



清华大学
Tsinghua University



道路机动车及其油品上游 VOCs 排放 影响因素分析及控制建议

**Analysis and control suggestions on influencing
factors of VOCs emissions from road vehicles and
their upstream oil products**

清华大学

2022年9月

Tsinghua University

September, 2022

报告负责人

刘欢 清华大学环境学院 教授

技术报告承担单位

清华大学环境学院： 满瀚阳、蔡志涛、张芷宁
王永越、姜玉恒、蔡雯颖

顾问专家组

谢绍东 北京大学
徐文帅 海南省环境科学研究院
刘剑筠 广东省环境科学研究院
崔洪阳 国际清洁交通委员会

致谢

本研究由清华大学环境学院统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

关于清华大学环境学院

清华大学环境学院源于清华大学 1928 年设立的市政工程系。1977 年建立中国第一个环境工程专业，2011 年在清华大学百年校庆之际发展为环境学院。

清华大学环境学科在最近连续三次的教育部学科评估中获得环境科学与工程一级学科第一名；2022 年 QS 环境学科世界大学排名第 9，在所有亚洲大学的环境学科中排名第 1。在最近的数十年中，在教

育部、生态环境部、科学技术部等有关部委的大力支持下，环境学院在师资队伍、学科建设、人才培养、科学研究和国际合作等方面取得了优异的成绩。

环境学院建立了以环境科学、环境工程、环境管理三大学科方向为基础，涵盖多要素多介质的综合性、交叉型学科体系，下设环境工程系、环境科学系和环境规划与管理系。教师中现有 4 名中国工程院院士（其中 2 位为美国工程院外籍院士），教师队伍具有很强的创新能力、凝聚力和团队合作精神，为高水平教学、科研和社会服务工作的顺利开展提供了有力保障。学院建立了“环境模拟与污染控制国家重点联合实验室”、“国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室”等高水平开放式研究机构，长期担任教育部高等学校“环境科学与工程教学指导委员会”和“环境工程专业教学指导分委员会”的主任单位。学院为国家重大环境问题的解决和可持续发展战略的实施提供了技术服务、理论支持和决策支撑，成为环境保护高层次人才培养基地和高水平科学研究中心，在国内外环境保护领域享有很高的声誉。

关于能源基金会

能源基金会是在美国加利福尼亚州注册的专业性非营利公益慈善组织，于 1999 年开始在中国开展工作，致力于中国可持续能源发展。基金会在北京依法登记设立代表机构，由北京市公安局颁发登记证书，业务主管单位为国家发展和改革委员会。

能源基金会的愿景是通过推进可持续能源促进中国和世界的繁荣发展和气候安全；使命是通过推动能源转型和优化经济结构，促进中国和世界完成气候中和，达到世界领先标准的空气质量，落实人人享有用能权利，实现绿色经济增长。致力于打造一个具有战略眼光的专业基金会，作为再捐资者、协调推进者和战略建议者，高效推进使命的达成。

项目资助领域包括电力、工业、交通、城市、环境管理、低碳转型、策略传播七个方面。通过资助中国的相关机构开展政策和标准研究，

推动能力建设并促进国际合作，助力中国应对发展、能源、环境与气候变化挑战。除上述七个领域的工作，能源基金会还致力于支持对中国低碳发展有重要影响的综合性议题的研究和实践，并成立了六个综合工作组：中长期低碳发展战略、城镇化、煤炭转型、电气化、空气质量、国际合作。

-----报告正文-----

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.

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.3 研究目标.....	5
1.4 研究内容.....	5
第 2 章 研究方法.....	7
2.1 汽油全过程 VOCs 排放方法学.....	7
2.2 汽油全过程 VOCs 未来排放计算.....	23
第 3 章 结果与讨论.....	32
3.1 汽油全过程 VOCs 排放清单及综合源谱.....	32
3.2 汽油全过程 VOCs 未来排放及控制效益研究.....	41
第 4 章 案例示范.....	54
4.1 广东、海南省汽油全过程排放特征.....	54
4.2 广东、海南省汽油全过程控制效益分析.....	55
第 5 章 结论与建议.....	57
参考文献.....	59
附表 1 清单参数输入及来源.....	64
附表 2 各情景关键参数变化表.....	69
附表 3 汽油全链条相关政策法规调研情况表.....	72

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

2013 年以来，随着《大气污染防治行动计划》及《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的开展，我国对大气污染防治力度不断提高，大气颗粒物污染问题得到显著改善。2021 年全国 337 个地级及以上城市细颗粒物 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，与 2013 年相比下降了 58.3%，而臭氧浓度居高不下，与 2013 年相比仅仅下降了 1.4%，以臭氧为首要污染物的超标天数占总超标天数的 34.7%^[1-2]。此外，相较于世界卫生组织 WHO (World Health Organization) 最新发布的空气质量准则 AQG (Air quality guidelines) 值，2019 年全国城市空气质量监测站的 362 个城市最大 8 小时臭氧浓度中：82.3% 的城市臭氧浓度超出暖季 IT1 限值 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，仅有东北、西藏及西南少数几个城市未超标，所有城市臭氧浓度均超出暖季 IT2 ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，所有城市臭氧浓度均超出 AQG 值 ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。目前，臭氧污染控制已经成为我国新阶段大气污染防治的重点^[3]。

臭氧的生成与其前体物呈非线性响应，2020 年新冠疫情期间在氮氧化物 (NO_x) 排放大幅减少的情况下，部分地区臭氧异常升高，其重要原因之一是 NO_x 和挥发性有机物 (VOCs) 的减排比例不同^[4-6]。RSM 模型结果显示 VOCs 对臭氧始终保持一定程度的正贡献^[7]。在全国层面，VOCs 减排量需达到 NO_x 的 40% 才能实现颗粒物及臭氧的协同控制^[8]。2013 年到 2017 年我国 NO_x 减排约为 21%，而 VOCs 排放基本未变^[9]，中国大部分城市地区的臭氧生成处于 VOCs 控制区^[10]，人为源排放驱动平均贡献了 1.2 ppb/年的变化趋势^[11]。因此实现颗粒物与臭氧协同控制，尤其是臭氧减排关键在于加大 VOCs 控制力度，这也对人为源 VOCs 排放清单的精确度提出更高的要求。

从全国范围看，移动源相关 VOCs 排放已经成为城市 VOCs 的主要人为源以及影响臭氧的核心排放过程。车辆 VOCs 的排放过程可分为两类：尾气管排放过程和蒸发排放过程。北京地区 2007-2013 年间移动源 VOCs 排放对大气 VOCs 的贡献比例高达全部人为源的 45%-57%^[12-15]。近十年 VOCs 排放清单的研究结果显示，仅移动源尾气排放占总 VOCs 排放的 23-33%^[16-19]。事实上，从物质流的角度，下游油品的消耗必然与上游油品的储存、运输和销售环节相关联。由于汽油具有显著的挥发性，上游储运销环节中储存过程的储罐蒸发及收

发物料的工作损失、装卸油过程的蒸汽置换及泄漏、运输过程的损耗、加油站销售过程车辆加油排放及加油站储罐呼吸排放等多个环境均存在油气挥发。清单研究显示，2010-2016年储运销过程的VOC排放占比从3.76%增加到4.46%，仅油品运输环节占VOCs排放约9.8%^[20]，加油过程的排放更是占了汽油车驻车过程蒸发排放的1/3^[21]。由于其工业和人口密集的东南沿海区域年均温度超过20摄氏度^[22]，显著高于全国平均水平，那么来自油气挥发过程的VOCs将更为显著。

根据长三角和珠三角区域已发表的相关研究，大气VOCs的源解析显示车辆尾气排放对上海^[23-24]、南京^[25]、广州^[26]、香港^[27]大气VOCs贡献超过27.6%（2017年）、27%（2016年）、11±2%（2007年）、16±2%（2010年）；油气蒸发贡献超过13.8%（2017年）、15%（2016年）、7±2%（2007年）、17±2%（2010年）。而空气质量模型的结果显示，2015年之后长三角和珠三角地区移动源排放对大气臭氧的贡献均已超过35%^[28-29]。可以推测，车辆及汽油储运销VOCs排放在城市地区的人为源VOCs中占有重要地位，准确的排放清单对进一步提升重点城市环境空气质量、指导臭氧污染联防联控具有指导意义。

1.2 研究现状

1.2.1 排放清单方法

车辆汽油储运销VOCs排放清单研究的方法学和应用实践都已经有了有一定的积累，但仍然存在下述问题。首先，虽然车辆VOCs排放清单已经可以有相对完整的方法学建立，但启动排放定量存在较大误差。排放清单计算最基本的逻辑即为“排放因子×活动水平×（1-控制效率）”，我国最早期机动车清单研究常借鉴国外排放模型中的排放因子^[30-31]，包括美国EPA的MOVES及MOBILE模型、加州空气质量管理局的IVE模型以及欧洲的COPERT模型。这些模型中的排放因子都来自于美国或者欧洲的排放测试。由于机动车排放控制技术、环境条件以及行驶工况的差异，这些排放因子并不能准确反映中国的排放特征。对于尾气排放，Hao等使用台架试验测试了171辆车的排放因子，并将测试结果用于MOBILE模型的本地化应用^[32]。Fu和Liu等人分别使用车载测试系统（PEMS）对12辆和75辆车进行了道路测试，并使用测试结果对MOBILE和IVE模型进行了本地化^[33-35]。Zhang等基于大量的排放测试建立并更新了北

京市机动车排放因子模型 (EMBEV) [36-37]。并基于大量的本地化数据编写了《机动车排放清单编制指南》，为我国机动车排放清单编制提供缺省排放因子及活动水平。但是由于实验室行驶工况缺陷或者尾气后处理装置失效，实验室测试并不能反映实际行驶条件下的排放特征，单独使用实验室测试排放因子会造成排放计算结果低于实际情况。项目团队之前使用密闭舱开展了 154 次系统性的交叉法规测试规程的正交实验，完善了蒸发排放机制及排放物种特征的研究[38]；充分考虑车辆控制技术、行驶状况、环境因素、油品参数等因素，建立基于“行驶-驻车-行驶”链式行为解析的机动车 VOCs 全过程排放模型，实现有限基础参数及活动水平数据输入下的热浸排放、分子渗透排放、通气渗透排放、加油排放、碳罐排放等蒸发排放过程以及热稳定运行和启动排放在内的尾气排放过程的模拟[38]。不过，最新的研究显示，轻型汽油车尾气 VOCs 的排放主要发生在冷启动过程中 [39]。此外，环境温度同样对冷启动阶段尾气有机气体排放有影响[40]。低温冷启动已经成为未来汽油车尾气有机气体减排的关键环节，需要在现有清单方法学基础上，深入研究并优化我国不同地区环境条件下的启动排放清单方法学，为制定未来我国车辆 VOCs 排放的综合控制策略提供科学支撑。

其次，现有研究中油品储运销过程清单不确定过大。油品储运销一般仅作为一个非重要部门在 VOCs 工业过程源中被粗略的计算，总结起来，绝大部分研究都使用了之前少数几个来源的固定排放因子数据，比如最为常用的 AP-42 系数[49]，或者指南在特定假设条件下计算得到的排放因子[41-42]，自下而上的清单研究中，其计算不确定性高达-82%~246% [43]。虽然 EPA 也已经提供了参数模型算法，如 TANK 模型[44]，但是大范围有代表性的油品参数，本地化的储库状况调研数据的缺失限制了对储存过程排放的更为准确的评估，而油品参数如 RVP，对排放的影响却为指数型的[45]。对运输过程的排放，主要影响因素在于油气回收设施的控制效率，由于效率的不同，这一排放因子可能会产生数十倍的差异 (0.1 g/kg ~2.3 g/kg) [46-52]。

此外，汽油从储运销过程到车辆使用过程 VOCs 排放计算方法学的割裂使得排放影响关键因素识别不清。从物质流动的角度看，汽油的“储-运-销-使用”各个环节是具有连贯性的，而现有清单方法学中不同环节核算时所考虑的因素却是不一致的，这就导致了不同环节排放量不完全可比，而影响因素的量化并

未完全覆盖。例如，汽油 RVP 是影响油气蒸发的关键因素，且对汽油使用周期内各个环节的排放产生指数影响，那么在环境温度较高的地区严格限制夏季汽油蒸汽压可能会有显著的效果，而现有的清单方法却无法对油品的全过程影响进行有效量化；新冠疫情期间由于短期出行频率的显著下降，尾气排放降低的同时，蒸发排放却会升高，同时由于储罐周转效率降低，储罐周转量减少，但储罐的单位周转量排放系数也会升高，那么交通相关的 VOCs 排放随着车辆活动水平的变化对整体排放量有多大影响，现有相对割裂的清单算法同样无法评价；再诸如随着车辆电动化，使用过程汽油消耗量会逐年降低，被动的加油站和储运销环节的排放系数在不同地区不同条件下却会发生一定程度提高，但是电动化的最终收益现有的方法学也无法进行有效评估。因此，基于现有的相对先进的清单算法，建立连贯性的集成算法，将极大优化不同环节排放的一致性评价以及相关因素的全过程影响量化评估。

1.2.2 排放控制政策

2022 年多部委联合发布的《减污降碳协同增效实施方案》中的工作原则要求“突出协同增效。坚持系统观念，统筹碳达峰碳中和与生态环境保护相关工作，强化目标协同、区域协同、领域协同、任务协同、政策协同、监管协同，增强生态环境政策与能源产业政策协同性，以碳达峰行动进一步深化环境治理，以环境治理助推高质量达峰。”2020 年生态环境部开展“O₃ 和 PM_{2.5} 复合污染协同防控科技攻关预研课题”，对不同行业的排放现状与深度减排方案进行了研究，但单个过程的研究结果与全周期系统分析结论之间的一致性与分异性特征未开展更深入的研究。根据多个省份已发布的“十四五”期间 VOCs 治理相关工作的规划，各个省份多参照国家发布的《十四五节能减排综合工作方案》等相关政策制定本行政区内的具体执行政策。综合整理目前已经发布的 18 个省份共 44 份地方控制标准、政策文件（表 4-2），现有及未来涉上下游各环节 VOCs 排放政策与重点排放环节的契合度量化评价及系统性目标达成分析研究不足。

综合以上，实现颗粒物与臭氧协同控制，尤其是臭氧减排，关键在于加大 VOCs 控制力度。车辆及汽油储运销过程是影响臭氧的核心排放过程之一。下游油品的消耗必然与上游油品的储存、运输和销售环节相关联，排放计算方法学的割裂使得系统减排的科学支撑不足。基于此，本研究将开展现有机动车及储

运销清单计算方法学集成研究，开展相关参数本地化的工作，全周期内评估排放薄弱环节与核心影响因素，基于不同的管控及减排视角对不同控制情景进行系统性排放影响分析，从减少排放、强化控制、防止劣化三个视角，设定未来交通行业 VOCs 减排情景，并分析对不同方式的对应的各环节 VOCs 减排潜力，为未来车辆及汽油储运销 VOCs 排放系统性控制提供科学支撑。

1.3 研究目标

本研究将从我国交通行业汽油的物质流视角出发，建立我国汽油炼制、储存、运输、销售及汽油使用全过程 VOCs 分物种排放清单，并基于清单结果分析各环节 VOCs 排放的主要影响因素并量化其排放影响；识别优先减排物种和高排放环节，制定汽油全过程 VOCs 的减排路径，最终将研究成果应用于广东省、海南省交通行业 VOCs 减排，为国家和地方汽油 VOCs 控制管理提供技术支撑。

1.4 研究内容

本研究的研究内容包括：

(1) 调研我国汽油炼制、储存、运输及销售环节的 VOCs 排放现状及现有控制措施，分析各环节 VOCs 排放特征及控制现状，建立涵盖汽油总消耗量、环境因素、控制措施类型及控制效率等影响因素的汽油炼储运销 VOCs 综合排放清单，定量识别影响汽油上游阶段各环节 VOCs 排放的关键因素，通过调研分析等手段建立汽油使用上游环节分排放过程的 VOCs 源谱；

(2) 基于课题组已建立的车辆 VOCs 排放链式模型，建立涵盖在内的汽油使用环节 VOCs 分省份月分辨率的排放清单；

(3) 基于汽油全过程 VOCs 排放特征及清单，评估我国现有汽油上下游各环节控制措施对 VOCs 排放的影响；基于我国现有 VOCs 管控措施和源头控制、过程控制和末端控制等方面设定未来交通行业 VOCs 减排情景，研究制定 VOCs 排放控制路径；

(4) 基于排放控制路径的研究，计算不同减排路径下交通行业 VOCs 减排效益；将不同减排路径下的减排效益进行对比，比较汽油全周期各环节 VOCs 减排潜力及各种不同减排技术的减排效率；

(5) 基于本课题姊妹项目，以广东和海南的相关数据调研为基础，更新并丰富研究内容 1、2 的基础数据库，形成本地化的参数库。为姊妹项目提供海南省汽油炼、储、运、销阶段和使用阶段各环节 VOCs 排放控制路径，考虑当地汽油炼、储、运、销及机动车行业发展现状和各减排技术效率制定本地化减排技术路线，并进行试点研究，进行减排效益评估。

基于以上研究内容，本研究的技术路线如图 1-1 所示：

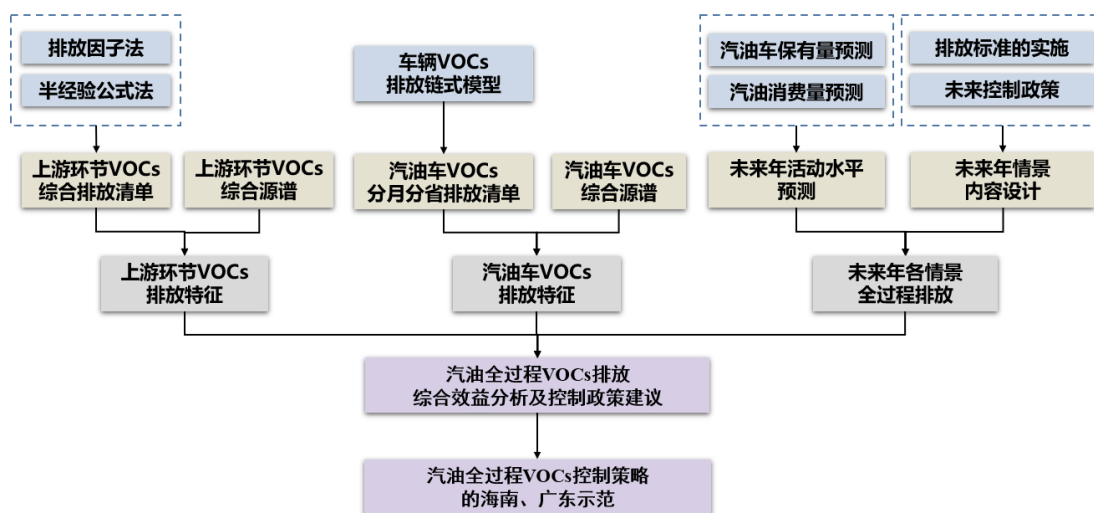


图 1-1 技术路线图

第 2 章 研究方法

2.1 汽油全过程 VOCs 排放方法学

本研究中汽油全过程核算边界如图 2-1 所示，从原油进入炼油环节开始，到车辆使用过程为止。上游环节包括炼制、储存、运输、销售等环节。其中，炼制环节又包括有组织的燃烧烟气排放、火炬排放、工艺过程排放，和无组织的废水处理及泄漏过程（LDAR）。储存环节包括炼厂储罐和储油库储罐排放。具体的，储罐排放又分为边缘密封损失、挂壁损失、浮盘附件损失和浮盘缝隙损失 4 个部分。运输环节包括从炼油厂到储库的运输（一次运输）和从储库到加油站的运输（二次运输）过程，这其中又包含公路、船舶、管道三种运输方式。销售环节包括卸油排放和加油排放两个过程。从排放过程的属性来讲，上游环节除烟气、火炬及工艺过程之外，其他环节均为物理变化，也被定义为上游环节蒸发过程。

下游使用环节排放包括尾气排放和使用过程的蒸发排放。按照排放发生的时序和机制，尾气排放包括启动排放和热稳定运行排放，蒸发排放包括热浸损失、分子渗透、通气渗透、碳罐损失和运行损失。

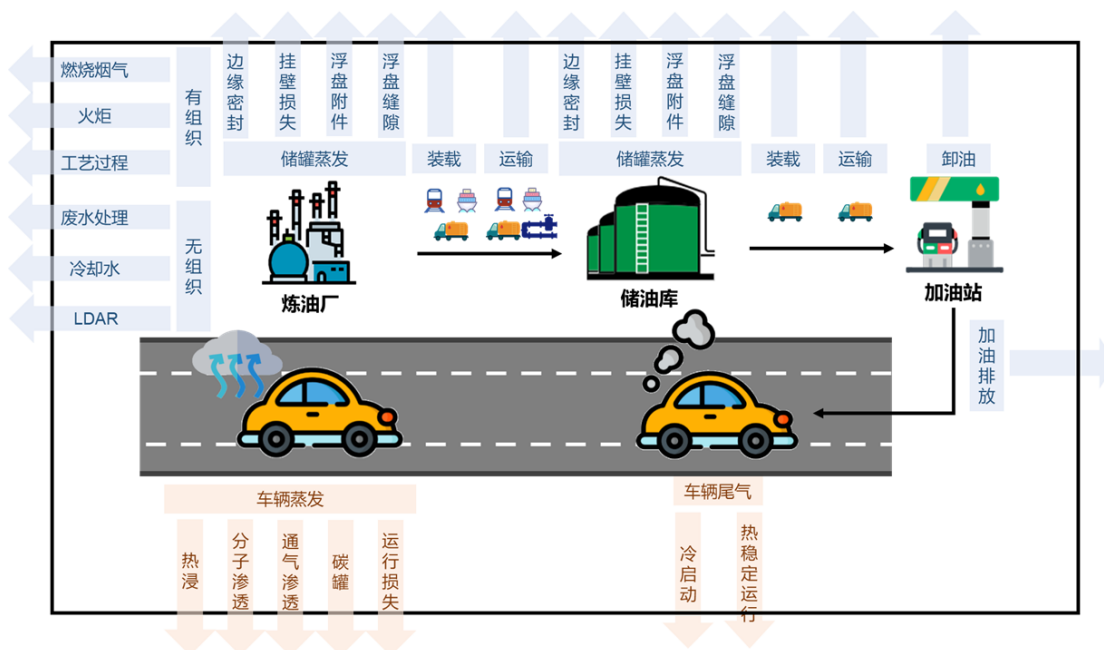


图 2-1 汽油全过程 VOCs 排放核算边界

汽油全过程 VOCs 排放计算框架如表 2-1 所示。在充分考虑影响各环节 VOCs 排放的主要因素的基础上，研究针对不同的排放环节采用了不同的清单算

法，炼制环节采用排放因子法，储存、运输和销售环节采用半经验公式法，而下游环节采用本课题组所建车辆尾气及蒸发排放链式模型。研究中使用的关键输入数据来源包括 31 个省份 2167 个地面气象站逐小时数据，30 份炼化企业 LDAR 及排放口实测报告，3397 份市售油油品参数报告，17 个汽油储油罐实际工程参数，13 个月不同道路类型卡口车流量数据，70000 辆车出行链数据，清华大学积累的数百辆车次排放测试数据，以及研究新补充国六尾气排放测试数据。下面，将分别对各个环节 VOCs 排放的计算方法进行详细介绍。

表 2-1 汽油全链条 VOCs 排放清单计算框架

排放环节		主要影响因素			清单算法	关键输入参数				
上游	炼制	有组织排放	燃烧烟气排放	生产工艺；后处理设备控制情况			排放因子法	单位产量排放因子；后处理设备控制效率		
			火炬排放							
			工艺过程排放							
			集中处理装置排气口							
	无组织排放	废水处理排放	废水中油相 VOCs 含量				单位产量排放因子			
		冷却水排放								
		设备动静密封点								LDAR 频率
	储存	炼厂储罐、 储油库储罐	边缘密封损失	气象参数	储罐参数、周 转次数	油品参 数	半经验公式 法	温度；大气压		汽油 密度； 汽油 RVP
			挂壁损失	周转量				周转量；支撑柱数目；除锈频率		
			浮盘附件损失					附件类型数目	5%、15% 馏出 温度；罐容、直 径；周转次数	
浮盘缝隙损失			浮盘工艺类型							
运输	运输过程	铁路罐车	气象参数	一阶段控制情 况		Reddy-Wade 半经验公式	温度；大气压			
		公路罐车					运输方式比 例；控制效率			
		船舶运输								
	管道运输	本环节不产生排放								
	装卸过程	一次装船	饱和因子	一阶段控 制情况	气象参数；油 品参数			运输方式比例	一阶段控制效率、达标率	温度；大气压；汽油 密度；汽油 RVP
一次装车										
二次装车										
	卸油排放						饱和因子			

	销售	加油排放	二、三阶段控制情况		二阶段控制效率、三阶段覆盖率及控制效率
下游	尾气	冷启动排放	排放标准，环境温度，行驶速度，启动前停车时长，车辆劣化	课题组所建车辆尾气及蒸发排放链式模型	车辆出行链数据；基础尾气排放因子；车辆日内活动分布；车速分布；分省行驶里程
		热稳定运行排放			
	蒸发	热浸损失	排放标准，停车前车辆行驶情况，停车时环境状况，碳罐工作能力，车辆基准渗透情况；		小时分辨率环境温度、大气压；出行链数据集；汽油 RVP；平均油箱大小；油箱加油量；碳罐最大工作能力（g）；基础热浸排放速率（g/hour）；基础渗透速率（g/hour）；碳罐脱附系数（L/(min*km/hour)）；升温渗透系数；运行损失速率（g/hour）
		分子渗透			
		通气渗透			
		碳罐损失			
运行损失					

2.1.1 炼制环节 VOCs 排放计算方法

本研究的炼油环节基本计算公式依据《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》、《石化企业泄漏检测与修复工作指南》和《石油炼制行业源强核算技术指南》，使用实际调研得到的汽油参数及炼油厂生产运营状况，使用国家统计局机动车保有量、行驶里程及燃油经济性得到汽油需求量，使用中国气象数据发布的公开数据得到逐小时气象参数，对我国炼油厂 VOCs 排放以省级行政区域为空间分辨，以月份为时间分辨率进行排放核算。

基于调研结果，炼油厂汽油生产 VOCs 排放包括生产过程的 VOCs 有组织排放、废水处理 VOCs 排放、冷却水循环 VOCs 排放、设备动静密封点泄漏 VOCs 排放和汽油储罐 VOCs 排放。

具体表述如下：

炼油过程的 VOCs 有组织排放包括燃烧烟气排放和工艺有组织排放，涉及汽油生产的装置有常减压装置、催化裂化装置、连续重整装置、延迟焦化装置、汽油加氢装置制氢装置、硫磺装置、CFB 锅炉和火炬，其中催化裂化和连续重整装置为汽油关键生产装置。有组织工艺废气是指除热源供给设施燃烧烟气和火炬外，所有经过排气筒的排放。燃烧烟气是工业企业为了给物料直接或者间接提供热源，燃烧燃料造成的排放。火炬是通过燃烧方式处理排放无法回收和再加工的可燃气体及蒸汽的特殊燃烧设施，气体来自企业正常工况以及非正常工况（包括开停工、检维修、设备故障超压等）过程中工艺装置无法回收的工艺可燃废气、过量燃料气以及吹扫废气中的可燃气体及蒸汽等。公式如下：

$$E_h = Q_h \times C_h \times t_h \times 10^{-9} \quad (1)$$

$$EF_i = \frac{E_i}{W_i} \times 1000 + \sum_j^J \frac{E_j}{W} \times 1000 \quad (2)$$

式中： E_h 为涉汽油生产装置 VOCs 排放量，t/月； EF_i 为 VOCs 排放因子，g/kg 加工量； E_i 为汽油关键生产装置 VOCs 排放量，t/a； W_i 为汽油关键生产装置加工量，t/月； E_j 为汽油生产配套装置 VOCs 排放量，t/a； W 为炼油厂生产装置总加工量，t/a； Q_h 为第 h 个装置排放口烟气流量， m^3/h ； C_h 为第 h 个装置排放口 VOCs 浓度， mg/m^3 ； t_h 为第 h 个装置的年运行时间，h/月； i 为汽油关键生产装置，涉及催化裂化和连续重整； j 为汽油生产配套装置，涉及常减压装置、

制氢装置、硫磺装置、CFB 锅炉、火炬； h 为涉汽油生产装置，包括汽油关键生产装置和汽油生产配套装置。

废水处理 VOCs 排放来源于生产过程产生的废水、废液，其中中含有的有机成分随着温度变化，可能释放到大气中，有时不同类型的废水在收集系统中发生化学反应还可能释放出新污染物进入大气。公式如下：

$$E_{\text{废水处理}} = \sum_i^n \alpha \times Q_i \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$EF_{\text{废水处理}} = \frac{E_{\text{废水处理}}}{W} \times 1000 \quad (4)$$

式中： $E_{\text{废水处理}}$ 为废水处理过程 VOCs 产生量，t/月； α 为第 i 个废水处理设施挥发性有机物的产生系数， kg/m^3 ； n 为废水处理设施的个数； Q_i 为第 i 个废水处理设施的月废水处理量， m^3 ； EF 为废水处理装置 VOCs 生成因子， g/kg -加工量； W 为炼油厂生产装置总加工量，t/a。

冷却水循环 VOCs 排放是由于回用水处理不彻底、添加水质稳定剂和工艺物料泄漏将污染物带入循环冷却水中，污染物通过循环水冷却塔的闪蒸、汽提和风吹等作用释放到大气中。公式如下：

$$E_{\text{冷却塔},i} = Flow_{\text{循环水}} \times EF \times t_i \quad (5)$$

$$EF_{\text{冷却塔}} = \frac{E_{\text{冷却塔}}}{W} \times 1000 \quad (6)$$

式中： $E_{\text{冷却塔},i}$ 为第 i 个循环水冷却塔 VOCs 排放量，t/月； $Flow_{\text{循环水}}$ 为循环水流量， m^3/h ； EF 为单位体积循环水 VOCs 排放系数， t/m^3 ，取 7.19×10^{-7} ； t_i 为循环水冷却塔年运行时间，h/月。 $EF_{\text{冷却塔}}$ 为循环水冷却塔 VOCs 生成因子， g/kg 加工量； W 为炼油厂生产装置总加工量，t/a。

设备动静密封点泄漏 VOCs 排放来自生产装置、储存、装卸、供热供冷等公辅设施中的动、静密封点的泄露排放。公式如下：

$$E_{\text{密封点泄漏}} = \left(EF_{\text{基准排放}} + EF_{\text{泄漏排放}} \times (5 - \theta) \right) \times Q \times 10^{-3} \quad (7)$$

$$EF_{\text{基准排放}} = \frac{e_{\text{VOCs},i} \times t_i}{W} \quad (8)$$

$$EF_{\text{泄漏排放}} = \frac{E_{\text{泄露}}}{W} \times 1000 \quad (9)$$

$$e_{VOCs,i} = e_{TOC,i} \times \frac{WF_{VOCs}}{WF_{TOC}} \quad (10)$$

$$e_{TOC,i} = \begin{cases} e_0 & (0 \leq SV \leq 1) \\ e_p & (SV \geq 50000) \\ e_f(1 \leq SV \leq 50000) & \end{cases} \quad (11)$$

式中： $E_{\text{密封点泄漏}}$ 为设备动静密封点泄漏 VOCs 排放量，t/月； $EF_{\text{基准排放}}$ 为修复后的设备动静密封点排放因子，g/kg 加工量； $EF_{\text{泄漏排放}}$ 为不进行 LDAR 情况下设备动静密封点的 VOCs 排放因子，g/kg 加工量； θ 为 LDAR 检测次数； Q 为汽油需求量，t/月； $e_{VOCs,i}$ 为为 i 装置密封点的 VOCs 年排放速率，kg/h； $e_{TOC,i}$ 为 i 装置密封点的 TOC 排放速率，kg/h； WF_{VOCs} 为运行时间段内流经为 i 装置密封点的物料中 VOCs 的平均质量分数； WF_{TOC} 为运行时间段内流经为 i 装置密封点的物料中 TOC 的平均质量分数； e_0 为为 i 装置密封点的默认零值排放速率，kg/h； e_p 为密封点 i 的限定排放速率，kg/h； e_f 为为 i 装置密封点的相关方程核算排放速率，kg/h； SV 为修正后的净检测值， $\mu\text{mol/mol}$ ； t_i 为 i 装置运行时间，h/月； $E_{\text{泄露}}$ 为设备动静密封点 VOCs 年排放量，t/a； W 为炼油厂生产装置总加工量，t/a。

2.1.2 储存环节 VOCs 排放计算方法

储罐储存 VOCs 排放来源于炼油厂储罐储存 VOCs 排放和储油库储罐储存 VOCs 排放。基于调研，我国目前汽油储存均已采用内浮顶罐。汽油内浮顶罐的总 VOCs 排放是边缘密封损失 VOCs 排放、挂壁损失 VOCs 排放、浮盘附件损失 VOCs 排放和浮盘缝隙损失 VOCs 排放四部分排放的总和。边缘密封损失 VOCs 排放 L_R 依赖于储罐参数、油品气相空间密度和日平均液面温度下的饱和蒸汽压。挂壁损失 VOCs 排放 L_{WD} 依赖于油品周转量和储罐参数。浮盘附件损失 VOCs 排放 L_F 依赖于与储罐附件数目、油品气相空间密度和日平均液面温度下的饱和蒸汽压。浮盘缝隙损失 VOCs 排放 L_D 的计算依赖于储罐参数、油品气相空间密度和日平均液面温度下的饱和蒸汽压。

汽油内浮顶罐的总 VOCs 排放 L_T 计算公式如下：

$$L_T = N(L_R + L_F + L_D) + L_{WD} \quad (12)$$

$$N = \frac{Q}{\theta \times V_c} \quad (13)$$

式中： L_T 为计算区域储存 VOCs 排放，lb/d； L_R 为边缘密封损失 VOCs 排放，lb/d； L_{WD} 为挂壁损失 VOCs 排放，lb/d； L_F 为浮盘附件损失 VOCs 排放，lb/d； L_D 为浮盘缝隙损失 VOCs 排放，lb/d； N 为计算区域汽油储油罐保有量； Q 为汽油需求量，t/年； θ 为计算区域油库平均年周转次数，次/年； V_c 为计算成品油的平均库容，t。

浮顶罐的各部分损耗 VOCs 排放计算公式如下：

$$L_R = K_{Ra} DP * M_V K_C \quad (14)$$

$$P^* = \frac{\frac{P_{VA}}{P_A}}{[1 + (1 - \frac{P_{VA}}{P_A})^{0.5}]^2} \quad (15)$$

$$L_{WD} = \frac{(0.943) Q C_S W_L}{D} \left[1 + \frac{N_C F_C}{D} \right] \quad (16)$$

$$L_F = F_F P^* M_V K_C \quad (17)$$

$$F_F = [(N_{F1} K_{F1}) + (N_{F2} K_{F2}) + \dots + (N_{Fn} K_{Fn})] \quad (18)$$

$$L_D = K_D S_D D^2 P^* M_V K_C \quad (19)$$

$$P_{VA} = \exp \left[A - \left(\frac{B}{T_{LA}} \right) \right] \quad (20)$$

$$A = 15.64 - 1.854S^{0.5} - (0.8742 - 0.3280S^{0.5}) \ln(RVP) \quad (21)$$

$$B = 8742 - 1042S^{0.5} - (1049 - 179.4S^{0.5}) \ln(RVP) \quad (22)$$

式中： L_R 为边缘密封损失 VOCs 排放，lb/d； L_{WD} 为挂壁损失 VOCs 排放，lb/d； L_F 为浮盘附件损失 VOCs 排放，lb/d； L_D 为盘缝损失 VOCs 排放，lb/d； K_{Ra} 为零风速边缘密封 VOCs 排放因子，lb-mol/ft · d； D 为罐体直径，ft； M_V 为气相分子质量，lb/lb-mol； K_C 为产品因子，参照《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》取值为 1.0； P^* 为蒸汽压函数，无量纲量。 P_{VA} 为日平均液面温度下的饱和蒸汽压，psia； P_A 为标准大气压，14.70 psia； Q 为日周转量，bbl/d； C_S 为罐体油垢因子； W_L 为有机液体密度，1 b/gal；0.943 为常数，1000ft³- gal/bbl²； N_C 为固定顶支撑柱数量，无量纲量； F_C 为有效柱直径，依据《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》取值 1.0。 F_F 为总浮盘附件 VOCs 排放因子，lb-mol/d。 N_{Fi} 为特定规格的浮盘附件数，无量纲量； K_{Fi} 为特定规格的附件 VOCs 排放因子，本研究条件下即无风情况下特定类型浮盘附件 VOCs 排放因子，lb-mol/d，见表 2-1。 K_D 为盘缝 VOCs 排放单位缝长因子，1 b-mol/ft · d，依据《石化行业

VOCs 污染源排查工作指南》取值 0.012； S_D 为盘缝长度因子， ft/ft^2 ； A 为蒸汽压公式中的常数，无量纲量； B 为蒸汽压公式中的常数， $^{\circ}\text{R}$ ； RVP 为雷德蒸汽压， psi ； S 为 10% 蒸发量下 ASTM 蒸馏曲线斜率， $^{\circ}\text{F}/\text{vol}\%$ ； T_{LA} 为液体表面温度， $^{\circ}\text{R}$ 。

2.1.3 运输环节 VOCs 排放计算方法

运输过程 VOCs 排放来源于炼油厂汽油装载 VOCs 排放、炼油厂至储油库运输 VOCs 排放、储油库装载和卸载 VOCs 排放，储油库至加油站运输 VOCs 排放。装卸排放指物料装载和卸载过程中，油罐内的蒸气被装卸的物料置换时所产生的排放，运输排放取决于运输工具油气回收系统的密闭性以及油气密封点的泄漏程度。本研究的装卸过程基本计算公式依据 Reddy-Wade 公式核算，运输过程则采用排放系数法核算，排放系数来源于大气攻关预研课题研究报告调研。使用实际调研测试得到的汽油参数，使用国家统计局机动车保有量、行驶里程和燃油经济性得到汽油需求量，使用交通运输部发布的公开数据得到汽油在各环节的运输比例，使用中国气象数据发布的公开数据得到逐小时气象参数，对我国“炼油厂-储油库-加油站”运输环节 VOCs 排放以省级行政区域为空间分辨，以小时为时间分辨率进行排放核算。

基于调研结果，汽油从炼油厂至储油库的转移包括管道运输、铁路罐车运输、公路罐车运输和油船运输，统称一次运输；汽油从储油库到加油站的运输成为二次运输，采用公路罐车运输。此外，我国油品装卸操作方式基本采用底部液下装载。具体公式如下：

$$E_{\text{运输}} = E_{\text{运}} + E_{\text{装卸}} \quad (23)$$

$$E_{\text{运}} = EF_{\text{运}} \times Q \times 10^{-3} \quad (24)$$

$$E_{\text{装卸}} = EF_{\text{装卸}} \times (1 - \eta) \times Q \times 10^{-3} \quad (25)$$

$$EF_{\text{装卸}} = \frac{C_{\text{装卸}} \times \alpha_i \times S_i}{\rho} \quad (26)$$

$$C_{\text{装卸}} = 18.2 \times \left[\frac{f \times P_{\text{atm}}}{R \times T} + \frac{P_{\text{atm}} - P_{\text{oil}}}{R \times T_v} \right] + \left[\frac{P_{\text{oil}}}{P_{\text{atm}} - P_{\text{oil}}} \right] \quad (27)$$

$$P_{\text{oil}} = A \times T \times RVP \times \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (28)$$

$E_{\text{运输}}$ 为计算区域运输环节 VOCs 排放量, t/d; $E_{\text{运}}$ 为计算区域运输过程 VOCs 排放量, t/d; $E_{\text{装卸}}$ 为计算区域装卸过程 VOCs 排放量, t/d; Q 为汽油需求量, t/d; $EF_{\text{运输}}$ 为运输过程的排放因子, g/kg; $EF_{\text{装卸}}$ 为装卸过程的排放因子, g/kg; η 为装卸过程油气回收装置控制效率, %; $C_{\text{装卸}}$ 为被置换到环境中的 VOC 浓度, g/L; ρ 为汽油密度, t/m³; α_i 为不同运输方式比例; S_i 为饱和因子, 参照《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》, 罐车取 0.6, 油船取 0.2; f 为常数, 0.2 g/gal; R 为普适气体常数, 0.3187 (gal psi)/(g mol k); T 为环境温度, K; T_v 为储罐中油品温度, K; P_{atm} 为大气压力, psi; P_{oil} 为汽油蒸汽压, psi; A 、 B 为常数, 分别为 25.61、2789.78; RVP 为雷德蒸汽压, psi。

2.1.4 销售环节 VOCs 排放计算方法

销售环节 VOCs 排放主要来源于卸油过程 VOCs 排放和机动车加油过程 VOCs 排放。卸油排放指油罐车到达加油站, 通过输油管线向地下油库内卸油时, 地下油库内因液面上升而气压上升, 以及油库内卸油带来的油品搅动, 使油库内产生的多余油气通过排气管排向大气。加油过程 VOCs 排放指机动车加油过程中, 油箱中的汽油蒸汽被加入的汽油置换并排入大气中。本研究的销售环节 VOCs 排放基本计算公式依据 Reddy-Wade 公式核算。使用实际调研测试得到的汽油参数, 使用国家统计局机动车保有量、行驶里程及燃油经济性得到汽油需求量, 使用中国气象数据发布的公开数据得到逐小时气象参数, 对我国加油站卸油和加油环节 VOCs 排放以省级行政区域为空间分辨, 以小时为时间分辨率进行排放核算。

基于调研结果, 我国加油站均已安装一阶段油气回收设施 (Stage I) 和二阶段油气回收设施 (Stage II)。其中 Stage I 主要控制油罐车卸油阶段的油气挥发, 达标运行时油气回收效率可达 95%; Stage II 主要控制加油时的油气挥发, 达标运行时油气回收效率可达 70%。此外, 自《轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段)》实施以来, 我国国六标准车辆已全面加装 ORVR 油气回收系统来控制加油时的油气挥发, 但其与 Stage II 存在着兼容性问题, 故部分地区加油站加装三阶段油气回收设施 (Stage III) 来控制地下储罐油气呼吸损耗。具体公式如下:

$$E_{\text{销售}} = E_{\text{加油}} + E_{\text{卸油}} \quad (29)$$

$$E_{\text{加油}} = [\alpha \times (1 - \eta_{\text{UI}})(1 - \eta_{\text{UII}}) + \beta \times (1 - \eta_{\text{ORVR}})(1 - \eta_{\text{UII}})] \times \frac{C_{\text{加油}} Q}{1000\rho} \quad (30)$$

$$E_{\text{卸油}} = \frac{C_{\text{装卸}}}{\rho} \times Q \times (1 - \eta_{\text{U}}) \times 10^{-3} \quad (31)$$

$$C_{\text{加油}} = 18.2 \times \left[\frac{f \times P_{\text{atm}}}{R \times T_{\text{d}}} + \frac{P_{\text{atm}} - P_{\text{tank}}}{R \times T_{\text{v}}} \right] + \left[\frac{P_{\text{disp}}}{P_{\text{atm}} - P_{\text{disp}}} \right] \quad (32)$$

$$P_{\text{disp}} = A \times T \times \text{RVP} \times \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (33)$$

式中： $E_{\text{销售}}$ 为计算区域销售环节 VOCs 排放量，t/d； $E_{\text{加油}}$ 为计算区域加油站加油过程 VOCs 排放量，t/d； α 为国一到国五车保有量比例； β 为国六、国七车保有量比例； $E_{\text{卸油}}$ 为计算区域加油站卸油过程 VOCs 排放量，t/d； Q 为汽油需求量，t/d； η_{U} 、 η_{UI} 、 η_{UII} 、 η_{ORVR} 分别为一阶段、二阶段、三阶段和 ORVR 油气回收装置综合控制效率，%； $C_{\text{加油}}$ 为被置换到环境中的 VOC 浓度，g/L； f 为常数，0.2 g/gal； R 为普适气体常数，0.3187 (gal psi)/(g mol k)； T_{d} 为所加汽油温度，K； T_{v} 为机动车油箱中汽油温度，K； P_{atm} 为大气压力，psi； P_{tank} 为油箱中的蒸汽压，psi； P_{disp} 为所加汽油蒸汽压，psi； A 、 B 为常数，分别为 25.61、2789.78；RVP 为雷德蒸汽压，psi。

2.1.5 使用环节 VOCs 排放计算方法

机动车在使用环节排放 VOCs 主要包括两个部分，分别是机动车在运行过程中燃烧不充分所导致的尾气排放以及在静置和运行过程中由于汽油组分挥发所带来的蒸发排放。本研究采用常用的排放因子法计算机动车 VOCs 在尾气与蒸发过程中的排放，其基本公式为：

$$E_i = EF_i \times \text{VAL}_i \times \text{VP}_i \quad (34)$$

其中： i 为机动车的使用排放环节，包括尾气排放与蒸发排放； E_i 为机动车在 i 环节中的排放总量； EF_i (emission factor) 为机动车在该环节中，单位活动水平下的单车排放因子； VAL_i (vehicle activity level) 为机动车在该环节中的单车年活动水平； VP_i (vehicle population) 为计算范围内的机动车年保有量。

机动车尾气排放 VOCs 的计算方法如下：

$$E_{\text{tail}} = \sum_{i,j,k} EF_{\text{tail},i,j,k} \times \text{VKT}_{i,k} \times \text{VP}_{i,j} \quad (35)$$

其中： E_{tail} 为机动车尾气排放 VOCs 的总量（g）； i 为中国各省，本研究中为除中国除台湾省、香港特别行政区、澳门特别行政区外的 31 个省、市、自治区以及直辖市； j 为机动车排放标准，本研究中为我国现行的汽油车国 1 至国 6 以及虚拟设定的国 7 标准； k 为机动车尾气排放阶段，包括冷启动和热稳定运行排放； $\text{VKT}_{i,j,k}$ （vehicle kilometers of travel）为 i 省 j 排放标准汽油车在 k 行驶阶段的车辆年行驶里程，本研究中采用 Man 等^[27]给出的各省 VKT 数据，冷启动和热稳定运行阶段的 VKT 根据各省机动车活动水平（冷启动与热稳定运行的时间和平均速度）决定； $\text{VP}_{i,j}$ 为 i 省 j 排放标准汽油车的年保有量。本研究采用的保有量数据详见保有量预测部分； $\text{EF}_{\text{tail},j,k}$ 为 j 排放标准汽油车在 k 阶段的单车尾排放因子（g/km），本研究中国 1 至国 5 各车型各标准汽油车采用 Man 等给出的汽油车尾气排放因子，国 6 车采用 Zhang 等给出的尾气排放因子，虚拟设立的国 7 尾气标准对标国际更先进的 Tier3，相应尾气排放因子根据国 1 至国 6 尾气排放标准限值与实测尾气排放因子所拟合的线性关系结合国 7 尾气排放标准限值进行计算。

考虑到实际运行过程中，车辆所处的环境因素与运行状况与排放测试时不一致，排放因子会发生变化。本研究根据车辆实时运行状况以及逐小时气象数据，对冷启动和热稳定运行时各省机动车的实际排放因子进行修正计算。冷启动阶段采用各省全年逐小时温度与湿度数据，热稳定运行阶段采用实测车辆运行速度，根据《道路机动车排放清单编制技术指南》对排放因子进行修正。

冷启动排放因子可以根据以下公式计算：

$$EF_{\text{cold},j,l} = \begin{cases} (2.8 - 0.06T_l) \times EF_{\text{hot},j} & (j = 0) \\ \beta_j(A \times V_l + B \times T_l + C) \times EF_{\text{hot},j} & (j = 1-7) \end{cases} \quad (36)$$

其中： j 为汽油车的排放标准； l 为汽油车运行过程中的阶段单元； $\text{EF}_{\text{cold},j,l}$ 为 j 标准汽油车的实际冷启动排放因子（g/km）； $\text{EF}_{\text{hot},j,l}$ 为 j 标准汽油车的实际热稳定运行排放因子（g/km）； T_l 为第 l 个运行单元的环境温度（K）； V_l 为第 l 个运行单元的运行速度（km/h）； A 、 B 、 C 为常数；

热稳定运行排放因子可以根据以下公式计算：

$$EF_{hot,j,l} = \begin{cases} 1.247 & (j = 0, V_l > 100) \\ 30.34 \times V_l^{-0.693} & (j = 0, V_l \leq 100) \\ \frac{a_j + c_j \times V_l + e_j \times V_l^2}{1 + b_j + V_l + d_j \times V_l^2} & (j = 1-4) \\ a_j \times V_l^b + c_l \times V_l^d & (j = 5-7) \end{cases} \quad (37)$$

其中： $EF_{hot,j,l}$ 为 j 标准汽油车的实际热稳定排放因子 (g/km)； j 为汽油车的排放标准； l 为汽油车运行过程中的阶段单元； T_l 为第 l 个运行单元的环境温度 (K)； V_l 为第 l 个运行单元的运行速度 (km/h)； a_j 、 b_j 、 c_j 、 d_j 为 j 标准汽油车所对应的计算常数。

机动车蒸发排放 VOCs 可以根据车辆运行和驻车状况分为驻车热浸排放、碳罐排放、分子渗透排放、通气渗透排放以及运行损失，排放强度存在显著的不同。本研究采用 Man 等建立的链式排放模型进行蒸发排放各环节的计算。

驻车热浸排放可以根据如下公式进行计算：

$$E_{hotsoak} = \sum_i EF_{hotsoak,i} \times (T_i \times p_{duration,<1h,i} + N_i \times p_{event,>1h,i} \times 1) \times 365 \times VP_i \quad (38)$$

其中： $E_{hotsoak}$ 为汽油车热浸 VOCs 排放总量 (g)； $EF_{hotsoak,i}$ 为 i 排放标准的汽油车热浸 VOCs 的排放因子 (g/h)； $P_{duration,<1h,i}$ 为 i 排放标准的汽油车驻车时间在 1 小时内的比例； $p_{event,>1h,i}$ 为 i 排放标准的汽油车驻车持续时间为 1 小时以上的驻车次数百分比； T_i 为 i 排放标准的汽油车单车每日平均驻车时长 (h)； VP_i 为 i 排放标准的汽油车总保有量；

分子渗透排放可以根据如下公式进行计算：

$$E_{pp} = \int_{t_1}^{t_2} P_{base} e^{0.0385(f(t)-T_{base})} dt \quad (39)$$

其中： E_{pp} 为分子渗透排放 VOCs 的总量 (g)； P_{base} 为渗透排放基准排放速率 (g/h)； $f(t)$ 是环境温度对时间的函数； t_1 、 t_2 为渗透过程开始和结束的时间 (h)。

通气渗透排放可以根据如下公式进行计算：

$$E_{pv} = \alpha \times TVG \quad (40)$$

其中： E_{pv} 为通气渗透排放 VOCs 的总量 (g)； α 为由于气体膨胀通过油路系统产生的渗透排放与由于温度升高产生的油气生成量比例常数； TVG 为油气生成量 (g)，可以根据如下公式进行计算：

$$TVG = A \times e^{B \times RVP} (e^{C \times T_x} - e^{C \times T_0}) \times V_{tank} \quad (41)$$

其中：RVP 为燃油蒸气压（psi）； T_x 为停车过程最高温度（K）； T_0 为停车事件开始时的温度（K）；A、B、C 为常数。

碳罐排放可以根据如下公式进行计算：

$$E_c = f(TVG_i, M_{i-1}, M_0, M_p) \quad (42)$$

其中：TVG 为油气生成量（g）； M_{i-1} 为第 i 次行驶前的碳罐加载量（g）； M_0 为汽油车的碳罐初始加载量（g）； M_p 为机动车行驶过程中碳罐脱附质量（g），可以根据如下公式进行计算：

$$M_p = K_{pm} \times V_{pv} \quad (43)$$

$$V_{pr} = K_{pr} \times V \quad (44)$$

$$V_{pv} = V_{pr} \times t_d \quad (45)$$

其中： K_{pr} 为行驶速度与脱附速率相关系数； V 为停车前机动车行驶平均速度（km/h）； t_d 为机动车行驶时间（min）； V_{pr} 为停车前机动车行驶过程中碳罐脱附速率（L/min）； V_{pv} 为机动车行驶过程碳罐总脱附流量（L）； M_p 为机动车行驶过程中碳罐脱附质量（g）， M_p 最大值不超过机动车行驶过程开始时的碳罐加载量； K_{pm} 为碳罐脱附质量与脱附流量相关系数。

运行损失可以根据如下公式进行计算：

$$E_{running\ loss} = \sum_i EF_{running\ loss,i} \times (24 - T_i) \times 365 \times VP_i \quad (46)$$

其中： i 为汽油车的排放标准； $E_{running\ loss}$ 为汽油车运行损失排放 VOCs 总量（g）； $EF_{running\ loss}$ 为汽油车运行损失的排放因子（g/h）； T_i 为 i 排放标准的汽油车单车每日平均驻车时长（h）； VP_i 为 i 排放标准的汽油车总保有量。

2.1.6 汽油全过程 VOCs 生成的关键影响因素

基于上述汽油全过程 VOCs 排放计算框架，研究从生成视角量化了环境温度对 VOCs 排放的影响。当环境基准温度为 20 °C 时，环境温度每增加 1 °C 对各个子环节 VOCs 排放的影响如图 2-2（a）所示。本研究中，未考虑温度对上游环节炼油环节的有组织排放、无组织排放以及运输环节的排放。此外，无论驻车时车辆所处的环境温度是多少，在运行过程中车辆都已经充分预热，因此下游过程中车辆尾气的热稳定运行排放和车辆蒸发的运行损失排放与温度无关。对于与汽油燃烧有关的车辆尾气的冷启动过程，环境温度降低，VOCs 的排放增

加。这种现象的产生有两个主要的原因，首先，为补偿低温时燃料蒸发减少以及缺少润滑油引起的发动机部件摩擦增加，空气-燃料混合物更加富足，导致 VOCs 生成增加；第二，低温情况下催化剂达到起燃温度的时间增加且催化效率降低，导致低温冷启动时汽油燃烧生成的部分甚至全部 VOCs 未经催化转化直接排出。对其他与蒸发相关的排放子环节，包括上游环节的炼厂储罐和储油库储罐的边缘密封排放、挂壁损失排放、浮盘附件排放和浮盘缝隙排放，加油站卸油和装油，以及下游过程车辆蒸发的热浸排放、分子渗透排放、通气渗透排放和碳罐排放，温度的降低会减少 VOCs 的生成。在此基础上，研究定量分析了温度的连续增加对 3.1 中定义的主要排放环节 VOCs 排放的影响，结果如图 2-2 (b) 所示。与 20 °C 相比，环境温度升高 1 °C 时，储存蒸发、运输蒸发和销售蒸发环节的 VOCs 生成的增幅分别为 3.41%、2.10%和 4.59%，汽油使用环节 VOCs 排放的降幅为 3.45%。而当环境温度升高 4 °C 时，上游环节储存蒸发、运输蒸发和销售蒸发环节的 VOCs 生成的增幅合计达到 43.07%，汽油使用环节 VOCs 排放的降幅达到 12.05%。从图 2-2 中还可以发现，环境温度对各环节 VOCs 排放变化的影响并不是线性的。对于与蒸发相关的上游环节，从 20 °C 开始，排放比例呈指数型变化，即温度越高，温度每升高 1 °C 引起的排放比例变化越大。例如，温度从 20 °C 上升至 21 °C，上游环节 VOCs 排放增加的比例为 10.11%，而温度从 23 °C 上升至 24 °C，该比例为 11.45%。与此相反，对于下游环节，温度越高，温度每升高 1 °C 引起的排放比例变化越小，温度从 23 °C 上升至 24 °C，下游过程 VOCs 排放降低的比例为 2.97%。由此可见，上游环节 VOCs 生成对温度的敏感性在高温时更明显，而下游过程 VOCs 排放对温度的敏感性在低温时更显著。

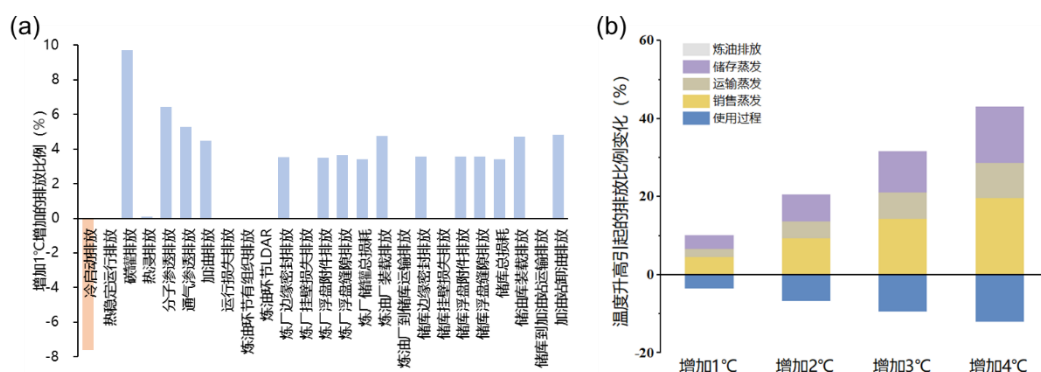


图 2-2 (a) 基准温度为 20 °C 时环境温度每上升 1 °C 引起的汽油全过程 VOCs 各子环节的排放变化 (b) 基准温度为 20 °C 时环境温度连续上升引起的汽油全过程主要排放环节的 VOCs 排放变化

研究进一步对影响上游储存和销售环节 VOCs 排放的因素进行了分析。图 2-3 展示了油箱中油气生成情况与日均温度和温差的关系，日均温度越高，昼夜温差越大，油箱油气生成越多。当日均温度超过 25 °C，昼夜温差超过 10 °C，油箱油气生成量可以达到 15 g/day 左右，而当日均温度低于 -10 °C 时，油箱油气生成量仅为 0.1 g/day。储存蒸发与销售蒸发环节的排放因子与日均气温的相关性如图 2-4 所示。在储存蒸发的四类排放过程中，挂壁损失对温度变化并不敏感，而浮盘缝隙、浮盘附件以及边缘密封排放均与温度呈现指数型正相关关系，且浮盘缝隙排放对温度升高最敏感。加油和卸油过程的排放因子同样与日均温度呈现指数型正相关关系。除环境温度以外，汽油蒸汽压也是影响加油和卸油过程 VOCs 排放的关键因素。由图 2-5 可知，汽油蒸汽压越高，加油和卸油过程油气排放因子越高，汽油蒸汽压增加引起的加油和卸油过程油气排放因子增幅越大，且汽油蒸汽压对油气排放因子的影响在高温情况下更加明显。

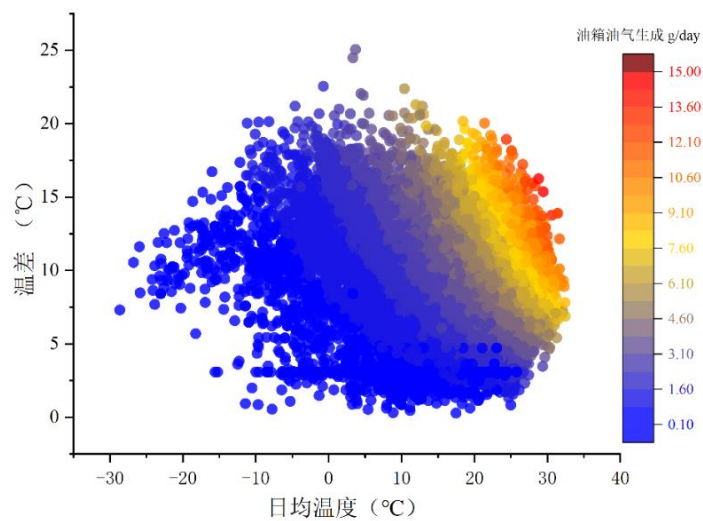


图 2-3 日均温度和温差对于油箱油气生成的影响

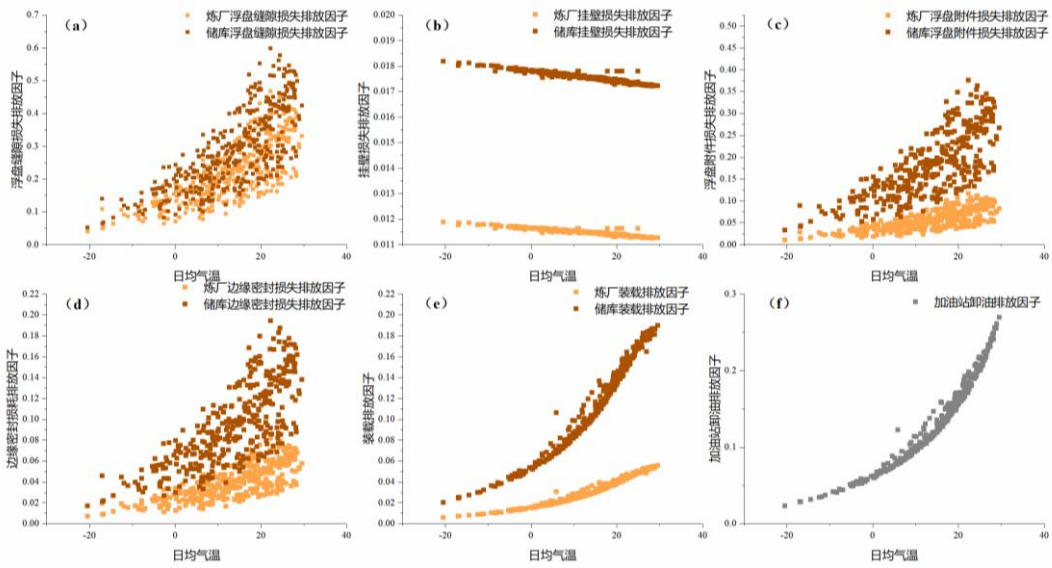


图 2-4 日均气温与 (a) 浮盘缝隙、(b) 挂壁损失、(c) 浮盘附件、(d) 边缘密封、(e) 加油以及 (f) 卸油环节排放因子的相关性分析

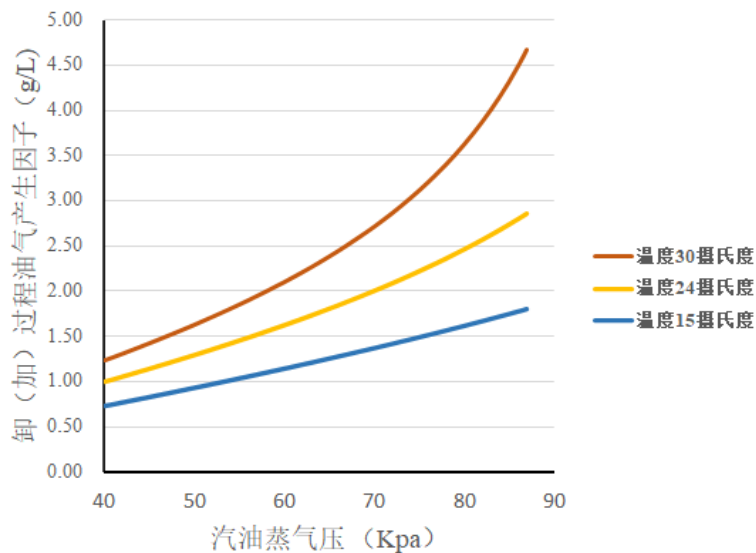


图 2-5 汽油蒸汽压及环境温度对于加油和卸油过程油气排放因子的影响

2.2 汽油全过程 VOCs 未来排放计算

2.2.1 机动车分标准保有量预测方法

本研究对 2009-2021 年全国汽油车分标准保有量进行了年龄结构的分析复现，并对 2022-2030 年的保有量进行了预测，预测流程和数据来源如下：

(1) 2009-2021 年全国汽油车总量及 2009-2019 年分标准保有量采用每年的《移动源管理年报》以及公安部数据，2020-2021 年分标准保有量在 2019 年的分标准车队构成的基础上，基于上一年总保有量扣除淘汰车辆数后新增的数量得到；

(2) 车队的淘汰参考 Zheng 等^[53]提供的生命周期曲线进行计算，每年新增的车辆按当年标准政策实施情况划分该批新车的排放标准，如国 6 标准于 2020 年起在全国全面实施，因此自 2020 年起，新增的车辆均视为国 6 车辆。特别地，由于《移动源管理年报》的最早年份为 2009 年，而国 1 至国 3 标准实施的年份均在 2007 年及更早时间，考虑到其保有量占比逐渐趋小，对车队的标准构成影响不大，因此在解构国 1 至国 3 标准汽油车保有量时，按保有量整体对其进行生命曲线的计算，使之符合历年变化趋势；

(3) 本研究采用 Huo 等^[54]的方法，基于人口、GDP 以及千人车辆保有率等数据，对 2022 年至 2030 年民用汽车保有量进行了预测，并根据历史年份民用汽车与汽油车的比例折算成总汽油车保有量，该年预测的汽油车总保有量中减去由于历史年份车队迭代所剩下的车辆，得到该年相应排放标准应新增的新汽油车数量；

(4) 由于电动化情景的设立，每年应增的新汽油车数量中，相应电动化渗透率的比例被扣除，得到相应标准实增的新汽油车数量。

2.2.2 使用环节汽油消费量预测方法

本研究采用自下而上的单车行驶油耗计算方法对各省每年使用环节汽油消费量进行核算。汽油消费量可以根据以下公式进行计算：

$$Q_{i,j} = CF_i \times VKT_{i,j} \times VP_{i,j} \quad (47)$$

其中： $Q_{i,j}$ 为 j 省在 i 年的汽油消费量 (kg)； i 为计算目标年； j 为中国各省，本研究中为除中国除台湾省、香港特别行政区、澳门特别行政区外的 31 个省、市、自治区以及直辖市； $VKT_{i,j}$ 为 j 省在 i 年的车辆年行驶里程 (km)，数据来源于 Man 等； CF_i 为在 i 年我国单车的平均行驶油耗 (kg/km)，2010 年至 2015 年的数据来源于 ICCT 报告，2016 年及以后年份的数据来源于中国汽车工程学会； $VP_{i,j}$ 为 j 省在 i 年的汽油车保有量。

2.2.3 未来情景搭建

本研究参考国内已有政策、发展计划，对我国未来汽油上下游环节的减排措施进行量化，同时设立基准情景与强化情景，量化分析各环节减排措施对汽油全链条排放的减排效果。本研究参考的政策文件包括《“十四五”节能减排综合工作方案》、《绿色交通“十四五”发展规划》、《2030 年前碳达峰行动方案》等。

2.2.3.1 汽油全过程 VOCs 排放控制政策分析

本研究广泛调研了各种汽油全过程 VOCs 排放相关的控制政策。行业覆盖了石油炼制、储油库、油品运输、加油站、道路移动源、油品参数。除了国家层面的政策以外，还包括了 18 个地区地方层面的汽油全链条 VOCs 控制措施，具体的政策总结见附表 3。总结已发布政策情况，我们将所有相关的控制措施按环节分类的前提下，按控制类型再分为三类，分别是“减少生成，加强控制，防止劣化”。得到了更加脉络清晰的现有控制政策表，如表 2-2 所示。可以看到汽油全过程 VOCs 排放的主导环节——下游使用过程的控制措施反而是比较薄弱的。

表 2-2 现有控制政策表

措施	炼制	储存	运输	销售	尾气	蒸发
			完成底部装油方式改造			
减少生成	减少非正常工况 VOCs 排放	储罐采取更高效的密封方式	一次运输结构比例调整	错峰加油	提升新能源渗透率	提升新能源渗透率
强化控制	强化炼油总量控制	调整油库布局	新增运输汽油的油罐车不得配备上装密闭装油装置		优化油品	优化油品淘汰老旧车辆
治理设施改造升级			对装载汽油的汽车罐车，推广使用自封式快速接头。	VRU 的安装普及		
加强控制	提升废气收集率与去除率	油气回收处理装置的安装	完成原油和成品油码头油气回收，新建装船作业线全部安装油气回收设施。	当辖区内采用 ORVR 的轻型汽车达到汽车保有量的 20% 后，油气回收系统、在线监测系统应兼容 ORVR 系统。	加强在用车环保检测和达标监管	加强在用车环保检测和达标监管

提升治理设施投入使用防止劣化LDAR工作	开展	LDAR工	作	每年组织	开展油气回收专项检查	和整	改工作	安装油气回收自动	监控设备	实施汽	车排放	检验与	维护制	度	遥感监	管	蒸发排放控	制系统检验
----------------------	----	-------	---	------	------------	----	-----	----------	------	-----	-----	-----	-----	---	-----	---	-------	-------

本研究进一步对各省十四五区域政策与排放过程作了契合性分析，如下表2-3所示，研究结果表明，上游的储存、销售，以及下游使用过程的尾气与蒸发环节控制措施还较为薄弱。尤其是蒸发排放管控环节，目前仅有广东省首个印发了《汽油车燃油蒸发排放控制系统检验操作指南》，规范了汽油车蒸发排放控制系统的检验操作，减少蒸发排放。

表 2-3 各省十四五政策与排放过程的契合性分析

省份	政策文件	发布时间	上游环节					使用环节		全过程
			炼油工 艺过程	炼油储 存	成品油 储存	运输	销售	尾气	蒸发	电动化
浙江	《浙江省“十四五”挥发性有机物综合治理方案》	2021.08.20	1	1	1	1	1	0	0	0
上海	《上海市生态环境保护十四五规划》	2021.08.21	1	1	1	1	1	1	0	0
江苏	《江苏省“十四五”生态环境保护规划》	2021.09.29	1	1	0	1	0	0	0	1
内蒙古	《内蒙古自治区“十四五”生态环境保护规划》	2021.10.12	0	0	1	1	1	1	0	1
广东	《广东省生态环境建设十四五规划》	2021.10.29	1	0	1	1	1	1	1	1
湖北	《湖北省生态环境保护“十四五”规划》	2021.11.23	1	1	1	1	1	0	0	1
北京	《北京市十四五时期生态环境保护规划》	2021.11.28	1	0	1	1	1	1	0	1
江西	《江西省“十四五”生态环境保护规划》	2021.12.08	0	0	0	0	1	1	0	1
湖南	《湖南省“十四五”生态环境保护规划》	2021.12.10	1	0	0	1	0	0	0	0
甘肃	《甘肃省“十四五”生态环境保护规划》	2021.12.23	0	1	1	1	1	1	0	1
天津	《天津市生态环境保护“十四五”规划》	2022.01.06	1	1	0	1	1	0	0	1
四川	《四川省“十四五”生态环境保护规划》	2022.01.20	1	1	0	0	0	1	0	1
福建	《福建省十四五空气质量改善规划》	2022.01.28	1	1	1	1	0	1	0	1
辽宁	《辽宁省“十四五”生态环境保护规划》	2022.02.09	1	0	0	1	0	0	0	1
重庆	《重庆市生态环境保护“十四五”规划》	2022.02.16	0	0	0	1	0	1	0	1
黑龙江	《黑龙江省“十四五”节能减排重点工作实施方案》	2022.03.30	0	0	0	1	0	0	0	1
广西	《广西壮族自治区“十四五”空气质量全面改善规划》	2022.05.16	1	0	1	1	1	1	0	1

2.2.3.2 源头控制领域

本研究对交通行业汽油 VOCs 排放源头控制领域的具体内容进行了设计。在本研究中，认为交通行业汽油 VOCs 排放的源头在于我国车队构成及清洁化比例。

在基准情景中，通过中国汽车工业协会，乘联会，机动车管理年报以及公安部历年数据可以得到我国近年来汽油小客车和新能源汽车的保有量、新车销量变化。根据《“十四五”节能减排综合工作方案》与《2030年前碳达峰行动方案》中提到的2025年新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的20%左右，2030年达到40%，可知从2022年~2025年，新能源汽车新车销量占比平均每年约增长1.3%，从2026年~2030年，新能源汽车新车销量占比保持不变。

在强化情景中，假设国家推出力度更大的新能源车优惠政策，扩大充电基础设施建设规模。使得目标年2025年、2030年的新销量车中新能源占比分别能达到20%，70%，即平均每年增长10%。情景内容表如表2-4所示：

表 2-4 源头控制领域情景设计参数表

情景内容	基准情景		强化情景	
	2025	2030	2025	2030
新销量汽 车清洁能 源化率	达 20% 2022~ 2025 年平均每 年增长 1.3%	达 20% 2026~2030 保持不 变	达 20% 2022~2025 年 平均每年增长 1.3%	达 70% 2026~2030 年平均每年增 长 10%

2.2.3.3 过程控制领域

(1) 炼制环节

在基准情景中，根据《“十四五”节能减排综合工作方案》，未来我国将深化石化化工等行业挥发性有机物污染治理，全面提升废气收集率、治理设施同步运行率和去除率。对易挥发有机液体储罐实施改造，对浮顶罐推广采用全接液浮盘和高效双重密封技术，对废水系统高浓度废气实施单独收集处理。根据《2030年前碳达峰行动方案》，到2025年，国内原油一次加工能力控制在10亿吨以内。

在强化情景中，进一步优化炼厂的产能结构，调整汽油油品调和配方，减少催化裂化环节的高排放。MTBE在我国虽未禁止使用，但受汽油标准含氧量要求限制（质量分数不得超过2.7%），添加上限在15%左右，且汽油辛烷值与MTBE添加量不呈线性关系，因此当前市场中MTBE调和比例一般控制在10%以下，因此情景设置中保持现有MTBE调和比例不变。

情景内容如表 2-5 所示：

表 2-5 炼制环节情景设计参数表

情景内容	基准情景		强化情景	
	2025	2030	2025	2030
油品调和配方	FCC 65%		FCC 60%	FCC 55%
	CR 27%		CR 32%	CR 37%
	MTBE 8%		MTBE 8%	MTBE 8%
有组织排放废水搜集效率	85%		85%	
有组织排放废水处理效率	30%		60%	90%
FCC 及 CR 去除效率	90%		90%	
LDAR 每年检测次数	4		4	

(2) 储存环节

在基础情景中，根据《“十四五”节能减排综合工作方案》，未来我国将深化石化化工等行业挥发性有机物污染治理，全面提升废气收集率、治理设施同步运行率和去除率。对易挥发有机液体储罐实施改造，对浮顶罐推广采用全接液浮盘和高效双重密封技术，对废水系统高浓度废气实施单独收集处理。

在强化情景中大力推广汽油内浮顶罐的升级改造，减少最劣化储库的比例，于 2025、2030 年分别降低其比例至 10%、0%；大力推广采用全接液式高效密封，于 2025、2030 年分别完成 25%、50%的改造升级。

情景内容如表 2-6 所示：

表 2-6 储存环节情景设计参数表

情景内容	基准情景		强化情景	
	2025	2030	2025	2030
炼油厂储库	5000 m ³ 储库	5000 m ³ 储库	5000 m ³ 储库	5000 m ³ 储库
	19.1%	14.7%	19.1%	14.7%
最劣化储库	20000 m ³ 储库	20000 m ³ 储库	20000 m ³ 储库	20000 m ³ 储库
	45.9%	35.3%	45.9%	35.3%
	最劣化储库 20%	最劣化储库 20%	最劣化储库 10%	最劣化储库 0%

	全接液式高效密封技术 15%	全接液式高效密封技术 30%	全接液式高效密封技术 25%	全接液式高效密封技术 50%
				2000 m ³ 储库 40%
	2000 m ³ 储库 52%	2000 m ³ 储库 40%	2000 m ³ 储库 52%	
	5000 m ³ 储库 13%	5000 m ³ 储库 10%	5000 m ³ 储库 13%	5000 m ³ 储库 10%
城市储库	最劣化储库 20%	最劣化储库 20%	最劣化储库 10%	最劣化储库 0%
	全接液式高效密封技术 15%	全接液式高效密封技术 30%	全接液式高效密封技术 25%	全接液式高效密封技术 50%

(3) 运输环节

在基准情景中，根据攻关项目调研结果，汽油在一次运输过程中，各运输方式所占总运输量比例分别为铁路 29%，船舶 20%，公路 1%，管道 50%。基准情景设定 2022~2030 年间保持此运输结构不变。

根据《“十四五”节能减排综合工作方案》，未来我国将加强油船和原油、成品油码头油气回收治理。《油品运输大气污染物排放标准》（GB20951-2020）中，要求万吨级及以上油品泊位码头、新建 150 总吨级以上及现有 8000 总吨及以上的油船应开展油气管控，新建码头及油船自 2021 年 4 月 1 日实施，现有码头及油船自 2024 年 1 月 1 日实施。我国沿海、内河从 2010 年前后开始，根据各地环保相关要求，陆续约有 40 个以上油码头开展了油气回收设施的建设，但到目前为止已建设施约 90% 未投入使用，因为缺乏强制要求，油船缺少配套回收设施，回收后的油品再利用也存在困难。综合调研情况，基准情景设定 2025 年、2030 年油船油码头回收效率分别提高到 15%、30%。

车船运输呼吸阀方面，我国的≤150mm 规格的呼吸阀最大允许泄漏量是国际标准 API2000 近 3 倍，是国际标准 API527 的 5 倍，是欧洲先进厂家最大允许泄漏量的 23 倍。我国的 200-400mm 规格的呼吸阀最大允许泄漏量 0.4m³/h 高于国际标准 API2000 近 3 倍，但是国际标准 API527 的 111 倍，是欧洲先进厂家最大允许泄漏量的 88 倍。总体来说，我国的呼吸阀技术标准远落后于国际先进技术标准要求。结合我国现状，基准情景按经验系数设定船舶、罐车损耗率分别为 0.03%、0.01%。

在强化情景中，大力发展建设我国的成品油管道运输，优化成品油一次运输结构，将铁路与船舶运输的成品油份额转化到排放更低的管道运输，于 2025 年、2030 年管道运输比例分别提高到 60%、70%。同时加强油船、码头油气回收设施的建设与监管力度，在 2025 年、2030 年分别提高油气回收效率到 60%、90%。升级运输过程的呼吸阀技术标准，向国际先进标准看齐，2025 年、2030 年分阶段进一步降低运输过程损耗率。

情景内容如表 2-7 所示：

表 2-7 运输环节情景设计参数表

情景内容	基准情景		强化情景	
	2025	2030	2025	2030
一次运输结构	铁路 24%	铁路 24%	铁路 21%	铁路 14%
	船舶 20%	船舶 20%	船舶 18%	船舶 15%
	公路 1%	公路 1%	公路 1%	公路 1%
	管道 55%	管道 55%	管道 60%	管道 70%
炼厂装车控制达标率	30%	30%	60%	90%
炼厂装船收集效率	90%	90%	90%	90%
炼厂装船回收处理效率	70%	70%	70%	70%
炼厂装船处理达标率	30%	60%	40%	80%
储库装车处理达标率	81.3%	81.3%	81.3%	81.3%
升级呼吸阀技术标准	船舶损耗率 0.03%	船舶损耗率 0.03%	船舶损耗率 0.02%	船舶损耗率 0.015%
	罐车损耗率	罐车损耗率	罐车损耗率	罐车损耗率

0.01%

0.01%

0.007%

0.005%

(4) 销售环节

在基准情景中，根据攻关项目调研情况，我国 100% 完成卸油油气回收（Stage I）改造，90.2%（原标准实施范围为北京、上海、天津、广州及其他城市建成区）完成加油油气回收（Stage II）改造，10-15%的加油站同步安装油气处理装置，全国约 3000 座加油站安装了在线监测系统。因此，基准情景设定 2022~2030 年我国加油站 100% 完成 Stage I、II 改造，10% 完成 VRU 覆盖；Stage I 和 Stage II 的稳定达标运行率分别为 60%、70%。

在强化情景中，VRU 实际覆盖率在 2025 年、2030 年分别达到 30%、50% 的安装比例。各地区应强化加油站监管，安排专门的管理人员进行检查，根据攻关项目研究，加强监管可提高原有的油气回收效率 45% 以上。综合考虑未来推广在线监测系统的安装覆盖、投入使用以及强化监管力度，能够大幅提高油气回收系统的工作效率，因此能将稳定达标运行率从 60% 提升到 90%。

情景内容如表 2-8 所示：

表 2-8 销售环节情景设计参数表

情景内容	基准情景		强化情景	
	2025	2030	2025	2030
加油站技 术减排	100% Stage I、II	100% Stage I、II	100% Stage I、II	100% Stage I、II
	10% VRU	30% VRU	50% VRU	50% VRU
	监管力度一般	监管力度加强	监管力度加强	监管力度加强
	油气回收系统	油气回收系统	油气回收系统	油气回收系统
加油站管 理减排	Stage I 稳定达标运行 率 70%	Stage I 稳定达标运行 率 80%	Stage I 稳定达标运行 率 90%	Stage I 稳定达标运行 率 90%
	Stage II 稳定达标运行 率 70%	Stage II 稳定达标运行 率 80%	Stage II 稳定达标运行 率 90%	Stage II 稳定达标运行 率 90%

2.2.3.4 末端控制领域

在基准情景中，目前我国的车用汽油标准实施的是国 VIA 阶段，并于 2023 年 1 月 1 日过渡至国 VIB 阶段。我国机动车排放标准实施的是国 VIB 阶段。

在强化情景中，在国 VIB 基础上，适当加严排放标准，假设国家在 2025 年升级推出更为严格的车用汽油与机动车排放标准。

情景内容如表 2-9 所示：

表 2-9 销售环节情景设计参数表

情景内容	基准情景		强化情景	
	2025	2030	2025	2030
机动车排放标准	国 VIB		尾气排放适当加严冷启动限值	
	尾气排放 NMHC 限值	35mg/km	蒸发排放适当加严热浸排放与运行损失限值	
	蒸发排放 IV 型试验排放限值	0.7g/test		

第 3 章 结果与讨论

3.1 汽油全过程 VOCs 排放清单及综合源谱

按照排放发生的时间、空间以及排放机制，汽油全过程可以划分为上游环节和下游使用环节，上游环节包含炼油排放（有组织排放和无组织排放）、储存蒸发（炼厂储罐和储油库储罐的边缘密封排放、挂壁损失排放、浮盘附件排放和浮盘缝隙排放）、运输蒸发（炼厂到储油库的一次装载和一次运输、储油库到加油站的二次装载和二次运输）、销售蒸发（加油站卸油和装油）四个子环节，使用过程包含车辆尾气（冷启动排放和热稳定运行）和车辆蒸发（热浸排放、分子渗透排放、通气渗透排放、碳罐排放和运行损失排放）两个子环节。在第二章搭建的汽油全过程 VOCs 计算边界下，基于关键参数输入（附件 1），计算了排放清单及综合源谱。

3.1.1 汽油全过程 VOCs 排放因子

图 3-1 展示了汽油全过程中各子环节 VOCs 排放因子的月度变化。2019 年，我国汽油全过程 VOCs 排放因子平均为 15.58 ± 4.81 g VOCs/kg fuel。汽油全过程 VOCs 排放因子呈现出明显的季节变化，冬季的排放因子达到 23.08 ± 1.27 g VOCs/kg fuel，是夏季的 1.95 倍。使用环节的 VOCs 排放因子显著高于上游环节，车辆尾气、车辆蒸发、炼油排放、储存蒸发、运输蒸发和销售蒸发的 VOCs 排放因子在总 VOCs 排放因子中的年平均占比分别为 60.82%、26.58%、0.28%、5.94%、2.86% 和 3.52%。各子排放环节 VOCs 排放因子呈现不同的季节变化，冬季车辆尾气 VOCs 排放因子是夏季的 3.80 倍，这使得其在总排放因子中的占比由夏季的 40.77% 升至冬季的 77.86%。而对于汽油全过程中与蒸发排放相关的

环节，包括上游环节中的储存蒸发、运输蒸发、销售蒸发环节以及使用过程中的车辆蒸发环节，其绝对排放因子随温度的变化趋势与车辆尾气相反，且对温度的敏感性更弱。夏季储存蒸发、运输蒸发、销售蒸发以及车辆蒸发的 VOCs 排放因子分别是冬季的 2.12、1.64、2.58 以及 1.14 倍。

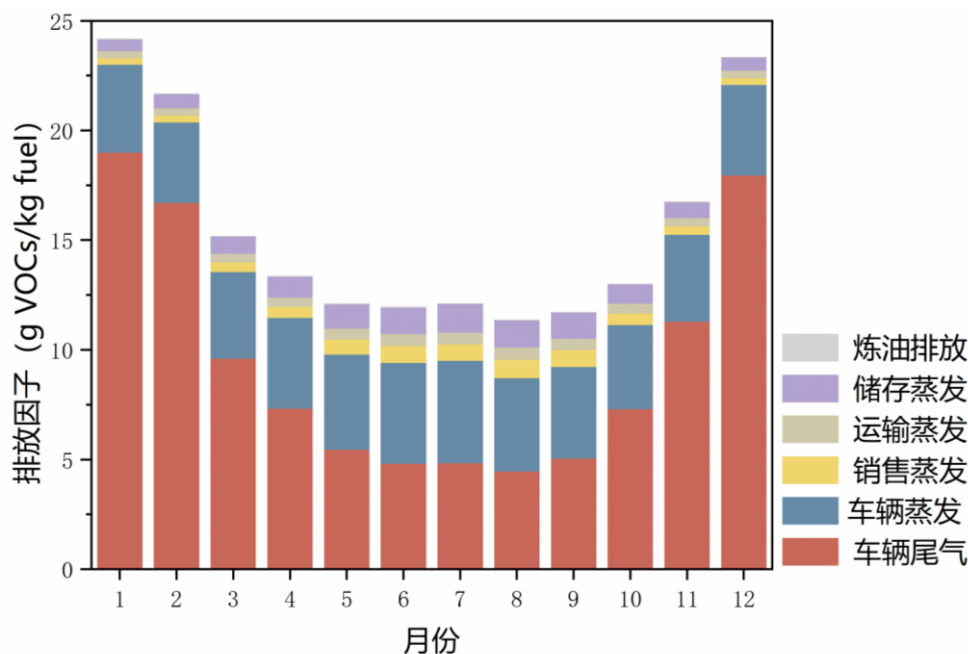


图 3-1 全国汽油全过程 VOCs 排放因子的月度变化

为了解汽油全过程 VOCs 排放因子的地区差异情况，本研究由南至北，选取了海南省、广东省、福建省、浙江省、江苏省、山东省、辽宁省、吉林省以及黑龙江省 9 个典型省份，绘制其汽油全过程 VOCs 排放因子的月度变化情况，结果展示在图 3-2 中。对于南部省份来说，全年各月份汽油全过程 VOCs 排放因子基本持平，例如海南省全年汽油全过程 VOCs 排放因子平均为 11.64 ± 0.22 g VOCs/kg fuel，广东省全年汽油全过程 VOCs 排放因子平均为 12.05 ± 0.37 g VOCs/kg fuel。而对于北部省份，汽油全过程 VOCs 排放因子呈现出非常明显的季节变化特征，例如冬季黑龙江省汽油全过程 VOCs 排放因子达到 64.21 g VOCs/kg fuel，为其夏季排放因子的 5.79 倍，吉林省冬季汽油全过程 VOCs 排放因子为夏季的 3.70 倍。

在夏季，各省份之间汽油全过程 VOCs 排放因子相差较小，平均为 11.50 ± 0.47 g VOCs/kg fuel。然而，各子环节的贡献却存在一定差异，由南至北，夏季车辆尾气对汽油全过程 VOCs 排放因子的贡献逐步增加。以最南部的海南省和最北部的黑龙江省为例，在海南省夏季汽油全过程 VOCs 排放因子中，使用过

程排放因子是上游环节排放因子的 3.08 倍，而对于黑龙江省来说，则是 4.22 倍。在使用过程中，夏季海南省车辆蒸发对汽油全过程 VOCs 排放因子贡献为 44.07%，超过了车辆尾气的贡献（31.42%），而黑龙江省车辆尾气的贡献（46.82%）更高。在冬季，各省份之间汽油全过程 VOCs 排放因子存在很大的差距，北部省份 VOCs 排放因子远高于南部省份，例如冬季黑龙江省汽油全过程 VOCs 排放因子是全国全年平均水平的 4.12 倍以及海南省冬季水平的 5.55 倍。这种差距的主要来源是北部省份冬季汽油使用过程中车辆尾气排放因子的显著增加，冬季黑龙江省车辆尾气 VOCs 排放因子是海南省的 11.30 倍，而海南与蒸发有关的排放环节 VOCs 排放因子仅是黑龙江省的 1.05 倍。

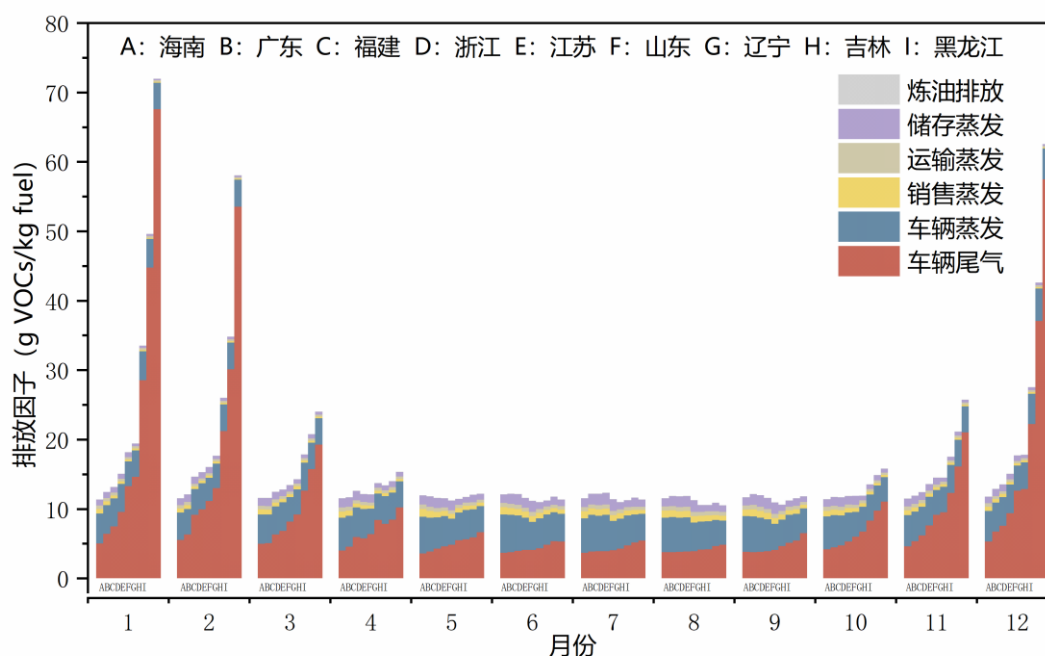


图 3-2 典型省份汽油全过程 VOCs 排放因子的月度变化

3.1.2 汽油全过程 VOCs 排放清单及空间分配

基于汽油全过程中各子环节的 VOCs 排放因子，研究计算了我国汽油全过程 VOCs 排放量。2019 年，我国汽油全过程 VOCs 排放量为 2234.43 Gg，其中，炼油排放、储存蒸发、运输蒸发、销售蒸发、车辆蒸发和车辆尾气的贡献分别为 0.31%、6.75%、3.21%、4.05%、28.50% 以及 57.18%。当考虑微观排放过程时，车辆尾气的冷启动、车辆蒸发的运行损失以及车辆尾气的热稳定运行排放较高，排放量分别为 939.43，544.59 以及 338.29 Gg。

图 3-3 展示了基于微观排放过程的全国各省份汽油全过程 VOCs 排放量的计算结果。整体来看，山东省是我国汽油全过程 VOCs 排放最高的省份，其排放量为 190.83 Gg，其次是江苏省、广东省、河北省和河南省，排放量分别为 161.28、159.16、157.33 和 141.58 Gg，这五个排放量较高的省份贡献了我国汽油全过程 VOCs 排放总量的 36.26%。西藏自治区、海南省和青海省汽油全过程 VOCs 排放较低，排放量分别为 5.05、8.67 和 17.17 Gg。在各省份的汽油全过程 VOCs 排放中，使用过程的排放均占主导，约为上游环节的 6.97 ± 2.97 倍。尽管使用过程的绝对排放量更高，各省份在上游环节和使用过程 VOCs 排放中的相对重要性存在差别。例如，广东省上游环节 VOCs 排放在全国上游环节总 VOCs 排放中占比为 10.83%，而使用过程 VOCs 排放在全国使用过程总 VOCs 排放中占比仅为 6.50%；而对黑龙江省来说，上游环节和使用过程该比例分别为 1.68% 和 4.67%。

在上游环节的 VOCs 排放中，广东省、江苏省、山东省、河南省、浙江省是 VOCs 排放量最高的五个省份，其排放占比达到上游环节总 VOCs 排放量的 40.56%。全国各省份的排放均由储存蒸发主导，储存过程蒸发平均占上游排放的 $46.69\% \pm 6.19\%$ ，在炼油厂和储油库储存过程蒸发的四个微观排放过程中，浮盘缝隙的排放较高，占储存过程蒸发总排放量的 $56.01\% \pm 0.53\%$ 。各省份销售蒸发在上游环节的 VOCs 排放中平均占比为 $28.14\% \pm 3.72\%$ ，在销售过程蒸发中，加油排放量平均为卸油排放量的 1.32 ± 0.03 倍。值得注意的是，广东省销售过程蒸发 VOCs 排放量为 10.21 Gg，远超其他省份，超过销售过程蒸发 VOCs 排放量第二位的山东省 32.34%。运输过程蒸发在上游环节的 VOCs 排放中平均占比为 $22.89\% \pm 2.65\%$ ，其中一次装载、一次运输、二次装载、二次运输对运输过程蒸发 VOCs 排放的贡献分别为 $12.86\% \pm 0.99\%$ 、 $20.17\% \pm 2.04\%$ 、 $44.56\% \pm 3.32\%$ 以及 $22.41\% \pm 2.27\%$ 。而炼油排放对各省份上游环节 VOCs 排放的贡献较低，占比约为 $2.28\% \pm 0.37\%$ 。尽管各省份汽油上游环节 VOCs 的绝对排放量存在差异，但总的来说各省份之间排放构成差距较小。

在使用过程的 VOCs 排放中，山东、河北、江苏、广东、河南是 VOCs 排放量最高的五个省份，其排放占比达到使用过程总 VOCs 排放量的 35.57%。除海南省外，我国所有省份车辆尾气 VOCs 排放均超过了车辆蒸发排放，车辆尾气排放平均为车辆蒸发排放的 2.28 ± 1.05 倍。从微观排放过程来看，车辆尾气

中的冷启动主导使用过程 VOCs 排放，占比为 48.98% ± 12.70%，车辆蒸发排放中运行损失的贡献为 28.52% ± 7.24%，超过车辆尾气的热稳定运行（17.48% ± 3.97%）。对于海南省来说，车辆蒸发排放是车辆尾气排放的 1.08 倍，此时车辆蒸发的运行损失成为使用过程 VOCs 排放的主要贡献者，占比为 41.78%，其次是车辆尾气的冷启动（24.15%）和热稳定运行（23.88%）。各省份汽油使用环节 VOCs 排放量、排放构成均存在较大差距，因此，有必要针对各省份排放特征制定本地化的减排政策。

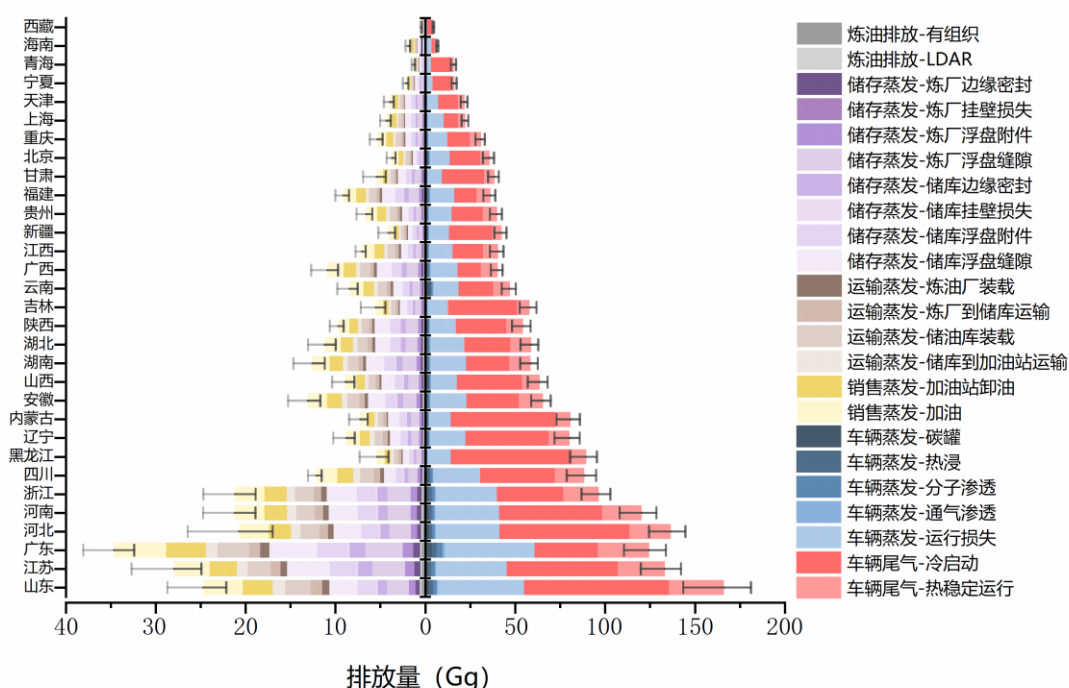


图 3-3 全国各省份汽油全过程 VOCs 排放量

为把握汽油全链条 VOCs 排放的空间分布情况，研究利用人口、路网交通强度、加油车数量、炼油厂产能分布等活动水平相关信息将排放量分配到 36×36 km 的空间网格中，使用的空间分配参数如图 3-4 所示。上游环节的 VOCs 排放基于炼厂的分布及产能、加油站的分布进行空间分配。对于使用过程，首先基于人口分布识别城市和乡村地区，接着基于城市和乡村地区的路网交通流强度对使用过程 VOCs 排放进行空间分配。2019 年 1 月、4 月、7 月、10 月我国汽油全过程 VOCs 排放的空间分布情况如图 3-5 所示。在空间分布方面，汽油全过程 VOCs 排放集中在经济较发达的我国中部、东部沿海以及东南沿海地区。在季节变化方面，1 月我国北部地区特别是东北部地区汽油全过程 VOCs 排放明显

高于其他季节，这与冬季我国北部地区较低的气温促进了车辆尾气中的冷启动排放有关。

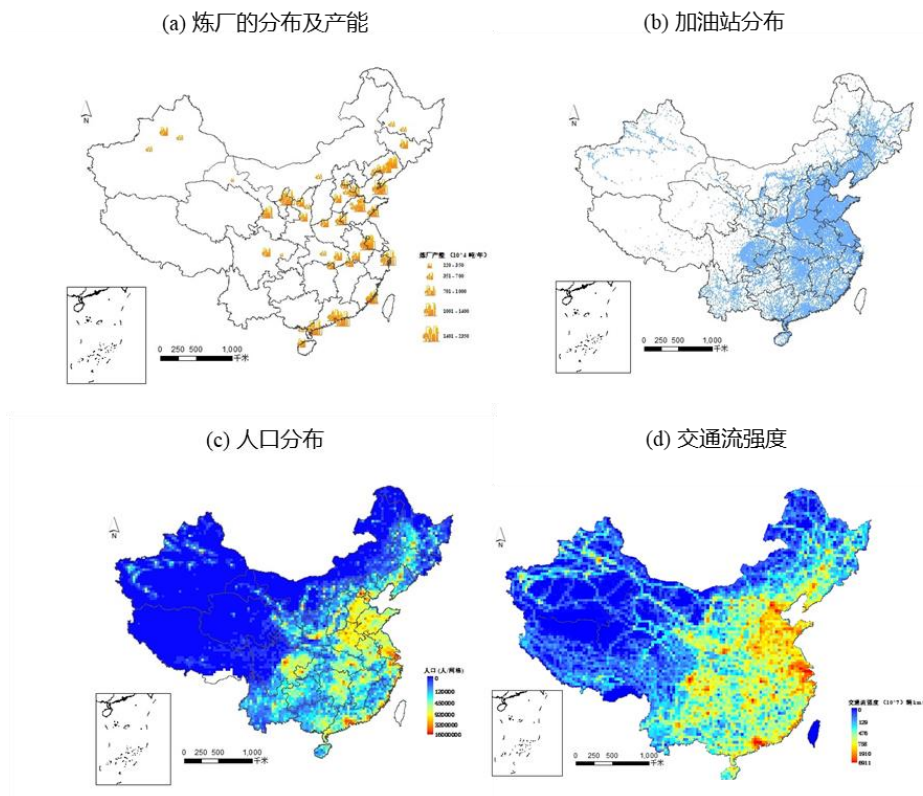


图 3-4 空间代用参数：（a）炼厂的分布及产能；（b）加油站的分布；（c）人口分布；（d）交通流强度

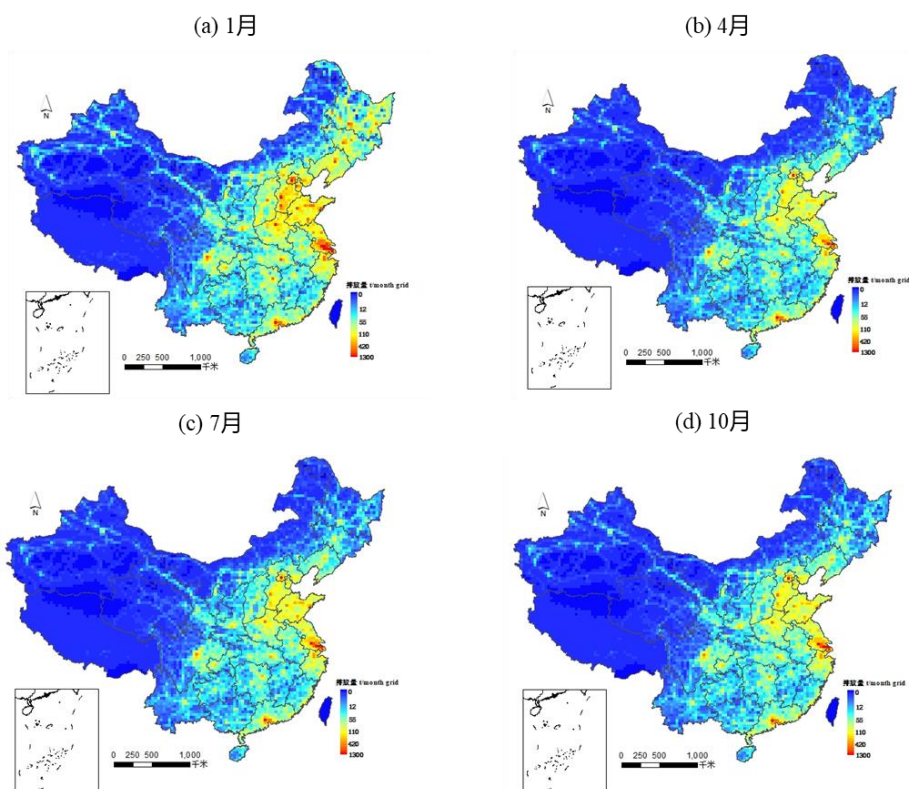


图 3-5 我国汽油全过程 VOCs 空间分布情况：（a）1 月；（b）4 月；（c）7 月；（d）10 月

3.1.3 汽油全过程 VOCs 排放综合源谱

根据文献调研得到的各排放环节物种组成，研究计算了汽油全过程 VOCs 排放综合源谱，结果展示在图 3-6 中。上游环节炼制环节 VOCs 排放以烷烃（47.55%）、烯烃（13.71%）和芳香烃（13.80%）为主，丙烷是优势物种。上游环节储存、运输、销售蒸发环节 VOCs 物种具有相似性，排放由烷烃主导，特别是在储运蒸发环节中烷烃贡献达到 92.65%。在销售蒸发环节中烷烃的贡献为 70.49%，烯烃也有一定贡献（17.51%）。异戊烷是储运销蒸发环节的优势物种。由于汽油的燃烧，使用过程中车辆尾气的 VOCs 源谱与其他过程差异明显。芳香烃贡献较高，约为 32.55%，其次是 OVOCs（25.03%）、烷烃（21.80%）、烯烃（11.05%）、卤代烃（9.56%）。车辆尾气 VOCs 物种构成与排放标准有关，随着排放标准的加严，OVOCs 的贡献由国一的 3.06% 升至国五的 37.41%。车辆尾气 VOCs 排放的优势物种为甲苯、甲醛。对于使用过程的车辆蒸发环节，其 VOCs 源谱特征与上游环节类似。VOCs 排放以烷烃（66.81%）和烯烃（12.89%）为主，优势物种为异戊烷、丙烷、正丁烷及 MTBE。

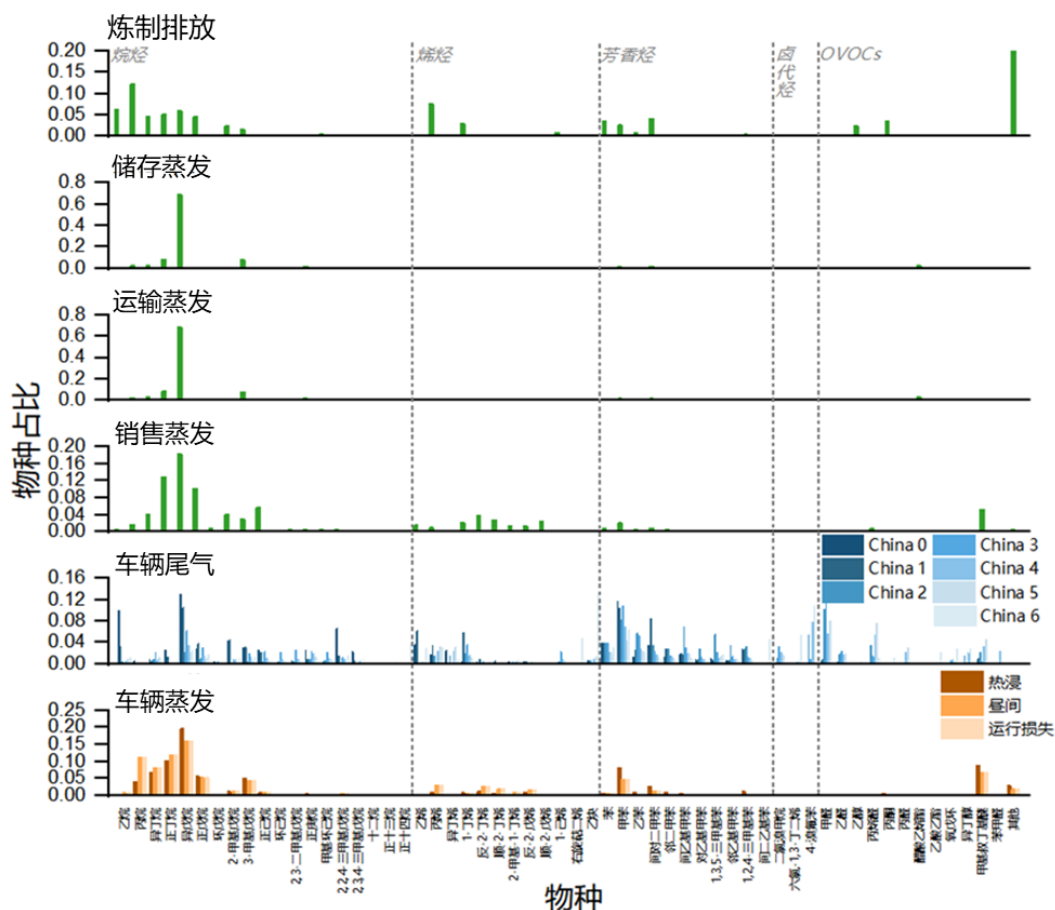


图 3-6 我国汽油全过程 VOCs 排放综合源谱

根据 Cater 等^[52]提出的最大增量反应性（MIR）方法，本研究根据物种的相对臭氧反应活性对计算得到的 VOCs 排放因子进行加权，得到了汽油全过程中各排放环节 VOCs 物种的臭氧生成潜势（OFPs），如图 3-7 所示。尽管在各 VOCs 排放环节中烷烃均有较高的排放因子且占比较高，但由于其 MIR 较其他物种低，因此在考虑 OFPs 时，烷烃的重要性被削弱，而烯烃、芳香烃和 OVOCs 的重要性上升。在上游环节中，烯烃对炼制排放和销售蒸发 OFPs 的贡献较高，贡献分别为 55.02% 和 62.89%，炼制排放环节中对 OFPs 贡献最高的物种为丙烯，销售蒸发环节中对 OFPs 贡献最高的物种为反-2 丁烯和顺-2 丁烯。在储存蒸发和运输蒸发环节中，由于烷烃排放量的绝对优势，烷烃对 OFPs 的贡献为 78.24%，此外芳香烃的贡献（16.79%）同样不可忽视，储运蒸发环节中对 OFPs 贡献最高的物种为异戊烷。在使用过程中，车辆尾气中 OVOCs 对 OFP 贡献最高，其贡献为 37.16%，其次是芳香烃（32.55%）和烯烃（11.05%），对 OFPs 贡献最高的物种为甲醛、甲苯以及丙烯醛。蒸发环节烯烃（52.65%）和烷

烃（26.65%）对 OFPs 的贡献较高，OFPs 的优势物种为反-2-丁烯、丙烯和顺-2-丁烯。

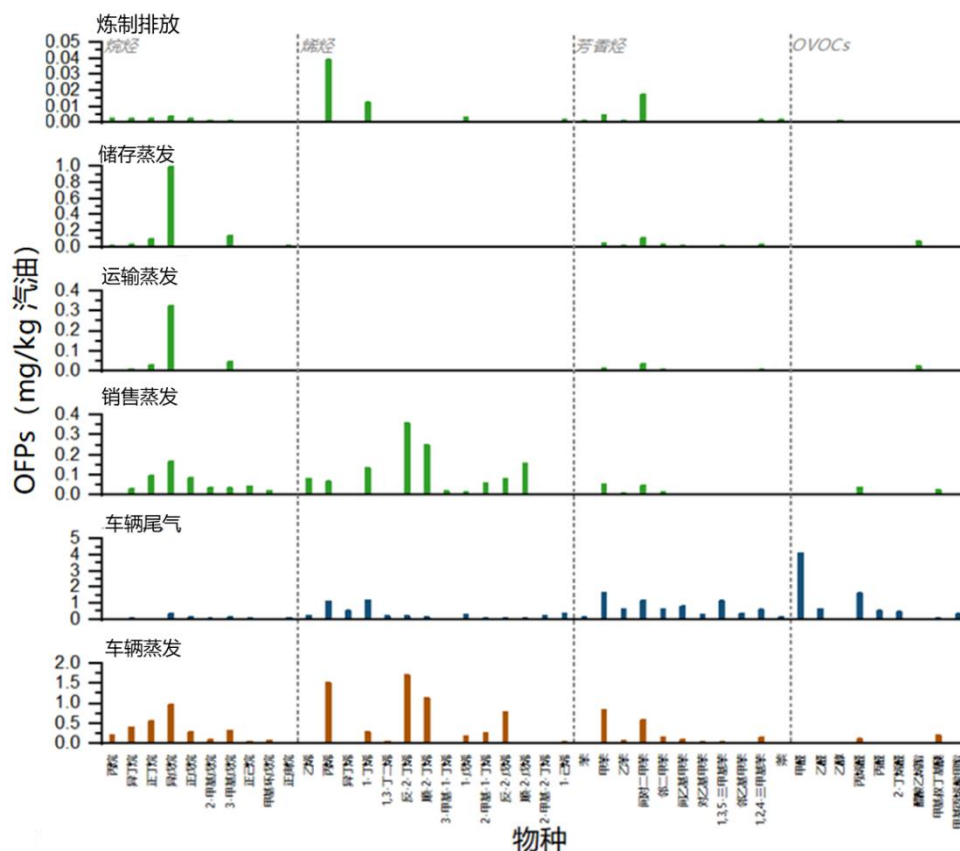


图 3-7 我国汽油全过程 VOCs 臭氧生成潜势

根据以上的计算结果，研究进一步整理了 2019 年我国分省和分月份汽油全过程 VOCs 排放综合源谱。如图 3-8 (a) 所示，我国汽油全过程 VOCs 排放综合源谱呈现出明显的季节变化特征。尽管各月份中物种贡献从高至低的顺序均为烷烃>芳香烃>OVOCs>烯烃>卤代烃，且优势物种类似，但是在夏季（6 月、7 月和 8 月）烷烃的贡献可达 $54.37 \pm 0.20\%$ ，远高于烷烃在冬季（12 月，1 月和 2 月）的贡献（ $34.68 \pm 0.53\%$ ）。在烷烃中，异戊烷的季节变化最明显，此外正丁烷、异丁烷和丙烷也呈现出较明显的季节变化。与烷烃的变化趋势相反，芳香烃、卤代烃和 OVOCs 在冬季的贡献高于夏季，芳香烃在夏季和冬季的贡献分别为 $17.62 \pm 0.08\%$ 和 $26.60 \pm 0.23\%$ ，其月际变化由甲苯主导；卤代烃在夏季和冬季的贡献分别为 $3.70 \pm 0.02\%$ 和 $7.15 \pm 0.09\%$ ，其月际变化由 4-溴氟苯主导；OVOCs 在夏季和冬季的贡献分别为 $13.75 \pm 0.06\%$ 和 $20.54 \pm 0.18\%$ ，其月际变化由甲醛、丙烯醛主导。而烯烃对汽油全过程 VOCs 排放量的贡献在全年各月份相对稳定，全年的变化区间为 10.55%~11.07%。由于综合源谱的月际和省际变化均与气温的变化有关，因此变化趋势相似。图 3-8 (b) 展示了我国从南至北 9 个典型省份汽油全过程 VOCs 排放综合源谱。烷烃在南方省份的贡献远高于北方省份，

烷烃对海南省，广东省和福建省汽油全过程 VOCs 排放的贡献分别为 54.39%，53.28% 和 50.97%，而对辽宁省，吉林省和黑龙江省的贡献分别为 39.51%，36.48% 和 32.20%。而芳香烃、卤代烃和 OVOCs 对北方省份汽油全过程 VOCs 排放的贡献高于南方省份，烯烃的贡献在各省份之间差异不大。

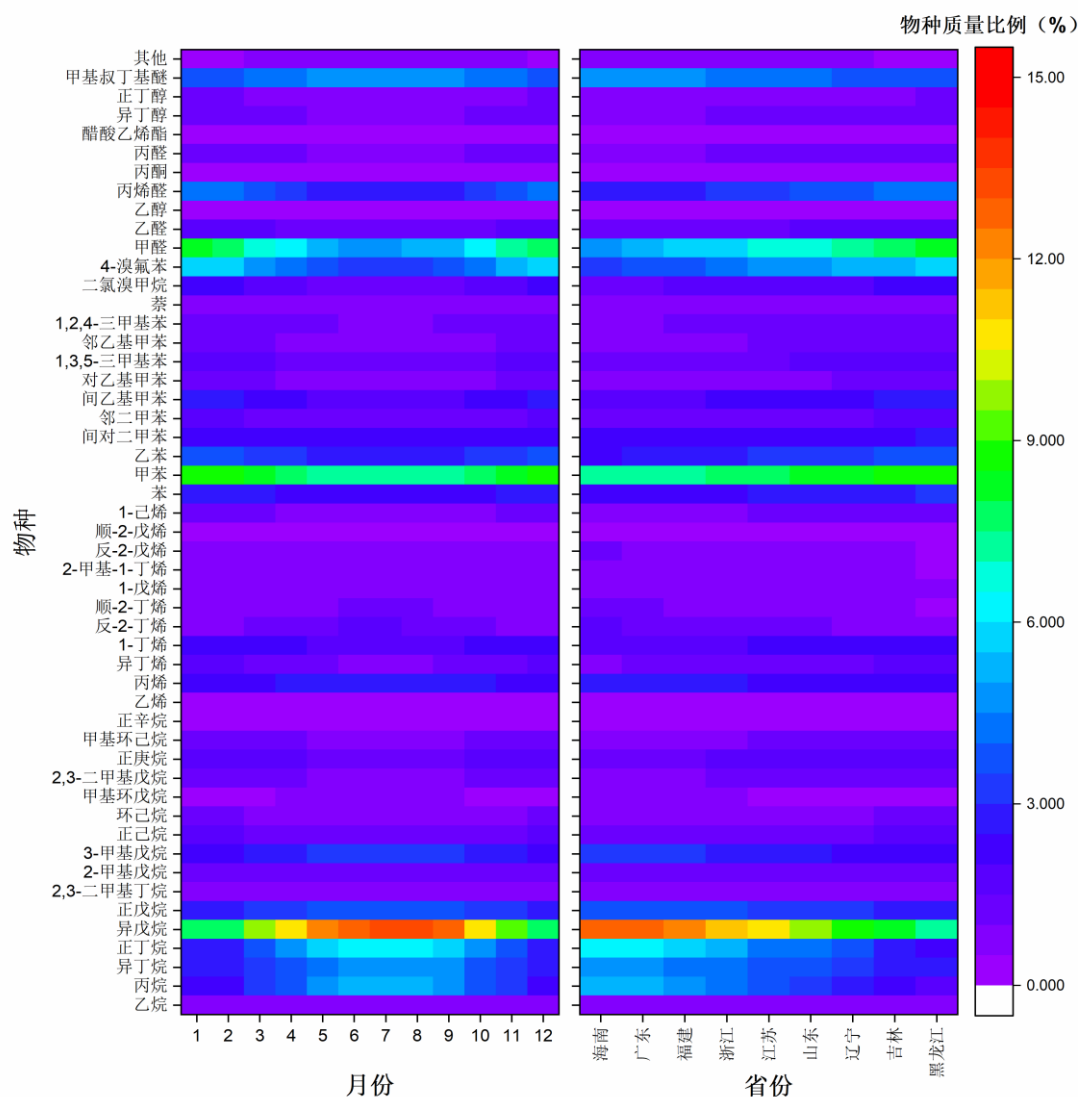


图 3-8 2019 年我国 (a) 分月份汽油全过程 VOCs 排放综合源谱；(b) 分省汽油全过程 VOCs 排放综合源谱

3.2 汽油全过程 VOCs 未来排放及控制效益研究

3.2.1 汽油全过程 VOCs 未来排放量

通过比较基准情景 (Baseline) 以及最强化情景 (Strengthen) 汽油全链条 VOCs 排放总量的变化，可以直观确定各环节减排措施的加强与否对总排放量影响的上下限。2019-2030 年两种边界情景下汽油全链条 VOCs 排放总量的变化情况如图 3-9 所示。情境具体参数设置见附表 1。基准情景下，2025 年汽油全链

条 VOCs 排放总量为 1778.01 Gg，炼制环节、储存环节、运输环节、销售环节以及使用环节的尾气排放和蒸发排放分别排放了 7.69 Gg、147.54 Gg、77.52 Gg、83.41 Gg、939.05 Gg 和 522.80 Gg，与 2019 年相比下降了 456.42 Gg，减排比例为 20.43%。2030 年汽油全链条 VOCs 排放总量为 1270.92 Gg，炼制环节、储存环节、运输环节、销售环节以及使用环节的尾气排放和蒸发排放分别排放了 7.00 Gg、116.21 Gg、69.45 Gg、64.86 Gg、698.70 Gg 和 314.69 Gg，与 2019 年相比下降了 963.51 Gg，减排比例为 43.12%。

强化情景下，2025 年汽油全链条 VOCs 排放总量为 1664.27 Gg，炼制环节、储存环节、运输环节、销售环节以及使用环节的尾气排放和蒸发排放分别排放了 7.16 Gg、116.86 Gg、61.64 Gg、59.39 Gg、905.78 Gg 和 513.67 Gg，与 2019 年相比下降了 570.16 Gg，减排比例为 25.52%。2030 年汽油全链条 VOCs 排放总量为 936.02 Gg，炼制环节、储存环节、运输环节、销售环节以及使用环节的尾气排放和蒸发排放分别排放了 5.59 Gg、57.83 Gg、41.65 Gg、28.01 Gg、533.45 Gg 和 269.50 Gg，与 2019 年相比下降了 1298.41 Gg，减排比例为 58.11%。强化情景与基准情景相比，到 2030 年，加油环节减排幅度最大，减排了该环节 69.01% 的排放，其次为储存环节、使用环节的蒸发排放和尾气排放、以及运输环节，分别减排了该环节 61.65%、58.25%、57.69%、41.93% 的排放量；炼油环节的减排幅度最小，仅为 19.27%。

从减排量绝对值来看，使用环节具有最大的减排潜力，对使用环节加强减排措施可以最有效降低总减排量；从减排比例来看，除炼制环节基本没有减排潜力外，其他环节依然具有将近 50% 甚至更大的减排空间。从短期来看，使用环节的减排是最急需的，但从长远角度来看，储运销环节的减排也是必要的。

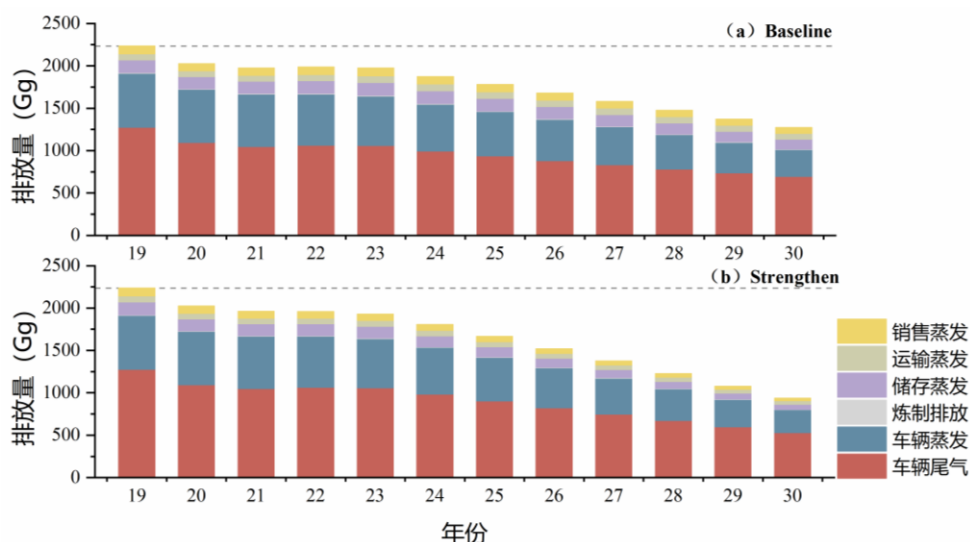


图 3-9 2019~2030 年两种边界情景下汽油全链条 VOCs 排放总量的变化情况

不同情景下，汽油全链条各环节 VOCs 排放占比存在一定的差异。2019~2030 年两种边界情景下汽油全链条 VOCs 排放占比变化如图 3-10 所示。基准情景下，2019 年，上游环节排放 VOCs 占总排放的 14.31%，使用环节尾气占比为 57.18%，蒸发排放占比为 28.50%；到 2030 年，上游环节排放占比有所增加，为 20.09%，相比 2019 年上升了 5.77%，蒸发排放降至 24.81%，下降了 3.69%，尾气排放降至 55.09%，下降了 2.09%。相比而言，强化情景下，到 2030 年，上游环节排放占比有所增加，为 14.22%，蒸发排放占比 28.79%，尾气排放占比 56.99%，各部分占比基本与 2019 年保持不变。

总体来看，基准情景下，如果不对现有政策及措施进行强化管控，上游环节的排放占比将略有上升，特别是储存排放与运输排放，但绝对量占比仍仅有 20% 左右；而下游使用环节中，蒸发排放的占比将逐渐减少，尾气排放的比例可能保持不变或上升。但当在全链条环节实施了强化的管控措施时，可以达到全链条各环节协同减排的效果。

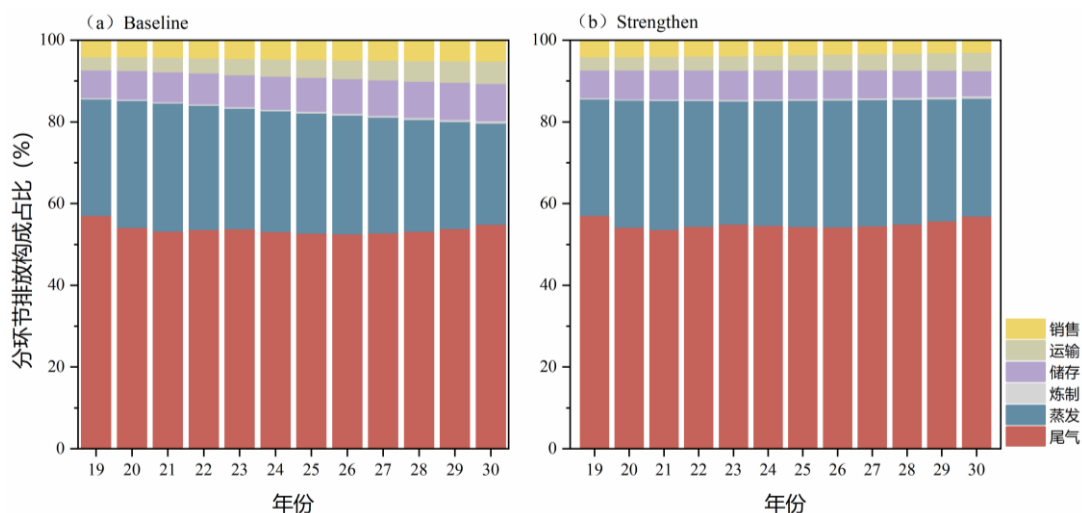


图 3-10 2019~2030 年两种边界情景下汽油全链条 VOCs 排放占比变化

进一步地，本研究讨论了三种情景下我国汽油使用环节 VOCs 排放量，如图 3-11 所示。中间情景相比于基准情景，从 2025 年起新增了标准更严的国 7 排放标准；强化情景相比于中间情景，从 2025 年起，每年新增车辆中电动车辆的比例不同，强化情景中的新车电动化比例显著高于中间情景。从图中可以看出，三种情景的排放差异主要体现在 2025—2030 年期间。基准情景下，2019 年我国汽油使用环节排放 VOCs 总量为 1914.61 Gg，其中国 1—国 5 各标准车辆分别排放了 85.95 Gg、150.94 Gg、492.13 Gg、701.19 Gg、484.40 Gg，分别占总排放的 4.49%、7.88%、25.70%、36.62%、25.30%；到 2025 年，我国汽油使用环节预计将排放 VOCs 总量为 1461.84 Gg，比 2019 年下降了 23.65%，其中国 1—国 6 各标准车辆分别排放了 4.73 Gg、9.12 Gg、124.86 Gg、508.07 Gg、457.57 Gg、357.48 Gg，分别占总排放的 0.23%、0.62%、8.54%、34.76%、31.30%、24.45%；到 2030 年，我国汽油使用环节预计将排放 VOCs 总量为 1013.39 Gg，比 2019 年下降了 47.07%，其中国 1—国 6 各标准车辆分别排放了 0 Gg、0.19 Gg、20.03 Gg、104.19 Gg、262.07 Gg、626.91 Gg，分别占总排放的 0%、0.02%、1.98%、10.28%、25.86%、61.86%。该情景下，淘汰老旧标准车辆促进了车队排放标准的提升，国 6 标准车辆在车队占比中的升高导致了尾气排放的迅速下降，且随着保有量的增加和国 6 车辆占比的提升，使用环节的 VOCs 排放逐渐集中于国 6 标准车辆。此外，车队的更新还导致了使用环节各阶段排放占比的变化。2019 年，冷启动阶段 VOCs 排放占总排放的比例最高，为 42.04%，其次为运行损失，占 24.37%，热稳定运行阶段 VOCs 排放、碳罐排放、热浸排放、分子渗透排放、

通气渗透排放占比很小，分别为总排放的 15.14%、1.45%、1.11%、1.08%、0.49%；随着车队更新，冷启动排放的占比逐渐上升，到 2030 年，冷启动阶段 VOCs 排放占总排放的比例达到了 51.49%，其次为运行损失，占 19.99%，碳罐排放、热浸排放、分子渗透排放、通气渗透排放占比分别为总排放的 3.61%、1.08%、2.06%、1.32%、0.36%。相比而言，随着车队排放标准逐渐更新至国 6，热稳定运行阶段排放、蒸发排放特别是运行损失得到了有效的控制，但热浸排放、分子渗透排放的比例有所上升，冷启动阶段排放更是上升了较大的比例，因此在未来车队更新后，需要对冷启动排放阶段给予更高的重视。

中间情景设计于 2025 年实施了国 7 标准，因此相比于基准情景，使用环节产生了更大的减排。中间情景下，到 2030 年，我国汽油使用环节预计将排放 VOCs 总量为 912.48 Gg，比 2019 年下降了 54.23%，其中国 1—国 7 各标准车辆分别排放了 0 Gg、0.19 Gg、20.03 Gg、104.19 Gg、262.07 Gg、273.27 Gg、216.56 Gg，分别占总排放的 0%、0.02%、2.19%、11.42%、28.72%、29.95%、23.73%。随着车队排放标准逐渐更新至国 7，使用环节 VOCs 排放也逐渐集中于国 7 车辆。国 7 标准的实施使使用环节 VOCs 的减排量增加了 137.08 Gg，将近 2019 年的 7%，而这一部分全部来自于冷启动阶段的减排。中间情景在 2030 年，冷启动阶段 VOCs 排放占总排放的比例达到了 48.00%，其次为运行损失，占 20.30%，碳罐排放、热浸排放、分子渗透排放、通气渗透排放占比分别为总排放的 4.03%、1.21%、2.07%、1.28%、0.40%。与 2019 年相比而言，随着车对排放标准在 2025 年后更新至国 7，热浸排放、分子渗透排放的比例有所上升，冷启动阶段排放的比例依然有较大幅度的上升，但冷启动阶段排放的增幅已不如仅更新至国 6 标准那么明显。

强化情景设计于 2025 年进行新增车辆的强化电动化，并同时实施国 7 标准，其减排效益要比单纯实施国 7 标准更大。强化情景下，到 2030 年，我国汽油使用环节预计将排放 VOCs 总量为 802.95 Gg，比 2019 年下降了 58.06%，其中国 1—国 7 各标准车辆分别排放了 0 Gg、0.19 Gg、20.03 Gg、104.19 Gg、262.07 Gg、261.77 Gg、154.69 Gg，分别占总排放的 0%、0.02%、2.49%、12.98%、32.64%、32.60%、19.27%。尽管随着国 7 标准的实施，与中间情景相类似，车队排放标准逐渐更新，使用环节 VOCs 排放也逐渐集中于国 7 车辆，但随着新车电动化的强度越来越大，国 7 标准车辆的排放占比反而不如中间情景，这是

因为随着更多的新车份额流入电动化车队，国 7 标准汽油车的保有量增幅趋缓，因此其排放占比也随之降低了。此外，强化情景在 2030 年，冷启动阶段 VOCs 排放占总排放的比例达到了 52.21%，其次为运行损失，占 23.32%，碳罐排放、热浸排放、分子渗透排放、通气渗透排放占比分别为总排放的 4.78%、1.38%、2.22%、1.42%、0.46%。相比起中间情景，新车强化电动化的实施基本没有对各阶段的排放比例造成影响，这也是由新车电动化仅作用于保有量而不作用于排放因子所决定的。

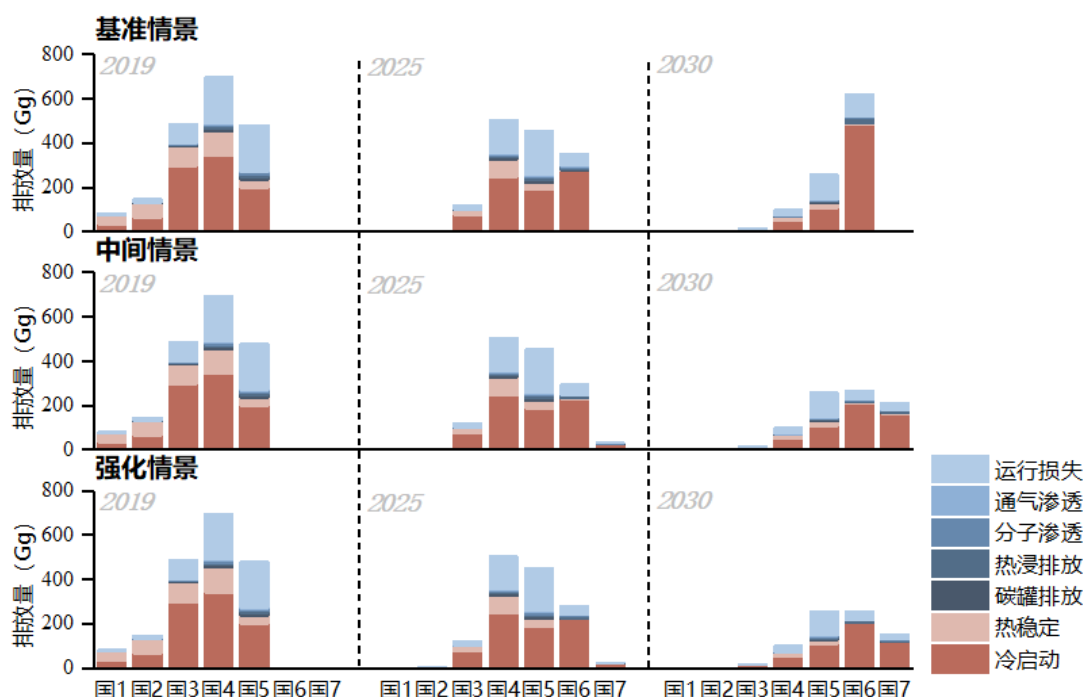


图 3-11 使用环节各排放标准车辆在不同情景下的排放变化

3.2.2 汽油全过程 VOCs 排放的控制效益

本研究对强化情景下各环节的排放因子变化进行了计算，从而探讨影响汽油全过程 VOCs 排放的主要因素。汽油全链条 VOCs 排放各环节排放因子减排效益展示在图 3-12 中。炼制环节各减排措施对排放因子影响较小，每五年仅减排 5%左右，排放因子的绝对量相比其他环节也是最小的，这与我国炼厂 VOCs 排放控制较为严格有关；储存环节每五年排放因子降低量相似，但减排比例呈上升趋势（28%→40%），这是因为在我们的强化情景中，对储罐构造，储库容积都有着持续性的优化设计；运输环节的排放因子降低量和对应比例会有走低趋势（24%→17%），这是因为强化情景对一次装载的加强控制和运输结构

的调整是有限的，减排潜力也相对较小；销售环节通过不断提高一、二阶段油气回收设施的达标运行率，推广普及油气回收处理装置（VRU）的使用，有效降低了加油站环节的排放因子，每五年约减排 42%；在下游使用环节，我们发现尾气、蒸发排放因子降低的主要驱动力是基准情景下国六车对老旧车的更新迭代，由于基准情景的电动化率已有较高的增幅，导致加速电动化的减排效益并不明显，2025 年对尾气、蒸发排放因子分别减排 0.35%、1.06%，2030 年对尾气、蒸发排放因子分别减排 8.73%、1.52%。由于强化情景中 2025 年开始实施国 7 标准，因此 2025 年当年国 7 车市场占有率较低，升级机动车标准的减排效益将体现在中后期，2025 年对尾气、蒸发排放因子分别减排 1.34%、0.66%，2030 年对尾气、蒸发排放因子分别减排 10.89%、4.92%。由此可见，上游环节 VOCs 减排的主要驱动力是储存环节储罐构造的更新升级、防止劣化，以及销售环节一、二阶段油气回收设施达标运行率的提高。下游环节 VOCs 减排的主要驱动力是基准情景下国六车对老旧车的更新迭代，以及我国目前新能源汽车市场的高速发展趋势，加速电动化与升级机动车标准均能进一步提升减排效益，但在短期内不明显，将体现在 2030 年左右的中后期。

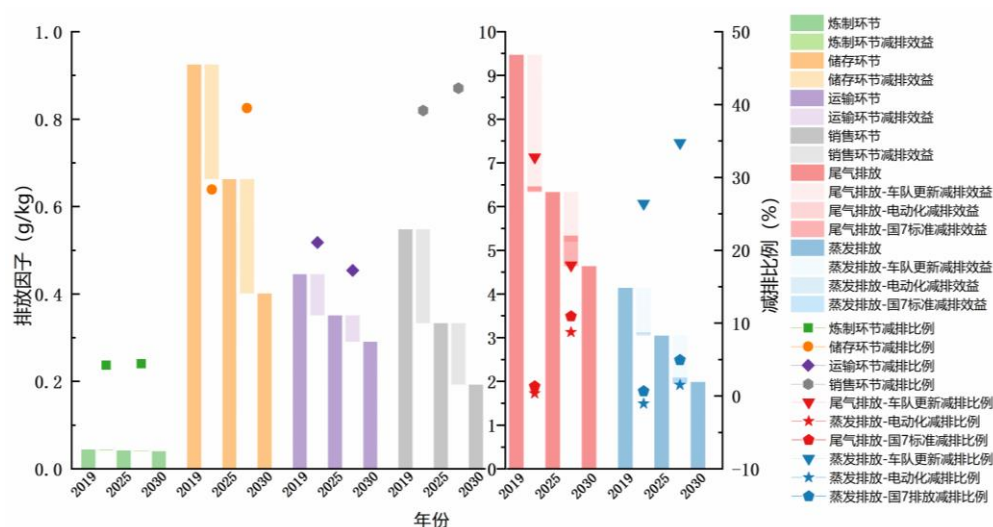


图 3-12 汽油全链条 VOCs 排放各环节排放因子减排效益

为了对汽油全链条各环节管控措施的有效性进行定量分析，本研究对强化情景下各环节的管控措施相对应的减排效益进行了计算。汽油全链条 VOCs 排放各环节总量减排效益展示在图 3-13 中。2019 年汽油车保有量为 22230 万辆，使用环节尾气排放量为 1277.72 Gg，蒸发排放量为 636.89 Gg。2019-2025 年和 2025-2030 年，汽油车分别增加了 16806 万辆和 34212.18 万辆。在没有老旧车淘

汰的情况下，2025年汽油全过程 VOCs 排放量为 2801.88 Gg。相比于 2019 年，炼制环节排放量增加了 3.55 Gg，储存环节排放量增加了 50.08 Gg，运输环节排放量增加了 33.82 Gg，销售环节排放量增加了 24.67 Gg，使用环节 VOCs 排放量增加了 455.34 Gg，其中尾气排放增加了 354.31 Gg，蒸发排放量增加了 101.03 Gg。2030 年汽油全过程 VOCs 排放量为 3350.18 Gg，其中炼制环节排放量为 13.51 Gg，储存环节排放量为 224.11 Gg，运输环节排放量为 133.93 Gg，销售环节排放量为 137.06 Gg，使用环节排放量为 2841.57 Gg。

在新车增加的情况下同时淘汰老旧车，2019-2025 年和 2025-2030 年分别淘汰 11261.28 万辆和 31328.72 万辆。2025 年汽油全过程 VOCs 排放量为 1909.67 Gg。相比于 2019 年，上游-炼储运销环节 VOCs 排放量增加了 33.67 Gg，下游-使用环节 VOCs 排放量降低了 357.53 Gg。2030 年汽油全过程 VOCs 排放量为 1353.26 Gg，其中炼制环节排放量为 7.72 Gg，储存环节排放量为 105.10 Gg，运输环节排放量为 66.06 Gg，销售环节排放量为 51.94 Gg，使用环节排放量为 1122.44 Gg。

考虑到电动化的普及，新增车辆中存在部分车辆为电动车，且同时淘汰老旧车，2019-2025 年和 2025-2030 年新增车辆中分别有 3563 万辆和 6490 万辆为电动车。2025 年汽油全过程 VOCs 排放量为 1779.84 Gg。相比于 2019 年，上游-炼储运销环节 VOCs 排放量降低了 3.14 Gg，而下游-使用环节 VOCs 排放量降低了 474.34 Gg。2030 年汽油全过程 VOCs 排放量为 1307.32 Gg，其中炼制环节排放量为 7.25 Gg，储存环节排放量为 120.26 Gg，运输环节排放量为 71.87 Gg，销售环节排放量为 66.88 Gg，使用环节排放量为 1041.06 Gg。如果加快电动化进程，2019-2025 年和 2025-2030 年新增车辆中分别有 4462.15 万辆和 9767.51 万辆为电动车，同时提高上游环节各过程的控制效率，更新储罐构造与技术、优化一次运输结构，则 2025 年和 2030 年汽油全过程 VOCs 排放量分别再次降低 74.64 Gg 和 176.27 Gg。

假设 2025 年开始进一步升级机动车标准，新增车辆实行国 7 标准。2025 年汽油全过程 VOCs 排放量为 1756.95 Gg，其中上游-炼储运销环节排放量不受标准升级影响，下游-使用环节排放量则降低了 4.73 Gg，为 1440.27 Gg。相比于 2019 年，使用环节 VOCs 排放量降低了 474.34 Gg，其中尾气排放降低了 355.81 Gg，蒸发排放量降低了 118.53 Gg。2030 年汽油全过程 VOCs 排放量为 1169.78

Gg，其中使用环节排放量为 903.52 Gg。如果加快电动化进程，同时提高上游环节各过程的控制效率，更新储罐构造与技术、优化一次运输结构，则 2025 年和 2030 年汽油全过程 VOCs 排放量分别再次降低 92.68 Gg 和 129.97 Gg。

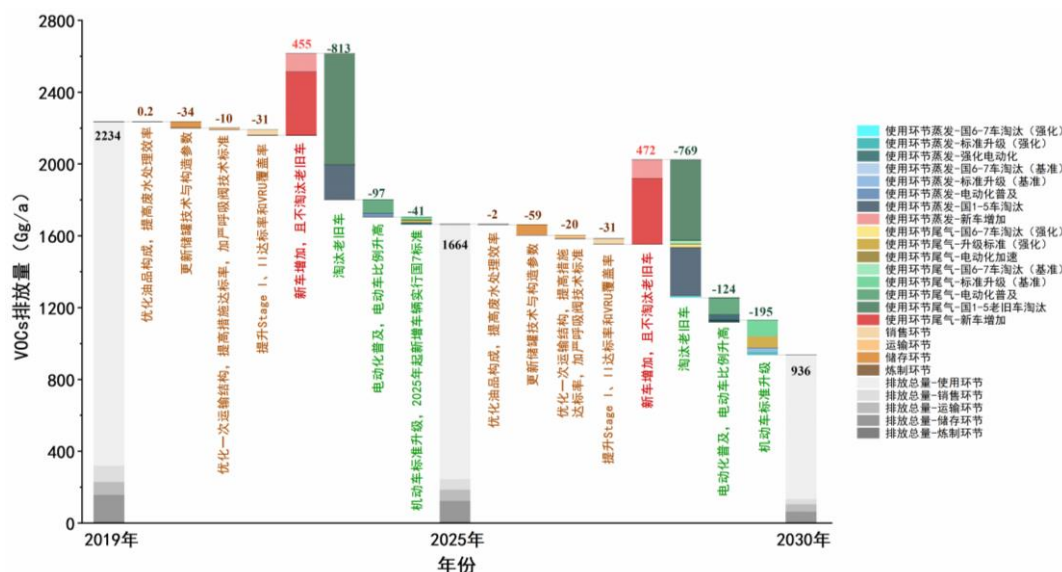


图 3-13 汽油全链条 VOCs 排放各环节总量减排效益

汽油全过程中各环节的 VOCs 生成后，采取的排放控制措施是影响其最终排放量的关键。对上游环节各排放过程，虽然储罐蒸发排放是核心排放过程，但其排放控制主要依赖于储罐工程改造，并未有对应的后处理设施。图 3-14 展示了综合处理效率对汽油上游其他环节 VOCs 生成量及排放量的影响。从图中可以看出，炼制环节现有排放控制已非常有效，FCC 及 CR 以及废水处理的综合控制效率分别达到了 90%和 89.5%，因此 VOCs 排放量较低，仅为 0.49 和 0.69 Gg。而在运输环节中，一次和二次装车过程的综合控制效率分别为 74.72%和 51.94%，而一次装船的综合控制效率仅为 6.30%，因此，尽管一次装车时 VOCs 的生成量是一次装船的 4.29 倍，一次装车和一次装船的 VOCs 最终排放量接近，分别为 2.85 和 2.46 Gg。但由于一次装船的 VOCs 生成量相对较低，提升该环节中的综合控制效率不会对汽油全过程 VOCs 排放总量产生显著的影响。在销售环节中，卸油过程和加油过程相比，VOCs 生成量较少的卸油环节的综合处理效率却更高，这使得加油过程的 VOCs 生成量是卸油过程的 1.73 倍，而加油过程的 VOCs 排放量达到了卸油过程的 2.63 倍。因此，对于上游环节，高排放环节（例如二次装车和加油排放）综合处理效率具有继续提升的潜力。

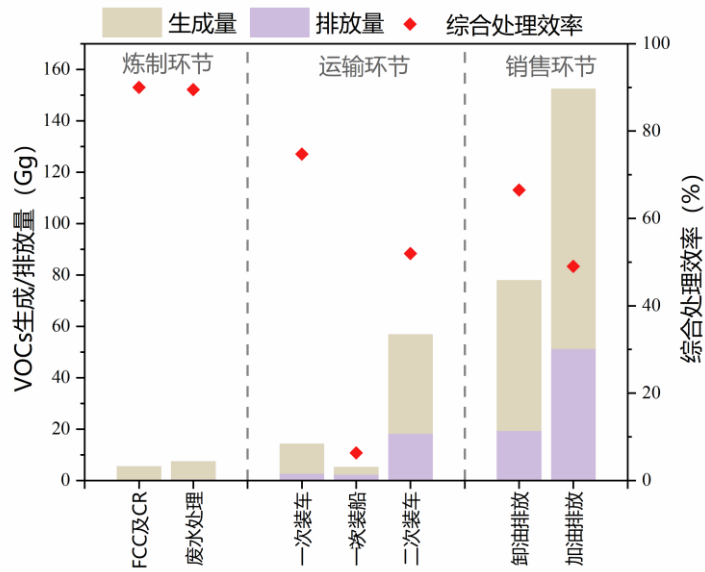


图 3-14 上游环节各环节综合处理效率以及 VOCs 生成量和排放量

制定加严的排放标准是控制下游过程 VOCs 排放的重要措施。图 3-15 展示了不同排放标准下下游过程各排放环节的 VOCs 排放因子，与指南中的排放因子相比，本研究采用的排放因子体现了精细化的排放过程，且更充分地考虑了环境条件对于我国汽油车排放因子的影响。从 2000 年开始，我国开始逐步建立轻型车排放控制体系，在国 3 标准开始，我国首次对轻型车尾气 THC 的排放限值做出了规定。因此，从国 3 标准开始，汽油车 VOCs 排放因子开始下降，且下降主要是由于尾气中热稳定运行排放削减至国 1 和国 2 汽油车的 27.18%，而与国 1 和国 2 标准相比，国 3 汽油车尾气的启动排放的排放因子没有改变。从国 4 标准开始，尾气启动排放开始下降，国 4 和国 5 车启动排放因子仅为国 3 车的 49.22% 和 28.74%。然而，与尾气热稳定运行排放因子持续下降的趋势不同，随着标准进一步加严，启动排放因子的下降潜力降低，国 6 车的启动排放因子与国 5 车相比仅降低了 9.52%。而由于国 6 标准的排放限值进一步降低，且在标准中规定了更符合实际情况的测试循环，使得国 6 汽油车的尾气 VOCs 控制效率进一步提升，热稳定运行排放因子仅为 0.002 g/km，因此启动排放在尾气中的重要性进一步上升。而对于蒸发排放来说，国 6 标准实施之前一直采用的是在部分地区加油站安装二阶段油气回收系统控制加油排放，24 小时碳罐控制昼间排放的策略。而国 6 标准执行 48 小时昼间排放及加油排放测试控制策略，因此当排放标准从国 5 加严至国 6 时，蒸发排放的排放因子才开始下降，国 6 车蒸发排放因子为国 1 至国 5 车的 22.10%。根据本研究的预测，国 7 车的尾气启动排放

和蒸发排放的 VOCs 排放因子将进一步降低至国 6 车的约 60%左右，而由于已经达到超低水平，热稳定运行的 VOCs 排放因子可能短时间内不会继续下降。因此，为降低汽油下游过程 VOCs 的排放量，未来应进一步提高对于尾气启动排放和蒸发排放的控制水平。

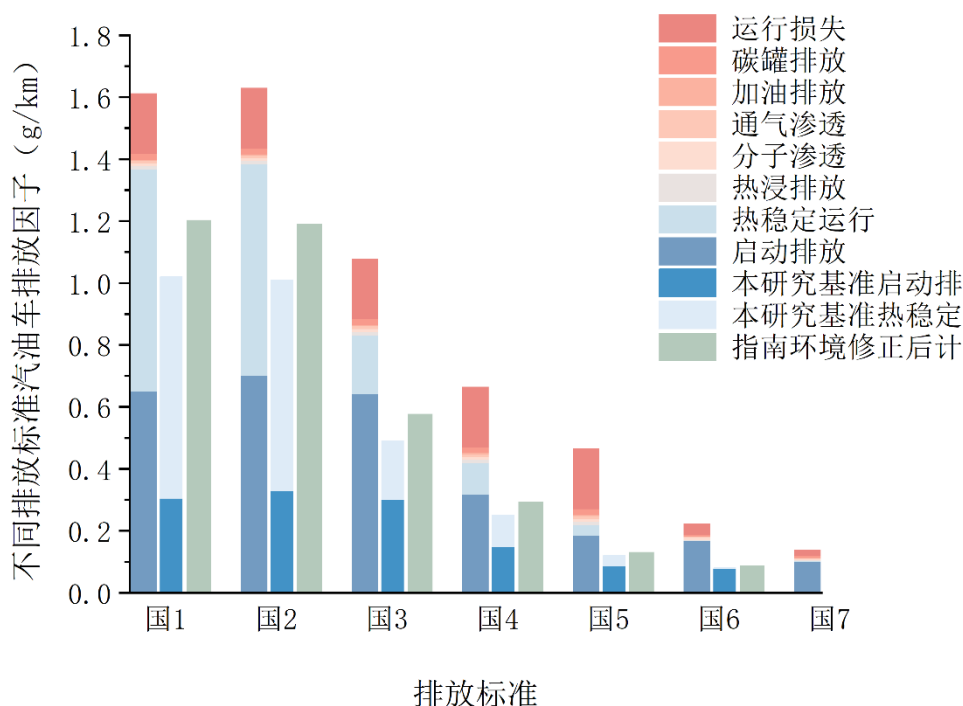


图 3-15 不同排放标准下下游过程各排放环节的 VOCs 排放因子

为了研究排放控制措施劣化产生的排放影响，本研究假定上游各环节 VOCs 排放控制措施有 10% 失效。导致的异常排放情况如图 3-16 所示。总体上看，上游环节 2019 到 2030 年 10% 控制措施失效导致的 VOCs 异常排放量由 12.85 Gg 增加至 15.84 Gg，引起的汽油全过程 VOCs 异常排放比例由 6‰ 上升至 13‰。细分到环节来看，加油环节是对控制措施失效最敏感的环节，控制措施失效 10% 造成的异常排放占比从 2019 年的 2.25% 升高到了 2030 年的 6.3%。其次是卸油环节与运输环节。这说明加油站与汽油运输环节要尤其关注现有排放控制措施的检修与维护工作，防止控制劣化情况的出现。

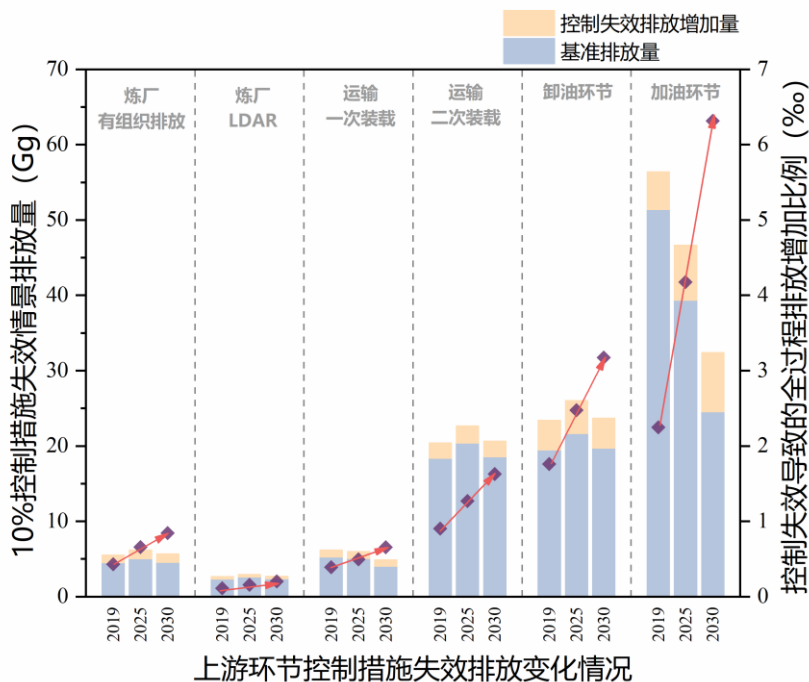


图 3-16 上游环节控制措施失效 10%时排放变化

为了研究下游环节控制劣化产生的排放影响，我们假定有 4%的在用车发生了严重劣化，尾气排放变成了国一、国二车水平，蒸发排放也严重失控。导致的异常排放情况如图 3-17 所示。总体上看，使用过程中 VOCs 排放量对于排放控制失效的敏感性强于上游环节，并且异常排放占比逐年增加。2019 年异常排放量为 339.95 Gg，占全过程排放的 15.5%；2030 年对应数值增加到了 570.61 Gg 和 46.2%。这表明尽管汽油车排放整体呈现逐年下降的趋势，在用车劣化导致的异常排放量却将逐年增加，占全过程排放的比例更是在 2030 年接近一半，因此，高排放车辆筛查将成为未来汽油全过程 VOCs 排放管控的重点。

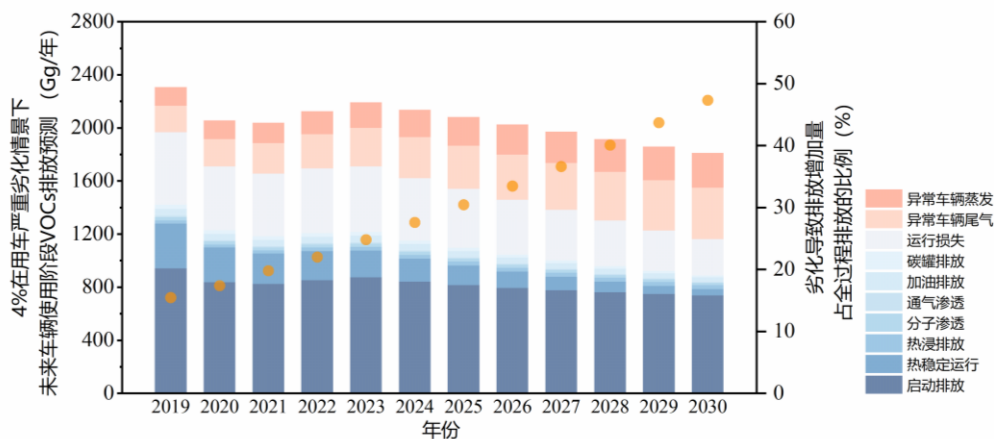


图 3-17 下游环节 4%在用车严重劣化时排放变化

综合未来汽油全过程 VOCs 排放量及主要影响因素，本研究探讨了在“十四五”和“十五五”期间，不同省份未来全过程 VOCs 排放构成及减排潜力。由于不同省份其 VOCs 排放构成有所差异，其减排效益也有所不同，本研究由南至北，选取了海南省、广东省、福建省、浙江省、江苏省、山东省、辽宁省、吉林省以及黑龙江省 9 个典型省份，结果如图 3-18 所示。虽然不同省份的排放总量及构成具有差异性，但由于控制劣化导致的异常排放量在总排放量中的占比在“十四五”和“十五五”期间逐步上升。在加强后处理设施覆盖率及控制效率、排放标准升级及老旧车淘汰、新车电动化等措施下，“十四五”期间，各省份上游环节的减排潜力分别为 21.76~22.03%（平均为 $21.86 \pm 1.44\%$ ），下游使用环节的减排潜力为 17.35~19.92%（平均为 $18.71 \pm 1.21\%$ ）。“十五五”期间，各省份上游环节的减排潜力分别为 44.01~45.26%（平均为 $44.69 \pm 0.51\%$ ），下游使用环节的减排潜力为 34.58~37.94%（平均为 $36.56 \pm 1.15\%$ ）。相对于排放因子的显著差异，南方地区减排潜力略高于北方（海南省 31.17%，黑龙江 29.99%），相同措施下不同地区的减排比例相对一致。这里值得注意的是，随综合控制效率提升，实际运行中控制措施异常所导致的额外排放，影响更为显著，且排放因子高的地区（南方地区）影响高于北方。

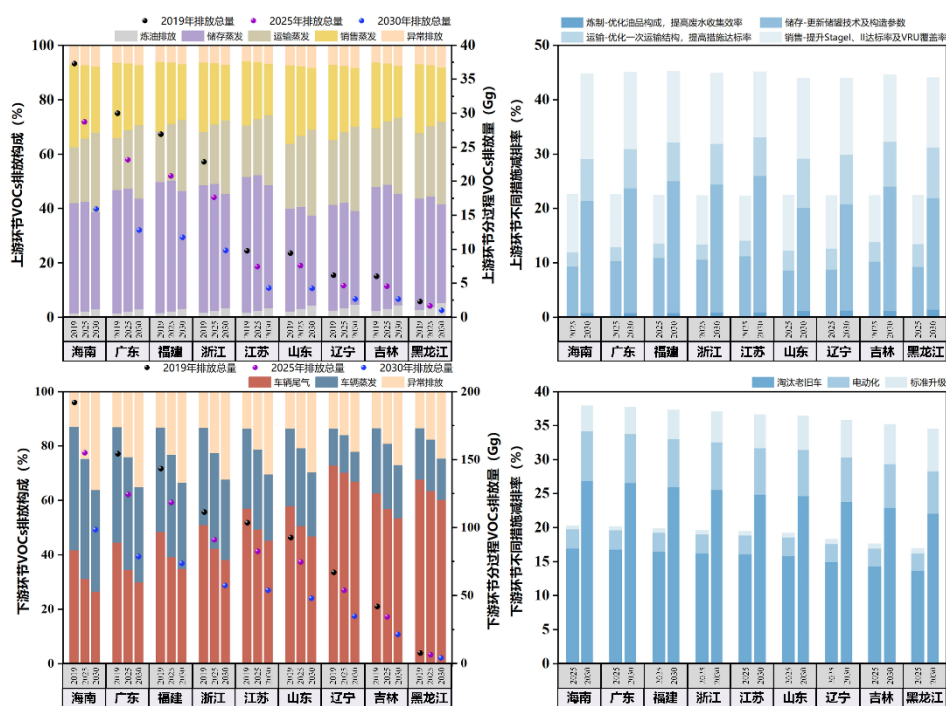


图 3-18 不同省份未来全过程 VOCs 排放构成及减排潜力分析

第 4 章 案例示范

4.1 广东、海南省汽油全过程排放特征

本研究对典型省份广东省和海南省汽油全过程 VOCs 排放及减排路径进行了分析。图 4-1 展示了广东、海南省分月分环节排放因子特征进行了分析。广东省 4 月-10 月整体排放因子高于全国平均水平，这是由于广东地区温度较高，温差较大，上、下游蒸发相关排放因子高于全国平均水平。在夏季（6~8 月），广东汽油全过程排放因子（13.48g/kg 汽油）分别是海南（9.76 g/kg 汽油）和全国平均（11.19 g/kg 汽油）的 1.38 倍和 1.20 倍。海南省全年整体排放因子低于全国平均水平，这是因为海南省全年高温，且温度变化范围小，蒸发相关排放不显著的同时尾气排放远低于全国平均水平。全年来看，海南汽油全过程排放因子（10.21 g/kg 汽油）分别是广东（13.52 g/kg 汽油）和全国平均（14.50 g/kg 汽油）的 0.76 倍和 0.70 倍。

汽油炼制过程 VOCs 排放因子相对较小，且各地区差异不大，全过程占比不超过 0.5%，但海南汽油炼制排放因子占全过程的比例（0.41%）要大于广东与全国平均（0.33%），这是因为海南汽油全过程的排放因子整体较小。

由于广东、海南温度较高，导致汽油储运销及蒸发排放的排放因子高于全国平均水平。广东的汽油储存（1.27 g/kg 汽油）、运输（0.38 g/kg 汽油）、销售（0.61 g/kg 汽油）、蒸发（6.48 g/kg 汽油）排放因子分别是全国平均水平的 1.34、1.18、1.37、1.59 倍，海南的汽油储存（1.06 g/kg 汽油）、运输（0.38 g/kg 汽油）、销售（0.61 g/kg 汽油）、蒸发（4.08 g/kg 汽油）排放因子分别是全国平均水平的 1.11、1.17、1.37、1.00 倍。其中广东地区不仅温度高，而且温差大，导致蒸发类排放显著高于全国平均水平；相比而言，海南省常年温度变化较小，蒸发类排放只有运输排放显著高于全国平均水平。由于尾气排放量与环境气温负相关，广东海南两地的尾气排放因子远低于全国平均水平。广东（4.72 g/kg 汽油）、海南（4.04 g/kg 汽油）的汽油尾气排放因子分别是全国平均水平（8.66 g/kg 汽油）的 0.55、0.47 倍。

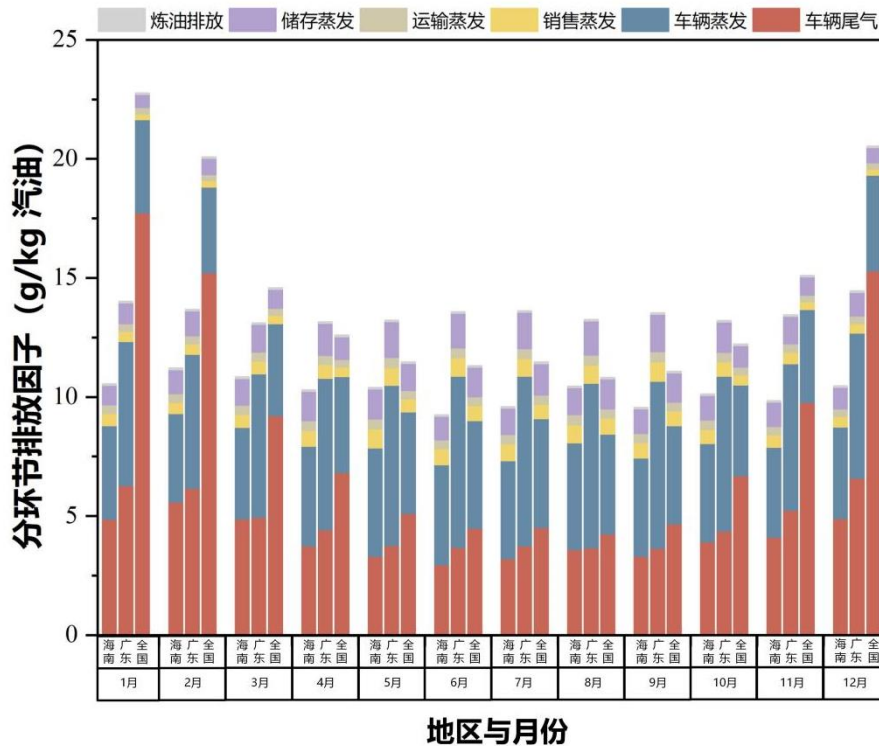


图 4-1 广东、海南省分月分环节排放因子

如图 4-2 所示，在排放量特征上，广东省无论是汽油产品量还是消费量都远大于海南，因此各环节排放量都远高于海南省。广东省基于生产端、需求端的排放量相差无几，几乎不产生炼制端的排放转移；而海南省基于生产端的排放量是需求端的 4.15 倍左右，这说明海南省承担了较多的炼制端排放量。其中主要排放来源是炼厂储罐排放，因此建议海南省重视储罐技术的更新，加快省内汽油储罐的全接液式密封改造，并防止储罐参数劣化。

4.2 广东、海南省汽油全过程控制效益分析

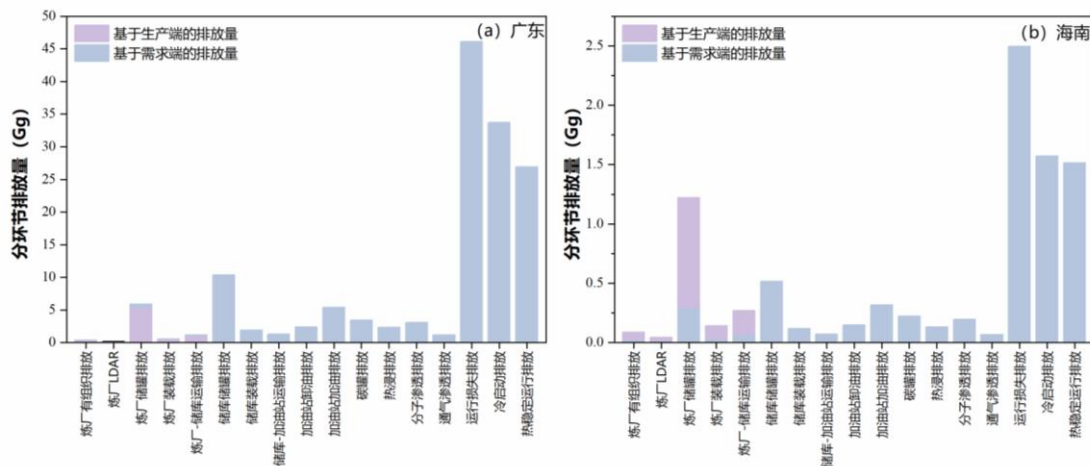


图 4-2 广东、海南省分环节排放量

本研究进一步对广东、海南两地进行了未来情景预测，并且考虑到海南远超全国平均水平的新能源渗透率（海南 2019 年新能源渗透率 8.54%，2021 年已达 28.02%），结合《海南省清洁能源汽车发展规划》中提到的目标，设定基准情景 2025 年、2030 年海南省新能源渗透率分别达到 50%、75%，强化情景分别达到 70%、100%。广东、海南两省双情景下的未来年分环节排放量如图 4-3 所示。

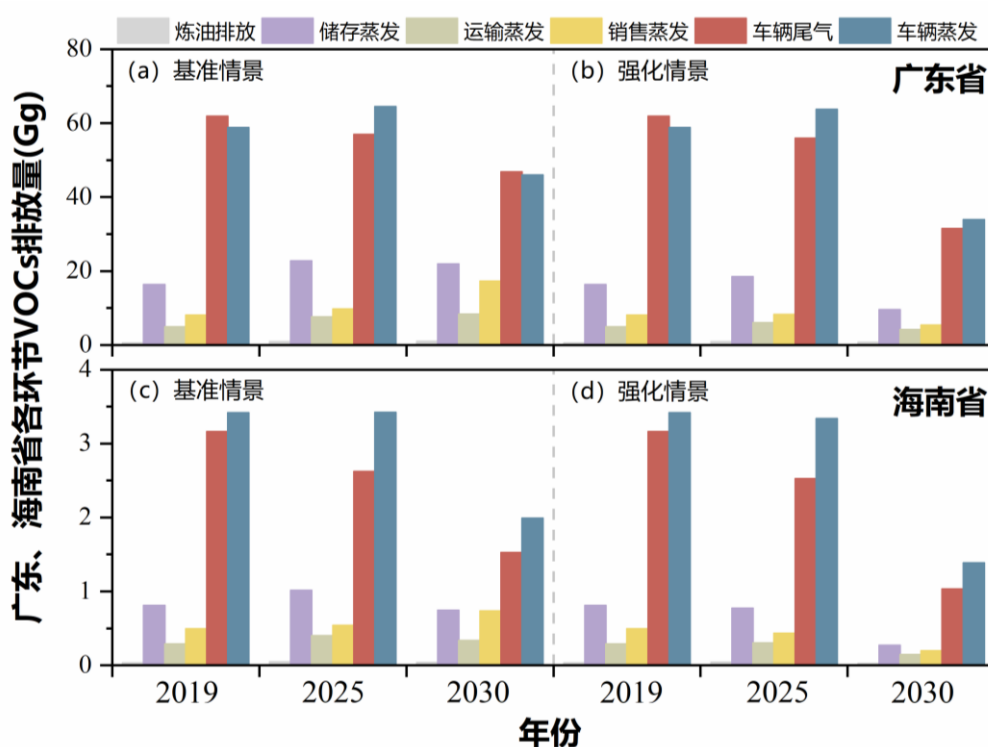


图 4-3 广东、海南省未来年分环节排放预测结果

对广东省而言，基准情景 2019、2025、2030 年的汽油全过程 VOCs 排放总量分别是 150.42、162.38 和 141.28 Gg，强化情景下 2025 年、2030 年则能在基础情景上对应减排 5.62%、39.71%。“十五五”期间强化情景减排效益巨大的主要驱动力因素是加速了广东省的电动化转型进程，2030 年新能源渗透率达到了 70%，对全链条的 VOCs 排放都有极大的减排作用。对海南省而言，基准情景 2019、2025、2030 年的汽油全过程 VOCs 排放总量分别是 8.20、8.04 和 5.36 Gg，强化情景下 2025 年、2030 年则能在基础情景上对应减排 7.82%、43.2%。基准情景下，海南 2030 年较 2019 年的汽油全过程 VOCs 排放已有较大降幅（34.6%），但相比之下，强化情景中海南省有更多的新能源汽车更早地进入了

市场，这使得 2030 年较 2019 年的汽油全过程 VOCs 排放降低了 62.85%。对于广东、海南两地，由于常年高温的影响，蒸发主导的相关排放远高于全国平均水平，如上游的储运销排放以及下游的车辆蒸发排放。因此建议广东、海南省重视储存销售环节的 VOCs 排放控制，加快储罐的全接液式密封改造，定时开展泄漏检测与修复工作；对于加油站要尤其重视已有排放控制措施的实际运行情况，通过人工管理，安装在线监测系统，红外摄像检测等手段强化管理减排，提升现有控制设施的达标运行率。各地区应将汽油车 VOCs 减排视为关键环节，在减少生成的源头控制方面，做好新能源车普及推广，尽量让更多的新能源汽车更早地进入本地市场，制定老旧车辆强制淘汰的报废年限，研究更新的排放控制标准。更为重要的，是加强在用车的环保检测与达标监管，利用遥感技术、排放筛查等手段防止在用车的严重劣化。广东省目前已经制定了科学的汽油车蒸发排放控制系统检验指南，加强蒸发排放控制，值得其他省份效仿。

第 5 章 结论与建议

2019 年，我国汽油全过程 VOCs 排放总量为 2234.43 Gg。其中上游环节的炼油排放、储存蒸发、运输蒸发、销售蒸发、以及下游过程的车辆蒸发和车辆尾气的贡献分别为 0.31%，6.75%，3.21%，4.04%，28.50%以及 57.18%。总的来说，汽油全过程 VOCs 排放的关键环节是车辆尾气排放的冷启动环节以及车辆蒸发的运行损失环节。在基准情景下，2030 年较 2019 年能够实现 963.51 Gg 的 VOCs 减排，减排比例为 43.12%；强化情景的减排优势将在 2025-2030 年显现，在该情景下 2030 年较 2019 年的减排比例可达到 58.11%，电动化可以实现汽油全过程 VOCs 的减排，但由于汽油车存量巨大，电动化显著的减排驱动作用需要在未来更长周期才能够显现出来。只有在激进情景下才能够实现未来汽油全链条 VOCs 无停滞期的持续减排。环境温度、汽油蒸气压以及排放控制是影响汽油全过程 VOCs 排放的关键因素。现有政策对下游使用环节关注不足，对防止劣化关注不足。特别是车辆使用环节排放控制措施劣化将导致大量异常排放，4%在用车严重劣化的情况下，2019 年汽油全过程 VOCs 排放量将增加 15.46%，若不采取防止劣化措施，2030 年汽油全过程 VOCs 排放量将增加

47.32%。未来应持续开展我国全链条 VOCs 排放核算工作，并从增加排放控制措施和防止排放控制措施劣化两个角度着重减少汽油使用环节的 VOCs 排放。

根据上述汽油全过程 VOCs 排放特征及未来控制措施的效益分析，本研究提出以下建议：

- 1、着力关键排放环节控制力度。以上游环节储存过程排放和老旧车淘汰为重点，降低汽油全过程 VOCs 生成量，老旧车淘汰是未来十年我国汽油全过程 VOCs 减排的核心驱动力。
- 2、强化上游环节后处理设施实际运行状况监管。随后处理设施覆盖率和理论控制效率提升，由于实际控制失效导致的排放量和排放占比都将持续升高，只有强化现有设施实际控制效率监管才可确保实际控制效果落实。
- 3、未来需增加车辆使用过程蒸发排放及排放异常车监管措施。虽然车辆使用过程中蒸发排放占比已达到汽油全过程 VOCs 排放的 1/3，但目前几乎没有针对车辆蒸发的额外控制保障措施。此外，控制失效车的影响将随车辆排放标准升级，对排放产生十倍比例的影响。

参考文献

- [1] 中国生态环境部. 2019 年中国生态环境状况公报[R]. 2020.
- [2] 中国环境保护部. 2013 年中国环境状况公报[R]. 2014.
- [3] 中国生态环境部. 2020 年中国生态环境状况公报[R]. 2021.
- [4] Pierre S, Alessandra D M, Evgenios A, et al. Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 735:139542.
- [5] Tang R, Huang X, Zhou D, et al. Global air quality change during the COVID-19 pandemic: Regionally different ozone pollution responses[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020: 100015.
- [6] Lv Z, Wang X, Deng F, et al. Source Receptor Relationship Revealed by the Halted Traffic and Aggravated Haze in Beijing during the COVID-19 Lockdown[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(24).
- [7] Xing J, Wang S X, Jang C, et al. Nonlinear response of ozone to precursor emission changes in China: a modeling study using response surface methodology[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(10): 5027-5044.
- [8] Xing J, Ding D, Wang S X, et al. Development and application of observable response indicators for design of an effective ozone and fine-particle pollution control strategy in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(21): 13627-13646.
- [9] Zheng B, Tong D, Li M, et al. 2018. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18: 14095–14111.
- [10] Wu R R and Xie S D, Spatial Distribution of Secondary Organic Aerosol Formation Potential in China Derived from Speciated Anthropogenic Volatile Organic Compound Emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 52(15): 8146-8156.
- [11] Li K, Jacob D J, Shen L, et al. Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(19): 11423-11433.
- [12] Song Y, Shao M, Liu Y, et al. Source Apportionment of Ambient Volatile Organic

Compounds in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(12): 4348-4353.

[13] Wang M, Shao M, Chen W, et al. A temporally and spatially resolved validation of emission inventories by measurements of ambient volatile organic compounds in Beijing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(12): 5871-5891.

[14] Yuan B, Shao M, Lu S, et al. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(15): 1919-1926.

[15] Yuan Z, Lau A K H, Shao M, et al. Source analysis of volatile organic compounds by positive matrix factorization in urban and rural environments in Beijing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114.

[16] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2009.

[17] Wei W, Wang S, Hao J, et al. Projection of anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emissions in China for the period 2010–2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(38): 6863-6871.

[18] Li M, Zhang Q, Streets D G, et al. Mapping Asian anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds to multiple chemical mechanisms[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(11): 5617-5638.

[19] Yin S, Zheng J, Lu Q, et al. A refined 2010-based VOC emission inventory and its improvement on modeling regional ozone in the Pearl River Delta Region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 426-438.

[20] Simayi M, Hao Y F, Li J, et al. Establishment of county-level emission inventory for industrial NMVOCs in China and spatial-temporal characteristics for 2010–2016[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 211: 194-203.

[21] Liu H, Man H Y, Cui H Y, et al. An updated emission inventory of vehicular VOCs and IVOCs in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17 (20): 12709-12724.

[22] 中国气象数据网.国家气象科学数据中心[DB]. <http://data.cma.cn/>

-
- [23] Wang H L, Chen C H, Wang Q, et al. Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Source Analysis through a Two-year Continuous Measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 80: 488-498.
- [24] Liu Y, Wang H, Jing S, et al. Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Shanghai during Summer: Implications of Regional Transport[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 215: 116902.
- [25] Zhao Q, Bi J, Ling Z, et al. Sources of volatile organic compounds and policy implications for regional ozone pollution control in an urban location of Nanjing[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019.
- [26] Ling Z H, Guo H, Cheng H R, et al. Sources of ambient volatile organic compounds and their contributions to photochemical ozone formation at a site in the Pearl River Delta, southern China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2310-2319.
- [27] Lam S H M, Saunders S M, Guo H, et al. Modelling VOC Source Impacts on High Ozone Episode Days Observed at a Mountain Summit in Hong Kong under the Influence of Mountain-valley Breezes[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 166–176.
- [28] Li L, An J, Huang L, et al. Ozone source apportionment over the Yangtze River Delta region, China: Investigation of regional transport, sectoral contributions and seasonal differences[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 202(APR.): 269-280.
- [29] Yang W, Chen H, Wang W, et al. Modeling study of ozone source apportionment over the Pearl River Delta in 2015[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253.
- [30] Kato N, Akimoto H. Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia: emission inventories[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, 26(16): 2997-3017.
- [31] Walsh M. Global trends in motor vehicle use and emissions[J]. *Annual review of energy*, 1990, 15(1): 217-243.
- [32] Hao J, He D, Wu Y, et al. A study of the emission and concentration distribution of vehicular pollutants in the urban area of Beijing[J]. *Atmospheric environment*, 2000, 34(3): 453-465.

-
- [33]Fu L, Hao J, He D, et al. Assessment of vehicular pollution in China[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2001, 51(5): 658-668.
- [34]Liu H, He K, Lents J M, et al. Characteristics of Diesel Truck Emission in China Based on Portable Emissions Measurement Systems[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(24): 9507-9511.
- [35]Liu H, He K, Wang Q, et al. Comparison of Vehicle Activity and Emission Inventory between Beijing and Shanghai[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(10): 1172-1177.
- [36]Zhang S, Wu Y, Huang R, et al. High-resolution simulation of link-level vehicle emissions and concentrations for air pollutants in a traffic-populated eastern Asian city[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(15): 9965-9981.
- [37]Zhang S, Wu Y, Liu H, et al. Real-world fuel consumption and CO₂ (carbon dioxide) emissions by driving conditions for light-duty passenger vehicles in China[J]. Energy, 2014, 69: 247-257.
- [38]满瀚阳. 机动车蒸发排放特征与链式模型研究[博士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [39]George, I.J., et al., Effects of Cold Temperature and Ethanol Content on VOC Emissions from Light-Duty Gasoline Vehicles. Environmental Science and Technology, 2015. 49(21): p. 13067-13074.
- [40]Wen, Y., et al., Characterizing start emissions of gasoline vehicles and the seasonal, diurnal and spatial variabilities in China. Atmospheric Environment, 2021. 245.
- [41] 杨利娴. 我国工业源 VOCs 排放时空分布特征与控制策略研究[硕士学位论文][D]. 广东: 华南理工大学, 2012: 26-35.
- [42]鲁君. 典型石化企业挥发性有机物排放测算及本地化排放系数研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(6): 604-609.
- [43]Li M, Zhang Q, Zheng Bo, et al. Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19: 8897-8913.

-
- [44] US Environmental Protection Agency (USEPA): Compilation of air pollutant emission Factors, AP-42, 5th Edn[R]. U. S: EPA, 2002.
- [45] Li J, Wu R R, Li Y. Q, et al. Effects of rigorous emission controls on reducing ambient volatile organic compounds in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 557-558(Jul.1): 531-541.
- [46] Li C L, Liu Y F, Chen B F, et al. A comprehensive investigation on volatile organic compounds (VOCs) in 2018 in Beijing, China: Characteristics, sources and behaviours in response to O₃ formation[J]. Science of The Total Environment, 2021, 806.
- [47] Milazzo M. F, Ancione G, Lisi R. Emissions of volatile organic compounds during the ship-loading of petroleum products: Dispersion modelling and environmental concerns[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 204: 637-650.
- [48] Guan Y N, Wang L, Wang S J, et al. Temporal variations and source apportionment of volatile organic compounds at an urban site in Shijiazhuang, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 97: 25-34.
- [49] Wu R R, Bo Y, Li J Y, et al. Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008–2012[J]. Atmospheric Environment, 2016, 127: 244-254.
- [50] Zhou M M, Jiang W, Gao W D, et al. Anthropogenic emission inventory of multiple air pollutants and their spatiotemporal variations in 2017 for the Shandong Province, China[J]. Environmental Pollution, 2021, 288.
- [51] Liang X M, Chen X F, Zhang J N, et al. Reactivity-based industrial volatile organic compounds emission inventory and its implications for ozone control strategies in China[J]. Atmospheric Environment, 2017, 162: 115-126.
- [52] Carter, W. P. L. Estimation of ozone reactivities for volatile organic compound speciation profiles in the SPECIATE 4.2 database., 2013, <http://www.cert.ucr.edu/~carter/emitdb/Speciate-Reactivity.pdf/> (accessed June 2015)
- [53] ZHENG J H, ZHOU Y, YU R J, et al. Survival rate of China passenger vehicles: A data-driven approach [J]. Energy Policy, 2019, 129(587-97.)
- [54] HUO H, WANG M C. Modeling future vehicle sales and stock in China [J]. Energy Policy, 2012, 43(17-29.)

附表 1 清单参数输入及来源

参数类型	参数名称	参数数值	数据来源
气象参数	日最大环境温度	分省分月逐小时环境温度	国家气象科学数据中心
	日最低环境温度	分省分月逐小时环境温度	
	环境温度	分省分月逐小时环境温度	
	环境湿度	分省分月逐小时环境湿度	
	太阳辐射因子	分省分月太阳辐射因子	
油品理化性质	密度	分省分月的汽油密度	克拉玛依石化分公司、大连石化分公司、实测
	雷德蒸汽压	分省分月的汽油雷德蒸汽压	大连石化分公司、实测、 《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》
	气相分子质量	68 g/g-mol	《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》
	5%馏出温度	分省分月汽油 5% 馏出温度	克拉玛依石化分公司、大连石化分公司、泉港中石化企业
	15%馏出温度	分省分月汽油 15% 馏出温度	
炼油生产工艺	催化裂化排放因子	0.002 g/kg	泉港中石化企业
	连续重整排放因子	0.001 g/kg	
	废水处理排放因子	0.004 g/kg	

	冷却水循环排放因子		0.021 g/kg	
	设备动静密封点泄漏排放因子		0.015 g/kg	
储 罐 参 数 性 质	公 称 容 积	炼油厂	5000 m ³ 、20000 m ³	泉港中石化企业、 《石油库设计规范》 《石化行业 VOCs 污 染源排查工作指南》
		储油库	2000 m ³ 、5000 m ³	
	罐 径	2000 m ³ 罐容	14.5 m	
		5000 m ³ 罐容	21.0 m	
		20000 m ³ 罐容	40.5 m	
	产品因子		1	
	零风速边缘密封损耗因子		0.03 lb-mol/ft·d	
	罐体油垢因子		0.0075（每年除锈两次）	
	有效柱直径		1	
	固定顶支撑柱数		1	
	无 风 情 况 下 浮 盘 附 件 损 耗 因 子	2000 m ³ 罐容	2.8 lb-mol/d	
		5000 m ³ 罐容	2.8 lb-mol/d	
		20000 m ³ 罐容	5.5 lb-mol/d	
	盘缝损耗单位缝长因子		0.0004 lb-mol/ft·d	
盘缝长度因子		4.8（铆接浮筒式浮盘）		
运 输 环 节	运输排 放因子	罐车	0.001 g/kg	大气攻关预研课题研 究报告
		船舶	0.003 g/kg	

关键参数	一次运输比例		铁路：公路：船舶：管道 =0.29 : 0.01 : 0.20: 0.50	交通运输部
	饱和因子	罐车	0.6	《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》
		船舶	0.2	
	控制效率	炼厂装车控制达标率	30%	专家咨询、文献调研
		炼厂装船收集效率	90%	
		炼厂装船处理效率	70%	
		炼厂装船达标率	10%	
		储库装车处理达标率	81.31%	
		Stage I 控制效率	95%	
		Stage I 达标率	70%	
销售环节关键参数	饱和因子		0.6	《石化行业 VOCs 污染源排查工作指南》
	加油站控制效率	Stage I 控制效率	95%	文献调研
		Stage I 达标率	70%	
		Stage II 控制效率	70%	
		Stage II 达标率	70%	
		Stage III 控制效率	80%	

		Stage III 覆盖率	10%	
		ORVR 控制效率	82%	
使用环节关键参数	冷启动基础排放因子	国 1 标准车	9.46±5.59 g/km	课题组实测及模型计算
		国 2 标准车	10.21±6.03 g/km	
		国 3 标准车	9.34±5.52 g/km	
		国 4 标准车	4.60±2.72 g/km	
		国 5 标准车	2.69±1.59 g/km	
		国 6 标准车	2.43±1.44 g/km	
		国 7 标准车	1.46±0.86 g/km	
	热稳定运行基础排放因子	国 1 标准车	8.59 g/km	
		国 2 标准车	8.19 g/km	
		国 3 标准车	2.28 g/km	
		国 4 标准车	1.23 g/km	
		国 5 标准车	0.41 g/km	
		国 6 标准车	0.024 g/km	
		国 7 标准车	0.024 g/km	
	碳罐排放基础因子	国 1-5 标准车	5.24±2.33 g/L	
		国 6 标准车	0.82±0.49 g/L	
		国 7 标准车	0.82±0.49 g/L	
	热浸排放基础因子	国 1-5 标准车	3.62±0.34 g/L	
		国 6 标准车	2.71±0.25 g/L	
		国 7 标准车	2.03±0.19 g/L	
	分子渗透基础排放因子	国 1-5 标准车	3.35±0.97 g/L	
国 6 标准车		1.34±0.39 g/L		
国 7 标准车		0.80±0.23 g/L		
通气渗透基础	国 1-5 标准车	1.68±0.32 g/L		
	国 6 标准车	0.22±0.04 g/L		

	排放因子	国 7 标准车	0.22±0.04 g/L	
	运行损失基础	国 1-5 标准车	81.87±6.80 g/L	
	排放因子	国 6 标准车	14.92±1.24 g/L	
		国 7 标准车	8.95±0.74 g/L	
	VKT		12500 km	国家统计局
	分省里程系数		0.036±0.004	交通大数据
	燃油经济性		7.49 L/100 km	ICCT、汽车工业学会
	机动车保有量	国 1 标准车	431.21 万辆	国家统计局
		国 2 标准车	749.25 万辆	
		国 3 标准车	3713.79 万辆	
国 4 标准车		8669.94 万辆		
国 5 标准车		8665.80 万辆		

附表 2 各情景关键参数变化表

参数类型	参数名称	2019	2025			2030		
		基准	基准	中间	强化	基准	中间	强化
炼制环节	FCC 汽油比例	65%	65%	65%	60%	65%	65%	55%
	CR 汽油比例	27%	27%	27%	32%	27%	27%	37%
	有组织废水处理效率	30%	30%	30%	60%	30%	30%	90%
	炼厂储库 5000 立方米占比	23.5%	19.1%	19.1%	19.1%	14.7%	14.7%	14.7%
	炼厂储库 20000 立方米占比	56.5%	45.9%	45.9%	45.9%	35.3%	35.3%	35.3%
	炼厂储罐参数最劣化比例	20%	20%	20%	10%	20%	20%	0
储存环节	城市储库 2000 立方米占比	64%	52%	52%	52%	40%	40%	40%
	城市储库 5000 立方米占比	16%	13%	13%	13%	10%	10%	10%
	城市储罐参数最劣化比例	20%	20%	20%	10%	20%	20%	0
	城市储罐新技术比例	0	15%	15%	25%	30%	30%	50%
运输环节	一次运输铁路比例	29%	24.8%	24.8%	21%	24%	24%	14%
	一次运输船舶比例	20%	20%	20%	18%	20%	20%	15%

	一次运输公路比例	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
	一次运输管道比例	50%	55%	55%	60%	55%	55%	70%
	炼厂装车控制达标率	30%	30%	30%	60%	30%	30%	90%
	炼厂装船处理达标率	10%	30%	30%	40%	60%	60%	80%
	船舶运输损耗率	0.3‰	0.3‰	0.3‰	0.2‰	0.3‰	0.3‰	0.15‰
	公路罐车运输损耗率	0.1‰	0.1‰	0.1‰	0.07‰	0.1‰	0.1‰	0.05‰
	铁路罐车运输损耗率	0.1‰	0.1‰	0.1‰	0.07‰	0.1‰	0.1‰	0.05‰
销售环节	一阶段油气回收达标率	70%	70%	70%	80%	70%	70%	90%
	二阶段油气回收实际合格率	70%	70%	70%	80%	70%	70%	90%
	VRU 实际覆盖率	10%	10%	10%	30%	10%	10%	50%
电动化进程	新能源车渗透率	4.7%	29.9%	29.9%	44.7%	42%	42%	63.4%
排放标准升	轻型车排放标准	国 5	国 6	国 7	国 7	国 6	国 7	国 7

级								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

附表 3 汽油全链条相关政策法规调研情况表

适用地区	政策法规文件名	适用环节	具体内容
全国	《十四五节能减排综合工作方案》	炼制环节	深化石化化工等行业挥发性有机物污染治理，全面提升废气收集率、治理设施同步运行率和去除率。对废水系统高浓度废气实施单独收集处理。
		储存环节	对易挥发有机液体储罐实施改造，对浮顶罐推广采用全接液浮盘和高效双重密封技术。
		运输环节	加强油船和原油、成品油码头油气回收治理。
		使用环节	提高城市公交、出租、物流、环卫清扫等车辆使用新能源汽车的比例。到 2025 年，新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的 20% 左右。全面实施汽车国六排放标准和非道路移动柴油机械国四排放标准，基本淘汰国三及以下排放标准汽车。实施汽车排放检验与维护制度，加强机动车排放召回管理。
	《石油炼制工业污染物排放标准》	炼制环节	内浮顶罐的浮盘与罐壁之间应采用液体镶嵌式、机械式鞋形、双封式等高效密封方式。浮顶罐浮盘上的开口，缝隙密封设施，以及浮盘与罐壁之间的密封设施在工作状态应密闭。若检测到密封设施不能密闭，在不关闭工艺单元的条件下，在 15 日内进行维

			修技术上不可行，则可以延迟维修，但不应晚于最近一个停工期。对浮盘的检查至少每 6 个月进行一次，每次检查应记录浮盘密封设施的状态，记录应保存 1 年以上。
		运输环节	油品装卸栈桥对铁路罐车进行装油，发油台对汽车罐车进行装油，油品装卸码头对油船(驳)进行装油的原油及成品油设施，应密闭装油并设置油气收集，回收或处理装置。装车，船应采用顶部浸没式或底部装载方式，顶部浸没式装载出油口距离罐底高度应小于 200 mm。底部装油结束并断开快接头时，油品滴洒量不应超过 10 mL，滴洒量取连续 3 次断开操作的平均值。
	《储油库大气污染物排放标准》	储存环节	内浮顶罐的浮盘与罐壁之间应采用浸液式密封、机械式鞋形密封等高效密封方式。浮顶罐罐体应保持完好，不应有孔洞（通气孔除外）和裂隙。浮盘附件的开口（孔），除采样、计量、例行检查、维护和其它正常活动外，应密闭；浮盘边缘密封不应有破损。支柱、导向装置等储罐附件穿过浮盘时，其套筒底端应插入油品中并采取密封措施。除储罐排空作业外，浮盘应始终漂浮于油品的表面。自动通气阀在浮盘处于漂浮状态时应关闭且密封良好，仅在浮盘处于支座支撑状态时可开启。边缘呼吸阀在浮盘处于漂浮状态时应密封良好，并定期检查定压是否符合设定要求。除自动通气阀、边缘呼吸阀外，浮盘外边缘板及所有通过浮盘的开孔接管均应浸入油品液面下。
		运输	向汽车罐车、铁路罐车发油，原油应采用顶部浸没式或底部发油方式，顶部浸没式灌装鹤管出口距离罐底高度应小于 200 mm。向汽车罐车发其他油品应

		环 节	<p>采用底部发油方式。发油时产生的油气应密闭收集，并送入油气处理装置回收处理。底部发油快速接头和油气回收快速接头应采用自封式快速接头。底部发油结束并断开快速接头时，油品滴洒量不应超过 10 mL，滴洒量取连续次断开操作的平均值。向汽车罐车发油时，油气收集系统应为正压，且压力不应超过 6.0 kPa。向铁路罐车发油时，除拆装灌装鹤管之外的时段，灌装鹤管与铁路罐车灌装口（人孔）应密闭。向油船发油应采用顶部浸没式，顶部浸没式发油管出口距离罐底高度应小于 200 mm。具有万吨级及以上油品泊位的码头对应的储油库应密闭收集向 GB 20951 管控的油船发油时产生的油气，并送入油气处理装置回收处理。采用管道方式发油时，管道应保持密闭。</p>
	《油品运输大气污染物排放标准》	运 输 环 节	<p>汽车罐车应具备底部装卸油系统和油气回收系统。汽车罐车底部装卸油系统公称直径应为 100 mm，底部装卸油系统包括卸油阀、紧急切断阀、呼吸阀、防溢流系统及连接管线等。汽车罐车油气回收系统公称直径应为 100 mm，油气回收系统能够将储油库向汽车罐车发油时产生的油气密闭输入油气处理装置，能够将卸油时产生的油气密闭输入汽车罐车油罐内，能够保证运输过程中油品和油气不泄漏，不得随意排放汽车罐车油罐内的油气。采取有效措施减少因操作、维修和管理等方面原因发生的油品与油气泄漏。汽车罐车油气回收耦合阀、底部装卸油密封式快速接头应集中放置在管路箱内。多仓汽车罐车应将各仓油气回收管路在罐顶并联后进入管路箱。铁路罐车应符合 GB/T 5600 的技术规定，并采取相应措施减少运输过程中的油气排放。</p>

		<p>采用红外摄像方式检测运输工具油气密封点时，不应有油气泄漏。油船应设置密闭油气收集系统和惰性气体系统。油船油气收集系统应将向油船发油时产生的油气密闭送入油气处理装置。油船应在每个油仓设置独立的透气管线，每个透气管出口应安装一个压力/真空阀。油船运输过程中应保证油品和油气不泄漏。油船应采用封闭式液位监测系统测量油仓液位高度、油气压力和温度。采用红外摄像方式检测运输工具油气密封点时，不应有油气泄漏。</p>
	<p>《加油站大气污染物排放标准》</p>	<p>销 售 环 节</p> <p>所有影响储油油气密闭性的部件，包括油气管线和所连接的法兰、阀门、快接头以及其他相关部件在正常工作状况下应保持密闭，油气泄漏浓度满足本标准油气回收系统密闭点位限值要求。采用红外摄像方式检测油气回收系统密闭点位时，不应有油气泄漏。埋地油罐应采用电子式液位计进行汽油密闭测量。应采用符合 GB 50156 相关规定的溢油控制措施。应采用浸没式卸油方式，卸油管出油口距罐底高度应小于 200 mm。卸油和油气回收接口应安装公称直径为 100 mm 的截流阀（或密封式快速接头）和帽盖，现有加油站已采取卸油油气排放控制措施但接口尺寸不符的可采用变径连接。连接软管应采用公称直径为 100 mm 的密封式快速接头与卸油车连接。所有油气管线排放口应按 GB 50156 的要求设置压力/真空阀，如设有阀门，阀门应保持常开状态；未安装压力/真空阀的汽油排放管应保持常闭状态。连接排气管的地下管线应坡向油罐，坡度不应小于 1%，管线公称直径不小于 50 mm。卸油时应保证卸油油气回收系统密闭。卸油前卸油软管和油气回收软管应与油品运输汽车罐车和埋地油罐</p>

		<p>紧密连接，然后开启油气回收管路阀门，再开启卸油管路阀门进行卸油作业。卸油后应先关闭与卸油软管及油气回收软管相关的阀门，再断开卸油软管和油气回收软管。加油产生的油气应采用真空辅助方式密闭收集。油气回收管线应坡向油罐，坡度不应小于 1%，受地形限制无法满足坡度要求的可设置集液器，集液器的凝结液应能密闭回收至低标号的汽油罐中。加油软管应配备拉断截止阀，加油时应防止溢油和滴油。当辖区内采用 ORVR 的轻型汽车达到汽车保有量的 20% 后，油气回收系统、在线监测系统应兼容 GB 1852 要求的轻型车 ORVR 系统。油气处理装置启动运行的压力感应值宜设在 +150Pa，停止运行的压力感应值宜设在 0—50Pa，或根据加油站情况自行调整。油气处理装置排气口距地平面高度不应小于 4 m，具体高度以及与周围建筑物的距离应根据环境影响评价文件确定，排气口应设阻火器。油气处理装置回油管横向地下油罐的坡度不应小于 1%。油气处理装置在卸油期间应保持正常运行状态。</p>
	<p>《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》</p>	<p>使用环节</p> <p>与国 5 蒸发排放限值相比，即使不考虑更加严格的测试条件和程序，单日昼间排放加上热浸排放从 2 g/d 降至国 6 的 0.7 g/d，国六标准限值加严了 65%。如果考虑到测试程序的严格程度也在提高，国六对蒸发排放的控制要求至少提高 80% 以上。国六专门在低温冷启动试验中增加了 NO_x 检测项目，并且适用范围扩展到柴油车。低温条件下柴油车的 CO 和 HC 的排放也不应忽视，本着燃料中立的原则，柴油车的检测项目与汽油车的规定相同，并将 NO_x 排放限值设为 0.5 g/km。国六意见稿主要参考了美国</p>

			<p>加油排放的要求。国六轻型车加油排放控制水平与美国 TierII 看齐，限值定为 0.05 g/L 汽油。一种车型的型式检验内容包括排气污染物、实际行驶排气污染物、曲轴箱污染物、蒸发污染物、加油过程污染物、污染控制装置耐久性和 OBD 系统等方面。汽车生产企业或检测机构应将型式检验样车封存 1 年备查，1 年后将样车 ECU 封存备查。</p>
	《车用汽油》	使用环节	<p>国 VIB 汽油冬季 RVP 为 45~85kPa，夏季 RVP 为 40~65kPa。芳烃含量不大于 35%，烯烃含量不大于 15%。</p>
浙江	《浙江省“十四五”挥发性有机物综合治理方案》	炼制环节	<p>生产应优先采用密闭设备、在密闭空间中操作或采用全密闭集气罩收集方式；采用局部集气罩的，距集气罩开口面最远处的 VOCs 无组织排放位置控制风速应不低于 0.3 米/秒。开展 LDAR 企业 3 家以上或辖区内开展 LDAR 企业密封点数量合计 1 万个以上的县（市、区）应开展 LDAR 数字化管理。在确保安全的前提下，尽可能不在 O3 污染高发时段安排全厂开停车、装置整体停工检修和储罐清洗作业等，减少非正常工况 VOCs 排放。企业新建治理设施或对现有治理设施实施改造，应结合排放 VOCs 产生特征、生产工况等合理选择治理技术，对治理难度大、单一治理工艺难以稳定达标的，要采用多种技术的组合工艺。组织开展使用光催化、光氧化、低温等离子、一次性活性炭或上述组合技术等 VOCs 治理设施排查。到 2025 年，完成 5000 家低效 VOCs 治理设施改造升级，石化行业的 VOCs 综合去除效率达到 70% 以上。按照治理设施较生产设备“先启后停”的原则提升治理设施投运率</p>

		储运销环节	加大汽油、石脑油、煤油、原油等油品储运销全过程 VOCs 排放控制。在保障安全的前提下，推进重点领域油气回收治理，加强无组织排放控制，并要求企业建立日常检查和自行监测制度。各设区市要每年组织开展一轮储油库、油罐车、加油站油气回收专项检查和整改工作。年销售汽油量大于 5000 吨的加油站全部安装油气回收自动监控设施，并与生态环境部门联网。
上海	《上海市生态环境保护十四五规划》	炼制环节	到 2022 年，完成石化等六大领域 24 个工业行业、4 个通用工序、恶臭污染物排放企业的综合治理，工业 VOCs 排放量较 2019 年下降 10%。健全化工行业 VOCs 监测监控体系，建立重点化工园区 VOCs 源谱和精细化排放清单。
		储运销环节	以含 VOCs 物料的储存、转移输送等五类排放源为重点，采取设备与场所密闭、工艺改进、废气有效收集等措施，管控无组织排放。完善加油站、储油库、油罐车油气回收长效管理机制。到 2022 年，完成储油库底部装油方式改造，新增运输汽油的油罐车不得配备上装密闭装油装置。完成原油和成品油码头油气回收，新建原油、汽油、煤油、石脑油等装船作业线全部安装油气回收设施，新建 150 总吨以上的国内航行游船应当具备码头油气回收条件。
		使用环节	健全协调机制，部门间数据互联互通，实现移动源全生命周期管理。开展新生产机动车、非道路移动机械检查，主要车（机）型的年度抽检率达到 80% 以上。全面落实排放检验和强制维护制度，研究提前实施更为严格的在用车排放检验标准。
江苏		炼制	实施新建项目总量平衡“减二增一”。推进工业园区、企业集群推广建设涉 VOCs“绿岛”项目，因地

	《江苏省“十四五”生态环境保护规划》	环 节	制宜建设集中涂装中心、活性炭集中处理中心、溶剂回收中心等，实现车间、治污设施共享，提高VOCs治理效率。一企一策开展工业园区常态化走航监测、异常因子排查溯源等，建设一批VOCs达标排放示范区。推进石化生产企业生产供应符合标准的低硫燃油。
		储 运 环 节	落实原油成品油码头油气回收设施建设与使用要求，新建原油、汽油、石脑油等装船作业码头全部安装油气回收设施。实施含VOCs物料全方位、全链条、全环节管理，强化储存、转移和输送、设备与管线组件泄漏、敞开液面逸散以及工艺过程等无组织排放环节的污染收集处理。
		使 用 环 节	统筹“油、路、车”综合治理，实施机动车精细化管理，对全省新车生产企业进行常态化监管。2023年3月底前淘汰国I标准汽油车，鼓励苏南城市提前完成。2025年10月底前，基本淘汰国III及以下排放标准中重型柴油货车。建立在用车排放监管体系，强化检测维修制度，实施闭环管理。到2025年，在用柴油车监督抽测排放合格率达到98%以上。
内 蒙 古	《内蒙古自治区“十四五”生态环境保护规划》	储 运 销 环 节	持续推进加油站、储油库油气回收治理,定期开展加油站、储油库和油罐车油气回收治理设施运行维护情况监督检查。推进油品持续升级，禁止以化工原料名义出售调和油组分，禁止以化工原料勾兑调和油，严禁运输企业和工矿企业储存、使用非标油，以物流基地、货运车辆停车场和休息区、油品运输车、施工工地等为重点，持续集中打击和清理取缔黑加油站、流动加油车。加大油气回收治理力度，2025年底前，储油库、重点区域年销售汽油量大于5000吨的加油站，全面安装油气回收自动监控设备

			并与生态环境部门联网，严厉打击黑加油站和非标油生产企业。
		使用环节	开展新生产机动车、发动机、非道路移动机械监督检查，主要车（机）型系族年度抽检率达到 80% 以上，基本消除未登记或冒黑烟工程机械。加大对高排放车辆监督抽测频次，完善机动车排放检测与强制维护制度（I/M 制度）。呼和浩特市、包头市、乌兰察布市、鄂尔多斯市、巴彦淖尔市、乌海市等重点地区公共领域新增或更新公交等车辆中新能源汽车比例不低于 50%，到 2025 年，新能源汽车新车销量占比达 20% 左右。
福建	《福建省十四五生态省建设专项规划》	炼制环节	挥发性有机物排放实行区域内等量或倍量替代，以石化、化工、制药、涂装、印刷、制鞋、家具等行业为重点，推进挥发性有机物全过程治理。全面实施钢铁、65 蒸吨及以上燃煤锅炉超低排放改造，开展石化、化工等行业全流程挥发性有机物管控，实施陶瓷、玻璃、砖瓦、铸造、铁合金等行业工业炉窑大气污染综合治理项目。
		使用环节	开展交通运输绿色低碳行动，确保交通运输领域碳排放保持在合理区间。大力发展智能交通，深入实施新能源汽车替代、船舶电动改造等措施，全面提升充电桩、港口和机场岸电使用率，提升交通领域电气化水平。推广绿色低碳运输工具，推进电动福建建设，优化交通能源结构，加快推进城市客运、城市物流配送车辆电动化、新能源化和清洁化；推进内河船型标准化，加快近海及内江内河电动船舶研发和推广应用。

	《福建省十四五空气质量改善规划》	炼制环节	加强石油炼制、合成树脂、制药、涂料等行业储罐的无组织排放控制，加大含 VOCs 物料储存和装卸的治理力度。
		储运环节	储罐按照无组织排放控制标准及相关行业排放标准要求，进行罐型和浮盘边缘密封方式选型。鼓励使用低泄漏的储罐呼吸阀、紧急泄压阀，定期开展储罐部件密封性检测，规范泄漏检测与修复。对装载汽油、煤油等高挥发性化工产品的汽车罐车，推广使用自封式快速接头。
		使用环节	强化机动车环保达标监管。推进油品清洁化。力争基本淘汰国三及以下排放标准的汽车。加强高排放机动车限制通行区日常管理，推广机动车遥感监测，推动监测数据全面应用于执法处罚，建立健全生态环境部门取证、公安部门处罚机制，充分利用机动车遥感监测系统对机动车尾气排放进行监管。全省新增和更新的公交车全部采用新能源汽车，出租车、网约车、城市物流车、环卫、公务车等推广使用新能源汽车。
广东	《广东省生态环境建设十四五规划》	炼制环节	严格实施挥发性有机物排放企业分级管控，推动重点监管企业实施新一轮一企一策深化治理。
		储运销环节	加强油路车港联合防控，强化成品油质量产、储、运、销全流程监管，严厉打击非法调制和销售成品油行为，加大对非法流动加油、销售不合规油品、销售未完税油品等违法行为的查处力度。

		使用环节	<p>深化机动车尾气治理，完善机动车排气检测监管平台，强化非道路移动机械大气污染物排放状况监管。积极实施电能替代，重点在交通、建筑、工商业和民生等领域扩大替代规模、提高替代效率。加快新能源汽车推广应用，进一步推动电动汽车充电设施建设，打造智慧、便捷、安全的充电设施网络</p> <p>推进交通运输节能，以城市公交、出租车、市政车辆、物流配送车辆为重点推广新能源汽车，推进机场、港口、码头节能改造，加快建设综合智能交通体系，全面提升交通运输节能管理能力。到 2025 年，新能源汽车销量占新车销售量比例达 20% 以上。鼓励公交、环卫、出租、通勤、城市邮政快递作业、城市物流等领域新增和更新车辆采用新能源和清洁能源汽车。到 2025 年，全省新能源汽车保有量达到 100 万台。</p>
湖北	《湖北省生态环境保护“十四五”规划》	储运销环节	<p>强化清洁油品供应保障，强化生产、销售、储存和使用环节监管，加大劣质汽柴油打击力度，持续实施加油站、储油库、油罐车、原油成品油码头油气回收治理。开展汽油、石脑油、航煤等储罐综合治理，强化含 VOCs 物料储存、转移输送、设备与管线组件泄漏、敞开液面逸散及工艺过程中无组织排放控制，着力提升 LDAR 质量。全面提升治理设施废气收集率、治理设施运行率、治理设施去除率，实施装卸废气收集治理设施升级改造，开展污水逸散废气专项治理，强化非正常工况废气收集处理，切实提高 VOCs 末端治理水平，确保达标排放。严格执行汽柴油质量标准，加强油品监管执法，2025 年底前，全省年销售汽油量大于 5000 吨的加油站，</p>

			应安装油气回收自动监控设备并与行业主管部门联网，严厉打击黑加油站和非标油生产企业。
		使用环节	逐步完成老旧汽油车辆（国家第二阶段排放标准及以下）及老旧柴油车辆（国家第三阶段排放标准及以下）淘汰，到 2025 年，基本完成老旧汽油车辆及 80% 老旧柴油车辆淘汰大力开展新生产机动车、发动机、非道路移动机械监督检查，主要车（机）型系族年度抽检率达到 80% 以上，基本消除未登记或冒黑烟工程机械。稳妥推进车用乙醇汽油使用。推进新能源或清洁能源汽车使用，推动新能源汽车在公共服务、城市配送、港口机场作业、货物运输等领域应用，加快推动充换电、加氢等基础设施建设。
北京	《北京市十四五时期生态环境保护规划》	炼制环节	推进石化行业重点企业开展 VOCs 治理提升行动，强化炼油总量控制，实现 VOCs 年减排 10% 以上。
		储运销售环节	加强成品油储运系统油气排放监管，运用加油站油气回收在线监控开展精准执法。在生产、销售、储存和使用环节，油品质量实施严格管理，确保使用合格油品。动态清理无证无照经营的黑加油站点、流动加油罐车。
		使用环节	严格实施国六 b 机动车排放标准和非道路移动机械第四阶段排放标准，加强在京生产、销售的机动车和非道路移动机械环保达标监管。依托大数据平台强化在用车精准执法，运用远程排放管理系统推动移动源污染排放监管，依法处罚未按规定安装远程排放管理车载终端的行为。强化机动车排放检验和维修监管，建立机动车排放检验、排放达标维修、

			维修复检等信息共享机制。严格实施国六 b 机动车排放标准和非道路移动机械第四阶段排放标准，加强在京生产、销售的机动车和非道路移动机械环保达标监管。依托大数据平台强化在用车精准执法，运用远程排放管理系统推动移动源污染排放监管，依法处罚未按规定安装远程排放管理车载终端的行为。强化机动车排放检验和维修监管，建立机动车排放检验、排放达标维修、维修复检等信息共享机制。
江西	《江西省“十四五”生态环境保护规划》	使用环节	推动交通运输绿色发展。全面实施国六排放标准，推进老旧机动车提前淘汰更新，鼓励老旧车辆和非道路移动机械替换为清洁能源车辆。持续开展新生产机动车、发动机和非道路移动机械监督检查，深入推进非道路移动机械摸底调查和编码登记，加强在用车环保检测和达标监管，全面推进实施机动车排放检测与强制维修制度（I/M 制度）。深入实施公共交通优先战略，推进新能源和清洁能源车辆使用，推进充换电基础设施建设。加快高污染、高耗能客船淘汰和老旧运输船舶更新改造，推进新增和在用营运船舶应用新能源或清洁能源。
湖南	《湖南省“十四五”生态环境保护规划》	炼制环节	按照“分业施策、一行一策”的原则，加大低 VOCs 含量原辅材料的推广使用力度，从源头减少 VOCs 产生。实行重点排放源排放浓度与去除效率双重控制。
甘肃	《甘肃省“十四五”生态环境保护规划》	储运环节	严格执行汽柴油质量标准，加强定期监测监管执法，2025 年底前，年销售汽油量大于 5000 吨的加油站，安装油气回收自动监控设备并与生态环境部门联网，严厉打击黑加油站和非标油生产企业。加强油品储运销 VOCs 排放监管，年度不少于一次抽查

			检查。开展成品油、有机化学品等涉 VOCs 物质储罐排查，逐步取消炼油、石化、煤化工、制药、农药、化工、工业涂装、包装印刷等企业非必要的 VOCs 废气排放系统旁路。
		使用环节	强化移动源污染监管，加强机动车和非道路移动机械尾气污染治理，继续推动柴油货车污染治理，基本淘汰国三及以下排放标准汽车。以物流主要通道和柴油货车集中通行路段为重点，加强机动车污染治理遥感监测能力建设。加快推进机动车排放检测与维护（I/M）制度建设，推动非道路移动机械排放管理。开展新生产机动车、发动机、非道路移动机械监督检查，基本消除未登记或冒黑烟工程机械。推进新能源或清洁能源汽车使用。到 2025 年，新能源汽车新车销量占比达 20% 左右。
天津	《天津市生态环境保护“十四五”规划》	储运环节	加强精细化管理，开展原油、成品油、有机化学品等涉 VOCs 物质储罐排查及提升改造，动态更新工业企业 VOCs 排放源清单。涉 VOCs 的物料储存、转移输送、生产工艺过程等排放源，采取设备与场所密闭、工艺改进、废气有效收集等措施，减少无组织排放。开展 VOCs 有组织排放源排查，对采用低效治理设施的企业，全面实施升级改造。开展集装箱运输、商品车滚装运输、全程冷链运输、电商快递班列等多式联运试点示范创建。探索构建“外集内配、绿色联运”的公铁联运城市配送新体系。到 2025 年，铁路货运量占比进一步提高。严格执行油品质量标准，加强车用油品、车用尿素监管。推进油气回收治理设施建设，汽油年销量 5000 吨以上的加油站全部安装油气回收在线监控，并与生态环

			境部门联网。严厉打击黑加油站和非法流动加油车。
		使用环节	2024 年底前, 全市基本停止使用国三及以下排放标准清扫车、洒水车、垃圾运输车、邮政车。2025 年底前, 基本淘汰国三及以下排放标准汽车。停止使用并逐步淘汰采用稀薄燃烧技术的老旧燃气公交车。2023 年底前, 滨海新区制定实施国四及以下排放标准货车限行政策, 天津港停止国四及以下排放标准货车集疏港。大力推进新能源或清洁能源汽车使用。在新增或更新的车辆中, 国家机关、事业单位新能源汽车比例不低于 30%, 公交、出租、物流配送等行业新能源汽车比例不低于 80%。到 2025 年, 新能源汽车新车销量占比达到 25%左右。推动氢燃料电池汽车示范应用, 推动港口、机场、铁路货场、物流园区等场所非道路移动机械更新升级, 到 2025 年, 新能源机械占比达到 50%左右。
四川	《四川省“十四五”生态环境保护规划》	储运环节	强化无组织排放管控,加大含 VOCs 物料储存、转移和输送、设备与管线组件泄漏、敞开液面逸散等管控力度,开展泄漏检测与修复工作。强化企业 VOCs 排放达标监管,实施季节性调控。完善挥发性有机物产品标准体系,建立低挥发性有机物含量产品标识制度。优化交通运输结构。
		使用环节	推进机动车、船舶及油品标准升级。严格机动车环境管理。加快推进建设国家环境保护机动车污染控制与模拟重点实验室。综合运用现场抽检和遥感监测等手段强化机动车排气路检,加大机动车集中停放地、维修地的尾气排放监督抽检力度。完善在用汽车排放检测与强制维护制度(I/M 制度),推动成都市在用车排气污染物检测提前执行汽油车污染物排放

			限值 b 标准。采取经济激励、科学划定限行区域、强化监管等方式,大力推进老旧车船提前淘汰更新。加大新能源汽车在城市公交、出租汽车、城市配送、邮政快递、机场、铁路货场、重点区域港口等领域应用,到 2025 年,地级以上城市清洁能源汽车在公共领域使用率显著提升,设区的市城市公交车基本实现新能源化。制定鼓励新能源车船使用的差异化政策措施,推动新能源汽车发展,到 2025 年,新能源汽车销售占比达到 20% 以上。
辽 宁	《辽宁省“十四五”生态环境保护规划》	炼 制 环 节	完成全省涉 VOCs 企业排查（年产生 VOCs10 吨及以上），31 个化工园区完成环境空气 VOCs 自动站建设及联网。
		储 运 销 环 节	规划研究大连、鞍山、抚顺、营口、阜新、葫芦岛等市石化、化工、印染、喷涂和油品储运销等重点行业企业 VOCs 治理升级改造工程等。推进大宗货物、集装箱运输向铁路和水路转移，大宗货物年货运量 150 万吨以上的大型工矿企业和新建物流园区，原则上采用铁路、水运、管道等绿色环保运输方式，拓展利用已有铁路专用线能力。提高年货运量 150 万吨以上具有铁路专用线的大型工矿企业和新建物流园区铁路运输比例，完成大连市锦源铁路专用线建设、阜新市金德利铁路专用线建设等工程。
		使 用 环 节	加强新车源头管控，全面开展机动车、发动机、非道路移动机械生产、销售及注册登记环节监督检查，主要车（机）型系族年度抽检率达到 80% 以上。严格执行国 VI 汽、柴油标准，保障油品供应和质量。加快构建绿色交通体系，大力发展城市公共

			交通，强化新能源汽车的推广应用，加快老旧船舶淘汰，禁止国家已淘汰的外省老旧柴油货车违法违规向我省转移注册登记。2025 年底前，各城市建成区的公交、环卫、邮政、出租、通勤、轻型物流配送车辆全部使用新能源或清洁能源汽车，港口、机场、铁路货场等新增或更换作业车辆（机械）主要使用新能源或清洁能源汽车（机械）。
重 庆	《重庆市生态环境保护“十四五”规划》	使用环节	以柴油货车治理和纯电动车推广为重点深化交通污染控制。严格执行汽、柴油质量标准，加强油品监管执法。进一步深化高排放车辆限行措施，对货运车辆（含运渣车）按排放标准、按时段、按路线精细化管控，加快淘汰老旧车辆。推进构建“车—油—路”绿色交通体系，完善并严格执行在用车 I/M（检测与维护）制度，大力推广新能源车，推动公交车、出租车、网约车等公共领域用车纯电动化。
黑 龙 江	《黑龙江省“十四五”节能减排综合工作实施方案》	使用环节	全面落实汽车国六排放标准。推动绿色铁路、绿色公路、绿色港口、绿色航道、绿色机场建设，加快完善绿色交通配套基础设施，积极扩大电力、氢能、天然气等清洁能源在交通领域应用。积极推广低碳交通运输工具，提高城市公交、出租、物流、环卫清扫等车辆使用新能源汽车的比例，鼓励重型柴油货车更新替代，加快内河船舶绿色升级，推进既有铁路电气化改造。到 2025 年，城市公交领域新能源汽车占比达到 72%
广 西	《广西壮族自治区“十四五”空气质量全面改善规划》	储运销环节	加快推进构建长江、珠江和北部湾的水运大通道，建设连通广西北部湾港、西江重要港口及重点产业园区的专线铁路。加快大宗货物和中长距离货物运输“公转铁”“公转水”，提升广西铁路、水路货运比例。到 2025 年，实现铁路货运量增长速度快，

		<p>公路货物周转量增幅低于货运量增幅，水路运输货物周转量增幅高于货运量增幅，铁路、水路运货周转量比例上升至 56% 以上。加快推进城市建成区内加油站、储油库、油罐车油气回收治理工作，引导其开展油气回收改造；对年销量大于 5000 吨的加油站试点安装油气回收自动监控设备；以日间加油量较大的加油站为重点，开展加油站、储油库、油罐车油气回收治理专项执法行动。加强夏秋季汽油蒸气压检查。加快推进加油站、储油库油气回收自动监控建设试点。各地要以物流基地、货运车辆停车场和休息区、油品运输车、施工工地等为重点，集中打击和清理取缔黑加油站点、流动加油车，对不达标的油品追踪溯源，查处劣质油品存储、销售集散地和生产加工企业，对涉案人员依法追究相关法律责任。建立常态化油品监督检查机制，加强对生产、销售环节油品质量的监督抽检，加大储油库、加油（气）站抽查频次，到 2025 年，油品合规率提升至 90% 以上。采用底部装载方式向汽车罐车装载汽油、航空煤油、石脑油和苯、甲苯、二甲苯等。到 2022 年，自封式快速接头完成更换；到 2023 年，万吨级及以上原油、成品油码头全部完成油气回收治理；到 2025 年，80% 以上的油品运输船舶具备油气回收条件。</p>
	使用环节	<p>加快老旧车淘汰和深度治理。加快推进机动车遥感监测能力建设。加快建设完善“天地车人”一体化的机动车排放监控系统。加快清洁能源和新能源船舶的推广应用，建设新能源汽车充换电网络，推进公交出租、长途重卡、通勤作业、货运物流等车辆和运输船舶以电代油、以气代油、以氢代油，有序</p>

		<p>推广使用车用乙醇汽油。加大新能源和清洁能源车船推广力度，逐步降低传统燃油汽车在新车产销和汽车保有量中的占比。到 2025 年，新增及更新公交车中新能源汽车占比 90% 以上，新增及更新的轻型物流车、网约车、出租车、中短途客运车、环卫清扫车、3 吨以下叉车、市政园林机械使用新能源比例达到 90% 以上。</p>
--	--	--