



基于 2°C 温控目标的 中国工业园区低碳发展战略研究

Decarbonization Strategies of China's Industrial
Parks towards the 2°C Global Warming Target

清华大学环境学院

2020 年 11 月

School of Environment, Tsinghua University

Nov, 2020

报告作者

一、 项目负责人

陈吕军

二、 项目研究人员

陈吕军 田金平 郭 扬

胡琬秋 吕一铮 严 坤

卢琬莹 赵佳玲 叶 宁

三、 报告执笔人

陈吕军 田金平 郭 扬

胡琬秋 吕一铮

致谢

诚挚地感谢能源基金会对本项目的大力支持与资金资助，感谢领域内专家与业界同事为本项目提出的宝贵建议。

报告声明

本报告由能源基金会资助。报告内容不代表能源基金会观点。报告仅限于研究、学习或内部传阅，不得翻印或用于商业目的。如有不妥或谬误之处，敬请读者不吝批评指正。

摘要

《巴黎协定》确立了将全球平均气温较工业化前升高幅度控制在 2 °C 内的目标，并为 1.5 °C 温控目标而努力。中国政府承诺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。在工业部门应对气候变化和推进绿色转型的背景下，数量庞大的工业园区已成为实现精准碳减排的关键靶点。本报告识别了中国工业园区低碳发展面临的挑战与机遇，建立了中国工业园区碳排放清单，揭示了园区排放特征。面向 2035 和 2050 年定量分析了中国工业园区碳减排目标、主要低碳发展路径和碳减排贡献。进而，构建了基于地理信息系统的园区基础设施数据库，识别了以基础设施为核心的园区碳减排关键技术措施，并构建综合评价模型量化了园区减排潜力、经济成本和协同环境效益，为园区低碳发展提供清晰有力的决策支撑。

研究显示，2015 年中国工业园区二氧化碳排放总量约为 28.2 亿吨，占全国总排放量的 31%。2015-2035 年及 2035-2050 年期间，全国工业园区有望分别减排至少 28% 和 51%。在园区高、低两种经济增速情景下，通过产业结构调整、能效提升、能源结构优化、碳捕集等低碳路径可实现显著的减排效果：2015-2050 年预期可减排 18.4 亿吨二氧化碳，即有望实现 60% 以上的减排幅度。工业园区中普遍建设的热电联产等能源基础设施对园区碳排放具有长期锁定效应，平均贡献了园区排放的 75%。基于基础设施特征，针对性地实施低碳技术改造，园区能源基础设施可实现显著的碳减排潜力和经济环境协同效益。运用产业共生理念，推动工业园区能源基础设施和集中式污水处理厂建立“能一水”共生体系，可进一步挖掘园区深度减排潜力。

为推进工业园区在国家碳达峰与碳中和战略中发挥更大的作用，实现中长期低碳发展目标，本报告建议开发系统、规范、标准的工业园区温室气体排放核算方法与工具包，搭建工业园区碳减排决策支撑数据平台，制定工业园区低碳发展分类指导路线图，并开展碳达峰示范试点园区建设。

Abstract

The Paris Agreement set a target of limiting the rise in global average temperature to 2 °C above pre-industrial levels, and endeavoring to achieve 1.5 °C global warming. Chinese government pledged to strive to peak carbon emission by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. Industrial parks have been becoming critical trouble-shooters in achieving targeted carbon emission reductions in China for climate goals. This report identified challenges and opportunities underlying low-carbon transition of China's industrial parks, uncovered carbon emission characteristics of the parks, and quantified low-carbon targets, pathways and carbon reduction potentials of the parks toward 2035 and 2050. Further, a geodatabase of infrastructure in the parks was developed, followed by identifying key technical decarbonization measures centered on infrastructure. An integrated assessment model was developed to quantify carbon mitigation potentials, economic costs and environmental co-benefits in the parks.

In 2015, CO₂ emissions from China's industrial parks totaled about 2.82 gigaton, accounting for 31% of national CO₂ emission. During 2015-2035 and 2035-2050, China's industrial parks are expected to reduce CO₂ emissions by at least 28% and 51%, respectively. In high- and low- industrial growth scenarios for the parks, total CO₂ emission reduction potential was quantified as 1.84 gigaton during 2015-2050 (dropped by more than 60%) via industrial structure optimization, energy efficiency improvement, energy structure decarbonization, and carbon capture, utilization and storage. Further, energy infrastructure such as combined heat and power is widely deployed in industrial parks, which has a long service lifetime to lock in carbon emissions and averagely contributes to 75% of the parks' emissions. By implementing low-carbon options tailored for each facility, remarkable carbon reduction potentials could be achieved accompanied with economic and environmental co-benefits. Then, based on the concept of industrial symbiosis, symbiotic systems linking energy infrastructure with wastewater treatment plants in industrial parks are promising for deep decarbonization targets.

To peak and neutralize carbon emissions in China's industrial parks, policy implications were derived as: 1) Developing systematic and standardized carbon emission accounting framework and protocols for industrial parks; 2) Establishing online database for decision making in decarbonizing industrial parks; 3) Formulating customized roadmaps for various categories of industrial parks; and 4) Facilitating demonstrated pilots for industrial parks in peaking carbon emissions.

目录

1. 中国工业园区低碳发展现状与挑战	1
1.1 园区发展迈入“不惑之年”，低碳转型破局“中年危机”	1
1.1.1 工业领域低碳发展对于缓解气候变化意义重大	1
1.1.2 中国工业园区经 40 余载发展对全国工业产值贡献过半	1
1.2 园区碳排放“家底不清”，减排路径不明	3
1.2.1 “十三五”时期工业绿色发展规划首次显现园区碳达峰雄心	3
1.2.2 十八大以来中央政府出台系列政策加快园区绿色转型和创新发	4
1.2.3 园区温室气体排放核算方法不统一，排放现状与特征尚不清晰	5
2. 中国工业园区能源消费结构和碳排放特征	6
2.1 工业园区能耗清单构建与温室气体核算方法	6
2.1.1 园区能耗清单构建是温室气体核算的基础	6
2.1.2 园区小尺度高强度活动水平及多系统边界特征导致碳核算尤为复杂	7
2.1.3 碳达峰下园区尺度宜基于生命周期视角并重点核算能源相关排放	8
2.2 国家级工业园区能源消费结构与碳排放特征	11
2.2.1 园区能源消费结构中煤炭占比高于全国平均水平	11
2.2.2 基于生命周期视角充分认识园区直接和间接温室气体排放特征	13
2.2.3 园区能源基础设施温室气体排在园区直接排放中贡献显著	17
2.3 工业园区二氧化碳排放总体贡献占全国碳排放三成	18
3. 中国工业园区低碳发展路径	19
3.1 2°C目标下 2015-2050 年工业园区二氧化碳需减排 65%	19
3.2 四大减排路径推动工业园区深度低碳化	19
3.2.1 园区减排情景及潜力量化方法	19
3.2.2 园区 2015-2050 年二氧化碳减排 65%目标下四大路径之作为	22
4. 以基础设施为核心的中国工业园区低碳措施	25
4.1 工业园区现行低碳政策措施分析与关键技术	26
4.1.1 园区低碳措施的精确性、普适性和量化评价亟待提升	26
4.1.2 能源基础设施提效及低碳化是园区温室气体减排的核心途径	27
4.1.3 园区能源基础设施温室气体减排五大共性技术	34
4.2 工业园区能源基础设施存量特征与环境影响	35
4.2.1 园区能源基础的结构特征呈“大少小多”特征	35
4.2.2 园区能源基础设施对煤的依赖度高于全国水平	36
4.2.3 园区能源基础设施存量技术结构以凝气机组为主	36
4.2.4 园区能源基础设施空间分布及演化特征	38
4.2.5 园区温室气体、二氧化硫和氮氧化物排放及淡水消耗的整体判断	39
4.3 工业园区能源基础设施碳减排的环境与经济协同效应显著	42
4.3.1 五项减排措施与园区在役能源基础设施的适配	42

4.3.2 单一措施情景和综合情景下的减排潜力及协同环境效益.....	43
4.3.3 各容量等级机组不同情景下的减排潜力及协同环境效益.....	44
4.3.4 园区在役能源基础设施温室气体减排的成本效益.....	45
4.3.5 园区在役能源基础设施温室气体减排模型的不确定性.....	47
4.4 工业园区“能-水”基础设施共生的环境效益有待挖掘.....	48
4.4.1 园区集中式污水处理厂建设现状.....	48
4.4.2 排放提标促使工业园区集中式污水处理厂迈向非常规水资源.....	49
4.4.3 园区能源基础设施和污水处理厂共生的碳减排协同效益.....	50
5 中国工业园区碳排放和减排潜力均十分显著	51
5.1 主要发现及整体判断.....	51
5.1.1 项目开展的主要工作.....	51
5.1.2 项目研究主要发现.....	52
5.1.3 研究形成的核心观点.....	53
5.2 政策建议与展望.....	54
5.2.1 政策建议.....	54
5.2.2 进一步研究建议.....	55
参考文献	56
附录	62
附 1 工业园区基础设施数据库构建.....	62
附 1.1 园区能源基础设施数据库.....	62
附 1.2 园区环境基础设施数据库.....	64
附 2 园区能源基础设施温室气体减排综合评价模型.....	64
附 2.1 园区能源基础设施温室气体减排情景设置.....	66
附 2.2 各减排情景的直接环境效益核算.....	67
附 2.3 能源基础设施温室气体减排成本效益分析.....	76
附 2.4 生命周期环境效益.....	77
附 3 园区能源-环境基础设施共生驱动的温室气体减排模型.....	78
附 3.1 园区能-水基础设施耦合概念模型	78
附 3.2 基础设施能水共生耦合模型架构与参数取值.....	80
附 4 案例分析——浙江省工业园区能源基础设施升级改造节能潜力.....	81
附 4.1 浙江省工业园区能源基础设施存量特征分析.....	81
附 4.2 浙江省工业园区能源基础设施改造节能及碳减排潜力.....	84
附 5 案例分析——浙江省工业园区“能-水”基础设施共生环境效益	93
附 5.1 浙江省工业园区集中式污水处理设施存量特征分析.....	93
附 5.2 浙江省工业园区能水耦合共生的碳减排潜力分析.....	94
附 5.3 浙江省工业园区基础设施“能-水”共生温室气体减排主要结论.....	98
附表 1- 附表 14.....	99

正文表目录

表 1-1	2012 年中国温室气体总量	1
表 2-1	园区温室气体核算的变量与参数定义	10
表 2-2	213 家园区的温室气体排放平均强度	17
表 3-1	2015-2050 年中国工业园区碳减排路径参数设置	21
表 3-2	不同情景下能源结构与分品种能源生命周期碳排放因子	22
表 3-3	六种非化石能源占比提升的碳减排贡献	25
表 4-1	已开展研究的中国工业园区案例及碳减排措施	28
表 4-2	园区能源基础设施存量演变特征及驱动力	31
表 4-3	上虞工业园区节能措施	34
表 4-4	园区能源基础设施容量结构	36
表 4-5	园区能源基础设施燃料结构	37
表 4-6	园区能源基础设施技术结构	37
表 4-7	园区能源基础设施的温室气体减排潜力、协同环境效益和材料消耗	44
表 4-8	各减排情景的直接和间接环境效益	46
表 4-9	园区能源基础设施的温室气体减排成本	46
表 4-10	模型结果的不确定性	48
表 4-11	污水处理厂排放标准 ^[103] 与能源设施冷却水水质标准 ^[104] 对比	50

正文图目录

图 1-1	全国国家级和省级工业园区分布	3
图 1-2	近年来中国政府发布的园区转型发展主要政策	4
图 1-3	中国政府多部门协同推进工业园区绿色低碳循环发展 ^[4]	5
图 2-1	工业园区能源输入输出示意图	6
图 2-2	工业园区温室气体核算框架	9
图 2-3	213 家国家级经开区地理位置分布	11
图 2-4	213 家国家级经开区能源消费结构	12
图 2-5	213 家园区直接与间接温室气体排放	13
图 2-6	213 家园区温室气体排放空间分布	15
图 2-7	213 家园区温室气体排放分解矩阵	16
图 2-8	49 家工业园区能源基础设施温室气体排放	18
图 3-1	中国工业园区面向 2035 和 2050 年的碳减排路径-低增速情景	23
图 3-2	中国工业园区面向 2035 和 2050 年的碳减排路径-高增速情景	24
图 4-1	上虞工业园区能流图（2013 年）	33
图 4-2	上虞工业园区节能潜力	34
图 4-3	园区能源基础设施温室气体减排主要技术	35
图 4-4	1604 家园区的能源基础设施空间分布	38
图 4-5	1604 家园区的能源基础设施存量演化	39
图 4-6	1604 家园区能源基础设施的环境影响（2014 年）	42
图 4-7	园区能源基础设施温室气体减排的主要技术及其适配机组	43
图 4-8	各减排情景的环境效益—按机组容量等级分解	45
图 4-9	园区能源基础设施温室气体减排潜力与减排成本	47
图 4-10	园区能源环境基础设施共生模型示意	51

1. 中国工业园区低碳发展现状与挑战

1.1 园区发展迈入“不惑之年”，低碳转型破局“中年危机”

1.1.1 工业领域低碳发展对于缓解气候变化意义重大

应对气候变化是当今人类社会面临的共同挑战。《巴黎协定》确立了将全球平均气温较工业化前水平升高幅度控制在 2°C 内的目标，并为 1.5°C 温控目标而努力。中国作为全球最大的碳排放国，在应对气候变化中责任重大。2020 年 9 月，中国政府承诺将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，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^[1]，应对气候变化和低碳转型发展已成为中国的重大战略^[2]。

《中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告 2016》显示（表 1-1），中国温室气体排放总量中，能源活动排放占比达 78.5%。2017 年，中国工业增加值占国内生产总值（GDP）的 34%，而工业能源消费占全国能源消费总量的 66%^[3]，可见工业是应对气候变化的重点领域，工业节能、实现低碳发展对于缓解气候变化具有重要作用。

表 1-1 2012 年中国温室气体总量

单位：亿吨二氧化碳当量	二氧化碳	甲烷	氧化亚氮	氢氟碳化物	全氟化碳	六氟化硫	合计
能源活动	86.88	5.79	0.69				93.37
工业生产活动	11.93	0.00	0.79	1.54	0.12	0.24	14.63
农业活动		4.81	4.57				9.38
废弃物处理	0.12	1.14	0.33				1.58
土地利用变化和林业	-5.76	0.00	0.00				-5.76
总量（土地利用变化和林业）	98.93	11.74	6.38	1.54	0.12	0.24	118.96
总量（含土地利用变化和林业）	93.17	11.74	6.38	1.54	0.12	0.24	113.20

注：1) 阴影部分不需要填写，0.00 表示计算结果小于 0.005；由于四舍五入的原因，表中各项之和与总计可能有微小的出入。2) 全球增温潜势值采用《IPCC 第二次评估报告》中 100 年时间尺度下的数值。

1.1.2 中国工业园区经 40 余载发展对全国工业产值贡献过半

工业园区是全球工业发展的普遍特征，是用于工业生产活动的集中区域，以企业集聚和基础设施共享为显著特征^[4]。工业园区是我国工业发展的重要载体，园区建设始于 1979 年，是改革开放的一项重大创举。1979 年 7 月中共中央、国务院决定对广东福建的对外经济活动实行特殊政策和灵活措施，并在深圳、珠海、

汕头、厦门兴办“出口特区”，1980年3月“出口特区”被正式定名为“经济特区”^[5]。位于深圳经济特区南头半岛的蛇口工业区，面积2平方公里，是1979年2月由国务院批准交通部香港招商局投资兴办的中国第一个对外开放的工业园区^[5]。1984年3月，沿海部分城市座谈会在北京召开，明确进一步开放大连、天津、秦皇岛等14个沿海港口城市，允许这些城市兴办经济技术开发区^[6]。会议形成的《沿海部分城市座谈会纪要》成为中国经济技术开发区的准生证，由国务院批准建立的14个经济技术开发区，当时规划总面积为121.15平方公里，在中国对外开放进程中开启了新的篇章^[5]。1986年邓小平同志视察了天津经济技术开发区，欣然写下了“开发区大有希望”的题词，对开发区的广阔前景做出了明确论断，澄清了许多疑虑，坚定了开发区创业者的信心^[5]。

1988年国家批准建立第一个高新技术产业开发区——北京新技术产业开发试验区，同年又在上海建设漕河泾新兴技术开发区^[7]。1992年，随着邓小平同志第二次南巡，国务院先后开放了一大批沿长江、沿内陆边境城市和内陆省会城市，国家级经济技术开发区也随之扩展到东北和中西部地区，把沿海地区开发区的成功经验推广到全国^[5, 7]。1992~1993年国务院第二批批准了北京等18个开发区；1994年2月，国务院批准建立中国、新加坡两国政府合作的苏州工业园区^[5]。1999年8月国务院决定“允许中西部各省、自治区、直辖市在其省会或首府城市选择一个已建成的开发区，申办国家级经济技术开发区”^[8]。2000~2002年国务院第三批批准了合肥等17个开发区，到2009年国家级经济技术开发区达到51家，另有5家园区实行开发区政策^[5]。开发区遍布全国各地，形成由点到面、由沿海向内地的推进式发展。

经历了40年的建设发展，工业园区已成为重要的工业生产空间和主要布局方式，也是工业化和城市化发展的重要载体^[7]。根据工业园区所属级别不同，可分为国家级工业园区、省级工业园区和其他级别园区。国家级工业园区主要包括国家级经济技术开发区、国家高新技术产业开发区、国家级保税区、国家级边境经济合作区、国家级出口加工区和其他国家级开发区。目前，中国共有国家级和省级工业园区2543家^[9]，多数位于在环渤海、长三角、珠三角一带（图1-1），贡献了全国工业产值的50%以上^[10]。

然而，园区工业生产活动集聚，资源能源消耗密集，污染物排放量大，显著影响区域生态环境质量。园区在发展的早期，污染防治手段及环境管理能力落后于经济发展步伐，使其成为了高污染区域的代名词，因园区环境问题引发的新闻曝光和社会矛盾时有发生^[11]。处理好经济发展与节约资源、保护环境的关系，推进绿色、低碳、循环发展，是园区建设管理所面临的关键问题^[12]。

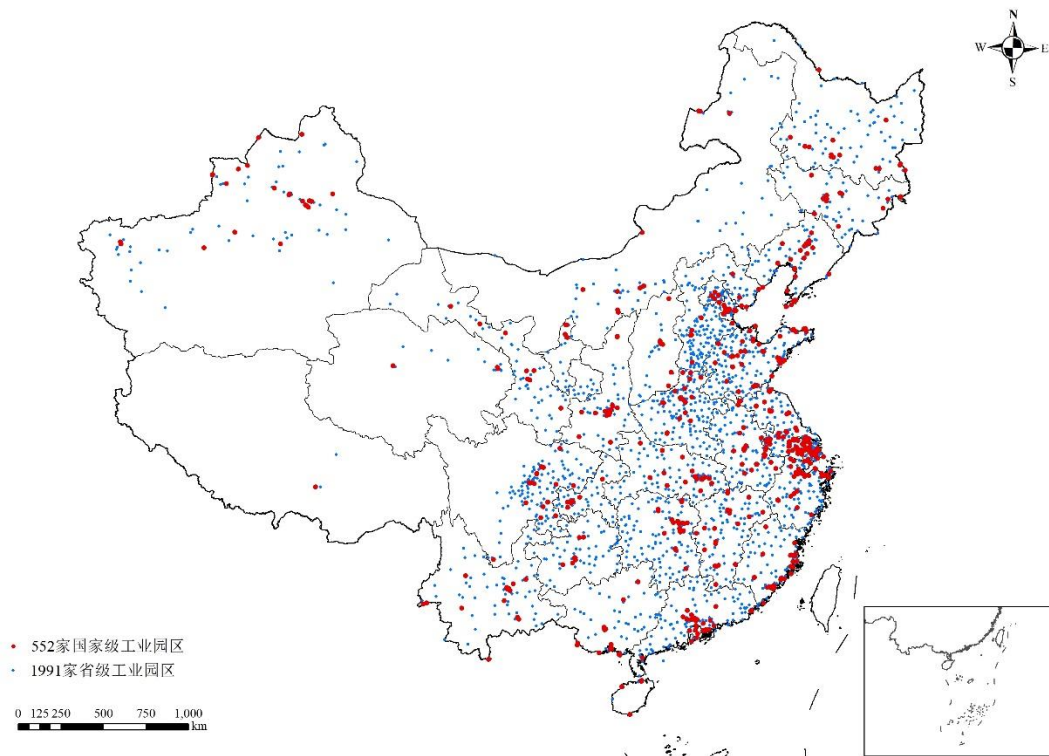


图 1-1 全国国家级和省级工业园区分布

中国工业园区的绿色低碳转型发展迫在眉睫，研究园区低碳发展途径与潜力也尤为重要。中国工业园区数量多、种类广、发展阶段各异，基于大样本的园区温室气体排放特征与控制尚未深入揭示。工业园区通过低碳转型实现碳达峰，既是园区高质量发展的内在要求，又是工业领域应对全球气候变化、落实 2°C 温控目标的重要载体，应找准着力点，发挥关键作用。本项目旨在分析中国工业园区温室气体排放特征、减排路径和具体措施，为缓解气候变化和实现工业绿色发展提供决策支持。

1.2 园区碳排放“家底不清”，减排路径不明

1.2.1 “十三五”时期工业绿色发展规划首次显现园区碳达峰雄心

中国工业园区的低碳发展始于“十一五”时期，自 2006 年以来，我国持续出台并实施园区低碳政策。2009 年环境保护部下发《关于在国家生态工业示范园区中加强发展低碳经济的通知》，决定自 2010 年起将发展低碳经济作为重点纳入生态工业示范园区建设内容^[13]。2011 年起，中国政府开始着重关注工业园区的低碳发展^[14]。在“十二五”规划确认的大量统领性政策推动下，中国已于 2012 年采取重大举措以充实内容广泛的碳政策和能源政策议程。2013 年，工信部和发改委联合推进低碳工业园区试点建设^[15]；2014 年，《国家应对气候变化规划

(2014-2020年)》提出到2020年建成150家左右低碳示范园区以应对气候变化^[2]；2016年，工信部发布《工业绿色发展规划（2016-2020年）》，再次强调了工业园区低碳化转型，并要求部分园区率先达到碳排放峰值^[16]。2017年发布的《国家低碳工业园区建设实践与创新》指出，截至目前，全国已有51家工业园区进入低碳工业园区试点期。经过三年的试点创建，参与试点的园区在保持经济快速发展的同时，单位工业增加值能源消耗和碳排放均显著下降，碳管理能力得到有效提升，在低碳发展领域涌现了许多新思路、新理念、新举措和新模式。迄今为止，大部分低碳政策措施聚焦于能源问题，特别是有关碳排放权交易体系建立与完善、淘汰产能或关停低效小微企业的政策和规划、万家企业节能低碳行动是主要的政策组合。新的政策结构给工业园区提供了更多的合规灵活性，意味着工业界可以有更多的决策空间来最大限度降低碳政策目标下的执行成本。

1.2.2 十八大以来中央政府出台系列政策加快园区绿色转型和创新发展的

工业园区绿色、低碳、循环发展是工业领域建设生态文明、打好污染防治攻坚战的重要抓手^[17, 18]，也是落实国家温室气体减排计划的重要途径^[19]。2013年以来，中国政府出台了一系列园区转型升级和创新发展的政策文件（图1-2），强调了园区高质量发展的重要性，园区转型发展对中国转变经济发展方式和建设资源节约型、环境友好型社会意义重大^[11]。近年来，工业园区也始终是“大气十条”、“水十条”等污染防治战略的重点治理对象^[20, 21]，“水十条”、“气十条”、“土十条”《中共中央 国务院 关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》《十三五生态环境保护规划》《工业绿色发展规划（2016-2020）》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等国家层面重要文件中，提出了许多与园区生态化、绿色发展相关的内容。



图 1-2 近年来中国政府发布的园区转型发展主要政策

中国政府各部委开展了一系列园区示范试点项目，出台了相应的管理措施，推进园区的绿色、低碳、循环发展（图 1-3）。中国工业园区推进绿色低碳循环发展实现产业生态化、产业低碳化，已在实践中形成了明确的指导思想，即运用产业生态学系统思考的原理，遵循减量化、再利用、再循环的原则，实现工业园区经济、资源能源和环境全系统的优化提升。当前，园区绿色低碳发展实践重点从三个方面协同推进：一是以企业清洁生产为核心，强化企业间联系以构建产业共生网络、绿色供应链和自主可控的产业链；二是完善公共基础配套服务，通过基础设施绿色转型升级以优化调控园区的物质能量代谢；三是借助现代化信息技术，实现园区整体的运行环境与管理模式的精细化，并推动智慧化升级^[22]。

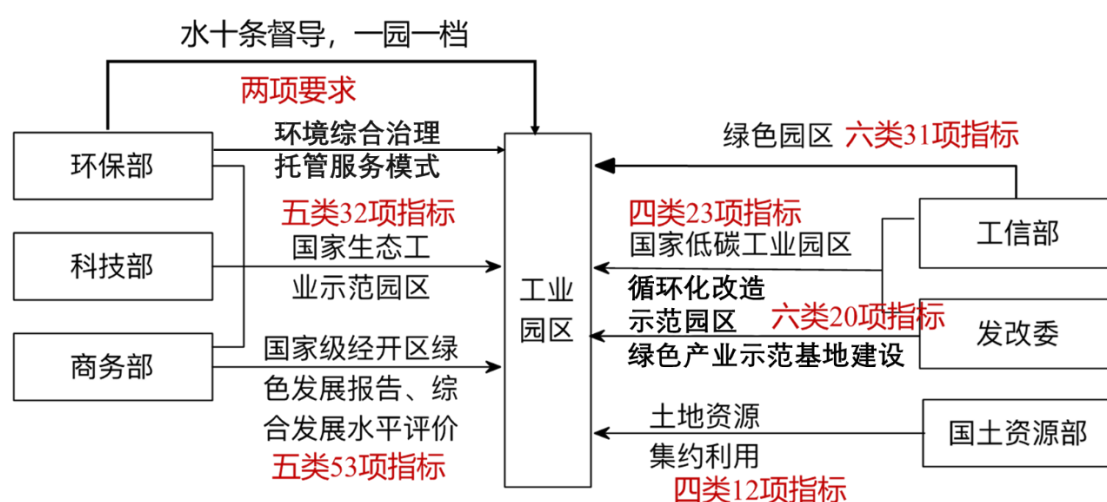


图 1-3 中国政府多部门协同推进工业园区绿色低碳循环发展^[4]

1.2.3 园区温室气体排放核算方法不统一，排放现状与特征尚不清晰

工业园区低碳发展对于缓解气候变化威胁具有重要作用，但中国工业园区数量众多且在国家统计体系中不是独立的统计单元，缺乏边界清晰、标准统一、准确可靠的数据基础，由此导致园区温室气体排放核算方法不统一，排放现状与特征尚不清晰，进而园区共性和针对性的温室气体减排路径、减排潜力、成本效益以及在应对全球气候变化中的预期贡献也仍不明确。

关于工业园区温室气体排放核算现有的研究进展，以及不同核算方法的特点讨论，详见 2.1.2 节。工业园区具有小尺度、经济活动水平强度高、系统边界多样等特点，从不同范围及不同视角对园区温室气体核算都有其合理性，但也存在不足。目前，针对工业园区温室气体排放核算尚未在国家层面核算框架下形成统一的核算方法，不同的核算方法与上一级行政尺度，如地市级、省级、国家层面

的核算如何衔接，采用什么样的核算方法指导园区碳达峰乃至碳中和，都仍面临着系列未解决的科学问题。

2. 中国工业园区能源消费结构和碳排放特征

2.1 工业园区能耗清单构建与温室气体核算方法

2.1.1 园区能耗清单构建是温室气体核算的基础

中国目前有国家级和省级工业园区共 2543 家^[9]，现行统计体系中尚未针对园区这一相对独立的经济活动载体开展统计，数据可得性成为园区研究的巨大挑战。园区能源消费核算是进行温室气体排放核算的基础，包括园区用于能源加工转换、工业过程、废弃物处理以及其他生产活动的分品种能源消耗。能源消费的统计品种包括一次能源（煤、天然气、原油、煤制品、油制品、煤矸石、生物质、生活垃圾、工业废料等）和二次能源（电力、热力、煤制品、石油制品等），共计 35 个细分种类，在附表 1 中详细列出了能耗数据采集清单。采集园区分品种能源消费数据时，以企业为基本单元，收集每个企业的分品种能源输入量和输出量，再将各企业数据加总得到园区分品种能源输入量和输出量。

需要明确的是，园区能源消费量应为净消耗，即能源输入与能源输出的差值，见公式 2-1。例如，某些园区企业将一次能源转换为二次能源（如燃煤发电、石油精炼），此部分二次能源转换产出应从园区净能耗中剔除，无论其用于园区其他企业或园区外部。

$$\text{净能源消费} = \text{能源总输入} - \text{能源总输出} \quad (2-1)$$

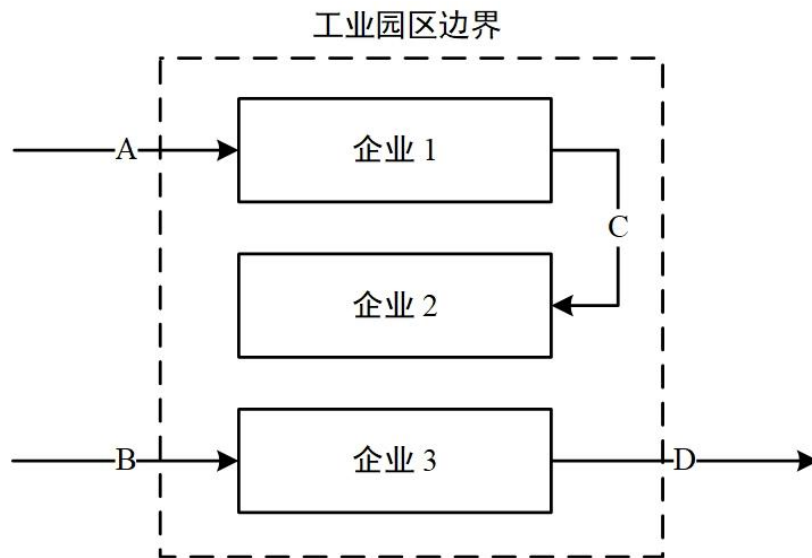


图 2-1 工业园区能源输入输出示意图

为更清晰地表述园区能源消费的核算范围，运用园区能流示意图进行表达（图 2-1）。图中假设园区包含 3 家企业，A、B、C、D 表示分品种能源输入流和输出流。由于园区各能源品种的输入、输出量为企业输入输出量的加总，因此总输入为 $A + B + C$ ，总输出为 $C + D$ ，则该园区净能源消费 = 能源总输入($A + B + C$) - 能源总输出($C + D$) = $A + B - D$ ，这一过程的目的是避免能源核算及后续的温室气体核算中的重复计算问题。

2.1.2 园区小尺度高强度活动水平及多系统边界特征导致碳核算尤为复杂

目前，温室气体排放相关研究在国家层面^[23, 24]、区域层面^[25, 26]和城市层面^[27-29]已十分广泛。在园区层面，仅有为数不多的工业园区温室气体排放与减排案例研究，如苏州工业园区^[30, 31]、北京经济技术开发区^[32]、沈阳经济技术开发区^[33]。相关研究所采用的园区温室气体核算方法主要从消费端视角出发^[34]，大多遵循世界资源研究所发布的核算导则，该导则按照温室气体排放来源的不同，将排放划分为范围 1~3^[35]。

对于工业园区而言，范围 1 排放指园区边界内的直接温室气体排放，如燃料燃烧和工业过程的排放，是园区的直接排放；范围 2 排放指外购电力和热力等二次能源的加工转换过程排放，是园区的间接排放；范围 3 排放指除范围 1 和范围 2 的所有间接排放，包括价值链上游和下游的排放，如外购原材料的生产过程排放，热力、电力生产上游的煤炭开采运输过程排放、废弃物园区外处理处置排放。针对苏州工业园区的案例研究涵盖了范围 1 和范围 2 排放^[30, 31]，北京经济技术开发区的案例研究则考虑了范围 1 和范围 2 排放，以及一些较为重要的范围 3 排放，如园区废弃物运输到区外进行处理处置^[32]。此外，Ban et al 估算了韩国 41 个生态工业园区的范围 1 排放，进而对温室气体减排绩效进行了分析^[36]。总的来说，上述研究尚未充分地分析园区经济活动的间接温室气体排放，且多为典型园区案例或小样本研究。进一步地，目前有少数研究从生命周期视角核算了园区案例的温室气体排放。Chen et al 建立了北京某高端产业园区的温室气体排放清单，涵盖了园区建设、运营和拆除阶段^[37]。Dong et al 采用混合生命周期评价方法分析沈阳经济技术开发区的碳足迹，考虑上游、现场和下游温室气体排放，其中外购原材料的间接排放通过投入产出分析方法进行估算^[33]。Yu et al 提出了一个园区能源相关碳排放核算框架，并应用于核算我国四家工业园区的范围 1 和范围 2 排放^[38]。

此外，园区因规划范围、面积界定的不同而系统边界划定各异，也为温室气体核算带来复杂性。实践中园区面积通常由核心区、扩展区、代管区、委托监管

区、辐射带动区等不同的提法，相应的面积大小也差异很大。不同园区进行温室气体排放结果比较时，物理边界一致性是核算难题之一。

为分析大样本园区的温室气体排放特征，划定统一的核算对象和范围是开展研究的重要环节。能源消费导致的温室气体排放约占全球总排放的 60%^[39]，相关研究显示能源利用是工业园区碳代谢的关键环节^[40, 41]。能源相关温室气体排放包括燃料燃烧产生的直接排放，以及燃料生产运输，外购电力、热力的生产传输等上游过程产生的间接排放。上述苏州工业园区、北京经济技术开发区和沈阳经济技术开发区的能源相关温室气体排放分别占总排放的 94%、97%和 62%^[31-33]。此外，其他研究也证实了能源相关温室气体排在园区总排放中占主导地位^[42]。上述结论均表明能源相关温室气体排放是园区排放的最主要组成部分。园区其他排放，特别是工业过程的直接排放和外购原材料的间接排放，由于不同园区主导产业的差异性，使得开展生命周期温室气体排放核算所必要的基础数据搜集具有复杂度高、耗时长、数据不可获得等实际困难。因此，在核算大样本园区的温室气体排放时，为保证核算范围的一致性和排放量的可比性，能源相关温室气体排放应作为主要考察对象。

2.1.3 碳达峰下园区尺度宜基于生命周期视角并重点核算能源相关排放

现有研究工作中，清单分析、投入产出分析和网络分析是温室气体排放核算的主要方法^[43]。2018 年全国生态环境保护大会上，习近平总书记指出，解决环境问题，要从系统工程和全局视角寻求新的解决之道。环境问题的复杂性主要原因之一在于污染转移，包括不同介质间转移、不同区域间转移、不同生命阶段间转移、以及代际间转移等产生的复杂性，促使在决策中从生命周期思考全面、系统地认识环境问题的复杂性。根据上述文献分析，本研究认为基于生命周期视角的中国工业园区大样本温室气体排放研究尚较少报道。从碳达峰和碳中和视角下，从生命周期视角核算园区温室气体，实践中一园一策制定低碳发展战略，更具有实际意义。

近年来，从生命周期视角追溯产业链条的上下游环节，识别间接温室气体排放已成为研究热点，例如能源生产、材料制造、区域贸易的隐含温室气体排放受到越来越多的关注^[44-46]。同时将直接和间接排放纳入温室气体核算范围，有利于更好地厘清园区的排放责任和未来削减空间。

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）是一种评价产品、技术或服务全过程环境影响的方法工具，考量范围覆盖从原材料采集、加工、处理，到产品生产、运输、销售、使用、回收和最终处置各个环节^[47]。生命周期评价经过长期

的演化发展，现阶段可以细分为基于清单分析的过程生命周期评价（Process-based LCA）、基于投入产出分析的生命周期评价（Economic input-output LCA）和将前两种方法进行耦合的混合生命周期评价(Hybrid LCA) [48]。

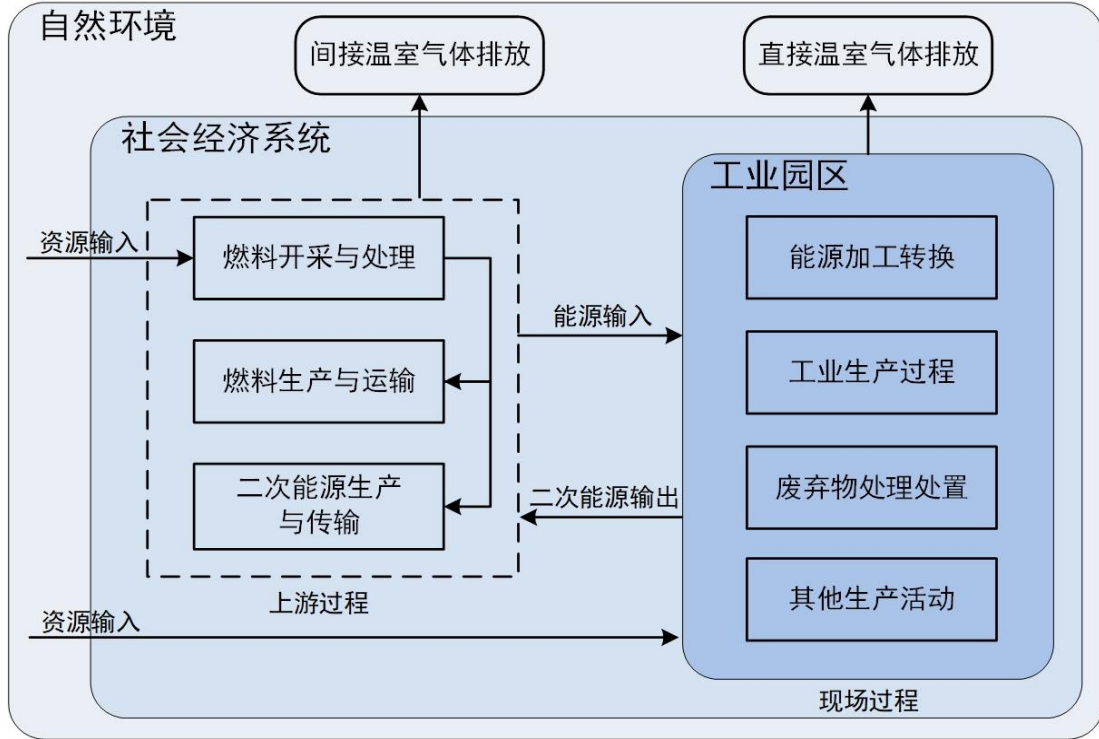


图 2-2 工业园区温室气体核算框架

本研究采用基于清单分析的过程生命周期评价方法核算园区温室气体排放，直接排放为园区边界内燃料燃烧产生的排放，间接排放包括燃料生产运输、外购二次能源生产运输相关的温室气体排放，方法框架见图 2-2。与能源消费核算相类似，园区加工转换产出的二次能源相关排放将从园区排放中扣除，即核算范围是园区负有实际责任的净排放。温室气体排放考虑 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 三种主要温室气体，按各自的 100 年全球变暖潜势（1，28，265）折算为 CO_2 当量^[49]。园区温室气体核算方法相关的变量和参数定义见表 2-1。本研究采用基于生命周期视角核算工业园区能源相关温室气体排放，将调研所得园区实景能耗数据与生命周期评价背景数据进行结合。背景数据采用中国生命周期基础数据库（Chinese Life Cycle Database, CLCD），该数据库是面向中国实际生产过程的本土化数据库，已广泛应用于中国环境问题的相关研究^[50, 51]。

园区直接排放对应世界资源研究所核算导则中范围 1 排放的主要部分，间接排放涵盖范围 2 和部分范围 3 排放^[52]。温室气体核算中， CO_2 排放包括矿物源排放和生物源排放，前者是将脱离全球碳循环且储存在矿物能源中的 CO_2 释放到

大气，而后者本身是碳循环的一部分，对大气的影晌是中和的^[52]。与大多数核算工作一致，本研究只将矿物源 CO₂ 排放纳入核算范围。

表 2-1 园区温室气体核算的变量与参数定义

变量/参数	定义
$DirectGHGEmi_i/IndirectGHGEmi_i$	第 i 家园区的直接/间接温室气体排放
$FuelCon_{ij}/FuelProd_{ij}$	第 i 家园区第 j 种燃料的总输入/总输出
$EleCon_i/EleProd_i$	第 i 家园区电力总输入/总输出
$HeatCon_i/HeatProd_i$	第 i 家园区热力总输入/总输出
$DirectFac(Fuel_j)$	第 j 种燃料燃烧的温室气体排放因子
$IndirectFac(Fuel_j)$	第 j 种燃料生产运输的温室气体排放因子
$IndirectFac(Ele, Grid_i)$	电力生产传输的温室气体排放因子（考虑第 i 家园区所在区域电网）
$IndirectFac(Heat)$	热力生产传输的温室气体排放因子

园区直接温室气体排放考虑所有燃料燃烧过程，分品种燃料的排放因子见附表 3，依照公式 2-2 进行核算。特别地，核算燃料燃烧产生的直接排放时，能源消费量不包括用于炼焦的原煤和用于精炼的原油，因为此两部分燃料消耗用于能源加工转换，不属于燃烧过程。

$$DirectGHGEmi_i = \sum_j (FuelCon_{ij} \times DirectFac(Fuel_j)) \quad (2-2)$$

园区间接排放考虑所有能源消费品种的上游生产运输环节，按公式 2-3 进行核算。需要明确的是，间接排放核算时只考虑从外部净输入园区的能源消费相关排放。当园区的某种能源输出大于输入，表示园区可实现该种能源的自给自足并输出多余部分。因此，对外输出能源可以抵消能源输入的温室气体排放。此外，外部电力生产传输的生命周期温室气体排放因子与园区所在区域电网相关。分品种能源生产运输过程的生命周期排放因子取自 CLCD 数据库，在附表 4 中列出。CLCD 生命周期排放因子为全国或相应区域的平均排放水平，此处理方法有助于鼓励园区的能源低碳生产^[42]。例如，当园区发电的温室气体排放水平低于区域电网排放水平，则此计算方法可以抵消更多温室气体排放。

$$IndirectGHGEmi_i = \sum_j ((FuelCon_{ij} - FuelProd_{ij}) \times IndirectFac(Fuel_j)) + (EleCon_i - EleProd_i) \times IndirectFac(Ele, Grid_i) + (HeatCon_i - HeatProd_i) \times IndirectFac(Heat) \quad (2-3)$$

2.2 国家级工业园区能源消费结构与碳排放特征

2500 余家园区中,国家级经济技术开发区(以下简称国家经开区)共 219 家,是中国园区中发展相对领先的一批,具有较好的经济绩效,数据可得性和可靠性也相对较高。通过实地调研、调查表发放(见附表 1)及商务部综评数据等多渠道数据支持,本研究采集了 213 家国家经开区相关数据,覆盖了全部国家级经开区总数的 97%。采集的基础数据包含园区 GDP、年末从业人口数、土地面积、分品种能源消耗、水资源消耗和园区管理委员会的经纬度坐标等。经统计,此 213 家园区在 2015 年 GDP 总计达到 7.59 万亿元,占同年全国 GDP 的 11%^[53]。

从地理位置来看,213 家国家经开区分布在除港澳台之外的 31 个省级行政区(见图 2-3),其中 46% 的国家级经开区位于华东,接近半数。而位于西北、华中、东北、华北、西南和华南的园区分别占总数的 11%、10%、10%、9%、9% 和 5%。具体到省级层面,江苏和浙江分别包含 26 家和 21 家园区,数量明显高于其他省份;山东、安徽、福建和江西分别有园区 13 家、12 家、10 家和 10 家,其他各省级行政区的园区数量均少于 10 家(详细信息见附表 2)。



图 2-3 213 家国家级经开区地理位置分布

2.2.1 园区能源消费结构中煤炭占比高于全国平均水平

基于园区能耗数据清单和能耗核算方法,计算得出 213 家国家经开区在 2015 年能源消费总计 3.89 亿吨标准煤,占同年全国能源消费总量的 10%^[53],同年此

213 家国家经开区贡献了占全国 GDP 的 11%。各能源消费品种按低位热值统一折算为标准煤，折算因子见附表 6。

结合地理区位，进一步分析 213 家园区的能源消费结构（图 2-4）。从能源品种来看，燃煤消耗占绝对主导地位，占总消费量的比例高达 74%，明显超过同年中国工业部门的燃煤消费份额（56%）^[54]，表明园区对于煤炭的依赖度高于全国平均水平。原油和天然气的份额分别为 36%和 8%，排名第二、三位。园区能源消费品种的多样化特征明显，非常规能源如余热、生物质、生活垃圾、煤矸石、工业固废得到了一定程度的利用，可以部分替代常规化石能源消耗。然而，非常规能源的总份额仅为 2%，表明园区的低碳能源发展还有很大提升空间。

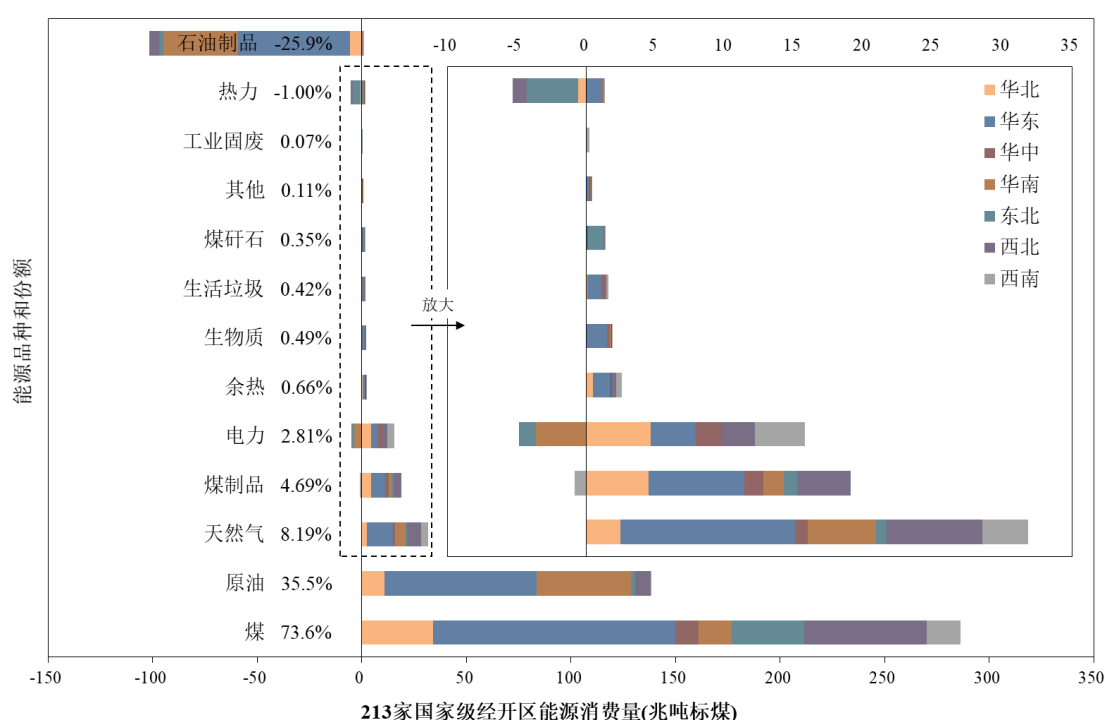


图 2-4 213 家国家级经开区能源消费结构

213 家园区电力消费模式均为：园区能源基础设施产生的电力直接上网，园区企业用户直接从电网购电。园区净外购电力仅占能源消费总量的 2.8%，意味着园区上网电量略低于外购电量，在电力消费方面基本可以实现自给自足。从整体来看，213 家园区净对外输出石油制品和热力。其中，20 家园区建设有石油精炼设施，其生产的石油制品输出到园区外，如上海化工园区^[55]。因此，石油制品的净消费量为负值，占总能源消费的-26%。园区能源基础设施产生的热力通常直接供给附近的园区企业用户，多余部分外供至区外。213 家园区中有 72 家园区净对外供热，热力总体净消费为负值但较小，表示在满足园区本身热力需求基础上，剩余小部分热力向区外供应。

从地理区位来看，213 家国家经开区按中国地理分区划分为七个区域。位于华东地区的园区在多数品种能源消费中占最高比例，如煤（40%）、原油（53%）、天然气（40%）。同时，位于华东和华南的园区输出了绝大部分石油制品，分别占输出总量的 53% 和 36%，表明此两个区域的园区布局有最多的石油精炼设施。就电力消费而言，位于华北、华东、东北、西北、西南的园区为电力净输入，分别占电力消费总量的 43%、30%、17%、22% 和 33%，而位于华南和东北的园区为电力净输出。从热力消费来看，由于冬季的社区采暖需求，东北、华北、西北三个区域的园区对外净输出热力，其中以东北园区输出占主导。

2.2.2 基于生命周期视角充分认识园区直接和间接温室气体排放特征

(1) 园区直接和间接温室气体排放分别占总排放量的 85% 和 15%

基于前文提出的生命周期视角园区温室气体核算方法，核算了 213 家国家级经开区的直接排放（园区边界内燃料燃烧产生的排放）和间接排放（园区所用燃料的上游生产运输过程排放和外购二次能源的生产运输过程排放）。总体上看，213 家园区在 2015 年的直接与间接温室气体排放分别为 10.4 亿吨和 1.8 亿吨 CO₂ 当量，各自占总排放的 85% 和 15%。结果表明，虽然直接排放为主要部分，但间接排放仍占有显著比例，园区对间接排放的责任和减排义务同样需要加以关注。由此引申，针对工业园区的温室气体达峰及减排政策制定，需要进一步明确并统一核算方法、系统边界、核算范围等。

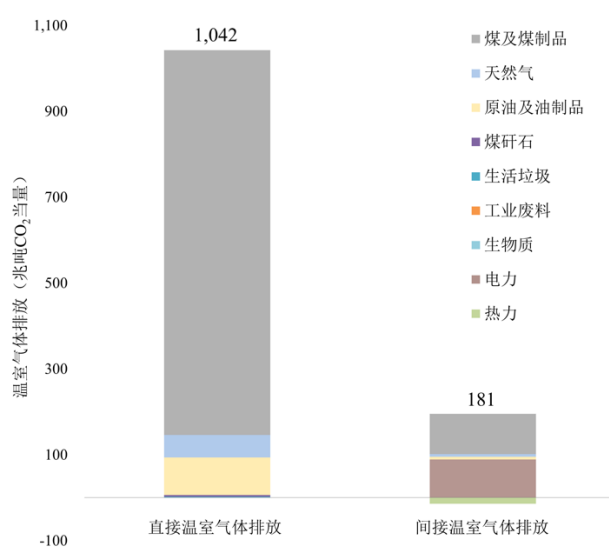


图 2-5 213 家园区直接与间接温室气体排放

2015 年中国温室气体排放总量为 130.4 亿吨 CO₂ 当量^[56]，213 家园区的能源相关温室气体总排放相当于全国排放的 9.4%，因此工业园区低碳化发展对于国

家层面应对气候变化具有不容忽视的作用。将 213 家园区的直接排放和间接排放按能源品种作进一步分解，如图 2-5 所示。

(2) 煤炭相关直接排放占燃料直接排放总量 86%，间接排放占相应总量 52%

从直接排放来看，煤及煤制品相关的直接排放为 8.96 亿吨 CO₂ 当量，占直接排放总量的 86%；其次为原油及其制品和天然气，分别占直接排放的 8.3% 和 5.1%；煤矸石、生活垃圾、工业废料、生物质等非常规能源的直接排放总占比仅为 0.6%，然而非常规能源在园区消费中占 2% 的份额，因此总体上其单位消费量的温室气体排放平均水平明显低于其他常规化石能源。从间接排放来看，煤及煤制品的上游生产运输过程排放为 0.93 亿吨 CO₂ 当量，占间接排放总量的 51.7%；其次为外购电力的上游生产传输过程排放（0.89 亿吨 CO₂ 当量），占间接排放总量的 49.3%；其余间接排放为天然气、油及其制品的生产运输相关排放，分别占 3.7% 和 3.3%；由于园区热力为净输出，因此间接排放为负值，占比为-8%。

(3) 空间排放量较大的园区多位于东部沿海和东北西北内陆地区

图 2-6 从空间位置进一步展示了 213 家国家级经开区直接和间接温室气体排放。图中，蓝色扇形和黄色扇形分别代表直接和间接排放，扇形面积与排放量大小成正比。各园区 2015 年的温室气体排放范围是-105~8,034 万吨 CO₂ 当量，园区间排放体量差异显著。其中，210 家园区温室气体排放（包含直接和间接排放）为正值，其余 3 家为净负排放，负排放表示园区的能源加工转换效率优于 CLCD 排放因子所代表的全国或区域相应品种能源的生产效率平均水平。举例而言，当某园区的电力生产过程温室气体排放强度（即生产单位上网电力的温室气体排放）低于区域电网平均排放水平，则其上网电量隐含的间接排放不仅将完全抵消实际发电过程的直接排放，还将多扣除一部分使园区总排放为负值（相关计算方法参见公式 2-3）。

213 家园区中，共有 167 家园区的间接温室气体排放为正值，其余 46 家为负值，负的间接排放代表园区具有二次能源（如热、电、石油制品）的净输出。此外，213 家园区中 48% 的园区，其间接排在总排放中占比高于 50%，意味着外部能源输入在园区总体能源消费中占主导地位。从图 3-6 可见，多数排放量较大的园区位于东部沿海地区和东北、西北内陆地区。

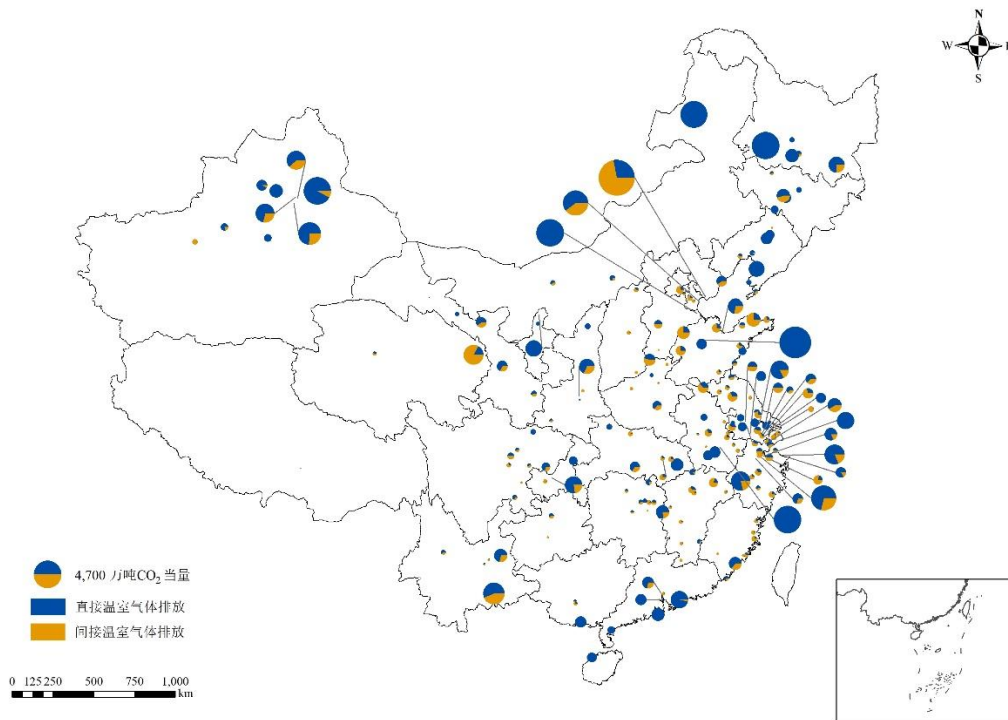


图 2-6 213 家园区温室气体排放空间分布

（注：每个饼图代表该园区温室气体排放，饼图面积与排放量成正比。蓝色和黄色扇形分别为直接和间接排放，若间接排放为负，则直接排放被抵消一部分，饼图只显示蓝色。）

（4）园区温室气体排放地域差异及主要驱动力

为识别园区温室气体排放的主要驱动力，进一步将直接和间接排放按能源品种和地理区位进行分解，可得园区温室气体排放热图（图 2-7）。图中蓝色代表正排放，黄色代表负排放，颜色深度与排放量绝对值成正相关。从图可见，部分区域的园区对外净输出二次能源，其间接排放为负值。华东、西北、华北、东北园区消耗煤及其制品是产生绝大部分直接排放和间接排放的动因，而华南、东北园区的净输出电力和东北园区的净输出热力是园区负间接排放的主要来源。在七个区域的园区中，华东园区的温室气体排放量最大，分别占直接排放的 41%和间接排放的 40%。这是由于华东园区在 213 家国家经开区中占有绝对的数量优势（97 家）和经济体量优势（园区总 GDP 的 53%），213 家园区的分区域详细统计数据可参见附表 2。基于上述结果，可针对相应区域的园区进行煤炭替代或大力推广煤炭清洁利用技术，以削减燃煤相关温室气体排放；根据园区的剩余能源产出规模，在园区周边适当布局热用户，可充分消纳园区的能源产出，提高能源效率和利用率。

(5) 园区温室气体排放绩效比较

为深入比较分区域园区的温室气体排放绩效，将园区经济发展、土地面积、从业人口规模等要素纳入考量，计算各区域园区的温室气体平均排放强度。强度计算采用该区域园区的总排放分别除以其总土地面积、总 GDP 和总从业人口（见表 2-2）。

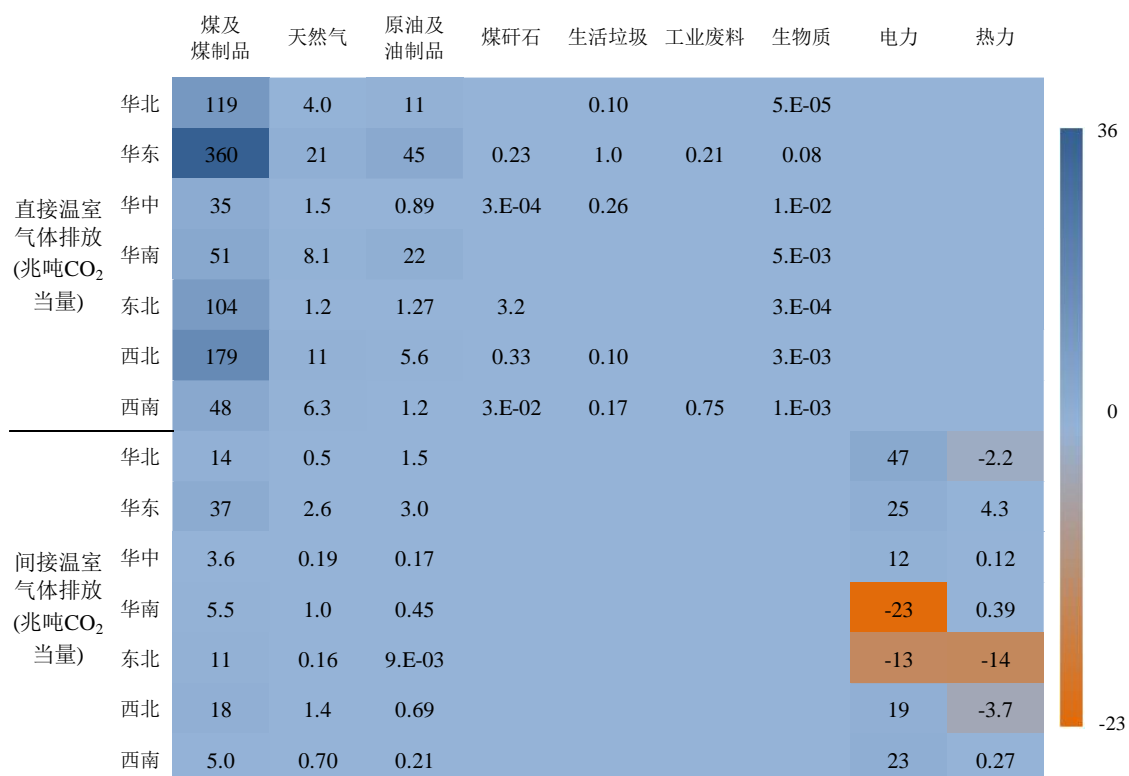


图 2-7 213 家园区温室气体排放分解矩阵

结果显示，各区域园区之间温室气体排放强度差异性十分显著，各强度的区间范围是 19,641~115,704 吨/平方公里、0.76~5.93 吨/万元和 37~238 吨/人。从单位土地面积排放来看，213 家园区的排放强度远高于全国单位土地面积排放水平（1,358 吨/平方公里，即全国总排放与国土面积比值^[53]），意味着园区是全国范围内的空间排放热点，应将其作为温室气体减排的关键着力点。总的来看，华东、华中、华南的园区排放绩效优于其他区域园区；华北和西北的园区由于布局较多高耗能产业，且广泛采用燃煤供热以满足冬季热力需求，导致额外的燃煤消费量，因而其排放绩效相较其他园区有较大差距。

具体分析来看，西北园区拥有最小的平均 GDP（170 亿元）和平均从业人口数（42,345 人），以及第二小的平均土地面积（92 km²），但平均排放量最大（1,006 万吨 CO₂ 当量），导致其各项排放强度均明显较高。同时，华北园区拥有最小的

平均土地面积（84 km²）和第二高的平均温室气体排放量（997 万吨 CO₂ 当量），因此单位土地面积排放水平远超其他园区。分区域园区详细统计数据见附表 2。基于上述结果，排放强度较高的华北和西北园区可作为推广温室气体减排技术的优先考虑对象。

表 2-2 213 家园区的温室气体排放平均强度

区域	单位土地面积温室气体排放 (吨/平方公里)	单位 GDP 温室气体排放 (吨/万元)	单位从业人口温室气体排放(吨/人)
华北园区	115,704	2.61	126
华东园区	41,363	1.24	48
华中园区	21,208	0.76	37
华南园区	19,641	1.22	62
东北园区	28,311	1.70	78
西北园区	109,493	5.93	238
西南园区	42,470	1.32	70
全部园区	45,293	1.61	68

2.2.3 园区能源基础设施温室气体排在园区直接排放中贡献显著

为量化分析园区能源基础设施在园区排放中的贡献，考虑数据可得性，本研究进一步分析了 49 家园区的能源消耗数据，并通过燃料消耗量和燃料燃烧的排放因子核算得出园区能源基础设施的直接温室气体排放。由此，确定了能源基础设施排在园区直接排放中的占比，见图 2-8。

结果显示，园区能源基础设施的直接温室气体排放为 0.09~30.6 兆吨 CO₂ 当量，且与园区经济体量无显著相关性。园区能源基础设施直接排在园区直接排放中占比范围是 38.4%~99.5%，中位数 75.2%。这一结果证实了能源基础设施是园区温室气体排放的主要来源，为后续将园区能源基础设施作为温室气体减排重点提供了依据。

通过分析园区能量流动，能源基础设施是园区的主要热力供应源。49 家园区可按照 80% 占比划分为上下两个区域。从园区主导产业来看，能源基础设施温室气体排在园区直接排放中占比高于 80% 的 24 家园区布局有更多热力消耗密集型产业，如化工、纺织、造纸等；而排放占比低于 80% 的 25 家园区布局有更多的高新技术产业，如电子、信息技术等，热力消耗相对较低。

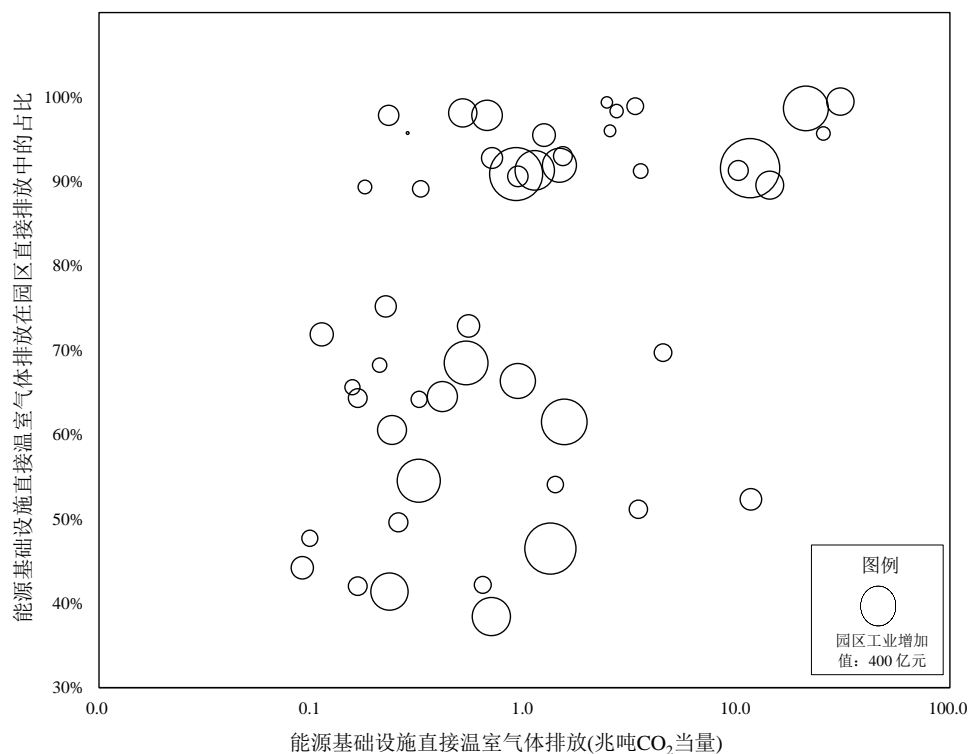


图 2-8 49 家工业园区能源基础设施温室气体排放

(注: 图中横轴为设施排放体量的对数坐标轴, 纵轴为设施直接排在园区直接排放中的占比; 气泡大小与园区工业增加值规模成正比。)

2.3 工业园区二氧化碳排放总体贡献占全国碳排放三成

213 家国家级工业园区 2015 年工业增加值为 47,220 亿元, 二氧化碳总排放量为 113,472 万吨, 此 213 家园区的二氧化碳平均排放强度为 2.4 吨/万元工业增加值。按照工信部《工业转型升级规划(2011-2015 年)》发布的数据,“十一五”期间中国工业园区贡献了全国工业产出的 50% 以上^[10]。保守估计, 2015 年工业园区贡献了 50% 的全工业增加值, 即 117,484 亿元^[3], 则全国工业园区二氧化碳排放为 282,324 万吨。

根据国际能源署数据,我国 2015 年能源相关二氧化碳排放为 913,720 万吨, 则工业园区贡献了全国排放的 31%, 占比相当显著。随着近年来工业企业入园率逐步提升, 例如至 2020 年诸多城市的化工企业入园率已达到 80%, 工业园区碳排放在全国的贡献率将会持续攀升, 明确园区碳减排路径并推广行之有效的碳减排措施已刻不容缓。

3. 中国工业园区低碳发展路径

3.1 2°C目标下 2015-2050 年工业园区二氧化碳需减排 65%

在实现 2°C 全球温控目标和我国自主贡献目标的双重压力下，极为有限的碳预算给中国工业园区高质量发展提出了更严格的要求，探究我国工业园区中长期低碳发展路径尤为关键。根据能源基金会近期发布的《中国碳中和综合报告 2020》^[57]，在 2°C 温控目标下中国工业部门 2035 年和 2050 年二氧化碳排放总量相比 2015 年需分别下降 20~35% 和 50~80%。

基于前文得出的 2015 年中国工业园区二氧化碳排放量为 28.2 亿吨，工业园区 2015~2035 年和 2015~2050 年二氧化碳排放量削减幅度参考上述工业部门降幅区间的中位数 28% 和 65% 作为后续研究的参考目标，进而规划园区未来排放轨迹和减排路径，即 2035 年和 2050 年全国工业园区二氧化碳排放量限值预期控制在 20.3 亿吨和 9.9 亿吨。由此，全国工业园区 2015~2035 年和 2035~2050 年的碳减排目标下限则需要分别达到 7.9 亿吨和 10.4 亿吨。

基于此目标，第 3-4 章对中国工业园区低碳化的主要路径进行分析，并突出工业园区发展中形成的“园区物理边界内普遍建有可共享的能源、环境基础设施”这一特点，重点从基础设施低碳化及基础设施共生视角揭示工业园区二氧化碳减排的路径、潜力及成本效益。

3.2 四大减排路径推动工业园区深度低碳化

3.2.1 园区减排情景及潜力量化方法

从工业系统和能源系统角度出发，结合供应侧和需求侧进行分析，工业园区碳减排路径涵盖以下方面：1) 产业结构优化，降低高耗能行业比例；2) 能效提升，涉及技术节能和能源产出率提升；3) 能源结构调整，增加风能、光能、氢能、生物质能、工业余热、生活垃圾与污泥在能源消费中的比例；4) 碳捕集、利用与封存（Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS）。

基于上述四种碳减排路径，并充分考虑不同工业增速下的园区经济发展情景，研究采用指数分解法进一步量化识别各路径的减排效果。指数分解分析和结构分解分析是目前广泛应用的两种分解分析法，在识别多种社会经济驱动力环境响应的相关研究中具有良好效果^[58]。指数分解法与结构分解法相比，前者不依赖投入产出表，更适用于量化分析园区层面的时间序列数据^[59, 60]。具体地，本研究选用对数平均迪氏指数法（Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI），其具有路径独

立、加总一致等优点^[61]，在碳排放驱动力分析等政策研究中被广泛采用^[62, 63]。本研究以 2015 年作为基准年、2035 年作为目标年，以及 2035 年作为基准年、2050 年作为目标年，分别运用 LMDI 分解法量化经济增长带来的碳增量以及四种减排路径（产业结构优化与能效提升、能源结构调整、CCUS、区域电网混合电力碳强度下降）的碳减排潜力。

根据我国工业增加值历史数据^[3]，2019 年全国工业增加值同比增长 5.3%，2014~2019 年期间工业增加值年均增长率为 6.3%，工业增加值增速在未来一段时期将逐步放缓进而保持相对稳定。本研究设置低、高增速两种情景：低增速情景下，2015~2035 年全国工业园区的工业增加值年均增长 3%，2035~2050 年均增长 1.5%；高增速情景下，2015~2035 年全国工业园区的工业增加值年均增长 5%，2035~2050 年均增长 3%。

四种碳减排路径的相关参数设置见表 3-1。首先，能耗强度是单位工业增加值的综合能耗，反映了产业结构优化和能效提升的双重作用，参考值采用《国家生态工业示范园区标准（HJ 274-2015）》，即低增速情景下 2035 年全国园区平均能耗强度达到生态工业园区水平，2050 年在 2035 年基础上降低 10%；高增速情景能耗强度水准略高于低增速情景。

在能源结构方面，生活垃圾、生物质和污泥、余热、风、光、氢等非化石能源占比预期将显著提升。具体地，根据《生物质能发展“十三五”规划》^[64]，生活垃圾焚烧和生物质的发电装机容量在 2015-2020 年将分别增长 60%和 32%，同时考虑到园区将污水处理厂污泥进行掺烧的工程应用不断增加（苏州工业园区、上虞经济技术开发区等），因此本研究设定两种情景下 2035 年的生活垃圾、生物质（含污泥）的比例将分别提升至 1%和 1.5%，至 2050 年保持不变。相似地，《“十三五”节能减排综合工作方案》^[65]和园区实践案例均明确了工业余热的回收利用率将在未来一段时间内显著提升，因此设定余热在两种情景下 2015-2035 年期间从 0.7%的占比均提升至 2%。根据《国家生态工业示范园区标准（HJ 274-2015）》，可再生能源使用比例至少达到 9%，本研究取最低值，即高增速情景下到 2035 年全国园区风电、光电平均各占比 4.5%，低增速情景下风、光各占比 3%，至 2050 年保持不变。基于能源基金会《中国碳中和综合报告 2020》^[57]，工业生产过程将更多使用零碳氢能作为替代能源，其占比在 2050 年将提升至 3-18%。本研究参考此取值范围以及工业园区减排总量限值，以 1%作为步长，分别试算得出了实现减排目标的 2035 年和 2050 年氢能最低占比，并假设零碳氢能的生命周期碳排放因子为零。上述非化石能源占比提升将直接削减园区能源结构中的燃煤所占份额。

《中国电力行业 2019 年度发展报告》显示，2018 年燃煤发电占全国发电量的 64%，结合《中国碳中和综合报告 2020》中 CCUS 至 2035 年和 2050 年分别覆盖化石燃料设施的 30-65% 和 70-85%，据此设定高、低增速情景下工业园区 CCUS 覆盖率（见表 3-1），其中 2035 年 CCUS 仅作用于燃煤设施，2050 年扩展至燃气、燃油等设施；相应地，结合全国 CCUS 覆盖率和煤电占比，可推算出电网混合电力碳强度降幅，如表 3-1 所示。

表 3-1 2015-2050 年中国工业园区碳减排路径参数设置

参数	年份	数值	说明
能耗强度 (吨标准煤/万元)	2015	0.82	实际数据
	2035 (低增速)	0.50	国家生态工业示范园区标准 (HJ 274-2015)
	2050 (低增速)	0.45	相比低增速 2035 年下降 10%
	2035 (高增速)	0.40	相比低增速 2035 年下降 0.1
	2050 (高增速)	0.35	相比低增速 2050 年下降 0.1
能源结构-垃圾	2015	0.42%	实际数据
	2035/2050	1.0%	生物质能发展“十三五”规划
能源结构-生物质和污泥	2015	0.49%	实际数据
	2035/2050	1.5%	生物质能发展“十三五”规划
能源结构-余热	2015	0.66%	实际数据
	2035/2050	2.0%	“十三五”节能减排综合工作方案
能源结构-风电	2015	0	实际数据
	2035/2050 (低增速)	3.0%	国家生态工业示范园区标准 (HJ 274-2015)
	2035/2050 (高增速)	4.5%	
能源结构-光伏发电	2015	0	实际数据
	2035/2050 (低增速)	3.0%	国家生态工业示范园区标准 (HJ 274-2015)
	2035/2050 (高增速)	4.5%	
能源结构-氢能	2015	0	实际数据
	2035 (低增速)	5%	参考《中国碳中和综合报告 2020》取值范围，以 1% 为步长，碳减排目标为约束条件得出的下限值
	2050 (低增速)	9%	
	2035 (高增速)	7%	
	2050 (高增速)	10%	
CCUS 覆盖率	2015	0	实际数据
	2035 (低增速)	30%	仅针对燃煤设施
	2050 (低增速)	70%	
	2035 (高增速)	40%	针对燃煤、燃气、燃油设施
	2050 (高增速)	80%	
电网碳强度降幅 (相对 2015 年)	2035 (低增速)	20%	按照 CCUS 覆盖率和煤电占比推算
	2050 (低增速)	40%	
	2035 (高增速)	30%	
	2050 (高增速)	50%	

各年份能源结构和分品种能源的直接、间接二氧化碳排放因子在表 3-2 中列出。其中，直接排放因子参考自引自世界资源研究所发布的《GHG Protocol Tool for Energy Consumption in China (V2.1)》^[52]；间接排放因子涵盖能源开采、生产、运输（传输）等上游环节的碳排放，取值参考自前文提及的中国生命周期基础数据库^[50]，此本土化数据库已广泛应用于中国环境领域的相关研究。表 3-2 所列的煤及其制品、石油及其制品为能源大类，其对应的总体碳排放因子与各细分品种的排放因子和消费结构均相关，例如负的间接排放因子源于此类能源加工转换产生的二次能源品种大量净输出。各细分品种的碳排放因子可参考上述数据源。

表 3-2 不同情景下能源结构与分品种能源生命周期碳排放因子
(注：L 表示低增速情景，H 表示高增速情景)

能源品种	能源结构 (%)					CO ₂ 排放因子 (t/GJ)		
	2015	2035L*	2050L	2035H*	2050H	直接	间接	总计
煤及其制品	78.6	64.7	60.7	59.7	56.7	0.1000	0.0027	0.1028
石油及其制品	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	0.0785	-0.0003	0.0782
天然气	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	0.0568	0.0042	0.0610
电力	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	-	0.2570	0.2570
热力	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-	0.1177	0.1177
垃圾	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0330	-	0.0330
生物质和污泥	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-	0
余热	0.7	2.0	2.0	2.0	2.0	-	-	0
工业固废	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1289	-	0.1289
其他	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	0
风力发电	0	3.0	3.0	4.5	4.5	-	0.0079	0.0079
光伏发电	0	3.0	3.0	4.5	4.5	-	0.0186	0.0186
零碳氢能	0	5.0	9.0	7.0	10.0	-	-	0

3.2.2 园区 2015-2050 年二氧化碳减排 65% 目标下四大路径之作为

中国工业园区二氧化碳排放量驱动因子分解参考 Kaya 恒等式，可分解为经济总量、能耗强度、能源结构、能源碳强度等因子相乘的形式^[61]，见式 3-1。其中， C 表示二氧化碳排放量（万吨）， C_i 表示第 i 种能源的排放量； $I\Delta V$ 为工业增加值（亿元）； EI 为能源强度（吨标准煤/万元）； ES_i 表示能源结构，即第 i 种能源所占份额； EF_i 表示第 i 种能源的生命周期碳排放因子（吨/吨标准煤）； $i=1..6$ ，依次表示煤、石油、天然气、电力、热力、非化石能源（垃圾、生物质和污泥、余热、风、光、氢等），具体如表 3-2 所示。

$$C = \sum_i C_i = \sum_i I\Delta V \times EI \times ES_i \times EF_i \quad (3-1)$$

采用 LMDI 分解法，进一步将基准年 T_0 到目标年 T 期间的二氧化碳排放量变化分解为上述各因子引起的变化量之和，见式 3-2。其中， ΔC_{IAV} 、 ΔC_{EI} 、 ΔC_{ES} 、 ΔC_{EF} 分别代表工业增加值增长、能源强度下降、能源结构优化和碳排放因子改变导致的二氧化碳排放量变化， ΔC_{EF} 又可进一步分解为 CCUS 覆盖率增加和电网碳强度下降带来的碳排放变化量，即 ΔC_{CCUS} 和 ΔC_{Grid} 。

$$\begin{aligned}
 \Delta C &= C_T - C_{T_0} = \sum_i \frac{C_i^T - C_i^{T_0}}{\ln C_i^T - \ln C_i^{T_0}} \times (\ln C_i^T - \ln C_i^{T_0}) \\
 &= \sum_i \frac{C_i^T - C_i^{T_0}}{\ln C_i^T - \ln C_i^{T_0}} \ln \frac{IAV^T}{IAV^{T_0}} + \sum_i \frac{C_i^T - C_i^{T_0}}{\ln C_i^T - \ln C_i^{T_0}} \ln \frac{EI^T}{EI^{T_0}} \\
 &\quad + \sum_i \frac{C_i^T - C_i^{T_0}}{\ln C_i^T - \ln C_i^{T_0}} \ln \frac{ES_i^T}{ES_i^{T_0}} + \sum_i \frac{C_i^T - C_i^{T_0}}{\ln C_i^T - \ln C_i^{T_0}} \ln \frac{EF_i^T}{EF_i^{T_0}} \\
 &= \Delta C_{IAV} + \Delta C_{EI} + \Delta C_{ES} + \Delta C_{EF} \\
 &= \Delta C_{IAV} + \Delta C_{EI} + \Delta C_{ES} + \Delta C_{CCUS} + \Delta C_{Grid} \quad (3-2)
 \end{aligned}$$

经计算，得出低、高增速情景下我国工业园区面向 2035 年和 2050 年的排放量和四种碳减排途径各自的减排贡献，见图 3-1 和图 3-2。总的来说，经济增长带来的碳排放新增量十分显著，但通过四种减排途径可以将其抵消并实现净减排，即实现 2015-2035 年和 2035-2050 年分别减排 28% 和 51% 的目标。

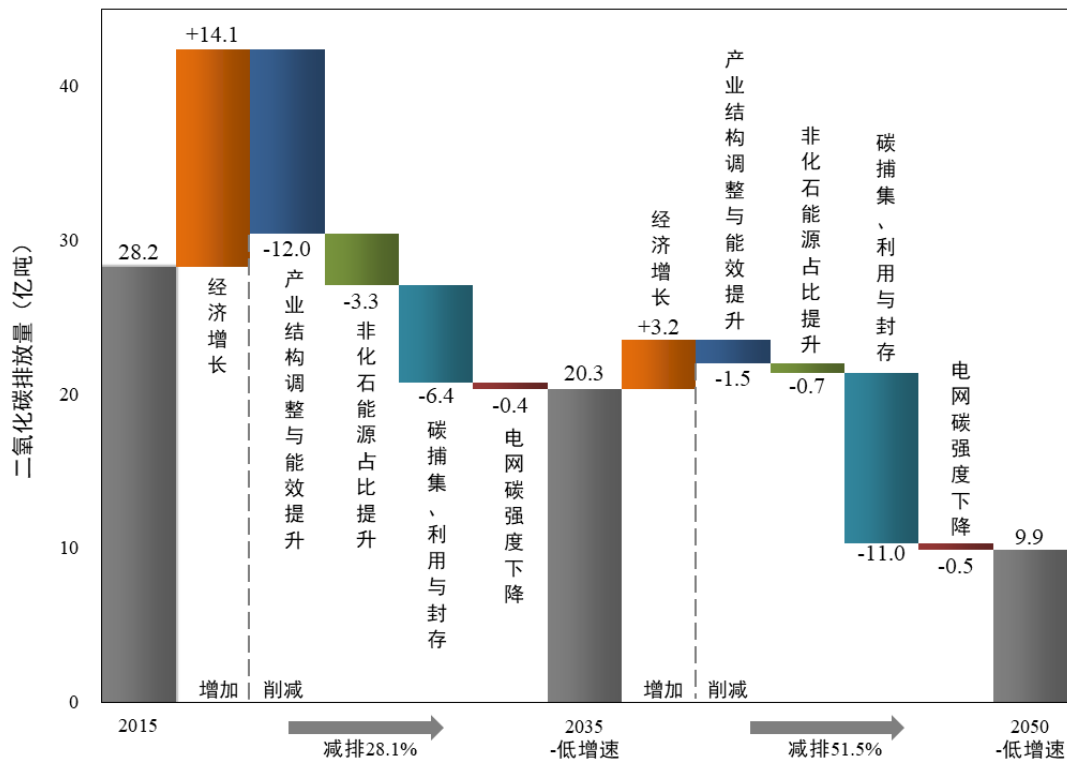


图 3-1 中国工业园区面向 2035 和 2050 年的碳减排路径-低增速情景

具体来看，2015-2035 年期间，产业结构调整与能效提升（即单位工业增加值产出的能耗下降）的碳减排潜力最为显著，非化石能源占比提升和 CCUS 覆盖

率增加也可带来可观的碳减排效果。电网碳强度下降的减排效果并不明显，这是由于园区从电网净输入电力在园区总体能源消费中占比十分有限，仅不足 3%，即园区物理边界内自备的能源基础设施在 2015 年已基本能实现电力的自给自足。此外，从生命周期碳排放因子来看，由于电力的生产、转换、传输过程中的损耗较大，对于园区这一直接耗电量较大的经济体而言，由本地生产电力并实施大用户直供，实现就地消纳，将具有更好的低碳绩效。从时间跨度来看，产业结构优化、能效提升、能源结构优化在 2035-2050 年期间的减排贡献将明显减小，表明至 2035 年此三方面的碳减排潜力基本挖掘殆尽，远期的深度减排需主要依靠持续推进工业生产活动中的系统优化、区域层面的产业布局优化和末端针对性的 CCUS，进而完成总体碳减排目标。

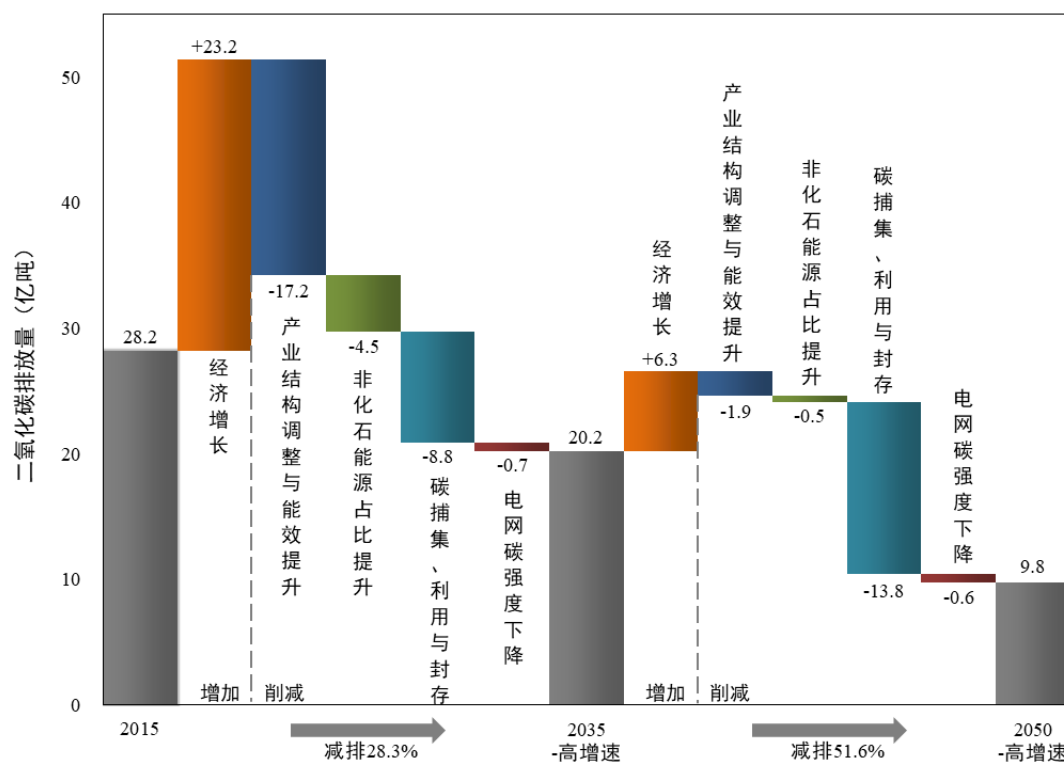


图 3-2 中国工业园区面向 2035 和 2050 年的碳减排路径-高增速情景

进一步，将能源结构优化的碳减排效果分解为生活垃圾、生物质和污泥、余热、风、光、氢等六种能源，研究各自的减排贡献。针对特定基准年和目标年，本研究采用下述取值作为每种能源在能源结构优化碳减排总量中的贡献权重：某种能源的增长份额 ÷ 非化石能源总增长份额 × (1 - 某种能源的碳排放因子 ÷ 煤的碳排放因子)，进一步得到表 3-3 所示的六种非化石能源占比提升相应的碳减排贡献。

结果显示，碳减排贡献最显著的为氢能、风电、光伏，此三者 在 2015-2035 年期间减排贡献率总计可达 79%-84%，尤其氢能在 2035-2050 年可贡献 100%，是能源结构深度减排最有潜力的措施。而垃圾、生物质和污泥、余热三类由于在能源结构中占比较小，贡献并不显著。考虑到本研究采用较保守的参数取值，此三类能源在 2035-2050 年期间所占份额并未有进一步增长，若未来大力提升此三类能源的回收利用率，并改进焚烧炉技术以降低煤掺烧比例，其带来的碳减排效果有望进一步增加。

表 3-3 六种非化石能源占比提升的碳减排贡献
(注：L 表示低增速情景，H 表示高增速情景)

能源品种	二氧化碳减排量 (亿吨)				碳减排贡献比例			
	2015-2035L*	2015-2035H*	2035-2050L	2035-2050H	2015-2035L	2015-2035H	2035-2050L	2035-2050H
垃圾	-0.10	-0.10	0	0	3.0%	2.2%	0	0
生物质和污泥	-0.26	-0.26	0	0	7.8%	5.8%	0	0
余热	-0.34	-0.34	0	0	10.4%	7.6%	0	0
风电	-0.70	-1.05	0	0	21.3%	23.6%	0	0
光伏	-0.63	-0.94	0	0	18.9%	20.9%	0	0
氢能	-1.27	-1.78	-0.66	-0.49	38.5%	39.8%	100%	100%

4. 以基础设施为核心的中国工业园区低碳措施

建立工业园区是全球经济发展的一个普遍现象。工业园区因企业集聚，在产业链、供应链构建，以及基础设施共享方面具有得天独厚的优势，也是园区绿色发展的重要举措。基础设施方面，基本的要求为“九通一平”，其中可共享的集中式能源基础设施和环境基础设施是极为重要的两类，前者以服务园区的集中式热电联产和热力厂为主，后者以集中式污水处理厂为主，后者也是“十三五”期间国家“水十条”推进园区水污染防治的重要着力点。中国的工业园区 80% 以上在其物理边界内建设有能源基础设施和环境基础设施，这些基础设施服役周期长，排放具有锁定效应。本研究基于前期建立的基础设施数据库，深入探究了基于基础设施视角的工业园区碳减排潜力。

此外，我们提出推进园区的碳减排，重点之一落脚在基础设施，这与仔细梳理园区现行低碳政策措施的得出的结论一致。以下 4.1 节首先对工业园区现行低碳政策措施分析以识别关键技术，进而全面剖析了园区能源基础设施存量的结构特征及其环境影响，提出了能源基础设施五项减排措施并量化了其多污染物协同

减排的潜力和经济效益，最后从“能源—水”耦合的视角，阐明了通过园区基础设施共生进一步挖掘碳减排潜力的可行性。

4.1 工业园区现行低碳政策措施分析与关键技术

基于文献调研，一方面，将现有政策措施或实践中推动工业园区低碳发展的关键行动及政策措施进行识别和分类，识别政府管理部门推动低碳转型的措施以及减排效果，按普适性高低和减排效果强弱对减排技术途径进行分类；另一方面，分析文献中已开展的工业园区温室气体排放核算案例研究，以及针对案例园区提出的温室气体减排及低碳发展政策建议。进一步地，基于项目前期研究构建的大样本园区数据库，分析数据库中园区现行低碳政策措施，评价其实施效果、障碍、成功要素、驱动力等。进而，结合国家低碳发展、能源革命相关政策，从可行性、普适性等角度，筛选出减排效果显著、普适性高的适合园区特点的温室气体减排关键技术。

4.1.1 园区低碳措施的精确性、普适性和量化评价亟待提升

基于中英文文献调研，对我国工业园区已实行的低碳政策措施及其减排效果进行梳理分析，进而从中识别减排潜力显著的共性措施在全国园区进行推广。通过在 Web of Science 核心合集采用检索式“(industr* park) AND (carbon OR CO2 OR greenhouse gas OR GHG) AND (Chin*)”进行标题检索，共筛选出 Article 与 Review 两种类型 16 篇论文，经进一步人工遴选，最终识别出包含园区减排政策措施的英文论文 14 篇。同时，通过在中国知网采用检索式“SU='中国'and SU='工业园区'and (SU='碳'or SU='温室气体')”进行主题检索，共筛选出 16 篇期刊论文和 12 篇学位论文，经进一步人工遴选，最终识别出包含园区减排政策措施的中文论文 7 篇。筛选后的中英文文献涉及园区案例、碳减排措施及实施效果（或碳减排政策建议及减排潜力）总结为表 4-1。

从园区案例样本来看，目前系统化的碳减排政策体系在园区层面推进仍有很大提升空间，目前仅有 20 余家园区具有明确的碳减排针对性措施。经过对已实施的碳减排措施或未来政策建议，可以得出减排措施涉及多部门工程与管理策略，可分为共性措施和特征措施两类：前者针对大多数园区均有适用效果，主要作用于能源系统尤其是能源基础设施；后者为针对园区重点行业的定制性措施，对该园区效果显著，但适用范围受限。此外，多数措施仅进行了定性分析，其作用对象未明确到操作层面，尚未定量识别其成本和效果，一定程度限制了该措施的进一步推广。

4.1.2 能源基础设施提效及低碳化是园区温室气体减排的核心途径

工业园区发展中形成的一个重要特征是基础设施共享(通常称为九通一平),在园区物理边界内或周边通常建设有能源供应、污染治理基础设施^[66],基础设施共享已成为园区发展的主要特征^[4]。一方面,能源供应、环境治理等基础设施普遍服役周期长,环境影响具有锁定效应;另一方面,当前工业园区和基础设施的减排研究各自独立,若将二者进行耦合研究,可进一步从操作层面识别出具有较高实践价值的减排技术,并基于设施层面精确量化其减排效果。基础设施是园区物质能量代谢的关键节点,将园区能源、水、污染物等要素耦合在一起^[40,67],通过物质代谢调控,可提高园区资源能源效率。

基础设施也是园区温室气体排放的主要来源,前文结果显示,能源基础设施平均贡献了园区直接碳排放的 75%。特别地,能源基础设施在园区排放中占据显著地位。本团队前期开展的研究显示,(1)以多产业集聚的综合类园区——北京经济技术开发区为例,构建含能源、工业过程和产品使用、废弃物处理处置三个部门的园区温室气体(greenhouse gas, GHG)核算方法,研究 2005-2013 年园区 GHG 排放量与排放强度的演变特征,发现能源消耗相应的 GHG 排放占园区总排放的比例保持在 94%~97.8%,呈现锁定效应;(2)以精细化工园区——杭州湾上虞经济技术开发区为例,核算能源、产品生产、废弃物处理三个部门的碳排放,工业过程覆盖 380 种原料、130 种产品生产过程,发现 2006-2017 年期间能源消耗的 GHG 排放占比稳定在 75%左右。这 2 个不同类型的园区的研究显示,能源消耗相应的 GHG 排放在园区均占较大比例。能源基础设施共享是园区建设的一个重要特征,具有普遍性。

中国工业园区能源基础设施存量仍在持续积累,能源基础设施投运后服役期长,对于园区温室气体排放具有长期的锁定效应^[68]。集中式污水处理厂是园区另一类典型的公共基础设施。目前污水处理厂面临着日益严格的排放标准要求,在提标的同时导致污水处理厂能耗增加。协同污水处理厂提标与节能,在能源基础设施和环境基础设施之间构建共生体系,具有较大的减排潜力。实现基础设施服务与温室气体排放的解耦,尤其是能源基础设施的脱碳,对于实现中长期应对气候变化目标具有重要现实意义。

表 4-1 已开展研究的中国工业园区案例及碳减排措施

案例园区	作用对象	已实施的碳减排措施/研究提出的政策建议	碳减排量占园区排放比例 (%)
上海金桥经济技术开发区(Liu et al., 2011) ^[69]	供热	以城市污水污泥和再生油替代部分煤作为能源	2020 年相比 2015 年能源强度下降 23%。
苏州工业园区(Liu L. et al, 2012) ^[30]	园区整体	1) 绿色建筑 2) 绿色出行 3) 太阳能与地热能利用 4) 污泥焚烧发电 5) 绿色照明 6) 产业结构调整 7) 能源审计 8) 外部电网低碳化	2015 相比基准情景共减排 20%，其中 1) 21%，2) 13%；3) 6%；4) 3%；5) 15%；6) 14%；7) 17%；8) 11%
苏州工业园区(Wang H. et al, 2013) ^[31]	园区整体	1) 工业部门能源审计与节能改造 2) 热电厂煤制气；3) 造纸设备改进 4) 绿色建筑开发 5) 实行建筑节能规范 6) 地热能与太阳能利用 7) 地铁建设运营	2020 相比基准情景共减排 43%，其中 1) 47%，2) 15%；3) 15%；4) 14%；5) 5%；6) 3%；7) 1%
东北某钢铁工业园区(Zhang H. et al, 2013) ^[70]	钢铁行业	1) 干熄焦余热回收 2) 煤气-蒸汽联合循环发电 3) 利用钢渣碳捕集	-
北京经济技术开发区(Liu W. et al, 2014) ^[32]	园区整体	1) 提升能源基础设施能效 2) 促进碳密集型行业减排 3) 加强废弃物管理	-
106 家国家生态工业示范园区(Guo Y. et al, 2016;Guo Y. et al, 2017) ^[71, 72]	能源基础设施	1) 煤改气 2) 热电技术升级 3) 上大压小	-
213 家国家级经济技术开发区(Guo Y. et al, 2018) ^[73]	园区整体	1) 清洁能源(天然气、生物质等)替代燃煤 2) 提升工业燃煤锅炉效率 3) 外部电网低碳化	2030 年相比基准情景共占减排 7%，其中 1) 50%；2) 23%；3) 27%
20 家低碳工业园区试点(Yu X. et al, 2018) ^[74]	园区整体	1) 加速淘汰碳密集部门落后过剩产能 2) 加强重工业低碳技术开发 3) 优化产业结构，促进高附加值、低碳产业的发展	-

续表 4-1 已开展研究的中国工业园区案例及碳减排政策措施

案例园区	作用对象	已实施的碳减排措施/研究提出的政策建议	碳减排量占园区排放比例 (%)
3家低碳工业园区试点(Yu X. et al, 2018) ^[75]	园区整体	鄂托克经济开发区：1) 制定企业落后产能退出计划 2) 制定严格的新建项目低碳准入门槛 3) 高耗能产业节能循环改造 4) 提高资源综合利用水平 5) 鼓励技术创新提高产品附加值； 金桥经济技术开发区：1) 加快产业结构调整 2) 改善支柱产业的生态产业链得到改善 3) 绿色供应链管理 4) 企业单位能耗碳排放评价与碳足迹核算； 宜兴环保科技产业园：1) 转变产业结构，提高生产率和资源效率 2) 制定战略性新兴产业发展的优惠政策 3) 大力发展金融服务业和节能服务业 4) 增加清洁能源的使用 5) 推进产城融合。	-
苏州工业园区 (Liu T. et al, 2018)	园区整体	1) 产业结构调整 2) 能源结构调整 3) 消费方式转变	-
152家国家级经济技术开发区(Hu W. et al, 2019) ^[76]	污水处理基础设施	1) 改进废水处理技术，减少不可降解有机物，污水集中处理化； 2) 优先选择生物处理工艺，降低电力消耗和运行成本； 3) 在厌氧生物处理装置中收集沼气并利用； 4) 污泥焚烧发电、土地应用和建筑材料应用作为优先处置方案； 5) 鼓励园区使用生物能源。	-
智慧工业园区综述 (Wang Y. et al, 2019) ^[77]	园区整体	1) 工业过程实施监控 2) 智慧能源资源管理 3) 高效物流 4) 安全风险监控 5) 需求侧管理	-

续表 4-1 已开展研究的中国工业园区案例及碳减排政策措施

案例园区	作用对象	已实施的碳减排措施/研究提出的政策建议	碳减排量占园区排放比例 (%)
永城经济技术开发区 (Zhang M. et al, 2020) ^[78]	园区整体	1) 工业余热利用 2) 工业能效提升 3) 生物质与光伏发电	2017 相比基准情景共减排 23%，其中 1) 48%，2) 46%，3) 6%
江西 99 家国家级和省级工业园区(李亮, 2010) ^[79]	园区整体	1) 优化产业及能源结构; 2) 提高低碳人才及技术; 3) 制定合理低碳政策法规	-
宝钢集团产业园区(卢红兵, 2013) ^[80]	钢铁行业	1) 清洁能源开发利用; 2) 合并落后产能; 3) 发展环境友好产品	-
苏州工业园区(张敏高, 2013) ^[81]	园区整体	重点行业和领域推进减排政策	2015 相比 2010 减排 20%。
聊城信发生态工业园区(于斐, 2015) ^[82]	园区整体	导入十一种工业共生方式	-
安丘青龙山低碳产业园(惠刚, 2015) ^[83]	园区整体	1) 优化园区规划布局; 2) 加快产业低碳化发展; 3) 转变能源利用方式; 4) 加强园区管理	-
永城经济技术开发区(高宇, 2019) ^[84]	园区整体	优化设计园区内部共生与城市共生的链条	-
西北地区工业园区(高新才, 曹昊煜, 2019) ^[85]	园区整体	1) 调整能源消费结构, 降低工业生产对化石能源的依赖; 2) 激励低碳技术研发, 推广低碳技术应用; 3) 调整产业结构, 优化工业生产	-

报告综合考虑园区设施存量特征、园区实践措施和国家相关能源政策，分析园区设施存量演化的驱动力，并识别出园区设施温室气体减排的主要技术参考的相关政策主要包括《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》《能源发展“十三五”规划》《“十三五”节能减排综合工作方案》《电力发展“十三五”规划》《生物质能发展“十三五”规划》《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014-2020年）》《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》《国家应对气候变化规划（2014-2020年）》等中央政府发布的文件^[64, 65, 86-90]。

首先，针对国家生态工业示范园区开展研究，结合园区设施演化特征和具体园区案例，可进一步分析园区设施演变的驱动力，总结为表 4-2。

表 4-2 园区能源基础设施存量演变特征及驱动力

特征	代表性案例	驱动力
1 燃煤机组改造为燃气机组	1#园区，1*105+5*76 MW（均于1996年投产）于2009年被替代； 68#园区，2*6 MW（1999年投产）+1*3 MW（2005年投产）于2013年全部被替代	清洁能源技术的推广，污染排放约束趋严
2 淘汰小容量低效机组，上大压小	4#园区，2015年由2*600 MW替代2*12+1*25+4*125 MW； 5#园区，2012年由2*350 MW替代2*12+2*60 MW	规模效益驱动，污染排放约束，热效率提升的需求
3 纯发电机组经抽凝改造，升级为热电机组	2#园区，2*330MW（1993年投产）+2*330MW（1994年投产）于2012年改造	热力需求，热效率提升
4 抽凝机组改造为背压机组，新建背压机组增多	17#园区，1*12 MW（2005年投产）于2012年改造； 56#园区，1*12 MW（1993年投产）于2005年改造； 78#园区，2*12 MW（1996年投产）于2010年改造	煤炭不断涨价，电价涨价迟缓，而热价相对较高，因此背压机组经济性更高
5 热电联产升级为热电冷或更多二次能源品种的多联供	1#园区，150MW	能源品种的多样化需求，热效率提升
6 园区能源基础设施的多功能化，既作为能源生产者，也担当园区及区域的废物分解者	57#园区，2*6 MW（2003年投产，垃圾焚烧产能）；66#园区，2*24 MW（2004年投产，污泥焚烧产能）71#园区，1*15 MW+1*6 MW（2006年投产，垃圾焚烧产能）；	园区热力需求，燃煤小机组建设受控，园区生活垃圾消纳、污水处理厂污泥消纳的需求，政策支持，缓解邻避效应

续表 4-2 园区能源基础设施存量演变特征及驱动力

	特征	代表性案例	驱动力
7	采用更高效清洁的能源技术	1#园区, 天然气联合循环机组 2*75 MW	技术创新的推动, 效率提升的需求
8	燃料类型的多样化, 包括非常规燃料和可再生能源的应用	煤矸石, 74#园区, 2*135 MW (2008 年投产); 生物质, 71#园区, 1*12 MW (2013 年投产); 余热, 2#园区, 1*50 MW (2003 年投产); 太阳能, 10#园区, 10 MW (2012 年投产)	产业共生体系的完善, 能效提升、废物减量化的需求, 技术创新, 政策支持, 可持续发展的要求
9	邻近园区设施共享	48#和 58#园区共享 48 MW; 55#和 56#园区共享 55MW; 20#和 77#园区共享 24 MW	地理位置邻近, 减少基建成本, 园区设施规模效益
10	园区向外部区域供电	2#、10#、17#、19#、34#、 36#、45#、51#、66#、69#和 75#园区	日益增长的能源需求, 园区设施规模效益

(注: 园区序号对应附表 5。)

随着园区经济发展, 能源基础设施的建设具有一定阶段性。园区新增产业使热力需求逐步增长, 而一次性投产大容量机组的建设成本过高, 且无法保证设备未来能得以充分利用, 因此园区倾向于分阶段建设小容量机组。然而, 随着节能减排政策要求, 小容量机组近年来逐渐被大容量机组替代。部分园区近期新增的大容量机组通常不仅为园区服务, 也是周边地区的能源供应中心, 某些园区也存在共用一座能源基础设施的现象。这意味着园区能源基础设施不仅需满足园区自身需求, 也可考虑发挥规模效应。若园区设施扩大服务范围, 则供热管网的建设及管网损耗的降低还需进一步加以关注。此外, 园区能源基础设施不仅是园区的能源生产者, 同时也作为废物分解者, 在解决区域环境问题方面发挥重要作用, 如消纳生活垃圾和污水处理厂剩余污泥、构建产业共生网络提高区域资源能源效率等。

下面选取代表性园区案例作简要说明, 分析其能源基础设施特征和减排实践措施。以上虞经济技术开发区(附表 5 的 71#园区)为例, 园区创建于 1998 年, 被科技部确定为“中国精细化工特色产业基地”。2007 年, 上虞园区被浙江省发改委授予生态工业园区示范点。园区以精细化工为主导, 染料和医药两大产业贡献了园区三分之二以上的产值。通过采集园区能流信息, 以能源基础设施为节点, 绘制 2013 年上虞园区的能流图(图 4-1), 图中箭头宽度与能流数值成正比。

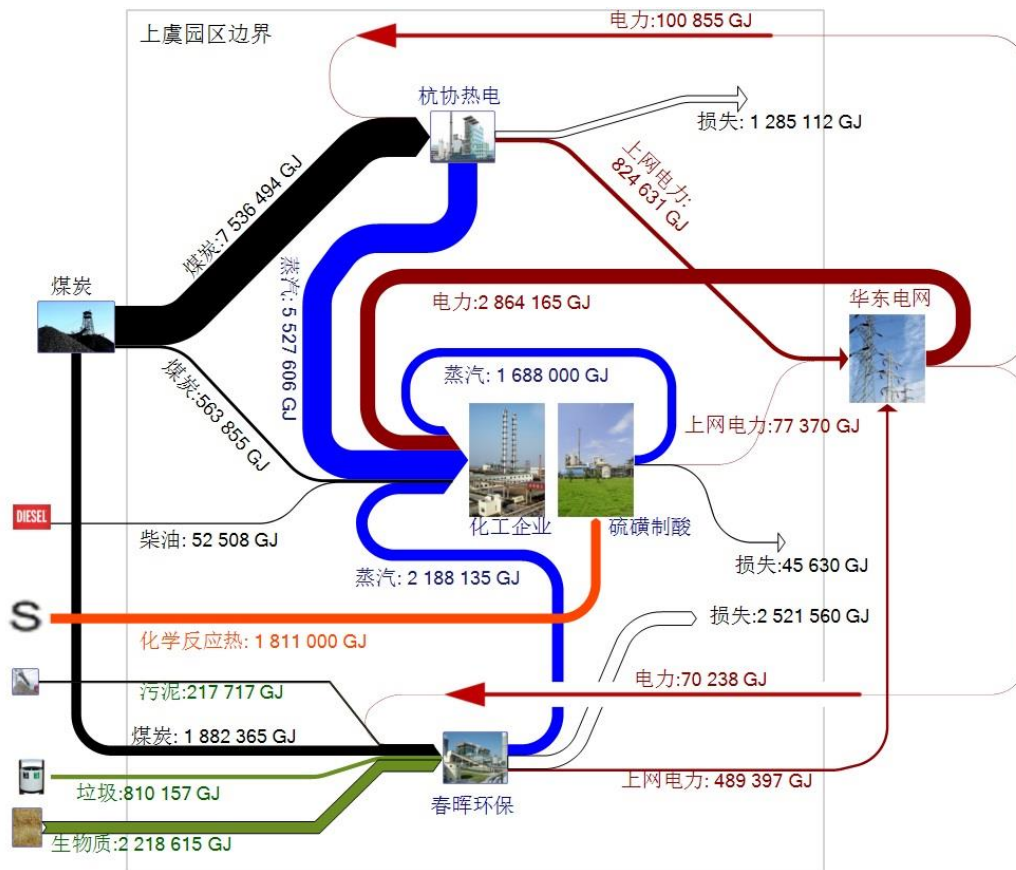


图 4-1 上虞工业园区能流图（2013 年）

上虞园区建设有两座集中式能源基础设施，分别为上虞杭协热电有限公司（2*15 MW，2005 年投产）和浙江春晖环保能源有限公司（15 MW+6 MW（2006 年投产）+12 MW（2013 年投产））。图 3-1 清晰展示了上虞园区在 2013 年能量代谢，园区能源基础设施具有如下演化特征：（1）杭协热电和春晖环保分别有 15 MW 和 6 MW 抽凝机组升级为背压机组，能效显著提升；（2）春晖环保燃料类型多样化，包括煤、生活垃圾、污泥，生物质等，不仅作为能源生产者，还担任区域的分解者功能，消纳园区及上虞市生活垃圾、园区集中式污水处理厂剩余污泥和农田秸秆废物。此外，园区企业硫磺制酸的反应余热得以充分利用，产出的蒸汽用于染料生产，产出电力直接上网。

在连续 10 余年收集大量数据的基础上，进一步对工业园区的能耗和能效进行了定量分析，并对 10 种节能措施的节能潜力和成本效益进行了评价。结果表明，2007 年其两座热电厂的能源效率分别为 81.5% 和 56%。上虞园区的能源效率约为 4626 kJ/USD(工业总产值)，仅为我国化工原料及化工产品制造业的 20%-25%。十项措施（表）的节能潜力约占 2007 年工业园区能耗的 11%，需总投资 3500 万美元。上虞园区的节能措施在我国其他精细化工园区具有普遍的可复制性，研究结果表明，精细化工园区最具发展前景的节能技术措施有五种：1) 变

频技术的应用；2) 高效耗汽干燥器的应用；3) 高效冰箱的应用；4) 蒸汽冷凝液的回收，以及5) 提高变压器的功率因数。

表 4-3 上虞工业园区节能措施

措施	编号	目标
应用变频技术	TS1	采用单机容量 50% 以上的变频调速技术
设备升级	TS2	烘干炉、烘干室、双锥烘干机和平板烘干机 100% 被气流烘干机取代
	TS3	TFC 全部被 ACC 取代
	TS4	PFPF 全部被 CDPF 取代
	TS5	PCR 全部被 SCR 取代
	TS6	回收 50% 蒸汽冷凝液
热回收	TS7	所有自备燃煤燃油炉的热回收
	TS8	S7 型和 S9 型变压器均升级为 S11 型
能源分配网络优化	TS9	所有变压器的功率因数都提高到 90%
	TS10	园区的输电线路从 10kV 改进为 20kV

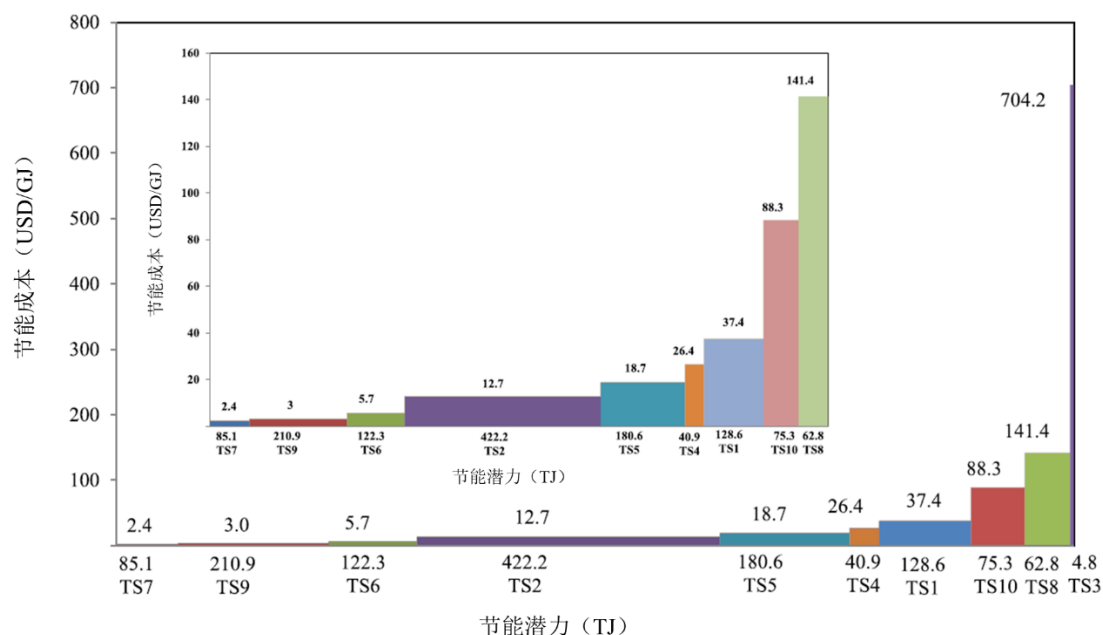


图 4-2 上虞工业园区节能潜力

4.1.3 园区能源基础设施温室气体减排五大共性技术

基于上述政策分析及典型案例剖析，结合普适性和实际可操作性，在园区设施特征和园区现有实践措施基础上，研究识别出园区能源基础设施温室气体减排 5 项共性技术（图 4-3），具体如下：

- M1: 燃煤锅炉改造为燃气锅炉；
- M2: 推广垃圾焚烧炉替代燃煤锅炉；
- M3: 抽凝/纯凝汽轮机升级为背压汽轮机；

M4: 大容量燃煤机组替代小容量燃煤机组;

M5: 大容量天然气联合循环机组替代小容量燃煤机组。

主要减排技术的筛选需兼顾可行性和普适性,从而在全国园区层面实现切实可观的减排效果。基于园区设施存量以小容量燃煤机组为主的特点,燃料替代和技术升级是两种主要途径。可再生能源从目前园区实践状况和发展趋势来看,对燃煤的替代潜力仍十分有限。例如,风电需要占用较多土地资源,而园区本身用地面积紧张,因此风电不适于在园区大规模发展。以煤矸石或余热为能源输入的机组,受限于园区主导产业类型,通常适用于化工为主导的特定园区。此外,由于整体煤气化联合循环机组具有投资成本较高和可靠性较低的特点^[91],其适用性低于天然气联合循环机组。

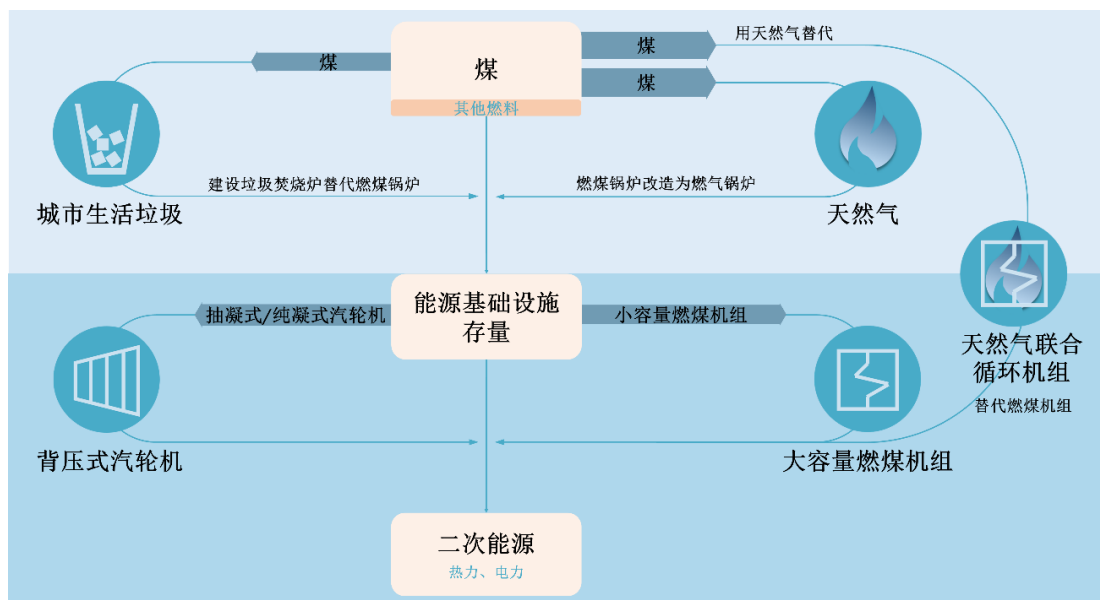


图 4-3 园区能源基础设施温室气体减排主要技术

4.2 工业园区能源基础设施存量特征与环境影

4.2.1 园区能源基础的结构特征呈“大小小多”特征

本项目构建的数据库统计显示,截至 2014 年底,1604 家园区能源基础设施包括 2127 个能源企业(热电厂、发电厂或供热厂)的 4706 个机组。其中,850 家园区建设有能源基础设施。4706 个机组共 524 GW,其中退役机组 164 个(9,013 MW),现役机组 4542 个(515 GW),占同年全国发电装机总容量的 38%。此外,由于园区无水电设施,园区在役机组总容量占全国非水力发电容量的 48%。本节将多角度分析园区能源基础设施存量的结构特征及其演化,作为后续园区设

施存量低碳化转型的基础性工作。首先，从容量结构、燃料结构、技术结构角度分析 1604 家园区的能源基础设施现状，见表 4-4~表 4-6。

表 4-4 园区能源基础设施容量结构

容量等级	容量		数量	
	数值 (MW)	占比 (%)	数值 (个)	占比 (%)
≥600 MW	169,850	33.0	250	5.5
[300, 600) MW	199,474	38.8	613	13.5
(200, 300) MW	20,284	3.9	90	2.0
(120, 200] MW	55,270	10.7	348	7.7
(30, 120] MW	33,368	6.5	550	12.1
≤30 MW	36,288	7.1	2,691	59.2
总计	514,533	100	4,542	100

从表 3-4 可见，机组容量结构体现出“大容量机组少，小容量机组多”的特点：300 MW 及以上的大容量机组占总容量的 72%和总数量的 19%，而 30 MW 及以下的小容量机组占总容量的 7%和总数量的 59%。总体而言，大容量机组的能源效率表现高于小容量机组（见附表 7）^[92]，因此将园区的小容量机组进行规模升级将带来显著节能减排潜力。

4.2.2 园区能源基础设施对煤的依赖度高于全国水平

从机组燃料结构来看（表 4-5），总容量的 87%为燃煤机组，远高于全国燃煤机组容量占比（61%^[93]），表明园区能源基础设施对煤的依赖度高于全国水平；其次是燃气机组，占总容量的 8.2%；可再生能源机组，包括生物质、沼气、风能、太阳能、地热能，仅占 0.92%；其余机组为柴油、煤矸石、煤气、余热、生活垃圾、污泥等非常规能源驱动的机组，共计占 4.1%。总体来看，园区设施的燃料具有多样化特征，但燃煤机组和天然气机组仍占绝对主导，共计占比 95%。因此，大力发展非常规能源和可再生能源驱动的能源基础设施，替代现有燃煤设施存量，将带来显著的温室气体减排效益。

4.2.3 园区能源基础设施存量技术结构以凝气机组为主

表 4-6 展示了园区能源基础设施存量的技术结构。纯凝机组即纯发电机组的容量占比最高，达到 48%；抽凝热电机组数量最多，占总数量的 48%和总容量的 41%。从能源产出来看，热电联产是机组的主要输出形式，包括抽凝机组、背压

机组以及部分天然气联合循环和煤气联合循环机组。热电机组共计占总容量的48%和总数量的61%。2014年全国热电机组总容量为283GW，占火电机组总容量的30.8%^[93]，可见园区中热电机组容量占比明显高于全国水平。

表 4-5 园区能源基础设施燃料结构

燃料类型	容量		数量	
	数值 (MW)	占比 (%)	数值 (个)	占比 (%)
煤	446,421	86.76	3,421	75.32
天然气	42,224	8.21	234	5.15
柴油	2,530	0.49	35	0.77
煤矸石	6,900	1.34	119	2.62
煤气	4,219	0.82	80	1.76
余热	4,697	0.91	209	4.60
生活垃圾	2,363	0.46	197	4.34
污泥	463	0.09	23	0.51
生物质	2,934	0.57	113	2.49
沼气	5	0.001	3	0.07
风能	333	0.06	9	0.20
太阳能	1,418	0.28	96	2.11
地热能	27	0.01	3	0.07
总计	514,533	100	4,542	100

表 4-6 园区能源基础设施技术结构

技术类型	容量		数量	
	数值 (MW)	占比 (%)	数值 (个)	占比 (%)
纯凝	247,431	48.1	1,472	32.4
抽凝	209,945	40.8	2,157	47.5
背压	7,364	1.4	475	10.5
天然气联合循环	40,434	7.9	176	3.9
煤气联合循环	1,215	0.2	7	0.2
整体煤气化联合循环	265	0.1	1	0.0
无汽轮机	7,878	1.5	254	5.6
总计	514,533	100	4,542	100

热电联产设施通常作为园区的主要热力源，产生热力直接供给企业用户。在相同能源产出的条件下，热电联产由于将发电后的蒸汽用于供热，相比热电分产可显著减少燃料输入，进而提高综合热效率^[94]。热电联产的节能减排效果明显，与工业园区低碳发展的要求相一致，这使热电设施在园区的进一步普及成为必然。根据本研究数据库中相关统计指标显示（附表 8），背压式机组发电效率最高，但背压机组要求在较高的热负荷下运行，才能充分发挥其效率优势。进一步分析，园区热电联产现役机组以抽凝式机组为主，背压式机组数量较少，因此在园区未来发展，新建高效背压机组并对现有抽凝机组进行背压技术升级，可实现能源效率的较大提升，从而进一步削减园区温室气体排放。

4.2.4 园区能源基础设施空间分布及演化特征

1604 家园区的能源基础设施地理位置分布见图 4-4，可见园区间总装机容量差异明显，在 1.2~6,706 MW 范围内。设施多分布在沿海地区，其中辽宁、河北、山东、江苏、浙江、广东 6 省的园区机组占总容量的 47%。

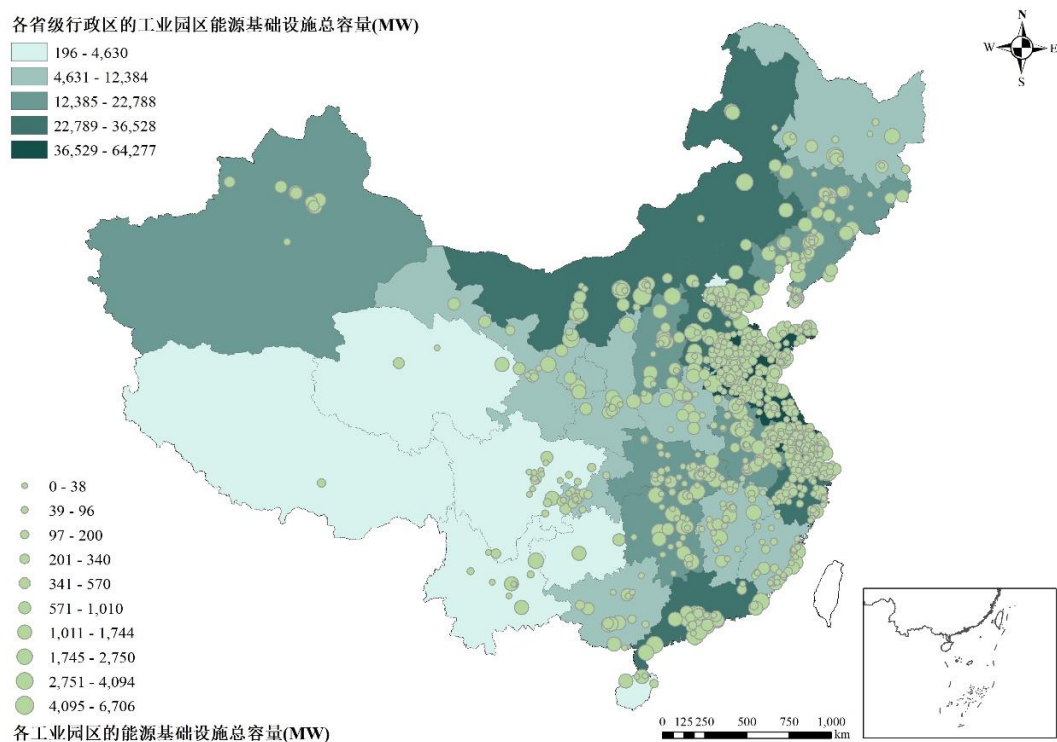


图 4-4 1604 家园区的能源基础设施空间分布

图 4-5 展示了 1604 家园区能源基础设施存量的演化。从投产时间来看，第一台机组出现在 1958 年，是中国最早的一批抽凝热电机组，当时仅为企业自身服务，随后该区域逐步形成产业集群进而成立园区，相应热电设施也转为给全区供热。于 2001~2010 年间投产的机组占总容量的 58%，从 30 年服役年限来看^[95]，

此部分机组的剩余服役时间在 20 年以上，属于相对年轻的机组。燃煤机组在 2004~2010 年间快速增长，并且由于国家能源政策的驱动^[96]，2007 年以来的新建机组多数在 300 MW 及以上。2010 年以后燃煤机组增长逐渐放缓，这是由于中国燃煤机组容量相对过剩^[97]，导致机组设备的年利用小时数近年来持续下降^[98]。因此，中国政府在“十三五”期间已开始严格控制新增煤电项目^[88, 99]。

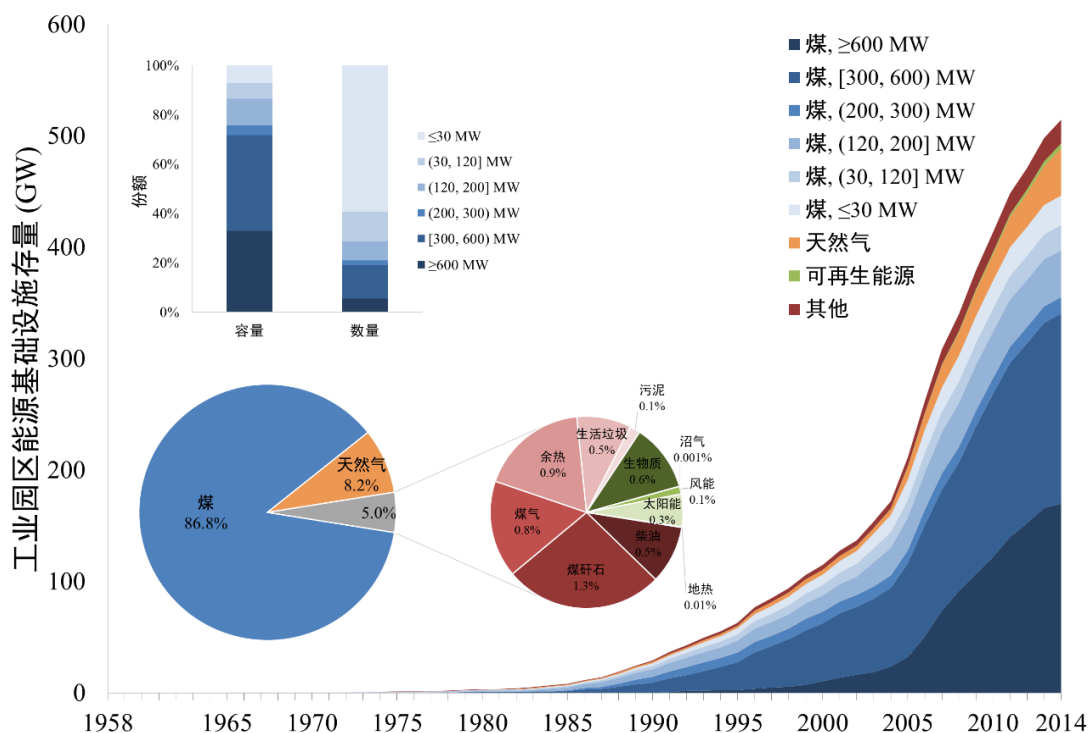


图 4-5 1604 家园区的能源基础设施存量演化

（注：柱状图表示园区能源基础设施容量结构，饼图表示设施燃料结构，面积图表示设施累积存量，计算公式为：当年存量=上一年存量+当年新增-当年退役。）

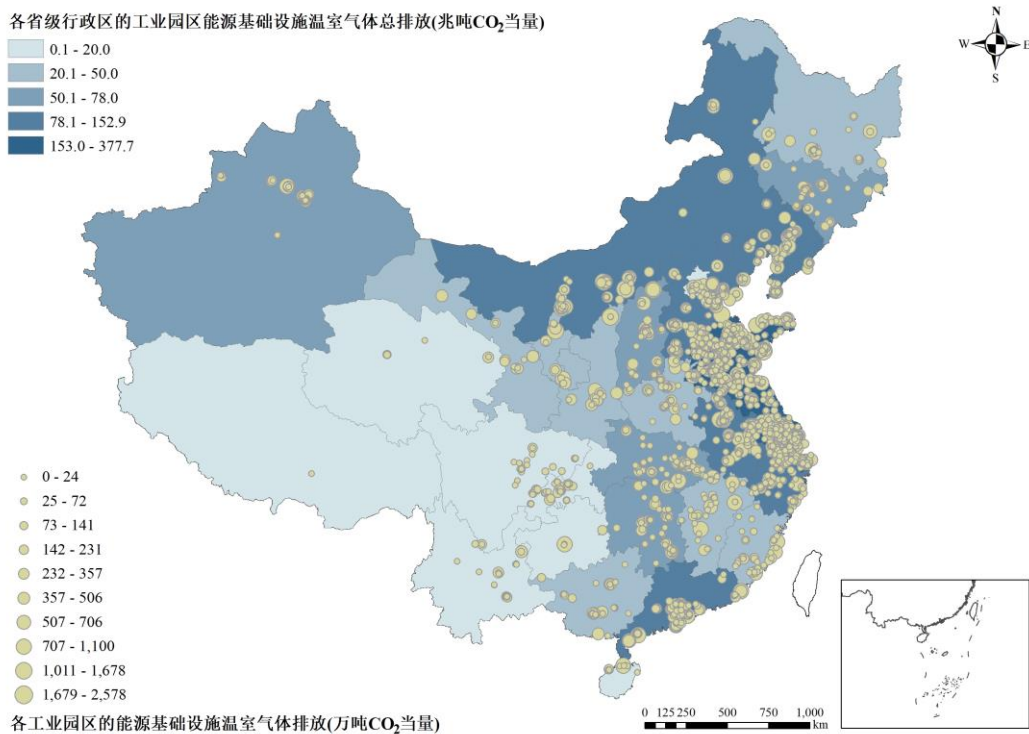
4.2.5 园区温室气体、二氧化硫和氮氧化物排放及淡水消耗的整体判断

总的来说，园区设施存量特征可以总结为四个“多”：燃煤机组多，小容量机组多，热电联产机组多，年轻机组多。基于前文工作中的园区能源基础设施数据库和环境影响核算方法，核算了中国 1604 家省级及以上工业园区 4542 个在役能源基础设施机组（共计 515 GW）在 2014 年的温室气体排放、淡水消耗、二氧化硫排放和氮氧化物排放，并基于地理信息系统作环境影响空间分布图（图 4-6）。

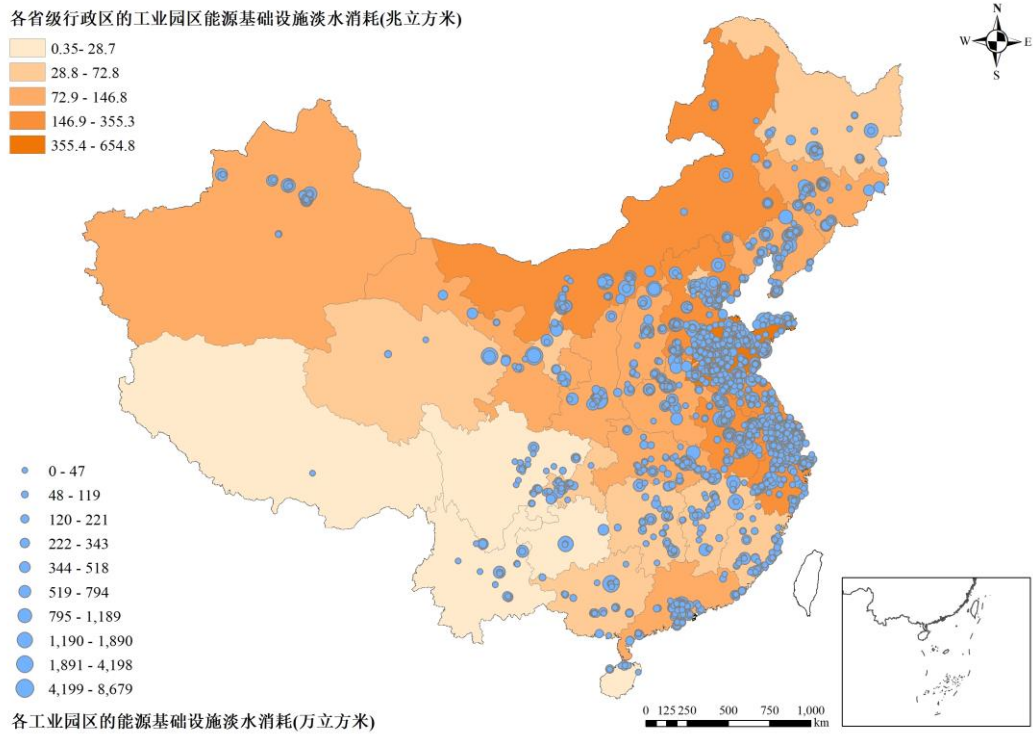
2014 年，园区能源基础设施的年度总温室气体排放为 23.5 亿吨 CO₂ 当量，总淡水消耗为 33.9 亿立方米，总二氧化硫排放为 235 万吨，总氮氧化物排放为 307 万吨，分别占同年全国温室气体排放、全国工业耗水量、全国二氧化硫排放和全国氮氧化物排放的 18%、4.6%、12% 和 15%^[56, 100, 101]。这一结果表明，园区

设施的环境影响在全国层面占据不可忽视的地位，设施存量的低碳化转型和绿色发展对于应对全球气候变化和改善区域环境质量具有重要作用。

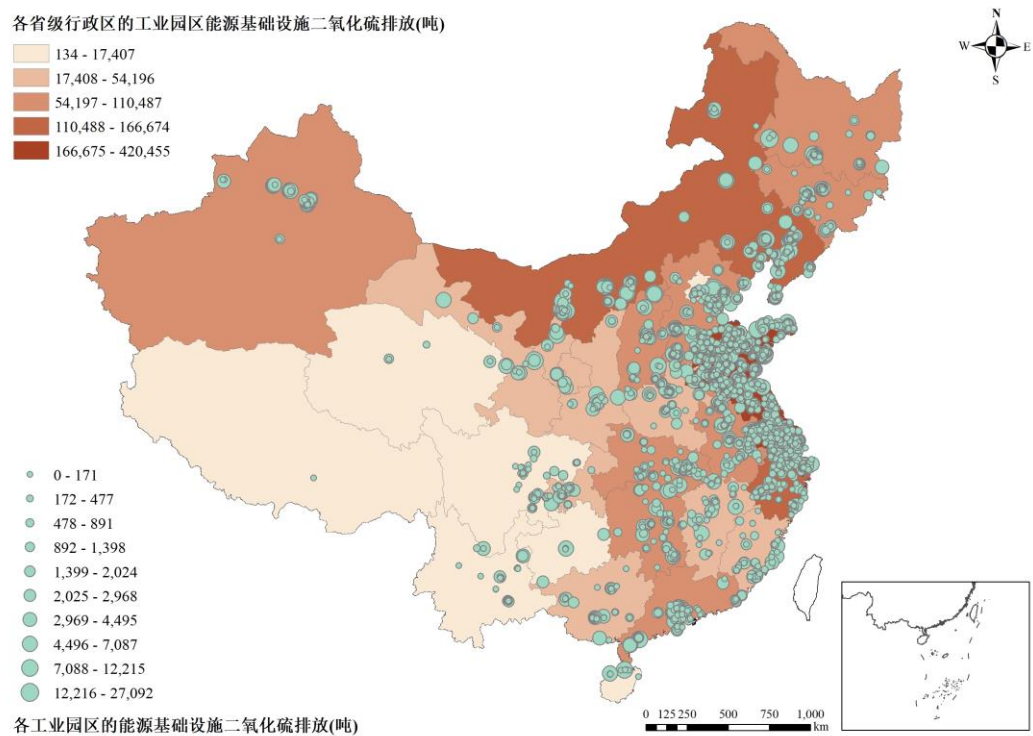
能源基础设施是园区物质能量代谢的关键节点，也是园区温室气体排放的主要来源，平均占园区直接温室气体排放的 75%。因此，园区能源基础设施的环境影响可在量级上代表整个园区的环境影响，尤其是温室气体排放。从空间分布来看，绝大部分环境影响集中在沿海发达地区的工业园区。例如，辽宁、河北、山东、江苏、浙江和广东 6 省的园区设施温室气体排放占总排放的 51%，淡水消耗、二氧化硫排放和氮氧化物排放分别占园区设施总量的 47%、52% 和 51%。从燃料类型来看，燃煤机组贡献了温室气体总排放的 92.1%，天然气、煤气、煤矸石和其他燃料机组分别贡献 2.8%、2.2%、1.9% 和 1.1%；从机组容量来看，大于等于 600 MW、大于等于 300 MW 且小于 600MW、小于 300MW 的机组分别占温室气体总排放的 31%、33%、36%。特别地，小于 300MW 的燃煤机组占温室气体总排放的 30%、淡水总消耗的 38%、二氧化硫总排放的 49% 和氮氧化物总排放的 35%，此类机组具有较为显著的环境绩效提升潜力。



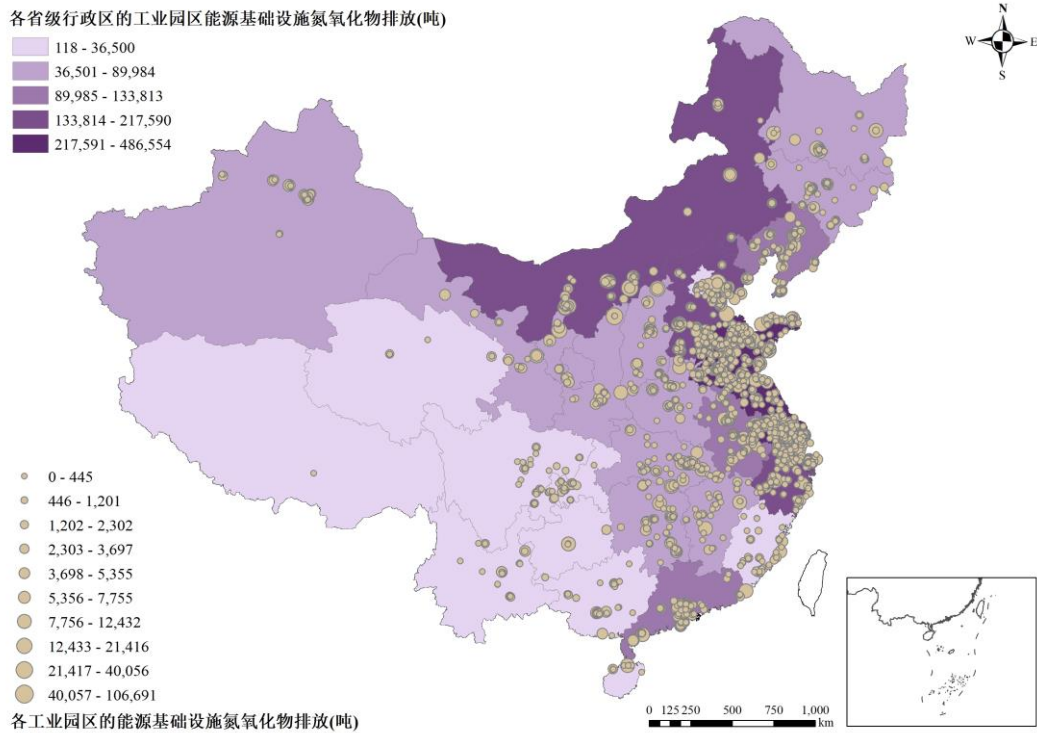
(a) 温室气体排放



(b) 淡水消耗



(c) 二氧化硫排放



(d) 氮氧化物排放

图 4-6 1604 家园区能源基础设施的环境影响（2014 年）

园区在役能源设施存量如保持当前结构及技术性能工作至自然退役，从机组剩余服役时间来看，所有设施机组存量的平均剩余服役年限为 18 年（基准年为 2014 年），即剩余服役时间跨度平均为 2015~2032 年。此时间段与实现 2030 年左右碳排放达峰在时间尺度上高度重合，这意味着园区设施提高能效及低碳化改造将会对实现达峰目标做出重要贡献。根据前述方法，测算了 1600 余家园区在役能源基础设施存量在其剩余服役时间的累积温室气体排放、淡水消耗、二氧化硫排放和氮氧化物排放，分别为 462 亿吨 CO₂ 当量、648 亿立方米、4501 万吨和 5786 万吨。

4.3 工业园区能源基础设施碳减排的环境与经济协同效应显著

4.3.1 五项减排措施与园区在役能源基础设施的适配

综合园区能源基础设施存量特征、园区实践措施和国家相关能源政策，识别出针对园区设施的 5 项温室气体减排主要技术，在多数园区中具有较高的适用性和可行性，分别为：燃煤锅炉改造为燃气（M1），垃圾焚烧炉替代燃煤锅炉（M2），抽凝/纯凝汽轮机升级为背压汽轮机（M3），大容量燃煤机组替代小容量燃煤机组（M4），大容量天然气联合循环机组替代小容量燃煤机组（M5）。为实现建模量化，进一步从操作层面考虑，将各减排技术与适用机组进行匹配，考虑机组

的单机容量、燃料类型、技术类型、能源效率、投产时间、地理位置等属性，以及燃料消费额度等外部因素限制。

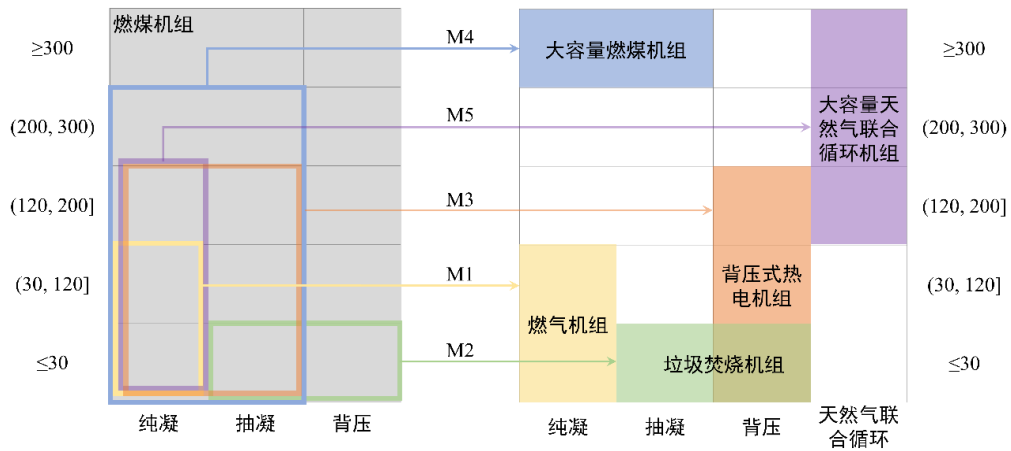


图 4-7 园区能源基础设施温室气体减排的主要技术及其适配机组

各减排技术及其适配机组简要概括为图 4-7，横轴为技术类型，纵轴为容量等级，左边部分为园区设施存量中与 M1~M5 适配的机组，右边部分为经 M1~M5 改造或替代后的机组。例如，M1 适配机组为 120 MW 及以下燃煤纯凝机组，改造后为相应容量的燃气纯凝机组，M2~M5 以此类推。

4.3.2 单一措施情景和综合情景下的减排潜力及协同环境效益

“年份-存量”模型中设置了基准情景和减排情景，减排情景包括单一措施情景（M1~M5 情景）和综合情景。基准情景下，园区设施存量性能保持不变，直到正常退役；减排情景下，M1~M5 技术单独作用或共同作用，对适配机组进行改造或替代。经模型定量计算，1604 家园区 4542 个能源基础设施机组的温室气体减排潜力、协同环境效益和材料消耗见表 4-7。

模型结果显示，所有减排情景均有显著的温室气体减排潜力，大多数情景在淡水节约、二氧化硫减排和氮氧化物减排方面具有协同环境效益。M4 和 M5 情景由于涉及新建机组，其材料消耗明显高于对现存机组进行改造的 M1~M3 情景。

综合情景下，通过将 M1~M5 技术进行组合实施，相比基准情景可分别实现温室气体减排、淡水节约、二氧化硫减排和氮氧化物减排 10.1%、38.1%、26.0% 和 10.6%。同时，综合情景下园区能源基础设施机组在其剩余服役时间的累积温室气体减排潜力可达 46.8 亿吨 CO₂ 当量，相当于 IPCC 《全球升温 1.5°C 特别报告》中 2°C 和 1.5°C 全球碳预算（三分之二机会将温升限制在 2°C/1.5°C 的碳预算，11700 亿吨/4200 亿吨 CO₂ 当量）的 0.4% 和 1.1%^[102]，减排潜力相当可观。

表 4-7 园区能源基础设施的温室气体减排潜力、协同环境效益和材料消耗

指标		M1	M2	M3	M4	M5	综合
环境 影响	Δ温室气体排放（亿吨 CO ₂ 当量）	-3.15	-12.5	-23.0	-11.8	-12.1	-46.8
	Δ淡水消耗（亿立方米）	1.78	16.3	-203	-83.2	-25.1	-247
	Δ二氧化硫排放（万吨）	-113	-295	-381	-825	-302	-1,170
	Δ氮氧化物排放（万吨）	-94.8	48.3	-343	-472	-188	-615
	Δ温室气体排放（%）	-0.68	-2.72	-4.99	-2.56	-2.61	-10.13
	Δ淡水消耗（%）	0.27	2.52	-31.23	-12.83	-3.87	-38.05
	Δ二氧化硫排放（%）	-2.52	-6.55	-8.46	-18.32	-6.72	-26.00
	Δ氮氧化物排放（%）	-1.64	0.84	-5.92	-8.16	-3.24	-10.63
材料 消耗	Δ混凝土（万吨）				1,194	166	623
	Δ钢（万吨）	0.279	11.9	49.7	382	52.7	246
	Δ铁（万吨）				4.66	0.693	2.48
	Δ铝（万吨）				3.15	0.346	1.55

（注：Δ表示减排情景与基准情景的差值；环境效益包括直接部分和间接部分，直接部分是燃料节约或替代、机组技术升级或机组替代产生的直接效益，间接部分是通过节能、节水、耗材以避免或增加的能源、水、材料上游生产过程环境影响。）

4.3.3 各容量等级机组不同情景下的减排潜力及协同环境效益

进一步地，将各减排情景的 4 项环境效益指标按适配机组的容量等级进行分解，识别各容量等级机组的减排贡献，见图 4-8。总的来看，在各减排情景下，单机容量为 0~30 MW、30~60 MW 和 120~200 MW 作为适配机组贡献了绝大部分环境效益。举例而言，综合情景下 0~30 MW、30~60 MW 和 120~200 MW 的减排适配机组总计贡献了全部温室气体减排量、淡水节约量、二氧化硫减排量和氮氧化物减排量的 91%、82%、89% 和 86%。在单一技术情景中，M3 情景通过将抽凝/纯凝汽轮机改造为背压汽轮机，显著提升机组能源效率，具有最大的温室气体减排潜力。温室气体减排技术与淡水节约、二氧化硫减排和氮氧化物减排在绝大多数情景下具有协同关系，仅在少数情景的少数指标中存在拮抗作用，且负效益数值较小。具体而言，M1 和 M2 情景的淡水消耗略有增加，这是由于天然气发电和垃圾发电的淡水消耗因子高于燃煤发电；同理，垃圾焚烧的氮氧化物排放因子高于燃煤，使 M2 情景的氮氧化物排放略有增加。

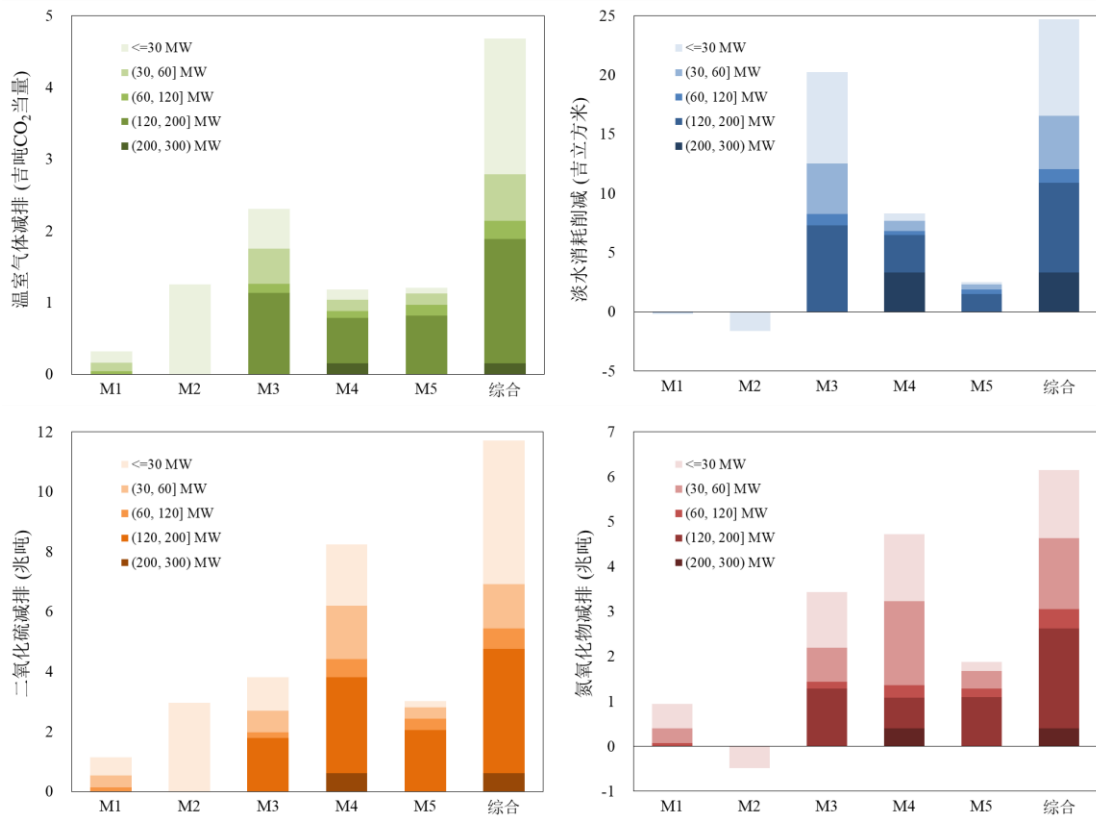


图 4-8 各减排情景的环境效益—按机组容量等级分解

将各减排情景的环境效益进一步分解为直接和间接两部分，见表 4-8。直接部分为各减排技术进行燃料节约或替代、机组改造或替代带来的直接效益，间接部分是通过节能、节水、耗材以避免或增加的能源、水和材料上游生产过程环境影响。表中结果显示，直接环境影响占绝大部分，间接环境影响虽占比较小，但仍不可忽视。以综合情景为例，间接部分在温室气体减排、淡水节约、二氧化硫减排和氮氧化物减排中分别贡献 9%、6%、5%和 15%。因此通过核算间接环境影响，可从生命周期视角更准确识别各减排技术产生的总环境效益。

4.3.4 园区在役能源基础设施温室气体减排的成本效益

基于前文提出的成本效益分析方法，对各减排情景进行成本效益核算，涉及设备建造成本变化、燃料成本变化和电力收益变化，由此计算出总减排成本和单位减排成本（表 4-9），表中数值均为 2015 年可比价格。其中，单位减排成本为总减排成本与直接温室气体减排量的比值。

结果显示，各情景的减排成本均为负值，表示减排技术具有一定程度的经济收益。从成本效益分项指标来看，M4 和 M5 情景由于新建大容量机组替代原燃煤小机组，设备建造成本较高。M2、M3 和 M4 情景具有可观的燃料成本节约效果，M2 情景通过垃圾焚烧替代燃煤减少煤炭成本，并同时获得政府给予的垃圾

处理补贴，而 M3 情景通过提升能效，保证能源输出不变的同时减少燃煤量以降低燃料成本。M1、M2 和 M5 情景涉及能源替代，天然气发电和垃圾焚烧发电的上网电价均高于燃煤发电，因此发电收益增加。综合情景由于将各减排技术共同实施，各分项指标均有很好表现。

表 4-8 各减排情景的直接和间接环境效益

指标		M1	M2	M3	M4	M5	综合
直接环境效益	Δ温室气体排放（亿吨 CO ₂ 当量）	-3.02	-10.9	-21.0	-10.9	-11.4	-42.6
	Δ淡水消耗（亿立方米）	1.59	19.2	-191	-80.4	-24.3	-231
	Δ二氧化硫排放（万吨）	-114	-273	-348	-814	-299	-1115
	Δ氮氧化物排放（万吨）	-89.0	82.0	-301	-454	-166	-521
间接环境效益	Δ温室气体排放（亿吨 CO ₂ 当量）	-0.14	-1.67	-2.03	-0.89	-0.70	-4.22
	Δ淡水消耗（亿立方米）	0.19	-2.86	-11.6	-2.82	-0.79	-15.3
	Δ二氧化硫排放（万吨）	0.84	-22.0	-33.3	-11.1	-3.11	-54.9
	Δ氮氧化物排放（万吨）	-5.85	-33.7	-41.8	-17.9	-21.3	-94.3

（注：Δ表示减排情景与基准情景的差值）

表 4-9 园区能源基础设施的温室气体减排成本

指标（2015 年可比价）	M1	M2	M3	M4	M5	综合
Δ设备建造成本（亿元）	65.3	596	71.9	2,273	4,474	1,958
Δ燃料成本（亿元）	1,556	-10,157	-10,221	-4,252	191	-14,490
Δ电力收益（亿元）	1,911	1,758			6,694	9,541
总减排成本（亿元）	-290	-11,318	-10,149	-1,979	-4,340	-22,074
单位减排成本（元/吨）	-96	-1,041	-483	-181	-382	-519

（注：Δ表示减排情景与基准情景的差值）

进一步将温室气体减排成本和减排潜力结合进行分析，以不等宽柱状图展示（图 4-9），图中柱宽代表减排潜力，柱高代表减排成本。从减排潜力来看，M1 情景由于锅炉煤改气对于锅炉效率的提升幅度有限（附表 9），同时天然气供给额度限制使得改造机组总容量较小，因此减排潜力较小；而 M3 由于通过汽轮机背压改造显著提升能效，且适配机组总容量较大，因此减排潜力显著。从单位减排成本来看，各情景单位减排成本均为负值，尤其 M2 经济效益显著，这是由于垃圾处理补贴、替代煤炭减少燃料成本以及生活垃圾上网电价优势的三重作用。

综合情景通过将各减排技术进行组合实施，可实现减排潜力的叠加，同时单位减排成本由于 M2 技术的拉动效应，为-519 元/吨 CO₂ 当量，表明其具有良好的经济效益。

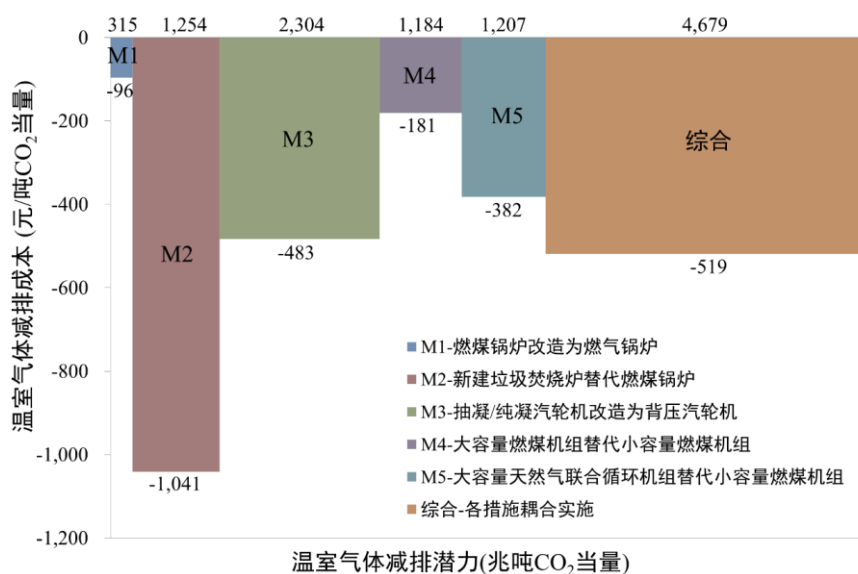


图 4-9 园区能源基础设施温室气体减排潜力与减排成本

4.3.5 园区在役能源基础设施温室气体减排模型的不确定性

由于 1604 家园区的能源基础设施机组数量众多，少量机组的运行参数（年利用小时数、热电比和能源效率）不可获得，需要基于数据库中有效样本对缺失运行数据的机组进行估算，由此导致模型结果的不确定性。本研究对于运行数据缺失机组，按容量等级、燃料类型和技术类型等进行分类，根据相应类别取缺省值（由数据可得同类别机组取平均数或中位数得出，见附表 8-附表 10）。基于上述分析，模型结果的不确定性主要来自部分运行数据缺失的机组，本研究采用蒙特卡洛模拟方法对关键结果的不确定区间进行分析。关键结果选取各减排情景相对于基准情景的四项环境效益改进比率，即温室气体减排比率、淡水节约比率、二氧化硫减排比率和氮氧化物减排比率。

将数据缺失机组的各运行参数在相应取值区间内同时随机取值，各参数的取值区间按机组的单机容量、燃料类型和技术类型分类列出。计算原模型结果时，数据缺省值取平均值或中位数。进一步分析模型中相关计算公式，环境效益改进比率等关键结果与年利用小时数、热电比和能源效率等参数呈单调递增或单调递减关系。因此，结果不确定区间的端点可以通过取各参数最大值或最小值得出。四项环境效益改进比率随参数取值同时发生变化，各自不确定区间的最大值或最小值可能不会同时达到。换言之，当温室气体减排比率达到最大值时，淡水节约比率可能会达到最小值。本研究以温室气体减排比率为研究焦点，因此结果不确

定性分析以其作为中心指标开展，表 4-10 列出了各减排情景的环境效益改进比率不确定区间端点值。

表 4-10 模型结果的不确定性

指标	情景	温室气体减排比率 (%)	淡水节约比率 (%)	二氧化硫减排比率 (%)	氮氧化物减排比率 (%)
原模型 计算结果	M1	-0.68	0.27	-2.52	-1.64
	M2	-2.72	2.52	-6.55	0.83
	M3	-4.99	-31.23	-8.46	-5.93
	M4	-2.56	-12.83	-18.32	-8.16
	M5	-2.61	-3.87	-6.72	-3.24
	综合	-10.13	-38.05	-26.00	-10.63
温室气体 减排比率 取最小值 的计算结果	M1	-0.45	0.26	-2.00	-1.13
	M2	-1.15	2.80	-3.22	0.62
	M3	-4.44	-32.15	-8.69	-5.37
	M4	-1.34	-13.58	-14.24	-4.25
	M5	-2.63	-4.12	-8.02	-3.32
	综合	-8.02	-39.34	-23.65	-9.68
温室气体 减排比率 取最大值 的计算结果	M1	-1.03	0.25	-2.93	-2.26
	M2	-5.62	1.46	-11.00	0.67
	M3	-7.07	-27.48	-9.74	-8.27
	M4	-5.76	-11.00	-25.38	-15.19
	M5	-2.42	-3.24	-4.61	-2.90
	综合	-15.92	-33.71	-30.50	-13.79

综上所述，综合情景下的温室气体减排比率、淡水节约比率、二氧化硫减排比率和氮氧化物减排比率四项关键结果的不确定区间范围是 8~16%、34~39%、24%~31% 和 10%~14%。

4.4 工业园区“能-水”基础设施共生的环境效益有待挖掘

4.4.1 园区集中式污水处理厂建设现状

根据《水污染防治行动计划》（以下简称“水十条”）要求，2017 年底前，工业集聚区应按规定建成污水集中处理设施，并安装自动在线监控装置，京津冀、长三角、珠三角等区域提前一年完成；逾期未完成的，一律暂停审批和核准其增加水污染物排放的建设项目，并依照有关规定撤销其园区资格。生态环境部、国家发展和改革委员会于 2018 年 12 月联合发布《长江保护修复攻坚战行动计划》，

要求规范工业园区环境管理，工业园区应按规定建设污水集中处理设施并做到稳定达标运行。根据生态环境部公布的数据，截至 2018 年 9 月底，全国 2411 家涉及废水排放的工业园区污水集中处理设施建成率为 97%，自动在线监控装置安装完成率为 96%。

以长江经济带工业园区为例进行深入调研剖析，其污水集中处理设施建设平均完成率为 96.8%，其中上海、江苏、浙江、重庆、四川的省级及以上园区全部完成污水集中处理设施建设，其他六省（市）还有 58 家园区尚未完成“水十条”规定的污水集中处理设施建设任务。长江经济带工业园区在线监控装置建设平均完成率为 96%。目前园区工业废水处理方式分为园区自建集中式污水处理厂和依托城镇污水厂处理两种方式，分别占总数的 40%和 60%。在具体废水排放情况上，限于数据可得性，研究以长江经济带 108 家国家级经开区为例，研究了其 2016 年用排水及节水潜力。全国有 219 家国家级经开区，长江经济带布局了 49.3% 的国家级经开区。长江经济带 108 家国家级经开区物理边界内共建有 209 座集中式污水处理厂，总设计规模 1060 万吨/天。绝大多数集中式污水处理厂同时处理园区内的工业废水和园区外的生活污水。长江经济带国家级经开区每年实际处理污水 29.7 亿吨，其中 21.1 亿吨为生活污水，占比 71%；8.6 亿吨为工业废水，占比仅 29%。

综上，通过“水十条”的推动，工业园区基本实现了集中式污水处理设施的全覆盖；随着污水处理厂的排放提标，园区集中式污水处理厂出水将成为重要的非常规水资源，同时污泥的处理处置将是“无废园区”的重要瓶颈。利用园区能源基础设施的优势，在能源、环境基础设施间构建共生链接，符合生态工业园区理念，可进一步减碳节水。由于冷却、冲洗等环节的用水需求，能源基础设施会消耗大量的水资源，对当地的供水造成了一定的压力。不同于一般工业企业，能源基础设施的冷却用水水质要求并不高，尽管其对氯离子等容易对管道造成腐蚀的离子浓度做出了较高的要求。因此，使用非常规水资源，如水质较好的污水处理厂出水或再生水等，作为能源基础设施的冷却用水将大大降低园区整体的新鲜水消耗。

4.4.2 排放提标促使工业园区集中式污水处理厂迈向非常规水资源

近年来环保领域排放标准及相关法律法规的日趋严格，园区集中式污水处理厂的出水水质随之大幅提升。对比污水处理厂排放标准和工业冷却水水质标准，发现除氨氮和氯离子外，前者中的一级 A 标准已经能满足后者中敞开式冷却系统水质要求，如表 4-11 所示。

表 4-11 污水处理厂排放标准^[103]与能源设施冷却水水质标准^[104]对比

水质标准	一级 A	一级 B	二级	其它	能源设施冷却水
污水厂数量	135	60	7	50	-
实施比例 (%)	53	24	3	20	-
COD (mg/L)	50	60	100	60	60
BOD ₅ (mg/L)	10	20	30	20	10
SS (mg/L)	10	20	30	20	20
TN (mg/L)	15	20	-	-	-
NH ₃ -N (mg/L)	5	8	25	15	1
TP (mg/L)	0.5	1	3	0.5	1

换言之，园区集中式污水处理厂出水只需再经过简单的深度处理，就可以回用至园区能源基础设施的冷却水系统。此外，集中式污水处理厂的污泥富含有机质，可以通过热解、厌氧消化等方式转换成生物质能。因此，可以将煤与生物质按照一定比例混合掺烧，作为燃煤电厂的能源供应，减少部分不可再生能源的消耗量。上述的“水”和“能源”两条线，将园区的环境基础设施和能源基础设施关联起来，构成园区基础设施共生网络模型。应用该共生模型可以显著减少园区总体新鲜水消耗、降低园区能源消耗、减轻园区固废处理负担，可谓“一举三得”。与企业之间的共生相比，基础设施共生的绝对环境效益更显著，节水节能效应明显，具有一定的经济价值。

4.4.3 园区能源基础设施和污水处理厂共生的碳减排协同效益

基础设施在工业园区绿色发展中发挥着重要作用，其中热电厂和集中式污水处理厂（CWWTP）是园区中的最重要的能源和水环境基础设施。热电厂作为园区主要供能者的同时，也是取水和排污大户。CWWTP 是园区水污染防治的“最后一道闸门”，同时也是非常规水资源（二级处理出水）和固体废物（污泥）的排放大户。CWWTP 的二级处理出水通常就近直排水体，即使出水水质已经近似水体水质，仍然会对周边水环境造成影响；而合理的污泥处理处置方式仍然是亟待解决的环境问题之一。

基于产业共生理论，以热电厂与 CWWTP 为关键节点，构建了园区基础设施共生模型（图 4-10）。将 CWWTP 的二级处理出水经深度处理制成再生水后，供给电厂作为冷却水使用。CWWTP 产生的污泥富含生物质能，经干化后可送至热电厂进行焚烧，在替代部分燃煤消耗量的同时，也解决了污泥处置难的问题。热电厂为整个 CWWTP 的运行提供电能，同时，其产生的蒸汽用于污泥干化，可降低湿污泥预处理过程中的能耗。

基于上述基础设施共生理念，对 111 家国家级工业园区的 252 座集中式污水处理厂和 308 座热电联产设施开展研究，在能源—环境基础设施之间构建“能源-水-污泥”耦合系统，研究发现基础设施间共生耦合的资源环境效益明显。该共生模型是传统产业共生理论在园区尺度和基础设施层面的探索，它包含了产业共生的两种类型：废物或副产物交换及基础设施共享；采用该共生模型，热电厂每年可减少 73.4% 的新鲜水取水量和 7% 的燃料消耗量；与基准情景相比，该共生模型可以减少 2.56% 的 GHG 排放量；地理邻近性是决定小尺度共生模型有效性的关键因素之一，工业园区则在此方面具有得天独厚的优势。

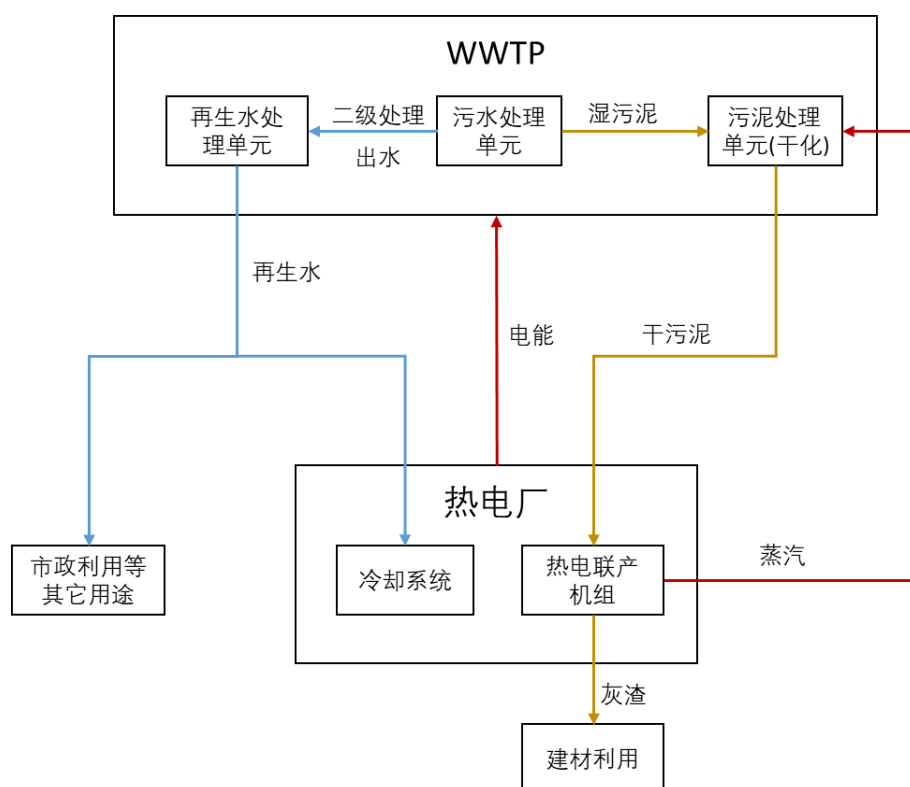


图 4-10 园区能源环境基础设施共生模型示意

5 中国工业园区碳排放和减排潜力均十分显著

5.1 主要发现及整体判断

5.1.1 项目开展的主要工作

研究开展的主要工作如下：

(1) 以 210 多家国家级工业园区为样本，揭示了我国工业园区的能源消费结构特点，从生命周期视角建立了园区能源相关的直接和间接温室气体排放核算方法，量化识别了园区温室气体排放特征；

(2) 估算了中国工业园区二氧化碳排放总量，并面向 2035 年与 2050 年量化分析了园区中长期碳减排目标和低碳发展路径，定量揭示了以产业结构调整、能效提升、能源结构优化、碳捕集等为主要路径的碳减排潜力；

(3) 进一步完善了覆盖 1600 余家国家级和省级工业园区的能源基础设施数据库，阐明了中国工业园区在役能源基础设施机组的年龄结构、容量结构、能源结构、技术类型、空间分布等特征，以及能源基础设施在后续服役期的温室气体排放总量；

(4) 提出了园区能源基础设施温室气体减排五种主要措施，开发了“年份—存量”综合评价模型，定量揭示了能源基础设施的温室气体减排潜力及其成本效益，二氧化硫、氮氧化物协同减排潜力和协同节水潜力；构建了能源基础设施与集中式污水处理厂通过“能-水”耦合模型，研究了基础设施共生的协同节能减排潜力。

5.1.2 项目研究主要发现

(1) 工业园区贡献了全国碳排放三成以上，2050 年减排 60% 以上前景可期

针对 213 家国家级工业园区的温室气体核算表明，园区在 2015 年的直接与间接温室气体排放分别为 10.4 亿吨和 1.8 亿吨 CO₂ 当量，各自占总排放的 85% 和 15%，园区对间接排放的责任和减排义务同样需要加以关注。园区中普遍建设的热电联产等能源基础设施是园区排放的主要来源，在园区直接排放中平均占比为 75%。为实现工业园区的温室气体达峰及减排政策制定，首先需明确并统一园区碳核算的边界、方法和工作细则。

2015 年，中国工业园区二氧化碳排放总量约为 28.2 亿吨，占全国总排放量的 31%。2015-2035 年与 2035-2050 年期间，全国工业园区有望分别减排至少 28% 和 51%；在园区高、低两种经济增速情景下，通过产业结构调整、能效提升、能源结构优化、CCUS 等低碳路径可实现显著的减排效果，2015-2050 年预期可减排 18.4 亿吨二氧化碳。

(2) 园区普遍建有的能源基础设施碳减排潜力和经济环境协同效益显著

2014 年，1604 家园区能源基础设施包括现役机组 4542 个，共计 515 GW，占同年全国发电装机总容量的 38%。园区能源基础设施温室气体总排放为 23.5 亿吨 CO₂ 当量，占同年全国排放的 18%。能源基础设施服役期长，对园区温室气体排放具有长期锁定效应。园区能源基础设施呈现“四多”特征：燃煤机组多，小容量机组多，热电联产机组多，年轻机组多。综合园区能源基础设施存量特征、园区实践措施和国家相关能源政策，识别出 5 项具有较高适用性和可行性的温室

气体减排措施：燃煤锅炉改造为燃气（M1），垃圾焚烧炉替代燃煤锅炉（M2），抽凝/纯凝汽轮机升级为背压汽轮机（M3），大容量燃煤机组替代小容量燃煤机组（M4），大容量天然气联合循环机组替代小容量燃煤机组（M5）。

综合情景下，通过将 M1~M5 技术进行组合实施，相比基准情景实现温室气体减排、淡水节约、二氧化硫减排和氮氧化物减排 8~16%、34~39%、24%~31% 和 10%~14%；园区能源基础设施在其剩余服役时间的累积减排潜力可达 46.8 亿吨 CO₂ 当量，相当于 IPCC《全球升温 1.5°C 特别报告》中 2°C 和 1.5°C 全球碳预算（三分之二机会将温升限制在 2°C/1.5°C 的碳预算，11700 亿吨/4200 亿吨 CO₂ 当量）的 0.4% 和 1.1%。此外，减排具有一定经济效益，综合情景下单位减排成本为 -519 元/吨 CO₂ 当量（2015 年可比价）。

（3）基于产业共生理念，推动工业园区能源基础设施和集中式污水处理厂建立“能-水”共生体系，可进一步挖掘园区深度减排潜力

对 111 家国家级工业园区的 252 座集中式污水处理厂和 308 座热电联产设施开展研究，在能源—环境基础设施之间构建“能源-水-污泥”耦合系统模型。研究发现，基础设施共生的资源环境效益明显：园区能源基础设施每年可减少 73.4% 的新鲜水取水量和 7% 的燃料消耗量，减排温室气体 2.6%。地理邻近是决定小尺度共生模型有效性的关键因素之一，工业园区在此方面具有得天独厚的优势。

5.1.3 研究形成的核心观点

基于上述定量分析结果，研究形成以下核心观点和判断：

（1）中国工业园区温室气体减排的挑战与机遇并存

我国省级及以上工业园区有 2500 余家，其他各级园区更多达上万家。为落实国家自主贡献和全球温升控制的双重目标，一方面，园区面临着迅速推进能源低碳化转型和工业绿色发展的双重压力，短期内需转变工业部门和能源基础设施对化石燃料高度依赖的状况，而当前园区的温室气体排放特征和针对性减排策略均不明确，园区低碳研究和政策实践尚处于初期阶段，亟需开展广泛、全面、深入的普查与核算以“摸清家底”，为后续减排策略制定奠定基础；另一方面，园区具有企业集聚性、规模性优势和创新转型动力，产业共生效益的潜力显著，基础设施集约化程度高，行政管理体系相对独立高效，低碳经济势必为园区高质量发展注入新的活力，成为全国乃至全球工业部门低碳发展的领头羊和示范区。

（2）中国工业园区温室气体减排对 2°C 温控目标贡献可期

工业园区贡献了全国二氧化碳排放的三成以上，园区在产业结构、能源结构、节能水平、碳捕集等方面仍有巨大减排潜力。园区实现碳达峰乃至碳中和，将为

我国自主贡献总体目标和 2℃全球温控目标发挥至关重要的作用。本研究发现，园区在 2015-2050 年期间有望实现超过 60%的减排幅度。目前工业园区普遍存在低效落后产能设施和高煤炭依赖度，例如从园区能源基础设施来看，大规模推广垃圾焚烧产能、热电联产技术升级将具有显著的减排潜力和环境、经济协同效益。因此，通过淘汰或替换落后产能、提高能效、废物废热回收利用等途径，可基本实现近期阶段（2015-2035 年）的减排任务。随着 CCUS 对化石燃料设施的逐步覆盖，以及工业过程中零碳氢能的广泛利用，我国园区面向 2050 年或 2060 年的深度减排任务也将有望达成。

5.2 政策建议与展望

5.2.1 政策建议

根据上述研究观点，建议完善工业园区温室气体核算方法，构建全国范围园区碳排放平台，并以能源基础设施作为重要着力点，通过能源基础设施低碳化、能-水基础设施间共生链接，推动园区生态化发展，实现温室气体及多污染物协同减排与节水。进而，为全球 2℃温控目标做出“园区贡献”，使工业园区成为全球性的碳减排落脚点和低碳经济载体。具体建议如下：

（1）开发系统、规范、标准的工业园区温室气体排放核算方法与工具包

建议基于生命周期方法开发并编制工业园区温室气体核算框架与实施细则，开发在线核算工具包，推动工业园区碳达峰，首先需要解决核算方法的可行性、核算范围的一致性、核算结果的可比性，为此可将能源相关温室气体排放作为首要核算对象，形成直接排放和间接排放核算的标准性工具方法；进而在全国范围内选择一批园区开展温室气体核算试点，为后续全面深化工业园区温室气体减排工作提供基础。

（2）搭建工业园区碳减排决策支撑数据平台

在园区层面碳核算的基础上，运用好国家“二污普”成果和数据，政府部门牵头，选择工业园区研究领域的重点研究机构，构建中国工业园区能源环境数据库，搭好开放共享的数据平台，全面摸清并动态更新工业园区基础设施的家底。进一步补充完善园区基础设施和园区四位数字代码主导产业等信息，拓展园区数据平台的“碳减排工具库”模块，链接更多园区形成合作网络，由园区自主录入当前实施的碳减排政策或技术措施的作用对象、作用效果、成本效益等数据。通过构建综合评价模型从中识别先进低碳措施，高效精准地将先进措施推广至其他适用园区的具体生产设施、工艺设备，为园区“量身打造”具有可操作性的碳减排工具包。

(3) 制定工业园区低碳发展分类指导路线图

研究制定“中国工业园区温室气体及多污染物协同控制节能节水行动路线图”，支撑园区打好污染防治攻坚战和绿色低碳转型攻坚战。在园区碳排放数据平台和减排工具包基础上，将园区按照园区绿色发展水平、经济规模、主导产业、基础设施建设状况等属性进行分类分级，明确各类各级园区低碳化转型的行动重点，有针对性地提出基础设施升级及共生链接的具体指导意见。模拟中国工业园区面向 2035 年的排放量演化路径，结合国家自主贡献和 2°C 全球碳预算目标，识别园区碳达峰关键节点，建立深度减排动态优化方案。

(4) 开展碳达峰示范园区建设

结合当前正在开展的国家生态工业示范园区、绿色园区、循环化改造试点园区等项目，建议主管部门间深化协作，选择一批绿色发展基础好、产业体系优势足、低碳达峰意愿强、经济实力有保障的园区，从全生命周期温室气体核算、在线物质流能量流系统建设、自然生态系统碳资产核算、定制化碳达峰路径规划等方面开展试点，并争取给与专项资金支持，在十四五期间形成 30-50 家碳达峰示范园区。

5.2.2 进一步研究建议

巴黎协定 2°C 温控目标为全球经济体的低碳发展提出了迫切要求，全球气候变化已成为威胁人类可持续发展的重大挑战之一，新冠疫情的冲击更强调了重新思考人类发展与生态系统和谐共处的必要性。自 19 世纪末工业化进程飞速推进至今，工业系统始终是经济社会发展的重要支柱，也是中国作为“世界工厂”的源动力。工业园区是我国建设绿色制造体系、实施制造业强国战略最重要、最广泛的载体，承担了密集的工业生产活动，也将成为落实我国自主贡献目标和实现精准减排的关键落脚点。尤其在当前至 2035 年大力推进生态文明建设的大背景下，园区低碳发展也是实现国家“生态环境根本好转，美丽中国目标基本实现”宏伟目标的内在要求和重要途径。

面向我国 2060“碳中和”目标，下一阶段研究将基于工业园区的生产空间布局，进一步扩大园区焚烧周边地区生活垃圾进行热电联产的比例，推广分布式光伏和风电园区的部署方案，如厂房屋顶太阳能和厂区小型风电机，进而构建园区“垃圾-风-光”低碳电力组成的智能化微电网，促进可再生能源的就地消纳，实现工业园区深度低碳化。在此基础上，构建综合评价模型，量化分析低碳、可再生能源设施嵌入园区的温室气体减排潜力、空气质量和健康的协同效益，以期为全球 2°C 温控目标实现和中国工业园区绿色发展提供强大助力。

研究成果目前已支撑了《国家生态工业示范园区标准 (HJ274-2015)》的制定,已应用于北京、上虞、芜湖、嘉兴等多家园区的生态化建设、循环化改造和绿色发展评价,以及浙江省工业园区综合能源管理创新的决策支持。目前,项目支撑的芜湖经济技术开发区、嘉兴港区已通过生态环境部“国家生态工业示范园区”验收。本研究建立的数据库覆盖面广,为深入揭示园区绿色发展机制奠定了基础;构建的“年份-存量”减排模型适用于全国多数园区,帮助园区识别减排路径并量化减排效果,为中国落实温室气体减排计划、实现工业绿色发展、打好污染防治攻坚战等提供坚实的科学依据,同时对于其他发展中国家的低碳工业园区建设具有重要借鉴意义。

参考文献

- [1] 人民网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [EB/OL]. 2020. http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2020-09/23/nw.D110000renmrb_20200923_2-01.htm.
- [2] 国家发展和改革委员会. 关于印发国家应对气候变化规划(2014-2020年)的通知 [EB/OL]. 2014. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201411/t20141104_642612.html.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴(2019年) [M/OL]. 2019. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>.
- [4] Peddle M T. Planned Industrial and Commercial Developments in the United States: A Review of the History, Literature, and Empirical Evidence Regarding Industrial Parks and Research Parks [J]. *Economic Development Quarterly*, 1993, 7(1): 107-24.
- [5] 李志群, 刘亚军, 刘培强. 开发区大有希望 [M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2011.
- [6] 国务院. 国务院关于批转《沿海部分城市座谈会纪要》的通知 [EB/OL]. 1984. <https://www.lawxp.com/statute/s1232940.html>.
- [7] 皮黔生, 王恺. 走出孤岛 [M]. 北京: 生活·读书·新知三联书店, 2004.
- [8] 国务院办公厅. 国务院办公厅转发外经贸部等部门关于当前进一步鼓励外商投资意见的通知 [EB/OL]. 1999. <https://www.lawxp.com/statute/s554639.html>.
- [9] 国家发展和改革委员会, 科学技术部, 原国土资源部, 等. 中国开发区审核公告目录(2018年版) [EB/OL]. 2018. http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201803/t20180302_878802.html.
- [10] 工业和信息化部. 《工业转型升级规划(2011-2015年)》系列解读材料 [EB/OL]. 2012. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1146562/n1146655/c3074561/content.html>.
- [11] 田金平, 刘巍, 臧娜, 等. 中国生态工业园区发展现状与展望 [J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7323-7334.
- [12] 国务院. 关于促进国家级经济技术开发区转型升级创新发展的若干意见 [EB/OL]. 2014. <https://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbfh/wqfbh/33978/34285/xgzc34291/Document/1471011/1471011.htm>.
- [13] 原环境保护部. 关于在国家生态工业示范园区中加强发展低碳经济的通知 [EB/OL]. 2009. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/200912/t20091229_183603.htm.
- [14] 国务院. 关于印发“十二五”控制温室气体排放工作方案的通知 [EB/OL]. 2011. http://www.gov.cn/zwggk/2012-01/13/content_2043645.htm.
- [15] 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会. 关于组织开展国家低碳工业园区试点工作的

- 通知 [EB/OL]. 2013.
<http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757016/c3762117/content.html>.
- [16] 工业和信息化部. 工业绿色发展规划（2016-2020年） [EB/OL]. 2016.
<http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057542/n3057545/c5142900/content.html>.
- [17] 中共中央, 国务院. 关于全面加强生态环境保护 坚决打好污染防治攻坚战的意见 [EB/OL]. 2018. http://www.gov.cn/zhengce/2018-06/24/content_5300953.htm.
- [18] 国务院. 关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知 [EB/OL]. 2016.
http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm.
- [19] 国务院. 关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知 [EB/OL]. 2016.
http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm.
- [20] 国务院. 大气污染防治行动计划 [EB/OL]. 2013.
<http://www.jingbian.gov.cn/gk/zfwj/gwywj/41211.htm>.
- [21] 国务院. 水污染防治行动计划 [EB/OL]. 2015. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm.
- [22] 吕一铮, 田金平, 陈吕军. 推进中国工业园区绿色发展实现产业生态化的实践与启示 [J]. 中国环境管理, 2020, 12(03): 85-89.
- [23] Liu Z, Guan D, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China [J]. Nature, 2015, 524(7565): 335-338.
- [24] Guan D, Jing M, Reiner D M, et al. Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems [J]. 2018, 11(8): 551-555.
- [25] Bai H, Zhang Y, Wang H, et al. A hybrid method for provincial scale energy-related carbon emission allocation in China [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(5): 2541-2550.
- [26] Shan Y, Guan D, Zheng H, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015 [J]. Scientific Data, 2018, 5: 170201.
- [27] Shan Y, Guan D, Hubacek K, et al. City-level climate change mitigation in China [J]. Science Advance, 2018, 4(6): eaaq0390..
- [28] Cai B, Guo H, Cao L, et al. Local strategies for China's carbon mitigation: An investigation of Chinese city-level CO₂ emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178: 890-902.
- [29] Zheng B, Zhang Q, Davis S J, et al. Infrastructure Shapes Differences in the Carbon Intensities of Chinese Cities [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(10): 6032-6041.
- [30] Liu L, Zhang B, Bi J, et al. The greenhouse gas mitigation of industrial parks in China: A case study of Suzhou Industrial Park [J]. Energy Policy, 2012, 46(3): 301-307.
- [31] Wang H, Lei Y, Wang H, et al. Carbon reduction potentials of China's industrial parks: A case study of Suzhou Industry Park [J]. Energy, 2013, 55(3): 668-675.
- [32] Liu W, Tian J, Chen L. Greenhouse gas emissions in China's eco-industrial parks: a case study of the Beijing Economic Technological Development Area [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66: 384-391.
- [33] Dong H, Geng Y, Xi F, et al. Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assessment approach [J]. Energy Policy, 2013, 57(7): 298-307.
- [34] Larsen H N, Hertwich E G. The case for consumption-based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action [J]. Environmental Science & Policy, 2009, 12(7): 791-798.
- [35] World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development. The Greenhouse Gas Protocol: A corporate accounting and reporting standard [EB/OL]. 2004.
<http://www.ghgprotocol.org/corporate-standard>.
- [36] Yong U B, Ji H J, Sang K J. Assessing the performance of carbon dioxide emission reduction of commercialized eco-industrial park projects in South Korea [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 124-131.

- [37] Chen B, He G, Qi J, et al. Greenhouse Gas Inventory of a Typical High-End Industrial Park in China [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013(3): 263-275..
- [38] Yu X, et al. An emissions accounting framework for industrial parks in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118712.
- [51] United Nations. Sustainable Development Goals: 17 Goals to Transform Our World [EB/OL]. 2016. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.
- [40] Lu Y, Chen B, Feng K, et al. Ecological network analysis for carbon metabolism of eco-industrial parks: a case study of a typical eco-industrial park in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(12): 7254-7264.
- [41] Tian J, Guo Q, Chen Y, et al. Study on Industrial Metabolism of Carbon in a Chinese Fine Chemical Industrial Park [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(2): 1048-1056.
- [42] 吕斌, 熊小平, 康艳兵, 等. 中国产业园区温室气体排放核算方法研究 [J]. 中国能源, 2015, 37(9): 21-26.
- [43] 陈彬, 杨维思. 产业园区碳排放核算方法研究 [J]. 中国人口 资源与环境, 2017, 27(3): 1-10.
- [44] Long R, Li J, Chen H, et al. Embodied carbon dioxide flow in international trade: A comparative analysis based on China and Japan [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 209: 371-381.
- [45] Kumanayake R, Luo H, Paulusz N. Assessment of material related embodied carbon of an office building in Sri Lanka [J]. Energy & Buildings, 2018, 166: 250-257.
- [46] Chen S, Chen B. Changing urban carbon metabolism over time: historical trajectory and future pathway [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(13): 7560-7571.
- [47] United Nations Environment Programme. Towards a life cycle sustainability assessment: Making informed choices on products [M/OL]. 2011. http://www.unep.org/pdf/UNEP_LifecycleInit_Dec_FINAL.pdf.
- [48] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242.
- [49] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [R]. 2013. <http://www.climatechange2013.org/report/>.
- [50] 亿科环境科技有限公司, 四川大学. 中国生命周期基础数据库 (Chinese Life Cycle Database 0.8) [M]. 2014.
- [51] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [52] World Resources Institute. GHG Protocol Tool for Energy Consumption in China V2.1 [R]. 2013. <http://www.ghgprotocol.org/calculation-tools>.
- [53] 国家统计局. 中国统计年鉴 (2016 年) [M/OL]. 2016. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2016/indexch.htm>.
- [54] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 (2016 年) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [55] Yune J H, Tian J, Liu W, et al. Greening Chinese chemical industrial park by implementing industrial ecology strategies: A case study [J]. Resources Conservation & Recycling, 2016, 112: 54-64.
- [56] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Trends in Global CO₂ and Total Greenhouse Gas Emissions: 2017 Report [R]. 2017. <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2017-report>.
- [57] Energy Foundation. Synthesis Report 2020 on China's Carbon Neutrality [R]. 2020. https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20201210/SPM_Synthesis-Report-2020-on-Chinas-Carbon-Neutrality_EN.pdf.
- [58] Peters G P, Andrew R M, Canadell J G, et al. Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement [J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 118-122.

- [59] Hoekstra R, Van Den Bergh J C J M. Comparing structural decomposition analysis and index [J]. *Energy Economics*, 2003, 25(1): 39-64.
- [60] Guan D, Meng J, M. R D, et al. Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems [J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11: 551-555.
- [61] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide [J]. *Energy policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [62] Meng J, Mi Z, Guan D, et al. The rise of South-South trade and its effect on global CO₂ emissions [J]. *Nature communications*, 2018, 9(1): 1-7.
- [63] Liu LC, Fan Y, Wu G, et al. Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO₂ emissions from final fuel use: An empirical analysis [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(11): 5892-900.
- [64] 国家发展和改革委员会. 生物质能发展“十三五”规划 [EB/OL]. 2017. http://ghs.ndrc.gov.cn/ghwb/gjjgh/201708/t20170809_857319.html.
- [65] 国务院. 关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知 [EB/OL]. 2017. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm.
- [66] Shi H, Tian J, Chen L. China's Quest for Eco-industrial Parks, Part II: Reflections on a decade of exploration [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(3): 290-292.
- [67] Chertow M, Ehrenfeld J. Organizing self-organizing systems: toward a theory of industrial symbiosis [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(1): 13-27.
- [68] Unruh G C. Understanding carbon lock-in [J]. *Energy Policy*, 2000, 28(12): 817-830.
- [69] Liu Q, Jiang P, Zhao J, et al. Life cycle assessment of an industrial symbiosis based on energy recovery from dried sludge and used oil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(15): 1700-1708.
- [70] Zhang H, Dong L, Li H, et al. Analysis of low-carbon industrial symbiosis technology for carbon mitigation in a Chinese iron/steel industrial park: A case study with carbon flow analysis [J]. *Energy Policy*, 2013, 61: 1400-1411.
- [71] Guo Y, Tian J, Chertow M, et al. Greenhouse Gas Mitigation in Chinese Eco-industrial Parks by Targeting Energy Infrastructure: a Vintage Stock Model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 11403-11413.
- [72] Guo Y, Tian J, Chen L, et al. Exploring Greenhouse Gas-mitigation Strategies in Chinese Eco-industrial Parks by Targeting Energy Infrastructure Stocks [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(1): 106-120.
- [73] Guo Y, Tian J, Zang N, et al. The Role of Industrial Parks in Mitigating Greenhouse Gas Emissions from China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(14): 7754-7562.
- [74] Yu X, Chen H, Wang B, et al. Driving forces of CO₂ emissions and mitigation strategies of China's National low carbon pilot industrial parks [J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1553-1562.
- [75] Yu X, Lu B, Wang R. Analysis of low carbon pilot industrial parks in China: Classification and case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187: 763-769.
- [76] Hu W, Tian J, Chen L. Greenhouse gas emission by centralized wastewater treatment plants in Chinese industrial parks: Inventory and mitigation measures [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 883-897.
- [77] Wang Y, Ren H, Dong L, et al. Smart solutions shape for sustainable low-carbon future: A review on smart cities and industrial parks in China [J]. 2019, 144(JUL.): 103-17.
- [78] Zhang M, Wang C, Wang S, et al. Assessment of greenhouse gas emissions reduction potential in an industrial park in China [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2020, 22(7): 1435-1448.
- [79] 李亮. 江西工业园区低碳经济发展研究 [D]; 南昌大学, 2010.
- [80] 卢红兵. 循环经济与低碳经济协调发展研究 [D]; 中共中央党校, 2013.
- [81] 张敏高. 苏州工业园区低碳经济发展路径研究 [D]; 苏州大学, 2013.

- [82] 于斐. 工业园区产业共生发展模式驱动力和环境绩效评价 [D]; 山东大学, 2015.
- [83] 惠刚. 安丘青龙山低碳产业园发展战略研究 [D]; 青岛科技大学, 2015.
- [84] 高宇. 永城经开区产业共生环境效益评估 [D]; 郑州大学, 2019.
- [85] 高新才, 曹昊煜. 新中国 70 年西北地区工业发展与政策评价——基于低碳经济的视角 [J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2019, 47(05): 11-23.
- [86] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于印发《能源生产和消费革命战略(2016-2030)》的通知 [EB/OL]. 2016.
http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/t20170425_845284.html.
- [87] 国家发展和改革委员会. 能源发展“十三五”规划 [EB/OL]. 2017.
http://www.nea.gov.cn/135989417_14846217874961n.pdf.
- [88] 国家发展和改革委员会. 电力发展“十三五”规划 [EB/OL]. 2017.
http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/t20170605_849994.html.
- [89] 国家发展和改革委员会. 关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》的通知 [EB/OL]. 2014.
http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201409/t20140919_626235.html.
- [90] 原环境保护部, 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知 [EB/OL]. 2015.
http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm.
- [91] Liu H, Ni W, Li Z, et al. Strategic thinking on IGCC development in China [J]. Energy Policy, 2008, 36(1): 1-11.
- [92] 中国电力企业联合会. 电力工业统计资料汇编(2015) [M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2016.
- [93] 中国电力企业联合会. 电力工业统计资料汇编(2014) [M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2015.
- [94] U. S. Environmental Protection Agency. Catalog of CHP technologies [R]. 2015.
http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies.pdf.
- [95] 住房和城乡建设部, 质量监督检验检疫总局. 大中型火力发电厂设计规范(GB 50660-2011) [S]. 2011.
- [96] 国务院. 关于加快关停小火电机组若干意见的通知 [EB/OL]. 2007.
http://www.gov.cn/zwggk/2007-01/26/content_509911.htm.
- [97] 绿色和平. 中国煤电产能过剩及投资泡沫研究 [R]. 2015.
http://www.greenpeace.org.cn/wp-content/uploads/2015/11/Media-Briefing_CN_20151118.pdf.
- [98] 国家能源局. 2015 年全社会用电量 [EB/OL]. 2016. http://www.nea.gov.cn/2016-01/15/c_135013789.htm.
- [99] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于促进我国煤电有序发展的通知 [EB/OL]. 2016. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201604/t20160425_798979.html.
- [100] 水利部. 2014 年中国水资源公报 [EB/OL]. 2014.
http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201612/t20161222_776054.html.
- [101] 国家统计局. 中国统计年鉴(2015年) [M/OL]. 2015.
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexch.htm>.
- [102] Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report: Global Warming of 1.5 °C [R]. 2018. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [103] 原环境保护部. 城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002) [S]. 2002.
- [104] 循环冷却水用再生水水质标准(HG/T 3923-2007) [S]. 2007.
- [105] 国家发展和改革委员会, 原国土资源部, 原建设部. 中国开发区审核公告目录(2006年版) [EB/OL]. 2007. <http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/200704/W020120821513549811060.pdf>.

- [106] 国家发展和改革委员会. 关于印发《热电联产管理办法》的通知 [EB/OL]. 2016. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201604/t20160418_798342.html.
- [107] 中国电力企业联合会. 全国发电机组手册（2013年） [M/OL]. 2014.
- [108] 中国电力企业联合会. 100-225MW级火电机组基础信息表（2013年） [M/OL]. 2014.
- [109] 中国电力企业联合会. 300MW级火电机组基础信息表（2013年） [M/OL]. 2014.
- [110] 中国电力企业联合会. 600MW级火电机组基础信息表（2013年） [M/OL]. 2014.
- [111] 原环境保护部. 关于公布全国燃煤机组脱硫脱硝设施等重点大气污染减排工程名单的公告 [EB/OL]. 2014. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201407/t20140711_278584.htm.
- [112] 国家能源局. 2013-2014年度全国电力企业价格情况监管通报 [EB/OL]. 2015. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto92/201509/t20150902_1959.htm.
- [113] 国家统计局. 中国能源统计年鉴（2011年） [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [114] Zheng L, Song J, Li C, et al. Preferential policies promote municipal solid waste (MSW) to energy in China: Current status and prospects [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 36: 135-148.
- [115] 国家发展和改革委员会. “十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划 [EB/OL]. 2016. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/t20170615_850951.html.
- [116] Guo Y, Glad T, Zhong Z, et al. Environmental life-cycle assessment of municipal solid waste incineration stocks in Chinese industrial parks [J]. 2018, 139: 387-395.
- [117] 原建设部. 生活垃圾焚烧处理工程技术规范（CJJ90-2009） [S]. 2009.
- [118] 焦树建. 关于电厂发电成本计算方法的探讨 [J]. *燃气轮机技术*, 2000, 13(3): 7-10.
- [119] Zhang C, Zhong L, Fu X, et al. Revealing Water Stress by the Thermal Power Industry in China Based on a High Spatial Resolution Water Withdrawal and Consumption Inventory [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, *Science & Technology*, 2016, 50(4): 1642-1652.

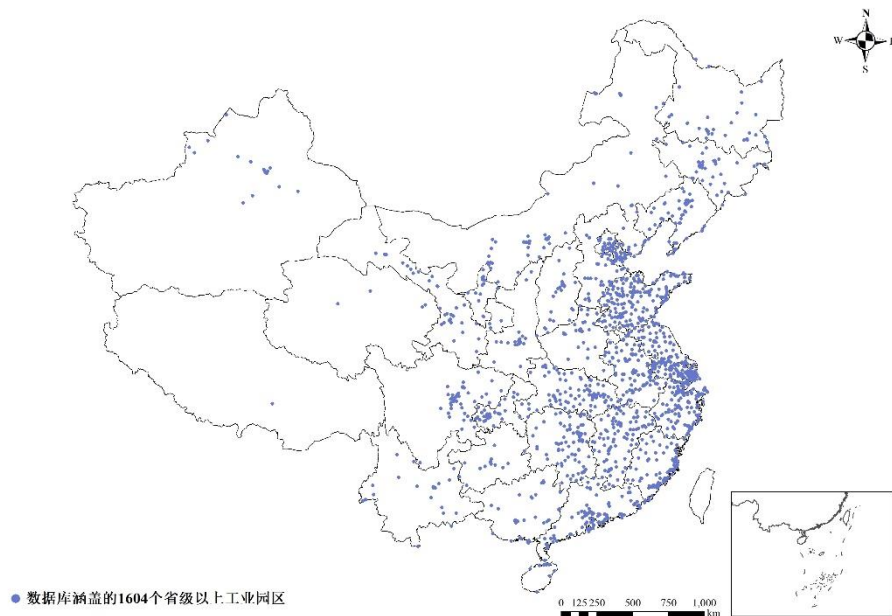
附录

附 1 工业园区基础设施数据库构建

大样本、高分辨园区基础设施数据库是开展后续工作的重要基础。项目基于 2006 年发布的《中国开发区审核公告目录》（共 1568 家省级及以上园区）^[105]进行园区基础设施数据库开发，重点针对能源基础设施和环境基础设施构建两个子库。

附 1.1 园区能源基础设施数据库

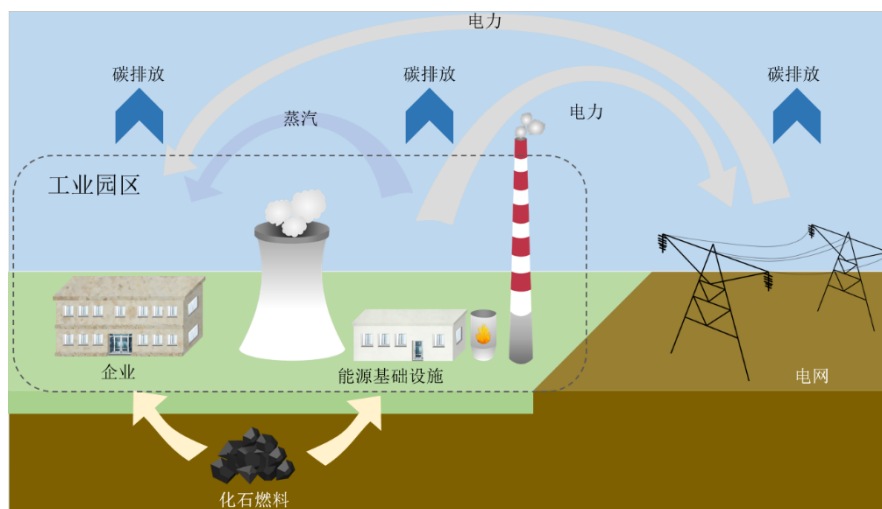
中国现行统计体系中尚未针对园区这一相对独立的经济活动载体开展统计，大样本、高分辨园区能源基础设施数据库是开展后续工作的重要基础。本研究前期工作已基于 2006 年发布的《中国开发区审核公告目录》（共 1568 家省级及以上园区）^[105]，并持续补充近年来新增园区，建立了包含 1604 家中国国家级和省级工业园区的能源基础设施清单，所包含园区的地理分布见附图 1-1。



附图 1-1 数据库涵盖的 1604 家中国工业园区空间分布

能源基础设施是为社会经济系统提供能源服务的工程设施。园区能源基础设施应满足以下两个属性，一是布局在园区边界内部，二是为园区提供能源服务，直接供应能源（如热力）或间接供应能源（如电力）。附图 1-2 为园区能源基础设施示意图。园区能源基础设施的形式包括热电厂、发电厂、热力厂等。发电或热电设施对园区的电力供应是间接的，产出的电力输送至电网，企业直接从电网购电；产出的热力直接供给园区企业。通常，一座能源基础设施包含若干个机组，

每个机组由燃烧系统（以锅炉为核心）、汽水系统（主要由汽轮机、各类泵、给水加热器、凝汽器、管道、水冷壁等组成）、电气系统（以发电机、主变压器等为主）及控制系统等组成^[94]，根据本研究的实际需要，可简化概括为“ m 个锅炉 + n 个汽轮机”的形式。当 $n=0$ 时，表示仅采用锅炉供热，为纯供热机组。



附图 1-2 工业园区能源基础设施示意图

进一步通过以下步骤识别 1604 家园区的能源基础设施（截至 2014 年）：

（1）将工业园区坐标和全国能源基础设施坐标分别导入地理信息系统，园区和设施的经纬度坐标数据采集自谷歌地球（Google Earth）。中国工业园区均设置独立的行政管理机构（园区管理委员会，简称园区管委会），本研究以园区管委会坐标代表园区地理位置。

（2）以园区管委会为圆心，逐一筛选出每家园区半径 10 公里范围内的能源基础设施，由此得到 1604 家园区能源基础设施的初步清单。10 公里为国家发改委发布的《热电联产管理办法》推荐服务半径^[106]。

（3）通过实地调研、园区官网、园区纸质报告、热电项目环评报告、电力企业官网、文献查阅等途径，针对步骤（2）所得初步清单中的园区能源基础设施进行逐一确认，若设施确实在园区中则予以保留，由此获得最终清单。此部分工作的劳动力和时间消耗最为密集。

基于园区设施清单，通过对多数数据源的数据提取与整合，进一步补充相关技术信息，包括机组容量、投产时间、燃料类型、燃料输入、能源产出、技术类型、能源效率等。数据源主要包括：（1）中国电力工业统计资料汇编^[93]；（2）全国发电机组手册^[107]；（3）全国 100-225MW、300 MW 和 600 MW 级火电机组基础信息表^[108-110]；（4）全国燃煤机组脱硫/脱硝设施清单 2014^[111]；（5）园区的实地

调研和调查表发放；（6）100 余份生态工业园区纸质报告和相应官方网站；（7）500 余份热电联产项目环评报告。

由此，自下而上建立了涵盖 1604 家工业园区 4706 个能源基础设施机组的大样本、高分辨地理信息数据库。通过对上述数据源进行交叉验证，完成数据清洗和校核，进一步提升数据准确性和可靠性。数据库包含 2006 年园区名录中全部 1568 家园区，且增补了近年来新增园区，共计 1604 家国家级和省级园区。数据库涵盖三个层面信息：（1）园区层面，如经济体量、主导产业、地理位置等；（2）企业层面，如燃料类型、年利用小时数、能源产出、厂用电率、能源效率等；（3）机组层面，如单机容量、汽轮机技术类型、冷却技术类型、热电比、投产时间等。

附 1.2 园区环境基础设施数据库

园区环境基础设施以集中式污水处理厂为主。集中式污水处理厂是中国工业园区的主要环境基础设施，对园区及周边小流域水环境保护与治理具有重要意义，对于整个园区的基础设施减排同样具有显著作用。

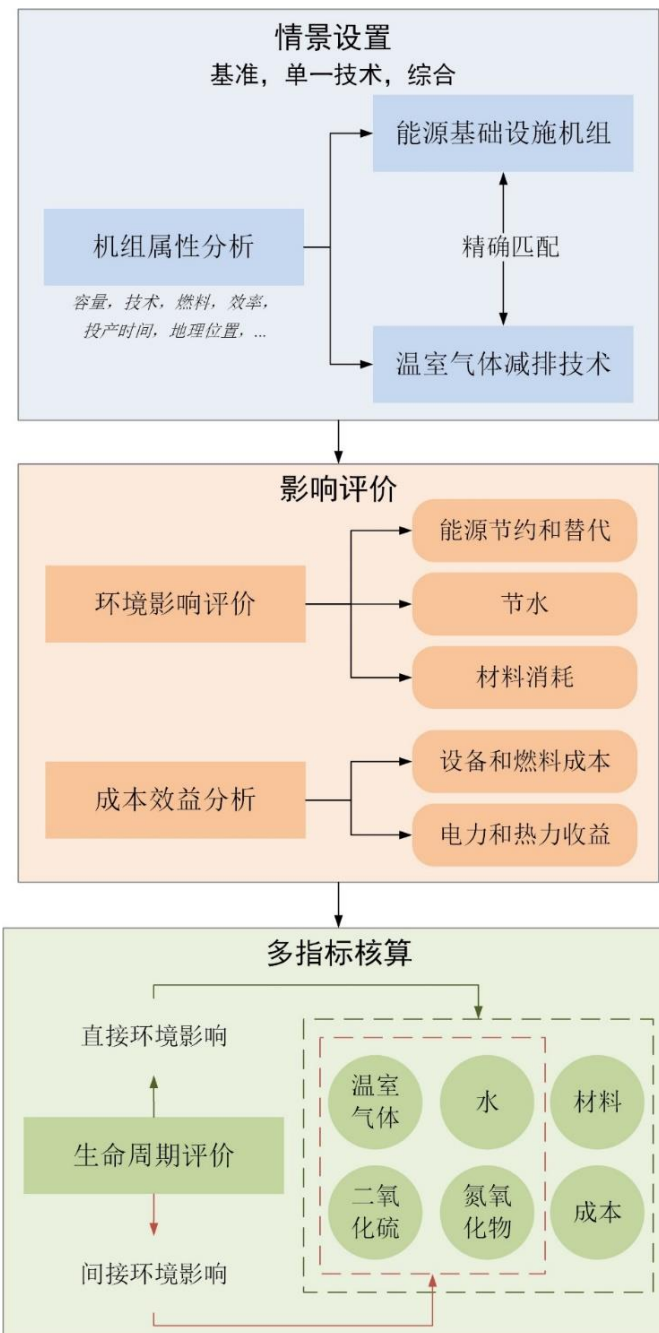
采集的园区集中式污水处理厂相关信息包括：

- （1）基本信息：名称、地理位置、建成时间等；
- （2）技术类型：污水处理厂类型、处理能力、处理工艺、原水构成等；
- （3）污染物排放：排放标准、排水去向、进出口污染物浓度、污染物排放量、污泥产生量及处理处置去向等；
- （4）经济数据：建设成本、运行成本、耗电量等。

附 2 园区能源基础设施温室气体减排综合评价模型

为量化园区能源基础设施的温室气体减排潜力、减排成本和协同环境效益，本研究构建“年份-存量”综合评价模型。基于前期工作中建立的园区能源基础设施数据库与识别出的温室气体减排主要技术，本评价模型聚焦园区设施存量的低碳化转型，将各机组的投产年份和剩余服役时间纳入考量。建模过程耦合了技术与机组的匹配、情景设置、能源效率评价、温室气体核算、成本效益分析和生命周期评价多种方法，可计算温室气体排放、淡水消耗、二氧化硫排放、氮氧化物排放、经济成本、材料消耗 6 项指标。材料消耗包括混凝土、钢、铁、铝四项大宗材料的消耗。附图 2-1 为园区能源基础设施减排的“年份-存量”评价模型架构。模型包括减排情景设置、影响评价和多指标核算 3 个子模块。下面按模型运算顺序依次进行介绍。

首先，通过分析机组属性，包括单机容量、燃料类型、技术类型、能源效率、投产年份、地理位置等，将 5 项温室气体减排技术与适用机组进行逐一匹配，从而实现减排效果的精确量化。根据技术-机组匹配情况，进行情景设置，包括基准情景、单一技术情景（M1~M5 情景）和综合情景。基准情景下无减排技术作用，设施存量保持原有属性直至正常退役；单一技术情景即为 M1~M5 每项技术的单独作用，改变相应设施存量；综合情景则为 M1~M5 的耦合实施。单一技术情景和综合情景统称为减排情景。



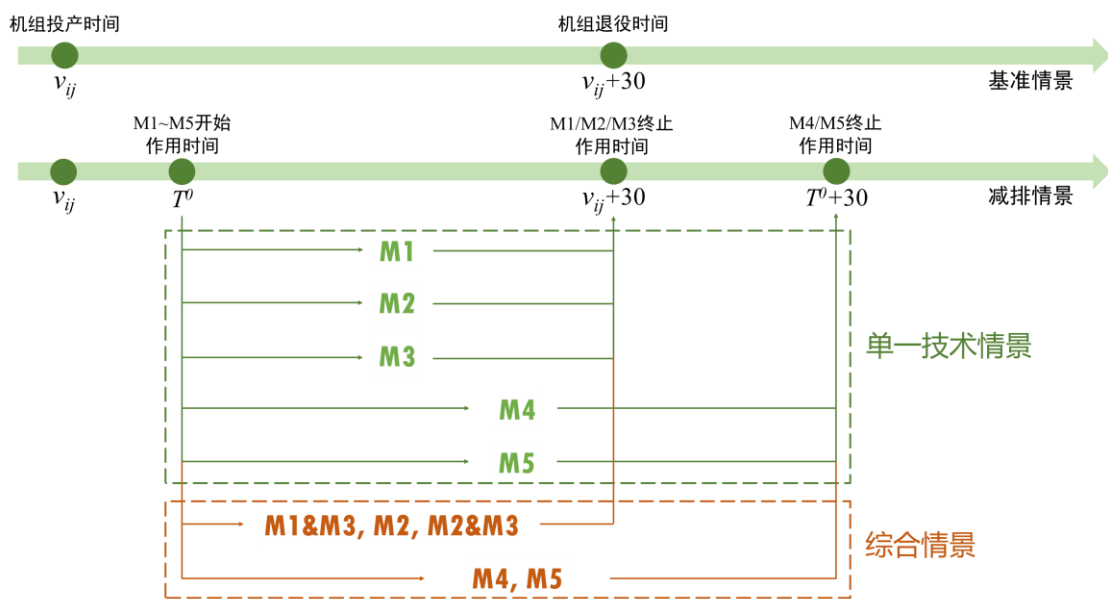
附图 2-1 园区能源基础设施“年份-存量”模型架构

其次，基于机组服役周期视角，核算单一技术情景和综合情景相对于基准情景的直接环境影响变化和成本效益变化。直接环境影响为减排技术作用于园区设施产生的就地环境影响，包含能源替代或节约、淡水节约和材料消耗。成本效益分析考虑设备建造成本、燃料成本、电力收益、热力收益等指标的变化量，从而得出各减排情景的温室气体减排成本。

进而，在环境影响评价结果的基础上，基于生命周期视角，核算各减排情景相对于基准情景的直接温室气体减排量、淡水节约量、二氧化硫减排量和氮氧化物减排量。进而，根据燃料替代量或节约量、淡水节约量、材料消耗量进一步计算各减排情景的间接环境影响，即考虑燃料、水和材料的上游生产过程环境影响。将各项指标的直接和间接环境影响分别加总，最终得出各减排情景整体环境影响。

附 2.1 园区能源基础设施温室气体减排情景设置

基于机组服役周期和减排技术有效作用时间，设置了 7 种情景（附图 2-2）：基准情景，单一技术情景（M1~M5 情景）和综合情景。单一技术情景和综合情景统称为减排情景。进行技术与机组的逐一匹配时，考察每个机组的技术属性，包括单机容量、燃料输入、技术类型、能源效率、投产时间、地理位置等。根据国家相关技术导则，所有机组的全服役周期设置为 30 年^[95]。基准情景下，无减排技术作用，所有机组工作至正常退役；在减排情景下，假设减排技术的适配机组将在一夜之间完成改造，技术开始作用时间为 T^0 。



附图 2-2 情景设置时间轴

本研究数据库的数据年份为 2014 年，将其设置为基准年，则开始作用年份为 2015 年。机组投产时间各不相同，设为 v_{ij} 。对于 M1、M2 和 M3，在原机组基础上进行改造，因此技术作用时间为 $[T^0, v_{ij}+30]$ ；M4 和 M5 新建机组替代原机组，则作用时间为 $[T^0, T^0+30]$ 。综合情景将 5 项减排技术均应用于设施存量改造，进行耦合实施，因此各时间尺度均有涉及。“&”表示两种技术的耦合实施。

对各减排情景的直接环境效益进行核算，包括单一技术情景（M1~M5）和综合情景。将 5 项温室气体减排主要技术与园区能源基础设施机组进行匹配时，需逐一考虑机组属性，包括单机容量、燃料类型、技术类型、能源效率、投产时间、地理位置等。此外，各减排情景还需考虑燃料消费额度、地理邻近等外部因素限制。根据园区设施特征和减排技术应用特点，将减排技术的适配机组概括为附表 2-1。各项减排技术的具体匹配准则以及各减排情景的直接环境效益核算见附 2.2 节。

附 2.2 各减排情景的直接环境效益核算

本研究的园区能源基础设施数据库为 2014 年数据，以 2014 年作为基准年，1604 家园区设施存量的温室气体排放、淡水消耗、二氧化硫排放和氮氧化物排放可根据相关指标进行核算，核算公式见式 1~4。2014 年全国尺度的温室气体排放、工业淡水消耗、二氧化硫排放和氮氧化物排放分别为 131 亿吨 CO₂ 当量、741 亿立方米、235 万吨和 307 万吨^[56, 100, 101]，由此可计算园区设施存量的环境影响在全国总量中的占比。温室气体核算包含 CO₂、CH₄、和 N₂O 三种主要温室气体，按 100 年全球变暖潜势折算为 CO₂ 当量^[49]。

$$GHGEmi^{2014} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times GHGFac(Fuel_{ij})) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} WaterCon^{2014} = & \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (EO_{ij} / (1 - SelfUseRate_i)) \\ & \times WatFacEle(CoolTech_{ij}, Fuel_{ij}, Cap_{ij}) \\ & + HO_{ij} \times WatFacHeat(Prov_i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$SO2Emi^{2014} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times SO2Fac(Fuel_{ij})) \quad (3)$$

$$NOxEmi^{2014} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times NOxFac(Fuel_{ij})) \quad (4)$$

附表 2-1 园区能源基础设施温室气体减排技术与适配机组

减排情景	减排技术	适配机组				附加要求	详细描述	
		燃料转换	机组容量	能源输出	汽轮机类型			总改造容量
单一技术情景	M1	煤→天然气	≤120 MW	电力	纯凝	36,949 t/h (锅炉)	天然气消费额度	附 2.2.1
	M2	煤→生活垃圾	3~30 MW	热电	抽凝或背压	74,661 t/h (锅炉)	生活垃圾消费额度, 机组投产时间	附 2.2.2
	M3	煤 (不变)	≤200 MW	电力或热电	纯凝或抽凝	98,421 MW (汽轮机)	无	附 2.2.3
	M4		<300 MW		纯凝、抽凝或背压	64,642 MW (机组)	被替代机组低能效, 地理位置邻近	附 2.2.4
	M5	煤→天然气	≤200 MW	电力	纯凝	14,884 MW (机组)	被替代机组地理位置邻近	附 2.2.5
综合情景	M1&M3	煤→天然气	≤120 MW	电力	纯凝	12,552 t/h (锅炉) + 5,919 MW (汽轮机)	天然气消费额度	附 2.2.6
	M2	煤→生活垃圾	3~30 MW	热电	抽凝或背压	25,952 t/h (锅炉)	生活垃圾消费额度, 机组投产时间	
	M2&M3				抽凝	44,269 t/h (锅炉) + 4,634 MW (汽轮机)		
	M3	煤 (不变)	≤200 MW	电力或热电	纯凝或抽凝	61,132 MW (汽轮机)	无	
	M4		<300 MW		纯凝、抽凝或背压	24,180 MW (机组)	被替代机组低能效, 地理位置邻近	
M5	煤→天然气	≤200 MW	电力	纯凝	14,779 MW (机组)	被替代机组地理位置邻近		

基准情景下，无减排技术作用，园区能源基础设施机组将工作至正常退役，在剩余服役年限内其性能保持不变，则设施在其剩余服役期的环境影响（温室气体排放、淡水消耗、二氧化硫排放、氮氧化物排放）可按式 5~8 进行核算。本研究构建的数据库中，所有机组均有单机容量、燃料类型、汽轮机技术类型、冷却技术类型和投产时间数据，但多数机组未能在现存数据源中获取机组层面运行数据，如年利用小时数、厂用电率、能源效率等。因此，将企业层面的运行数据应用于该企业所包含的机组。

$$GHGEmi^{BA} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times RemLife_{ij} \times GHGFac(Fuel_{ij})) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} WaterCon^{BA} = & \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((EO_{ij} / (1 - SelfUseRate_i)) \\ & \times WatFacEle(CoolTech_{ij}, Fuel_{ij}, Cap_{ij})) \\ & + HO_{ij} \times WatFacHeat(Prov_i) \times RemLife_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

$$SO2Emi^{BA} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times RemLife_{ij} \times SO2Fac(Fuel_{ij}, Cap_{ij})) \quad (7)$$

$$NOxEmi^{BA} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times RemLife_{ij} \times NOxFac(Fuel_{ij}, Cap_{ij})) \quad (8)$$

本节对各减排情景的直接环境效益进行核算，包括单一技术情景（M1~M5）和综合情景。将 5 项温室气体减排主要技术与园区能源基础设施机组进行匹配时，需逐一考虑机组属性，包括单机容量、燃料类型、技术类型、能源效率、投产时间、地理位置等。此外，各减排情景还需考虑燃料消费额度、地理邻近等外部因素限制。

附 2.2.1 M1 情景：燃煤锅炉改造为燃气锅炉

园区能源基础设施对于煤炭的依赖度很高，燃煤机组占总容量的 87%。天然气是中国的战略性能源，进口比例较高，因此其消费额度应合理优化配置。300 MW 及以上大容量燃煤机组具有较高的能源效率^[89]，且已完成或正在进行超低排放改造，改造后其烟尘、二氧化硫和氮氧化物排放标准将提升至燃气机组排放

标准^[90]。此外，燃气发电上网电价高于燃煤发电^[112]，因此机组的电力收益会由于煤改气有所提升。

根据上述分析，在 M1 情景下，将 120 MW 及以下燃煤发电机组的锅炉改造为燃气锅炉，锅炉改造前后保持锅炉蒸汽产出不变。由于机组会随着时间的推移逐渐退役，2015 年完成改造后达到新增天然气需求峰值，之后此需求增量逐年下降。按“机组天然气需求=机组原燃煤量×原燃煤锅炉效率÷改造后的燃气锅炉效率”进行计算，可以得出 M1 情景的新增天然气消费需求至多为每年 114 亿立方米，锅炉效率等具体参数见附表 9。中国电力和热力生产所用天然气从 2010 年的 211 亿立方米增长至 2015 年的 374 亿立方米，增幅为 163 亿立方米^[54,113]。新增天然气需求未超过 2010~2015 年的增幅，考虑 M1 作用时间为 2015~2030 年（M1 适配机组的平均剩余服役年限为 15 年），此新增量较为合理。

此外，考虑到碳-水-污染物三者的技术关联，机组改造后其发电耗水量和大气污染物排放也会发生相应变化。因此，M1 技术的直接环境效益可按式 9~12 进行量化。式中，“PC”表示汽轮机为纯凝式，即该机组为纯发电机组。

$$GHGMit_D^{M1} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (GHGEmi_{ij}^{BA} \times (1 - \frac{BE_{ij}}{BE^{NG}} \times \frac{GHGFac(NG)}{GHGFac(Coal)}) \Big|_{Fuel_{ij}=Coal \text{ and } Cap_{ij} \leq 120 \text{ MW and } TurTech_{ij}=PC} \quad (9)$$

$$WatSave_D^{M1} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (EO_{ij} / (1 - SelfUseRate_{ij}) \times RemLife_{ij} \times (WatFacEle(CoolTech_{ij}, Coal, Cap_{ij}) - WatFacEle(CoolTech_{ij}, NG)) \Big|_{Fuel_{ij}=Coal \text{ and } Cap_{ij} \leq 120 \text{ MW and } TurTech_{ij}=PC} \quad (10)$$

$$SO2Red_D^{M1} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (SO2Emi_{ij}^{BA} - (EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times RemLife_{ij} \times \frac{BE_{ij}}{BE^{NG}} \times SO2Fac(NG)) \Big|_{Fuel_{ij}=Coal \text{ and } Cap_{ij} \leq 120 \text{ MW and } TurTech_{ij}=PC} \quad (11)$$

$$NOxRed_D^{M1} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (NOxEmi_{ij}^{BA} - (EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times RemLife_{ij} \times \frac{BE_{ij}}{BE^{NG}} \times NOxFac(NG)) \Big|_{Fuel_{ij}=Coal \text{ and } Cap_{ij} \leq 120 \text{ MW and } TurTech_{ij}=PC} \quad (12)$$

附 2.2.2 M2 情景：垃圾焚烧炉替代燃煤锅炉

目前，中国生活垃圾多采用填埋处理，占用土地资源且污染严重^[114]。中国《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》中，要求推广垃圾焚烧处理方式^[115]。生活垃圾焚烧在工业园区已得到广泛实践，园区垃圾焚烧设施总容量为 2.4 GW，占全国垃圾焚烧设施总容量的 55%^[116]。

在M2情景下，以垃圾焚烧炉替代部分燃煤机组的锅炉。前期研究表明，垃圾焚烧设施的单机容量通常在3~30 MW范围内，且热电联产可以使设施获得更好的环境绩效^[116]。此外，根据相关设计导则，垃圾焚烧设施的服役年限至少为20年^[117]。2014年中国垃圾焚烧设施的装机总容量为4.3 GW，2020年国家预期目标为7.5 GW^[64]。根据上述年均增长率，垃圾焚烧总容量在2030年有望达到18.9 GW。假设未来一段时期，垃圾焚烧设施位于园区的比例保持在50%，则到2030年园区垃圾焚烧设施可达到9.4 GW，园区垃圾焚烧设施在2014~2030年间增量为7 GW，将其设置为M2情景下的燃煤锅炉替代总量。

因此，M2技术的适配机组筛选步骤如下：（1）3~30 MW的燃煤热电机组，剩余服役年限至少为20年；（2）根据式13计算步骤（1）筛选出机组的温室气体减排潜力，进而计算单位容量的减排潜力（吨CO₂当量/千瓦），将机组按此指标从大到小进行排列；（3）将步骤（2）确定的排列清单中位于优先位置的机组进行容量加总，使其总容量达到7 GW，此部分机组即为M2的适配机组，将其燃煤锅炉以新建垃圾焚烧炉进行替代。M2技术的直接环境影响核算见式13~16，其中生活垃圾焚烧时通常需掺烧一定比例的煤，其掺烧比（*MixRate*）取值见附表10。

$$GHGMit_D^{M2} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (GHGEmi_{ij}^{BA} \times (1 - \frac{BE_{ij}}{BE^{MSW}}) \times \frac{(1-MixRate) \times GHGFac(MSW) + MixRate \times GHGFac(Coal)}{GHGFac(Coal)}) \Big|_{M2\ client} \quad (13)$$

$$WatSav_D^{M2} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (EO_{ij} / (1 - SelfUseRate_{ij}) \times RemLife_{ij} \times (WatFacEle(CoolTech_{ij}, Coal, Cap_{ij}) - WatFacEle(CoolTech_{ij}, MSW))) \Big|_{M2\ client} \quad (14)$$

$$SO2Red_D^{M2} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (SO2Emi_{ij}^{BS} - (EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times RemLife_{ij} \times \frac{BE_{ij}}{BE^{MSW}} \times SO2Fac(MSW)) \Big|_{M2\ client} \quad (15)$$

$$NOxRed_D^{M2} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (NOxEmi_{ij}^{BS} - (EO_{ij} + HO_{ij}) \div EE_i^{BA} \times RemLife_{ij} \times \frac{BE_{ij}}{BE^{MSW}} \times NOxFac(NG)) \Big|_{M2\ client} \quad (16)$$

附 2.2.3 M3 情景：抽凝/纯凝汽轮机升级为背压汽轮机

M3 技术是热电技术的升级，将抽凝式机组和纯凝式机组的汽轮机升级为背压式。《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014-2020 年）》要求，200 MW 及以下抽凝式机组和纯凝式机组优先改造为背压式机组^[89]。背压机组将供热作为第一优先级，锅炉蒸汽与外供蒸汽之间的能量差用于发电^[94]，即背压机组为严格

意义上的“以热定电”。同时，背压机组的有效供电效率高于抽凝和纯凝机组^[94]。根据园区设施技术结构统计数据，抽凝机组和纯凝机组分别占园区能源基础设施总容量的 48% 和 41%，而背压机组仅占 1.4%。基于数据库中机组技术指标统计，背压机组有效供电效率的平均水平相比 200 MW 及以下抽凝机组和纯凝机组的平均效率，效率值分别高出 12.4% 和 19.2%，将其设置为 M3 技术的效率提升值 (ΔEEE)。由此，M3 技术的直接环境影响可以通过式 17~20 计算得出。式中，“EC”代表抽凝机组，“PC”代表纯凝机组。

$$GHGMit_D^{M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (GHGEmi_{ij}^{BA} \times (1-EE_{ij} \div \frac{1+(H/E)_i}{1/(EEE_{ij}+\Delta EEE_{ij})+(H/E)_i/BE_{ij}})) |_{(TurTech_{ij}=EC \text{ or } PC) \text{ and } Cap_{ij} \leq 200MW} \quad (17)$$

$$WatSav_D^{M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (EO_{ij}/(1-SelfUseRate_i) \times RemLife_{ij} \times (WatFacEle(CoolTech_{ij}, Fuel_{ij}, Cap_{ij}) - WatFacEle(CoolTech^{M3}, Fuel_{ij}, Cap_{ij}))) |_{(TurTech_{ij}=EC \text{ or } PC) \text{ and } Cap_{ij} \leq 200MW} \quad (18)$$

$$SO2Red_D^{M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (SO2Emi_{ij}^{BA} \times (1-EE_{ij} \div \frac{1+(H/E)_i}{1/(EEE_{ij}+\Delta EEE_{ij})+(H/E)_i/BE_{ij}})) |_{(TurTech_{ij}=EC \text{ or } PC) \text{ and } Cap_{ij} \leq 200MW} \quad (19)$$

$$NOxRed_D^{M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (NOxEmit_{ij}^{BA} \times (1-EE_{ij} \div \frac{1+(H/E)_i}{1/(EEE_{ij}+\Delta EEE_{ij})+(H/E)_i/BE_{ij}})) |_{(TurTech_{ij}=EC \text{ or } PC) \text{ and } Cap_{ij} \leq 200MW} \quad (20)$$

附 2.2.4 M4 情景：大容量燃煤机组替代小容量燃煤机组

园区能源基础设施具有“小容量机组数量多”的特点，300 MW 以下机组占总数量的 81%。根据相关能源政策，要求淘汰小容量燃煤机组，采用 300 MW 及以上燃煤机组替代^[96]。一些园区已经实施了“上大压小”措施，但仍有相当多园区有待改造。

从技术可行性和成本有效性角度考虑，M4 技术的适配机组通过以下准则进行筛选：（1）300 MW 以下燃煤机组，且有效供电效率低于 40.3%（全国 300 MW 级燃煤机组平均供电效率^[92]），即被替代机组能效低于新建机组；（2）考虑地理邻近性，同一园区内符合准则（1）的机组总容量至少为 180 MW 方能进行替代（国家相关导则要求，关停小机组容量至少为新建大机组容量的 60%^[96]）。因此，对于单一园区 M4 适配机组的替代大容量机组，其建设规模符合以下函数关系 $\{\min x \text{ MW} \mid x \geq \text{被替代机组总容量}, x \in \{300, 330, 350, 600, 630, 660, 1000, \text{及其线性组合}\}\}$ 。新建大容量机组的有效供电效率 (EEE^{M4}) 按机组容量等级进行取

值（见附表 7），锅炉效率保持与被替代机组相同。新建机组服役年限为 30 年^[95]，其能源产出与被替代机组的总能源产出相同。因此，M4 的直接环境效益可通过式 21~24 进行计算。

$$GHGMit_D^{M4} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (GHGEmi_{ij}^{BA} \times \frac{30}{RemLife_{ij}} \times (1 - EE_{ij} \div \frac{1+(H/E)_i}{1/EEE_{ij}^{M4}+(H/E)_i/BE_{ij}})) |_{M4\ client} \quad (21)$$

$$WatSav_D^{M4} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (EO_{ij} (1 - SelfUseRate_i) \times 30 \times (WatFacEle(CoolTech_{ij}, Coal, Cap_{ij})) - WatFacEle(CoolTech_{ij}, Coal, Cap_{ij}^{M4})) |_{M4\ client} \quad (22)$$

$$SO2Red_D^{M4} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((SO2Emi_{ij}^{BA} \div RemLife_{ij} - (EO_{ij} + HO_{ij})) \div \frac{1+(H/E)_i}{1/EEE_{ij}^{M4}+(H/E)_i/BE_{ij}} \times SO2Fac(Coal, Cap_{ij}^{M4})) \times 30 |_{M4\ client} \quad (23)$$

$$NOxRed_D^{M4} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((NOxEmi_{ij}^{BA} \div RemLife_{ij} - (EO_{ij} + HO_{ij})) \div \frac{1+(H/E)_i}{1/EEE_{ij}^{M4}+(H/E)_i/BE_{ij}} \times NOxFac(Coal, Cap_{ij}^{M4})) \times 30 |_{M4\ client} \quad (24)$$

附 2.2.5 M5 情景：大容量天然气联合循环机组替代小容量燃煤机组

在 M5 情景下，小容量燃煤机组被大容量天然气联合循环机组替代。与 M4 技术类似，从技术可行性和成本有效性角度考虑，M5 技术的适配机组通过以下准则进行识别：（1）200 MW 及以下的燃煤发电机组；（2）考虑地理邻近性，同一园区内符合准则（1）的机组总容量至少为 108 MW 方能进行替代（国家相关导则要求，关停小机组容量至少为新建大机组容量的 60%^[96]）。因此，对于单一园区 M5 适配机组的替代大容量天然气联合循环机组，其建设规模符合以下函数关系 {min x MW | x ≥ 被替代机组总容量, x ∈ {180, 300, 及其线性组合}}。新建的天然气联合循环机组能源产出与被替代机组的总能源产出相等，服役周期为 30 年^[95]，其有效供电效率（ EEE^{M5} ）为 48.1%（本研究数据库中天然气联合循环机组的平均有效供电效率，见附表 8）。由于新建发电机组的热电比为 0，因此其能源效率 $EE^{M5} = EEE^{M5}$ 。按“机组天然气需求 = 机组原燃煤量 × 原燃煤机组能源效率 - 新建机组能源效率”进行计算，可以得出 M5 情景的新增天然气消费需求为每年 126 亿立方米，根据 M1 情景中的讨论分析，这一消费需求较为合理。M5 技术的直接环境效益可以通过式 25~28 进行计算。

$$GHGMit_D^{M5} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (GHGEmi_{ij}^{BA} \times \frac{30}{RemLife_{ij}} \times (1 - EE_{ij} \div EE^{M5})) |_{M5\ client} \quad (25)$$

$$WatSav_D^{M5} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (EO_{ij} / (1 - SelfUseRate_i)) \times 30$$

$$\times (WatFacEle(CoolTech_{ij}, Coal, Cap_{ij}) - WatFacEle(CoolTech_{ij}, NG)) \Big|_{M5\ client} \quad (26)$$

$$SO2Red_D^{M5} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((SO2Emi_{ij}^{BA} \div RemLife_{ij} - EO_{ij} \div EE^{M5}$$

$$\times SO2Fac(NG)) \times 30) \Big|_{M5\ client}$$

(27)

$$NOxRed_D^{M5} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} ((NOxEmi_{ij}^{BA} \div RemLife_{ij} - EO_{ij} \div EE^{M5}$$

$$\times NOxFac(NG)) \times 30) \Big|_{M5\ client} \quad (28)$$

附 2.2.6 综合情景：M1~M5 技术的耦合

综合情景下，M1~M5技术均投入实施。能源基础设施机组主要由锅炉和汽轮机组组成，M1和M2是锅炉改造或替代技术，M3是汽轮机改造技术，M4和M5是机组的整体替代。从技术可行性角度考虑，M1或M2可以与M3进行耦合实施，将此耦合技术称之为“M1&M3”或“M2&M3”。M1&M3技术表示将适配燃煤机组的锅炉改造为燃气锅炉，同时将其汽轮机改造为背压式汽轮机，由此得出M1&M3技术的直接环境影响核算方法，见式29~32。

$$GHGMit_D^{M1\&M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (GHGEmi_{ij}^{BA} - EO_{ij} \times RemLife_{ij} \div (\frac{BE^{NG}}{BE_{ij}}$$

$$\times (EEE_{ij} + \Delta EEE_{ij})) \times GHGFac(NG)) \Big|_{Fuel_{ij}=Coal\ and\ Cap_{ij} \leq 120\ MW\ and\ TurTech_{ij}=PC}$$

(29)

$$WatSav_D^{M1\&M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (EO_{ij} / (1 - SelfUseRate_i)) \times RemLife_{ij}$$

$$\times (WatFacEle(CoolTech_{ij}, Coal, Cap_{ij})$$

$$- WatFacEle(CoolTech_{ij}^{M1\&M3}, NG)) \Big|_{Fuel_{ij}=Coal\ and\ Cap_{ij} \leq 120\ MW\ and\ TurTech_{ij}=PC}$$

(30)

$$SO2Red_D^{M1\&M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (SO2Emi_{ij}^{BA} - EO_{ij} \times RemLife_{ij} \div (\frac{BE^{NG}}{BE_{ij}} \times (EEE_{ij} + \Delta EEE_{ij})))$$

$$\times SO2Fac(NG)) \Big|_{Fuel_{ij}=Coal\ and\ Cap_{ij} \leq 120\ MW\ and\ TurTech_{ij}=PC}$$

(31)

$$NOxRed_D^{M1\&M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (NOxEmi_{ij}^{BA} - EO_{ij} \times RemLife_{ij} \div (\frac{BE^{NG}}{BE_{ij}} \times (EEE_{ij} + \Delta EEE_{ij})))$$

$$\times NOxFac(NG)) \Big|_{Fuel_{ij}=Coal\ and\ Cap_{ij} \leq 120\ MW\ and\ TurTech_{ij}=PC}$$

(32)

M2&M3 技术表示将适配燃煤机组的锅炉以垃圾焚烧炉替代，同时将其汽轮机改造为背压式汽轮机，则 M2&M3 技术的直接环境影响核算如式 33~36 所示。

$$GHGMit_D^{M2\&M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (GHGEmi_{ij}^{BA} - (EO_{ij} + HO_{ij}) \times RemLife_{ij})$$

$$\div \frac{1+(H/E)_i}{1/(\frac{BE^{MSW}}{BE_{ij}} \times (EEE_{ij} + \Delta EEE_{ij})) + (H/E)_i / BE^{MSW}} \times ((1-MixRate) \times GHGFac(MSW)$$

$$+ MixRate \times GHGFac(Coal)) \Big|_{M2\ client\ and\ TurTech_{ij}=EC} \quad (33)$$

$$WatSav_D^{M2\&M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (EO_{ij} / (1-SelfUseRate_i) \times RemLife_{ij})$$

$$\times (WatFacEle(CoolTech_{ij}, Coal, Cap_{ij}))$$

$$- WatFacEle(CoolTech_{ij}^{M2\&M3}, MSW) \Big|_{M2\ client\ and\ TurTech_{ij}=EC} \quad (34)$$

$$SO2Red_D^{M2\&M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (SO2Emi_{ij}^{BA} - (EO_{ij} + HO_{ij}) \times RemLife_{ij})$$

$$\div \frac{1+(H/E)_i}{1/(\frac{BE^{MSW}}{BE_{ij}} \times (EEE_{ij} + \Delta EEE_{ij})) + (H/E)_i / BE^{MSW}}$$

$$\times SO2Fac(MSW) \Big|_{M2\ client\ and\ TurTech_{ij}=EC} \quad (35)$$

$$NOxRed_D^{M2\&M3} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} (NOxEmi_{ij}^{BA} - (EO_{ij} + HO_{ij}) \times RemLife_{ij})$$

$$\div \frac{1+(H/E)_i}{1/(\frac{BE^{MSW}}{BE_{ij}} \times (EEE_{ij} + \Delta EEE_{ij})) + (H/E)_i / BE^{MSW}}$$

$$\times NOxFac(MSW) \Big|_{M2\ client\ and\ TurTech_{ij}=EC} \quad (36)$$

基于上述分析，在综合情景下，对于园区能源基础设施的每个机组，选择使其取得最大温室气体减排潜力的适配减排技术进行实施，则综合情景下的直接环境效益可按照式 37~40 进行计算。其中，若某个机组无任何适配技术，则其温室气体减排潜力和其他环境效益均为 0。

$$GHGMit_D^{IN} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} Max(GHGMit_{D,ij}^X \mid X=M1-M5, M1\&M3, M2\&M3) \quad (37)$$

$$WatSav_D^{IN} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} WatSav_{D,ij}^X \quad (38)$$

$$SO2Red_D^{IN} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} SO2Red_{D,ij}^X \quad (39)$$

$$NOxRed_D^{IN} = \sum_{i=1}^{2127} \sum_{j=1}^{Num_i} NOxRed_{D,ij}^X \quad (40)$$

附 2.3 能源基础设施温室气体减排成本效益分析

根据各减排情景（包括单一技术情景和综合情景）的机组存量改造情况进行综合考虑，温室气体减排成本效益分析主要涉及四项指标变化： Δ 设备建造成本、 Δ 燃料成本、 Δ 电力收益和 Δ 热力收益。其中， Δ 表示减排情景和基准情景的差值。由此，温室气体减排净成本可量化为式 41。

$$\begin{aligned} \text{减排成本} = & \sum (\text{改造或新建容量} \times \text{单位成本}) + \sum (\Delta \text{燃料输入} \times \text{燃料价格}) \\ & + \sum (\Delta \text{电力输出} \times \text{电力价格}) + \sum (\Delta \text{热力输出} \times \text{热力价格}) \end{aligned} \quad (41)$$

各减排情景的能源产出与基准情景相同，但由于机组经各项减排技术改造或替代后能源效率发生变化，以及部分减排技术涉及燃料替代，因此分品种燃料消耗量和分品种燃料发电量均会发生变化。具体而言，各减排情景涉及机组改造或新建、天然气替代煤炭、生活垃圾替代煤炭、能效提升节约煤炭、燃煤发电量减少、燃气发电量和生活垃圾焚烧发电量增加等变化。

基于情景设置，煤改气相关技术（M1 和 M5）仅替代纯发电机组；垃圾焚烧替代燃煤相关技术（M2）虽替代热发电机组，但垃圾供热与燃煤供热相比价格不变。因此，各减排情景下园区设施基于不同燃料类型的热力输出结构和数量均未改变，故 Δ 热力收益=0。因此，只需计算 Δ 设备建造成本、 Δ 燃料成本、 Δ 电力收益三项，下面依次进行说明：

（1）设备建造的单位成本根据各类机组的价格参考手册或具体工程案例得到，设备建造单位成本与机组改造容量或新建容量相乘，即为减排技术实施后与实施前相比的 Δ 设备建造成本。设备建造成本包括建筑工程费用、设备购置费用、安装工程费用和其他费用（如建设场地占用及清理费）。

（2）基于各减排情景下的煤炭消耗削减量、天然气消耗增加量、生活垃圾消耗增加量，与煤炭价格、天然气价格、生活垃圾处理补贴分别相乘，可得到 Δ 燃料成本。其中，地方政府对垃圾处理的财政补贴非常普遍，因此将政府补贴计入生活垃圾替代燃煤的成本效益分析。

（3）根据燃煤发电减少量、燃气发电增加量和生活垃圾焚烧发电增加量，与燃煤、燃气、垃圾焚烧的上网电价分别相乘，可得到各减排情景相对于基准情景的 Δ 电力收益。

设备建造价格、燃料价格、上网电价相关的各项价格指数在机组剩余服役时间内会有波动。通过参考相关研究的处理方法^[118]，本研究假设机组剩余服役期

限内,各年设备建造价格、燃料价格、上网电价的现值通货膨胀率与折现率相等,则各年的现值加总时通胀率与折现率相互抵消,因此按式 2-4 计算出的机组剩余服役时间内减排成本为 2015 年可比价格。各减排情景的单位减排成本为该情景下总减排成本与直接温室气体减排量的比值。

总的来说,根据改造机组容量、新建机组容量、分品种燃料输入变化和分品种电力产出变化,乘上各自相对应的成本/价格因子,即可按式 2-4 计算 Δ 设备建造成本、 Δ 燃料成本和 Δ 电力收益。各减排情景下的设备建造成本、燃料成本和电力收益相关具体指标分别在附表 11~13 列出。

附 2.4 生命周期环境效益

进一步,基于生命周期视角,考虑能源、水、材料上游生产过程的环境影响,核算各减排情景的间接环境影响,进而得出能源基础设施减排技术途径全生命周期的环境影响,见附图 2-3。

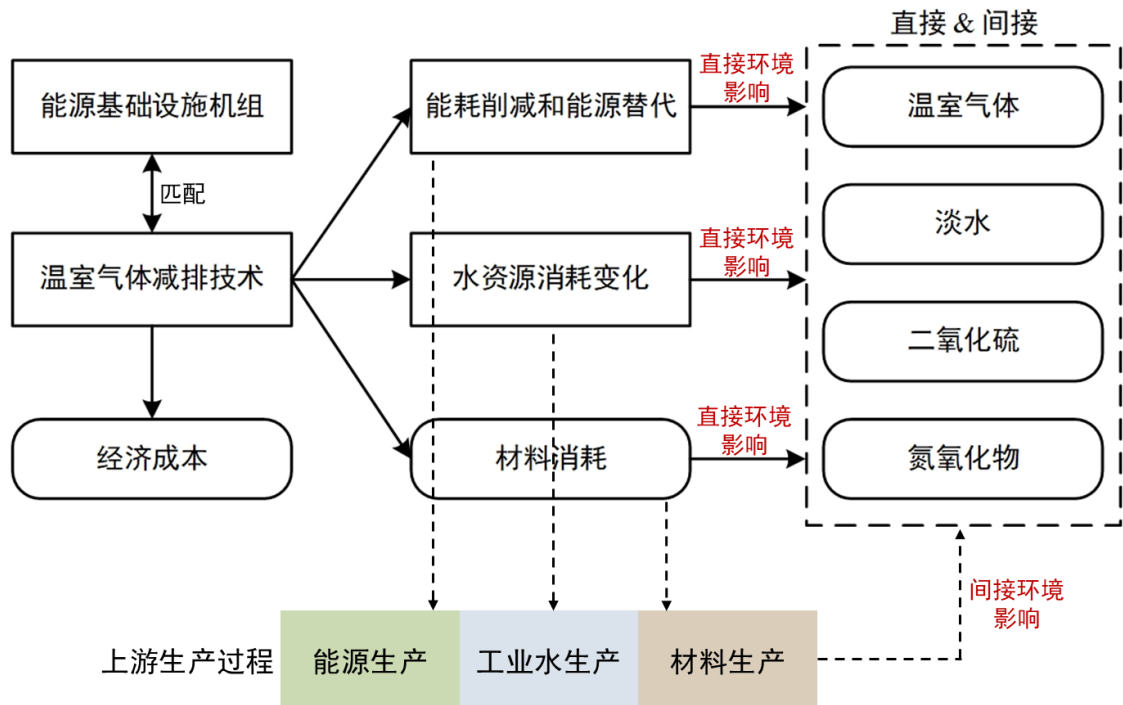


图 2-3 基于生命周期视角的能源-水-材料耦合关系

园区在役能源基础设施数量、结构、特征各异,需要与不同的减排技术进行最适匹配,根据减排技术特点,或需要机组进行改造,或需要新建机组。由此,使得锅炉类型、汽轮机类型和冷却技术类型发生改变,从而导致淡水消耗和大气污染物排放发生变化。因此,上述碳-水-排放的耦合关系需纳入模型考量。同时,

基于生命周期视角，减排技术不仅带来温室气体排放、耗水量、材料消耗等方面环境影响的直接变化，还将通过削减或增加燃料需求、用水需求和材料需求等方式，避免或增加的燃料、水、材料上游生产过程环境影响，此部分为间接环境影响的变化。

附 3 园区能源-环境基础设施共生驱动的温室气体减排模型

附 3.1 园区能-水基础设施耦合概念模型

“能—水”统筹，是工业园区综合能源管理创新战略、打好污染防治攻坚战的重要抓手，充分发挥园区能源基础设施优势，构建能源-环境基础设施共生，实现能-水统筹，实现节能节水共赢。工业园区进驻企业多，工业企业用水量大、废水产生量大、污染物浓度高、成份复杂且冲击负荷高、可生化性差，导致园区污水处理技术难度大、管理要求高。许多园区所在区域及流域水环境质量差、水生态受损重、水环境隐患多，园区绿色发展面临水资源约束、水资源节约集约利用、水污染防治等诸多挑战和风险。因此需要创新园区水污染防治模式，应用生命周期管理的理念，全面考虑水污染防治各环节，强化源头控制和系统治理，设计一体化解决方案，推动园区水资源精细化管理，提高水资源利用率，强化水污染防治，并减少能源和水的消耗。

生命周期思考是园区能—水统筹、水污染防治创新实践的核心。基于生命周期思考，构建“供（取）水——用水——废水处理——排放——废水再生回用——污水处理产生的有机废气治理——污泥处理处置及资源化”等水污染防治关键环节，全过程园区水污染防治体系相关的关键环节组成的，全生命周期园区水污染防治创新实践体系，实现园区能—水生命周期不同阶段的全过程管理，防范水风险，改善水环境质量。

同时，需要充分运用园区基础设施集中的优势，统筹“能—水”资源一体化，构建能源—环境基础设施共生体系。热电厂和污水处理厂（WWTP）分别作为工业园区中的能源基础设施和环境基础设施，肩负着为整个园区的生产提供能源和末端治理的重任。热电厂作为园区主要供能者的同时，也是取水和排污大户。WWTP 是园区水污染防治的“最后一道闸门”，同时也是非常规水资源（二级处理出水）和固体废物（污泥）的排放大户。WWTP 的二级处理出水通常直接排放至就近水体，即使出水水质已经近似水体水质，仍然会对周边水环境造成影响；而合理的污泥处理处置方式仍然是亟待解决的环境问题之一。

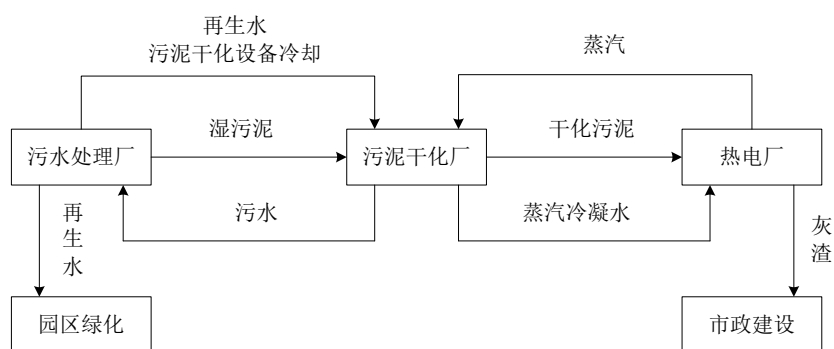
为提高工业园区资源能源利用效率、减少污染物排放、降低对周边环境的影响，可将 WWTP 的二级处理出水经深度处理制成再生水后，供给电厂作为冷却水使用。WWTP 产生的污泥富含生物质能，经干化后可送至热电厂进行焚烧，在替代部分燃煤的同时，也解决了污泥处置难的问题。同时充分利用热电厂等园区能源基础设施，为整个 WWTP 的运行提供电能、热能，将污泥干化后送至毗邻热电（力）厂处理，构建污水处理厂—热电（力）厂—污泥干化焚烧“三位一体”的产业共生体系，不但能有效利用热电厂的余热，减少污泥干化过程热值损失、降低污泥干化成本，在污泥减量化的同时回收热能；还能利用污水厂深度处理出水作为热电厂冷却水，降低热电厂水耗。

可见，在园区内统筹“能—水”资源一体化，构建热电厂和 WWTP 之间的共生体系，有助于提高园区整体资源能源利用效率，同时减少污染物及温室气体的排放。从基础设施视角来看，存在“电厂-污水处理厂共生”；从物质流动视角来看，存在着“能—水”共生耦合。

代表性案例：苏州工业园区——构建循环型基础设施共生体系

苏州工业园区针对园区污泥产生量大、污泥干化能耗高、污泥有机质高、热值高等情况，将区内第二污水处理厂污水处理过程中产生的湿污泥（含水率 80%）送至污泥干化厂进行干化。为实现热电厂的余热利用，污泥干化厂的二段干化设备利用热电厂的余热蒸汽间接换热，将含水率 80% 的湿污泥干化至含水率 10~20% 的干污泥。由于污泥中有机质较高，干化后污泥热值约 2600~2800 大卡，可作为低热值燃料进行循环利用。为此，污泥干化厂通过输送带将其送至热电厂的干燥棚内，与热值 5500 大卡的优质煤以 30% 左右的比例掺和燃烧，充分回收利用干化污泥中的热值。干污泥和优质煤燃烧产生的热量除发电外，余热蒸汽再次被用于污泥干化和区域内集中供热和制冷；干化污泥产生的 90~100 度的蒸汽冷凝水，全部送回热电厂循环利用回收热能。

园区以污水处理厂、污泥干化厂、热电联产基础设施为核心，与月亮湾社区构建了冷热电三联供的能源供应新模式，取代了传统能源供应模式，实现了能源的梯级化、集约化利用。该产业共生模式每年可节能 1.37 万吨标煤，且污泥焚烧后的灰渣用作建筑材料资源化利用。



附3.2 基础设施能水共生耦合模型架构与参数取值

基于园区基础设施共生关系，构建能源基础设施和集中式污水处理厂耦合的工业园区能源-水耦合模型，出于可行性考虑，首先从水量上评估 WWTP 二级处理出水作为电厂取水水源的可能性。为简化分析，做出以下基本假设：

(1) 将每个国家级经开区作为一个独立的系统，其基础设施间的物质能量交换仅发生在园区内部；

(2) 园区内集中式污水处理厂（WWTP）达到一级 A 排放标准的出水经必要的处理后可用作电厂的取水水源；

(3) 假设某园区有 m 个 WWTP 和 n 个电厂，则每个 WWTP 出水均有供给任何一个电厂的可能性；

(4) 园区集中式污水处理厂实际出水向能源基础设施供水分配，遵循总成本最小的原则，即 $\min c = \sum V_i \times D_i$ ，其中 V, D 分别为 WWTP 出水分配量和能源基础设施与 WWTP 之间的距离。

按照总成本最小的原则，园区实际参与构建能源基础设施-集中式污水处理厂产业共生关系的 WWTP 和电厂数量分别为 m' 和 n' 个。则电厂总去水量、发电用水量、供热用水量等关键用水指标计算如下：

电厂总取水量 = 发电取水量 + 供热取水量

发电用水量 = 发电取水因子 \times 发电量

供热用水量 = 供热取水因子 \times 供热量

园区电厂取水量替代率：园区所有 WWTP 实际处理水量占园区所有电厂总取水量百分比，其中供电取水系数参考附表 3-1，供热取水系数取 $1.1718 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 。

园区集中式污水处理厂 WWTP 的出水优化分配至同园区能源基础设施（电厂、热电联产、热力厂等）。其中“平均运输距离”为电厂和 WWTP 之间的直线距离，“可与电厂建立共生的 WWTP 数量”和“可与 WWTP 建立共生的电厂数量”是按照一个园区内“总成本最小”原则而得出的可能参与共生体系构建的集中式污水处理厂和能源基础设施的理论最大数量。

附表 3-1 不同类型及规模的发电技术相应的取水系数参考值^[119]单位: m³/MWh

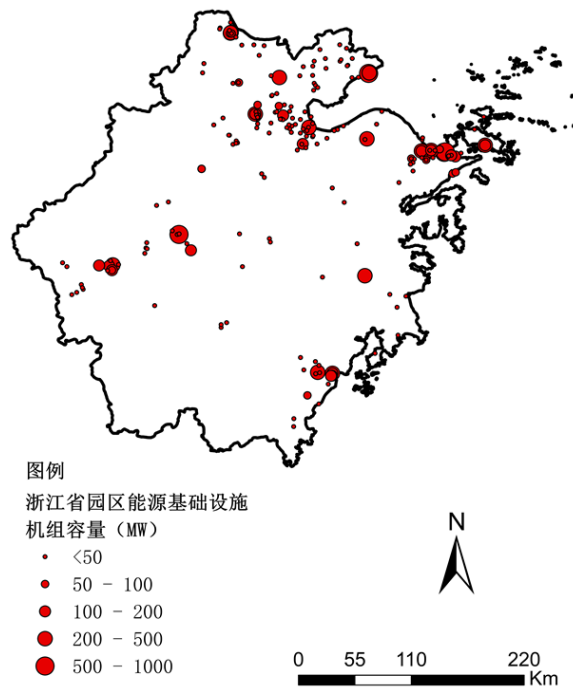
燃料类型	发电技术	冷却方式	平均值	低值	高值
煤	1000 MW	OT 直流冷却	82.8	74.2	88.4
		RC 循环冷却	2.11	2.05	2.17
		dry 风冷	0.31		
	600 MW	OT 直流冷却	100.6	92.8	105.9
		RC 循环冷却	2.061	1.63	2.323
		dry 风冷	0.334	0.211	0.456
	300 MW	OT 直流冷却	103.1	82.9	127.2
		RC 循环冷却	2.37	1.96	2.84
		dry 风冷	0.367	0.252	0.517
	100~250 MW	OT 直流冷却	103.1	82.9	127.2
		RC 循环冷却	2.7	2.11	3.68
		dry 风冷	0.59	0.5	0.68
	<100 MW	OT 直流冷却	103.1	82.9	127.2
		RC 循环冷却	3.09	2.18	4.19
		dry 风冷	1	0.864	1.08
天然气	蒸汽循环	RC 循环冷却	4.54	4.54	4.54
		OT 直流冷却	34.07	27.25	79.5
	联合循环	RC 循环冷却	0.946	0.568	2.84
生物质	蒸汽循环	RC 循环冷却	4.54	3.58	5.35
生活垃圾	蒸汽循环	RC 循环冷却	7.95	6.79	10
废热回收	蒸汽循环	RC 循环冷却	9.61	6.11	12.78

附 4 案例分析——浙江省工业园区能源基础设施升级改造节能潜力

选取长三角地区工业发达省份浙江省作为案例,研究浙江省工业园区能源基础设施情况及碳减排潜力。

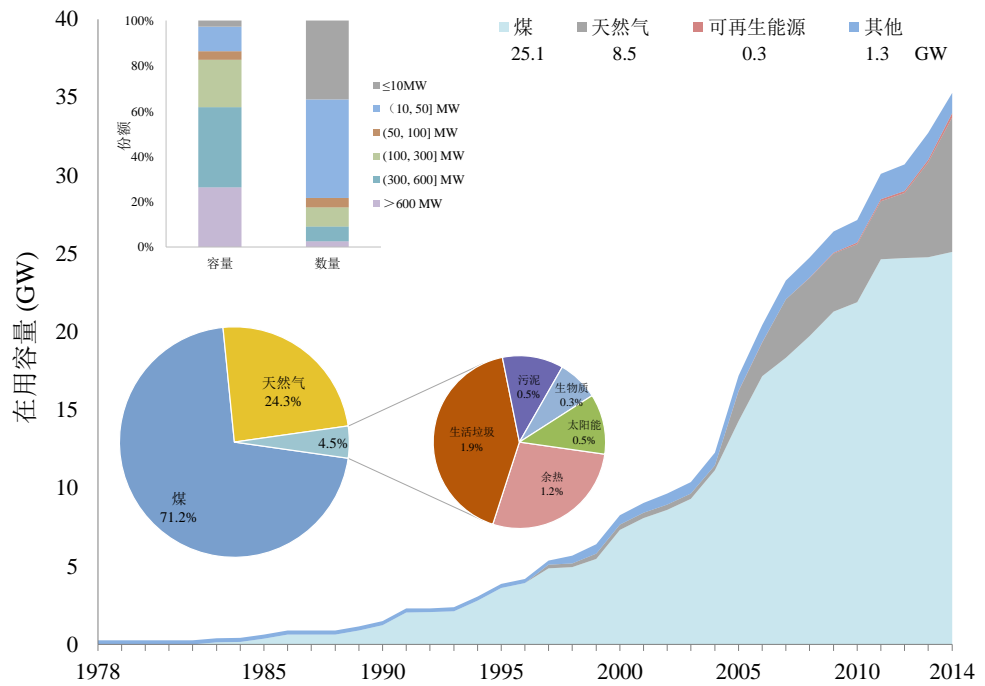
附 4.1 浙江省工业园区能源基础设施存量特征分析

根据国家发改委发布的《中国开发区审核公告目录(2018年版)》,浙江省共有 38 家国家级开发区(含经济技术开发区、高新技术产业园区等)、82 家省级工业园区,共计 120 家。基于本项目构建的数据库,上述园区具有在役能源基础设施机组 474 个,总容量 3529 万千瓦,占浙江省 6000 kW 及以上发电装机总容量的 51%(附图 4-1 和 4-2)。



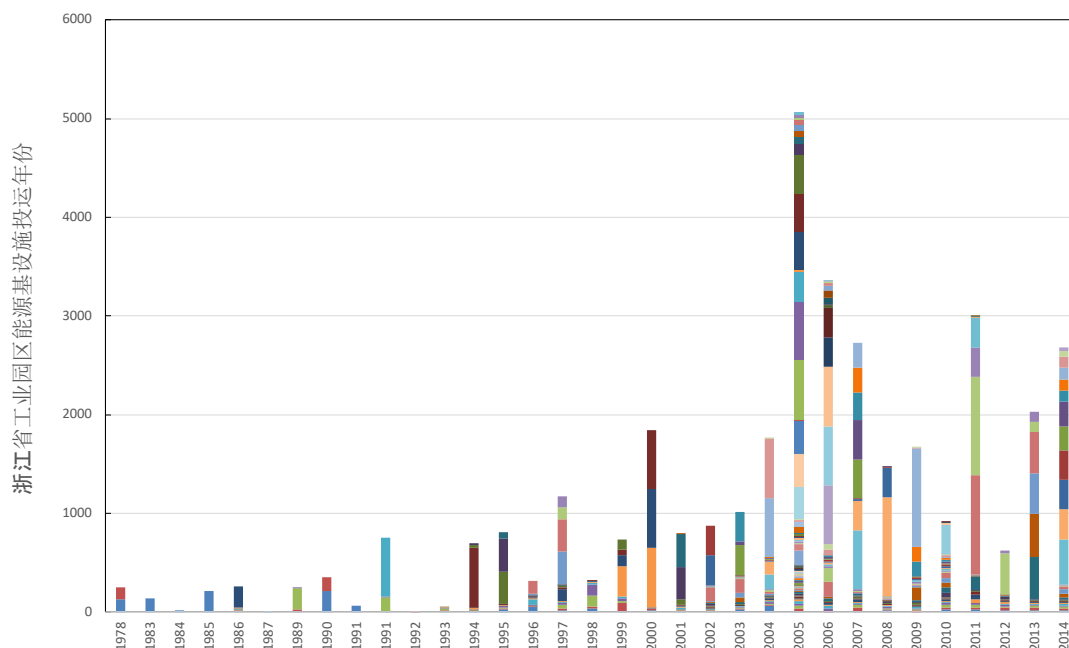
附图 4-1 浙江省工业园区能源基础设施空间分布示意

附图 4-2 统计了 1978-2014 年浙江省园区能源基础设施机组存量演变、燃料结构与容量结构。从投产时间看，浙江省工业园区能源基础设施投产主要集中在 2005 年之后，占全部机组的 49%，园区能源基础设施建设峰值出现在 2005-2007 年，这期间建设的机组数量最多。此外 2011 和 2014 年也有大容量机组在工业园区物理边界内投运。



附图 4-2 浙江省园区能源基础设施机组存量演变、燃料结构与容量结构

从燃料结构来看，园区能源基础设施具有很强的煤炭依赖性，燃煤机组占总容量的 71.2%，其次为天然气，占比 24.3%，其他燃料机组占比为 4.5%，其中生活垃圾焚烧发电占 1.9%，可再生能源机组（包含光伏发电和生物质发电）仅占 0.85%，污泥焚烧占 0.5%。但值得注意的是，设在园区的生活垃圾焚烧设施数量较多，占全省在役能源基础设施数量的 12.2%。



附图 4-3 浙江省园区能源基础设施机组投产时间分布图

（注：图中每一个色块代表一台机组，四块高度与机组成装机容量成正比）

附表 4-1 浙江省园区能源基础设施机组燃料结构

燃料类型	机组容量 (MW)	容量占比 (%)	机组数量 (台)	数量占比 (%)
煤	25115.3	71.2	306	64.6
天然气	8589.4	24.3	46	9.7
余热	439	1.2	27	5.7
生活垃圾	661.5	1.9	58	12.2
污泥	181	0.5	11	2.3
生物质	121.5	0.3	10	2.1
太阳能	178.3	0.5	16	3.4
总计	35286.1	100	474	100

从机组规模结构来看，浙江省省级及以上工业园区在役能源基础设施呈现“大容量机组少，小容量机组多”的特点，50 MW 及以下机组占总数量的 78.3%，

装机容量占在役能源基础设施总容量的 13.5%。50-300 MW 及以下机组数量占了 12.7%，装机容量占 24.6%；300MW 以上机组数量仅占 9.1%，但装机容量占 61.8%。

进一步，根据机组投运时间、燃料、容量等属性提出优先改造短名单，明确可以纳入优先退役或改造的园区及其机组清单。

附表 4-2 浙江省园区能源基础设施机组容量结构

容量等级	机组容量 (MW)	容量占比 (%)	机组数量 (台)	数量占比 (%)
>600 MW	9280	26.3	12	2.5
(300, 600] MW	12542.2	35.5	31	6.5
(100, 300] MW	7367.2	20.9	40	8.4
(50, 100] MW	1323.7	3.8	20	4.2
(10, 50] MW	3830	10.9	206	43.5
≤10MW	943	2.7	165	34.8
总计	35286.1	100	474	100

总体来看，浙江省工业园区能源基础设施具有小容量燃煤机组多的特点，能源效率相对较低，具有一定的节能改造提升空间。基于地理位置信息，对于邻近的小容量燃煤机组群，可考虑采用大容量高性能机组进行替代，同时对替代机组群的总容量设置一定的准入门槛，以兼顾技术经济性。进一步将对园区存量机组的节能潜力及成本效益进行研究。

附 4.2 浙江省工业园区能源基础设施改造节能及碳减排潜力

从全省层面来看，浙江省省级及以上开发区在役的能源基础设施中，小机组数量占了很大比例，小机组通常能效较低，有较大的能效提升空间。2014 年浙江省省级及以上开发区在役 50 MW 及以下火力机组数量 338 台，容量为 4559 万千瓦，数量和容量分别占浙江省省级及以上开发区在役能源基础设施的 71.3% 和 12.9%。

基于识别出的园区存量能源基础设施清单数据，可对其中地理邻近的小容量燃煤机组进行替代。对园区现役机组，综合考虑其技术参数，确定进入短名单机组的优先筛选原则为：以煤为燃料，单机容量 50MW 及以下，或服役时间超过 15 年（2003 年（含）之前投入使用）的机组。相应改造措施为：（1）300 MW/600 MW/1000 MW 大容量燃煤机组替代（M4）；（2）180 MW/300 MW 天然气-蒸

汽联合循环机组替代（M5）。计算节能潜力时，保持热力电力输出量不变，计算燃料输入的节约量。

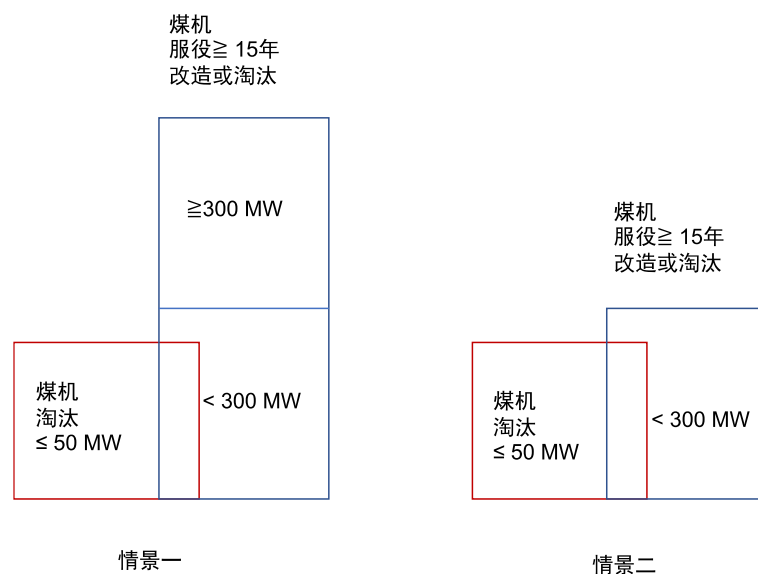
根据国务院发布的《加快关停小火电机组的若干意见》，替代关停机组的容量至少达到自身容量的60%以上，可直接纳入国家电力发展规划，优先安排建设。在本报告中，由于最小替代单元为300 MW 燃煤机组或180 MW 天然气，因此考虑到技术经济性，设置园区短名单筛选条件为：园区淘汰机组总容量超过100 MW。

由于部分待改造机组服役时间超过15年，但容量较大（300 MW 及以下），基于技术经济考虑，在计算节能潜力时分两种情况进行计算：

（1）优先替代单机容量50MW 及以下的燃煤小机组，或服役超过15年的燃煤老龄机组：识别出机组短名单覆盖容量为9464 MW，采用燃煤高参数大机组替代的节能潜力为162万吨标煤，若采用天然气-蒸汽联合循环机组替代的节能潜力为330万吨标煤，节能潜力分别为园区能源基础设施总能耗的2.7%或5.5%，占全省综合能耗的0.8%或1.6%；

（2）优先替代单机容量50MW 及以下的燃煤小机组，或服役超过15年的300MW 以下燃煤老龄机组：优先退役或改造机组短名单覆盖容量为3447 MW，采用燃煤高参数大机组替代的节能潜力为72万吨标煤，若采用天然气-蒸汽联合循环机组替代的节能潜力为157万吨标煤，节能潜力分别为园区设施总能耗的1.2%或2.6%，占全省综合能耗的0.4%或0.8%。

以上两种情景的示意可用附图4-3表示，本报告以后一种情况为例，对其计算过程进行说明。



附图 4-3 园区在役能源基础设施改造情景示意

本节设置三种情景：基准情景(BA)，大容量燃煤机组替换待淘汰机组(M4)和大容量天然气蒸汽联合循环机组替换待淘汰机组(M5)。经计算，筛选出浙江省省级及以上园区能源基础设施改造短名单，见附表 4-3。

附表 4-3 园区短名单及节能潜力

序号	园区名称	淘汰机组 总容量 (MW)	燃煤机组上大 压小节能潜力 (GJ/年)	天然气-蒸汽联合循 环机组上大压小节能 潜力(GJ/年)
1	浙江宁波石化经济技术开发 区	1252	9,994,682	21,004,536
2	杭州高新技术产业开发区	337	2,369,973	3,332,075
3	浙江绍兴经济开发区	333	2,450,219	3,623,131
4	浙江温州工业园区	270	1,402,008	2,796,122
5	浙江绍兴滨海工业园区	235	412,436	1,311,524
6	浙江衢州经济技术开发区	234	1,996,693	4,106,122
7	绍兴柯桥经济技术开发区	219	317,246	2,660,429
8	浙江富阳经济技术开发区	172	479,875	1,594,897
9	浙江嘉兴经济技术开发区	168	371,276	2,334,432
10	浙江普陀经济开发区	125	846,310	1,375,454
11	宁波望春工业园区	102	407,290	1,709,768
	合计	3,447	21,048,009	45,848,491

其中，两项措施的年度节能总量分别为 72 万吨标煤和 157 万吨标煤，占全省能源消费的 0.4%和 0.8%。总体来看，上大压小方法具有一定的节能潜力。这是基于假设能源输出量不变，计算燃料输入节约量得出的结果，但考虑到未来能源需求的持续增长，节能效果则会更加明显。

园区短名单中的天然气联合循环机组替代效果比燃煤机组替代更为显著，这是由于其发电供热效率均更高。附表 4-4 和表 4-5 给出了燃煤机组替代和天然气蒸汽联合循环机组替代的成本效益，对于燃煤机组替代措施，设备改造成本较高，但均摊到服役期每一年来看，11 家园区中有 5 家园区的燃料成本节约会将设备改造成本抵消，因此节能措施的年度净成本为负值，即具有正向经济效益。计算燃料成本节约时采用了我国同类机组能效的平均值，如管理得当，进一步提升能效，则经济效益会更加明显。

附表 4-4 园区短名单及成本效益-燃煤机组替代

序号	园区名称	淘汰机组总量 (MW)	新建燃煤大机组容量 (MW)	设备改造成本 (万元/年)	燃料成本节约 (万元/年)	年度总成本 (万元/年)
1	浙江宁波石化经济技术开发区	1,252	1,260	12,230	-36,947	-24,716
2	杭州高新技术产业开发区	337	350	3,828	8,761	-4,933
3	浙江绍兴经济开发区	333	350	3,828	9,058	-7,131
4	浙江温州工业园区	270	300	3,281	5,183	-1,902
5	浙江绍兴滨海工业园区	235	300	3,281	1,525	1,756
6	浙江衢州经济技术开发区	234	300	3,281	7,381	-4,100
7	绍兴柯桥经济技术开发区	219	300	3,281	1,173	2,108
8	浙江富阳经济技术开发区	172	300	3,281	1,774	1,507
9	浙江嘉兴经济技术开发区	168	300	3,281	1,372	1,909
10	浙江普陀经济开发区	125	300	3,281	3,128	153
11	宁波望春工业园区	102	300	3,281	1,506	1,967
	合计	3,447	4,360	46,134	-77,806	-31,672

对于天然气蒸汽联合循环机组替代措施，在当前价格机制下，较难实现环境效益与经济效益的双赢，需要统筹天然气价格、天然气多联供热电冷产品的价格，更全面系统地揭示本方案的环境收益，因为这个方案的实施会带来天然气生产、供应、污染治理、环境质量改善等连锁变化，需要核算污染减排的直接和间接经济收益。

附表 4-4 和 4-5 给出了短名单园区层面的信息，附表 4-6 进一步列出部分代表性园区的待改造机组信息，所列机组均为服役期超过 15 年且容量小于 300 MW 的老龄机组，或单机容量小于 50 MW 的低参数机组，且多为热电机组。因此替代机组同时需要满足电力和热力供给需求。

附表 4-5 园区短名单及成本效益-天然气蒸汽联合循环机组替代

序号	园区名称	淘汰 机组 总容 量 (MW)	新建天 然气蒸 汽联合 循环机 组容量 (MW)	设备改 造成本 -折算 到每年 (万元)	燃料成 本增加 (万元)	电力收 益增加 (万元)	热力收 益增加 (万元)	年度 总成本 (万元)
1	浙江宁波石化经济 技术开发区	1252	1260	10670	162981	60883	69309	34411
2	杭州高新技术产业 开发区	337	360	3449	16348	11464	3727	4606
3	浙江绍兴经济开发 区	333	360	3449	23462	14135	5292	7483
4	浙江温州工业园区	270	300	2407	17380	11909	3060	4817
5	浙江绍兴滨海工业 园区	235	300	2407	89972	14683	33841	43855
6	浙江衢州经济技术 开发区	234	300	2407	47637	9906	23691	16446
7	浙江绍兴柯桥经济 技术开发区	219	300	2407	65298	10639	29377	27689
8	浙江富阳经济技术 开发区	172	300	2407	49711	8789	21044	22284
9	浙江嘉兴经济技术 开发区	168	300	2407	47595	9327	20846	19830
10	浙江普陀经济开发 区	125	300	2407	4785	5336	0	1856
11	宁波望春工业园区	102	300	2407	24723	4866	11807	10457
	合计	3447	4380	36824	549892	161937	221994	193734

附表 4-6 部分园区机组改造短名单

园区名称	设施名称	可淘汰或 改造机组 容量 (MW)	投产 年份	燃料 类型	输出 类型	汽轮 机 类型	机组关停情 况(空值表示 未关停)
宁波石化 经济技术 开发区	中石化镇海炼 化分公司	25	1999	煤	热电	抽凝	
		25	1999	煤	热电	抽凝	
		50	2010	煤	热电	抽凝	
		50	2010	煤	热电	抽凝	
		50	2010	煤	热电	抽凝	
		50	2010	煤	热电	抽凝	
		50	2003	煤	热电	抽凝	
		50	2003	煤	热电	抽凝	
	镇海发电厂	215	1989	煤	热电	抽凝	
		215	1986	煤	热电	抽凝	3#4#2018年
		215	1985	煤	热电	抽凝	12月关停
		215	1990	煤	热电	抽凝	
	杭州高新 技术产业 开发区	半山	135	1983	煤	电	纯凝
130			1996	煤	电	纯凝	
协联热电厂		18	1997	煤	热电	背压	
		15	1984	煤	热电	背压	
		15	1989	煤	热电	背压	
杭州轻华热电 有限公司		15	1994	煤	热电	背压	
		6	1995	煤	热电	背压	关停, 2017 年11/12月
3	1995	煤	热电	抽凝			
绍兴经济 开发区	浙江浙能钱清 发电有限责任 公司	135	2002	煤	电	纯凝	关停, 2013 年12月
		135	2003	煤	电	纯凝	
	绍兴咸亨热电 有限公司	15	2008	煤	热电	背压	关停, 2018 年2月
		6	2008	煤	热电	背压	
	绍兴皋埠热电 有限公司	12	1986	煤	热电	抽凝	关停, 2017 年11月
		12	2005	煤	热电	抽凝	
		6	1986	煤	热电	抽凝	
6		2005	煤	热电	背压		
浙江温州 工业园区	温州发电有限 公司	135	1990	煤	热电	抽凝	关停, 2010 年8月
		135	1991	煤	热电	抽凝	

续附表 4-6 部分园区机组改造短名单

园区名称	设施名称	可淘汰或 改造机组 容量 (MW)	投产 年份	燃料 类型	输出 类型	汽轮 机 类型	机组关停情 况(空值表示 未关停)
浙江绍兴 滨海工业 园区	浙江天马热电 有限公司	30	2007	煤	热电	背压	
	浙江天马热电 有限公司	30	2007	煤	热电	背压	
	绍兴远东热电 有限公司	25	2006	煤	热电	背压	
	绍兴马山热电 厂	18	1989	煤	热电	抽凝	
		15	2005	煤	热电	背压	
	浙江天马热电 有限公司	15	2005	煤	热电	背压	
		15	2005	煤	热电	背压	
		15	2011	煤	热电	背压	
	绍兴远东热电 有限公司	12	2006	煤	热电	背压	
	浙江胜利热电 有限公司	12	2005	煤	热电	背压	
浙江衢州 经济技术 开发区		60	1991	煤	热电	抽凝	
	巨化热电厂	60	1996	煤	热电	抽凝	
		60	2001	煤	热电	抽凝	
		18	2013	煤	热电	背压	
	衢州东港热电 厂	15	2005	煤	热电	背压	
		15	2005	煤	热电	抽凝	
		6	2005	煤	热电	背压	

考虑到技术经济性,节能改造短名单要求待淘汰小机组总容量超过 100MW。出于整体考虑,附表 4-7 所列园区为基于“以煤为燃料,单机容量 50MW 及以下,或服役时间超过 15 年(2003 年(含)之前投入使用)的机组”原则,识别出的有可改造机组的所有园区名单、可改造机组的总容量,以及采用燃煤大机组替代方案或天然气蒸汽联合循环机组替代方案时各自的节能潜力,可为园区综合能源服务项目中长期的持续推进提供支撑。

附表 4-7 节能改造园区全体名单

园区名称	可改造机组总容量 (MW)	M4-燃煤大机组 替代节能潜力 (GJ)	M5-天然气蒸汽联合循环机组替代节能潜力 (GJ)
宁波石化经济技术开发区	1252	9,994,682	21,004,536
杭州高新技术产业开发区	337	2,369,973	3,332,075
浙江绍兴经济开发区	333	2,450,219	3,623,131
浙江温州工业园区	270	1,402,008	2,796,122
浙江绍兴滨海工业园区	235	412,436	1,311,524
浙江衢州经济技术开发区	234	1,996,693	4,106,122
浙江绍兴柯桥经济技术开发区	219	317,246	2,660,429
浙江富阳经济技术开发区	172	479,875	1,594,897
浙江嘉兴经济技术开发区	168	371,276	2,334,432
浙江普陀经济开发区	125	846,310	1,375,454
宁波望春工业园区	102	407,290	1,709,768
浙江平湖经济技术开发区	91	0	480,492
浙江杭州出口加工区	88	265,041	1,087,747
杭州江东工业园区	87	183,340	872,489
宁波大榭开发区	75	0	725,383
萧山经济技术开发区	74	524,253	1,468,117
嘉兴港区	74	0	550,183
浙江乍浦经济开发区	72	0	239,806
杭州湾上虞经济技术开发区	60	0	155,763
杭州经济技术开发区	57	145,362	758,825
浙江瑞安经济开发区	55	773,463	938,306
浙江慈溪出口加工区	48	126,768	622,293
绍兴袍江工业区	48	190,117	920,526
浙江德清经济开发区	48	395,627	626,089
宁波经济技术开发区	45	130,413	768,209
浙江湖州经济技术开发区	45	595,198	1,119,420
浙江桐乡濮院针织产业园区	42	231,167	748,056
浙江东阳横店电子产业园区	39	108,568	435,585
浙江桐乡经济开发区	38	230,353	605,531
浙江黄岩经济开发区	36	201,088	530,192

续附表 4-7 节能改造园区全体名单

园区名称	可改造机组总容量 (MW)	M4-燃煤大机组 替代节能潜力 (GJ)	M5-天然气蒸汽联合循环机组替代节能潜力 (GJ)
浙江龙游工业园区	36	136,599	215,798
浙江新昌工业园区	36	0	335,398
浙江丽水经济技术开发区	36	37,327	44,175
杭州余杭经济技术开发区	33	0	314,638
浙江江山经济开发区	31	299,230	354,953
浙江诸暨经济开发区	30	126,702	598,385
浙江海宁经济开发区	27	236,183	574,917
浙江余姚经济开发区	27	142,258	176,575
浙江台州经济开发区	27	0	70,758
浙江岱山经济开发区	24	246,626	265,515
浙江余姚工业园区	24	82,980	139,391
浙江建德经济开发区	24	0	158,243
浙江吴兴工业园区	24	0	56,440
浙江天台工业园区	23	29,263	75,950
浙江永康经济开发区	20	25,255	30,637
浙江奉化经济开发区	18	100,544	265,096
浙江德清工业园区	15	0	18,368
浙江定海工业园区	15	460,507	558,652
浙江兰溪经济开发区	15	308,982	395,561
浙江嘉善经济技术开发区	12	44,878	84,162
浙江嘉兴工业园区	12	102,728	162,661
浙江温州鹿城轻工产业园区	9	50,272	132,548
浙江仙居工业园区	8	67,415	98,600
浙江临安经济开发区	6	68,025	82,522
浙江遂昌工业园区	6	0	31,153
浙江义乌经济技术开发区	6	33,515	88,365

附 5 案例分析——浙江省工业园区“能-水”基础设施共生环境效益

附 5.1 浙江省工业园区集中式污水处理设施存量特征分析

(1) 浙江省国家级经开区集中式污水处理厂发展概况

以浙江省国家级经济技术开发区中污水处理厂信息资料完备的 16 家园区为例，分析其集中式污水处理厂处理设施类型、建成时间、执行的排放标准、污水处理级别及相应的方法、设计处理能力等信息，得到以下基本结论：

1) 16 家国家级经济技术开发区内共建有 60 座污水处理厂，其设计处理规模在 5000 吨/天~800000 吨/天，总设计处理能力 395.5 万吨/天。国家级经开区平均单个园区的污水处理厂数量多于省级开发区。

2) 60 座污水处理厂中 34 座为城镇污水处理厂，执行城镇污水处理厂污染物排放标准，其中 2 家执行二级标准，2 家执行一级 B 标准，25 家执行一级 A 标准，2 家执行间接排放标准。

3) 工业污水处理厂有 25 座，其中 9 家执行一级 A 排放标准，9 家执行其他排放标准，1 家执行间接排放标准，6 家信息未知。另外 1 家为其他类型污水处理厂，执行一级 A 排放标准。

4) 处理工艺方面，除嘉兴经济技术开发区的 9 家污水处理厂外，其他国家级经开区均采取了二级以上处理，二级处理工艺使用工艺情况见附表 5-1。

附表 5-1 浙江省 16 家国家级经开区集中式污水处理厂二级处理工艺技术现状

二级处理工艺类型	使用该工艺的污水厂数量	占比 (%)
A/O 工艺	6	12.0
A ² /O 工艺	15	30.0
SBR 类	4	8.0
化学沉淀法	1	2.0
化学混凝法	1	2.0
活性污泥法	10	20.0
生物滤池	2	4.0
生物膜法	2	4.0
生物转盘	1	2.0
氧化沟类	9	18.0
总计	51 ^注	100

注：其他 9 家污水处理厂均来自嘉兴经开区，一级处理后进入嘉兴联合污水处理厂。

附表 5-1 所示污水处理厂均列入了浙江省省控重点源。浙江省环保厅自 2011 年起持续发布集中式污水处理厂每季度监督性监测达标情况，向社会公布 pH、色度、悬浮物、COD、BOD、氨氮、总磷等水质指标的检测数据，以及纳入省控重点污染源的污水处理厂的出水达标情况，详细的污水处理厂分季度的监督性监测数据可参考浙江省生态环境厅网站信息公开相关内容（<http://www.zjepb.gov.cn/col/col1201347/index.html>）。

从浙江省环保厅公布的监督性监测数据分析结果看，“2017 年 1~6 月，全省共监测污水处理厂 297 家，监测完成率为 100%。297 家污水厂日处理水量合计 1116.5 万吨，总体运行负荷 81.6%。按控制级别，国控和其他污水处理厂分别为 211 家和 86 家，日处理水量为 1041.6 万吨和 74.9 万吨，运行负荷分别为 85.1% 和 72.2%。按设施类型，城镇和工业污水厂分别为 245 家和 52 家，日处理水量为 1028.5 万吨和 88.0 万吨，运行负荷分别为 87.6% 和 57.3%。按“达标率=达标水量/实际处理水量”方式评价，全省 297 家污水处理厂总体达标率为 98.6%。其中国控 98.7%，其他 96.7%；城镇 98.7%，工业 97.6%。

（2）浙江省国家级经开区的集中式污水处理厂排水去向

浙江省国家级经开区的集中式污水处理厂排水去向主要有三类（附表 5）：直接排入海域，直接进入江河湖、库等水环境，和进入城市下水道（再入江河、湖、库），各污水处理厂排水的具体去向可见附表 5，多为东海、钱塘江、甌江、甬江、太湖、运河、苕溪、衢江、东阳江等。污泥产生量为 762035 吨，处理方式以焚烧为主，焚烧污泥比例为 96%，另 4% 为建筑材料利用。

限于数据可得性，分析了 27 家省级开发区的集中式污水处理设施。这 27 家省级开发区的集中式污水处理厂有 22 家执行城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 排放标准，5 家执行一级 B 排放标准（其中 1 家执行纺织染整工业水污染物排放标准一般印染行业（除蜡染行业外）的间接排放标准，1 家为纺织染整工业水污染物排放标准特别排放限值）。这 27 家污水处理厂日均处理规模在 5000 吨~340000 吨，合计日均处理规模 157.3 万吨。

附 5.2 浙江省工业园区能水耦合共生的碳减排潜力分析

（1）浙江省经开区污水处理厂出水与能源基础设施匹配结果及减排潜力

经园区能水基础设施耦合模型计算，在可实施“水-能基础设施共生”的园区中，水厂和电厂的平均直线距离为 17 千米，WWTP 出水平均可替代电厂取水量的 83%。16 家园区中有 13 家的 WWTPs 出水水量能满足电厂的取水要求。具体

结果见附表 5-2。通过焚烧污泥替代部分化石燃料，可以减少一定量的温室气体排放。采用情景分析的方法核算温室气体的减排量，本报告计算中仅考虑能源基础设施-集中式污水处理厂共生情景下与能源有关的温室气体排放量，包含燃料燃烧所产生的碳排放、污泥处理处置所产生的碳排放、运输所产生的碳排放三部分。浙江省国家级经开区能源基础设施-集中式污水处理厂水能耦合的节能及温室气体减排潜力见附表 5-3。

附表 5-2 浙江省经开区集中式污水处理厂出水与能源基础设施之间匹配结果

序号	园区名称	WWTP 排放总量 (Mt/a)	园区年取水量 (Mt/a)	平均距离 (km)	WWTP 数量	电厂数量	可与电厂共生的 WWTP 数量 (座)	可与 WWTP 建立共生的电厂数量 (座)	WWTP 出水替代电厂取水的最大比例 (%)
1	宁波经开区 ¹	173.6	2465.8	64.2	5	12	5	7	7.04
2	温州经开区	28.	3.0	27.9	3	2	2	1	100
3	萧山经开区	89.2	9.0	7.7	2	3	2	3	100
4	宁波大树	9.9	7.2	3.4	1	1	1	1	100
5	嘉兴经开区	25.7	20.7	15.5	9	3	9	2	100
6	湖州经开区	19.8	5.7	4.9	1	2	1	2	100
7	长兴经开区	72.0	364.7	36.1	9	11	9	9	19.7
8	金华经开区	61.3	16.3	2.5	2	2	1	2	100
9	嘉善经开区	10.2	0.14	1.5	3	2	1	1	100
10	衢州经开区	12.4	204.2	23.4	3	6	3	3	6.1
11	义乌经开区	133.7	0.52	3.0	7	1	1	1	100
12	余杭经开区	21.1	4.7	2.2	4	2	2	2	100
13	柯桥经开区	248.1	28.8	16.6	2	7	1	7	100
14	富阳经开区	117.1	53.7	1.8	7	7	6	7	100
15	平湖经开区	12.6	6.7	22.6	1	3	1	2	100
16	丽水经开区	12.6	1.6	39.5	1	3	1	3	100
	合计	1048	3193		60	67	46	53	
	平均值	65.5	199.5	17.0					83

注 1：宁波经济技术开发区，位于北仑区。

附表 5-3 污泥分配结果及减排潜力

序号	园区名称	污泥替代能源比例 (%) ¹	园区污泥焚烧产热 (GJ)	园区发电供热 (GJ) ²	基准情景 GHG 排放 (tCO ₂ e)	共生情景 GHG 排放 (t CO ₂ e)	GHG 减排潜力 (tCO ₂ e)	平均运输距离 (km)
1	宁波经开区	0.7	984835	143476111	28413056	28219080	193975	50.4
2	温州经开区	17.1	375296	2189462	148941	128403	20538	27.6
3	萧山经开区	20.4	1693276	8302762	1189611	973296	216314	5.8
4	宁波大榭经开区	0.2	13223	7015570	913209	911490	1718	3.4
5	嘉兴经开区	0.7	145697	19745280	2624549	2605322	19227	36.2
6	湖州经开区	4.0	208980	5166957	764514	734242	30272	3.6
7	长兴经开区	1.6	785641	48799474	8756188	8622990	133198	65.8
8	金华经开区	26.3	480325	1828818	220460	172143	48316	3.6
9	嘉善经开区	19.1	30055	157587	41453	33983	7469	5.1
10	衢州经开区	0.2	52699	33653716	4988193	4983096	5097	29.4
11	义乌经开区	100	1429196	465525	172399	108402	63996	3.0
12	杭州余杭经开区	1.8	77622.8	4298584	555135	545229	9906	13.9
13	绍兴柯桥经开区	14.6	3920291	26830256	3711855	3213619	498235	15.9
14	富阳经开区	0.3	130115	46007987	4200650	4190828	9821	1.2
15	平湖经开区	5.2	322662	6261876	859929	836597	23331	20.9
16	丽水经开区	12.7	195341	1543173	201018	177531	23486	39.3
	合计		10845261	355743144		56456260	1304907	325.2
	平均值	14.05	677828	22233947		3528516	81556	20.3

注 1: 污泥替代能源比例指污泥经焚烧后产生的能量占电厂原发电量和发热量之和的百分比,干污泥的热值按 16956.5 kJ/kg 计算。注 2: 园区发电供热能耗按原煤消耗量计算。

(2) 浙江省经开区集中式污水处理厂出水与电厂水质匹配性

在浙江省经开区集中式污水处理厂出水与电厂取水水量匹配分析及距离分析基础上,水质匹配性对于建立能源-水耦合也是重要影响因素。以浙江省国家级经开区集中式污水处理厂出水水质和循环冷却水系统水质要求进行比较分析。前述分析指出浙江省 16 家国家级经济技术开发区有效样本中,共建有 60 座污水处理厂,其中近 60%执行城镇污水处理厂污染物排放一级 A 标准。水质标准比较见附表 5-4。

附表 5-4 电厂循环冷却水系统补充水水质要求与现行排放标准比较

指标	城镇污水处理厂污染物排放标准 GB18918-2002		地表水环境质量标准 GB 3838-2002		DB32-1072-2007 ¹	电厂循环冷却水系统补充水
	一级 A	一级 B	III 类水体	IV 类水体		
COD (mg/L)	50	60	20	30	50	≤60
BOD ₅ (mg/L)	10	20	4	6		≤10
SS (mg/L)	10	20				≤20
TN (mg/L)	15	20	1	1.5	15	
NH ₃ -N (mg/L)	5 (8)	8 (15)	1	1.5	5 (8)	<1
TP (mg/L)	0.5	1	0.2	0.3	0.5	≤1

注: 《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》

浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》将于 2019 年 1 月 1 日起实施,加严了四项指标(附表 5-5),其余控制项目仍按 GB18918-2002 中一级 A 标准执行。

从上述分析可见,浙江省国家级经开区中执行城镇污水处理厂主要水污染物排放标准一级 A 排放标准的污水处理厂,随着 2019 年四项水污染物指标加严后,污水处理厂出水除氨氮指标略有超标外,水质能直接满足电厂电厂循环冷却水系统补充水水质要求。根据浙能集团开展的“浙江长兴发电有限责任公司市政污水

深度处理回用工程可行性研究”结论，“污水厂出水基本满足电厂补给水系统的要求，但是 NH₃-N 高出标准较多（编制可研时出水氨氮 15 mg/L），需要通过深度处理系统的处理，建议曝气生物流化池工艺（ABFT）方案作为回用工程的推荐方案，每吨污水处理的费用约 0.18 元”。

附表 5-5 城镇污水处理厂主要水污染物排放限值

序号	污染物项目	限值 (mg/L)	
		日均值	最大瞬时值
1	化学需氧量 (COD _{Cr})	30	50
2	氨氮 ¹	1.5 (3)	5 (8)
3	总氮 ¹	10 (12) ²	15
		12 (15) ³	
4	总磷	0.3	0.5

注 1: 括号内数值为每年 11 月至次年 3 月执行；注 2: 适用于新立项城镇污水处理厂；
注 3: 适用于改（扩）建污水处理厂

附 5.3 浙江省工业园区基础设施“能-水”共生温室气体减排主要结论

总结来看，从浙江省 21 家国家级经济技术开发区中，取 16 家既有热电厂又有 WWTP 的园区为样本，研究构建能源基础设施——集中式污水处理系统能—水耦合产业共生体系，实现节能节水，从空间距离、水量匹配、水质匹配的角度及节能减排潜力研究可得出以下结论：

(1) 16 家国家级经济技术开发区共有 60 座 WWTP，总废水处理能力为 1048 Mt/a，总干污泥产量为 762035 t/a；这些园区同时共有 67 座电厂，总机组容量为 12069 MW，总电力输出为 50513 MWh/a，热力输出为 171426 TJ/a，总取水量为 3192.6 Mt/a。

(2) 16 家国家级经开区中，有 13 个园区的集中式污水处理厂处理水量可满足电厂取水量的需求，能源基础设施与集中式污水处理厂之间的平均直线距离为 17 千米，建设 WWTP 至电厂的再生水管网，构建园区能源基础设施——集中式污水处理系统能—水耦合产业共生体系，最大可削减电厂取水量 83.3%。浙江省国家级经济技术开发区内集中式污水处理厂的出水水质基本能满足电厂电厂循环冷却水系统补充水水质要求。

(3) 16 家国家级经开区 WWTP 所产生污泥替代电厂燃料百分比的平均值为 14.05%。通过使用污泥替代部分燃料，每年可减排温室气体（以二氧化碳当量计）1,304,907 吨，为基准情景的 2.3%。

附表1 工业园区数据收集调查表

指标	单位	数值		
国内生产总值 (GDP)	元			
工业增加值 (IAV)	元			
土地面积	平方公里			
能源	单位	输入	输出	净输出 ^a
原煤	吨			
洗精煤 (用于炼焦)				
其他洗煤				
煤制品				
焦炭				
其他焦化产品				
原油				
汽油				
煤油				
柴油				
燃料油				
液化石油气				
炼厂干气				
石脑油				
润滑油				
石蜡				
溶剂油				
石油焦				
石油沥青				
其他石油制品				

续附表1 工业园区数据收集调查表

指标	单位	输入	输出	净输出 ^a
煤矸石	吨			
城市生活垃圾				
工业废料（用于燃烧）				
天然气	万立方米			
煤层气				
焦炉煤气				
高炉煤气				
转炉煤气				
发生炉煤气				
电力	万千瓦时			
热力	吉焦			
余热余压				
生物燃料	吨标准煤 ^b			
其他燃料				
总计				

注：a) 净输入=输入-输出，此三个指标可用于数据校核；b) 1 吨标准煤=29.27 GJ。

附表2 采集能耗数据的213家国家经济技术开发区统计信息

指标	华北	华东	华中	华南	东北	西北	西南	总计
园区数量	20	97	21	11	22	23	19	213
国内生产总值（亿元）	7,498	40,193	7,017	5,323	5,510	3,900	6,466	75,907
土地面积（平方公里）	1,689	12,055	2,512	3,305	3,315	2,114	2,013	27,003
从业人数（万人）	155	1,043	145	105	120	97	122	1,788
温室气体排放（亿吨 CO ₂ 当量）	1.95	4.99	0.53	0.65	0.94	2.31	0.85	12.23
园区平均 GDP（亿元）	375	414	334	484	262	170	323	356
园区平均土地面积（平方公里）	84	124	120	300	158	92	101	127
园区平均从业人数（人）	77,450	107,557	68,935	95,855	57,182	42,345	61,191	83,956
园区平均温室气体排放（万吨 CO ₂ 当量）	977	514	254	590	447	1006	427	574

附表3 燃料燃烧的温室气体排放因子

燃料类型	CO ₂ 排放因子 (吨/吨)	CH ₄ 排放因子 (克/吨)	N ₂ O 排放因子 (克/吨)	CO ₂ 当量排放因子 (吨/吨)
原煤	1.981	20.908	31.362	1.9899
洗精煤	2.405	26.344	39.516	2.4162
其他洗煤	0.955	10.454	15.681	0.9594
煤制品	2.148	17.793	26.690	2.1556
焦炭	2.860	28.435	42.653	2.8721
其他焦化产品	3.833	38.099	57.149	3.8492
原油	3.020	125.448	25.090	3.0302
汽油	2.925	129.210	25.842	2.9355
煤油	3.033	129.210	25.842	3.0435
柴油	3.096	127.956	25.591	3.1064
燃料油	3.170	125.448	25.090	3.1802
煤矸石	2.77*; 0#	-	-	2.7700
生物质	0*; 2.933#	879.200	117.220	0.0557
液化天然气	2.889	51.498	5.150	2.8918
液化石油气	3.101	50.179	5.018	3.1037
炼厂干气	3.012	46.055	4.606	3.0145
其他石油制品	2.527	105.504	21.101	2.5355
工业废料	3.772*; 0.4191#	-	-	3.7720
城市生活垃圾	0.967*; 1.877#	-	-	0.9670

燃料类型	CO ₂ 排放因子 (吨/万立方米)	CH ₄ 排放因子 (克/万立方米)	N ₂ O 排放因子 (克/万立方米)	CO ₂ 当量排放因子 (吨/万立方米)
天然气	21.622	389.310	38.931	21.6432
焦炉煤气	8.555	173.540	17.354	8.5645
高炉煤气	9.784	37.688	3.769	9.7861
其他煤气	8.955	202.218	20.222	8.9660

注：“*”代表矿物源排放，“#”表示生物源排放，其余未标注的均为矿物源排放。排放因子引自 World Resources Institute 发布的 GHG Protocol Tool for Energy Consumption in China (V2.1)。CO₂、CH₄ 和 N₂O 按 100 年全球变暖潜势（1、28 和 265）折算为 CO₂ 当量（IPCC Working Group I 发布的 Climate Change 2013: The Physical Science Basis 报告）。部分燃料排放的矿物源排放因子折算为 CO₂ 当量/GJ，用于减排模型计算，如下表所示：

燃料	t CO ₂ /GJ	g CH ₄ /GJ	gN ₂ O /GJ	t CO ₂ 当量/GJ
原煤	0.0948	1.0000	1.5000	0.0952
天然气	0.0555	1.0000	0.1000	0.0556
柴油	0.0726	3.0002	0.6000	0.0728
城市生活垃圾/污泥	0.0330	-	-	0.0330
煤矸石	0.0946	-	-	0.0946
生物质/沼气	-	30.0376	4.0048	0.0019
焦炉煤气	0.0493	1.0001	0.1000	0.0494
高炉煤气	0.2599	1.0012	0.1001	0.2600

附表4 能源生产运输的生命周期温室气体排放因子

能源品种	单位	生命周期温室气体排放
原煤		0.179
焦炭		0.524
原油		0.607
柴油		0.801
汽油		0.944
润滑油		0.633
煤油	kg/kg	0.655
燃料油		0.636
石脑油/轻油		0.650
沥青/石蜡 ^a		0.644
石油焦		0.184
液化石油气		0.533
炼厂干气		0.564

续附表4 能源生产运输的生命周期温室气体排放因子

能源品种	单位	生命周期温室气体排放	
天然气		0.278	
发生炉煤气	kg/m ³	0.169	
焦炉煤气		0.298	
高炉煤气/转炉煤气 ^b		0.234	
电力	kg/kWh	华北电网	1.24
		东北电网	1.33
		西北电网	0.962
		华东电网	0.946
		华中电网	0.773
		南方电网	0.782
热力 ^c	kg/MJ	0.126	

注：

a: 取以上 4 项的平均值； b: 取以上 2 项的平均值；

c: 热力供应的生命周期温室气体排放因子为：热力生产过程排放因子/（1-热力传输损失率）。热力生产排放因子取 CLCD 数据库中不同温度和压力的蒸汽生产过程排放因子平均值，热力传输损失率采用住建部发布的《居住建筑节能检测标准 JGJ/T132-2009》中推荐值 10%。

附表5 部分工业园区基础信息（83家）

园区序号	园区成立时间	2012年工业增加值（亿元）	首个能源基础设施机组投产时间	能源基础设施机组数量（个）	能源基础设施总装机容量（MW）	主导产业
1	1992	521.9	1996	8	635	电子信息，生物医药，汽车，装备制造，高端服务业，文化创意产业
2	1992	547.5	1993	22	5,644	造纸，精细化工，火电，装备制造
3	1992	229.3	2004	2	22	汽车及零部件，航空航天技术，新材料
4	2002	106.6	1989	13	2,905	热电，铝深加工，铝粉
5	1984	740.2	1991	5	736	电子元器件，工业电子产品，办公用品，家用电器
6	2006	-	2006	3	36	电子信息，装备制造，电子商务，信息服务
7	1992	113.1	2003	14	855	有色金属，石油化工，装备制造
8	2007	35.0	2004	5	565	石油化工，氯碱化工，矿产品，农产品
9	1984	960.0	2002	7	1,170	化工，电子通信，食品饮料，冶金
10	1988	310.4	1993	9	2,170	信息技术，机电一体化，新材料，生物医药，环境保护
11	1993	337.5	1998	8	259	食品饮料，电子信息，生物医药，机械
12	1991	205.2	2005	6	71	国际贸易，木材加工，轻工业，农产品加工
13	1991	236.8	1998	3	81	信息技术，生物医药，新材料，先进机械，光机电一体化
14	2006	-	2012	3	40	钢加工，装备制造，新材料，化工，高新技术产业，现代服务业
15	2002	136.1	2004	2	30	精密仪器，电子，高端纺织，食品加工，新能源技术产品，新材料，电子商务
16	1992	233.4	1994	8	154	光电产品，装备制造，生物医药，软件，纺织

续附表5 部分工业园区基础信息（83家）

园区序号	园区成立时间	2012年工业增加值（亿元）	首个能源基础设施机组投产时间	能源基础设施机组数量（个）	能源基础设施总装机容量（MW）	主导产业
17	2001	50.2	1995	13	5,140	电力，化工新材料，金属制品，仓储物流
18	2002	56.7	2006	4	40	新材料，电子，精密仪器
19	2001	48.9	1999	4	1,040	汽车电子及零部件
20	1992	232.6	1994	8	148	金属材料，电子信息，生物医药，纺织
21	1992	96.7	2010	2	30	新材料，生物技术，机电一体化，环境保护，信息技术
22	1994	248.2	2003	2	48	精密仪器，可再生能源，光电产品
23	1985	564.9	1995	5	136	电子信息，精密仪器，生物医药
24	1992	122.4	1996	5	270	电子，机械，新能源技术产品，新材料
25	2009	37.5	2013	4	122	石油化工，钢铁，装备制造，环境保护，现代港口物流
26	2003	95.1	2010	1	24	铜冶炼加工
27	1998	84.6	1993	7	642	化工，冶金，电子，新材料，现代物流
28	1991	97.2	2005	3	124	光机电一体化，生物医药，信息技术，新材料，环境保护，精密仪器
29	1988	76.4	1994	3	642	汽车，电子信息，生物医药，软件
30	1992	425.0	2004	2	110	汽车，电子信息
31	1992	298.2	1988	3	235	电子信息，生物医药，新材料，机械
32	1984	397.9	2000	7	93	电子，机械，新材料，生物医药，新能源技术产品，现代服务业
33	1999	73.8	2005	7	143	新能源，半导体，光电，新材料

续附表5 部分工业园区基础信息（83家）

园区序号	园区成立时间	2012年工业增加值（亿元）	首个能源基础设施机组投产时间	能源基础设施机组数量（个）	能源基础设施总装机容量（MW）	主导产业
34	1984	202.6	1991	23	5,912	石油化工，电力，钢铁，机械，纺织服装
35	2003	70.3	2011	2	13	软件和信息技术，海洋生物医药，装备制造
36	1984	700.1	1988	18	2,584	石油化工，家用电器，汽车，船舶工程
37	1991	119.1	2001	8	259	造纸，食品，纺织服装，热电
38	1995	57.7	1990	10	202	海洋生物化工
39	1996	125.2	2005	4	2,600	乙烯，氯化物
40	1990	378.9	1995	8	138	汽车，电子，家用电器，食品加工，生物医药
41	1995	87.1	2000	3	36	精密仪器，电子信息，印刷
42	1995	123.0	1996	6	117	电信设备，机械，化工
43	1991	136.6	1994	5	96	信息技术，生物医药，光机电一体化
44	2000	78.0	2003	7	72	高新技术产业
45	1991	219.5	2002	17	1,171	信息技术，先进制造业，生物医药，新材料
46	1988	716.0	2001	7	158	装备制造，现代建筑，汽车及零部件
47	2002	496.8	2006	2	120	电子信息，精密仪器，精细化工，新材料
48	1994	836.8	1999	9	1,080	纳米光电子，新能源，生物医药，集成通信
49	2005	0.2	2006	8	75	静脉产业
50	2001	51.1	2002	17	394	信息技术，新材料，机械，电子，新建筑材料，生物医药，食品和农产品加工

续附表5 部分工业园区基础信息（83家）

园区序号	园区成立时间	2012年工业增加值（亿元）	首个能源基础设施机组投产时间	能源基础设施机组数量（个）	能源基础设施总装机容量（MW）	主导产业
51	2002	200.1	2010	20	1,347	电子信息，机械，生物医药，零部件，纺织，新材料，新能源
52	1984	764.9	1996	10	205	电子通信，汽车，装备制造，石油化工
53	1992	98.1	2014	2	28	汽车，装备制造，家用电器，日用化工
54	1994	62.1	2014	7	407	机械制造，电力传输设备，新能源，生物医药，食品饮料，化工，塑料
55	1992	252.7	1995	7	103	电子信息，机械，装备制造
56	1992	334.4	1993	10	462	电子信息，精密仪器，电力机械，精细化工
57	1993	507.7	2003	7	92	汽车和零部件，电子产品，新建筑材料
58	1993	70.8	1993	5	147	精密仪器，电子产品，信息技术，生物医药，新材料，新能源
59	1991	335.9	2004	6	615	冶金，汽车，机械，高新技术产业，食品加工，饮料，建材加工，生物医药
60	1997	36.0	2008	3	15	电子，精密仪器，生物医药
61	1993	114.3	1995	7	98	机械，医药，食品，纺织服装
62	2003	72.4	2002	8	84	新能源汽车及零部件，机械，装备制造，新能源材料
63	1992	112.2	1997	2	21	汽车，机械，电子，现代服务业
64	1992	284.3	1992	8	78	装备制造，新能源，电子，纺织服装
65	1984	565.9	1993	5	54	机械，汽车，电子信息
66	1992	212.8	1996	7	1,363	电子信息，太阳能光伏，汽车，纺织

续附表5 部分工业园区基础信息（83家）

园区序号	园区成立时间	2012年工业增加值（亿元）	首个能源基础设施机组投产时间	能源基础设施机组数量（个）	能源基础设施总装机容量（MW）	主导产业
67	1992	112.2	1999	10	204	物流，化工，粮油，电子机械纺织
68	1993	56.0	1999	3	15	纺织服装，装备制造，新材料
69	1993	540.3	1991	38	2,727	汽车，零部件，食品加工，光电产品，生物医药
70	2005	317.6	1958	11	882	汽车零部件，食品加工，光电信息，生物医药
71	1998	140.0	2005	11	103	医学颜料，精细化工，纺织，染料
72	1993	35.1	2003	6	626	信息技术，汽车，装备制造，生物医药，中药，现代物流
73	1996	36.0	1987	9	622	铝冶炼加工
74	2002	66.0	2008	4	420	装备制造，纺织，食品加工，能源化工，冶金，建材
75	1992	92.0	1994	18	1,277	新材料，医药，装备制造
76	2001	297.0	2004	16	472	纺织服装，食品加工，医药，新材料，装备制造
77	1991	167.1	1994	4	24	电子信息，精细化工，新材料，生物医药 s，纺织
78	1996	148.2	1995	5	32	装备制造
79	2007	75.3	2008	2	100	铜冶炼加工
80	1991	73.0	2008	2	2	软件和信息技术，新能源，先进制造业，生物医药
81	2006	8.9	2009	1	2	高新技术产业，先进装备，电子商务
82	1992	463.5	2013	1	20	先进机械制造，汽车及零部件，信息技术，电子产品，新材料
83	1991	422.4	2008	10	530	软件和信息技术，先进制造业，生物医药，汽车制造

附表6 分品种能源低位热值

能源品种	单位	基于低位热值的标准煤折算系数
原煤		0.7143
洗精煤		0.9
其他洗煤		0.4643
煤制品		0.5286
焦炭		0.9714
原油		1.4286
柴油		1.4571
汽油		1.4714
润滑油		1.4143
煤油	kgce/kg	1.4714
燃料油		1.4286
石脑油/轻油		1.5
沥青/石蜡		1.3307
石油焦		1.0918
液化石油气		1.7143
炼厂干气		1.5714
液化天然气		1.7572
煤矸石		0.2857
城市生活垃圾		0.2714
工业废料		0.4285
天然气		1.33
发生炉煤气		0.1786
焦炉煤气	kgce/m ³	0.5714
高炉煤气		0.1286
转炉煤气		0.2714
电力	kgce/kWh	0.1229
热力	kgce/MJ	0.03412

注：kgce 表示千克标准煤当量，1 kgce=29.27 MJ。

表中数据来自《综合能耗计算通则 GB/T2589-2008》和《上海能源统计报表制度 2017》

(<http://www.stats-sh.gov.cn/html/tjfw/201801/1001456.html>)。

附表7 各容量等级机组供电效率

单机容量 (MW)	供电效率 (克标准煤/千瓦时)	供电效率 (%)
≥1000	287	42.8
600≤ <1000	309	39.8
300≤ <600	305	40.3
200≤ <300	324	37.9
100≤ <200	327	37.6
6≤ <100	355	34.6

数据来源：中国电力企业联合会. 电力工业统计资料汇编(2015) [M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2016.

附表8 园区能源基础设施技术指标统计

燃料	容量和技术	有效供电效率 ^a			年利用小时数			自用电率 (%)		
		平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大
煤	PC, <100	0.286	0.130	0.433	3731	117	8859	10.5	0.1	65.4
	PC, 100≤ <300	0.352	0.296	0.431	4315	535	7226	8.7	3.9	12.8
	PC, 300≤ <600	0.378	0.334	0.442	4767	2045	8352	6.0	1.8	11.7
	PC, ≥600	0.399	0.346	0.460	4795	1237	7323	5.1	1.5	11.2
	EC, <100	0.368	0.121	0.793	4118	140	9875	8.8	0.1	46.4
	EC, 100≤ <300	0.380	0.271	0.585	5063	1223	9111	8.0	1.3	21.7
	EC, 300≤ <600	0.388	0.253	0.532	4818	704	7667	6.1	1.4	16.1
	EC, ≥600	0.403	0.375	0.434	5149	3556	7128	4.9	2.7	7.6
	BP	0.494	0.228	0.884	4414	355	8760	7.6	1.6	33.4
天然气	NGCC	0.481	0.302	0.690	3049	232	7633	3.4	0.8	35.5
	PC/EC	0.436	0.352	0.654	4103	1673	7340	4.4	0.5	7.7
煤气	CGCC	0.371	0.308	0.436	5491	2347	7329	8.2	6.2	10.5
	PC	0.386	0.162	0.621	4737	416	9029	11.5	1.1	35.5
	EC	0.318	0.202	0.414	5940	-	-	12.6	7.7	19.7
煤矸石	PC	0.307	0.218	0.398	4185	189	8765	9.6	5.1	14.7
	EC	0.313	0.186	0.385	4977	584	7786	11.3	0.8	22.3
柴油	PC	0.294	0.104	0.377	2627	727	6044	14.0	3.4	33.2
	EC	0.350	0.228	0.459	3310	1441	4661	7.6	1.6	13.2
城市生活垃圾	PC	0.231	0.137	0.378	5518	858	8766	16.6	5	34.4
	EC	0.344	0.156	0.679	5658	610	9223	13.9	4.4	29.3

续附表8 园区能源基础设施技术指标统计

燃料	容量和技术	有效供电效率 ^a			年利用小时数			自用电率(%)		
		平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大
生物质	PC	0.272	0.216	0.354	5992	77	8478	8.1	0.7	19.5
	EC	0.290	0.201	0.572	5702	272	9125	10.6	4	31.6
	BP	0.541	0.369	0.698	3645	1197	5033	11.1	4.9	21.7
污泥	EC	0.335	0.271	0.383	6422	4846	9070	6.0	2.7	7.9
	BP	0.467	0.414	0.521	2753	2275	3230	5.5	3.5	7.4
余热	PC	0.355	0.207	0.621	4970	416	9029	8.2	0.6	76
	EC	0.342	0.235	0.516	4118	565	8647	11.6	4	23
	BP	0.595	0.396	0.793	5147	2056	9029	4.3	3.6	4.9

注：a) 有效供电效率=供电量/供电用燃料。根据美国环保署发布的 Catalog of CHP Technologies, 计算有效供电效率时假设热电联产系统的热力输出若不由此产生, 则需要单独的供热锅炉生产, 进而将总燃料输入划分为供电用燃料和供热用燃料。b) PC=纯凝, EC=抽凝, BP=背压, NGCC=天然气联合循环, CGCC=煤气联合循环。

附表9 能源基础设施锅炉效率

燃料类型	缺省值	最小值	最大值	数据来源
煤/煤矸石	0.85	0.8	0.9	国家质量监督检验检疫总局, 2010. 锅炉节能技术监督管理规程 TSGG0002-2010 [S].
天然气/煤气	0.92	0.9	0.94	
柴油	0.91	0.88	0.94	
生活垃圾/生物质	0.725	0.6	0.85	Thomas A, Møller J, Thilde F. Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions [J]. Waste Management & Research, 2009, 27(8): 789-799.
垃圾焚烧的煤掺烧比例	0.1	0	0.2	原环保总局, 国家发改委. 关于加强生物质发电项目环境影响评价管理工作的通知 [EB/OL]. 2006. http://law.npc.gov.cn/FLFG/flfgByID.action?txtid=4&flfgID=230988&showDetailType=QW .
余热	0.8	0.75	0.85	Walker M, Lv Z, Masanet E. Industrial steam systems and the energy-water nexus [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(22): 13060-13067.

附表10 能源基础设施热电比

机组容量	缺省值 (取中位数)	最小值	最大值
≥600MW	0.022	0.0003	0.744
[300, 600) MW	0.229	0.0017	1.669
[100, 300) MW	0.469	0.0532	3.480
<100MW	4.321	0.4838	14.964

注：表中数据基于本研究数据库。

附表11 各减排情景下的设备建造成本变化相关指标

情景	指标	数值	单位
全部情景	燃煤锅炉改造为燃气锅炉的单位成本	176,683 ^a	元/(t/h)
	新建垃圾焚烧炉的单位成本	798,851 ^b	元/(t/h)
	抽凝/纯凝汽轮机改造为背压汽轮机的单位成本	73,000 ^c	元/MW
	新建 350 MW 级燃煤机组的单位成本	3,281,000 ^d	元/MW
	新建 660 MW 级燃煤机组的单位成本	2,912,000 ^d	元/MW
	新建 1000 MW 级燃煤机组的单位成本	2,904,000 ^d	元/MW
	新建 180 MW 级天然气联合循环机组的单位成本	2,874,000 ^d	元/MW
	新建 300 MW 级天然气联合循环机组的单位成本	2,407,000 ^d	元/MW
M1 情景	年度新增天然气消费量	445,364	TJ
	煤改气锅炉总容量	36,949	t/h
M2 情景	年度新增生活垃圾消费量	1,027,782	TJ
	年度掺烧燃煤量	114,198	TJ
	新建垃圾焚烧炉总容量	74,661	t/h
M3 情景	抽凝/纯凝汽轮机背压改造总容量	98,421	MW
M4 情景	被替代燃煤机组总容量	64,642	MW
	新建 350 MW 级燃煤机组总容量	22,820	MW
	新建 660 MW 级燃煤机组总容量	39,330	MW
	新建 1000 MW 级燃煤机组总容量	13,060	MW
M5 情景	被替代燃煤机组总容量	14,884	MW
	新建 180 MW 级天然气联合循环机组总容量	9,780	MW
	新建 300 MW 级天然气联合循环机组总容量	7,200	MW
综合情景	煤改气锅炉总容量	12,552	t/h
	新建垃圾焚烧炉总容量	70,220	t/h
	抽凝/纯凝汽轮机背压改造总容量	71,685	MW
	被大容量燃煤机组替代的机组总容量	24,180	MW
	新建 350 MW 级燃煤机组总容量	7,860	MW
	新建 660 MW 级燃煤机组总容量	16,980	MW
	新建 1000 MW 级燃煤机组总容量	4,060	MW
	被大容量天然气联合循环机组替代的机组总容量	14,779	MW
	新建 180 MW 级天然气联合循环机组总容量	8,100	MW
	新建 300 MW 级天然气联合循环机组总容量	8,700	MW

(1) $1 \text{ t/h}=0.65\text{MW}^{[23]}$, $1 \text{ MWh}=3.6 \text{ GJ}$, 2014 年全国火力发电设施的平均年利用小时数为 4739 小时^[64]。根据 M1 情景下年度新增天然气消费量和 M2 情景下的年度新增生活垃圾消费量, 则煤改气锅炉总容量和新建垃圾焚烧炉总容量 (t/h) 可由下列公式计算得出: 年度新增天然气/生活垃圾消费量 (GJ) \times 锅炉效率 $\div 3.6 \div 4739 \div 0.65$ 。

(2) a-d 数据源见附表 14。)

附表12 各减排情景下的燃料成本变化相关指标

情景	指标	数值	单位
情景	指标	数值	单位
全部情景	煤炭价格	1,082 ^a	CNY/tce
	天然气价格	1,887 ^b	
	垃圾处理补贴	368 ^c	
	柴油价格	4,366 ^d	
	高炉煤气价格	1,555 ^e	
	焦炉煤气价格	1,400 ^e	
	煤矸石价格	210 ^f	
	生物质价格	1,700 ^g	
	沼气价格	1,401 ^h	
M1 情景	机组剩余服役年限的累积新增天然气消费	6,359,922	
	累积削减煤炭消费	6,883,680	
M2 情景	累积新增生活垃圾消费	23,341,062	
	累积削减煤炭消费	19,527,163	
M3 情景	累积削减煤炭消费	17,417,970	TJ
	累积削减天然气消费	175,008	
	累积削减柴油消费	135,307	
	累积削减高炉煤气消费	730,708	
	累积削减焦炉煤气消费	128,418	
	累积削减煤矸石消费	1,816,639	
	累积削减生物质消费	4,968,684	
	累积削减沼气消费	3,268	
M4 情景	累积削减煤炭消费	11,503,120	
M5 情景	累积新增天然气消费	14,743,757	
	累积削减煤炭消费	20,559,646	

续附表12 各减排情景下的燃料成本变化相关指标

情景	指标	数值	单位
	累积削减煤炭消费	57,688,874	
	累积新增天然气消费	16,789,178	
	累积新增生活垃圾消费	20,604,809	
	累积削减柴油消费	135,307	
综合情景	累积削减高炉煤气消费	730,708	TJ
	累积削减焦炉煤气消费	128,418	
	累积削减煤矸石消费	1,816,639	
	累积削减生物质消费	757,530	
	累积削减沼气消费	3,268	

注：（1）1吨标准煤=29.27 GJ；（2）a-h 数据源见附表 14。

附表13 各减排情景下的电力收益变化相关指标

情景	指标	数值	单位
	燃煤发电上网电价	0.419 ^a	
全部情景	燃气发电上网电价	0.758 ^a	元/kWh
	垃圾焚烧发电上网电价	0.65 ^b	
M1 情景	机组剩余服役年限累积新增燃气供电量 /累积削减燃煤供电量	562,784	GWh
M5 情景	累积新增燃气供电量/累积削减燃煤供电量	1,971,056	
	累积削减燃煤供电量	3,052,218	GWh
综合情景	累积新增燃气供电量	2,292,041	
	累积新增垃圾焚烧供电量	760,177	

注：a-b 数据源见附表 14。

附表14 成本效益与材料消耗相关参数来源

所属 表格	对应 标注	数据来源
附表 11	a	汤广伟, 杨银仁, 常志勇. 燃煤锅炉燃气改造和新建燃气炉的经济性比较 [J]. 大氮肥, 2014, 37(6): 408-412.
	b	中国有色工程设计研究总院. 无锡惠联环保热电工程可行性研究报告 [R]. 2004. https://wenku.baidu.com/view/ddc48fdbb1717fd5360cba1aa8114431b90d8ee4.html .
	c	常序庆, 王芳. 抽凝式汽轮机改造为抽背式汽轮机的可行性研究 [J]. 化肥设计, 2014, 52, (4): 35-37.
	d	电力规划设计总院. 火电工程限额设计参考造价指标(2015 年水平) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
附表 12	a	上海市发改委. 关于调整本市部分供热企业蒸汽基准价格的通知 [EB/OL]. 2011. http://fgw.sh.gov.cn/gk/cxgk/14449.htm .
	b	北京市发改委. 关于调整本市非居民天然气销售价格的通知 [EB/OL]. 2015. http://www.bjpc.gov.cn/zwxx/tztg/201511/t9778184.htm .
	c	北京市政府. 关于建立生活垃圾处理调控核算平台意见的通知 [EB/OL]. 2010. http://law.wkinfo.com.cn/legislation/detail/MTAwMDEzOTAwNjY%3D .
	d	柴油价格 [EB/OL]. 2015. https://zhidao.baidu.com/question/649478163904292685 .
	e	煤气价格 [EB/OL]. 2017. https://www.zybang.com/question/d574ec65c21c9d45c9f1c7a69484062d.html .
	f	煤矸石价格 [EB/OL]. 2015. https://detail.1688.com/offer/575093354600.html?spm=a261b.8768596.0.0.3a991b5cBpNV5W .
	g	生物质价格 [EB/OL]. 2015. http://p4pdetail.hc360.com/p4pdetail/aladindex.html?confr=8&key=%25C9%25FA%25CE%25EF%25D6%25CA%25BF%25C5%25C1%25A3%25B3%25A7%25BC%25D2&bcid=684688567 .
	h	沼气价格 [EB/OL]. 2009. https://zhidao.baidu.com/question/96902446.html .
附表 13	a	国家能源局. 2013-2014 年度全国电力企业价格情况监管通报 [EB/OL]. 2015. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto92/201509/t20150902_1959.htm .
	b	国家发改委. 关于完善垃圾焚烧发电价格政策的通知[EB/OL]. 2012. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201204/t20120410_472395.html .