

特色专题

“双碳”目标下甲烷管控与减排科技创新

张通^{1,2,3}, 袁亮^{1,2,3*}, 王玥晗^{1,2}

摘要 剖析了“双碳”目标下甲烷管控与减排的战略布局。现阶段,甲烷管控已取得初步成效。“空-天-地”立体监测精准定位排放源,能源开采前端采收率提高,农业中水稻种植与畜牧业源头控排技术成熟,甲烷气候投融资体系也为减排注入资金活力。但甲烷减排面临的挑战依旧严峻,在能源领域,传统煤炭资源开采利用流程中甲烷泄漏、油气系统逃逸排放阻碍绿色转型;在农业领域,水稻厌氧、畜牧肠道发酵与粪便处理致甲烷逸散突出;在废弃物处理环节,固废填埋与工业废水厌氧发酵产生大量甲烷。为此,提出通过跨领域协作,打破能源、农业、废弃物处理行业界限,构建联动减排体系,同时兼顾能源安全与“双碳”目标,稳步推动能源结构绿色、低碳化发展,保障能源供应,整合教育、科研、人才优势,多学科交叉融合,布局国家级科创平台,攻克甲烷管控技术难题。未来,借助持续技术创新、精准政策优化与深度国际合作,中国有望突破甲烷管控困境,大幅削减排放,助力“双碳”目标实现,为全球气候治理添砖加瓦。

关键词 “双碳”目标;多源甲烷管控;减排战略;技术创新;多学科交叉融合

甲烷作为第二大温室气体,自2000年起排放形势愈发严峻,至2024年达历史峰值,大气甲烷浓度升至1930 (nmol/mol),约占温室气体总排放量16%(图1)^[1-2]。据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第6次评估报告,全球地表温度较工业化前升高约1.1℃,其中0.5℃归因于甲烷排放^[3]。甲烷属于典型的短寿命强效温室气体,以全球增温潜势(global warming potential, GWP)衡量,化石燃料源甲烷在100年尺度下是二氧化碳的29.8倍,20年尺度下高达82.5倍,其对全球升温影响不可小觑^[3-4]。《联合国气候变化框架公约》

第二十八次缔约方大会(COP 28)报告显示,2023年是有记录以来最热一年,全球平均地表温度比工业化前高出2.06℃,升温首次超过2℃^[5]。值此全球气候治理关键节点,减少甲烷排放能在短期内有效遏制全球升温,是实现《巴黎协定》1.5℃温升目标的关键举措。

大气中的甲烷约40%来自自然源,约60%来自人为源。全球超过95%的人为源甲烷排放来自能源、农业、废弃物处理3大关键领域,其中,农业作为首要人为排放源,占比为46%,能源领域占32%,废弃物处理领域占19%,建筑、交通等领域因化石燃料不完全燃烧产生的甲烷占比不足4%^[1]。全球大气研究排放数据库(EDGAR)数据表明,中国是甲烷排放大国,2023年,中国甲烷排放量占全球总量的18%(表1)^[6-7]。从排放结构看,能源领域为中国甲烷首要排放源,占比为44.7%,农业领域占37.2%,废弃物处理领域占

1. 安徽理工大学安全科学与工程学院, 淮南 232001

2. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 淮南 232001

3. 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 淮南 232001

收稿日期: 2025-03-12; 修回日期: 2025-05-30

基金项目: 中国工程院重大咨询项目(2025-XBZD-12); 安徽省优秀青年基金项目(2022AH030086); 安徽省高校科学研究重大项目(KJ2021ZD0050); 国家自然科学基金面上项目(42477201)

作者简介: 张通, 副教授, 研究方向为煤与伴生资源协同开发, 电子信箱: 1099731996@qq.com; 袁亮(通信作者), 教授, 中国工程院院士, 研究方向为煤炭开发, 电子信箱: yuanl_1960@sina.com

引用格式: 张通, 袁亮, 王玥晗. “双碳”目标下甲烷管控与减排科技创新[J]. 科技导报, 2025, 43(12): 55-64; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.03.00049

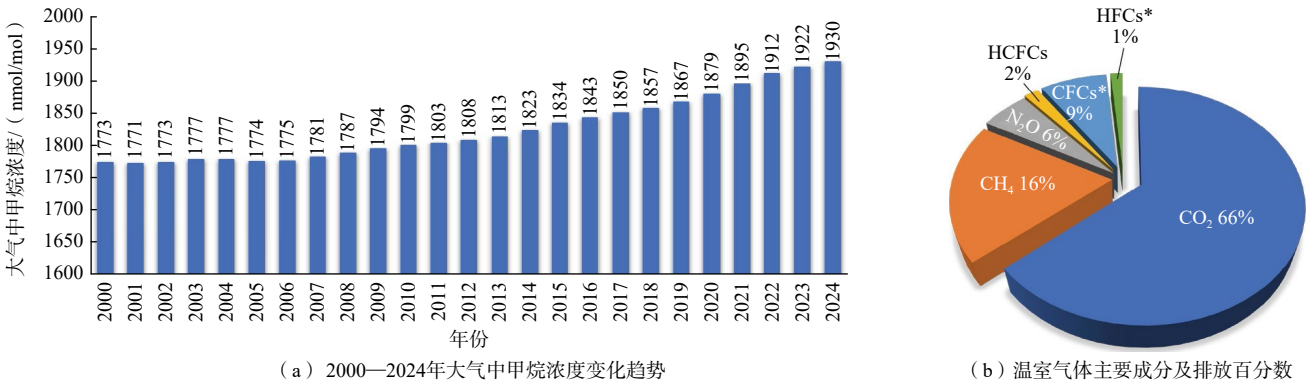


图1 大气中甲烷浓度及变化趋势

11.9%^[8-9]。近年来,重点排放源逃逸甲烷量呈上升态势,煤炭开采等固体燃料为最大单一排放源,油气系统逃逸排放占比虽低,但呈稳定增长态势。农业源甲烷排放中,动物肠道发酵等占据主导且持续增长。同时,废弃物处理相关甲烷排放近年亦不断攀升。研究显示,若2030年前人为源甲烷排放量减少45%,到2045年有望缓解近0.3℃的全球变暖^[10],足见甲烷减排的紧迫性。

表1 主要国家及地区人为源甲烷排放结构

国家/地区	更新年份	排放总量/万t	燃料燃烧/%	煤炭逃逸/%	油气逃逸/%	肠道发酵/%	粪便管理/%	水稻种植/%	废弃物处理/%	废水处理/%
中国	2018	6411.3	2.6	39.2	2.9	16.9	5.4	14.9	7.4	4.5
美国	2021	2833.6	1.5	6.4	30.2	24.6	8.3	2.1	15.8	2.7
印度	2016	1955.6	1.5	4.2	4.9	54.2	0.6	17.4	3.9	10.6
巴西	2016	1726.9	2.2	0.3	0.9	68.5	3.7	2.7	8.7	7.9
欧盟	2021	1480.5	6.4	6.2	4.3	44.0	10.8	0.7	19.4	4.1
俄罗斯	2021	1373.2	0.8	20.4	29.1	11.9	1.7	0.2	20.4	6.9

中国长期高度重视甲烷排放控制工作。2020年,习近平在第75届联合国大会一般性辩论上提出了中国的“双碳”目标,并多次在重大国际场合强调加强甲烷等非二氧化碳温室气体管控,为相关工作部署指明方向。在“双碳”目标引领下,落实甲烷管控与减排,是深入践行习近平生态文明思想、贯彻党中央及国务院决策部署的关键行动。这不仅有助于缓解温室效应,还能促进能源资源化利用、推动行业绿色低碳转型、实现污染物排放协同控制、保障安全生产、提升粮食和能源安全等,带来多维度的社会、经济、环境与健康效益。

1 甲烷管控发展现状与科技创新成果

1.1 全球甲烷管控发展现状

在全球气候危机持续加剧的背景下,甲烷管控与减排已成为国际气候治理的核心议题,跨国协同合作

机制对实现全球温控目标具有关键支撑作用。2021年COP26大会上,超过100个国家签署全球甲烷承诺倡议,确立2030年甲烷排放量较2020年至少降低30%的目标。2023年COP28达成的“阿联酋共识”,强化各国非二氧化碳温室气体减排共识。全球50家头部石油和天然气企业签署《石油和天然气脱碳宪章》,明确2030年前实现甲烷零常规泄漏与火炬取缔目标^[11]。2024年COP29达成的“巴库气候团结契约”,确立气候融资集体量化目标(NCQG),完善《巴黎协定》第六条碳市场机制。这些国际行动通过跨国技术共享、数据互认及资金机制创新^[12],为全球甲烷减排目标的实现提供了制度与技术保障。

多个国家和地区依自身情形、需求及减排潜能,采取多元化甲烷管控举措并制定政策法规(表2)。美国自20世纪70年代《清洁生产法》起,构建起州主导、联邦辅助的甲烷监管架构,陆续出台《美国清洁能源与安全法案》等系列法规,设各类污染物排放标准,

严控煤炭、油气开采甲烷排放^[13]。2022 年更新的《美国甲烷减排行动计划》聚焦能源、废弃物、农业领域,主攻油气源甲烷减排,升级相关排放与基础设施标准^[14]。加拿大联邦政府 2018 年推出油气行业上游甲烷排放管理法规,2020 年修订并发布 2 项指令强化减排,明确各环节要求,2023 年预先发布新规,督促油气行业

加强甲烷管控,预计 2030 年油气行业甲烷排放较 2012 年至少降 75%^[15-16]。2020 年的《欧盟甲烷战略》涵盖能源、农业、废弃物处理领域^[17],搭建国际甲烷排放观测站,助力甲烷排放数据国际共享,并凭借循环经济和农业领域的优势,助推降低农业甲烷排放的国际合作,以科学数据指引减排路径^[18]。

表 2 近年来主要国家及地区发布甲烷管控相关政策法规

国家/地区	发布时间/年	政策法规	针对领域
中国	2023	甲烷排放控制行动方案	综合领域
	2024	煤层气(煤矿瓦斯)排放标准	能源领域
	2022	“十四五”现代能源体系规划	能源领域
	2020	关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知	能源领域
	2022	农业农村减排固碳实施方案	农业领域
	2021	“十四五”全国农业绿色发展规划	农业领域
	2023	关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见	废弃物领域
	2021	“十四五”时期“无废城市”建设工作方案	废弃物领域
美国	2022	美国甲烷减排行动计划	综合领域
	2021	基础设施投资和就业法案	综合领域
加拿大	2022	更迅速、更深入:加拿大甲烷战略	综合领域
	2023	甲烷排放新规	能源领域
欧盟	2020	欧盟甲烷减排战略	综合领域
	2024	欧盟新甲烷法规	能源领域
巴西	2022	国家零甲烷计划	综合领域

中国自 20 世纪 50 年代起开展甲烷管控实践,并在多领域持续深化治理。在能源领域,煤炭行业以瓦斯治理为起点,多部门协作出台规章标准^[19]。2024 年修订的《煤层气(煤矿瓦斯)排放标准》将煤矿瓦斯排放限值从 30% 下调至 8%,该标准自 2025 年 4 月起正式实施,有力推动了煤矿瓦斯的资源回收与排放控制^[20]。当前,瓦斯回收利用已形成发电、供热、火炬燃除等多元技术路径,但废弃矿井的瓦斯排放管控体系仍需进一步健全^[21]。油气行业现阶段甲烷逃逸尚未构成主要排放源,伴随能源结构转型,在“十二五”至“十四五”规划期间,通过政策引导推动开采环节的节能技术与放空天然气回收技术应用,并规范排放核算方法与环境影响评价管理。在农业领域,水稻种植和畜禽养殖是甲烷排放的主要来源。针对水稻种植,通过优化施肥方案、改进灌溉方式及选育低排放品种等农艺措施降低排放;针对畜禽养殖,采取调整牲畜日粮

结构、推广青贮氨化技术及利用畜禽粪便规模化制取沼气等综合手段实现减排目标。在废弃物处理领域,废水处理系统采用厌氧消化技术,垃圾处理场通过填埋气抽采发电及提纯利用,均在甲烷减排方面取得显著成效。在政策层面,随着“双碳”目标的提出,中国加速推进甲烷管控的战略规划。2023 年发布的《甲烷排放控制行动方案》^[22],是中国首份系统性聚焦甲烷减排的专项政策文件,标志着管控机制向精细化、协同化升级。在国际合作方面,中国积极参与全球甲烷行动倡议(GMI)、石油和天然气气候倡议(OGCI)等多边及双边合作机制,通过技术与经验共享提升全球甲烷治理效能^[23]。

1.2 甲烷管控科技创新成果

1.2.1 甲烷排放“空-天-地”立体监测技术

中国在甲烷管控技术体系建设中持续推进,着力构建涵盖监测、核算、报告与核查(MRV)的全流程管

理框架,构建起“空-天-地”立体监测技术体系。传统的甲烷监测主要依赖地面固定设备与人工巡检,受限于时空分辨率不足与人工干预误差,难以满足精细化管控需求。近年来,多源遥感技术与智能感知手段的融合应用,推动监测体系向立体化、智能化升级。在近地面监测层面,基于甲烷分子特定波段热辐射特性,红外热成像技术实现泄漏源的精准定位与可视化识别;无人机载光谱仪通过搭载可调谐激光吸收光谱(TDLAS)等传感器,具备对复杂地形的矿区、油气田快速扫描能力,可在分钟级时间尺度内完成区域浓度反演^[24];配置高精度传感器的移动监测平台沿输气管道、工业厂区进行网格化巡检,结合差分吸收光谱(DOAS)技术,能够捕捉 nmol/mol 级(十亿分之一)级浓度的微量泄漏信号,高空遥感监测领域,中国已成功发射多颗携带温室气体探测仪器、高光谱相机的卫星,对全球甲烷排放展开定量监测与反演,实现甲烷排放图景的精准勾勒^[25-26]。随着高分 5 号等甲烷监测卫星、“新舟 60”等遥感飞机以及遍布各地的甲烷地面监测站相继投入运行,构建起“空-天-地”协同的三维立体监测网络。借助人工智能算法的数据分析能力、卫星遥感的广域监测优势,融合部分排放源库信息,中国建立起油气、煤矿设施等甲烷排放源数据库,率先在吕梁、长治、鄂尔多斯等矿区实现对甲烷排放源的高效监测,为后续精准管控、靶向治理筑牢根基。当前,中国正推进下一代高分辨率甲烷卫星的工程论证,进一步提高监测技术的精细化水平,拓展甲烷管控的深度与广度。

1.2.2 煤矿甲烷及油田伴生气高效采收技术

中国煤层地质构造复杂、赋存条件多样,导致瓦斯抽采与利用面临显著挑战。针对本土煤层地质与资源特性,科研团队经数十年技术攻关,形成以保护层卸压开采、松动爆破、水力致裂为核心的成熟强化抽采技术体系^[27-28]。近年来,微波辐射、液氮冷侵等前沿增透技术快速发展,推动甲烷抽采向大范围、精准化、智能化方向演进。在瓦斯利用领域,低浓度甲烷利用技术已实现市场化应用,超低浓度甲烷利用技术虽尚未规模化推广,但具备良好发展潜力,乏风瓦斯氧化技术也已进入实践探索阶段。此外,袁亮院士提出的煤与瓦斯共采理论,攻克瓦斯全浓度利用这一世界性难题,并构建了采煤-采气一体化创新技术体

系^[29-31];2004 年首次提出并完成甲烷减排方法学,推动甲烷减排纳入清洁发展机制(CDM),为煤矿甲烷管控开辟全新技术路径^[32]。

在油气行业,中国持续推进油田伴生气与气田试采气回收技术的推广应用。“十三五”期间,依托重大专项,突破关键技术瓶颈,掌握了煤层气、页岩气开发过程中逸散气及放空气的国际先进回收处理技术。在泄漏修复与减排方面,一方面,通过组建专业化维修团队、优化应急响应流程,实现泄漏问题的快速处置;另一方面,加快老旧设备系统更新,采用先进设备提升运行效率与安全性。在技术创新上,研发井底集气管柱与强排气抽油泵相结合的工艺管柱,实现油气混输,有效降低套管气排放;研制高压增压比增压装置,保障伴生气从井口至联合站的密闭集输。在页岩气开发领域,开发的逸散气回收利用装置成效显著,促使返排液逸散甲烷减排超 90%,放空气减排超 98%,逸散气排放控制达到国际领先水准,有力推动了油气产业的绿色低碳转型^[33]。

1.2.3 水稻种植及畜牧业甲烷源头控排技术

中国聚焦水稻种植甲烷源头减排,构建了以水分调控、有机物料管理、品种改良及稻田复合种养为核心的综合防控技术体系。在政策层面,《农业农村减排固碳实施方案》与《甲烷排放控制行动方案》针对水稻主产区地理气候特征,系统性推广关键减排技术:通过实施间歇灌溉、湿润栽培等节水灌溉模式,缩短稻田厌氧环境持续时间,从代谢机制层面抑制产甲烷菌活性;倡导秸秆还田、绿肥替代部分化肥等有机物料管理措施,优化土壤碳氮循环,降低甲烷生成潜力;筛选兼具高产特性与低排放特征的水稻品种,同步构建区域尺度的甲烷排放监测网络与分级评价体系,形成产量保障与低碳排放协同优化的种植模式,并探索将甲烷减排纳入农业碳中和路径的实现机制。颜晓元团队整合田间原位观测、数据建模及生命周期评估方法,深度挖掘农田碳氮耦合调控潜力,创新提出“生物炭施用耦合能源捕获”技术策略,该策略在有效降低稻田甲烷排放强度的同时,显著提升了土壤有机碳固持能力^[34]。团队基于多年观测数据绘制的全球首张稻田甲烷排放高精度空间分布图,其量化方法被纳入《IPCC 国家温室气体清单指南》,为国际稻田甲烷减排提供了重要技术支撑^[35]。

在畜牧业领域,肠道甲烷减排在当前主要依赖日粮结构优化技术,通过精准调控饲料中碳水化合物、蛋白质比例及纤维组成,定向调节反刍动物瘤胃微生物发酵路径,抑制甲烷生成菌群落活性,而新型饲料添加剂等前沿技术仍处于机理研究与应用探索阶段。粪便管理技术体系已形成规模化应用能力,好氧堆肥、厌氧消化及沼气回收利用等技术在畜禽养殖场已实现广泛部署。董红敏团队主导研发了畜禽养殖领域多项关键方法学,成功开发适用于 CDM 与中国核证自愿减排量(CCER)的畜禽粪便管理温室气体减排核算方法^[36]。其建立的全球首个户用沼气 CDM 方法学,经联合国清洁发展机制执行理事会批准,成为国际通用的户用沼气温室气体减排量化监测工具^[37-38]。以山东民和牧业沼气工程为典型代表的大型养殖场粪污处理项目,通过构建“沼气发电—碳资产交易—有机肥生产”的循环利用模式,实现年碳减排收益 700 万元,为畜牧业甲烷减排与资源化利用树立了工程化示范。

1.2.4 固体废弃物及工业有机废水处理技术

中国在固体废弃物与工业有机废水处理领域形成系统性技术突破与管理创新。生活垃圾分类制度已在全国 237 个城市落地实施,北京、上海、广州等超大城市成效初显。在固体废弃物处理技术体系中,形成以焚烧发电占据主导地位,卫生填埋、机械生物预处理、生物干化等技术协同发展的多元化处理格局。针对存量填埋场的甲烷管理,通过建立全生命周期甲烷监测—收集—利用体系,实施封场填埋场排放特征动态监测、导气系统优化设计及填埋气提纯发电技术升级,推动填埋气管理从末端治理向资源化利用转型^[39-40]。根据《“无废城市”建设试点工作方案》等政策规划,中国分阶段推进垃圾分类与处理设施升级,2030 年前实现一线和二线城市生活垃圾分类全覆盖,基本淘汰原生垃圾直接填埋;2060 年建成现代化垃圾分类处理体系,届时将全面推广填埋气膜下收集技术,以集中焚烧发电替代火炬燃烧,实现温室气体排放精细化管控。在废水处理方面,污水处理零排技术、新型节能型生物脱氮工艺和两相厌氧发酵系统等已趋成熟,通过优化厌氧反应器运行参数与微生物群落结构,显著降低处理过程中的甲烷逃逸强度^[41]。在有机废弃物综合利用方面,通过构建跨行业、跨区域

的资源循环协同网络,聚焦发展高效生物制备清洁能源技术与营养物质回收技术,推动有机废弃物向能源产品、土壤改良剂等高价值化产物转化。针对偏远地区与特殊场景,研发原位自消纳技术与装备,突破传统处理技术的地域限制,为实现废弃物处理领域的碳中和目标提供了技术支撑与实施路径^[42-43]。

1.2.5 甲烷气候投融资体系建设

甲烷气候投融资体系对甲烷减排及全球气候治理至关重要,中国近年来在制度创新与机制构建方面取得显著进展。在政策层面,2020 年颁布的《全国碳排放权交易管理办法(试行)》首次将甲烷减排项目纳入 CCER 机制,助力企业通过 CCER 项目抵消碳排放配额实现降本增效。2021 年实施的《绿色债券支持项目目录》将油气行业甲烷回收利用、畜禽粪污沼气工程等纳入绿色债券支持范畴,企业凭项目抵押发债,为企业低碳转型提供多元化资金渠道。2023 年,生态环境部等 11 个部门联合印发的《甲烷排放控制行动方案》,围绕“十四五”“十五五”甲烷减排目标,通过财政补贴、税收优惠等创新激励政策,引导社会资本向煤矿瓦斯抽采利用、垃圾填埋气资源化等高价值减排领域集聚,有效激活气候投融资市场潜力。在市场机制构建方面,全国碳排放权交易市场运行中,CCER 作为配额抵消工具的制度设计,既降低了控排企业的履约成本,又为甲烷减排项目创造了碳资产收益渠道,助力企业低碳转型^[44]。当前,中国 CCER 试点项目已在垃圾填埋气收集、煤层气开发、沼气工程等领域形成初步实践范例,展现出投融资机制与甲烷管控的协同效应。尽管现阶段中国气候投融资体系仍存在体制机制待健全、银行融资动力不足、能力建设滞后等问题,但随着绿色金融标准体系的健全及碳市场基础政策的完善,甲烷气候投融资体系将在提升全球减排行动效能中释放更大潜力。

2 甲烷管控与减排面临的挑战

2.1 能源领域

国际能源署(IEA)报告揭示,2023 年,中国人源甲烷排放量为 5285 万 t,占全球人源排放量的 15.1%,居世界第 1,其中,在各类排放源中,能源活动排放的甲烷量最大,为 2232 万 t,占比高达 42%。在

能源排放中,煤炭排放的甲烷量最大,达到 1947 万 t,占比高达 87%,而油气排放量为 295 万 t,占比 13%。能源活动可划分为煤炭开采活动、油气系统泄漏、燃料燃烧 3 类。煤炭开采相关排放源分为井工开采、露天开采引发的甲烷逃逸排放以及矿后活动。甲烷浓度低于 0.75% 的乏风瓦斯,这部分利用难度极大,占中国煤矿瓦斯甲烷总量的 81%。废弃煤矿的甲烷排放也是备受关注的重要排放源,但中国对废弃矿井瓦斯利用尚处于摸索阶段,若不能采取有效措施,甲烷排放量也将随废弃煤矿的增加而增加。油气系统的甲烷逃逸排放贯穿石油和天然气产业链的相关活动过程,如原油的勘探、生产、运输、炼制,天然气的勘探、生成、处理、运输、储存、分销;废弃油气田也会产生一定的甲烷排放。燃料燃烧可分为化石燃料燃烧、生物质燃料燃烧 2 种。中国油气行业甲烷控制一方面是将作为资源利用,主动回收;另一方面是在污染防治要求下,协同控制甲烷。与欧美发达国家相比,中国在油气能源行业甲烷排放监测、报告及核查体系尚未完全建立,甲烷减排行动还缺乏规模化的实践。在措施层面,需加强地面预抽、关闭/废弃矿井抽采、低浓度瓦斯与乏风瓦斯回收利用,推动技术装备示范与产业化,同时加强废弃矿井监管,建立清单并研发高效抽采利用技术;建立油气行业各层级统一的甲烷排放核算方法形成甲烷监测、报告和核证体系,强化甲烷排放控制,实现精细化管控减排,完善甲烷泄漏突发事件应急响应机制。

2.2 农业领域

2023 年,中国农业活动甲烷排放量为 1856 万 t,占中国人源排放总量的 35.1%。农业活动中 80% 的甲烷来自畜牧系统,其中约 90% 来自牛、羊等反刍动物的肠道发酵,约 10% 来自动物粪便储存和管理过程中的厌氧发酵,剩下的 20% 主要在稻田植株-土壤-微生物相互作用、厌氧环境下产生,少量来自秸秆等农业废弃物田间焚烧。尽管中国已针对农业部门制定并实施了减排政策且取得初步成效,但中国仍是发展中国家,受制于有限的自然禀赋,与发达国家相比,在推动甲烷减排方面面临诸多挑战。例如,畜禽饲料与品种选育的技术改进主要着眼于提高畜产品的产量或质量等经济效益,甲烷减排技术在减少反刍动物肠道排放方面的潜力尚未得到充分关注。同时,农业源

甲烷减排技术的推广也面临着多重障碍,这主要与中国小农户的农业经营模式对农业推广体制与农业经营者的技术素养均提出了更高要求。甲烷气体减排的市场机制和公共低碳投资亟待完善,甲烷减排技术研发的财政投入则有所不足,主要以财政补贴或税收优惠为主,缺乏利用市场机制调动社会投资进入。甲烷减排技术顶层设计有待完善,同时,行之有效的甲烷气体检测、报告与核查制度(MRV)尚未建立。在措施层面,探索畜禽粪污养分平衡管理方式,提高畜禽粪污处理及资源化利用水平;实施精准饲喂,探索高产低排放技术模式,降低单位畜产品的肠道甲烷排放;推广高产、优质、节水抗旱水稻品种,形成高产低排放水稻种植模式。

2.3 废弃物处理领域

2023 年中国废弃物甲烷排放量为 1051 万 t,占中国人源排放总量的 20%。中国废弃物领域甲烷排放主要来源于固体废弃物处置和废水处理。固体废弃物的主要处理方式是卫生填埋和焚烧,减排方式以卫生填埋场的甲烷回收利用为主,中国已建立垃圾填埋场甲烷排放控制标准,但垃圾焚烧甲烷排放控制标准仍有缺失,尚未出台专门针对废弃物处理甲烷排放的法律法规,减排资金投入不够,废弃物循环利用产业发展不够。废水和污水中有机物在无氧条件下会分解产生大量甲烷,虽然中国对于废水处理标准进行了规定,减少了露天氧化塘的甲烷排放,但许多污水处理厂受建设费用、技术水平限制,尚未对污泥进行稳定化处理,或处理工艺配套设施不完善,对污水处理过程中产生的污泥目前还没有较好的减排措施。在措施层面,推动生活垃圾源头减量、分类回收和资源化利用,健全生活垃圾的资源化利用体系;鼓励有条件的污水处理,采用污泥厌氧消化等方式产生沼气并加强回收利用,强化废弃物与甲烷协同控制措施。

2.4 人才与平台方面

能源、农业、废弃物领域甲烷排放涵盖了环境科学、地球化学、畜牧工程等学科,甲烷全生命周期管理、防控技术优化的研究平台学科交叉特征显著。同时,甲烷排放源具有分散性、隐蔽性和强动态性特征,甲烷排放清单编制与溯源准确分析仍高度依赖现有监测技术(如高精度传感器、卫星遥感反演)的时空分辨率;而人才培养层面,传统教育体系对甲烷控排的

专项认知薄弱,缺乏甲烷生成机制、监测技术、防控政策等模块化知识体系;当前涉及相关的本科专业高校仅有 300 余所,甲烷防控技术的实践教学投入存在不足,校企联合实验室、模拟仿真平台等实践平台仍需强化,基层技术人员对甲烷快速检测、应急响应等技能掌握不足,高端研发人才与现场应用型人才结构失衡,“实验室基础研究—关键核心技术攻关—技术集成应用—市场运行管理”链条衔接度与适配性不足。积极构建甲烷管控与减排学科交叉矩阵,推动能源、农业、环境等领域共建共享实验平台与监测数据库,并通过“理论-技术-管理”三位一体的培养模式与产教融合实训基地建设,强化人才在甲烷管控与减排全链条过程中的关键技术攻关、技术集成应用的支持和保障作用。

3 甲烷管控科技创新与平台建设

3.1 能源领域发展建设

在能源领域,甲烷减排在技术、经济、政策监管、国际合作等多方面面临挑战。技术层面存在泄漏检测精度不足(尤其偏远地区老旧设施)和修复成本高的难题。经济上受制于企业短期成本压力与能源价格波动导致的减排动力不足,政策监管因各国标准碎片化、执法能力薄弱而难以统一落实。在数据透明度方面,卫星监测揭示实际排放量远超官方报告,暴露清单不精准问题。国际合作则面临资金分配不均、技术转移壁垒等障碍,制约发展中国家减排能力。为解决能源领域甲烷减排难题,当前应逐步降低高甲烷煤炭基地的生产规模,加大煤与瓦斯共采、多类型煤气资源协同高效开发技术的研发与推广,从源头上减少甲烷排放。健全能源开采行业甲烷监测统计核算技术体系,细化监测对象、统计/核算方法以及监测设备技术参数,确保对甲烷排放数据的及时、准确掌握。统筹技术创新与经济政策协同发力,重点加强新型高效减排技术及装备的研发创新,加速绿氢规模化替代、甲烷资源化利用等低碳技术产业化进程。通过建立碳定价机制、开征甲烷税及创新绿色金融工具,构建市场化激励机制引导企业主动减排。完善能源开采领域甲烷回收利用的财税、金融、土地等配套支持政策,打通技术推广与产业转型的关键堵点,实现甲

烷减排与能源结构低碳转型的协同增效。强化国际合作机制,推动建立全球统一监测标准与资金支持机制,例如,通过“全球甲烷承诺”框架强化跨国技术转移(如卫星监测、智能传感器)和资金调配,并依托国际平台共享数据、协同核查,重点支持发展中国家老旧设施升级与甲烷资源化技术落地,实现减排责任共担与效益共享。

3.2 农业领域发展建设

在农业领域,水稻淹水种植和反刍动物肠道发酵(占畜牧业排放 40% 以上)等生物过程减排难度大,现有减排饲料添加剂成本高且长期效果待验证,低碳水稻品种推广受限于农田适应性差异。中小型农户占全球农业主体,减排设备(如沼气池、精准饲喂系统)前期投入超其承受能力,碳交易市场尚未有效覆盖农业甲烷项目。不同地区的社会和文化因素以及农民的传统习惯导致对农业及畜牧业减排新技术的接受度存在差异,影响减排措施的推广。例如,改变水稻种植方式可能需要农民接受新的农艺实践,而调整牲畜饲料可能涉及改变长期的饲养习惯。针对农业领域特点,甲烷减排应大力推广浅薄湿润灌溉、节水灌溉技术,以中期晒田或间歇性灌溉替代长期淹灌,减少因长期淹水产生的甲烷。采用集约化生产模式,培养低排放品种,引导大型生产企业、合作社、种植大户应用甲烷减排技术平台。改进畜牧业饲养模式,减轻肠道发酵甲烷排放,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,减轻肠道发酵甲烷排放。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。统筹考虑国家战略与农业从业者利益,制定切实可行的减排政策与激励措施,给予积极减排从业者一定税收优惠及资金补贴政策,推动广大从业者自愿进入碳汇市场。

3.3 废弃物领域发展建设

在废弃物领域,垃圾填埋场及废水处理厂气体收集系统覆盖率低(全球仅 20% 填埋场配备高效气体回收设施),且有机废物分类不足导致厌氧消化技术应用受限。发展中国家普遍缺乏资金升级老旧处理设备,而碳市场对废弃物甲烷项目认证标准严苛,抑制减排收益转化。此外,露天堆放和非正规填埋占比超 35%,监管缺失与排放监测数据断层进一步加剧控排难度。因此,在废弃物处理领域应重点推动废弃物处

理场所的甲烷排放监测,精准统计生活垃圾清运量、填埋处理量、焚烧处理量、废水处理量、甲烷回收利用量等活动数据。加速建立投放、收集、运输、处理的全流程垃圾分类处理系统,加快固态废弃物填埋场填埋气发电的应用,研发相关填埋气采集、回收、分离、储存装置。同时,结合国际成熟实践经验,优化固体废弃物及废水处理工艺流程,鼓励市政污泥与餐厨垃圾、生活垃圾联合消化,按城乡基本情况分级合理设置处理设施,积极推动各类型废弃物及废水处理产业化进程。

3.4 跨领域平台建设与人才培养

在甲烷减排与管控学科平台建设与人才培养领域,推动形成“跨学科融合+产教协同”科研创新与人才培养体系,建立国家级甲烷管控国家实验室及工程研究中心,监测融合多源监测数据(如卫星遥感、物联网传感器),结合机器深度学习算法,构建人工智能大模型数据库,开发甲烷全生命周期管理数字孪生平台,突破跨行业排放核算与精准防控技术瓶颈,实现甲烷管控和减排跨领域精准调控与实施路径快速决策;同时,设立专项基金支持校企共建实验基地,推动监测设备、防控技术等成果的产业化应用。“政产学研金服用”深度协同,深化人才培养体制机制创新,依托生成式人工智能,赋能创新型拔尖人才培养,构建“基础理论—技术方法—政策管理”立体培训模式,培养人才跨学科思维,强化甲烷生成机理、溯源建模、智能监测等方面的专业学习,提升思维创新性,避免思维同质化,以项目为依托推进实践教学(如甲烷泄漏应急演练、控排技术田间验证);推行校企联合培养模式,联合企业设立甲烷防控技术专项奖学金,建立行业职业资格认证体系,基层技术人员技能培训与高端研发人才同步分类培养,形成“基础突破—技术攻关—先导试验—基层应用”的全链条人才梯队,通过专项补贴与优惠政策倾斜,加速形成甲烷管控与减排领域的学科优势与人才储备。依托科学研究与学科人才培养平台,加强国内外科研机构联合攻关,稳步推进科技创新内涵式发展,推进全球甲烷监测技术创新,支持建立以我为主的甲烷排放控排联盟。在应对气候变化合作交流中,推动全球甲烷排放数据共享,借助气候变化南南合作、“一带一路”绿色发展国际联盟等平台,引领开展甲烷排放控制与多边合作。

4 展望与建议

为系统推进中国甲烷管控工作,需统筹顶层设计、技术创新、标准规范与国际协作,构建多维度协同治理体系,统筹技术创新、制度完善与国际协作,构建经济—能源—环境协同发展范式,为全球甲烷治理贡献中国方案,助力“双碳”目标实现。

1) 完善政策体系,强化多领域协同治理。深化甲烷管控顶层设计,结合“双碳”战略节点,分阶段制定区域消费达峰路径,建立涵盖能源、农业、废弃物等领域的甲烷排放核算、监测、验证体系(MRV),完善重点排放源定期核算与报告制度。建议强化财政、产业、科技政策的协同效应,推动指令型、激励型政策工具组合应用,并构建“政—产—学—研—用—金”联动机制,政府引导政策制定与监管,企业优化生产流程,科研机构攻关技术瓶颈,金融资本提供项目支持,形成全链条协作网络,实现甲烷管控从被动约束向主动治理转型。

2) 聚焦技术创新,构建全链条研发体系。布局国家级甲烷管控创新平台,依托重点实验室、工程中心及校企联合基地,推进监测精准化、减排高效化、利用多元化等核心技术突破。短期内加大智能开采、碳捕获利用与封存(CCUS)等技术研发投入;中长期发展新能源与传统能源耦合技术,提升能源转换效率,并通过数字技术构建智能能源调配系统。同步推进前沿学科平台建设与科技人才培养,实施教育科技人才一体化战略,高校需优化专业设置,联合企业开展实训,培养兼具理论与实操能力的复合型人才,为技术迭代提供可持续支撑。

3) 健全市场机制,推动标准与金融工具创新。加快建立覆盖煤炭、农业等关键行业的甲烷减排标准体系,将智能开采、稻田种植等环节纳入自愿减排交易市场,试点甲烷减排量抵销机制。鼓励开发碳期货、碳期权等金融衍生品,引导社会资本参与减排项目。针对农业领域,需制定基于水稻品种、灌溉模式等变量的精准减排方法学,通过经济收益激励企业实践。此外,应加强公众教育与行业培训,借助数字化手段普及甲烷管控知识,推动减排理念从政策驱动转向社会共识。

4) 深化国际合作,融入全球气候治理。积极参与

全球甲烷减排倡议,通过技术引进、联合研发及数据共享提升管控能力。重点在监测技术、废弃物处理等领域开展跨国合作,建立排放数据互通平台,协同分析减排成效。同时,对外推广中国在能源、农业领域的低成本减排经验,推动国际标准互认,增强在全球气候治理中的话语权,实现技术自主创新与国际责任担当的双重突破。

参考文献(References)

- [1] IEA. Global methane tracker 2024[R]. Paris: IEA, 2024.
- [2] WMO. WMO greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2023[R]. Geneva: WMO, 2024.
- [3] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [4] IPCC. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [5] UNFCCC. First global stocktake proposal by the President[R]. Dubai: UNFCCC, 2023.
- [6] Crippa M, Guizzardi D, Pagani F, et al. GHG emissions of all world countries, publications office of the European Union[EB/OL]. [2025-02-28]. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897>.
- [7] United Nations Framework Convention on Climate Change(UNFCCC). Greenhouse gas inventory data: Detailed data by party[EB/OL]. [2025-02-28]. https://di.unfccc.int/detailed_data_by_party.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第四次国家信息通报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2023.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2023.
- [10] United Nations Environment Programme. Global methane assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions[R]. Kenya: United Nations Environment Programme, 2021.
- [11] Oil & Gas Decarbonization Charter. The Oil & Gas Decarbonization Charter[EB/OL]. [2025-05-28]. <https://www.ogdc.org/>.
- [12] 许玲懿, 樊星. 中国为COP29的成功作出重要贡献[J]. 世界环境, 2024(6): 23-25.
- [13] 姜渊. 美国《清洁空气法》中的环境质量达标制度研究: 以联邦与地方的权限为视角[J]. 中国环境管理, 2018, 10(4): 122-128.
- [14] The White House Office of Domestic Climate Policy. US methane emissions reduction action plan[R]. Washington: The White House, 2021.
- [15] Government of Canada. Faster and further: Canada's methane strategy[R]. Ottawa: Government of Canada, 2022.
- [16] Government of Canada. Canada's greenhouse gas offset credit system: Protocols[R]. Ottawa: Government of Canada, 2024.
- [17] European Commission. EU strategy to reduce methane emissions[R]. Luxembourg: European Commission, 2020.
- [18] European Union. Regulation (EU) 2024/1787 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942[R]. Luxembourg: European Union, 2024.
- [19] 袁亮, 黄晶. 中国甲烷管控技术发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 煤层气(煤矿瓦斯)排放标准: GB 21522—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [21] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131-2139.
- [22] 中华人民共和国生态环境部, 外交部, 国家发展改革委, 等. 《甲烷排放控制行动方案》[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2023.
- [23] 徐源, 张永香. 透过“沸腾”的COP28看中美参与全球气候治理[J]. 气候变化研究进展, 2025, 21(1): 135-143.
- [24] 达虹鞠, 许德刚, 王晨, 等. 基于无人机平台的甲烷监测技术及其在油气行业的应用[J]. 中国环境监测, 2024, 40(1): 1-11.
- [25] 解北京, 李晓旭, 张景顺, 等. 井工煤矿甲烷排放精准监测与核算[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 119-130.
- [26] 刘勇丽, 赵晨尧, 刘希平, 等. 水稻甲烷排放遥感监测研究综述[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(5): 1523-1531.
- [27] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 1-8.
- [28] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 1-14.
- [29] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
- [30] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
- [31] 袁亮. 煤及伴生资源精准开采科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1-9.
- [32] 袁亮. 中国煤矿区煤层气清洁发展机制项目开发理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.

- [33] 薛明, 翁艺斌, 刘光全, 等. 石油与天然气生产过程甲烷逃逸排放检测与核算研究现状及建议[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(2): 187–195.
- [34] Yan X Y, Xia L L, Ti C P. Temporal and spatial variations in nitrogen use efficiency of crop production in China[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 293: 118496.
- [35] Xia L L, Cao L, Yang Y, et al. Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production[J]. *Nature Food*, 2023, 4(3): 236–246.
- [36] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269–273.
- [37] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303–308.
- [38] 董红敏, 李玉娥, 朱志平, 等. 农村户用沼气CDM项目温室气体减排潜力[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 293–296.
- [39] 张相锋, 肖学智, 何毅, 等. 垃圾填埋场的甲烷释放及其减排[J]. 中国沼气, 2006, 24(1): 3–5.
- [40] 冯俊熙, 陈多福. 垃圾填埋场甲烷排放监测方法研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(3): 174–179.
- [41] 施汉昌. 污水处理技术的研究与发展[J]. 给水排水, 2013, 49(2): 1–3.
- [42] 王博, 宋永一, 王鑫, 等. 有机固体废弃物热化学制氢研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(2): 709–721.
- [43] 杨天华, 佟瑶, 翟英媚, 等. 碳中和愿景下有机固废热转化清洁利用技术研究现状与展望[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(3): 29–51.
- [44] 王科, 吕晨. 中国碳市场建设成效与展望(2024)[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2024, 26(2): 16–27.

Technological innovations in methane control and emission reduction under the twin goals of carbon peak and carbon neutrality

ZHANG Tong^{1,2,3}, YUAN Liang^{1,2,3*}, WANG Yuehan^{1,2}

1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China

2. National Key Laboratory of Deep Coal Safe Mining and Environmental Protection, Huainan, 232001, China

3. State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Huainan, 232001, China

Abstract In the context of global efforts to address climate change and China's determined march toward the twin goals of carbon peak and carbon neutrality, methane control and emission reduction have become key links in achieving sustainable development and climate targets. This paper analyzes the strategic layout for methane management and mitigation under these twin carbon objectives. To date, preliminary achievements have been made: A three-dimensional "air-space-ground" monitoring system enables precise localization of emission sources; upstream recovery rates in energy extraction have improved; source-control technologies for rice cultivation and livestock farming in agriculture have matured; and a methane-focused climate finance framework has injected fresh capital into reduction efforts. However, methane mitigation challenges remain severe. In the energy sector, methane leaks in traditional coal mining and fugitive emissions in oil and gas systems hinder the green transition; in agriculture, anaerobic processes in rice paddies and enteric fermentation and manure management in livestock farming lead to significant methane release; and in waste treatment, landfill disposal and anaerobic treatment of industrial wastewater generate large methane volumes. In response, this paper proposes a cross-sectoral collaboration that breaks down the boundaries among the energy, agriculture, and waste-treatment industries to build an integrated mitigation system. This approach balances energy security with the twin carbon goals by steadily steering the energy mix toward greener, lower-carbon sources while ensuring supply reliability. It also calls for leveraging educational, research, and talent advantages to establish national-level science and innovation platforms to tackle key technological challenges in methane control. Looking ahead, with sustained technological innovation, targeted policy optimization, and deep international cooperation, China is poised to overcome current methane-control obstacles, achieve substantial emission reductions, support its carbon-peak and neutrality goals, and contribute meaningfully to global climate governance.

Keywords twin goals of carbon peak and carbon neutrality; multi-source methane control; emission reduction strategies; technological innovation; cross-sector collaboration ●



(责任编辑 王微)