

非二氧化碳温室气体减排展望： 面向 2035 年的机遇与挑战



2025 年 9 月

致谢

本项目得到了由美国环保协会 (EDF) 北京代表处的支持。项目组特别鸣谢以下专家在项目研究过程中提供的支持与建议:

马翠梅 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心统计核算部主任

胡建信 北京大学环境科学与工程学院教授

高庆先 中国环境科学研究院研究员

高俊莲 中国矿业大学 (北京) 管理学院副教授

王 斌 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员

王 寅 德国国际合作机构 (GIZ) 高级项目经理

白富丽 北京大学环境科学与工程学院博士后

项目组感谢 iGDP 杨鹏对完善报告内容提供的建议, 包林洁提供版面设计。

报告作者

马越 陈美安 朱彤昕 胡敏

联系我们

邮箱: igdpoffice@igdp.cn

免责声明

本报告内容和观点仅代表作者的个人理解和观点, 旨在加强相关领域的讨论交流, 不代表支持方、作者所属机构、调研专家学者的立场和观点。本报告内容采用数据和信息均来自公开的信息和渠道, 我们力求准确和完整, 但难免偶有疏漏, 敬请谅解并指正。

引用建议

绿色创新发展研究院. (2025). *非二氧化碳温室气体减排展望: 面向 2035 年的机遇与挑战*. 北京: 绿色创新发展研究院.

目 录

摘 要	1	4.2 氧化亚氮减排机遇与挑战	39
Advancing Non-CO ₂ Greenhouse Gas Mitigation in China: Outlook to 2035	6	4.2.1 农业部门氧化亚氮减排机遇与挑战	39
1. 非二氧化碳温室气体减排具有重要意义	13	4.2.2 工业生产过程氧化亚氮减排机遇与挑战	42
1.1 非二氧化碳温室气体减排助力全球温升减缓	13	4.3 含氟温室气体减排机遇与挑战	43
1.2 非二氧化碳温室气体减排的多重效益	14	4.3.1 HFCs 减排机遇与挑战	43
1.3 非二氧化碳温室气体减排在我国碳中和愿景中 发挥重要作用	15	4.3.2 SF ₆ 减排机遇与挑战	45
2. 非二氧化碳温室气体涉及气体和部门范围广, 亟需系统性减排战略	16	4.3.3 PFCs 减排机遇与挑战	45
2.1 全球非二氧化碳温室气体排放情况	16	4.3.4 退役含氟温室气体无害化处理机遇与挑战	46
2.1.1 全球非二氧化碳温室气体分部门排放情况	16	5 国家自主贡献与非二氧化碳温室气体减排展望	47
2.1.2 全球非二氧化碳温室气体分气体排放情况	17	5.1 完善非二氧化碳温室气体减排政策与合作的顶层设计	47
2.2 我国非二氧化碳温室气体排放情况	18	5.1.1 增强国家自主贡献对非二氧化碳温室气体的 减排承诺	47
2.2.1 我国非二氧化碳温室气体分部门排放情况	19	5.1.2 加速《蒙特利尔议定书》履约进程	47
2.2.2 我国甲烷排放情况和趋势	20	5.1.3 推动双多边合作机制进一步发挥关键作用	47
2.2.3 我国氧化亚氮排放情况和趋势	21	5.1.4 优化国内非二氧化碳温室气体排放控制政策体系	47
2.2.4 我国含氟温室气体排放情况和趋势	22	5.2 重点领域的优先减排措施	48
3 非二氧化碳温室气体减排进展	25	5.2.1 甲烷领域的优先减排措施	48
3.1 全球非二氧化碳温室气体减排政策与合作进展	25	5.2.2 氧化亚氮领域的优先减排措施	48
3.1.1 全球非二氧化碳温室气体纳入国家自主贡献 进展情况	25	5.2.3 含氟温室气体领域的优先减排措施	49
3.1.2 全球甲烷减排政策与合作进展	26	5.2.4 行业综合治理领域的优先减排措施	49
3.1.3 全球氧化亚氮减排政策与合作进展	27	5.3 强化重点配套机制建设	49
3.1.4 全球含氟温室气体减排政策与合作进展	28	5.3.1 提升非二氧化碳温室气体排放的数据基础	49
3.2 我国非二氧化碳温室气体减排行动	29	5.3.2 发挥市场机制促进非二氧化碳温室气体减排	50
3.2.1 我国甲烷减排行动	29	5.3.3 加大财政和金融机制对非二氧化碳温室气体减排 的支持	50
3.2.2 我国氧化亚氮减排行动	31	5.3.4 建立健全绿色消费激励机制	51
3.2.3 我国含氟温室气体减排行动	32	5.3.5 持续推进科技创新与技术研发	51
4 我国非二氧化碳温室气体减排机遇与挑战	34	5.4 总结	52
4.1 甲烷减排机遇与挑战	34	附件 1: 2021 NDC 中非二温室气体控排相关政策及针对 2025 NDC 的建议	54
4.1.1 能源部门甲烷减排机遇与挑战	34	参考文献	57
4.1.2 农业部门甲烷减排机遇与挑战	35		
4.1.3 废弃物处理部门甲烷减排机遇与挑战	37		

摘要

非二氧化碳温室气体贡献了全球近一半的历史温升

非二氧化碳温室气体包括甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)，以及氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF₆)和三氟化氮(NF₃)等含氟温室气体，尽管在2023年全球人类活动带来的温室气体排放总量中占比25%，但是贡献了全球近一半的历史温升。随着全球气温长期平均值朝1.5°C阈值不断逼近，推进非二氧化碳温室气体(以下简称“非二温室气体”)减排成为加速缓解全球气候变化的必须行动。尤其是CH₄和HFCs，作为短寿命强效温室气体，其减排将带来显著的短期气候收益(CCAC, 2024)。此外，推进CH₄和N₂O减排还能实现改善空气质量、维护粮食安全和提高公众健康等一系列重要协同效益。

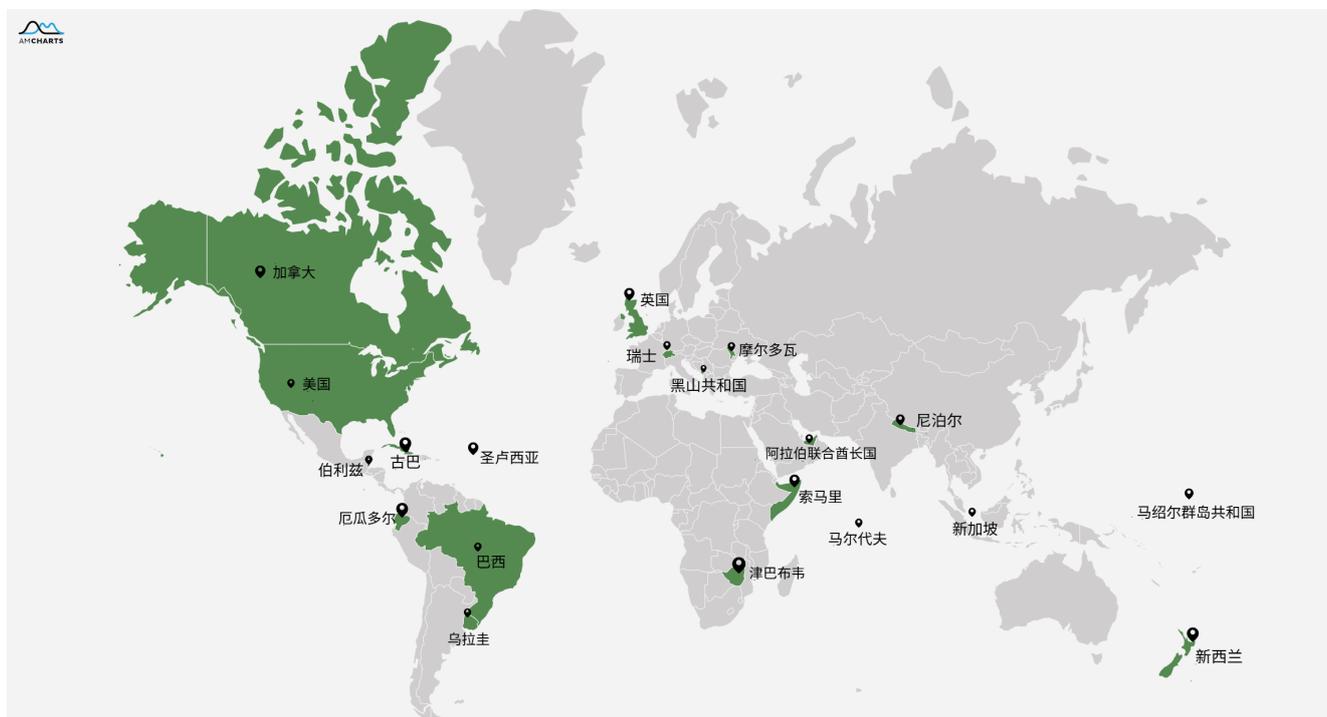
非二氧化碳温室气体减排国际实践

随着气候危机加剧，国际社会对非二温室气体关注的加强以及减排行动的加速，非二温室气体减排正在迎来新的机遇。全球多个国家和地区已采取积极措施，通过将非二温室气体控排纳入国家自主贡献、制定非二温室气体控排国家方案或部门行动、开展减排国际合作等形式，强化对非二温室气体的管控。其中有广为关注的“全球甲烷减排倡议”，自2021年联合国气候大会宣布以来，至今已有160个国家参与，承诺到2030年要将CH₄排放量在2020年水平上减少至少30%；也有欧盟在不断完善的含氟气体监管体系，2024年初更新的《含氟气体法规》在含氟气体的生产、销售、使用、进出口、泄漏监测、回收销毁等各环节建立起严格管控，并设立了到2050年淘汰HFCs的目标。

下表总结了多项主要的国际减排政策及合作行动。

气体	国别减排政策	国际减排合作
甲烷(CH ₄)	<ul style="list-style-type: none">美国：《美国甲烷减排行动计划》(2021年)加拿大：《更迅速、更深入：加拿大甲烷战略》(2022年)欧盟：《欧盟甲烷减排战略》(2020年)；《欧盟新甲烷法规》(2024年)巴西：《国家零甲烷计划》(2022年)；《石油和天然气开采低碳指南》(2024年)	<ul style="list-style-type: none">“全球甲烷减排倡议”：2021年发起，旨在到2030年将CH₄排放量在2020年水平上减少至少30%，迄今有160个国家参与。“减少有机废弃物甲烷宣言”：2024年发起，承诺在未来的国家自主贡献(NDC)中设定减少有机废弃物CH₄排放的部门目标或可测量的行动、路线图和政策，迄今有65个国家参与。
氧化亚氮(N ₂ O)	<ul style="list-style-type: none">欧盟：碳市场纳入对硝酸和己二酸氧化亚氮排放的管控(2013年)；《从农场到餐桌战略》(2020年)澳大利亚：碳信用单位计划为采取农业N₂O减排措施的企业和个人提供经济激励	<ul style="list-style-type: none">“硝酸气候行动项目”：2015年发起，旨在推动全球硝酸和尿素厂安装减少N₂O排放的装置，有16个国家签署参与项目。美国-巴西 Fertilize 4 Life 科研合作：2023年发起，致力于提高化肥施用效率以及减少化肥温室气体排放。
含氟温室气体(F-Gases)	<ul style="list-style-type: none">美国：《创新与制造法案》(2020年)欧盟：碳市场纳入铝生产过程的PFCs排放；更新《含氟气体法规》(2024年)日本：含氟气体全生命周期管理	<ul style="list-style-type: none">《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书<基加利修正案>》：2019年生效，旨在对HFCs的生产和消费进行管控，已在163个国家和地区获得批准。“全球降温承诺”：2023年发起，旨在到2050年将全球所有部门的制冷相关排放量在当前基础上减少至少68%，到2030年大幅增加可持续制冷的使用、并将全球新空调的平均效率提高50%。迄今有72个国家和16个地方参与者加入。

根据《巴黎协定》，各缔约国需在 2025 年提交面向 2035 年的国家自主贡献（NDC）目标，有望提出更多新的减排措施，为缓解全球短期快速升温 and 避免气候过冲提供助力。截至 2025 年 6 月，在已提交的新 NDC 中，作出非二温室气体减排相关承诺的国家如下图、表所示：



承诺类型	国家
具有单独的量化承诺	乌拉圭、加拿大、摩尔多瓦共和国、新西兰、圣卢西亚、津巴布韦、美国
具有分部门的减排承诺	阿拉伯联合酋长国、瑞士、津巴布韦、尼泊尔、索马里、伯利兹
具有减排措施或行动	阿拉伯联合酋长国、巴西、美国、乌拉圭、英国、厄瓜多尔、新加坡、马绍尔群岛共和国、津巴布韦、加拿大、黑山共和国、古巴、马尔代夫、摩尔多瓦共和国、尼泊尔、索马里、伯利兹

非二氧化碳温室气体减排的中国实践

我国国家领导人在联合国气候大会、气候和公正转型领导人峰会等多个场合宣布“将提交覆盖全经济范围、包括所有温室气体的 2035 年国家自主贡献”，如果能在本轮更新中提高非二温室气体减排的雄心，将彰显出我国应对气候变化的大国责任。

在我国推动实现碳达峰、碳中和目标的工作中，已经在逐步加强对非二温室气体减排的重视。例如，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》、《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》等文件明确要求“加大甲烷、氢氟碳化物、全氟化碳等其他温室气体的控制力度”、“逐步建立健全非二氧化碳温室气体排放统计核算体系、政策体系和管理体系”。

此外，我国近年也陆续发布针对具体非二温室气体的控排方案，包括 2023 年和 2025 年先后出台《甲烷排放控制行动方案》、《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》。同时也在推动具体部门的非二温室气体减排，例如，《全国碳排放权交易市场覆盖钢铁、水泥、铝冶炼行业工作方案》将铝冶炼行业的 PFCs 排放纳入管控；2025 年 8 月发布的《工业领域氧化亚氮排放控制行动方案》，提出要通过完善排放控制政策、提高减排技术创新能力和排放管理能力，实现工业领域 N₂O 回收利用和排放控制水平有效提高。

在完善政策体系的同时，我国也已形成一批相对成熟、具推广潜力的非二氧化碳温室气体减排技术与实践案例（如下表所示）；各行业、地方的减排行动探索也为未来减排工作的推进提供了可借鉴的实践样本，可支撑非二氧化碳减排政策的完善。

部门	领域	技术	案例	挑战
CH₄				
能源	煤矿开采	煤矿瓦斯综合利用技术	山西省阳泉市阳煤二矿桑掌乏风氧化热电联供项目	低浓度瓦斯和风排瓦斯利用项目收益率低、技术挑战大，企业积极性缺乏。
农业	畜禽养殖	调整饲料结构 / 添加辅料	江西省正合环保集团畜禽粪污资源化、资源化利用项目	在保证粮食安全的前提下，我国“大国小农”的基本国情导致甲烷排放源分散，规模化减排挑战大，农户缺乏经济激励；
		粪污管理 / 肥料化、资源化利用		
	水稻种植	稻田灌溉模式调整 农田管理措施调整（少、免耕，秸秆腐熟还田） 高产低排水稻品种	云南昆明、四川简阳的气候友好水稻种植减排实践	
废弃物	固废处理	源头减量、垃圾分类	广东省深圳市下坪填埋场填埋气综合利用实践	各地区的垃圾、污水处理规模、能力不平衡，部分地区的处理模式、设备相对落后，治理难度提升。
		餐厨垃圾厌氧消化		
		垃圾填埋气回收利用		
	废水处理	污水管网清淤管护	北京高安屯再生水厂餐厨垃圾和污泥联合厌氧消化	
		安装污泥厌氧消化系统 露天厌氧池加装沼气抽采系统		
N₂O				
农业	肥料管理	改进肥料种类：采用有机肥 / 添加生物炭 / 采用缓控释肥和硝化抑制剂	中化化肥公司智能配肥服务站智能配肥服务	我国化肥施用强度仍超过国际公认的安全上限； 未来需更多维技术和模式的探索。
		改善施用方式：测土配方 / 肥料深施 / 水肥一体化 / 精准农业		
	畜禽养殖	优化粪污管理	河南牧原集团楼房养猪项目	
工业	己二酸生产	苯氧化法 / 精馏法 / 热分解和催化分解法	重庆华峰化工研发了将己二酸尾气中的 N ₂ O 进行低温分解的催化剂	安装并使用 N ₂ O 减排装置进行己二酸和硝酸生产的企业数量有限； 催化剂自主研发起步晚。
	硝酸生产	一级控制措施：氨氧化催化剂	四川蜀泰化工自主研发了 N ₂ O 炉内减排催化剂用于硝酸装置 N ₂ O 减排	
		二级控制措施：在氨氧化催化剂之后布设高温分解催化剂 三级控制措施：借助催化分解或者催化还原等技术脱除硝酸生产尾气中的 N ₂ O		

部门	领域	技术	案例	挑战
HFCs				
工业生产过程和产品使用	制冷剂	研发与使用低 GWP 值替代品	芜湖美的工业园 R290 新一级能效空调产品下线 环新氟材通过三氟乙烯为原料制备 HFO-1234fy	天然工质制冷剂存在提升安全性、成本、能效等需求； HFOs 存在生态环境风险。
		制冷剂回收再生技术	天津澳宏环保材料有限公司制冷剂回收再生技术	
	副产 HFC-23	改进生产工艺	浙江省化工研究院与中昊晨光开发的 HFC-23 转化技术	
		资源化利用		
PFCs				
工业生产过程和产品使用	电解铝	低阳极效应设计及控制技术	中国铝业股份有限公司、酒泉钢铁（集团）有限责任公司、云南铝业股份有限公司等企业开展低阳极效应铝电解技术工业示范	政策层面尚缺乏有利的激励与监管。
SF₆				
工业生产过程和产品使用	电力	SF ₆ 减少或替代技术	国家电网 SF ₆ /N ₂ 混合气体 GIS 设备	政策层面尚缺乏有利的激励与监管。
		SF ₆ 回收净化技术	国家电网省级 SF ₆ 回收处理中心	
退役 F-Gases				
工业生产过程和产品使用	无害化处理	等离子体技术	中昊晨光化工研究院有限公司等离子裂解 HFC-23 项目 南方电网贵州电力科学研究院低温等离子体降解 SF ₆ 装置	等离子体方法处理 SF ₆ 废气时可能会产生部分有毒副产物。

中长期强化非二氧化碳温室气体减排行动的建议

完善非二温室气体减排政策体系是一个长期系统性工程，一方面，针对 2025 年 NDC 目标更新，可结合当前我国非二温室气体排放现状，以及已有非二温室气体减排政策、减排技术与实践和面临的挑战，将相关减排承诺与行动纳入新的 NDC 中（具体内容详见附件 1）；另一方面，针对中长期国内政策体系，本报告建议继续完善顶层设计、识别优先减排的重点领域以及强化减排配套机制，并提出了如下具体建议：

气体	甲烷 (CH ₄)	氧化亚氮 (N ₂ O)	含氟温室气体 (F-Gases)
顶层设计与减排合作			
国际机制	<ul style="list-style-type: none"> 增强 2025NDC 对非二温室气体的减排承诺，提出非二温室气体控排量化目标，并将行业行动纳入 NDC； 加速《基加利修正案》履约，加快国内 HFCs 减排布局，以应对国际市场对环保制冷产品的需求； 鼓励不同地区、城市间、以及行业、企业和非政府组织间开展减排合作； 发挥“一带一路”倡议和南南合作平台在非二温室气体减排领域的积极作用，促进中国在农业、制冷等领域减排实践的国际交流。 		

气体	甲烷 (CH ₄)	氧化亚氮 (N ₂ O)	含氟温室气体 (F-Gases)
国内政策	<ul style="list-style-type: none"> 制定综合性、分气体的非二温室气体减排方案； 对排放量或排放气体种类多样、减排具有复杂性的重点部门和行业，考虑出台行业综合性非二温室气体控排规划，比如农业非二温室气体减排综合行动方案； 将非二温室气体纳入到“减污降碳”的政策框架体系下，促进形成最具成本有效性的减排措施和最具综合效益的协同控制方案。 		
	<ul style="list-style-type: none"> 加速推进 CH₄ 减排的地方行动。 	<ul style="list-style-type: none"> 出台针对 N₂O 的总体控排方案。 	<ul style="list-style-type: none"> 更新《国家制冷方案》，推动 HFCs 减排同时提高能效标准。
重点部门或行业的优先减排措施			
农业	<ul style="list-style-type: none"> 推动以粮食安全和乡村振兴为导向的农业非二综合减排行动：结合我国大国小农的基本国情，聚焦对成本有效性的减排实践的识别，通过农业技术推广服务中心以及新型农业经营主体和服务主体来助力推广高产低排放的减排技术，在保证粮食安全的前提下，提高我国农业生产应对气候变化的韧性。 		
工业		<ul style="list-style-type: none"> 落实《工业领域氧化亚氮排放控制行动方案》，通过纳入《绿色金融支持项目目录》或创新的市场机制为工业 N₂O 提供经济激励，推动工业 N₂O 领域率先减排。 	<ul style="list-style-type: none"> 以末端治理和产品标准更新为突破促进 HFCs 削减，通过加完善制冷剂标准，促进低 GWP 制冷剂推广； 结合企业减排实践探索出台相应的 PFCs 和 SF₆ 减排配套支持政策。
能源	<ul style="list-style-type: none"> 在已出台政策基础上，推动更多元化的金融产品开发以及绿色金融政策与减排项目的对接，强化超低浓度煤矿瓦斯的排放控制和综合利用； 加强对废弃矿井 CH₄ 逸散监测和治理利用技术研发，尽快摸清废弃矿井排放底数并提高对废弃矿井 CH₄ 的精准测算。 		
配套措施			
数据基础	<ul style="list-style-type: none"> 建立并完善非二温室气体排放的核算、报告和核查 (MRV) 制度，强化对非二氧化碳温室气体排放的监测，利用“自上而下”和“自下而上”不同尺度监测相结合的方法对排放数据进行交叉验证，提升我国非二氧化碳温室气体排放数据的准确性与透明度； 将数据基础强化工作与企业环境信息强制和自愿披露工作相结合。 		
市场机制	<ul style="list-style-type: none"> 考虑将更多非二温室气体排放源纳入碳市场的同时，对缺乏成本有效性的非二减排实践或者前期研发投入高的减排技术提供市场化的激励机制。 		
财政和金融	<ul style="list-style-type: none"> 加大对非二温室气体减排技术的财政投入； 鼓励与支持金融机构针对不同类型非二温室气体减排项目和技术开发绿色信贷、绿色债券、绿色保险等多种绿色金融产品，拓展非二温室气体减排项目的融资渠道； 进一步将非二温室气体减排技术纳入《绿色低碳转型产业指导目录》、《绿色金融支持项目目录》和《绿色债券支持项目目录》，进一步拓展《气候投融资试点地方气候投融资项目入库参考标准》中有关非二温室气体减排项目的实践，并在具体实施中持续金融创新。 		
绿色消费	<ul style="list-style-type: none"> 考虑将加强绿色消费的激励机制与更多政策有机结合，利用财政、税收和价格等措施引导社会对绿色低碳产品的消费。尤其在农业领域，可以通过农产品碳标识认证制度引导社会生产和消费预期，逐步提升消费者对绿色低碳农产品的市场价值认可； 在尊重市场发展客观规律的基础上，鼓励政府拓展绿色采购规模。 		
科技创新	<ul style="list-style-type: none"> 强化重点领域非二氧化碳温室气体减排与替代技术研发与创新，加强技术推广与行业和地方非二减排政策衔接与协同，例如将《国家重点推广的低碳技术目录》与绿色债券和绿色金融的《支持项目目录》进行结合。 		

Advancing Non-CO₂ Greenhouse Gas Mitigation in China: Outlook to 2035

The Disproportionate Impact of Non-CO₂ Greenhouse Gases

Non-CO₂ greenhouse gases (GHGs), including methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), and fluorinated gases (HFCs, PFCs, SF₆, NF₃), making up only about 25% of global anthropogenic GHG emissions, but their cumulative radiative forcing has contributed nearly half of historical warming.

With global warming nearing the 1.5° C threshold, mitigating non-CO₂ GHGs is essential for avoiding climate overshoot. Action on short-lived climate pollutants such as CH₄ and HFCs is particularly urgent, as mitigation can deliver rapid climate benefits (CCAC, 2024). Moreover, reducing CH₄ and N₂O also improves air quality, strengthens food security, and enhances public health, amplifying the benefits of climate action.

International Action to Reduce Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions

As the climate crisis deepens, global efforts to cut non-CO₂ GHG emissions are accelerating. Countries and regions are incorporating non-CO₂ targets into their Nationally Determined Contributions (NDCs), developing national or sector-specific mitigation programs, and advancing international cooperation.

Key initiatives include the Global Methane Pledge, launched at COP 26 in 2021, under which 160 countries committed to reducing methane emissions by at least 30% from 2020 levels by 2030. Another milestone is the European Union's revised F-gas Regulation, adopted in 2024, which introduces comprehensive controls on fluorinated gases and sets a long-term goal of phasing out HFCs production and consumption by 2050.

The table below highlights major national and international mitigation policies and collaborative efforts underway.

	National Mitigation Policies	International Mitigation Cooperation
Methane (CH₄)	<ul style="list-style-type: none"> • United States: Methane Reduction Action Plan, 2021. • Canada: Faster and Further: Canada's Methane Strategy, 2022. • European Union: Methane Reduction Strategy, 2020; EU New Methane Regulation, 2024. • Brazil: National Zero Methane Plan, 2022; Guidelines to Promote Decarbonization in Oil and Gas Exploration, 2024. 	<ul style="list-style-type: none"> • Global Methane Pledge, 2021, endorsed by 160 countries: Commitment to reduce methane emissions by at least 30% from 2020 levels by 2030. • Declaration on Reducing Methane from Organic Waste, 2024, endorsed by 65 countries: Commitment to establish sectoral targets or measurable actions, roadmaps, and policies to reduce CH₄ emissions from organic waste in future NDCs.
Nitrous Oxide (N₂O)	<ul style="list-style-type: none"> • European Union: Inclusion of N₂O emissions from nitric acid and adipic acid production in the carbon market, 2013; Farm to Fork Strategy, 2020. • Australia: Carbon Credit Units Scheme providing economic incentives for agricultural N₂O mitigation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitric Acid Climate Action Group, 2015, endorsed by 16 countries: Promotes installation of N₂O abatement equipment in nitric acid and urea plants. • United States–Brazil Fertilize 4 Life research collaboration, 2023: Enhances fertilizer application efficiency and reduces fertilizer-related GHG emissions.
Fluorinated Gases (F-Gases)	<ul style="list-style-type: none"> • United States: Innovation and Manufacturing Act, 2020. • European Union: Inclusion of PFC emissions from aluminum production in the carbon market; revised F-gas Regulation, 2024. • Japan: Lifecycle management of fluorinated gases. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kigali Amendment of Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, 2019, ratified by 163 countries and regions: Controls the production and consumption of HFCs. • Global Cooling Pledge, 2023, endorsed by 72 countries and 16 subnational participants: Targets at least a 68% reduction in cooling-related emissions across all sectors by 2050 compared to current levels, a substantial increase in sustainable cooling by 2030, and a 50% improvement in the average efficiency of new air conditioners.



Commitment Type	Parties
Quantified commitments separately for non-CO ₂ GHGs	Uruguay, Canada, Republic of Moldova, New Zealand, Saint Lucia, Zimbabwe, United States ¹
Sector-specific quantified commitments involving non-CO ₂ GHGs	United Arab Emirates, Switzerland, Zimbabwe, Nepal, Somalia, Belize
Mitigation measures or actions addressing non-CO ₂ GHGs	United Arab Emirates, Brazil, United States, Uruguay, United Kingdom, Ecuador, Singapore, Republic of the Marshall Islands, Zimbabwe, Canada, Montenegro, Cuba, Maldives, Republic of Moldova, Nepal, Somalia, Belize

China's Actions to Mitigate Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions

China's national leaders have announced at multiple international forums, including the United Nations Climate Change Conference and the Leaders' Summit on Climate and Just Transition, that the country will submit a NDC for 2035 covering all economic sectors and all greenhouse gases. Enhancing ambition in non-CO₂ GHG mitigation in this upcoming NDC update would underscore China's commitment as a major actor in addressing climate change.

In pursuit of its dual-carbon goals of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality, China has steadily increased its focus on non-CO₂ GHG mitigation. Key policy documents, such as the *Outline of the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives through the Year 2035*, as well as the *Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy*, explicitly call for “intensifying control of methane (CH₄), hydrofluorocarbons (HFCs), perfluorocarbons (PFCs), and other greenhouse gases,” and for “gradually establishing and improving the statistical accounting system, policy framework, and management system for non-CO₂ GHG emissions.”

Building on this policy framework, China has issued a series of control plans targeting specific non-CO₂ GHGs, including the *Methane Emission Control Action Plan* and the *Country Program for Implementing Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (2025–2030)*. Sector-specific mitigation efforts are also underway. For example, the *Work Plan for the inclusion of the Cement, Iron and Steel, and Aluminum Industries in National Carbon Trading Market* incorporates PFC emissions from aluminum smelting under regulatory oversight. In August 2025, the *Action Plan for Controlling Nitrous Oxide Emissions in the Industrial Sector* was released, setting out measures to strengthen emission control policies, enhance innovation capacity in abatement technologies and emission management, and improve N₂O recovery and mitigation performance across the industrial sector.

Alongside these policy measures, China has developed a set of relatively mature and scalable technologies and practical cases for mitigating non-CO₂ GHG emissions (see table below). Pilot initiatives at both sectoral and local levels provide valuable lessons to guide future mitigation efforts and support the ongoing refinement of non-CO₂ mitigation policies.

¹ The United States has not set a specific target commitment for non-CO₂ greenhouse gas reductions, but it has projected that CH₄ emissions could be reduced by at least 35% from 2005 levels by 2035.

Sector	Field	Technology	Case	Challenges
CH₄				
Energy	Coal mining	Comprehensive utilization of coal mine gas	Yangquan No.2 Coal Mine, Shanxi – Ventilation Air Methane (VAM) Oxidation Combined Heat and Power (CHP) Project	Low profitability and significant technical barriers lead to limited enterprise motivation.
Agriculture	Livestock farming	Feed structure adjustment / additives	Nanchang, Jiangxi – Livestock manure resource and energy utilization project	Emissions are highly dispersed due to China's predominantly small-scale farming structure, with limited economic incentives for mitigation.
		Manure management / fertilizer & energy utilization		
	Rice cultivation	Adjustment of irrigation patterns	Kunming, Yunnan & Jiayang, Sichuan – Climate-friendly rice farming	
Farmland management: reduced or no-tillage / straw incorporation	High-yield low-emission rice varieties			
Waste	Solid waste treatment	Source reduction & waste sorting	Shenzhen, Guangdong – Xiaping Landfill gas utilization project	Regional disparities in waste and wastewater treatment capacity, along with outdated equipment in some areas, make effective management more challenging.
		Kitchen waste anaerobic digestion		
		Landfill gas recovery and utilization		
	Wastewater treatment	Sewer dredging & maintenance	Gao'antun Reclaimed Water Plant, Beijing – Co-digestion of kitchen waste and sludge	
		Anaerobic digestion systems for sludge		
		Biogas extraction from open anaerobic ponds		
N₂O				
Agriculture	Fertilizer management	Fertilizer improvement: organic fertilizers / biochar / controlled-release fertilizers / nitrification inhibitors	Sinochem Fertilizer Co. – Intelligent fertilizer blending service	Fertilizer use intensity remains above internationally recognized safe limits, highlighting the need for multi-dimensional technological and model innovations.
		Application methods improvement: soil testing & formulated fertilization / deep placement / fertigation / precision agriculture		
	Livestock farming	Manure management optimization	Muyuan Group, Henan – High-rise pig farming	

Sector	Field	Technology	Case	Challenges
Industry	Adipic acid production	Benzene oxidation / distillation / thermal and catalytic decomposition	Huafeng Chemical, Chongqing – Low-temperature catalyst for N ₂ O decomposition from adipic acid tail gas	Limited adoption of N ₂ O abatement devices in adipic acid and nitric acid production. Delayed start in domestic catalyst R&D.
	Nitric acid production	Primary: ammonia oxidation catalyst	Shutai Chemical, Sichuan – In-furnace N ₂ O reduction catalyst for nitric acid	
		Tertiary: catalytic decomposition or reduction of N ₂ O in tail gas		
PFCs				
Industrial processes & product use	Electrolytic aluminum	Low-anode-effect design & control	Huasheng Aluminum Co., Ltd., Shanxi – 300kA electrolytic cell application	Insufficient policy incentives and regulatory frameworks.
SF₆				
Industrial processes & product use	Power	Development of alternatives in power equipment	State Grid – SF ₆ /N ₂ gas-insulated switchgear	Insufficient policy incentives and regulatory frameworks.
		SF ₆ recycling technology	State Grid – Provincial SF ₆ recycling centers	
End-of-life F-Gases				
Industrial processes & product use	Safe disposal	Plasma technology	Zhonghao Chenguang Research Institute – HFC-23 plasma decomposition project China Southern Power Grid – low-temperature plasma SF ₆ degradation device	Potential formation of toxic by-products during plasma treatment.

Recommendations for Strengthening China’s Non-CO₂ GHGs Emission Reduction Actions

Improving China’s policy framework for non-CO₂ GHG mitigation is a long-term and systematic effort. The 2025 NDC update provides an important opportunity to integrate targeted mitigation commitments and actions, informed by the current status of China’s non-CO₂ GHG emissions, existing mitigation policies, available technologies and practices, as well as key implementation challenges (see Annex 1 for details).

Looking beyond the 2025 NDC update, China’s medium- and long-term domestic policy framework should focus on further refining the top-level design, identifying priority sectors for emission reductions, and strengthening supporting mechanisms. Specific recommendations are as follows:

	CH ₄	N ₂ O	F-Gases
Top-level design and mitigation cooperation			
International Mechanisms	<ul style="list-style-type: none"> Strengthen non-CO₂ GHGs mitigation commitments in the 2025 NDC, propose quantified reduction targets, and integrate sector-specific actions into the NDC. Accelerate implementation of the <i>Kigali Amendment</i> and expedite domestic HFC mitigation efforts to meet international demand for environmentally friendly refrigeration products. Promote emission reduction cooperation across regions, cities, industries, enterprises, and NGOs. Leverage the Belt and Road Initiative and South-South cooperation platforms to facilitate international exchange of China's non-CO₂ mitigation practices in agriculture, refrigeration, and other fields. 		
Domestic policies	<ul style="list-style-type: none"> Develop comprehensive, gas-specific non-CO₂ mitigation plans. For key sectors with large emissions, diverse gases, and complex mitigation challenges, consider issuing integrated control plans, e.g., a comprehensive agricultural non-CO₂ mitigation action plan. Incorporate non-CO₂ GHGs mitigation into the "synergy of pollution reduction and carbon abatement" policy framework to foster the most cost-effective mitigation measures and maximize co-benefits. 		
	<ul style="list-style-type: none"> Accelerate local methane mitigation actions. 	<ul style="list-style-type: none"> Issue a dedicated N₂O control plan. 	<ul style="list-style-type: none"> Update the <i>National Cooling Plan</i> to advance HFC mitigation while also raising energy efficiency standards.
Priority mitigation measures for key sectors/industries			
Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> Promote comprehensive non-CO₂ mitigation actions that support food security and rural revitalization. In light of China's predominantly small-scale farming structure, focus on identifying cost-effective mitigation practices and scaling up high-yield low-emission technologies via agricultural technology service centers and new agricultural business/service entities. Improve agricultural resilience to climate change while ensuring food security. 		
Industry		<ul style="list-style-type: none"> Implement the <i>Action Plan for Controlling Nitrous Oxide Emissions in the Industrial Sector</i>, providing economic incentives for industrial N₂O mitigation through inclusion in the <i>Green Finance-Supported Projects Catalogue</i> and innovative market mechanisms. 	<ul style="list-style-type: none"> Advance HFC reduction through improved end-use treatment and updated product standards; revise refrigerant standards to foster low-GWP refrigerant adoption. Develop targeted mitigation policies for PFCs and SF₆ based on enterprise emission reduction practices.

Energy	<ul style="list-style-type: none"> • Building on existing policies by further developing diversified financial products and align green finance measures with mitigation projects to strengthen the control and integrated utilization of ultra-low concentration coal mine methane. • Improve monitoring of methane emissions from abandoned mines and advance technologies for their capture and utilization; accelerate emission baseline assessment and enhance the accuracy of methane accounting for abandoned mines. 		
Supporting measures			
Data foundation	<ul style="list-style-type: none"> • Improve measurement, reporting, and verification (MRV) systems for non-CO₂ GHG emissions by integrating “top-down” and “bottom-up” monitoring approaches for cross-validation, enhancing the accuracy and transparency of China’s non-CO₂ emission data. • Align MRV improvements with both mandatory and voluntary corporate environmental disclosure requirements. 		
Market mechanisms	<ul style="list-style-type: none"> • Explore the inclusion of additional non-CO₂ emission sources in the carbon market and provide market incentives for mitigation practices that are not yet cost-effective or for technologies requiring upfront R&D investments. 		
Finance and fiscal policy	<ul style="list-style-type: none"> • Increase public investment in non-CO₂ mitigation technologies. • Support financial institutions in developing green credit, green bonds, green insurance, and other green financial products for diverse non-CO₂ mitigation projects and technologies. • Further incorporate non-CO₂ mitigation technologies into the <i>Guidelines for Green and Low-Carbon Industry Transformation</i>, <i>Green Finance-Supported Projects Catalogue</i>, and <i>Green Bond Endorsed Projects Catalogue</i>; expand the coverage of non-CO₂ mitigation projects in the <i>Reference Standards for Climate Investment and Financing Pilot Projects</i>, supported by ongoing financial innovation in implementation. 		
Green consumption	<ul style="list-style-type: none"> • Consider integrating green consumption incentives into broader policy frameworks; use fiscal and pricing tools to steer consumers toward green and low-carbon products. In the agricultural sector, the carbon-labeling and certification system for agricultural products can shape production and consumption expectations, gradually enhancing market recognition of green low-carbon agricultural products. • Encourage governments to scale up green procurement while respecting market development principles. 		
Technological innovation	<ul style="list-style-type: none"> • Strengthen R&D and innovation for non-CO₂ GHG mitigation and substitution technologies in key fields; improve technology dissemination and align efforts with sectoral and local non-CO₂ mitigation policies. For example, coordinate the <i>National Catalogue of Key Low-Carbon Technologies for Promotion</i> with <i>Green Bond/Finance Projects Catalogue</i>. 		

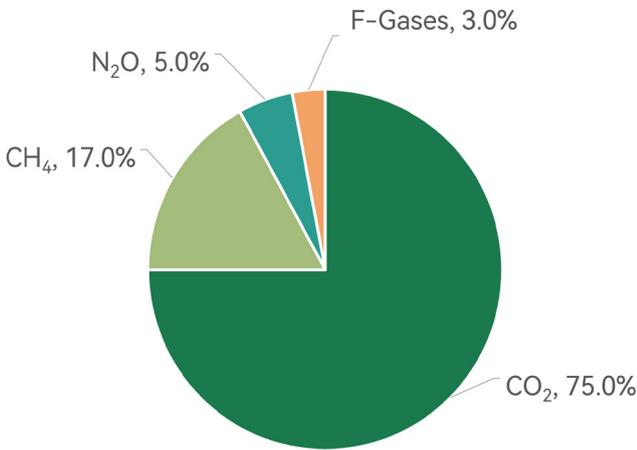
1. 非二氧化碳温室气体减排具有重要意义

1.1 非二氧化碳温室气体减排助力全球升温减缓

世界气象组织（WMO）指出，2024 年是有记录以来最热的一年，全球平均地表温度高出工业化前水平约 1.55°C (World Meteorological Organization, 2025)。虽然单年升温突破 1.5°C 阈值并不意味着《巴黎协定》长期目标的失败，但是足以敲响警钟，加速应对气候变化行动刻不容缓。其中，具有高升温潜势（Global Warming Potential, GWP）的非二氧化碳温室气体（以下简称“非二温室气体”）减排潜力不容忽视。

如图 1 所示，包括甲烷 (CH₄)、氧化亚氮 (N₂O)、氢氟碳化物 (HFCs)、全氟化碳 (PFCs)、六氟化硫 (SF₆)、三氟化氮 (NF₃) 在内的非二温室气体，尽管在全球人类活动带来的温室气体排放中仅占 25% (United Nations Environment Programme, 2024)，但是由于其升温效应远高于二氧化碳，大量排放正在加剧全球变暖。如图 2 所示，来自政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告的分析显示，CH₄ 贡献了全球历史升温的 0.5°C，N₂O 和含氟温室气体 (F-gases) 分别贡献了 0.1°C，而同时期的二氧化碳的升温贡献为 0.8°C（图 2）。针对近期出现的极端高温，2024 年 7 月联合国秘书长呼吁采取行动应对极端高温的讲话中指出，减少 CH₄、HFCs 在内的助推全球变暖的短寿命气候污染物对减缓气候变化有重要作用 (United Nations, 2024)。

图 1 全球不同温室气体占比 (2023)



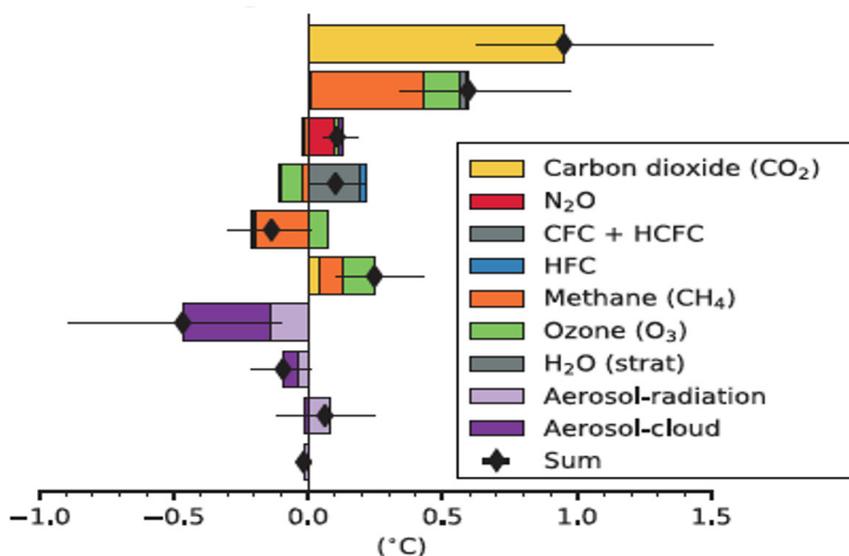
数据来源: UNEP, 2024

表 1 部分温室气体 GWP 数值 (CO₂ GWP=1)

气体	生命周期 (年)	GWP20	GWP100
CH ₄	11.8	81.2	27.9
N ₂ O	109	273	273
HFC-23	228	12400	14600
HFC-32	5.4	2690	771
HFC-125	30	6740	3740
HFC-134a	14	4140	1530
PFC-14	50000	5300	7380
PFC-116	10000	8940	12400
SF ₆	3200	18300	25200
NF ₃	569	13400	17400

数据来源: IPCC, AR6 Report

图 2 不同气候污染物对地面温影响 (1750-2019)



数据来源: IPCC, AR6 Report

近期的科学评估显示, 采取快速行动来减少非二温室气体排放可以在未来 15 年内降低温升速度和程度。研究表明, 与仅在能源部门减少非二温室气体排放的行动相比, 针对所有部门的非二减排努力可使峰值升温降低 0.1°C, 世纪末升温降低 0.3°C (Ou 等, 2022)。此外, 将脱碳行动与其他额外的非二减排措施相结合, 可以将 2030 年到 2050 年间的升温速度降低约 50%, 其中接近一半的贡献来自 CH₄ (Dreyfus 等, 2022)。

1.2 非二氧化碳温室气体减排的多重效益

非二温室气体减排不仅可以加速减缓全球气候变化, 同时也有助于改善空气质量、维护粮食安全和提高公众健康。

主要非二温室气体的 CH₄ 也是地面臭氧形成的前体物。长期暴露在地面臭氧超标的环境中是导致全球数百万人因呼吸道疾病过早死亡的主要原因 (CCAC secretariat, 2017), 并且也与玉米、小麦、大豆和稻米等农作物减产密切相关 (Pei 等, 2024)。根据气候与清洁空气联盟 (CCAC) 与联合国环境署 (UNEP) 联合发布的《全球甲烷评估》, 每减排一百万吨的 CH₄ 相当于每年可减少 1430 例过早死亡、4000 例与哮喘有关的就医, 14.5 万吨由臭氧导致的粮食减产, 以及由于极端高温导致的 400 万小时的工作时长损失 (UNEP and CCAC, 2021)。

对于 N₂O 而言, 一方面, 其排放在导致全球温室效应的同时也会加剧臭氧层消耗, 使得人类暴露于过多的紫外辐射 (UNEP, 2023)。研究显示, 尽管《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》(后称《蒙特利尔议定书》) 通过对主要的消耗臭氧层物质进行控制, 从而对臭氧层恢复产生了积极效果, 但是不受议定书控制的 N₂O 持续排放正在成为破坏臭氧层的主要气体之一 (UNEP, 2023)。联合国环境规划署在 2022 年发布的对臭氧层破坏的科学评估报告中提到, 2016 年到 2020 年期间人类活动导致的 N₂O 排放量 (采用 CFC-11 当量) 是 2020 年全球 CFCs 排放量的两倍, N₂O 排放也将延缓臭氧层的恢复 (World Meteorological Organization, 2022)。另一方面, 由于固定源排放的大气污染物氮氧化物 (NO_x) 中也含有少量的 N₂O, 针对 N₂O 的减排也将对环境污染治理带来协同效益, 包括减少光化学污染、土壤酸化、以及缓解水体富营养化和生态系统失衡的问题。

另外，针对化石燃料不完全燃烧的非二温室气体减排措施还可以减少包括黑碳在内的其他共同排放污染物，实现健康和气候的双赢。例如，石油行业长期以来采取天然气燃除的方式处理生产过程中的伴生天然气，据世界银行估算，2021年天然气燃除导致了3900万吨CO₂e的CH₄和黑碳排放（World Bank, 2022），且燃除还会导致挥发性有机化合物（VOCs）、氮氧化物（NO_x）等空气污染物排放。对此，天然气回注、生产液化天然气等措施可以实现协同减排效益。

1.3 非二氧化碳温室气体减排在我国碳中和愿景中发挥重要作用

作为非二温室气体排放的大国之一，我国非二减排行动对碳中和目标实现有重要意义。随着我国能源低碳转型的加速，加快推进非二氧化碳温室气体管控，既彰显我国应对气候变化的大国责任，又体现了控制排放总量增长的坚定决心。

研究指出，到2030年后，随着二氧化碳的快速减排，非二温室气体占总温室气体排放比例将会上升，因此将成为2050年实现深度脱碳的重点领域和部门（项目综合报告编写组，2020）。研究显示，在实施当前国内外所有可行的非二减排技术和实践的情景下，我国非二温室气体在2050年仍有12亿吨二氧化碳当量（CO₂e）左右，减排依然面临挑战（Lin等，2022）。因此，尽早对非二温室气体减排进行部署，加强对非二温室气体排放的管控政策和技术研发，将推进我国绿色低碳的长期可持续发展和碳中和愿景的实现。



2. 非二氧化碳温室气体涉及气体和部门范围广，亟需系统性减排战略

2.1 全球非二氧化碳温室气体排放情况

2023 年，全球人类活动温室气体排放总量为 571 亿吨二氧化碳当量（CO₂e），其中，非二氧化碳温室气体排放占比 25%，达到 141 亿吨 CO₂e (United Nations Environment Programme, 2024)，CH₄、N₂O 和 F-Gases 分别贡献了 17%、5% 和 3%。

2.1.1 全球非二氧化碳温室气体分部门排放情况

非二氧化碳温室气体的排放主要来自能源供应、农业活动、工业生产过程和产品使用以及废弃物管理部门 (EDGAR, 2024)。

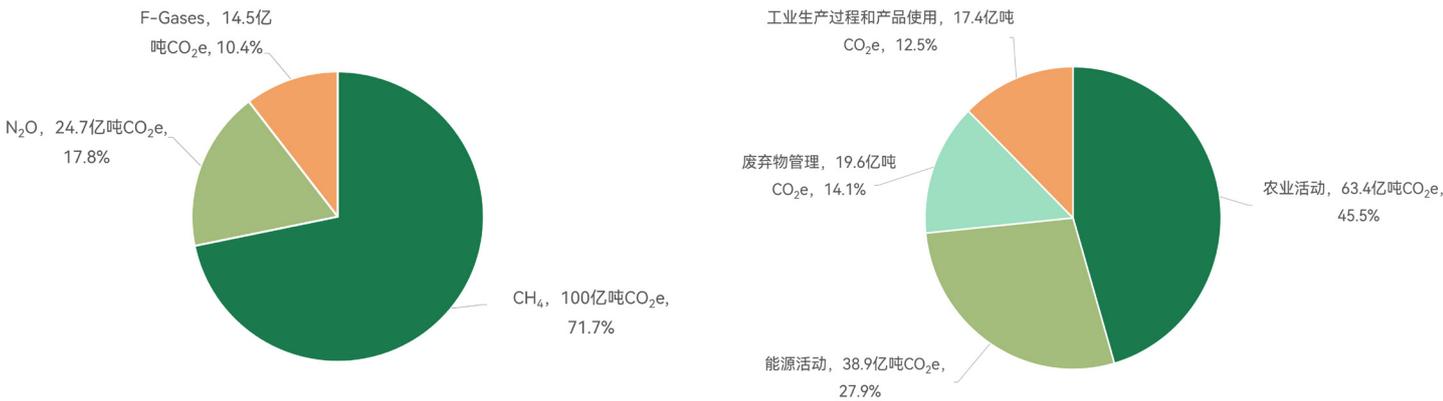
作为最主要排放源，农业部门在非二氧化碳排放总量中占比 45.5%，主要排放源包括畜禽养殖和稻田种植。

能源部门以 27.9% 的排放占比成为了第二大排放源，其排放绝大部分来自石油、天然气、煤炭等化石燃料的生产和使用。

废弃物管理部门的排放量在全部非二氧化碳温室气体中占比接近 14%，而废弃物填埋产生的 CH₄ 排放是部门内最重要的排放源。

另一个不容忽视的非二氧化碳温室气体排放源来自工业生产过程和产品使用，其排放占非二氧化碳温室气体排放量比重达到 12.5%。在这个部门内，以化工生产为代表的工业生产过程会排放大量的 N₂O 和 F-Gases，此外，含有 F-Gases 的空调设备、消防灭火器、电力设备等产品的使用也会大量增加排放。

图 3 2023 年全球非二氧化碳温室气体分气体排放情况（左）全球非二氧化碳温室气体分排放源排放情况（右）

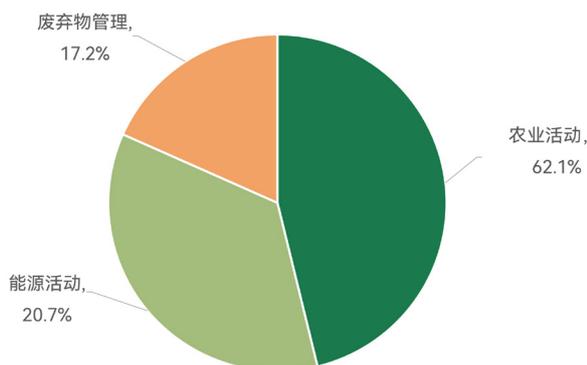


数据来源: EDGAR

2.1.2 全球非二氧化碳温室气体分气体排放情况

全球范围内，人类活动的 CH₄ 排放正在以几十年内最快的速度增长 (Milman, 2024)，2023 年，CH₄ 排放达到了 98 亿吨 CO₂e，占全球温室气体排放 17% 左右，是仅次于二氧化碳的第二大温室气体。其中，农业领域是最大排放源，占比达到 46.1%，其次是能源活动 (35.4%) 和废弃物处置 (18.3%) (图 4)。

图 4 按部门划分的 CH₄ 排放 (2023)



数据来源: EDGAR

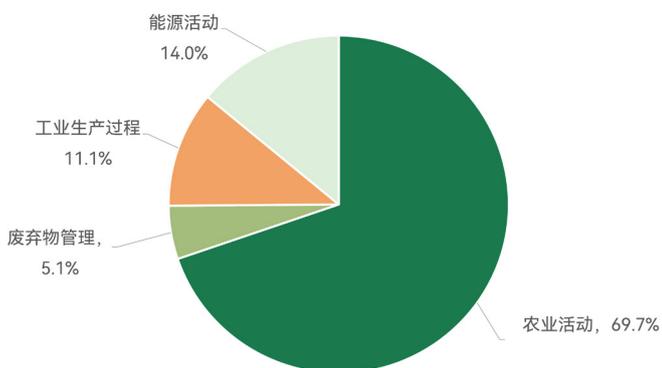
表 2 CH₄ 主要排放部门与途径

农业部门	动物肠道发酵、水稻种植、畜禽粪污处理等
能源活动	煤炭开采、油气系统以及化石燃料和生物质的燃烧等
废弃物管理	生活垃圾的填埋、焚烧过程，生活污水和工业废水处理等

来源: iGDP 整理

人类活动导致的 N₂O 排放从 1980 到 2020 期间增长了 40% (Tian 等, 2024)。2023 年，N₂O 的排放达到了 26 亿吨 CO₂e 左右，在全球温室气体中占比 5%。其中，人为 N₂O 排放最多的是农业部门 (69.7%)，其他主要排放源包括能源活动 (14%)、工业过程排放 (11.1%)、废弃物管理 (5.1%) (图 5)。此外，研究表明在不采取额外减排行动的情况下，N₂O 排放将持续上升，到 2050 年将比 2020 年排放增加 30% 左右 (Valerie, 2024)。

图 5 按部门划分的 N₂O 排放 (2023)



数据来源: EDGAR

表 3 N₂O 主要排放部门与途径

农业部门	农用地、畜禽粪污处理、秸秆焚烧等
工业部门	己二酸和硝酸的生产等
能源活动	化石燃料燃烧和生物质燃烧过程等，具体包括在电力部门、制造业和建筑用能中的烟气排放以及交通运输尾气
废弃物管理	生活污水和工业废水处理过程等

来源: iGDP 整理

HFCs、PFCs、SF₆ 和 NF₃ 的排放集中在工业生产过程以及产品使用和报废环节，排放源涉及制冷、电子、电力、冶金、化工等多个行业在生产、储运和使用过程中的泄漏以及在报废环节的排空等（非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组，2022）。2023 年，F-Gases 排放量约为 17 亿吨 CO₂e，占比 3% (United Nations Environment Programme, 2024)。尽管占总量极小，但其增长速度却是几种温室气体中迄今最高的：1990 年到 2019 年间，F-Gases 增长了 254%，接近同期二氧化碳增速的 4 倍；2023 年，全球温室气体排放量增长率是 1.3%，而 F-Gases 的增速仍达到 4.2% (IPCC, 2023)。

表 4 F-Gases 主要排放途径

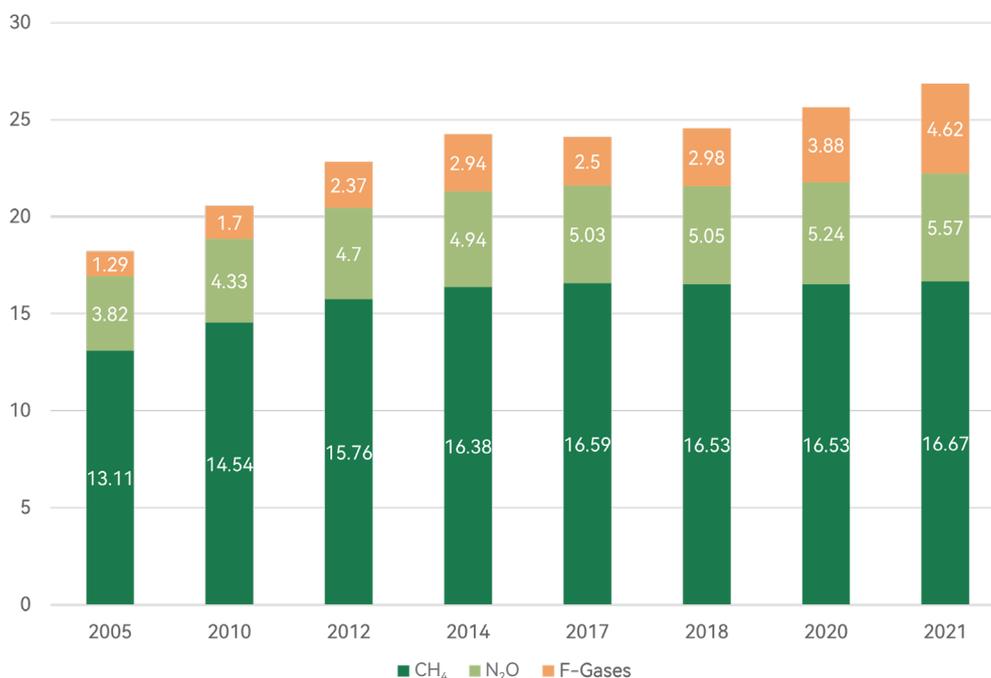
HFCs	制冷剂、发泡剂、灭火剂、医用气雾剂等在生产、储运、使用过程及报废环节的泄漏和排放	SF₆	电力工业设备的使用和报废环节，镁冶炼，电子工业等
PFCs	电解铝生产，半导体制造，光伏制造等	NF₃	半导体制造，电子工业，光伏制造等

来源：iGDP 整理

2.2 我国非二氧化碳温室气体排放情况

根据《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》和《中华人民共和国气候变化第四次两年更新报告》，2021 年我国排放温室气体 143.14 亿吨 CO₂e（不含 LULUCF），其中，非二温室气体排放量为 26.86 亿吨 CO₂e，占比 18.8%，CH₄、N₂O 和 F-Gases 分别贡献了 11.6%、3.9% 和 3.2%。

图 6 我国非二温室气体排放历史趋势（分气体，亿吨 CO₂e）



数据来源：《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》、《中华人民共和国气候变化第四次两年更新报告》

2.2.1 我国非二氧化碳温室气体分部门排放情况

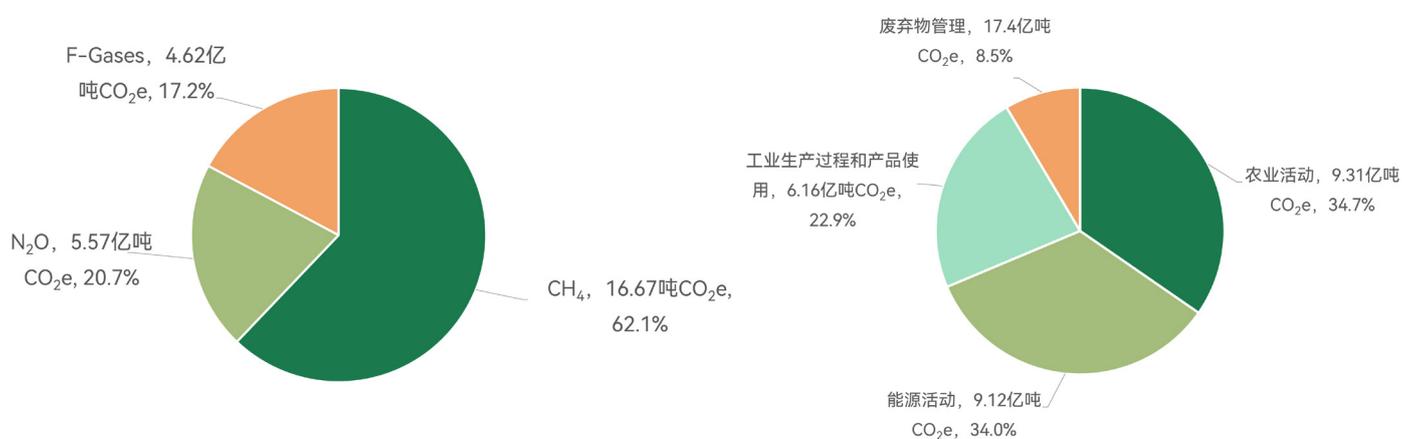
与全球情况相似，农业部门是我国非二温室气体的最大排放源。2021 年，我国农业非二温室气体排放量为 9.31 亿吨 CO₂e，占非二排放总量的 34.7%，主要排放源包括动物肠道排放（34.6%）、水稻种植（26.6%）、农用地排放（20.4%）和动物粪便管理（17.7%）（图 6）。

能源部门的非二温室气体排放量紧随其后，总量达到 9.12 亿吨 CO₂e，占非二排放总量的 34%，主要来源于逃逸排放（82.3%）和燃料燃烧排放（27.7%）。能源部门的 CH₄ 排放量大是我国非二温室气体排放的一个显著特征，这与我国煤矿 CH₄ 排放量大、占比高相关。

工业生产过程和产品使用是我国非二温室气体第三大排放源，排放量约为 6.16 亿吨 CO₂e，占比 22.9%。在这部分排放中，与消耗臭氧层物质替代物使用相关的排放约占 50.2%、与化工生产相关的排放则接近 29.7%。我国工业部门的非二温室气体排放占比高于全球平均水平的主要原因是与制冷相关的 HFCs 排放大：2023 年，我国制冷剂产能约占到全球 65%-70%，需求量达到全球 40%（杨林 & 张玮航，2024），而目前市场的主流制冷剂是 HFCs 制冷剂。

废弃物管理部门作为我国的第四大非二温室气体排放源，排放量为 2.27 亿吨 CO₂e，占比为 8.5%，低于全球水平。排放主要来自填埋处理排放（58.2%）和废水处理排放（38.6%）。

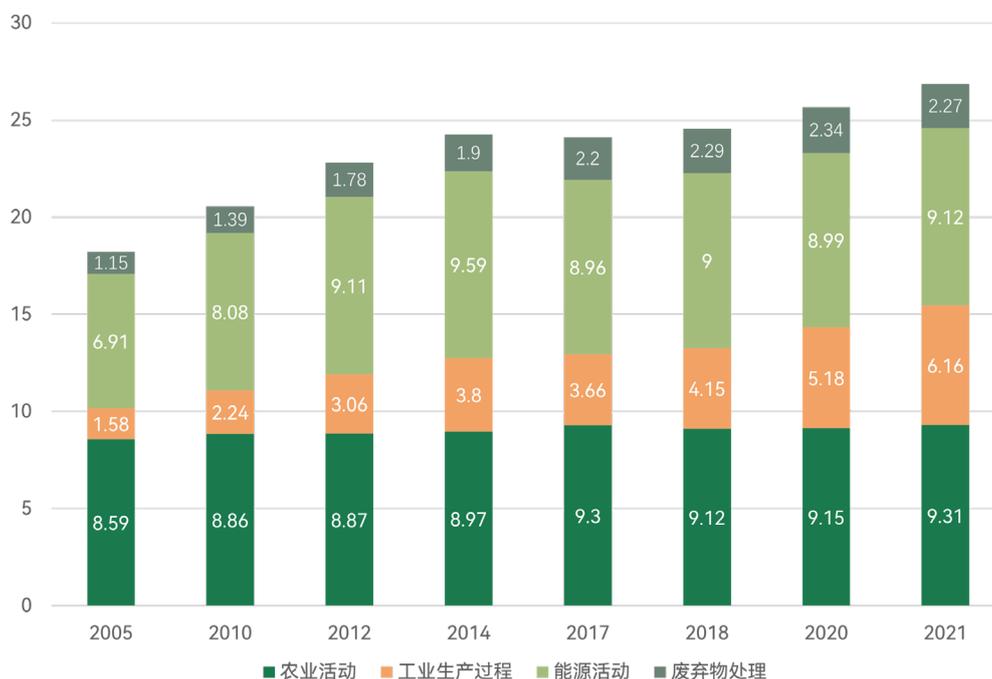
图 7 2021 年我国非二温室气体分气体排放情况（左）我国非二温室气体分排放源排放情况（右）



数据来源：《中华人民共和国气候变化第一次双年度透明度报告》

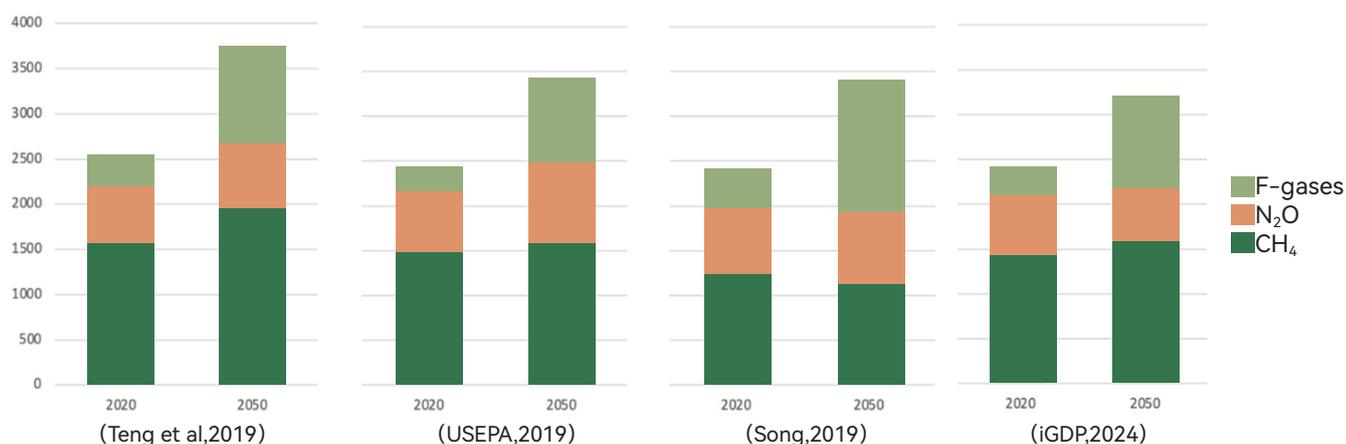
根据排放历史趋势及预测，我国非二温室气体排放距离达峰仍有一段距离。2005 年 -2021 年间，各主要排放部门的非二温室气体排放总体均呈现上升趋势，其中农业活动的排放变化相对平稳，而工业生产过程和产品使用的排放则以最快的增长速度在不断上升（图 8）。未来，工业部门将是我国非二温室气体增长的主要驱动力，并将逐渐成为我国排放体量最大的部门，而这一变化主要是由 F-Gases 排放的增长所导致的。不同研究显示，在不进一步强化针对非二温室气体减排政策的情况下，到 2050 年我国非二温室气体排放将达到 31-37 亿吨 CO₂e 左右（如图 9 所示）。

图 8 我国非二氧化碳温室气体排放历史趋势 (分部门, 亿吨 CO₂e)



数据来源: 《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》、《中华人民共和国气候变化第四次两年更新报告》

图 9 我国非二氧化碳温室气体排放趋势预测 (亿吨 CO₂e)



数据来源: Teng 等, 2019; United States Environmental Protection Agency, 2019; Song, R., 2019; iGDP 数据基于 EPS 模型分析。

2.2.2 我国甲烷排放情况和趋势

根据《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》，2021 年我国 CH₄ 排放为 5953.5 万吨（不含 LULUCF）。能源活动带来的 CH₄ 排放是最大的排放源，占比达 47.3%，其中多数来自逃逸排放（45.0%），少数来自化石燃料不完全燃烧（2.3%）。紧随其后的是农业活动，占我国 CH₄ 排放 40.8%，动物肠道发酵（19.3%）和水稻种植（14.9%）是最主要的排放源。废弃物处理带来的 CH₄ 排放占我国 CH₄ 排放的 11.9%，名列第三（图 10）。

图 10 中国 2021 年 CH₄ 排放结构（左）和 CH₄ 历史排放趋势（右，万吨）



数据来源: 《中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告》《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》、《中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告》、《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》、《中华人民共和国气候变化第四次国家信息通报》、《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》

从趋势看，我国 CH₄ 排放总量在 2005-2017 年以较快速度增长，2017 年后呈现出较为平稳甚至小幅下降的态势。能源活动的 CH₄ 排在波动增长后趋于平缓；农业活动排放总体呈现上升趋势，相较于 2005 年，2021 年的农业 CH₄ 排放增长了约 18%；而废弃物处理的 CH₄ 排在 2005 年到 2018 年持续快速增加，排放量几乎翻倍，近两年出现小幅下降。国内外不同研究显示（表 5），我国的 CH₄ 排放到 2050 年仍将剩余 13-16 亿吨 CO₂e 左右，相对于 2020 年水平下降不多。

表 5 不同研究下我国 CH₄ 排放趋势预测（百万吨 CO₂e，GWP=25）

来源	2020	2023	2040	2050	情景
US EPA, 2019	1490	1529	1551	1576	BAU
Song, R., 2019	1406	1407	1344	1286	Current Policy Scenario
Teng 等, 2019	1553	1606	1529	1497	CO ₂ Only Scenario
Khanna 等, 2024	1708	1721	1534	1371	Reference Scenario
iGDP EPS 模型	1652	1735	1661	1555	BAU

2.2.3 我国氧化亚氮排放情况和趋势

我国 2021 年 N₂O 排放量为 210.2 万吨。农业活动排放为 94.9 万吨，占 45.1%，主要来自农用地（34.2%）和动物粪便管理（10.8%）。工业生产过程排放 58 万吨，占比 27.6%；其他排放源为能源活动和废弃物处理排放，分别为 46.4 和 10.9 万吨，占比 22.1% 和 5.2%（图 11）。

图 11 中国 2021 年 N₂O 排放结构（左）和 N₂O 历史排放趋势（右，万吨）



数据来源:《中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告》《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》、《中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告》、《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》、《中华人民共和国气候变化第四次国家信息通报》、《中华人民共和国气候变化第一次双年度报告》

基于我国发布的国家温室气体清单的历史数据显示，我国 N₂O 排放从 2005 年到 2014 年呈明显上升趋势，上升幅度约为 36%；2014 到 2018 年期间，N₂O 排放总体趋于平缓，但近年来又再度出现一定抬升。如表 6 所示，不同研究对我国 N₂O 排放的趋势分析显示，在没有更多政策干预的情况下，我国 N₂O 排放仍有上升空间，到 2050 年 N₂O 排放将达到 6.2-7.9 亿吨 CO₂e 之间。

表 6 不同研究下 N₂O 排放趋势预测 (百万吨 CO₂e, GWP=298)

来源	2020	2023	2040	2050	情景
US EPA, 2019	588	653	715	794	BAU
Song, R., 2019	691	697	683	669	Current Policy Scenario
Teng 等, 2019	613	659	660	677	CO ₂ Only Scenario
iGDP EPS 模型	657	685	665	626	BAU

2.2.4 我国含氟温室气体排放情况和趋势

2021 年，我国 F-Gases 排放了 4.62 亿吨 CO₂e（不包括 NF₃），约占我国温室气体排放的 3.2%。其中 72.7% 来自 HFCs 排放，约为 3.36 亿吨 CO₂e，来自制冷剂的排放达到了 2.90 亿吨 CO₂e。此外，PFCs 和 SF₆ 排放分别为 0.23 亿吨和 1.03 亿吨 CO₂e。我国 PFCs 最大的排放源是电解铝生产，占 PFCs 排放总量比重约 93.8%；而 SF₆ 则是电力行业，占比达到 98.2%。

与其他温室气体不同的是，F-Gases 主要是作为化学品被人为生产的，这一特性导致其排放量随着相关产品的广泛生产和应用而显著增长。如图 12 中所示，2005-2021 年，F-Gases 排放增长了 258.1%。分气体看，尽管政府资助企业销毁 HFC-23 使得 HFCs 排放在 2017 年出现了一次下降，但其仍呈现快速增长的总体趋势，增幅达到 187%。2005 年的 PFCs 和 SF₆ 排放量都极小，因此，虽然这两类气体目前的排放量尚相对有限，但其增速表现迅猛：2005-2017 年，PFCs 排放增长了 320%，其后变化平稳；SF₆ 作为排放增长最快的气体，2005-2021 年的排放增幅超过了 1371%。

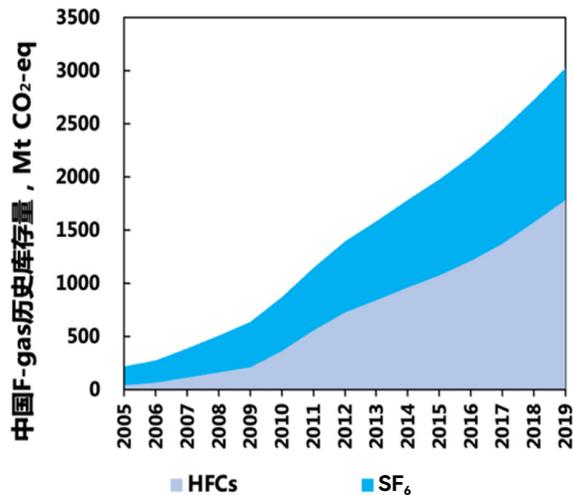
图 12 中国 F-Gases 历史排放趋势 (亿吨 CO₂e)



数据来源: 《中华人民共和国气候变化第一次双年度透明度报告》、《中华人民共和国气候变化第四次两年更新报告》

与此同时, F-Gases 因使用需求而被生产的特性还导致其排放会大量集中在使用 and 报废过程, 排放将具有延迟性。这意味着, 尽管我国作为《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书 <基加利修正案>》(后称《基加利修正案》) 的缔约国, 已按照条约要求于 2024 年将受控 HFCs 的生产和消费冻结在基线水平, 并将在未来持续推进削减工作, 但在用设备中已积累的大量库存 (见图 13) 会使得其排放仍保持一段时间的快速上涨。多项研究均显示, 我国 HFCs 排放到 2038 年前后才能达峰, 峰值超过 6 亿吨 CO₂e, 随后才会以较快速度下降 (表 7)。此外, 由于我国目前仍缺乏针对 SF₆、PFCs 的刚性控排政策, 这两种气体的排放量仍有上升空间, 将给 F-Gases 进一步减排带来挑战 (表 8)。

图 13 库存量 (产品中赋存) (百万吨 CO₂-eq)



数据来源: Bai 等, 2023; Guo 等, 2023

表 7 不同研究下中国 HFCs 排放趋势预测 (百万吨 CO₂e, AR4 GWP)

来源	2020	2030	2040	2050	情景
Song R., 2019	237	545	509	276	Current Policy Scenario
Teng 等, 2019	327	575	509	324	All GHG Scenario
Bai 等, 2023	230	511	597	376	Kigali Scenario
iGDP EPS 模型	251	587	533	281	Kigali Scenario

表 8 不同研究下中国 PFCs、SF₆ 排放趋势预测 (百万吨 CO₂e, AR4 GWP)

来源	2020	2030	2040	2050	情景
US EPA, 2019	69	108	144	195	BAU
iGDP EPS 模型	140	321	398	411	BAU
Guo 等, 2023	195	301	374	413	BAU



3 非二氧化碳温室气体减排进展

由于加快非二温室气体减排能对缓解全球变暖、提高空气质量及加强公众健康带来多重效益，多个国家开始加强对非二温室气体的管控，包括将非二温室气体控排纳入国家自主贡献、提出具体非二温室气体管控的国家方案或采取分部门的非二温室气体减排行动、以及开展减排的国际合作等行动。

3.1 全球非二氧化碳温室气体减排政策与合作进展

3.1.1 全球非二氧化碳温室气体纳入国家自主贡献进展情况

在《巴黎协定》框架下，缔约国需要定期制定并报告国家气候行动，即国家自主贡献（NDC）。作为指导国家减排行动的核心战略，NDC 在促进各国合作履约、控制全球升温方面发挥了重要作用。根据联合国环境规划署（UNEP）针对上一轮 NDC 所发布的数据，截至 2024 年 6 月，约有 31% 的缔约国在 NDC 减排目标中覆盖了所有被列入《京都议定书》的非二温室气体（United Nations Environment Programme, 2024）。同时，部分国家还承诺了独立的非二温室气体减排目标和行动，数据显示，约 37% 的 NDC 中包括了农业 CH₄ 和 N₂O 减排措施，9% 的 NDC 涉及了工业部门的非二温室气体减排。此外，上一轮的 NDC 中对短寿命气候污染物（Short-lived climate pollutants, SLCPs）的关注也在加强。有 47 个国家在 NDC 中强调了 SLCPs 减排的重要性（Malley, C. S. 等, 2023）。有 13 个国家将单独 SLCP 污染物——黑碳，纳入到了 NDC，其中有 11 个国家设定了单独的黑碳减排目标（Clean Air Fund, 2025）。

面向 2025 年 NDC 更新，截至 6 月，已有 25 个国家提交了文件。图 14 和表 9 中可以看到这些 NDC 对于非二温室气体减排的承诺情况。其中，“具有单独量化承诺”是指至少为一种非二温室气体设立了单独且量化的减排目标，“具有分部门的减排承诺”是指为不同部门设立了量化减排目标且该目标的实现需要涉及非二温室气体减排，“具有减排措施或行动”则指示 NDC 中承诺了明确指向非二温室气体减排的措施或行动。

图 14 2025NDC 对非二温室气体减排承诺情况

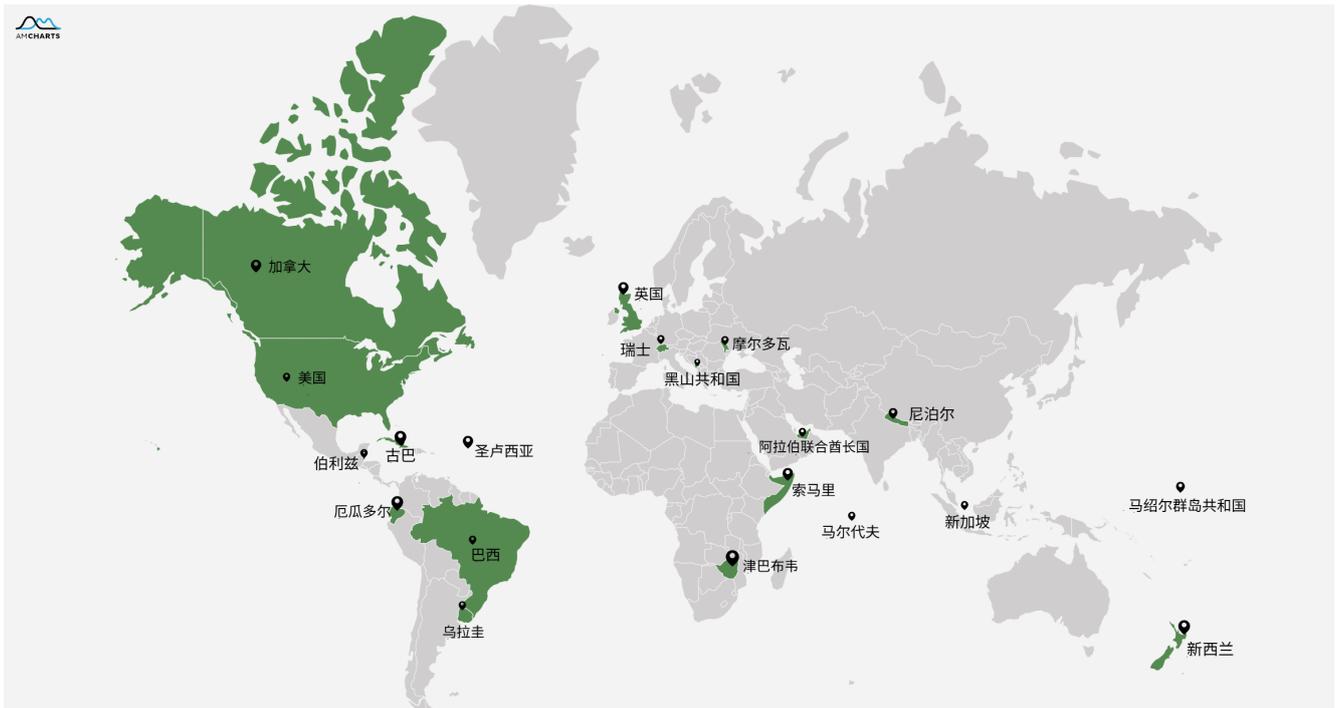


表 9 2025NDC 对非二温室气体的减排承诺

承诺类型	国家
具有单独的量化承诺	乌拉圭、加拿大、摩尔多瓦共和国、新西兰、圣卢西亚、津巴布韦、美国
具有分部门的减排承诺	阿拉伯联合酋长国、瑞士、津巴布韦、尼泊尔、索马里、伯利兹
具有减排措施或行动	阿拉伯联合酋长国、巴西、美国、乌拉圭、英国、厄瓜多尔、新加坡、马绍尔群岛共和国、津巴布韦、加拿大、黑山共和国、古巴、马尔代夫、摩尔多瓦共和国、尼泊尔、索马里、伯利兹

来源: IGDP 整理

3.1.2 全球甲烷减排政策与合作进展

近年来，欧盟、美国、加拿大和巴西等国家和地区已经先后提出了综合性的 CH₄ 减排战略，为能源、农业和废弃物管理三大行业设定 CH₄ 减排行动与目标，同时加强排放数据的收集和清单编制，为 CH₄ 减排提供科学的数据支持。除了财政拨款，有些国家还通过碳交易等市场机制促进 CH₄ 减排。

表 10 主要国家出台的 CH₄ 减排战略和实施计划

国家 / 地区	政策	主要行动与目标
美国	《美国甲烷减排行动计划》(2021) (The White House Office of Domestic Climate Policy, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> 对油气排放源监管法规进行更新，若提案通过将减少覆盖的排放源中 75% 的 CH₄ 排放；对高排放油气设施征收废气排放费； 通过《基础设施投资和就业法案》为废弃矿区修复、CH₄ 减排和经济发展提供 113 亿美元的拨款； 废弃物领域：全国垃圾填埋场填埋气收集和燃烧率将达到 70%；2030 年比 2015 年减少 50% 的食物损失和浪费； 农业领域基于经济激励和自愿伙伴关系减少甲烷排放，包括安装 / 升级粪污处理设施、支持沼气利用、增加对农业 CH₄ 检测和创新的投入。
加拿大	《更迅速、更深入：加拿大甲烷战略》(2022) (Government of Canada, 2022)	<ul style="list-style-type: none"> 更新《甲烷排放法规》并设立用于投资绿色技术的基金，到 2030 年油气行业 CH₄ 排放比 2012 年下降至少 75%； 与省级合作，加快废弃物资源化和能源化利用，到 2030 年废弃物行业 CH₄ 排放比 2019 年减少 50%； 拨款超过 11 亿美元用于支持农业减排行动和农业清洁技术的开发利用；研究制定关于减少肉牛反刍 CH₄ 排放和畜禽粪便 CH₄ 减排的碳市场方法学 (Government of Canada, 2024)。
欧盟	《欧盟甲烷减排战略》(2020) (European Commission, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> 能源领域：加强天然气设施泄漏检测和维修，并考虑立法禁止常规的放空和火炬燃烧； 农业领域：创新性 CH₄ 减排技术、动物饲料和饲养管理等最佳实践分享；对技术、基于自然的解决方案和饮食转变的研究；废弃物产沼； 废弃物领域：改善垃圾填埋场气体的管理，进行能源化利用；进一步研究生物 CH₄ 的技术。
	《欧盟新甲烷法规》(2024) (Regulation 2024/1787, 2024)	<ul style="list-style-type: none"> 针对排放源的测量、报告和核查 (MRV) 要求； 对所有油气设备进行强制性泄漏检测和维修； 禁止油气行业进行常规放空和火炬燃烧，并减少非常规放空和火炬燃烧（如出现技术故障的情况）； 2030 年起欧盟进口的煤油气 CH₄ 强度需要低于欧委会后期设立的上限值； 2027 年起限制供热煤矿的 CH₄ 放空，2030 年起禁止废弃矿井的 CH₄ 放空； 将建立废弃矿井排放清单，覆盖自 1954 年起停工的矿井，并检测 CH₄ 排放情况。

国家 / 地区	政策	主要行动与目标
巴西	《国家零甲烷计划》(2023) (International Energy Agency, 2023)	<ul style="list-style-type: none"> 鼓励碳市场特别是“甲烷信用”; 鼓励为轻型和重型车辆提供燃料的试点; 鼓励生物发酵罐、沼气净化系统等将沼气和生物 CH₄ 作为可再生能源和燃料来源的技术的应用; 支持 CH₄ 减排的科研, 以及技术和实践的传播; 促进国家和国际融资合作、能力建设、开发、转让和推广减少 CH₄ 排放的技术。
	《石油和天然气开采低碳指南》(2024) (Brazil's National Council for Energy Policy, 2024)	<ul style="list-style-type: none"> 鼓励采用能够减少排放和提高效率的开采技术; 继续执行零常规火炬燃烧, 确保天然气的利用和储存; 披露石油和天然气项目的排放指标, 并提高透明度。

来源: IGDP 整理

CH₄ 减排也成为全球合作所关注的重点议题。2021 年联合国气候变化大会 (COP 26) 上, 欧盟和美国一起发起的“全球甲烷减排倡议” (Global Methane Pledge) 提出到 2030 年将 CH₄ 排放量在 2020 年水平上减少至少 30%, 截至 2025 年 6 月, 这项自愿性的减排倡议已有 160 个国家加入 (Global Methane Pledge, 2023)。2023 年中美两国在《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》(后称《阳光之乡声明》) 中提到, 两国将在各自国家 CH₄ 行动计划基础上制定各自纳入其 2025 年国家自主贡献 (NDC) 的 CH₄ 减排行动 / 目标, 并支持两国各自 CH₄ 控排取得进展。同时, 两国将支持地方层面在各领域通过政策对话、最佳实践分享等方式开展气候合作 (中华人民共和国生态环境部, 2023)。2024 年 COP 29 发布了“减少有机废弃物甲烷宣言”, 65 个签署国承诺在未来的 NDC 中设定减少有机废弃物 CH₄ 排放的部门目标或可测量的行动、路线图和政策 (COP 29 news, 2024)。

3.1.3 全球氧化亚氮减排政策与合作进展

针对 N₂O 的排放, 在农业领域, 2020 年欧盟绿色新政下发布的《从农场到餐桌战略》中为改善土壤健康和过度氮肥施用的行动可以到 2030 年将化肥使用减少 20% (European Commission, 2020)。澳大利亚通过碳信用单位计划 (ACCU) 为采取农业 N₂O 减排措施的企业和个人提供经济激励 (Australia Government, 2025)。为应对来自工业部门的 N₂O 排放, 欧盟从 2013 年开始在碳市场中纳入了对硝酸和己二酸 N₂O 排放的管控, 因此控排企业纷纷通过安装减排装置来实现 N₂O 减排 (Oeko-Institut, 2021)。此前, 美国也曾宣布过其主要的化工企业将美国工业部门的 N₂O 排放到 2025 年减少到 2020 年的 50% 左右 (Pike, 2024)。

【专栏 1】欧盟碳市场对工业 N₂O 排放的管控

欧盟碳市场在第三阶段 (2013-2020) 将硝酸和己二酸生产以及包括 N₂O 在内的温室气体排放纳入覆盖范围。配额分配考虑如下: 配额 = 历史产量 * 基准值 * 碳泄漏系数 * 校正系数。其中的基准值是参考行业温室气体排放绩效前 10% 的生产设施的平均水平, 碳泄漏系数则适用于有碳泄漏风险的行业, 这里包括硝酸和己二酸。在此基础上, 第三阶段的硝酸厂免费配额的基准值为每吨纯硝酸 0.302 个配额, 己二酸每吨获得 2.79 个配额。在欧盟碳市场的第四阶段 (2021 年开始), 由于硝酸和己二酸的温室气体排放强度发生了变化, 因此第四阶段的基准值将在第三阶段基准值基础上削减 24%。

对于硝酸和己二酸设施 N₂O 排放的核算可以采用基于标准计算的方式或连续在线监测 (CEMS) 的方式, 但是采用前者来进行核算的设施更多。2018 年的数据显示, 整个欧盟只有 67 个设施将监测系统用于 N₂O 的核算。此外, 在对己二酸排放的核算中, CEMS 仅适用于核算 N₂O 的减排量 (德国国际合作机构, 2023)。

与此同时，针对 N₂O 减排的国际合作也在逐步展开。德国在 2015 年 COP 21 期间发起了硝酸气候行动项目（Nitric Acid Climate Action Group, NACAG），项目旨在推动全球硝酸和尿素厂安装减少 N₂O 排放的装置，并为符合条件的国家提供相应的技术和资金支持，包括阿根廷、印尼、墨西哥、泰国在内的 16 个国家签署对这个项目倡议的支持（NACAG, n.d.）。2023 年阿根廷在该项目的支持下已经开始为硝酸生产企业安装 N₂O 减排装置和监测设备（NACAG, 2023）。2023 年美国 and 巴西也在农业化肥施用开展了名为“Fertilize 4 Life”的科研合作，合作将致力于提高化肥施用效率以及减少化肥温室气体排放。这项合作也是美国发起的“全球化肥挑战”（Global Fertilizer Challenge）项目实施的一部分（NACAG, 2023）。此外，中美《阳光之乡声明》中提到两国计划就各自管理 N₂O 排放的措施开展合作（中华人民共和国生态环境部，2023）。

3.1.4 全球含氟温室气体减排政策与合作进展

针对 F-Gases 排放，2019 年生效的《基加利修正案》旨在对 HFCs 的生产和消费进行管控，目前已在 163 个国家和地区获得批准（United Nations Treaty Collection, 2025）。根据《修正案》要求，大部分缔约国已经在积极推进相关削减工作：非第 5 条款、较早开始国家（如美国、日本、欧盟等）在 2024 年需要将 HFCs 生产和消费在基线水平上减少 40%，较晚开始国家（如俄罗斯、白俄罗斯等）则是到 2025 年减少 35%；第 5 条款第一组国家（如中国、泰国、巴西等）于 2024 年要将生产和使用量冻结在基线值。《基加利修正案》的最终目标是到本世纪 40 年代末实现 80%-85% 的 HFCs 削减。

在《基加利修正案》通过后，多国出台了相对严格的排放控制政策和管理措施。美国于 2020 年颁布了《创新与制造法案》（AIM 法案），并按照《基加利修正案》时间表推动 HFCs 生产和消费的减少。根据该法案，美国国家环境保护局（EPA）规定了气雾剂、泡沫制品和制冷、空调和热泵产品中可以使用的 HFCs 最高 GWP 值、或是禁用特定 HFCs。例如，住宅和轻型商用空调与热泵到 2025 年禁用 GWP 超过 700 的制冷剂、轻型乘用车空调（2025 年车型）禁用 GWP 超过 150 的制冷剂等（US Environmental Protection Agency, 2023）。最新的美国 2025 年 NDC 目标依然采用了《基加利修正案》时间表控制 HFCs 排放。

欧盟在 2024 年初通过了新的 F-Gases 法规，在含氟气体的生产、销售、使用、进出口、泄漏监测、回收销毁各环节建立起严格管控。相比于《基加利修正案》，该法规覆盖的受控含氟气体范围更广，既包括了更多的 HFCs 气体，还将部分 HFOs、HFEs 及其混合物等也纳入管控。同时，该法规还约定了更领先的削减时间表，目标是到 2050 年实现 HFCs 的淘汰。在规定中，欧盟也根据含氟气体的 GWP 值对不同产品做出了市场禁令，其中部分产品将禁止使用所有被管控含氟气体，例如 2026 年的家用冰箱和冷冻柜、2033 年的泡沫制品等（REGULATION 2024/573, 2024）。此外，欧盟还将铝生产过程的 PFCs 排放纳入欧盟碳市场，以此推进 PFCs 的减排（European Commission, n.d.）。

【专栏 2】日本含氟气体全生命周期管理

日本采取含氟气体全生命周期管理的制度模式，对于气体生产、使用、回收和销毁各环节的主体都规定了其责任：
1) 气体生产商须减少 F-Gases 生产，并推进低 GWP 值制冷剂的使用。2) 使用者须定期检查泄漏；回充 / 回收气体时委托已注册企业开展相关作业；对回收、运输、循环利用和销毁等环节付费。3) 制冷剂回收 / 再生 / 销毁企业须在当地政府注册、认证。

与此同时，各主体还担负报告义务：气体生产商或进口商须报告每财年的出货情况；使用者须报告一定规模的泄漏情况；气体回收 / 回充企业在信息处理中心登记数据信息。该制度使日本国内制冷剂信息有了明确监督和统计。此外，日本政府还依靠行业协会建立制冷剂回收推进技术中心，负责对从事制冷剂回收的工作人员开展培训、对制冷剂回收企业进行资格认证等工作（潘寻等，2022）（Ministry of the Environment of Japan, 2016）。

除《基加利修正案》外，国际社会还达成了多项双多边减排合作。中美《阳光之乡声明》中指出，“两国计划在《基加利修正案》下共同努力逐步减少 HFCs，并致力于确保生产的所有制冷设备采用有力度的最低能效标准”，展现出中美双方对《基加利修正案》履约的积极态度以及对本国制冷空调行业低碳发展的更高追求。2023 年 COP 28 上发起的全球降温承诺（Global Cooling Pledge）为进一步推动 HFCs 减排和发展可持续制冷提供了机遇。承诺提出，要实现“到 2050 年将全球所有部门的制冷相关排放量在当前基础上减少至少 68%，到 2030 年大幅增加可持续制冷的使用，并将全球新空调的平均效率提高 50%”。COP 28 期间，有 63 个国家加入了该承诺，截至 2025 年 6 月，这一数量已增长至 72 个，同时还有 16 个地方层面的参与者加入该承诺，包括我国的广州市（Global Cooling Pledge, n.d.）。但全球降温承诺并未区分发达国家与发展中国家的责任差异，若按现有时间表推进，中国特别是阿拉伯国家等发展中国家要实现既定目标将面临严峻考验。

3.2 我国非二氧化碳温室气体减排行动

尽管我国尚未形成覆盖全部非二温室气体的减排政策体系，但我国在多份政策文件中都对进一步强化非二温室气体管控提出了战略规划。2023 年《甲烷排放控制行动方案》和 2025 年《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》为我国非二温室气体减排政策和管理体系建设，创造了良好的开端。

表 11 我国非二温室气体减排战略规划

政策文件	减排战略规划
《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》、《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》、《中国本世纪中叶长期温室气体低排放发展战略》、《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》、《减污降碳协同增效实施方案》	<ul style="list-style-type: none"> • 加大甲烷、氢氟碳化物、全氟化碳等其他温室气体的控制力度； • 研究实施非二氧化碳温室气体控排行动方案，继续完善非二氧化碳温室气体监测、报告和评估技术体系，逐步建立健全非二氧化碳温室气体排放统计核算体系、政策体系和管理体系； • 将温室气体管控纳入环评管理； • 强化非二氧化碳温室气体管控，研究制订重点行业温室气体排放标准。

来源：iGDP 整理

3.2.1 我国甲烷减排行动

我国早在 2007 年的第一份《中国应对气候变化国家方案》就已经提出了 CH₄ 减排行动，并对煤矿 CH₄ 减排政策的减排效果进行量化评估。进入“十四五”时期和“双碳”目标提出以来，我国更加重视 CH₄ 减排工作，陆续发布了多项政策。2023 年 11 月，我国开展 CH₄ 排放管控的顶层设计文件《甲烷排放控制行动方案》出台，提出加快形成 CH₄ 排放监管体系，有力有序有效控制 CH₄ 排放。

表 12 我国“十四五”以来推动 CH₄ 减排的政策

分领域主要排放源		现有减排行动及目标	政策文件
能源	煤矿开采	<ul style="list-style-type: none"> 鼓励引导煤炭企业加大煤矿瓦斯抽采利用。到 2025 年，煤矿瓦斯年利用量达到 60 亿立方米； CH₄ 体积浓度≥8% 的抽采瓦斯，在确保安全的前提下，应进行综合利用；鼓励对 CH₄ 体积浓度在 2%~8% 的抽采瓦斯以及乏风瓦斯，探索开展综合利用。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》 《关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知》
	油气开采	<ul style="list-style-type: none"> 加大油气田 CH₄ 采收利用力度； 鼓励企业开展伴生气与放空气回收利用，努力逐步减少常规火炬排放； 到 2030 年，油田伴生气集气率达到国际先进水平。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》 《“十四五”现代能源体系规划》
农业	畜禽养殖	<ul style="list-style-type: none"> 推广精准饲喂技术。推进品种改良。推广低蛋白日粮、全株青贮等技术；合理使用基于植物提取物、益生菌等饲料添加剂。 	<ul style="list-style-type: none"> 《农业农村减排固碳实施方案》
	水稻种植	<ul style="list-style-type: none"> 因地制宜推广稻田节水灌溉技术。选育推广高产、优质、节水抗旱水稻品种。改进稻田施肥管理，推广有机肥腐熟还田。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》 《“十四五”全国农业绿色发展规划》
	畜禽粪便管理	<ul style="list-style-type: none"> 推广节水型机械干清粪等技术和工艺； 建立畜禽粪污资源化利用台账； 改进畜禽粪污存储及处理设施装备，推广粪污密闭处理、气体收集利用或处理等技术； 提升畜禽养殖粪污资源化利用水平；因地制宜发展农村沼气、规模化沼气/生物天然气工程； 因地制宜推广堆沤肥还田、液体粪污贮存还田等技术模式，推动粪肥低成本还田利用； 到 2025 年，畜禽粪污综合利用率达到 80% 以上，2030 年达到 85% 以上。 	<ul style="list-style-type: none"> 《关于进一步加强水资源节约集约利用的意见》 《关于加强畜禽粪污资源化利用计划和台账管理的通知》 《关于推进畜禽粪污资源化利用标准体系建设的指导意见》
废弃物	垃圾处理	<ul style="list-style-type: none"> 推动生活垃圾源头减量、分类回收和资源化利用提高填埋气体回收利用水平； 到 2025 年底，地级城市因地制宜基本建成生活垃圾分类和处理系统； 到 2025 年，全国城市生活垃圾资源化利用率达到 60% 左右。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》 《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》
	污水处理	<ul style="list-style-type: none"> 稳步提高污泥无害化、资源化利用水平；鼓励采用污泥厌氧消化等方式产沼并加强回收利用； 到 2025 年，城市污泥无害化处置率达到 90% 以上； 科学开展污水管网清淤管护； 推广污泥沼气热电联产。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》 《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》
其他	工业交通	<ul style="list-style-type: none"> 妥善处置工业生产产生的含 CH₄ 可燃性气体； 推动机动车船动力系统技术提升，实现污染物与 CH₄ 协同控制。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》

来源：iGDP 整理

3.2.2 我国氧化亚氮减排行动

我国在主要“双碳”政策中均已经提出研究实施包括 N₂O 在内的非二温室气体控排行动和强化对非二温室气体管控力度。在 2021 年提交的《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》中，我国也提出研究制定重点行业 N₂O 减排方案，并于今年 8 月发布了《工业领域氧化亚氮排放控制行动方案》。

与此同时，N₂O 主要排放源所在部门发布的“双碳”政策和相关的绿色低碳减排行动都在推动 N₂O 的减排进程。例如 2021 年发布的《“十四五”全国农业绿色发展规划》提到推进化肥减量增效和加强畜禽粪污的资源化利用。2022 年发布的《农业农村减排固碳行动方案》中提出提高氮肥利用效率，降低 N₂O 排放。表 13 梳理了我国在推动 N₂O 减排的主要政策措施。

表 13 我国推动 N₂O 减排的主要政策行动

分领域主要排放源		现有减排行动	政策文件
农业活动	氮肥使用	<ul style="list-style-type: none"> 减少农田 N₂O 排放，到 2020 年实现农田氧化亚氮排放达到峰值； 到 2025 年，全国农用化肥施用量实现稳中有降，有机肥施用面积占比增加 5 个百分点以上； 提高氮肥利用效率，降低 N₂O 排放； 推广测土配方，推进化肥减量增效和有机肥替代对有机肥购买和使用提供补贴； 构建果菜茶有机肥替代化肥长效机制； 示范推广缓释肥、水溶肥等新型肥料，打造绿色种养循环农业模式。 	<ul style="list-style-type: none"> 《“十三五”控制温室气体排放工作方案》 《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》 《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》 《到 2025 年化肥减量化行动方案》 《到 2025 年化学农药减量化行动方案》 《全国农业可持续发展规划(2015—2030 年)》 《“十四五”全国农业绿色发展规划》 《农业农村减排固碳实施方案》 《建设国家农业绿色发展先行区 促进农业现代化示范区全面绿色转型实施方案》 《“十四五”推进农业农村现代化规划》
	畜禽粪污	<ul style="list-style-type: none"> 畜禽粪污的资源化利用目标； 畜禽粪污资源化利用提供财政补贴。 	
工业部门	硝酸和己二酸	<ul style="list-style-type: none"> 推动己二酸、硝酸和己内酰胺生产企业开展氧化亚氮减排，通过使用治理设备、加装催化剂等方式，减少氧化亚氮排放。鼓励己二酸生产企业对氧化亚氮尾气进行回收提纯，鼓励氧化亚氮回收利用； 研究利用相关资金渠道支持建设氧化亚氮回收提纯装置和己二酸、硝酸和己内酰胺行业氧化亚氮减排装置； 持续开展源头和过程控制、资源化利用、监测和减排等关键技术的研发创新，开展氧化亚氮排放控制技术示范工程建设，支持工业领域氧化亚氮排放控制技术申报国家重点推广的低碳技术目录，推动工业领域氧化亚氮排放控制装备和技术的集成化和产业化，推动成立工业领域氧化亚氮控排产学研联盟； 改进化肥、己二酸、硝酸和己内酰胺等的生产工艺 加强工业领域氧化亚氮与氮氧化物、挥发性有机物(VOCs) 等的协同控制，研究探索建立协同控制制度，开展绿氨掺烧与氧化亚氮排放机理研究。开展工业领域氧化亚氮与臭氧层保护协同控制政策研究。研究在己二酸、硝酸和己内酰胺等重点行业建设项目环境影响评价中开展氧化亚氮排放评价，提出减污降碳协同控制措施； 加强工业领域氧化亚氮监测、报告和核查体系建设。 	<ul style="list-style-type: none"> 《工业绿色发展规划(2016-2020)》 《“十四五”工业绿色发展规划》 《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2030 年)》 《工业领域氧化亚氮排放控制行动方案》

分领域主要排放源		现有减排行动	政策文件
废弃物	污水处理	<ul style="list-style-type: none"> 加强高效脱氮除磷等低碳技术应用，减少脱氮过程 N₂O 逸散。 	<ul style="list-style-type: none"> 《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》
能源活动	化石燃料和生物质燃料燃烧过程	<ul style="list-style-type: none"> “十四五”时期严格合理控制煤炭消费增长、“十五五”时期逐步减少； 有序推进工业燃煤和农业用煤天然气替代； 有序推动老旧车辆替换为新能源车辆和非道路移动机械使用新能源清洁能源动力。 	<ul style="list-style-type: none"> 《减污降碳协同增效实施方案》

来源：iGDP 整理

3.2.3 我国含氟温室气体减排行动

我国已出台多项针对 F-Gases 管控的减排政策，并且，由于 HFCs 排放的高占比，目前的减排行动侧重在对 HFCs 排放进行管控。2025 年 4 月，《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》的出台全面加强了对 HFCs 的管理，为我国实现《基加利修正案》履约目标提供坚实政策支撑。

表 14 我国推动 F-Gases 减排的主要政策行动

气体	领域	现有减排行动	政策文件
HFCs	生产、消费和使用	<ul style="list-style-type: none"> 从 2024 年起将受控用途 HFCs 生产和使用冻结在基线水平，2029 年起 HFCs 生产和使用不超过基线的 90%，2035 年起不超过 70%，2040 年起不超过 50%，2045 年起不超过 20%； 不得新建、扩建受控用途的 HFCs 化工生产设施；已建成的用作受控用途的 HFCs 化工生产设施，需要改建或异地建设的，不得增加原有 HFCs 生产能力，也不得新增用作受控用途的 HFCs 产品种类； 对管控物质受控用途生产单位实施配额许可管理； 对管控物质销售单位实施备案管理； 对 HFCs 受控用途使用单位实施配额许可或备案管理。优先在汽车、家电、工商制冷空调等重点行业开展 HFCs 削减活动。汽车行业自 2029 年 7 月 1 日起，禁止新申请公告的 M1 类车辆空调系统使用 GWP 值大于 150 的制冷剂；鼓励在电动汽车热系统领域开展自然工质制冷剂替代技术研发和应用。家电行业自 2026 年 1 月 1 日起，禁止生产以 HFCs 为制冷剂的电冰箱和冰柜产品；自 2029 年 1 月 1 日起，禁止生产用于国内销售的充注 GWP 值大于 750 制冷剂的房间空气调节器，家用多联式空调（热泵）机组除外；鼓励使用自然工质制冷剂。工商制冷空调行业自 2029 年 1 月 1 日起，禁止生产充注 GWP 值大于 750 制冷剂的单元式空气调节机（额定制冷量或制热量 ≤ 12kW）、风管送风式空调（热泵）机组（额定制冷量或制热量 ≤ 12kW）；禁止生产或新建、扩建充注 GWP 值大于 2500 制冷剂的其他制冷设备或制冷系统（蒸发温度 -50℃以下设备除外）；鼓励工业及冷链物流领域大中型制冷系统和轻型商用制冷设备使用自然工质制冷剂； 鼓励、支持消耗臭氧层物质替代品和替代技术的科学研究、技术开发和推广； 对管控物质进出口实施配额许可管理。开展打击非法贸易专项行动。 	<ul style="list-style-type: none"> 《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〈基加利修正案〉》 《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》 《消耗臭氧层物质管理条例》 《关于严格控制氢氟碳化物化工生产建设项目的通知》 《绿色高效制冷行动方案（2019）》 《制冷设备更新改造和回收利用实施指南》 《“十四五”冷链物流发展规划》
	末端治理	<ul style="list-style-type: none"> 对含管控物质的制冷设备、制冷系统和灭火系统的维修单位实施备案管理，明确备案管理范围和数据报送要求，规范制冷剂和灭火剂采购、使用台账记录； 对管控物质回收、再生利用和销毁单位实施备案管理。做好制冷剂分类回收和储存，鼓励对回收制冷剂进行循环和再生利用； 鼓励地方按区域建立管控物质无害化处置中心，满足销毁处置需求。 	<ul style="list-style-type: none"> 《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》

气体	领域	现有减排行动	政策文件
HFCs	副产 HFC-23	<ul style="list-style-type: none"> 二氟一氯甲烷（HCFC-22）或氢氟碳化物（HFCs）生产过程中副产的 HFC-23 不得直接排放； 除作为原料用途和受控用途使用外，副产 HFC-23 应采用《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》缔约方大会核准的销毁技术尽可能销毁处置； 进一步规范 HCFC-22 生产单位副产三氟甲烷（HFC-23）的监测、计量和数据报送，鼓励 HFC-23 的资源化利用技术推广应用。 	<ul style="list-style-type: none"> 《关于控制副产三氟甲烷排放的通知》 《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030年）》
	体系建设	<ul style="list-style-type: none"> 制定完善家电、工商制冷空调、汽车、消防、泡沫、工业清洗、制冷维修等领域管控物质替代品和替代技术的产品标准、安全标准、能效标准和技术规范； 加强 HFCs 排放统计核算能力建设，开展 HFCs 生产、使用过程的排放因子和排放量识别和核算研究； 研究 HFCs 替代、回收和再生利用、销毁等领域开发温室气体自愿减排项目方法学的可行性和科学路径。 	<ul style="list-style-type: none"> 《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030年）》
PFCs	铝冶炼行业	<ul style="list-style-type: none"> 铝冶炼行业管控温室气体种类为二氧化碳、四氟化碳（CF₄）和六氟化二碳（C₂F₆）。 	<ul style="list-style-type: none"> 《全国碳排放权交易市场覆盖钢铁、水泥、铝冶炼行业工作方案》
SF ₆	电力行业	<ul style="list-style-type: none"> 开展新型低温式效应环保绝缘气体等相关装备制备； 加速环保气体高压开关推广应用； 2023年起，新建站110、220千伏GIS母线、隔离开关全面推广混合气体设备，力争2028年实现公司SF₆气体使用总量“零增长”（企业制度-国家电网）； 年SF₆泄漏率标准提升至0.1%（企业制度-国家电网）。 	<ul style="list-style-type: none"> 《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》 《关于开展混合气体GIS设备推广应用工作的通知》（企业制度-国家电网）

来源：iGDP 整理

4 我国非二氧化碳温室气体减排机遇与挑战

4.1 甲烷减排机遇与挑战

4.1.1 能源部门甲烷减排机遇与挑战

煤矿 CH₄ 减排主要通过对其逸散的 CH₄ 进行回收及利用。根据瓦斯的浓度采用不同的利用方式，主要利用方式如下表所示。总体而言，煤矿瓦斯的浓度越高，其利用的技术经济性也越好（山西卓越瓦斯研究中心，2021）。

表 15 煤矿瓦斯综合利用技术路线

CH ₄ 浓度	主要来源	用途	特征	经济性
90% 以上	地面煤层气抽采及少量的煤矿井下抽采	民用、汽车燃料等。	便于储存和远距离运输。	技术可行性高，技术路线成熟，收益稳定，是我国目前普遍采用的瓦斯利用方式。
30%~90%	煤矿井下抽采	民用、化工原料、燃气锅炉、发电、CH ₄ 提纯等。		
8%~30%	煤矿井下抽采	基本用于发电，内燃机发电配套余热利用。	不便于长途运输，就近送入煤层气管网或发电。	技术路线成熟，发电经济性较好，在我国多地已有应用且运行相当稳定。
1%~8%	煤矿井下抽采	催化氧化或蓄热氧化供热或发电。		投资成本高、经济性差，仍处于项目示范阶段。
1% 以下	煤矿乏风瓦斯	主要通过掺混氧化和辅助燃料技术实现利用，剩余全部排空。	CH ₄ 浓度低且风量巨大，难以直接利用。	投资成本高、经济性差，盈利依赖高碳交易价格和规模效应。

来源：iGDP 根据《〈煤层气（煤矿瓦斯）排放标准〉（修订 GB 21522-2008）编制说明》整理

据统计，CH₄ 浓度低于 0.75% 的乏风瓦斯占我国煤矿瓦斯 CH₄ 总量的 81%（渠沛然，2023）。2024 年 7 月，生态环境部先后组织编制了《温室气体自愿减排项目方法学 煤矿低浓度瓦斯和风排瓦斯利用》（以下简称《方法学》）和《煤层气（煤矿瓦斯）排放标准（修订征求意见稿）》（以下简称《排放标准》），并公开征求意见。

《标准》已于 12 月被批准并发布，并于 2025 年 4 月 1 日起开始实施。此后允许排放的煤矿瓦斯排放限值从 30% 调整到 8%，对于促进资源回收、控制 CH₄ 排放、应对气候变化具有积极作用。生态环境部相关负责人指出，《排放标准》实施后每年可减少 CH₄ 排放约 5000 万吨 CO₂e（中华人民共和国生态环境部，2024a）。

2025 年 1 月 3 日，《方法学》正式发布，规定符合条件的低浓度瓦斯和风排瓦斯通过分解销毁并将分解产生的热能发电、供热或热电联产方式加以利用的项目，可以参与全国温室气体自愿减排交易市场并获得减排量收益。考虑到此类技术处于产业发展初期，投资建设和运费成本高，《方法学》采取免于额外性论证的方式。经估算，当前已建项目可产生的年减排量约为 450 万吨 CO₂e，到 2030 年可增加至月 2000 万吨 CO₂e（中华人民共和国生态环境部，2024b）。

【专栏 3】山西省阳煤二矿超低浓度煤矿瓦斯减排实践

位于山西省阳泉市的阳煤二矿桑掌乏风氧化热电联供项目，由兴边富民（北京）清洁能源技术有限公司和阳泉煤业采用 BOT（建设—运营—转让）模式合作建设。项目通过引进国际先进的蓄热式高温氧化技术（RTO）来对桑掌风井排空的乏风和低浓度瓦斯进行回收利用，该技术以氧化销毁方式处理排空的瓦斯，同时通过热电联供系统在采暖季提供清洁供暖，代替煤矿风井原有的小型燃煤热风炉。

项目于 2017 年 9 月开工建设，2018 年 11 月实现供热，2019 年 5 月实现并网发电。参考项目每小时平均发电量估算，年甲烷摧毁量约为 3504 万标方。由于用瓦斯发电替代了燃煤发电，年减排 CO₂ 量达到 83 万吨。

项目收益主要来自瓦斯发电上网所得的电价收益，一小部分来自为煤矿供热带来的收益。此外，项目也享受国家对瓦斯发电增值税即征即退的优惠税收政策（绿色创新发展研究院，2024）。

但是，目前我国已经投入运行的低浓度煤矿瓦斯和风排瓦斯利用项目仅有 20 个左右，项目收益率均低于行业基准收益率，且项目的盈利高度依赖电价补贴，尚未形成规模化发展态势，企业的投资积极性也不高。iGDP 此前针对低浓度煤矿瓦斯减排的案例研究指出，除了高度依赖政府补贴以及补贴缺乏差异性之外，低浓度煤矿瓦斯减排还面临气源供应不稳定、单位造价高、稳定燃烧和安全输送等技术挑战。对于煤矿企业而言，保障安全的煤炭生产和稳定的煤炭供应仍是其主要任务，因此煤矿企业往往缺乏对低浓度瓦斯利用的积极性。

我国煤矿 CH₄ 中还有一部分来自废弃矿井（AMM），仍需要更多研究。由于煤矿的废弃时间、状态、残余气体含量以及地址条件等都可能产生影响（梁运培等，2023），AMM 的排放特征和排放量都还需要更加精准的测算。此外，AMM 减排技术在我国开发还处于探索阶段，专业公司缺乏（朱妍，2021），也需要更多研究试验。从管理层面看，目前国内缺乏针对废弃矿井管理和减排方面的政策，近期出台的《方法学》尚不适用于废弃或关闭的井工煤矿。加之根据规定，采矿人的所有权会在矿井废弃后被收回，使得煤矿关闭后土地、财产和资源的所有权和责任监管不明确，也阻碍着 AMM 治理的发展（崔相飞等，2022）（联合国欧洲经济委员会，2023）。

4.1.2 农业部门甲烷减排机遇与挑战

农业领域 CH₄ 减排与循环经济、粮食安全、乡村振兴等重要政策之间存在协同，农业领域一直是农业农村减排固碳的重点机遇所在。

畜禽养殖

养殖业的 CH₄ 排放主要来自反刍动物胃肠道发酵和动物粪便管理。在反刍动物肠道发酵方面，《农业农村减排固碳行动方案》和《甲烷减排行动方案》中提出推广低蛋白日粮、全株青贮等技术；合理使用基于植物提取物、益生菌等饲料添加剂和多功能营养舔砖等技术手段来控制 CH₄ 排放。

- **调整饲料结构：**通过对粗饲料进行青贮、微生物处理或氨化处理等可以减少 CH₄ 排放（娜仁花等，2011）。调整饲料配方并精准投喂，优化饲料的精粗比也可以减少 CH₄ 排放。

- **饲料中添加辅料：**添加茶皂素和大蒜素等植物提取物，能够通过调控瘤胃微生物等途径降低 CH₄（邹晓霞等，2011）。添加酵母菌和芽孢杆菌、乳酸杆菌等益生菌也可以调控瘤胃发酵作用从而降低 CH₄ 排放（高尔等，2022）。

我国一直以来致力于提高畜禽粪便管理水平，同时积极推动资源化利用。《农业农村减排固碳行动方案》和《甲烷减排行动方案》中提出，改进畜禽粪污处理设施装备，推广粪污密闭处理、气体收集利用或处理等技术，以降低 CH₄ 排放。

- **优化畜禽粪污管理：**通过干清粪和粪水分离方式处理畜禽粪污，减少了进入厌氧环境的有机物的总量，可以减少 CH₄ 排放（朱志平等，2020）。

- **畜禽粪污肥料化利用：**好氧堆肥过程中通过翻堆和强制通风可以减少 CH₄ 排放，通过添加生物炭可以同步降低 19% 的 CH₄ 排放（朱志平等，2020）。

- **畜禽粪污能源化利用：**主要包括建设沼气工程，将收集到的沼气进行并网发电或者制成生物天然气等方式。研究显示，收集畜禽粪污厌氧发酵产生的沼气能大幅减少 CH₄ 排放（胡敏等，2022）。

【专栏 4】江西省正合环保集团畜禽粪污资源化、能源化利用项目

江西省正合环保集团在南昌市流湖镇投建生态农业科技园，对南昌市红谷滩区和新建区 229 家规模化养殖场实行生态改造，联动农村厕所和公共厕所粪污，实现人畜粪污共治。人畜粪污由密闭运输车全量化收集至处理中心进行厌氧发酵，产生沼气用于园区自用电，沼液沼渣制造商品有机肥用于销售。

园区每年处理粪污 30 万吨，产生沼气 500 万立方米，发电 1000 万度；生产各种固态有机肥 2 万吨，沼液肥 26 万吨，土壤调理剂 1000 吨。年产沼气可替代 7400 吨标煤，减排二氧化碳 1.8 万吨，沼肥利用相当于减少化肥施用 1 万吨。在减少温室气体排放的同时，避免了区域农业面源污染。

由于项目场地、设备投资规模在 4-5000 万元左右，为减少投资压力、促进更多项目落地，正合集团通过与地方城投合作的形式进行轻资产投资，在江西全省运行、筹备了十余个类似项目（绿色创新发展研究院，2023）。

水稻种植

稻田 CH₄ 排放控制可以通过水分管理、农田管理和推广高产低排的水稻品种等方式实现。《农业农村减排固碳行动方案》和《甲烷减排行动方案》中提出，因地制宜推广稻田节水灌溉技术；选育推广高产低碳水稻品种；改进稻田施肥管理，推广有机肥腐熟还田等促进稻田 CH₄ 减排的行动。

- **稻田灌溉模式调整：**相较于长期淹灌，采取中期晒田的方式不仅能提高水稻产量，还能减少 20%-60% 的 CH₄ 排放（汪笑溪等，2024），湿润灌溉和间歇灌溉也可以分别减少 CH₄ 排放 47% 和 39%（米松华等，2016）。

- **调整农田管理措施：**少耕和免耕相比翻耕，能够一定程度上减少 CH₄ 产生。研究表明免耕稻田比传统翻耕稻田的 CH₄ 排放低 30% 左右（Zhao 等，2016）。秸秆腐熟还田的 CH₄ 排放约为秸秆直接还田的 1/3（石生伟等，2010），过腹还田或旱季还田也能削弱 CH₄ 减排。

- **高产低排的水稻品种：**高产低排水稻品种选育可以在种植中保持高产稳产的同时降低 CH₄ 排放。在保障粮食安全的前提下，推广此项技术能够实现我国稻田 CH₄ 减排 5%-10%（非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组，2022）。

【专栏 5】我国气候友好水稻种植减排实践

云南和四川山地地区的一些乡村，通过开沟起垄的方式来进行水稻旱作——在平整好的田地里开挖形成的长条形土堆（即垄）的上面进行水稻种植，而在垄和垄之间较为低洼的地方（即垄沟）上进行灌溉，可以大幅减少稻田与水接触的时间并进而减少 CH_4 排放。

在四川简阳地区的一个村庄，农户正在通过覆盖免耕和开沟起垄的方式来种植水稻。在水稻种植前采用免耕方式减少对土壤的扰动，在种植过程中采用开沟起垄减少水稻淹水时间，同时用菜籽饼来作为肥料替代化肥，并且采用当地的菜籽壳做覆盖来增温保湿。

在云南山地地区，当地一支关注农业气候变化的团队也对水稻直播旱种进行了尝试，探讨能够适应干旱条件的水稻种植方式。通过与当地的农技推广中心以及农户合作，选取高产低排放的水稻品种来尝试直播旱种（绿色创新发展研究院，2023）。

“大国小农”是我国的基本国情农情，也给我国农业部门的 CH_4 排放管控带来挑战。首先，我国作为耕地少、人口多的国家，在农业生产中需要在确保粮食安全的前提下来对 CH_4 排放进行管控。其次，我国农业部门的 CH_4 排放源仍较为分散，生产端的排放难以管理。全国小农户数量占农业经营主体的 98% 以上，经营耕地面积占总耕地面积的 70%（苑鹏，2024）。2020 年我国的畜禽养殖规模化率达到 67.5%，与发达国家还有相当差距。因此，我国目前针对农业部门 CH_4 减排的措施主要集中在末端的秸秆和畜禽粪污资源化利用环节。针对水稻种植和反刍动物肠道发酵环节的排放，短期内实现规模化的 CH_4 减排仍有较大挑战（张博等，2022）。

此外，农业部门 CH_4 减排缺乏经济激励。长期以来，种植水稻这样的粮食作物本身不具备太多经济激励，即使有些措施能够带来减排和增产的效应，但考虑到需要额外投入的人工和时间，农户也往往缺乏积极性（夏志坚，2023）。养殖业也面临类似的挑战，牧场缺乏具有可操作性和激励性的政策与技术措施，导致养殖户的积极性不高。一些 CH_4 抑制剂和添加剂的大规模应用还受添加剂残留、抗生素禁用、食品安全、消费者喜好等因素的影响（张秀敏等，2020）。

4.1.3 废弃物处理部门甲烷减排机遇与挑战

固废处理

在国家的引领下，绝大部分省份已在《“无废城市”建设实施方案》、《城乡建设领域碳达峰实施方案》等政策文件中明确提出生活垃圾资源化利用的目标，将有利于固废处理的 CH_4 减排。

- **源头减量、垃圾分类：**首先在生产、流通和消费过程中减少垃圾量的产生，其次对垃圾进行分类收集、运输和处理。目前，我国已在 46 个城市实行生活垃圾强制分类。

- **餐厨垃圾厌氧消化：**利用微生物在厌氧环境中将有机物转化为沼气和沼渣沼液，可以实现物质和能源回收。沼气可发电和供热，沼渣沼液可以生产液肥或堆肥。

- **加强垃圾填埋气回收利用：**利用垃圾填埋气发电和供热，或提纯作为天然气进行利用的工艺技术十分成熟，在我国上海、天津、广东、陕西、山西等地均有应用。此外，垃圾填埋气还能制取汽车燃料（张相锋等，2006）。

【专栏 6】我国垃圾填埋场填埋气综合利用实践案例

广东省深圳市下坪填埋场生活垃圾填埋量约为 6000 吨 / 日，自 2007 年开始进行填埋气收集及 CH₄ 摧毁，部分气体以特许经营的方式开展综合利用。填埋气收集系统为政府投资，企业付资源使用费，填埋气发电利用系统和提纯利用系统为企业投资建设并运营管理，项目运营商为中国水业集团。

目前填埋气收集量为 40000 立方米 / 时，其中部分通过发电机组发电后并入电网，日发电量为 80 万千瓦时；另建有填埋气提纯系统，处理能力为 5000 立方米 / 时，60000 立方米 / 天，其余填埋气经封闭式火炬进行 CH₄ 摧毁。下坪填埋场于 2007 年申请注册为 CDM (京都议定书下的清洁发展机制项目)，共计实现减排量 448 万吨 CO₂e (绿色创新发展研究院，2021)。

废水处理

我国历来重视污水处理。《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》和《甲烷排放控制行动方案》分别着力于减少厌氧处理过程的 CH₄ 排放，以及对末端的 CH₄ 进行回收和资源化利用。

- **开展污水管网清淤管护：**定期对污水管网进行清淤维护可减少污水中的有机碳转化成 CH₄ 排放，同时避免污水处理厂进水碳源浓度偏低、影响污水处理效率 (刘良伟，2024)。

- **安装污泥厌氧消化系统：**厌氧消化池用于处理好氧污水处理过后的污泥等生物固体，能够产生沼气，所收集的 CH₄ 能够通过能源化利用 (注入天然气网或用作发电、供热等) 来减少排放 (胡敏等，2022)。

- **在现有露天厌氧池中加装沼气抽采系统：**与投资建设新的集中式好氧处理厂相比，封闭现有的污水处理池并抽采沼气或具有更优的经济性 (胡敏等，2022)。

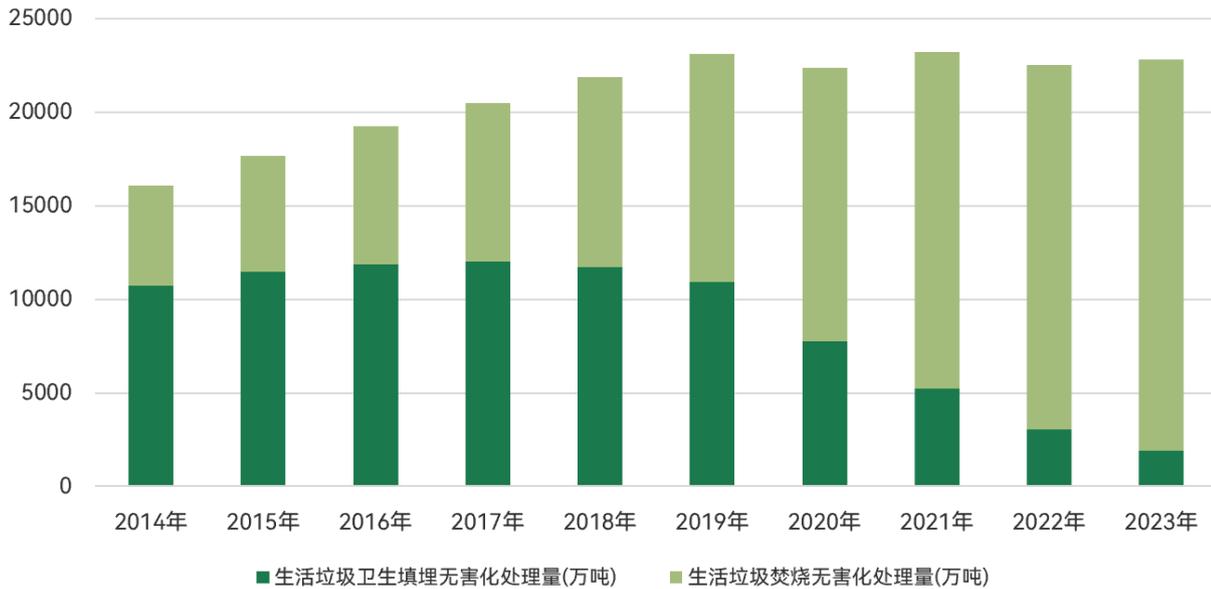
【专栏 7】北京高安屯再生水厂厌氧消化沼气发电案例

高安屯再生水厂位于北京市东北部，污水处理规模约 20 万立方米 / 天，污泥处理规模约 1800 吨 / 天。2022 年 7 月，北京排水集团与北京环卫集团签署战略合作协议，在高安屯再生水厂启动餐厨垃圾与污泥协同处理的工作。

高安屯再生水厂配有 5 台沼气发电机组，总装机容量 6MW，通过协同处置 700 吨污泥 / 天和 550 吨厨余垃圾 / 天，每年可产沼气约 3143 万立方米，沼气发电量约 4680 万度，折合节约标煤 0.58 万吨 / 年，相当于减少 1.57 万吨 CO₂ / 年。(北京青年报，2024)。

随着经济发展和城镇化水平的提升，近年来我国生活垃圾处理量呈现快速增长趋势。国家统计局公布的相关数据显示，2020 年以来我国城市生活垃圾处理量相对稳定。计算显示，2023 年的处理总量相比 2014 年的增幅超过 42%；从处置结构来看，已由填埋为主转向焚烧为主，填埋处理量占比从 2014 年的 66% 下降到 2023 年的 8%。

图 15 2014–2023 年我国城市生活垃圾无害化处置结构分布



数据来源: 国家统计局

但我国各地的垃圾处理能力仍不平衡，对于中西部一些基础设施不健全的小城镇，填埋依然是垃圾处理的主要方式。我国的废水处理也有类似问题，即污水处理设施数量多，处理规模差距大、工艺复杂，且地区分布不均（自然资源保护协会，2023）。对于废弃物处理领域而言， CH_4 排放的空间分布差异性和地区的不平衡性，使整体性减排进程更加复杂和具有挑战（张博等，2024）。

4.2 氧化亚氮减排机遇与挑战

因为推动能源转型和改善空气质量相关的政策将对能源部门中 N_2O 减排有协同作用，因此这里将重点关注我国 N_2O 最主要的两个排放源——农业和工业部门。

4.2.1 农业部门氧化亚氮减排机遇与挑战

改进肥料种类

- **采用有机肥替代化肥：**通过有机肥替代化肥可减少化肥施用量，并调节土壤中微生物活性，可以减少 N_2O 排放。但是有机肥推广面临成本高、效益低、配套设施不足等挑战（周楠等，2020）。
- **添加生物炭：**生物炭多孔结构适宜微生物生长并有利于土壤氮素的固定，降低土壤 N_2O 的排放（严圣吉等，2022）。
- **采用缓控释肥和硝化抑制剂：**通过施用缓释肥，肥料氮素逐步释放，控释肥可以降低氮肥流失率，节省氮肥用量，进而减少 N_2O 排放。此外，采用硝化抑制剂抑制硝化速率也可以减少 N_2O 排放（邹晓霞等，2011）。

优化施肥管理

- **测土配方**：基于土壤养分的需求进行合适施肥可以避免过度施肥以及肥料利用率低的问题。我国从 2005 年开始推广测土配方施肥技术，2024 年统计数据显示，全国测土配方施肥技术年推广面积超过 23 亿亩次，其中在三大粮食作物上的应用覆盖率超过 95%（郁静娴，2025）。

- **肥料深施**：通过改变传统的表面撒施的施肥方式，将肥料施到作物根系密集的土层下面，不仅可以提高氮肥的利用效率，还可以减少氮肥通过氨挥发、径流等途径的损失比例（彭术等，2019），同时也减少氮肥施用和 N₂O 的排放（C. Zhang 等，2022）。

- **水肥一体化管理**：采用滴灌方式将养分均匀送到作物根层，减少土壤中利于硝化反硝化过程，进而减少 N₂O 排放。我国目前也在华北、西北等地区逐步应用水肥一体化滴灌技术（郑利杰等，2018）。

- **精准农业**：通过传感器来收集土壤、农作物的信息以及天气、温度等环境数据，然后通过大数据分析来为农户提供种植、灌溉施肥等建议。

【专栏 8】中化化肥公司智能配肥服务站

中化化肥公司，在农业部支持下，从 2014 年以来，在全国推出了以智能配肥机为主的智能配肥服务站，通过智能配肥机来进行精准的测土配肥（农民日报，2016）。种植大户和散户均可以通过与互联网智能配肥终端对应的应用软件。输入种植信息并提供测土图样，配肥机可以进行快速测土，并且将测土结果传送到云端。云服务器根据测土结果计算出种植方案、所需的肥料配方和价格，最终生成配肥订单发送到农户的智能手机上（王立伟，2016）。经过智能配肥的化肥由于直接从工厂到农民手中，节省了流通环节的加价。测算显示，智能配肥系统可直接减少施肥量和成本投入 10%~30%，同时作物增产 5% 以上，服务农民增收 10% 以上（李纯，2016）。

优化畜禽粪污管理

- 通过合理的管理可以有效减少畜禽粪污贮存过程中温室气体排放，包括在粪污管理中采用固液分离，液体部分进行厌氧沼气，固体部分进行好氧堆肥，并且缩短液体粪肥贮存时间等。

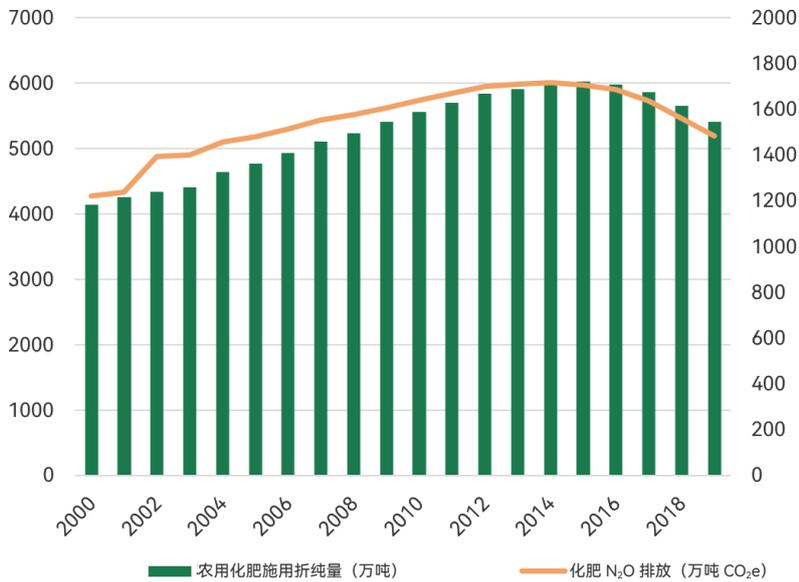
- 在粪便贮存中添加包括生物炭和膨润土等辅料可以实现 N₂O 减排（雷鸣等，2019）。而在畜禽粪污的肥料化过程中，在好氧堆肥中通过翻堆和强制通风也可以减少 N₂O 排放（朱志平等，2020）。

【专栏 9】牧原集团楼房养猪项目

在河南省南阳市内乡县大花岭村，牧原集团投资建设的楼房养殖综合体项目 2022 年投产运营，这里有 21 栋六层楼的猪舍，可年出栏 210 万头猪。在牧原 21 栋楼房养猪综合体，全部采用了优化改进的粪水净化回用工艺。固液分离后的固体直接用于加工成固体肥料，粪水则通过黑膜厌氧发酵生成沼气用于加热和发电，厌氧发酵后的水经生化处理、臭氧消毒等 5 道净化成无菌无毒的净水处理，再循环回到楼房猪舍用于给猪喷淋降温和场区消毒。2022 年，牧原通过粪水净化处理废水达 1260 万立方米，累计粪水回用 307.23 万立方米、洗消水及除臭水回用 3.94 万立方米。牧原推广低豆粕促进了养殖饲料源头减氮，创新应用无供热猪舍实现了零化石燃料供暖，研发猪舍出风废气净化系统减少了猪舍内部 N₂O 等温室气体排放。2022 年，牧原成功通过国际自愿减排交易获得第一笔减排收益，成为河南省唯一达成碳交易的企业（农民日报，2023）。

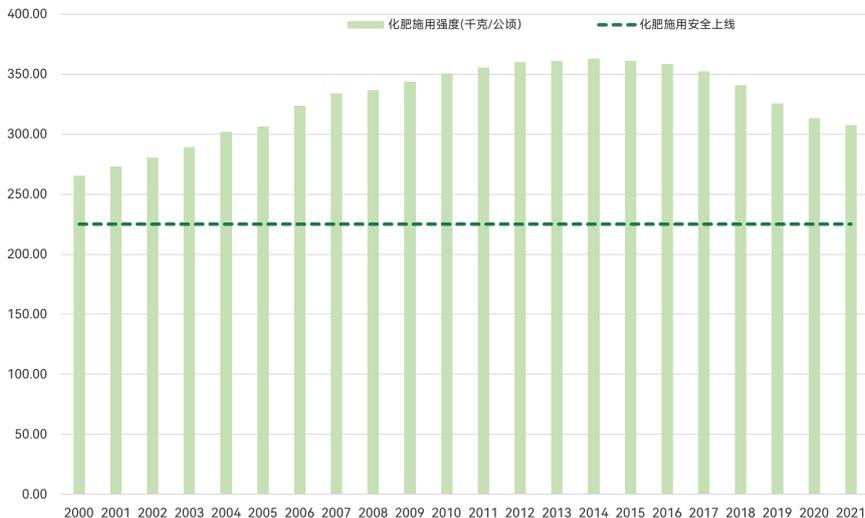
然而，作为我国农业 N₂O 最主要的排放源——农用地中的氮肥施用，由于需要在确保粮食安全和农产品增产增收的前提下实现减排，仍面临一定挑战。我国采取的主要方案是化肥减量增效，例如 2015 年发起的化肥农药使用量零增长行动，并且在 2017 年已经提前三年实现了化肥农药使用量零增长的目标。采取具体行动包括支持和鼓励采取测土配方施肥技术、有机肥资源利用以及示范推广缓释肥、水溶肥等新型肥料等方式来降低化肥使用。随着化肥减量增效政策的密集出台，我国化肥施用量自 2016 年开始缓慢下降，也是我国从 1974 年以来首次实现化肥的负增长（张福锁，2017）。并在 2017 年提前三年实现化肥零增长目标（焦莹，2017）。如下图所示，我国化肥施用量 2016 年为 5984 万吨，比 2015 年减少 38 万吨，并在 2019 年下降到 5403 万吨。与此同时，来自化肥施用的 N₂O 排放也在同步下降中。尽管我国农用化肥使用呈下降趋势，但是 2021 年，我国化肥施用强度在 307 千克 / 公顷左右，仍然超过国际公认的安全上限 225 千克 / 公顷（绿色创新发展研究院，2024）。未来，要实现碳中和目标下 N₂O 的深度减排，仍需更多维技术和模式的探索。

图 16 2000-2019 年我国农用化肥施用量（万吨）与化肥施用 N₂O 排放量（万吨 CO₂e）



数据来源：农用化肥施用量数据来自国家统计局年鉴，化肥 N₂O 排放数据来自 FAO

图 17 我国化肥施用强度（千克 / 公顷，2000-2021）



数据来源：国家统计局年鉴

4.2.2 工业生产过程氧化亚氮减排机遇与挑战

N_2O 在工业部门的主要排放来自硝酸和己二酸的生产过程中。我国化工行业中的 N_2O 排放中大约 90% 左右来源于己二酸的生产，其次是硝酸生产的排放 (liang 等, 2024)。目前减少硝酸和己二酸生产 N_2O 排放主要采用催化分解技术。

己二酸生产

目前针对己二酸生产装置有四种 N_2O 处理工艺，分别为热分解法、催化分解法、苯氧化法和精馏法 (重庆华峰化工有重庆华峰化工有限公司等, 2024)。

- **苯氧化法**：可将 N_2O 变成资源回收利用，但工业化应用尚不成熟 (重庆华峰化工有限公司等, 2024)。

- **精馏法**：通过洗涤、压缩、吸附、精馏方法提纯出 N_2O ，由于市场应用领域及成本原因，目前市场有限 (重庆华峰化工有限公司等, 2024)。

- **热分解法和催化分解法**：工艺成熟，两者可将 N_2O 分解为氮气和氧气。其中，热分解法对 N_2O 的分解可以达到 88% 左右，催化分解法可以达到 95% (江屿等, 2018)。国内己二酸生产中的 N_2O 处理技术目前以催化分解为主。已有企业在己二酸生产装置上建设 N_2O 分解装置，使用催化剂对 N_2O 排放进行处理，但是多数企业使用了进口催化剂。

【专栏 10】重庆华峰化工己二酸生产 N_2O 减排实践

重庆华峰化工有限公司从 2010 年开始，其己二酸的产业规模以平均每两年新建一期项目的速度扩张，目前已经具备年产 150 万吨己二酸的生产能力 (刘冰逸 & 孟晶, 2023)。公司也与上海华峰研究院联合展开了“己二酸生产过程 N_2O 低温催化分解消除技术及工业化应用”项目。经过十多年的投入和研发，突破了 N_2O 低温催化分解技术并建成了工业化装置。项目研发了将己二酸尾气中的 N_2O 进行低温分解的催化剂——T350 低温催化剂，该催化剂起活温度较国际主流技术降低 100℃，降至 350℃ 以下，在催化剂作用下， N_2O 经催化分解生成 N_2 和 O_2 的转化率在 95% 以上，设备投资成本下降 60%，并创新集成余热回收系统。以 18 万吨 / 年己二酸装置为例，其年处理 N_2O 达 4.82 万吨，相当于减排 1315 万吨 CO_2e (徐岩, 2025)。目前，建成了两套可处理 18 万吨 / 年己二酸生产过程 N_2O 低温催化分解消除工业化应用装置，将 N_2O 分解率提高到 99% (左黎韵, 2014)。通过采用创新的 N_2O 减排技术，重庆华峰不仅减少了实现了尾气无污染排放，同时将大幅降低公司在重庆碳市场中需要购买的碳排放的指标数量，实现绿色环保和经济效益的双赢 (重庆日报, 2024)。此外，这项技术也被列入了国家重点推广的低碳技术目录 (第五批)。

硝酸生产

硝酸生产中减少 N_2O 排放的措施可以分为一级、二级和三级控制措施 (李佳等, 2023)。

- **一级控制措施**：主要通过改进氨氧化催化剂来减少 N_2O 形成，可以减少 30%-85% 的 N_2O 排放，但是仅适用于新建厂采用 (李佳等, 2023)。

- **二级控制措施**：主要是在氨氧化催化剂之后布设 N_2O 高温分解催化剂使 N_2O 在炉内发生分解，减排效率在 80-90% 左右，由于投资少和改造简单，应用较多 (柯宇, 2016)。

- **三级控制措施**：主要借助催化分解或者催化还原等技术脱除硝酸生产尾气中的 N_2O ，减排效率可以达到 95%。与二级减排相比，三级减排运行费用相对较高，但是由于减排系统安装在尾气部分，对硝酸生产基本没有影响（柯宇 & 安明，2014）。

【专栏 11】四川蜀泰化工硝酸生产 N_2O 减排实践

四川蜀泰化工科技有限公司在 2016 年开发成功了 SCST-102 型 N_2O 炉内减排催化剂，是一种具有多金属氧化物成分的复合型催化剂。同年在四川金象塞瑞化工股份有限公司 150kt/a 双加压法稀硝酸装置上投入试运行。在测试周期中， N_2O 炉内减排催化剂稳定性良好，硝酸产量处于正常水平， N_2O 减排效率维持在 70% 左右，对 N_2O 分解选择性良好，没有产生 NO 分解、 NO_2 分解等副反应（吴小强等，2021）。四川蜀泰化工自主研发的 N_2O 减排催化剂生产研究与应用项目，也通过了由中国氮肥工业协会组织的专家评审。此外，项目开发的 N_2O 减排催化剂成本较低，实现了硝酸生产中炉内 N_2O 减排催化剂国产化（搜狐新闻，2020）。

不过，目前我国化工行业中安装并使用 N_2O 减排装置进行己二酸和硝酸生产的企业仍然不多。早前受《京都议定书》下清洁发展机制（CDM）的激励，我国硝酸和己二酸企业曾采用催化氧化技术来申请 N_2O 减排项目，例如辽阳石化曾引进巴斯夫的催化分解技术建设了己二酸尾气减排装置（李飞等，2018），河南神马曾经引进了英威达催化剂分解技术用于己二酸尾气处理，安徽淮化集团采用 Yara 的二级催化剂处理硝酸生产的 N_2O 排放（陈标华等，2023）。但是随着 2013 年欧盟停止购买国内 N_2O 减排的 CDM 项目之后，在没有额外经济激励以及对 N_2O 控排的政策约束下，这些减排装置处在时开时停的状况（陈标华等，2023）。

对于 N_2O 减排中所需要的关键要素催化剂，我国研究起步晚、工业化应用进程较慢，因此早前大多数企业都通过引用国外的催化剂来实现减排（李飞等，2018）。近年随着我国碳交易发展也推动国内自主研发催化剂技术发展（陈标华等，2023），例如重庆华峰研发的己二酸生产过程中 N_2O 低温催化分解消除技术并建成了工业化装置， N_2O 分解率可以达到 99%（刘冰逸 & 孟晶，2023）。四川蜀泰化工研发的 N_2O 减排催化剂也在硝酸生产中实现试运行（四川蜀泰化工科技有限公司，2019）。

4.3 含氟温室气体减排机遇与挑战

4.3.1 HFCs 减排机遇与挑战

HFCs 的减排关键在制冷空调行业，对此，主要的减排技术包括环保型替代品的研发与制冷剂回收再生。而除制冷行业外，HCFC-22 生产导致的副产 HFC-23 排放也备受关注，作为 GWP 值最高的 HFCs，HFC-23 是《蒙特利尔议定书》规定的应尽量销毁的气体。

制冷剂行业

- **研发与使用低 GWP 值替代品**：这是从源头降低 HFCs 排放的核心举措之一。2023 年发布的《中国消耗臭氧层物质替代品推荐名录》将丙烷（R290）、异丁烷（R600a）、二氧化碳（R744）、氨（R717）等列为了推荐替代品。

- **制冷剂回收再生技术**：将设备中的制冷剂回收后，根据其纯度、单一或混合工质等特性，选择简易再生或蒸馏再生技术，实现制冷剂的提纯再生（骆理学，2014）。

【专栏 12】我国制冷行业 HFCs 减排实践案例

对于制冷剂替代技术，在天然工质制冷剂领域，我国空调行业已经开展多年关于 R290 技术路线的探索，改造 R290 生产线 29 条，年产能约 1839 万台（刘拓，2024）。其中，截至 2022 年，美的集团改造了 9 条 R290 生产线，并在芜湖美的工业园下线了全球首台 R290 新一级能效空调产品（安徽环境新闻网，2022）。

除天然工质外，氢氟烯烃（HFOs）制冷剂也可能是一条替代路径。目前国内 HFOs 产能多来自给国外代工或中外合资公司。例如，巨化股份为霍尼韦尔代工生产 4 种 HFO、中化蓝天霍尼韦尔合资公司生产 HFO-1233zd 等。也有部分国内企业已具备自主知识产权的 HFOs 生产技术，例如，环新氟材通过三氟乙烯为原料制备 HFO-1234fy，并建成年产 3000 吨的产业化装置。

而在制冷剂回收再生领域，天津澳宏环保材料有限公司是目前国内最大的制冷剂回收再生企业，其主要技术性能指标已达到国际先进水平，并具有成本优势。2020 年，该企业回收再生制冷剂 815 吨，折合减排约 160 万吨 CO₂e；2021 年回收再生制冷剂 1200 余吨，折合减排约 240 万吨 CO₂e。

副产 HFC-23

《蒙特利尔议定书》核准的 HFC-23 销毁技术有 8 种，其中最主流的是高温焚烧，但这一方式能耗高且浪费氟资源。因此，我国鼓励企业探索降低副产率、资源化利用等解决方案（中华人民共和国生态环境部，2021）。

- **改进生产工艺：**通过提高催化剂寿命，优化反应压力、温度、催化剂浓度，调整原料供给配比和进料方式等可以降低 HFC-23 的副产率。目前，中国多数企业 HFC-23 副产率仍处于 2-3% 水平，通过产业化装置技术改进和过程优化可以实现副产率降低至 1% 以下（林军等，2022）。

- **资源化利用：**目前最具经济和社会效益的资源化利用路径是将 HFC-23 与氯仿（CHCl₃）进行氟氯交换，转化回 HCFC-22。该转化流程短、安全性高，能实现 HFC-23 的近零排放，且该技术与 HCFC-22 生产工艺耦合、投资成本相对较低（林军等，2022）（中国昊华化工集团，2024）。

【专栏 13】我国副产 HFC-23 减排实践案例

浙江省化工研究院与中昊晨光完成了与 HCFC-22 生产装置完整耦合的 HFC-23 转化工艺技术开发。该装置于 2023 年 12 月正式投料运行，实现年直接减排量 740 万吨 CO₂e 并能产生经济效益，该技术于 2024 年 8 月入选“2023 年度中国碳达峰碳中和十大科技创新”（李东海，2025）。

但是，HFCs 的减排仍面临多重挑战。尤其在制冷行业，天然工质制冷剂仍存在进一步提升使用安全和能效、降低成本等方面的需求。例如，R290（丙烷）具有易燃性，增加了使用时的应对需求，其进一步市场化的发展仍然需要长久的努力（JSRAE，2017）；R744（CO₂）运行压力高，增加了设备的耐高压要求和成本（X. P. Zhang 等，2013）。而对于 HFOs 制冷剂，尽管它是四代制冷剂发展的方向之一，但其是否适合可持续发展存疑，目前欧盟正在对 HFOs 等一系列化学品开展其是否有永久环境污染影响的研究。针对 HFOs 的最大不确定性在于其部分可以降解为三氟乙酸（TFA），环境 TFA 浓度增加对生态环境可能带来危害风险（Arp 等，2024）。

对于制冷剂的回收再生利用，我国的行业发展仍处在起步阶段。一方面，我国制冷剂回收率与回收比例都相对较低。据统计，2015年我国制冷剂回收量为113吨，尽管近年来增长迅速，并于2021年突破千吨，但与欧盟破万吨以及美国超7000吨的回收量仍有较大差距；且在回收空调、冰箱制冷剂的过程中，我国能实现的回收比例约为40%和14%，仍有极大提升空间（林军等，2022）。另一方面，制冷剂并不理想的回收情况也影响了后续的再生环节。由于回收量小、回收时分类情况欠佳，制冷剂再生费用可能达到4-10万元/吨（林军等，2022）。加之再生技术要求高、需要企业具备相应资质，开展制冷剂再生工作的企业数量极为有限。然而，当前我国激励机制和行政管理措施均相对缺乏的现状并不利于改善制冷剂回收再生行业所面临的问题。

4.3.2 SF₆ 减排机遇与挑战

SF₆的减排重点在电力行业，同样可以通过气体替代技术、回收净化技术实现。

- **电力设备 SF₆ 减少或替代技术：**将 SF₆ 与其他气体混合使用的混合气体替代技术，或是使用其他气体的完全替代技术可以实现减排。研究显示，在混合气体替代领域，当 SF₆/N₂ 中的 SF₆ 含量为 30%，气压为 0.7MPa 时，全球变暖值（GWP）约能降低 50%；而在气体完全替代领域，全氟异丁腈（C₄F₇N）和三氟甲基磺酰氟等展现出了相对较好的综合性能，但其 GWP 依然上千或可能降为温室气体（周文俊等，2016）（颜湘莲等，2016）。

- **SF₆ 回收净化技术：**对设备中尚未达到退役年限的 SF₆ 气体进行回收、净化和循环利用，2015年《国家重点推广的低碳技术目录》中采取的综合净化处理技术能达到 95% 以上的净化处理回收率。

【专栏 14】我国电力系统 SF₆ 减排实践案例

2017年以来，中国国家电网在河北、山东、安徽等多地开展了 SF₆/N₂ 混合气体母线、隔离接地开关试点；2023年起开展了 SF₆/N₂ 混合气体 GIS 设备推广应用工作；此外，无氟 GIS 设备也在我国不断推广，西门子 Blue 环保型 GIS 设备超过 100 台已投入运行（余娜，2024）。2020年，平高集团和西安交通大学自主设计开发了我国首台具有应用价值的 126kV 无氟环保型气体绝缘金属封闭开关设备（《电气技术》杂志社，2020）。

对于 SF₆ 的回收净化，国家电网研发了 SF₆ 气体回收处理和循环再利用成套技术与装备，建成 26 家省级 SF₆ 回收处理中心。截至 2020 年底，国家电网 SF₆ 气体回收率超过 96.5%，累计回收 SF₆ 气体 732.3 吨，相当于减排二氧化碳 1750.2 万吨（中华人民共和国国家能源局，2021）。

然而，目前我国针对 SF₆ 的减排主要仍依靠企业的自主行动，从政策层面尚缺乏有利的监管。如果未来能出台针对 SF₆ 排放的管控政策规定，制定电力等行业的 SF₆ 减排目标和监管体系，将有力推进我国 SF₆ 的减排进程。

4.3.3 PFCs 减排机遇与挑战

PFCs 的减排重点在电解铝行业，主要措施是通过改善设备、工艺降低产生 PFCs 的阳极效应。

- **电解铝降低（无）阳极效应设计及技术：**通过控制氧化铝浓度、提高阳极碳块质量和改善电解槽工艺技术条件等手段降低阳极效应系数、控制效应持续时间，实现有效降低过程中的 PFCs 排放，该技术在实现减排以外，还能带来额外的经济效益，具有良好的经济性（非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组，2022）。

除铝冶炼行业，近年来 PFCs 在半导体的应用使得其除无意生产过程排放外，还增加了产品生产的有意排放，对此，推动半导体企业回收刻蚀剂并实施再利用或者销毁等措施可以实现减排。

【专栏 15】我国电解铝行业 PFCs 减排实践案例

中国铝业股份有限公司、酒泉钢铁（集团）有限责任公司、云南铝业股份有限公司等企业开展了低阳极效应铝电解技术工业示范。其中，中国铝业公司在 350 万吨生产企业应用了大型铝电解槽低阳极效应技术，实现吨铝节电 50kW·h，减少温室气体排放 1 吨以上；酒泉钢铁（集团）有限责任公司通过 500kA 铝电解降低阳极效应技术实现将阳极效应系数控制在 0.013 次 /（槽·日），阳极效应持续时间 88 秒；而云南铝业股份有限公司则建立了 200kA 级铝电解“零效应”技术，阳极效应系数最低可达 0.007 次 /（槽·日）（非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组，2022）。

但总体而言，PFCs 的减排工作也需要更多的政策支持。2025 年 3 月 26 日，《全国碳排放权交易市场覆盖钢铁、水泥、铝冶炼行业工作方案》正式发布，我国宣布将铝冶炼行业的四氟化碳（CF₄）和六氟化二碳（C₂F₆）纳入管控（中华人民共和国生态环境部，2025），这将激励行业降低 PFCs 排放。然而，若要深入推进、实现 PFCs 减排，明确的减排目标、健全的激励约束体系、完善的监督管理制度仍是不可或缺的。

4.3.4 退役含氟温室气体无害化处理机遇与挑战

对于已报废的 F-Gases，需要对其进行无害化处理。

- **等离子体技术**：利用产生高温的等离子体破坏含氟温室气体分子，与传统的焚烧热解相比，该技术能效和去除率高，运行成本低（非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组，2022）。

【专栏 16】我国等离子体技术无害化处理 F-Gases 减排实践案例

据统计，2021 年，我国直接销毁的制冷剂中，有 62.3% 采用了等离子体裂解方式（林军等，2022）。

对于 HFC-23，中昊晨光化工研究院有限公司的等离子裂解 HFC-23 项目已于 2015 年底投入运行，其 2 套处理装置，总处理能力达每年 1000 吨，HFC-23 裂解去除率可达 99% 以上，年减排量约为 1420 万吨 CO₂e（中国昊华化工集团股份有限公司，2016）。

而针对 SF₆，南方电网贵州电力科学研究院研制的“低温等离子体降解强温室效应六氟化硫气体装置”已在贵州、湖北、重庆、安徽等地投入使用，该装置对 SF₆ 降解率达到 96%，已完成超过 77 万吨 CO₂e 的 SF₆ 气体降解工作（江伟，2023）。

不过，需要注意的是，等离子体方法处理废气时可能会产生部分副产物，例如，在处理 SF₆ 时，可能会产生有毒物质 SO₂F₂、SOF₂ 和 SOF₄ 等（崔兆仑等，2023）（张杰等，2023）。因此，对于进一步控制副产物的生成以及回收环节的研究还需要持续推进。

5 国家自主贡献与非二氧化碳温室气体减排展望

5.1 完善非二氧化碳温室气体减排政策与合作的顶层设计

5.1.1 增强国家自主贡献对非二氧化碳温室气体的减排承诺

我国作为《巴黎协定》达成的重要推动者，一直积极参与应对气候变化国际合作，推动《联合国气候变化框架公约》及其《巴黎协定》的全面有效实施。在 COP29 世界领导人气候行动峰会上，我国表示“将提交覆盖全经济范围、包括所有温室气体的 2035 年国家自主贡献”(中华人民共和国外交部，2024)，传递出非二温室气体控排进一步纳入我国 NDC 的积极信号。与此同时，在“十四五”期间，我国陆续出台的多项“双碳”战略规划和政策部署中对非二温室气体减排的关注也在加强，其中多项可以带来非二温室气体减排效益的政策行动也为我国更新 NDC 提供了重要依据（NDC 更新建议请见附件 1）。

5.1.2 加速《蒙特利尔议定书》履约进程

尽管相关预测显示，《蒙特利尔议定书》的《基加利修正案》足以对控制温升作出贡献，但国际社会仍可以考虑进一步提升《修正案》雄心、加速 HFCs 淘汰。这是因为，有相关研究指出，即使在完全遵守《基加利修正案》减排时间表的情况下，2050 年的全球 HFCs 排放相比 2010 年也仅会下降 56%，无法满足实现 1.5°C 目标所需的减排量 (Purohit, P. 等, 2022)。并且，由于 HFCs 在大气中的平均寿命较短，短期内减少 HFCs 排放的努力将显著降低未来几十年预计的温升幅度 (Center for Climate and Energy Solutions, n.d.)。

我国作为全球制冷产品出口大国，可以考虑加快 HFCs 减排布局，在汽车空调、房间空调器以及小型制冷设备等行业率先开展替代减排，以应对在《基加利修正案》履约下全球市场对环保制冷剂需求的增加。

5.1.3 推动双多边合作机制进一步发挥关键作用

当前在全球形成的包括“全球甲烷减排倡议”、“减少有机废弃物甲烷宣言”、“全球降温承诺”等非二减排合作机制，正积极推动着减排行动的交流和落实。与此同时，不同地区、城市间的合作以及行业、企业和非政府组织间的减排合作也在发挥重要作用。例如，区域层面，2023 年美国加利福尼亚州政府发起成立了“地方甲烷行动联盟” (Subnational Methane Action Coalition)，致力于为地方政府提供 CH₄ 减排的政策、数据和工具支持，推动 CH₄ 减排行动落实，目前已有 21 个地方成员加入；在行业、企业层面，2020 年，由联合国环境规划署、气候与清洁空气联盟、欧盟委员会、环境保护基金以及 62 家油气企业共同启动的“石油和天然气甲烷伙伴关系 2.0” (Oil and Gas Methane Partnership 2.0) 已经汇聚了全球超过 150 家企业，为企业提供 CH₄ 减排经验分享和技术指导，增强了行业 CH₄ 排放报告的准确性和透明度。

对于我国而言，在参与区域政府和非政府间合作的同时，可以发挥“一带一路”倡议和南南合作平台在非二温室气体减排领域的关键作用。并且考虑在上述不同的多边合作机制中，进一步强化与不同国家和地区间的交流，学习分享各自在非二温室气体的减排技术和实践。

5.1.4 优化国内非二氧化碳温室气体排放控制政策体系

考虑到非二温室气体排放源众多、减排行动需要不同部门支持的情况，针对各气体逐一出台控排方案，可以为我国非二温室气体减排提供明确目标，更好地协调不同部门间的减排行动。例如我国已经出台的《甲烷排放控制行动方案》和《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》对 CH₄ 和 HFCs 排放形成了管控，为我国非二温室气体控排政策体系建设奠定了基础。

对排放量大或排放气体种类多样、减排具有复杂性的重点部门和行业，可以考虑出台行业综合性非二温室气体控排规划。以农业部门为例，综合性的控排规划有利于在实现减排的过程中兼顾粮食安全、农产品增产增收等其他关切；并且，综合性控排规划还有利于协同不同气体的减排措施，实现最大减排效益。

由于非二温室气体减排与黑碳、近地面臭氧等大气污染物治理之间也存在协同控制的潜力，因此，将非二温室气体纳入到“减污降碳”的政策框架体系下，促进形成最具成本有效性的减排措施和最具综合效益最大的协同控制方案。

5.2 重点领域的优先减排措施

5.2.1 甲烷领域的优先减排措施

加速推进 CH₄ 减排的地方行动：在 2023 年《甲烷排放控制工作方案》发布后，宁夏、广东、山西、云南、湖北等多省市也陆续出台了地方甲烷控排行动方案，对标国家方案设定了相应的量化目标，并根据各省资源禀赋和排放情况提出重点减排任务。未来，推动地方 CH₄ 行动方案的落实和 CH₄ 减排实践的探索将助力全国 CH₄ 减排进展。

强化超低浓度煤矿瓦斯的排放控制和综合利用：作为我国能源 CH₄ 主要排放源的煤矿 CH₄，也是当前减排政策关注焦点。包括近期更新和实施的《煤层气（煤矿瓦斯）排放标准》要求禁排甲烷体积分数 8% 以上煤矿瓦斯，同时也发布了《温室气体自愿减排项目方法学 煤矿低浓度瓦斯和风排瓦斯利用》鼓励对 8% 以下的低浓度瓦斯和风排瓦斯进行利用和参与自愿碳市场。这些政策信号也为已有的低浓度煤矿瓦斯利用技术的推广应用带来了机遇。但是目前我国已经投入运行的低浓度煤矿瓦斯和风排瓦斯利用项目仅有 20 个左右，且项目的盈利高度依赖电价补贴，尚未形成规模化发展态势，企业的投资积极性也不高。因此未来通过多元化的金融产品开发以及推动绿色金融政策与减排项目的对接，将有望释放更多减排潜力。

加强对废弃矿井 CH₄（AMM）排放的统计和管控：随着废弃煤矿数量的持续增加，由此造成的废弃煤矿 CH₄ 排放占比也呈增长趋势。据估算，1998-2020 年，我国关闭了 7 万多资源枯竭和不符合安全生产条件的煤矿，煤矿数量减少到 4700 处左右。研究指出，2030 年，我国废弃矿井数量或将达到 1.5 万处（武晓娟，2019）；AMM 排在 2011 年和 2019 年分别占煤矿 CH₄ 排放总量的 8% 和 26%，但到 2035 年将成为煤矿 CH₄ 的主要排放源（Liu 等，2024）。未来建议加强对废弃矿井 CH₄ 逸散监测和治理利用技术研发，并且尽快摸清废弃矿井排放底数并提高对 AMM 的精准测算。同时也可以加强与其他国家和地区在 AMM 减排实践的交流与合作。

5.2.2 氧化亚氮领域的优先减排措施

推动工业领域率先采取 N₂O 减排行动：由于工业部门 N₂O 排放集中在己二酸和硝酸生产的化工企业，市场上已有相对成熟的减排技术，并且我国近期出台了《工业领域氧化亚氮排放控制行动方案》，因此 N₂O 减排有望从工业领域率先开始。但是，需要关注的是，目前我国化工行业中安装并使用 N₂O 减排装置进行己二酸和硝酸生产的企业仍然不多。随着我国在 N₂O 减排所需要的关键要素催化剂的自主研发上的突破，例如重庆华峰、四川蜀泰化工等企业开始运行 N₂O 减排装置，结合早前 CDM 项目在我国运行经验，可以通过纳入《绿色金融目录》或其他创新市场机制为工业 N₂O 提供经济激励并加速减排行动。

5.2.3 含氟温室气体领域的优先减排措施

以末端治理和产品标准更新为突破加速 HFCs 削减工作：作为制冷剂及制冷空调设备主要生产国和出口国，我国为推进《基加利修正案》履约而制定出台了《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》，方案锚定了制冷行业为下一阶段的减排重点，其中不仅强调了源头管控，同时也提到完善末端治理，例如提升对制冷剂分类回收和处理；以及对《绿色高效制冷行动方案》的落实，包括在主要制冷产品能效标识上增加制冷剂 GWP 值信息，研究制定冷链领域绿色制冷剂和发泡剂使用指导意见等。

强化 SF₆、PFCs 减排政策支持：由于我国目前尚未有针对 SF₆、PFCs 控排政策，这两种气体的排放量仍有上升空间。但随着企业层面 SF₆ 和 PFCs 减排行动的展开，结合企业减排实践探索出台相应的配套支持政策可以撬动更多减排潜力。

5.2.4 行业综合治理领域的优先减排措施

推动以粮食安全和乡村振兴为导向的农业非二温室气体综合减排行动：农业领域的温室气体排放有超过一半来自非二温室气体，但其减排行动的推进需要考虑粮食安全和农户生计。在农业 CH₄ 排放，我国长期支持农业畜禽粪污的资源化利用，例如实施种养循环一体化以及整县推进畜禽粪污资源化利用等行动，在稻田种植的 CH₄ 排放，云南、四川等地也在探索气候友好的水稻种植，尝试以节水省力的实践在保证产量的同时也可以带来 CH₄ 减排。农业 CH₄ 减排中可以聚焦对成本有效性的减排实践的识别，通过农业技术推广服务中心以及包括农民合作社和家庭农场等新型农业经营主体和服务主体来助力推广高产低排放的减排技术，在保证粮食安全的前提下，提高我国农业生产应对气候变化的韧性。

作为我国农业 N₂O 最主要的排放源的氮肥施用，由于需要在确保粮食安全和农产品增产增收的前提下实现减排，仍面临一定挑战。我国采取的主要方案是化肥减量增效，随着相关政策的密集出台，我国化肥施用量自 2016 年开始缓慢下降，但是化肥施用强度仍然超过国际公认的安全上限。未来，要实现碳中和目标下 N₂O 的深度减排，仍需更多维技术和模式的探索。

5.3 强化重点配套机制建设

5.3.1 提升非二氧化碳温室气体排放的数据基础

强化非二温室气体排放的数据基础。建立并完善非二温室气体排放的核算、报告和核查（MRV）制度，例如加快本地化排放因子和核算方法体系开发，可以为我国非二温室气体减排政策制定提供科学依据。2025 年 1 月，“国家温室气体排放因子数据库”上线运行，为碳排放统计核算工作提供重要数据平台。未来，通过进一步强化对非二温室气体排放的监测，利用“自上而下”和“自下而上”不同尺度监测相结合的方法对排放数据进行交叉验证，可以提升我国非二温室气体排放数据的准确性与透明度。

此外，非二温室气体排放的数据基础强化可以与企业环境信息强制和自愿披露工作相结合。2022 年起，《企业环境信息依法披露管理办法》开始施行，要求重点企业披露包括碳排放量，纳入碳排放权交易市场的企业还应依据温室气体排放核算与报告标准或技术规范，披露排放设施、核算方法等信息。2025 年 1 月，生态环境部等四部门发布《关于促进企业温室气体信息自愿披露的意见》，提出鼓励煤炭开采、油气开发、畜牧业和水稻种植等行业协会、重点企业，探索开展 CH₄、N₂O 等重点非二氧化碳温室气体信息自愿披露工作。结合企业温室气体强制和自愿信息披露的工作，对提升非二温室气体排放的数据基础具有协同作用。

5.3.2 发挥市场机制促进非二氧化碳温室气体减排

随着全国温室气体自愿减排交易市场（CCER）的重启，以及 CH₄ 体积浓度低于 8% 的煤矿低浓度瓦斯和风排瓦斯利用方法学发布，有望促进相关项目的落地和产业发展，为我国能源领域 CH₄ 减排提供机遇。

2025 年 3 月，全国碳排放权交易市场扩容，将钢铁、水泥、铝冶炼三个行业纳入，覆盖的温室气体也从 CO₂ 扩充到包括 CF₄ 和 C₂F₆。这一举措将助力市场机制发挥对非二温室气体减排的作用，此外，随着碳市场的发展与完善，碳核查、碳监测等领域也将迎来发展，对非二温室气体排放 MRV 制度的完善也有积极作用。

农业碳汇交易等市场化的激励措施也能通过市场机制鼓励非二温室气体减排。近日由生态环境部土壤中心自主设计的稻田甲烷减排项目碳普惠减排量，以 72 元 / 吨的价格在浙江省完成第一笔碳交易，大幅降低 CH₄ 排放的同时保障粮食安全、实现增收 30 元 / 亩，为我国农业绿色低碳转型提供了示范。

展望未来，我国可以考虑将更多非二温室气体排放源纳入碳市场的同时，对于缺乏成本有效性的非二减排实践或者前期研发投入高的减排技术提供市场化的激励机制，有利于进一步促进非二温室气体减排。

5.3.3 加大财政和金融机制对非二氧化碳温室气体减排的支持

加大对减少非二温室气体排放的低碳技术的财政投入。可参考对于重点行业节能降碳专项行动的资金支持，对各批次《国家重点推广的低碳技术目录》中涉及非二温室气体减排的低碳技术进行支持。例如，对实施工业过程非二温室气体减排的化工企业给予补助，以及给予和落实持续实施非二温室气体减排实践的企业所得税优惠政策。2025 年 3 月，《清洁能源发展专项资金管理办法》发布，对煤层气（煤矿瓦斯）的开采利用按“多增多补”的原则给予奖补，未来若能对煤矿瓦斯利用进行梯级补贴，对浓度低的煤矿瓦斯利用给予更大力度的不同，将促进我国能源领域的 CH₄ 减排。

积极发展绿色金融和转型金融，提供多元化绿色金融产品助力非二温室气体减排。通过鼓励与支持金融机构针对不同类型减排项目和技术开发绿色信贷、绿色债券、绿色保险等多种绿色金融产品，将进一步拓展非二温室气体减排项目的融资渠道。当前我国最新版的《绿色债券支持项目目录（2021 年版）》对天然气 CH₄ 泄露检测与修复装置配备以及电力开关设备 SF₆ 替代活动进行支持，未来适时修订标准时可以考虑囊括更多针对非二温室气体减排的技术和活动。我国近期发布的《绿色金融支持项目目录（2025 年版）》中，明确提到了对稻田低甲烷种植技术推广、减少农田氧化亚排放活动、低 GWP 值制冷使用以及畜禽粪污资源化利用等项目的支持。当前纳入项目大多基于高效节能和污染防治的角度，未来的目录更新如果考虑非二减排维度，将可以对包括超低浓度煤矿瓦斯利用以及工业己二酸 N₂O 减排的项目提供支持，进而带来更多减排潜力。

我国《气候投融资试点地方气候投融资项目入库参考标准》支持的“减缓气候变化类项目”涵盖众多非二温室气体减排项目，控制 CH₄、SF₆、HFCs 等气体的排放。随着气候投融资试点的落实和深化，非二温室气体减排项目有望在更多行业和地区落地。

此外，《绿色低碳转型产业指导目录（2024 年版）》提出对消耗臭氧层物质替代品开发与利用和油气田甲烷采收利用产业的生产、流通和消费各环节给予鼓励支持，同时鼓励金融机构对符合要求的项目和企业提供金融支持。未来若指导目录能够进一步扩展，将能为更多非二温室气体减排提供经济激励。

5.3.4 建立健全绿色消费激励机制

加强对绿色消费的激励有利于提高绿色低碳产品的市场渗透率。我国历来重视从消费端发力，支持绿色低碳产品发展，已有较好的政策基础。例如，《绿色高效制冷行动方案》提出促进低 GWP 制冷剂的推广应用；《促进绿色消费实施方案》关注衣食住行等重点领域，提出大力推广绿色有机食品、农产品；《农业农村部关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见》指出通过开展优质农产品消费促进活动，引导城乡居民采购绿色优质农产品。

未来我国的绿色消费激励机制可以与更多绿色低碳政策有机结合，引导全社会对绿色低碳产品的消费。例如，低 GWP 制冷产品的推广可以和“大规模设备更新和消费品以旧换新”（简称“两新”）政策结合。针对工商业制冷设备和家用制冷设备的“两新”补贴可以考虑根据制冷剂的 GWP 值设立梯级补贴，参考按照能效水平给予差异化的支持，以促进低 GWP 值制冷产品的普及。针对汽车以旧换新的补贴，在考虑排量、乘用车排放标准的基础上，也可增加对采用低 GWP 值制冷剂的乘用车的补贴。

农业领域的绿色消费激励机制也有待健全。当前农业减排固碳的经济价值尚未得到充分体现，生产者往往无法获得农产品的绿色低碳溢价（金书秦等，2022）。2025 年 3 月，我国发布首个系统性产品碳标识认证制度文件《产品碳足迹标识认证通用实施规则（试行）》。未来，在非二温室气体排放和核查数据日益完善的基础上，通过农产品碳标识认证制度来引导社会生产和消费预期，逐步提升消费者对绿色低碳农产品的市场价值认可，进而促进对绿色农产品的消费。

此外，在尊重市场发展客观规律的基础上，鼓励政府拓展绿色采购规模，进一步加大对绿色低碳产品的消费。例如通过与新能源汽车下乡、绿色智能家电下乡以及多渠道开展的助农活动进行联动，促进对低 GWP 值制冷产品和低碳农产品的消费。

5.3.5 持续推进科技创新与技术研发

强化重点领域非二氧化碳温室气体减排技术研发与创新。自双碳目标提出以来，我国积极推动科技创新，持续发挥科研对推进非二温室气体减排、实现碳中和目标的支撑作用。2022 年发布的《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》提出加强甲烷、氧化亚氮及含氟气体等非二氧化碳温室气体的监测和减量替代技术研发及标准研究。其中包括加强对煤矿乏风瓦斯利用、工业氧化亚氮及含氟气体的替代、减量和回收，以及反刍动物低甲烷排放等技术的研发。

我国 2025 年发布的《国家重点推广的低碳技术目录（第五批）》也纳入了多项非二温室气体减排技术，例如超低浓度抽放及风排瓦斯氧化利用技术、超低浓度煤矿瓦斯供热发电碳减排技术、己二酸生产过程氧化亚氮低温催化分解消除技术、低温室效应环保制冷空调技术、公约受控强温室气体三氟甲烷绿色资源化转化利用技术、126kV 无氟环保型气体绝缘金属封闭开关设备等。此外，技术的创新和推广也需要和行业和地方非二减排政策衔接与协同，例如将《国家重点推广的低碳技术目录》与《绿色债券支持项目目录》、《绿色金融支持项目目录》等进行结合，将对非二温室气体减排形成合力，推动非二减排项目的落地。

5.4 总结

气体	甲烷 (CH ₄)	氧化亚氮 (N ₂ O)	含氟温室气体 (F-Gases)
顶层设计与减排合作			
国际机制	<ul style="list-style-type: none"> 增强 2025NDC 对非二温室气体的减排承诺，提出非二温室气体控排量化目标，并将行业行动纳入 NDC； 加速《基加利修正案》履约，加快国内 HFCs 减排布局，以应对国际市场对环保制冷产品的需求； 鼓励不同地区、城市间、以及行业、企业和非政府组织间开展减排合作； 发挥“一带一路”倡议和南南合作平台在非二温室气体减排领域的积极作用，促进中国在农业、制冷等领域减排实践的国际交流。 		
国内政策	<ul style="list-style-type: none"> 制定综合性、分气体的非二温室气体减排方案； 对排放量大或排放气体种类多样、减排具有复杂性的重点部门和行业，考虑出台行业综合性非二温室气体控排规划，比如农业非二温室气体减排综合行动方案； 将非二温室气体纳入到“减污降碳”的政策框架体系下，促进形成最具成本有效性的减排措施和最具综合效益的协同控制方案。 		
	<ul style="list-style-type: none"> 加速推进 CH₄ 减排的地方行动。 	<ul style="list-style-type: none"> 出台针对 N₂O 的总体控排方案。 	<ul style="list-style-type: none"> 更新《国家制冷方案》，推动 HFCs 减排同时提高能效标准。
重点部门或行业的优先减排措施			
农业	<ul style="list-style-type: none"> 推动以粮食安全和乡村振兴为导向的农业非二综合减排行动：结合我国大国小农的基本国情，聚焦对成本有效性的减排实践的识别，通过农业技术推广服务中心以及新型农业经营主体和服务主体来助力推广高产低排放的减排技术，在保证粮食安全的前提下，提高我国农业生产应对气候变化的韧性。 		
工业	<ul style="list-style-type: none"> 落实《工业领域氧化亚氮排放控制行动方案》，通过纳入《绿色金融支持项目目录》或创新的市场机制为工业 N₂O 提供经济激励，推动工业 N₂O 领域率先减排。 以末端治理和产品标准更新为突破促进 HFCs 削减，通过加完善制冷剂标准，促进低 GWP 制冷剂推广； 结合企业减排实践探索出台相应的 PFCs 和 SF₆ 减排配套支持政策。 		
能源	<ul style="list-style-type: none"> 在已出台政策基础上，推动更多元化的金融产品开发以及绿色金融政策与减排项目的对接，强化超低浓度煤矿瓦斯的排放控制和综合利用； 加强对废弃矿井 CH₄ 逸散监测和治理利用技术研发，尽快摸清废弃矿井排放底数并提高对废弃矿井 CH₄ 的精准测算。 		

气体	甲烷 (CH ₄)	氧化亚氮 (N ₂ O)	含氟温室气体 (F-Gases)
配套措施			
数据基础	<ul style="list-style-type: none"> 建立并完善非二氧化碳温室气体排放的核算、报告和核查 (MRV) 制度, 强化对非二氧化碳温室气体排放的监测, 利用“自上而下”和“自下而上”不同尺度监测相结合的方法对排放数据进行交叉验证, 提升我国非二氧化碳温室气体排放数据的准确性与透明度; 将数据基础强化工作与企业环境信息强制和自愿披露工作相结合。 		
市场机制	<ul style="list-style-type: none"> 考虑将更多非二氧化碳温室气体排放源纳入碳市场的同时, 对缺乏成本有效性的非减排实践或者前期研发投入高的减排技术提供市场化的激励机制。 		
财政和金融	<ul style="list-style-type: none"> 加大对非二氧化碳温室气体减排技术的财政投入; 鼓励与支持金融机构针对不同类型非二氧化碳温室气体减排项目和技术开发绿色信贷、绿色债券、绿色保险等多种绿色金融产品, 拓展非二氧化碳温室气体减排项目的融资渠道; 进一步将非二氧化碳温室气体减排技术纳入《绿色低碳转型产业指导目录》、《绿色金融支持项目目录》和《绿色债券支持项目目录》, 进一步拓展《气候投融资试点地方气候投融资项目入库参考标准》中有关非二氧化碳温室气体减排项目的实践, 并在具体实施中持续金融创新。 		
绿色消费	<ul style="list-style-type: none"> 考虑将加强绿色消费的激励机制与更多政策有机结合, 利用财政、税收和价格等措施引导社会对绿色低碳产品的消费。尤其在农业领域, 可以通过农产品碳标识认证制度引导社会生产和消费预期, 逐步提升消费者对绿色低碳农产品的市场价值认可; 在尊重市场发展客观规律的基础上, 鼓励政府拓展绿色采购规模。 		
科技创新	<ul style="list-style-type: none"> 强化重点领域非二氧化碳温室气体减排与替代技术研发与创新, 加强技术推广与行业 and 地方的非减排政策衔接与协同, 例如将《国家重点推广的低碳技术目录》与绿色债券和绿色金融的《支持项目目录》进行结合。 		

附件 1：2021 NDC 中非二温室气体控排相关政策及针对 2025 NDC 的建议

2021 NDC 中与非二温室气体总体控排相关的政策及相应的 2025 NDC 建议

领域	2021NDC	2025NDC 可考虑增加或者更新的内容	政策来源
非二总体	加大对重点非二氧化碳温室气体的控排力度，研究实施非二氧化碳温室气体控排行动方案，继续完善非二氧化碳温室气体监测、报告和评估技术体系，逐步建立健全非二氧化碳温室气体排放统计核算体系、政策体系和管理体系，形成一批可推广的非二氧化碳温室气体排放控制技术，建成一批具有良好减排效果的重大工程，推广一批可复制的试点示范项目。	<ul style="list-style-type: none"> 加强甲烷等非二氧化碳温室气体排放管控。 将所有相关温室气体管控纳入环评管理。 	<ul style="list-style-type: none"> 《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》 《减污降碳协同增效实施方案》

2021 NDC 中与 CH₄ 控排相关的政策及相应的 2025 NDC 建议

领域	2021NDC	2025NDC 可考虑增加或者更新的内容	政策来源
煤矿甲烷	合理控制煤炭产能，提高瓦斯抽采利用率。推广伴生气回收技术。	<ul style="list-style-type: none"> 落实《排放标准》，禁止甲烷体积浓度高于 8% 且抽采纯度高于 10 立方米每分钟的煤矿瓦斯排放。 落实《方法学》，鼓励对甲烷体积浓度 2%~8% 的抽采瓦斯以及乏风瓦斯开展综合利用。 	<ul style="list-style-type: none"> 《煤层气（煤矿瓦斯）排放标准》 《关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知》 《温室气体自愿减排项目方法学 甲烷体积浓度低于 8% 的煤矿低浓度瓦斯和风排瓦斯利用》
油气甲烷	推广伴生气回收技术。	<ul style="list-style-type: none"> 加大油气田甲烷采收利用力度。 逐步减少常规火炬排放。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》 《十四五现代能源体系规划》
畜禽养殖	改进畜禽粪污处理和利用方式，减少畜禽养殖温室气体排放。	<ul style="list-style-type: none"> 养殖业单位农产品甲烷排放强度进一步降低。 2030 年，畜禽粪污综合利用率达到 85% 以上。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》 《农业农村减排固碳实施方案》
水稻种植		<ul style="list-style-type: none"> 降低水稻单产甲烷排放强度。 	
废弃物	加快发展循环经济。	<ul style="list-style-type: none"> 生活垃圾日清运量超过 300 万吨的地区基本实现原生生活垃圾“零填埋”。 提高填埋气体回收利用水平。 鼓励污水处理项目采用污泥厌氧消化等方式产沼并加强回收利用。 	<ul style="list-style-type: none"> 《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》 《甲烷排放控制行动方案》
政策体系	逐步建立健全非二氧化碳温室气体排放统计核算体系、政策体系和管理体系。	<ul style="list-style-type: none"> 适时进一步完善油气甲烷泄漏的甲烷排放标准，严格甲烷排放控制要求。 制订水稻、畜禽养殖及废物资源化利用甲烷排放控制技术规范。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》
经济激励	持续完善全国碳市场管理制度体系，完善注册登记系统和交易系统基础设施，完善温室气体自愿减排交易体系。推动国家核证自愿减排量纳入全国碳市场交易体系。	<ul style="list-style-type: none"> 推进具有甲烷减排效益的项目纳入生态环境导向的开发项目库。 探索研究反刍动物养殖和水稻种植主产区甲烷减排奖补政策。 完善温室气体自愿减排交易机制，支持符合条件的甲烷利用和减排项目开展温室气体自愿减排交易。 	<ul style="list-style-type: none"> 《甲烷排放控制行动方案》

2021 NDC 中与 N₂O 控排相关的政策及相应的 2025 NDC 建议

主要排放源	2021NDC	2025NDC 可考虑增加或者更新的内容	政策来源
氮肥使用	加大力度推进化肥农药减量增效，深入实施测土配方施肥。 推广有机肥替代化肥。	<ul style="list-style-type: none"> 研发推广作物吸收、利用率高的新型肥料产品，推广水肥一体化等高效施肥技术，提高肥料利用率。 示范推广缓释肥、水溶肥等新型肥料，打造绿色种养循环农业模式。 	<ul style="list-style-type: none"> 《农业农村减排固碳实施方案》 《建设国家农业绿色发展先行区 促进农业现代化示范区全面绿色转型实施方案》
畜禽粪污	改进畜禽粪污处理和利用方式，减少畜禽养殖温室气体。	<ul style="list-style-type: none"> 提升畜禽养殖粪污资源化利用水平，减少畜禽粪污管理的甲烷和氧化亚氮排放。 	<ul style="list-style-type: none"> 《农业农村减排固碳实施方案》
硝酸和己二酸	研究制定工业领域重大低碳技术推广实施方案，促进先进适用低碳技术、工艺、装备和材料的推广应用。	<ul style="list-style-type: none"> 到 2030 年，己二酸行业、硝酸行业、己内酰胺行业单位产品氧化亚氮排放量持续下降，达到国际领先水平。 研究利用相关资金渠道支持建设氧化亚氮回收提纯装置和己二酸、硝酸和己内酰胺行业氧化亚氮减排装置。 开展氧化亚氮排放控制技术示范工程建设，支持工业领域氧化亚氮排放控制相关技术申报国家重点推广的低碳技术目录，推动工业领域氧化亚氮减排催化剂的研制与应用。 加强工业领域氧化亚氮与氮氧化物、挥发性有机物（VOCs）等的协同控制。开展工业领域氧化亚氮与臭氧层保护协同控制政策研究。 加强工业领域氧化亚氮监测、报告和核查体系建设。 	<ul style="list-style-type: none"> 《工业领域氧化亚氮排放控制行动方案》
污水处理	加快发展循环经济。	<ul style="list-style-type: none"> 加强高效脱氮除磷等低碳技术应用，减少脱氮过程氧化亚氮逸散。 	<ul style="list-style-type: none"> 《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》

2021 NDC 中与 F-Gases 控排相关的政策及相应的 2025 NDC 建议

气体	2021NDC	2025NDC 可考虑增加或者更新的内容	政策来源
HFCs	强化氢氟碳化物排放控制	<ul style="list-style-type: none"> • 2029 年起 HFCs 生产和使用不超过基线的 90%，2035 年起不超过 70%。 • 制定完善家电、工商制冷空调、汽车、消防、泡沫、工业清洗、制冷维修等领域管控物质替代品和替代技术的产品标准、安全标准、能效标准和技术规范。 • 优先在汽车、家电、工商制冷空调等重点行业开展 HFCs 削减活动。 • 鼓励、支持替代品和替代技术的科学研究、技术开发和推广应用。 • 做好制冷剂分类回收和储存，鼓励对回收制冷剂进行循环和再生利用。 • 鼓励地方按区域建立管控物质无害化处置中心，满足销毁处置需求。 • 加强 HFCs 排放统计核算能力建设，开展 HFCs 生产、使用过程的排放因子和排放量识别和核算研究。 • 研究 HFCs 替代、回收和再生利用、销毁等领域开发温室气体自愿减排项目方法学的可行性和科学路径。 	<ul style="list-style-type: none"> • 《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〈基加利修正案〉》 • 《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》 • 《消耗臭氧层物质管理条例》 • 《绿色高效制冷行动方案（2019）》
	推动 HFC-23 销毁	<ul style="list-style-type: none"> • 加强 HFC-23 副产设施及销毁处置设施运行监管。 • 开展生产技术革新和升级改造，降低 HFC-23 副产率，推广 HFC-23 作为原料用途的资源化利用技术。 	<ul style="list-style-type: none"> • 《关于控制副产三氟甲烷排放的通知》 • 《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025-2030 年）》
SF ₆	推广低增温潜势电力设施	<ul style="list-style-type: none"> • 加速新型低温式效应环保绝缘气体等相关装备制备与应用推广。 	<ul style="list-style-type: none"> • 《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》

参考文献

- Arp, H. P. H., Gredelj, A., Glüge, J., Scheringer, M., & Cousins, I. T. (2024). The global threat from the irreversible accumulation of trifluoroacetic acid (TFA). *Environmental Science & Technology*, 58(45), 19925–19935
- Australia Government. (2025, January 2). *The Australian Carbon Credit Unit (ACCU) Scheme*. <https://www.agriculture.gov.au/agriculture-land/farm-food-drought/climatechange/mitigation/cfi>
- Bai, F., An, M., Wu, J., Fang, X., Jiang, P., Yao, B., ... & Hu, J. (2023). Pathway and Cost-Benefit Analysis to Achieve China's Zero Hydrofluorocarbon Emissions. *Environmental Science & Technology*, 57(16), 6474–6484.
- Brazil's National Council for Energy Policy. (2024). *Guidelines to Promote Decarbonization in Oil and Gas Exploration*. Brazil's National Council for Energy Policy.
- CCAC. (2024, July 22). *Super pollutants*. Climate & Clean Air Coalition. <https://www.ccacoalition.org/news/super-pollutants>
- CCAC secretariat. (2017, September 1). *One million premature deaths linked to ozone air pollution*. Climate & Clean Air Coalition. <https://www.ccacoalition.org/news/one-million-premature-deaths-linked-ozone-air-pollution>
- Clean Air Fund (2025). *Tackling Black Carbon: How to Unlock Fast Climate and Clean Air Benefits*. London: Clean Air Fund.
- COP 29 news. (2024, November 19). Countries Representing Nearly 50% of Global Methane Emissions From Organic Waste Pledge to Reduce Emissions From Sector. *COP29 news*. <https://cop29.az/en/media-hub/news/countries-representing-nearly-50-of-global-methane-emissions-from-organic-waste-pledge-to-reduce-emissions-from-sector>
- Council of the European Union. (2023). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-15927-2023-INIT/en/pdf>
- Dreyfus, G. B., Xu, Y., Shindell, D. T., Zaelke, D., & Ramanathan, V. (2022). Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(22), e2123536119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2123536119>
- EDGAR. (2024). *Global Greenhouse Gas Emissions*. [Dataset]. EDGAR. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg2024
- European Commission. (2020). *EU strategy to reduce methane emissions*. European Commission.
- European Commission. (2020). *Farm to Fork Strategy*. European Commission.
- European Commission. (no date). *Scope of the EU ETS*. European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/scope-eu-ets_en
- European Parliament & European Council. (2024). *REGULATION (EU) 2024/573 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj>
- European Parliament & European Council. (2024). *Regulation (EU) 2024/1787*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1787/oj/eng>
- European Parliament & European Council. (2024). *Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj/eng>.
- Global Cooling Pledge. (no date). *Global Cooling Pledge*. <https://coolcoalition.org/global-cooling-pledge/>
- Global Methane Pledge. (2023, November 22). *Global Methane Pledge*. <https://www.globalmethanepledge.org/>
- Government of Brazil. (2024). *BRAZIL'S National determination to contribute and transform*. Government of Brazil.
- Government of Canada. (2022). *Faster and Further: Canada's Methane Strategy*. Government of Canada.
- Government of Canada. (2024). *Canada's Greenhouse Gas Offset Credit System: Protocols*. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/output-based-pricing-system/federal-greenhouse-gas-offset-system/protocols.html>
- Guo, L., Yang, Y., Fraser, P. J., Velders, G. J., Liu, Z., Cui, D., ... & Fang, X. (2023). Projected increases in emissions of high global warming potential fluorinated gases in China. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 205.
- International Energy Agency. (2023, February 14). *National Programme for the Reduction of Methane Emissions - Zero Methane*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/policies/17045-national-programme-for-the-reduction-of-methane-emissions-zero-methane>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva: IPCC. pp. 35–115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- JSRAE. (2017). *Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants*. The Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers (JSRAE).
- Khanna, N., Lin, J., Liu, X., & Wang, W. (2024). An assessment of China's methane mitigation potential and costs and uncertainties through 2060. *Nature Communications*, 15(1), 9694.
- Liang, M., Zhou, Z., Ren, P., Xiao, H., Hu, Z., Piao, S., ... & Yuan, W. (2024). Four decades of full-scale nitrous oxide emission inventory in China. *National Science Review*, 11(3), nwad285.

- Lin, J., Khanna, N., Liu, X., Wang, W., Gordon, J., & Dai, F. (2022). Opportunities to tackle short-lived climate pollutants and other greenhouse gases for China. *Science of the Total Environment*, 842, 156842.
- Liu, Q., Teng, F., Nielsen, C. P., Zhang, Y., & Wu, L. (2024). Large methane mitigation potential through prioritized closure of gas-rich coal mines. *Nature Climate Change*, 14(6), 652-658.
- Malley, C. S., Lefèvre, E. N., Kuylenstierna, J. C., Haeussling, S., Howard, I. C., & Borgford-Parnell, N. (2023). Integration of Short-Lived Climate Pollutant and air pollutant mitigation in nationally determined contributions. *Climate policy*, 23(10), 1216-1228.
- Milman, O. (2024, July 30). Global methane emissions rising at fastest rate in decades, scientists warn. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/article/2024/jul/30/methane-emissions-study>
- Ministry of the Environment of Japan. (2024). *Japan's Progress on Climate Change Measures and International Cooperation*. Ministry of the Environment of Japan.
- Ministry of the Environment of Japan. (2024). *Act on Rational Use and Proper Management of Fluorocarbons*. Ministry of the Environment of Japan.
- NACAG. (2023, March 20). Argentina takes further steps towards mitigating N₂O emissions in the Nitric Acid Sector. NACAG. <https://www.nitricacidaction.org/argentina-takes-further-steps-towards-mitigating-n2o-emissions-in-the-nitric-acid-sector/>
- NACAG. (no date). *Introducing Nitric Acid Climate Action Group*. NACAG. <https://www.nitricacidaction.org/>
- Oeko-Institut. (2021). *N₂O mitigation potentials and costs in the nitric acid sector: A 2020 assessment for the Nitric Acid Climate Action Group (NACAG)*. Oeko-Institut e.V.
- Ou, Y., Iyer, G., Fawcett, A., Hultman, N., McJeon, H., Ragnauth, S., ... & Edmonds, J. (2022). Role of non-CO₂ greenhouse gas emissions in limiting global warming. *One Earth*, 5(12), 1312-1315.
- Pei, J., Liu, P., Feng, Z., Chang, M., Wang, J., Fang, H., ... & Huang, B. (2024). Long-term trajectory of ozone impact on maize and soybean yields in the United States: A 40-year spatial-temporal analysis. *Environmental Pollution*, 344, 123407.
- Pike, L. (2024, July 24). Biden's Last Chance at Climate Diplomacy With China. *Foreign Policy*. <https://foreignpolicy.com/2024/07/24/biden-climate-china-nitrous-oxide-super-pollutants/>
- Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. (2009). *Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century*. *science*, 326(5949), 123-125.
- Ross J. Salawitch (Lead Author), Laura A. McBride, Chelsea R. Thompson, Eric L. Fleming, Richard L. McKenzie, Karen H. Rosenlof, Sarah J. Doherty, David W. Fahey. (2023). Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2022 Update *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*, 75 pp World Meteorological Organization.
- Song, R. (2019). *Opportunities to Advance Mitigation Ambition in China: Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions*. *United States of America: World Resources Institute*.
- Teng, F., Su, X., & Wang, X. (2019). Can China peak its non-CO₂ GHG emissions before 2030 by implementing its nationally determined contribution? *Environmental Science & Technology*, 53(21), 12168-12176.
- The Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers (JSRAE). (2017). *Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants*. Japan: JSRAE.
- The White House. (2024). *Reducing Greenhouse Gases in the United States: A 2035 Emissions Target*. The White House.
- The White House Office of Domestic Climate Policy. (2021). *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*. The White House Office of Domestic Climate Policy. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2021/11/US-Methane-Emissions-Reduction-Action-Plan-1.pdf>
- Tian, H., Pan, N., Thompson, R. L., Canadell, J. G., Suntharalingam, P., Regnier, P., ... & Zhu, Q. (2024). Global nitrous oxide budget (1980-2020). *Earth System Science Data*, 16(6), 2543-2604.
- UNEP-Convended Climate and Clean Air Coalition (2024). *Leveraging the Benefits of non-CO₂ Pollutants and Air Quality in NDC 3.0: Guidance on Including Methane in Nationally Determined Contributions*. Climate and Clean Air Coalition.
- UNFCCC Secretariat. (2022). *Nationally determined contributions under the Paris Agreement: Synthesis report by the secretariat*. UNFCCC.
- United Nations. (2024, July 25). *United Nations Secretary-General's Call to Action on Extreme Heat*. United Nations. <https://www.un.org/sg/en/content/sg/press-encounter/2024-07-25/secretary-generals-press-conference-extreme-heat>.
- United Nations Environment Programme. (2013). *Drawing Down N₂O to Protect Climate and the Ozone Layer*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP).
- United Nations Environment Programme (2024). *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>.
- United Nations Environment Programme and Climate & Clean Air Coalition (2021). *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- United Nations Treaty Collection. (2025, June 6). *Status of Amendment of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. United Nations Treaty Collection. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-2-f&chapter=27&clang=en

- US Environmental Protection Agency. (2019). *Global Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation Potential 2015–2050*. Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- US Environmental Protection Agency. (2023). *FACT SHEET: Final Rule—Phasedown of Hydrofluorocarbons*. Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- Valerie Volcovici. (October 31, 2024). World will miss Paris climate target as nitrous oxide rises, report says. *Reuters*. <https://www.reuters.com/business/environment/world-will-miss-paris-climate-target-nitrous-oxide-rises-report-says-2024-10-31/>
- World Bank. (2022). *2022 Global Gas Flaring Tracker Report*. World Bank.
- World Meteorological Organization. (2022). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*, GAW Report No. 278, 509 pp.; Geneva: WMO.
- World Meteorological Organization. (2025). *WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55 °C above pre-industrial level*. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/media/news/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>.
- Zhang, C., Song, X., Zhang, Y., Wang, D., Rees, R. M., & Ju, X. (2022). Using nitrification inhibitors and deep placement to tackle the trade-offs between NH₃ and N₂O emissions in global croplands. *Global Change Biology*, 28(14), 4409–4422.
- Zhang, X. P., Wang, F., Fan, X. W., Wei, X. L., & Wang, F. K. (2013). Determination of the optimum heat rejection pressure in transcritical cycles working with R744/R290 mixture. *Applied thermal engineering*, 54(1), 176–184.
- Zhao, X., Liu, S. L., Pu, C., Zhang, X. Q., Xue, J. F., Zhang, R., ... & Chen, F. (2016). Methane and nitrous oxide emissions under no-till farming in China: A meta-analysis. *Global change biology*, 22(4), 1372–1384.
- Zhou, S., Teng, F., & Tong, Q. (2018). Mitigating sulfur hexafluoride (SF₆) emission from electrical equipment in China. *Sustainability*, 10(7), 2402.
- 安徽环境新闻网. (2022-09-13). 全球首台! 美的空调 R290 新一级能效产品在芜湖下线. *安徽环境新闻网*. <http://huanjing.ahwang.cn/hjchanye/20220913/18273.html>
- 北京青年报. (2024-07-08). 正式并网发电! 高安屯再生水厂将成全国首座电能自给再生水厂. *北京市发展和改革委员会*. https://fgw.beijing.gov.cn/gzdt/fzbjgzh/202407/t20240709_3741397.htm
- 陈标华, 田梦, 徐瑞年. (2023). 化工生产中温室气体 N₂O 排放与工业化减排技术. *环境工程*, 41(10), 82–90.
- 重庆华峰化工有限公司, 重庆同辉科发气体有限公司, 山东华鲁恒升股份有限公司, 中海油天津化工研究设计院有限公司, 重庆同辉科发气体有限公司, 山东华鲁恒升股份有限公司, & 中海油天津化工研究设计院有限公司. (2024). *精己二酸行业氧化亚氮减排技术指南*. <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=171F616BDF51304AE06397BE0A0AA522>
- 重庆日报. (2024-06-19). 今年一季度重庆碳市场成交碳排放权 331 万吨 规模在全国 8 个试点碳市场位居第一. *重庆日报*. https://cq.gov.cn/ywdt/jrcq/202406/t20240619_13304883.html
- 崔相飞, 蒋亚茹, & 吕灯. (2022). 废弃矿井资源开发利用战略研究. *工程建设*, 5(8), 103–105.
- 崔兆仑, 郝艳捧, 阳林, 李立涅, 王宇非, 周畅, & 张晓星. (2023). SF₆ 废气无害化降解研究综述. *中国电机工程学报*, 43(19), 7720–7736.
- 《电气技术》杂志社. (2020-07-07). 全国首台 126kV 无氟环保型气体绝缘金属封闭开关设备研制成功. *《电气技术》杂志社*. <https://www.ces-transaction.com/html/report/20070530-1.htm>
- 非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组. (2022). *非二氧化碳温室气体减排技术发展评估与展望*. 北京: 中国科学技术出版社.
- 高尔, 石红梅, 刘汉丽, 才让闹日, 徐海, 丁考仁青, 马桂琳, 李鹏霞, & 万玛吉. (2022). 益生菌对反刍动物生产及降低甲烷排放的研究进展. *中国牛业科学*, 48(2), 67–72.
- 胡敏, 梁梁, 陈美安, 吴宛忆, & 耿浩森. (2022). *甲烷减排: 碳中和新焦点*. 北京: 北京绿色金融与可持续发展研究院; 高瓴产业与创新研究院; 绿色创新发展中心.
- 江伟. (2023-01-17). 贵州电网投用新型降解六氟化硫装置. *中国能源新闻网*. https://cpnn.com.cn/news/kj/202301/t20230117_1579311.html
- 江屿, 徐焯琨, 艾晓欣. (2018). 己二酸生产中 N₂O 减排技术综述. *化工设计通讯*, (9), 56–57.
- 金书秦, 丁斐, 胡钰. (2022). 农产品碳标识赋能农业生态价值实现: 机理与建议. *改革*, 8, 57–66.
- 柯宇. (2016). 硝酸装置氧化亚氮二级减排特点和结构设计. *化肥工业*, 43(3), 28–32.
- 柯宇 & 安明. (2014). 硝酸装置氧化亚氮三级减排技术及应用. *化肥工业*, 41(4), 42–46.
- 来永才, 董文军, 孟英, 张俊, 唐傲, 张喜娟, ... & 陈磊. (2017). 我国稻田系统温室气体排放及减排对策分析. *Climate Change Research Letters*, 6, 88.
- 雷鸣, 程于真, 苗娜, 周建斌, & 陈竹君. (2019). 黄土及其他添加物对猪粪贮存过程氨气和温室气体排放的影响. *环境科学学报*, 39(12), 4132–4139.
- 李纯. (2016-04-21). 测土配肥 一键下单精准施肥手机操控. *农民日报*. http://www.xinhuanet.com/politics/2016-04/21/c_128915313.htm
- 李东海. (2025-03-06). 两会能言 | 李慧: 加大对含氟温室气体 HFC-23 可持续减排力度. *中国电力报*. https://www.cpnn.com.cn/zt/2025zt/2025lhxs/2025lhjj/202503/t20250306_1779074.html
- 李飞, 黄伟, 李潇, 刘程, 仵静, 侯鑫, ... & 满雪. (2018). 硝酸或己二酸行业氧化亚氮直接催化分解技术研究进展及现状. *工业催化*, 26(9), 6–10.

- 李佳, 樊星, 陈莉, & 李坚. (2023). 硝酸生产尾气中 NO_x 和 N_2O 联合脱除技术研究进展. *化工进展*, 42(7), 3770-3779.
- 联合国欧洲经济委员会. (2023). *有效回收利用废弃煤矿瓦斯最佳实践指南*. 联合国.
- 梁运培, 李左媛, 朱拴成, 陈强, 王鑫, & 秦朝中. (2023). 关闭 / 废弃煤矿甲烷排放研究现状及减排对策. *煤炭学报*, 48(4), 1645-1660.
- 林军, 胡俊杰, 李仓敏, & 潘寻. (2022). *蒙特利尔议定书受控物质制冷剂回收再用管理模式研究报告*. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心.
- 刘冰逸, 孟晶. (2023-10-08). 向阳而生 逐绿而行——重庆华峰绿色低碳高质量发展纪实. *中国化工报*. <https://www.huafeng.com/pportal/wwwroot/magazine/73/7305/278864.shtml>
- 刘良伟. (2024-01-31). 喊话污水处理企业: 温室气体控排来了, 准备好了吗? | 减污降碳协同增效之污水处理⑤. *中国环境报*. <http://www.cenews.com.cn/news.html?aid=1111288>
- 刘拓 (2024-11-18). 空调分会: CHEATC2024 | HCFC 淘汰与 HFCs 管控协同发展下的行业新任务. *中国家电网*. <http://news.cheaa.com/2024/1118/642678.shtml>
- 骆理学. (2014). 制冷剂回收与循环利用技术. *制冷与空调*, 14(6), 48-50.
- 绿色创新发展研究院. (2021). *中国城市生活垃圾和市政污泥处理良好实践指南*. 北京: 绿色创新发展研究院.
- 绿色创新发展研究院. (2023). *探路农食系统转型——中国农食系统应对气候变化实践年度报告 2023*. 北京: 绿色创新发展研究院.
- 绿色创新发展研究院. (2024). *化肥减量增效与氧化亚氮减排: 观察与展望*. 北京: 绿色创新发展研究院
- 绿色创新发展研究院. (2024). *中国低浓度煤矿瓦斯减排良好实践分析报告*. 北京: 绿色创新发展研究院.
- 米松华, 黄祖辉, 朱奇彪, 黄河啸, & 李宝值. (2016). 稻田温室气体减排成本收益分析. *浙江农业学报*, 28(4), 707-716.
- 娜仁花, 董红敏, 陈永杏, & 周志凯. (2011). 日粮精粗比对瘤胃发酵特性的影响. *中国畜牧杂志*, 47(9), 49-54.
- 农民日报. (2016-12-23). 共筑减量新局面谱写增效新篇章. *农民日报*. <http://www.sinofert.com/s/4368-12223-56364.html>
- 农民日报. (2023-07-18). 畜禽粪污都去哪儿啦. *农民日报*. <https://news.ntv.cn/content/0/964/99964683.html>
- 潘寻, 胡俊杰, 李仓敏 & 林军. (2022). 日本制冷剂回收管理模式的启示与借鉴. *世界环境*. 2022(3): 70-73.
- 彭术, 张文钊, 侯海军, 王华, 陈安磊, & 魏文学. (2019). 氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响. *生态学杂志*, 38(1), 153.
- 渠沛然. (2023-11-20). 甲烷控排新政倒逼低浓度瓦斯利用提速. *中国能源报*. <http://paper.people.com.cn/zgnyb/images/2023-11/20/02/zgnyb2023112002.pdf>
- 山西卓越瓦斯研究中心. (2021). *中国中心在行动*. <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/22.%20ICE%20China%20-%20Workshop%20Poland.pdf>. <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/22.%20ICE%20China%20-%20Workshop%20Poland.pdf>
- 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 万运帆, 高清竹, & 张仲新. (2010). 中国稻田 CH_4 和 N_2O 排放及减排整合分析. *中国农业科学*, 43(14), 2923-2936.
- 四川蜀泰化工科技有限公司. (2019-01-31). *四川蜀泰化工 N_2O 减排催化剂成果通过科技鉴定, 技术水平达到国内领先*. https://www.shutai.cn/blog/_194795_204827.html
- 搜狐新闻. (2020). N_2O 炉内减排催化剂实现国产. *搜狐新闻*. https://www.sohu.com/a/366825408_120507608
- 汪笑溪, 李佳珂, 叶蕾, & 林斌. (2024). 中国农业非二氧化碳温室气体减排的政策措施、技术应用与对策启示. *中国生态农业学报*, 32(11), 1793-1804.
- 王立伟. (2016-04-17). 中国农民尝鲜精准农业 在手机上完成智能施肥. *第一财经*. <https://www.yicai.com/news/5003423.html>
- 武晓娟. (2019-03-04). 废弃矿井仍有很大开发价值 (面对面). *中国能源报*. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2019-03/04/content_1912062.htm
- 吴小强, 严会成, 许云波, 欧军, & 刘阳. (2021). *SCST-102 型一氧化二氮炉内减排催化剂的开发与工业应用*. 四川蜀泰化工科技有限公司. https://www.shutai.cn/blog/_185313_323631.html
- 夏志坚. (2023-02-08). 稻田甲烷减排: 中国水稻种植正在发生的变化. *对话地球*. <https://dialogue.earth/zh/5/96736/>
- 项目综合报告编写组. (2020). 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1-25
- 徐岩. (2025-03-14). 破解己二酸行业温室气体减排难题——记华峰集团己二酸生产过程氧化亚氮低温催化分解消除技术. *中国化工报*. <https://news.10jqka.com.cn/20250314/c666707707.shtml>
- 严圣吉, 尚子吟, 邓艾兴, & 张卫建. (2022). 我国农田氧化亚氮排放的时空特征及减排途径. *作物杂志*, 38(3), 1-8
- 颜湘莲, 高克利, 郑宇, 李志兵, 王浩, 何洁, & 刘焱. (2018). SF_6 混合气体及替代气体研究进展. *电网技术*, 42(6), 1837-1844.
- 杨林, 张玮航. (2024). *含氟制冷剂行业点评: 底部反转且格局优化, 制冷剂开启景气复苏周期*. 国信证券.
- 郁静娴. (2025-02-23). 我国三大粮食作物化肥利用率达 42.6%——粮食的“粮食”, 如何减“肥”增效. *人民日报*. <http://paper.people.com.cn/rmrb/pc/attachement/202502/23/e2f31b5b-a3f5-422e-9862-25fae89792f1.pdf>
- 余娜. (2024-05-27). 严控六氟化硫! 电力设备加速无氟替代. *中国工业新闻网*. <https://www.cinn.cn/p/299652.html>
- 苑鹏. (2024-02-23). 促进小农户和现代农业发展有机衔接. *经济日报*. http://www.moa.gov.cn/ztlz/ymksn/jjrbdb/202408/t20240827_6461328.htm
- 张博, 郭金玲, 高俊莲, 张国生, & 刘合. (2024). 我国甲烷排放控制的中长期挑战与应对. *中国工程科学*, 26(2), 185-197.

- 张博, 李蕙竹, 仲冰, & 高俊莲. (2022). 中国甲烷控排面临的形势, 问题与对策. *中国矿业*, 31(2), 1-10.
- 张福锁. (2017-12-28). 我国农用化肥用量 43 年首次实现负增长. *中华人民共和国中央人民政府网*. https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/28/content_5251080.htm
- 张杰, 王放放, 夏忠林, 赵光金, & 马双忱. (2023). “双碳”目标下 SF₆ 排放现状, 减排手段分析及未来展望. *化工进展*, 42(S1), 447.
- 张相锋, 肖学智, 何毅, 陈家军, & 杨志峰. (2006). 垃圾填埋场的甲烷释放及其减排. *中国沼气*, 24(1), 3-8.
- 张秀敏, 王荣, 马志远, 王敏, & 谭支良. (2020). 反刍家畜胃肠道甲烷排放与减排策略. *农业环境科学学报*, 39(4), 732-742.
- 郑利杰, 张笑千, & 王波. (2018). 化肥有机肥补贴政策演变过程及配套技术初探. *世界环境*, 4, 30-35.
- 中国昊华化工集团股份有限公司. (2016-04-14). 晨光院等离子裂解 HFC-23 项目年减排 CO₂ 可超千万吨. <https://www.sinochem.com/Portals/164/zt/portal/xwymt/qyxw/webinfo/2016/04/1460595386376933.htm>
- 中国昊华化工集团. (2024-08-06). 国内首套副产物 HFC-23 资源化利用项目取得新进展. <https://www.chemchina.com/zjhtwap/xwzx/gdwdt/2024/10/11294310442029547520.html>
- 中国新闻网. (2018-04-25). 农业农村部: 已提前 3 年实现化肥农药使用量零增长目标. *中国新闻网*. http://www.xinhuanet.com/politics/2018-04/25/c_1122739925.htm
- 中华人民共和国国家发展与改革委员会. (2014). 国家重点推广的低碳技术目录技术简介. 中华人民共和国国家发展与改革委员会. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ycqhbh/wsqtz/201904/W020190419533061567507.pdf>
- 中华人民共和国国家能源局. (2021-12-28). 关于十三届全国人大四次会议第 6052 号建议的答复摘要. 中华人民共和国国家能源局. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/28/c_1310378245.htm
- 中华人民共和国生态环境部. (2021-09-14). 关于控制副产三氟甲烷排放的通知. 中华人民共和国生态环境部. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202109/t20210915_943345.html
- 中华人民共和国生态环境部. (2022-12-21). 国家重点推广的低碳技术目录 (第四批) 技术简介. 中华人民共和国生态环境部. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202212/W020221221722821167835.pdf>
- 中华人民共和国生态环境部. (2023-11-15). 关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明. 中华人民共和国生态环境部. https://www.mee.gov.cn/xxgk/hjyw/202311/t20231115_1056452.shtml
- 中华人民共和国生态环境部. (2024-12-31). 《温室气体自愿减排项目方法学 煤矿低浓度瓦斯和风排瓦斯利用》编制说明. 中华人民共和国生态环境部. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202407/W020240730657341018014.pdf>
- 中华人民共和国生态环境部. (2024-12-12). 生态环境部气候司相关负责人就《煤层气 (煤矿瓦斯) 排放标准》答记者问. 中华人民共和国生态环境部要闻动态. https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202412/t20241212_1098486.shtml
- 中华人民共和国外交部. (2024-11-14). 丁薛祥在联合国气候变化巴库大会世界领导人气候行动峰会上的发言. 中华人民共和国外交部. https://www.mfa.gov.cn/zyxw/202411/t20241114_11526095.shtml
- 中华人民共和国生态环境部. (2025-03-21). 全国碳排放权交易市场覆盖钢铁、水泥、铝冶炼行业工作方案. 中华人民共和国生态环境部. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk03/202503/W020250326367625819894.pdf>
- 周楠, 李云平, 刘智强. (2020-10-13). “金疙瘩”为何叫好不叫座? 有机肥推广困局调查. *新华网*. http://www.ce.cn/cysc/sp/info/202010/13/t20201013_35881440.shtml
- 周文俊, 郑宇, 杨帅, 覃兆宇, & 王宝山. (2016). 替代 SF₆ 的环保型绝缘气体研究进展与趋势. *高压电器*, 52(12), 8-14.
- 邹晓霞, 李玉娥, 高清竹, 万运帆, & 石生伟. (2011). 中国农业领域温室气体主要减排措施研究分析. *生态环境学报*, 20(8/9), 1348-1358.
- 朱妍. (2021-04-05). 甲烷减排箭在弦上. *中国能源报*. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-04/05/content_2042088.htm
- 朱志平, 董红敏, 魏莎, 马金智, & 薛鹏英. (2020). 中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响. *农业环境科学学报*, 39(4), 743-748.
- 自然资源保护协会. (2023). 甲烷排放管控路径与政策研究. 自然资源保护协会.
- 左黎韵. (2024-01-06). 重庆华峰聚力打造千亿级产业园. *重庆日报*. <http://www.cq.xinhuanet.com/20250106/db25c0507a0245b0a282c02b65ce7f83/c.html>

关于绿色创新发展研究院

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress), 简称: 研究院 (iGDP), 是专注绿色低碳发展的战略咨询平台, 2014 年成立于北京, 旨在成为具领先专业素养和独立影响力的国际化智库。研究院根植我国地方绿色低碳实践, 面向全球应对气候变化进程, 为决策者、投资者和社区提供具有国际视野和前瞻思考的解决方案及公益性知识产品。

联系方式:

电话: 86-10-8532 3096

邮箱: igdpooffice@igdp.cn

网站: www.igdp.cn

地址: 中国北京市朝阳区秀水街 1 号建外外交公寓 6-2-62

