et al. Genetic background of methane emission by Dutch Holstein Friesian cows measured with infrared sensors in automatic milking systems[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(3): 2226-2234.
114. Van Lingen H J, Crompton L A, Hendriks W H, et al. Meta-analysis of relationships between enteric methane yield and milk fatty acid profile in dairy cattle[J]. *Journal of Dairy*

- Science,2014,97(11):7115-7132.
115. Wackett L, Ma J. Methanogenesis spathway map[OL].[http:// umbbd. msi. umn. edu/ meth/ meth map. html](http://umbbd.msi.umn.edu/meth/methmap.html), 2006.
 116. Waghorn G, Garnett E J , Pinares-Patino C S, et al. Implementation of GreenFeed in a dairy herd grazing pasture[C]//Advances in Animal Biosciences, Proceeding of the 5th Greenhouse Gases and Animal Agriculture Conference (GGAA2013). Dublin:Greenhouse Gasesand and Animal Agriculture Conference, 2013.
 117. Wang D T, Gruen D S, Barbara Sherwood L, et, al. Methane cycling. Nonequilibrium clumped isotope signals in microbial methane [J].Science,2015,348(6233):428.
 118. Wang Y, Dong H, Zhu Z, et al. Mitigating greenhouse gas and ammonia emissions from swine manure management: a system analysis. Environmental Science & Technology, 2017, 51(8): 4503–4511.
 119. Wang Y, Dong H, Zhu Z, et al. CH₄, NH₃, N₂O and NO emissions from stored biogas digester effluent of pig manure at different temperatures. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 217: 1–12.
 120. Wood T A, Wallace J,Rowe A, et al. Encapsulated fumaric acid as a feed ingredient to decrease ruminal methane emissions[J].Animal Feed Science and Technology,2009,152(1/2):62-71.
 121. Wu L, Koerkamp P W G G, Ogink N. Uncertainty assessment of the breath methane concentration method to determine methane production of dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2018,101(2):1554-1564.
 122. Xu P, Liao Y, Zheng Y, et al. Northward shift of historical methane emission hotspots from the livestock sector in China and assessment of potential mitigation options[J].Agricultural and Forest Meteorology,2019,272-273.
 123. Xu X, Sharma P, Shu S, et al. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods[J].Nature Food,2021,2(9):724–732.
 124. Yang S, Anthony SE, Jenrich M, et al. Microbial methane cycling in sediments of Arctic thermokarst lagoons[J].Global Change Biology,2023,29(10):2714-2731.
 125. Zhou X,Meile L,Kreuzer M, et al. The effect of lauric acid on methane production and cell viability of methanobrevibacter ruminantium[J].Advances in Animal Biosciences,2013,4(2):458.

126. Zixuan L, Mahmood A, Guojing L, et al. Decoupling of greenhouse gas emissions from livestock industrial development: Evidence from China Agricultural Green Development Modern Zone[J].Frontiers in Environmental Science,2022,10.
127. 陈丹丹,刁其玉,姜成钢等.反刍动物甲烷的产生机理和减排技术研究进展[J].中国草食动物科学,2012,32(04):66-69.
128. 陈丹丹.四种植物提取物对肉羊甲烷排放、物质代谢及瘤胃微生物区系的影响[D].新疆农业大学,2014.
129. 陈木兰. 内蒙古双峰驼甲烷产生量的测定及其影响因素的研究[D].内蒙古农业大学,2010.
130. 陈锐,陈育涛,王祖力等.低碳背景下我国反刍动物甲烷排放现状与减排策略研究[J].畜牧产业,2022,(08):37-39.
131. 程露曦. 通过畜禽养殖优化管理实现耕地节约、温室气体减排与环境保护[D].浙江大学,2022.
132. 崔安.不同精粗比日粮对舍饲秦川肉牛甲烷产量和瘤胃发酵的影响[D].西北农林科技大学,2016.
133. 崔璨,杜蒙 F1 杂交肉用绵羊妊娠期与哺乳期能量和蛋白质需要量的研究[D].内蒙古农业大学,2017.
134. 淡瑞芳,张海涛,龙瑞军等.藏系绵羊瘤胃细菌数量及其放牧地牧草养分随季节变化的研究[J].草业学报,2009,18(1):100-104.
135. 翟耶秋,张芊芊,刘芳等.我国畜禽养殖业碳排放研究进展[J].华南师范大学学报(自然科学版),2022,54(3):72-82.
136. 刁其玉,贾鹏.反刍动物甲烷减排措施研究进展[J].广东畜牧兽医科技,2023,48(4):1-6.
137. 刁其玉.反刍动物甲烷生成与营养调控减排措施[J].畜牧产业,2023,(01):39-43.
138. 刁其玉.反刍动物温室气体排放量化及减排措施研究进展[J].中国农业科学技术出版社,2021.
139. 丁丹.牛羊混合放牧对内蒙古荒漠草原温室气体通量的影响[D].内蒙古农业大学,2015.
140. 董春晓,郭晓飞,李义海等.植物精油调控反刍动物瘤胃发酵和甲烷排放的研究进展[J].家畜生态学报,2022,43(01):8-15.
141. 董红敏,康国虎,朱志平等.垫料型猪舍和传统猪舍 NH_3 、 CO_2 、 CH_4 浓度变化对比分析[J].发展低碳农业应对气候变化——低碳农业研讨会论文集,2010,33-39
142. 董利锋,付敏,陈天宝等.反刍动物瘤胃优势产甲烷菌菌群结构及多样性研究进展[J].动物营养学报,2019,31(9):3927-3935.

143. 董利锋,李斌昌,王贝等.饲料非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维对 12 月龄荷斯坦后备奶牛生长性能、营养物质表观消化率及瘤胃甲烷产量的影响[J].动物营养学报,2020,32(08):3688-3697.
144. 冯仰廉.反刍动物营养学[M].北京:科学出版社.2004.
145. 高孕,石红梅,刘汉丽等.益生菌对反刍动物生产及降低甲烷排放的研究进展[J].中国牛业科学,2022,48(02):67-72.
146. 高娇,杨雅静,蒋彬等.畜牧养殖业温室气体排放特征与减排路径[J].农业工程,2022,12(S1):52-54.
147. 顾沈怡,戴海洋,郭凡婧等.微生物和化学添加剂对畜禽粪便堆肥过程活性氮气体的减排研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(8):1010-1018.
148. 郭海宁,李建辉,马晗等.不同养猪模式的温室气体排放研究[J].农业环境科学学报,2014,33(12):2457-2462.
149. 郭鹏辉.高寒牧区藏绵羊消化代谢与肠道甲烷排放特征[D].兰州大学,2020.
150. 郭旭东,周迪,李永宏.内蒙古草原温室气体净排放量及影响因子[C]//中国草学会.2017 中国草学会年会论文集.内蒙古大学生态与环境学院,;2017:6.
151. 郭雪峰.内蒙古白绒山羊甲烷产生量估测模型的建立及其影响因素的研究[D].内蒙古农业大学,2008.
152. 郭雅琴,虞建华.反刍动物甲烷排放机制及减排措施的研究与进展[J].饲料与畜牧,2013(11):16-19.
153. 候良忠.不同季节泌乳奶牛舍排风扇外侧四种吸附剂吸附 CO₂、CH₄、NH₃ 和 H₂S 的探究[D].新疆农业大学,2017.
154. 胡婉玲,黄玛兰,王红玲.低碳背景下畜牧业甲烷排放现状与减排策略研究[J].华中农业大学学报(自然科学版),2022,41(03):115-123.
155. 黄江丽,王东升,张志红等.体外产气法研究植物精油对水牛瘤胃发酵和甲烷生成的影响[J].江西科学,2014,32(3):328-331,337.
156. 黄耀.中国的温室气体排放、减排措施与对策[J].第四纪研究,2006(05):722-732.
157. 贾鹏.荷斯坦泌乳牛的甲烷排放特征及减排调控的机制研究[D].兰州大学,2023.
158. 菅瑞珍,贾生美,邢明勋等.畜牧业温室气体的排放源及减排措施[J].当代畜禽养殖业,2022(06):62-64.
159. 黎学琴,马文林,邓柏林等.低蛋白日粮对规模猪场温室气体减排效果研究[J].家畜生态学报,2014,35(06):69-75.

160. 李斌昌,董利锋,成述儒等.不同精粗比日粮对反刍动物甲烷排放的调控[J].家畜生态学报,2019,40(01):1-6.
161. 李斌昌,董利锋,王贝等.日粮不同精粗比对 9 月龄后备奶牛甲烷排放与生长性能及营养物质消化率的影响[J].饲料工业.2019,40(11):12-18.
162. 李斌昌.日粮精粗比对不同月龄后备奶牛甲烷排放与生长性能和营养物质消化的影响[D].甘肃农业大学,2019.
163. 李华伟.放牧条件下内蒙古白绒山羊甲烷排放量的测定[D].内蒙古农业大学,2008.
164. 李丽莲,董红梅,朱正平等.酸化对生猪粪浆和沼液贮存过程中气体排放的影响.农业环境科学学报, 2016, 35(04): 774-784
165. 李路路.粪污存储过程中温室气体和氨气排放特征与减排研究[D].中国农业科学院,2016.
166. 李霞.体外法建立内蒙古双峰驼甲烷排放量的预测模型及甲烷排放抑制措施的研究[D].内蒙古农业大学,2007.
167. 李洪孜.粪便管理对露天奶牛场下垫面甲烷和 N_2O 排放影响的模拟研究[D],河北农业大学,硕士毕业论文,2014.
168. 李志才, 姜竹会, 齐文娟.奶牛养殖碳减排与粪污资源利用技术措施[J].中国乳业,2023,07(259):70-75.
169. 梁晓伟,徐晓峰.反刍动物瘤胃微生物对宿主生产性能和甲烷排放影响的研究进展[J].中国奶牛,2022(04):5-8.
170. 刘慧丽,郝力壮,刘书杰等.舍饲生长期牦牛 NH_3 排放及其对 CH_4 与 CO_2 排放的影响[J].贵州农业科学,2017,45(9):69-71.
171. 刘树军,李向林,何峰等.奶牛常用饲草的体外发酵 CH_4 产量研究[J].草地学报, 2011, 19(5):858-864.
172. 刘翌晨,郭涑娜,朱法江等.规模化奶牛养殖场温室气体排放研究——以山西省某奶牛养殖场为例[J]环境保护与循环经济,2020,6:56-60.
173. 刘羽,刘婕,王朝元等.规模奶牛养殖室外运动场春季温室气体与氨气排放特性[J].农业工程学报,2018,34(22):178-184.
174. 刘志豪.干奶期奶牛胎次与瘤胃发酵特征和甲烷排放的关联分析[D].河南科技大学硕士学位论文,河南洛阳,2022.
175. 刘竹.《全球逐日二氧化碳排放报告 2023》[R].清华大学,2023:3-15.
176. 刘卓凡.不同生理阶段荷斯坦后备奶牛甲烷排放与营养物质消化率的规律研究[D].塔里木大学,2022.

177. 刘子瑜. 内蒙古自治区畜牧业碳排放影响因素研究[D]. 延边大学, 2023.
178. 卢彬, 武肖媛. 复合微生物菌剂对高温堆肥进程及有害气体排放的影响[J]. 过程工程学报, 2018, 18(S1): 122-128.
179. 马华青. 规模化养殖场牛棚不同季节 NH_3 、 CO_2 和 CH_4 的排放特征及减排措施研究[D]. 青海师范大学, 2022.
180. 马军, 张盼, 古强. 基于 DEA 的内蒙古草原畜牧业温室气体排放效率研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019, (20): 1-6.
181. 马燕芬, 杨淑青, 薛瑞婷等. 饲料 NFC/NDF 对奶山羊甲烷和二氧化碳排放量的影响[J]. 动物营养学报, 2013, 25(05): 996-1003.
182. 娜仁花, 张东方, 王月等. 内蒙古地区家畜温室气体排放量估算研究[J]. 家畜生态学报, 2015, 36(3): 6. 0. 2015-03-016.
183. 牛文静, 赵广永, 张婷婷等. 延胡索酸二钠对氨化稻草体外瘤胃发酵甲烷及挥发性脂肪酸产量的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(1): 245-251.
184. 秦贵平, 王加众. 畜牧业温室气体排放现状及建议[J]. 当代畜禽养殖业, 2022(03): 63-64.
185. 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
186. 石福于, 景小平, 黄小丹等. 天然放牧系统反刍动物甲烷排放研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2023, 53(07): 916-930.
187. 孙凯佳, 朱建营, 梅洋等. 降低反刍动物胃肠道甲烷排放的措施[J]. 动物营养学报, 2015, 27(10): 2994-3005.
188. 孙维斌, 胡建红. 反刍动物瘤胃甲烷的产生及调控研究进展[J]. 黄牛杂志, 1999, 25(6): 37-39.
189. 塔娜. 内蒙古畜牧业绿色全要素生产率及其影响因素分析[D]. 内蒙古大学, 2021.
190. 覃春富, 张佩华, 张继红等. 畜牧业温室气体排放机制及其减排研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2011, 38(11): 209-214.
191. 田方, 王银朝, 何良军等. 动物温室气体排放机制及减排技术与策略研究进展[J]. 草食家畜, 2012(04): 1-8.
192. 汪开英, 黄丹丹, 应洪仓. 畜牧业温室气体排放与减排技术[J]. 中国畜牧杂志, 2010(46)24: 20-26. 11.
193. 汪开英, 李鑫, 陆建定等. 碳中和目标下畜牧业低碳发展路径[J]. 农业工程学报, 2022, 38(01): 230-238.
194. 王贝, 李斌昌, 董利锋等. 饲料 NDF/NFC 对泌乳中期奶牛瘤胃甲烷排放量、营养物质表观消化率及生产性能的影响[J]. 饲料工业, 2019, 40(09): 45-51.

195. 王贝,许贵善,李斌昌等.饲料 NDF/NFC 对泌乳高峰期奶牛瘤胃甲烷排放量、营养物质表观消化率及生产性能的影响[J].中国饲料.2019(09):15-21.
196. 王健,沈玉君,刘焯等.畜禽粪便与秸秆厌氧-好氧发酵气肥联产碳氮元素变化研究[J].农业工程学报,2019,35(04):225-231.
197. 王路路,刘欣超等.基于全生命周期分析的呼伦贝尔家庭牧场肉羊温室气体排放[J].应用与环境生物学报,2021,27(6):10.2020.08047.
198. 王新颜,孙福方,田蕊.中小畜禽养殖场污染物减排技术[J].农业工程技术综合版,2020(9):53.
199. 王义祥,叶菁,林怡等.花生壳生物炭用量对猪粪堆肥温室气体和 NH_3 排放的影响[J].中国农业大学学报,2021,26(6):114-125.
200. 王月,张东方,丁莹等.内蒙古呼和浩特市家畜温室气体排放量估算[J].家畜生态学报,2014,000(010):68-73.2014.10.013.
201. 王治轶.内蒙古牧区家畜粪砖利用及其温室气体排放效应研究[D].内蒙古大学,2021.
202. 韦玥瑞.日粮类型对内蒙古绒山羊瘤胃甲烷产生及微生物多样性影响的研究[D].内蒙古农业大学,2020.
203. 吴胜,沈丹,唐倩等.规模化半封闭式猪场舍内颗粒物、氨气和二氧化碳分布规律[J].畜牧与兽医,2018,50(3):30-38
204. 肖怡.三种益生菌对肉羊甲烷排放、物质代谢和瘤胃发酵的影响[D].塔里木大学,2016.
205. 谢军飞,李玉娥,董红敏等.密闭箱处理蛋鸡粪的氧化亚氮氨气排放研究[J].农业环境保护,2002,21(6):524-526.
206. 许斌斌.不同添加剂量酿酒酵母对肉牛肠道甲烷排放及生产性能的影响[D].河南农业大学,2016.
207. 许斌斌.不同添加剂量酿酒酵母对肉牛肠道甲烷排放及生产性能的影响[D].河南农业大学,2016.
208. 杨彦明,庞彰,乌思.内蒙古自治区主要畜禽甲烷排放现状及对策[J].内蒙古农业科技,2011(5):1-3.
209. 于国杰.单宁酸与茶多酚对奶牛瘤胃发酵、甲烷排放及生产性能的影响[D].山西农业大学,2022.
210. 于茜,马军.内蒙古地区畜牧业温室气体排放问题研究[J].现代农业,2018(08):54-57.
211. 《2022年中国温室气体公报》[R].北京:中国气象局,2023:15-19.
212. 於江坤,蔡丽媛,张骥等.养殖业温室气体排放的影响因素及减排措施[J].家畜生态学

- 报,2015,36(10):80-85.
213. 曾波,钟荣珍,谭支良.畜牧业中的甲烷排放及其减排调控技术[J].中国生态农业学报,2009,17(4):811-816.
214. 曾楠,刘桂环,张洁清等.基于自然的解决方案的农业甲烷减排路径及对策研究[J].环境保护,2022,50(7):54-58.
215. 曾泽,张华琦,桂干北等.植物提取物对反刍动物瘤胃发酵、甲烷产量及生产性能影响的研究进展[J].饲料研究,2022,45(04):140-144.
216. 张 祎,高志岭,李晴等.“规模化养殖 + 设施番茄”种养结合模式的氨减排研究,河北农业大学学报,2020,43 (4):73-74.
217. 张东.不同放牧强度对内蒙古典型草原温室气体通量的影响[D].内蒙古大学,2019.
218. 张东方,王月,荆红俊等.内蒙古不同区域家畜温室气体排放量估算[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2016,37(01):7-15.
219. 张帆,刁其玉.畜牧业温室气体排放及其减排研究进展[J].家畜生态学报,2015,36(11):81-85.
220. 张振威,王聪,刘强等.异丁酸对西门塔尔牛增重、日粮养分消化和甲烷排放的影响[J].草业学报,2014,23(1):346-352.
221. 赵磊.低聚木糖与复合酶调控奶牛泌乳性能及甲烷排放量的研究[D].宁夏大学,2022.
222. 赵亮,陈懂懂,徐世晓,赵新全,李奇.传统放牧模式下青藏高原高寒牧区藏系绵羊温室气体排放研究.家畜生态学报,2016,37(8):36-44.
223. 赵一广.肉用绵羊甲烷排放的测定与估测模型的建立[D].中国农业科学院,2012.
224. 郑永辉,鞠鑫鑫,孙辉等.奶牛场温室气体排放与减排措施[J].中国乳业,2021,11(239):34-39.
225. 钟 搏 , 赵 连 阁 . 区 域 畜 牧 业 发 展 与 温 室 气 体 排 放 研 究 [J]. 中 国 畜 牧 杂 志,2015,51(24):6.0.2015-24-007.
226. 周静,马友华,杨书运等.畜牧业温室气体排放影响因素及其减排研究[J].农业环境与发展,2013,8(30):78-82.
227. 周培,韩国栋,王成杰等.不同放牧强度对内蒙古荒漠草地生态系统含碳温室气体交换的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011,32(04):59-64.
228. 周孝康,李昊,张立阳等.3-硝基氧基丙醇降低反刍动物瘤胃甲烷排放的作用机理以及在生产中的应用前景[J].动物营养学报,2022,34(06):3454-3460.
229. 周艳,邓凯东,董利锋等.反刍家畜肠道甲烷的产生与减排技术措施[J].家畜生态学报,2018,39(04):6-10+54.

230. 周艳.肉用绵羊生长期甲烷排放规律研究[D].塔里木大学,2018.
231. 朱晓雯,刘月,周振明等.瘤胃中添加剂的甲烷减排作用及甲烷厌氧氧化[J].动物营养学报,2023,35(11):6848-6860.
232. 朱志平,董红敏,魏莎等.中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(04):743-748.
233. 庄明浩,贡布泽仁,张静等.草原畜牧业温室气体排放现状、问题及展望[J].生态学报,2021,41(24):9970-9977.
234. 张博, 唐旭.迈向碳中和, 甲烷减排不容忽视 [R]中国能源报, 2021 年 01 月 04 日

免责声明

- 若无特别声明, 报告中陈述的观点仅代表作者个人意见, 不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性, 不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时, 并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐, 或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.