DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.01.044

我国非二氧化碳温室气体排放的系统治理

张博[1,2]，杨琰伦[1]，邢懿心[3]，高俊莲[3*]，刘合[4]

（1. 厦门大学管理学院，福建厦门 361005；2. 厦门大学绿色管理研究院，福建厦门 361005；3. 中国矿业大学（北京）管理学院，北京 100083；4. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室，黑龙江大庆 163712）

摘要：非二氧化碳温室气体与CO_2的物理化学性质差异明显，排放总量大、来源分散、跨行业特征明显；在我国承诺2035年全经济范围温室气体减排国家自主贡献目标的背景下，开展非二氧化碳温室气体排放管控兼有挑战性和紧迫性。本文梳理了我国非二氧化碳温室气体排放管控形势，辨析了非二氧化碳温室气体的排放过程与形成机理、排放监测与核算方法、减排与资源化利用技术及措施、减排路径与治理策略等关键管控要素。提出了以系统治理为导向的管控思路，将非二氧化碳温室气体纳入统一治理范畴，构建“一体、两翼、三层架构、四类支撑”的总体治理框架，实施涵盖各类气体、主要行业、减排与经济社会发展、国内与国际等维度的一体化协同治理策略，关注人工智能技术赋能治理的路径创新。可在加强顶层设计与制度建设、强化科技创新与人才支撑、激发市场活力与产业创新、布局全球议程与国际合作等方面采取积极行动，加快完善我国非二氧化碳温室气体治理体系，推动全面温室气体减排并深度参与全球气候治理。

关键词：非二氧化碳温室气体；全面温室气体减排；管控要素；系统治理；人工智能

中图分类号：F407.2；F416.2　**文献标识码：**A

Systematic Governance of non-CO_2 Greenhouse Gas Emissions in China

Zhang Bo[1,2], Yang Yanlun[1], Xing Yixin[3], Gao Junlian[3*], Liu He[4]

(1. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 2. Institute for Green Management Studies, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Daqing 163712, Heilongjiang, China)

Abstract: Non-carbon dioxide (CO_2) greenhouse gases exhibit significant differences in physicochemical properties from CO_2, with large total emissions, dispersed sources, and obvious cross-industry characteristics. Against the background of China’s commitment to the nationally determined contribution target of reducing greenhouse gas emissions across the entire economy by 2035, controlling non-CO_2 greenhouse gas emissions becomes both challenging and urgent. This study reviews the situation of non-CO_2 greenhouse gas emission control in China, and analyzes the key control elements, including emission processes and formation mechanisms, emission monitoring and accounting methods, emission reduction and resource utilization technologies and measures, as well as emission reduction pathways and governance strategies. Moreover, the study proposes a management approach guided by systematic governance, incorporating non-CO_2 greenhouse gases into a unified governance framework. Additionally, an overall governance structure consisting of “one body, two supporting wings, a three-tier architecture, and four types of support” is constructed. An

收稿日期：2026-01-25；**修回日期：**2026-03-15

通讯作者：*高俊莲，中国矿业大学（北京）管理学院副教授，研究方向为资源环境政策与管理；E-mail: junliangao@cumtb.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“‘双碳’战略目标下甲烷管控工程科技发展路径研究”(2025-XZ-53)；国家自然科学基金项目(72374175, 72404270)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

integrated and coordinative governance strategy covering various gases, major industries, emission reduction and socioeconomic development, as well as domestic and international dimensions are implemented, with a focus on path innovation in governance enabled by artificial intelligence. Active actions can be taken in strengthening top-level design and institutional development, enhancing technological innovation and talent support, stimulating market vitality and industrial innovation, and planning global agendas and international cooperation. These efforts aim to accelerate the improvement in China's non-CO_2 greenhouse gas governance system, promote comprehensive greenhouse gas reduction, and deeply participate in global climate governance.

Keywords: non-CO_2 greenhouse gases; comprehensive greenhouse gas emission reduction; control elements; systematic governance; artificial intelligence

一、前言

实现温室气体的全面和深度减排成为全球性的重大挑战。碳中和的本质是人为温室气体的排放与清除取得整体性平衡，因而在CO_2减排以外，更需要大幅削减包括CH_4、N_2O、含氟气体（HFCs、PFCs、SF_6、NF_3）在内的非二氧化碳温室气体[1]。CH_4是仅次于CO_2的第二大升温因子，累计排放已致约0.5 ℃的全球升温[2]；而CH_4在大气中的寿命较短，减排CH_4会在较短时间内产生明显的大气CH_4浓度减缓效果[3]。N_2O具有超过100年的大气寿命，可对位于平流层的臭氧层产生破坏效应。含氟气体排放规模不大，但全球增温潜势（GWP）值极高，对气候系统具有放大效应。对比温室气体排放总体格局中的占比可知，非二氧化碳温室气体的温升贡献更为突出，相应变化趋势将显著影响全球温控目标的路径与碳预算空间，需要推进CH_4等温室气体的深度减排[3~5]，同步取得空气质量改善等协同效益[6]。

近年来，人为源非二氧化碳温室气体排放治理上升为全球气候治理体系中的重要组成部分。自第26届联合国气候变化大会召开以来，CH_4等温室气体管控从相对边缘的补充性议题转变为国际气候谈判的核心议题。美国、欧盟联合发起“全球甲烷承诺”，加拿大、欧盟、经济合作与发展组织均将多种温室气体纳入气候治理战略或规划[7~9]，强化油气行业CH_4泄漏监管、农业与废弃物领域温室气体减排等的政策宣示[10,11]。《蒙特利尔议定书》框架下通过的《基加利修正案》提出，各国应逐步削减HFCs的生产和使用[12]。在《巴黎协定》《联合国气候变化框架公约》约束下，非二氧化碳温室气体减排的履约要求、报告与审评机制、责任分配等问题持续获得国际关注，尽管各国实质性的政策推动、行动落实等仍处于博弈与演化过程中。

我国非二氧化碳温室气体排放规模大、结构复杂，相关减排行动具有紧迫性。“十四五”时期，持续强化非二氧化碳温室气体的政策与行动部署[7]。《甲烷排放控制行动方案》将CH_4治理正式纳入国家气候治理体系，《关于促进企业温室气体信息自愿披露的意见》《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）》《工业领域氧化亚氮排放控制行动方案》等政策文件相继发布。到2035年全经济范围温室气体净排放量比峰值下降7%~10%的新一轮国家自主贡献目标，进一步明确了我国向所有温室气体协同减排的战略转型任务。整体上，管控非二氧化碳温室气体事关国家温室气体减排行动目标的实现，也将对全球气候治理成效产生重要影响。

与CO_2排放相比，我国非二氧化碳温室气体排放的研究与治理实践明显滞后。现有研究集中于单一气体（以CH_4为主）[13~15]、单一部门[16,17]或技术层面[18,19]的排放清单编制与减排策略分析，而在排放机理认知、核算与监测方法、减排与资源化利用技术、政策工具设计等方面存在不足[20]。能源领域的相关研究覆盖了煤矿瓦斯排放、天然气全产业链的CH_4逃逸排放、移动源排放[21]。农业领域的相关研究多关注畜牧业、水稻种植的CH_4排放，农业种植与化肥施用的N_2O排放，尤其是典型排放源的时空特征、影响因素与演变态势[22]。此外，废弃物处置的温室气体排放、工业过程的含氟气体排放等也得到关注，如分析了CH_4、N_2O排放在空气质量协同治理中的作用[17]；部分研究量化了特定政策对非二氧化碳温室气体排放的长期影响[14]，将不同类型温室气体纳入综合气候评估模型以衡量对温控目标的贡献度[23]。然而，从单一角度或局部出发的论述[22]，并不能系统把握非二氧化碳温室气体排放控制问题的全貌。

在实施层面，开展非二氧化碳温室气体排放控制受数据、方法、技术、政策等因素的影响[24~27]。如沿用以CO_2为主线的治理路径，容易掩盖甚至忽

视非二氧化碳温室气体减排的重要性，导致CH_4等气体处于分散且碎片化的治理定位与规划状态，构成与CO_2减排和污染物治理有机融合的障碍，不利于减污降碳工作的统一规划、科学推进、高效协调。一旦出现“顾此失彼”“此降彼升”等治理失衡问题，将在新一轮国家自主贡献目标实现、碳市场有效运行、国际履约压力、产业转型成本、综合治理效率等方面构成更大的现实风险，可能错过最佳治理时机甚至延误治理效果，进而付出更高的经济成本和社会代价。鉴于此，本文立足温室气体减排面临的新形势，从排放特征、管控要素、现实需求出发，采取系统治理视角来审视非二氧化碳温室气体排放管控问题，提出系统治理构思，提供科学决策参考。

二、我国非二氧化碳温室气体排放管控形势

（一）非二氧化碳温室气体排放的总体格局

结合国家温室气体排放清单来看，人为源非二氧化碳温室气体排放具有与CO_2显著不同的规模、结构与趋势特征。我国非二氧化碳温室气体排放源类型多样、整体规模突出、行业结构复杂，减排重要性凸显[28,29]。CH_4主要来自化石能源开采利用、农业生产、废弃物处理等环节，N_2O主要与农田氮肥施用、化学工业生产过程相关，含氟气体与制冷、空调、泡沫、气溶胶等工业制品或化学品的全生命周期密切相关。

我国正式公布了9个年度的温室气体排放国家清单（1994年、2005年、2010年、2012年、2014年、2017年、2018年、2020年、2021年）。2010年以来的各年份清单中温室气体构成情况如图1所示。非二氧化碳温室气体是我国温室气体排放的重要组成部分，2021年的非二氧化碳温室气体排放总量为2.686×10^9 tCO_2-eq，占当年温室气体排放总量的18.9%（CH_4、N_2O、含氟气体的占比分别为11.6%、3.9%、3.2%）。从趋势看，非二氧化碳温室气体在我国温室气体排放总体格局中的占比持续上升，2017—2021年的累计增长率约为11.36%，高于同期CO_2排放（9.44%）。同时，各类非二氧化碳温室气体排放的演变路径差异显著，CH_4、N_2O排放增速趋缓，而含氟气体排放快速增长（2010—2021年累计增幅为171.76%）。

2017—2021年的人为源非二氧化碳温室气体排放构成情况如表1所示。能源活动、农业活动的排放贡献度分别从2017年的37.15%、38.56%下降到2021年的33.81%、34.74%，而工业过程的排放贡献度从2017年的15.17%增长到2021年的22.99%。废弃物处理相关的排放变化较小，占比保持稳定。CH_4在非二氧化碳温室气体排放中的占比从2017年的68.78%下降到2021年的62.2%，而含氟气体的占比从2017年的10.37%增长到2021年的17.24%。N_2O排放小幅增长，占比稳定在20%左右。

行业性非二氧化碳温室气体排放清单研究结果表明，农业部门是重要的CH_4、N_2O排放来源[30]，

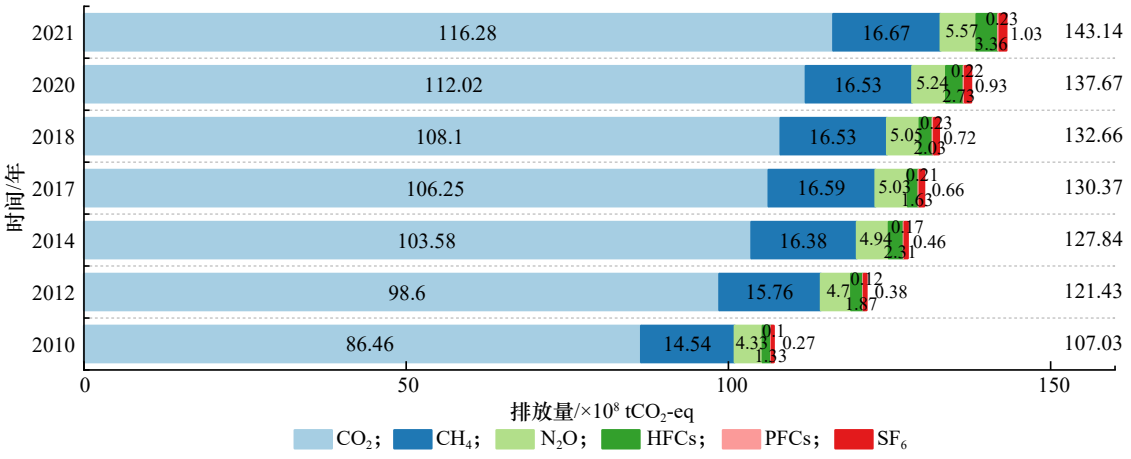

图1 国家清单中人为源温室气体排放构成情况

注：数据来源为《中华人民共和国气候变化第四次两年更新报告》《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》；国家清单中未纳入NF_3，故图中并未给出NF_3排放；统一按照联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告中100年水平的各类温室气体GWP值计算图中数据，不包括“土地利用、土地利用变化和林业”相关的非二氧化碳温室气体排放（2021年的总量为3.1×10^7 tCO_2-eq，贡献度为1.14%）。

表1　国家清单中人为源非二氧化碳温室气体排放特征

时间/年	排放源	非二氧化碳温室气体排放量/×10^8 tCO_2-eq					SF_6	分领域占比/%
		排放总量	CH_4	N_2O	HFCs	PFCs		
2017	能源活动	8.96	7.96	1	—	—	—	37.15
	工业生产过程	3.66	0	1.16	1.63	0.21	0.66	15.17
	农业活动	9.3	6.68	2.62	—	—	—	38.56
	废弃物处理	2.2	1.95	0.25	—	—	—	9.12
	合计	24.12	16.59	5.03	1.63	0.21	0.66	100
2018	能源活动	9	7.92	1.08	—	—	—	36.64
	工业生产过程	4.15	0	1.17	2.03	0.23	0.72	16.90
	农业活动	9.12	6.57	2.55	—	—	—	37.13
	废弃物处理	2.29	2.04	0.25	—	—	—	9.32
	合计	24.56	16.53	5.05	2.03	0.23	0.72	100
2020	能源活动	8.99	7.82	1.17	—	—	—	35.04
	工业生产过程	5.18	0	1.3	2.73	0.22	0.93	20.19
	农业活动	9.15	6.64	2.51	—	—	—	35.66
	废弃物处理	2.34	2.07	0.27	—	—	—	9.12
	合计	25.66	16.53	5.24	2.73	0.22	0.93	100
2021	能源活动	9.06	7.84	1.22	—	—	—	33.81
	工业生产过程	6.16	0	1.54	3.36	0.23	1.03	22.99
	农业活动	9.31	6.8	2.51	—	—	—	34.74
	废弃物处理	2.27	1.98	0.29	—	—	—	8.47
	合计	26.8	16.67	5.57	3.36	0.23	1.03	100

注：数据来源及处理方式与图1一致。

相应温室气体排放自20世纪80年代起经历了“快速增长–增速放缓–趋稳波动”的发展阶段，形成了“稻田–反刍动物–畜禽粪污”主导的排放格局；其中，畜牧养殖、稻田耕作构成的CH_4排放占比超过70%，而N_2O排放主要来自种植业并与化肥施用强度同步。能源系统的CH_4排放结构随着能源转型而发生变化，如煤炭开采的CH_4排放自2015年起逐步下降[31]并受到排放因子、煤炭产量波动的直接影响，油气系统CH_4泄漏由1990年的0.5 Tg/a上升至2022年的4 Tg/a，非常规天然气开发成为新的排放增长因素[32]。重化工业、制冷电子产业的HFCs、PFCs排放量维持高位，而固体废弃物填埋处理、污水处理的CH_4和N_2O贡献自2020年起被高分辨率清单识别并纳入温室气体的设施级清单编制与收支预算。行业级温室气体排放核算体系正在转向多气体、全链条覆盖[30]。

区域性非二氧化碳温室气体清单在一定程度上呈现“东重西轻、南稻北煤”的空间分布格局，核算精度已从省级向网格化、设施级跃迁[30]。全国尺度的排放持续遵循“胡焕庸线”分隔特征，70%以上的CH_4、N_2O集中于以东部地区，以华北平原、四川盆地、长江中下游为热点并持续30年[16]。2000—2021年的省级N_2O清单结果表明，东部沿海地区的排放强度为西部地区的2~3倍[33]。晋陕蒙煤炭主产区的煤矿瓦斯排放较为突出[34]，川渝产气区的天然气产业链CH_4排放较为突出[32]。在农业源中，稻田CH_4排放集聚在长江中下游水稻主产区[16]，反刍动物肠道CH_4排放集中于西北牧区，如新疆、内蒙古等省份的畜牧区CH_4排放年均增速为5%~8%[35]。受产业聚集效应的影响，东部沿海地区的氟化工行业排放突出，高端制造相关含氟气体排放主要位于长江三角洲（长三角）、珠江三角洲地区。城镇化驱动下的废弃物处理源贡献度逐步提升，垃圾填埋场、污水管网的CH_4排放多分布于重点城市及周边区域[36]。区域排放清单还受到政策治理的影响，如东北地区稻田CH_4在2009—2018年因禁烧政策与耕作方式调整而下降12%~18%[37]。此外，我国HFCs等含氟气体排放快速增长且空间分布差异显著，随

着《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）》正式实施，“HCFCs 淘汰+HFCs 削减”并行推进，含氟气体排放增速有望逐步放缓。

整体上，我国非二氧化碳温室气体排放的来源结构、时间演化、空间分布特征与地区资源禀赋、农业和能源生产格局、工业产业聚集、城市消费水平、自然地理因素等深度耦合，与以化石燃料使用为主的 CO_2 排放源存在明显差异。跨部门、多环节的排放格局，使非二氧化碳温室气体排放源具有显著的异质性和分散性。

（二）非二氧化碳温室气体排放管控面临的挑战

我国非二氧化碳温室气体排放格局具有复杂性，开展管控工作具有极大的挑战性。当前的现实困难主要有数据基础与“可监测、可报告、可核查”（MRV）能力薄弱，驱动机制复杂且趋势不确定，减排潜力与成本边界不清，预测与路径优化研究不足，政策风险评估缺位[7]。

一是数据基础与 MRV 支撑能力薄弱。非二氧化碳温室气体排放源分散、过程性强，对 MRV 的依赖程度高于 CO_2。在多部门、多气体条件下针对非二氧化碳温室气体开展 MRV 体系建设，存在方法不同、数据缺口、核算不确定性等方面的突出问题，影响政策执行与效果核验。对多源排放过程的精细刻画受制于活动水平与排放因子的数据质量及透明度。

二是多重因素影响下的排放趋势高度不确定。非二氧化碳温室气体排放受能源结构调整、农业生产方式、工业品生产周期、城镇化进程等因素的耦合驱动，不同气体排放的影响因素与驱动机制差异明显。面向国情实际，非二氧化碳温室气体排放的达峰与下降路径对政策组合高度敏感，具有相当的情景依赖性[38]。

三是减排潜力与费用效益边界不清。非二氧化碳温室气体技术减排、措施减排的潜力评估普遍具有较大的不确定性，会对政策强度选择、减排路径排序产生实质性的影响[36,39,40]。既有研究梳理了我国非二氧化碳温室气体减排选项、部门贡献、中长期潜力，但技术可达性、扩散速度、成本假设具有较大的差异，导致边际减排成本与优先序结果存在不一致的情况。CH_4 减排方向的研究较深入，依然存在潜力可观但路径不清的结构性困境。在含氟气体方面，“替代－回收－全生命周期管理”策略运用将对减排成本和效果产生关键影响[41]。

四是减排进程模拟与路径优化研究支撑不力。在气候政策模拟与综合评估模型方面，非二氧化碳温室气体多被简化处理，所得结论难以支撑多气体协同减排的精细化决策。非二氧化碳温室气体的排放轨迹与减排选项虽受到关注，但与 CO_2 相关研究相比，在跨部门联动、政策组合优化、动态情景校准方面存在明显缺口甚至空白[29]，直接制约政策工具从方向性迈向可计算、可比较、可校核。

五是政策实施的潜在风险与外溢效应评估不足。实施非二氧化碳温室气体减排，涉及农业投入与产出体系调整、能源系统监管与合规成本消化、工业制冷剂替代与回收体系建设等，需要权衡粮食安全、能源安全、产业链韧性，确保治理措施的可接受性与稳健性。因此，减缓政策评估需要兼顾可行性、经济成本、社会影响，避免因实施条件约束、非市场化、主观性分配导致政策失灵甚至逆向反弹，相关风险识别与治理协同需求呈上升趋势。

三、我国非二氧化碳温室气体排放管控的关键要素

（一）非二氧化碳温室气体排放过程与形成机理

跨圈层、多介质过程是大气环境问题系统治理的核心科学问题[42]，也是开展非二氧化碳温室气体精准管控的重要科学基础。然而，CH_4、N_2O 排放涉及大气、陆地生态系统、水体、人类活动系统之间的复杂耦合，形成机理与响应机制方面的基础认知不足，制约了多尺度排放核算、归因、趋势研判的可靠性。

温室气体排放及其大气化学过程对环境条件变化高度敏感，需要探究相应的主导作用机制。CH_4 排放变化可能源于永久冻土融解等自然系统变化、湿地微生物过程增强，也可能与化石能源消耗、农业排放增长、大气羟基自由基清除能力变化有关，自然源和人为源交织并导致排放归因高度复杂[43]。N_2O 的产生主要涉及土壤硝化和反硝化过程，但不同模型对环境因子、微生物机制的表征能力差异显著，导致模拟的 N_2O 通量结果面临较大分歧[44]。

气候效应评估与大气化学模式也是机理研究的

重点。GWP指标虽然广泛使用，但在不同时间尺度和情景下的适用性与数值（影响各类温室气体的统一计量与清单地位研判）仍存在争议；在处理非二氧化碳温室气体时，综合评估模型多采用简化假设，难以刻画非线性过程和短期升温效应[19]。大气化学模式和地球系统模型在非二氧化碳温室气体反应机制、寿命估计、生物地球化学过程参数化等方面仍有改进空间。

CH_4和N_2O排放源类型多样、空间分布复杂、与气候系统的互馈机制不明，在自然源和人为源的识别与定量归因时需进一步降低清单的不确定性。稳定同位素方法在混合源区域解析方面能力有限，观测网络分布不均匀也制约了国家尺度上的排放核算和验证。

（二）非二氧化碳温室气体排放监测与核算方法

排放监测与核算方法体系是开展清单编制的基础、厘清人为源排放特征及其影响因素的前提。排放源识别不精确、核算方法存在误差、排放因子适用性受限[45]、观测网络与数据体系薄弱，共同构成非二氧化碳温室气体核算与监测的主要不确定性来源，导致MRV体系面临实施成本、数据一致性、精度控制等挑战。

在遥感监测方面，我国虽已发射碳卫星、“高分五号”卫星开展CO_2和CH_4监测，但公开数据的可用性、空间分辨率、业务化产品的连续性仍待提升。相比之下，欧洲航天局的Sentinel-5P卫星、美国国家航空航天局的OCO-2/OCO-3卫星、加拿大GHGSat卫星均具备对区域排放甚至CH_4点源泄漏的识别能力[46,47]。遥感反演精度、点源识别能力的增强，直接提升多尺度排放核算结果的可靠性。

在地面观测方面，我国高精度温室气体观测站点布局较为稀疏，缺乏统一协调的长期运行机制。基于高精度傅里叶变换红外光谱仪的全球碳柱总量观测网具有较高精度且运行稳定，而我国仅有少数站点接入，难以充分捕捉重点排放区域的时空变化特征[48]。与发达国家建立的“天空地”一体化、多尺度监测体系相比，我国在地基观测支撑国家排放核算方面存在短板。

在核算方法学层面，非二氧化碳温室气体排放具有间歇性、脉冲性特征，传统的监测方法在时空代表性方面存在局限。不同核算方法之间存在系统性差异，导致不同研究之间的排放估算结果难以直接对比。IPCC指南提供了Tier1/Tier2方法，但对发展中国家情境的适用性受限，如农业、废弃物等部门的默认排放因子不确定度甚至超过±50%。加快构建本地化排放因子库是提升核算准确性与清单质量的关键因素。

此外，多源数据融合能力影响核算精度。开展高分辨率的排放监测，需综合卫星遥感、地面观测、无人机巡测、大气传输模型的信息，而数据格式、时间尺度、空间分辨率上的差异使多源数据融合与同化面临方法学层面的挑战[49,50]。观测数据共享机制缺失、统一平台建设滞后，进一步限制了不同尺度非二氧化碳温室气体动态排放的评估能力。

（三）非二氧化碳温室气体减排与资源化利用技术及措施

非二氧化碳温室气体减排潜力取决于相关技术与措施的推广应用。不同类型的非二氧化碳温室气体减排技术，在成熟度、管理措施、适用条件上存在差异明显。长期以来，我国在煤矿CH_4减排与回收利用方面积累了一定的技术基础，但低浓度瓦斯销毁与梯度利用的技术经济性不足。发达国家在农业领域CH_4、N_2O减排方面已形成一定的技术积累，而我国实施相关减排仍依赖传统的管理措施，对新型饲料添加剂、硝化抑制剂、稻田协同减排等技术的研发与规模化应用重视不够[51,52]。在废水处理领域，低浓度CH_4利用存在技术瓶颈。工业领域的N_2O减排技术路线相对明确，治理设备和催化剂的研发与应用是关键。含氟气体替代技术相对成熟，但在设备改造成本、技术标准统一、工业品全生命周期管理、产业链重构方面受到较大约束。

不同技术在减排效率、应用成本、推广条件上存在差异，带来分化的研发需求，影响相应减排潜力的量化评估。减排与资源化利用技术扩散以及相关的资金支持机制也影响应用潜力提升[53]。此外，生物源非二氧化碳温室气体排放过程具有显著的非线性特征，技术干预效果受到生态系统类型、管理方式、环境条件的显著影响[54–56]。现有研究对不同非二氧化碳温室气体减排潜力与成本量化的估计结果差异较大，主要源于对技术与措施减排的效能及适用边界认识不足[39]。此外，各种减排技术缺乏全生命周期视角下的评估，在特定环节实现减排的同

时可能引入额外的能源资源消耗或间接排放，而相关影响尚未得到系统性量化[19,57]。

（四）非二氧化碳温室气体减排路径与治理策略

选择最优的减排路径与治理策略是科学制定减排目标和政策组合的重要基础。现有研究和治理实践多以单气体、单部门为对象，而多目标约束下的路径模拟与优化不足，难以全面刻画多气体减排之间的协同与权衡关系，使多气体协同减排面临复杂的耦合与路径模拟问题。

在评价框架、模型方法、不确定性处理等方面，现有研究仍存在明显不足。一方面，量化评估结果对模型假设、参数设定等高度敏感。非二氧化碳温室气体减排路径通常涉及农业、废弃物、工业过程的结构性转型，实施效果难以线性外推，模型参数不确定性较高。在更大范围内甚至全球尺度上，不同研究的CH_4、N_4O减排潜力预测结果差异显著，全球尺度的波动幅度为40%~58%，直接影响不同温室气体的排放空间／预算分配和治理成本判断[39]。同时，排放因子、活动水平等基础数据的不确定性，“自上而下”“自下而上”核算方法之间的系统性差异，都放大了路径与政策评估的不确定性。例如，农业土壤N_2O排放因子提高50%可导致总排放估算增加约10%[58]。另一方面，现有模型对多气体交互效应和系统反馈刻画不足，充分纳入非二氧化碳温室气体排放的气候变化综合评估模型也显缺乏。CH_4、N_2O与气溶胶等组分之间存在复杂的化学和气候交互作用，如CH_4影响对流层臭氧和水汽进而改变辐射强迫水平；若模型未能充分耦合这些非线性过程，可能误判不同减排路径的气候效应、成本效益、潜在风险[19]。此外，多数模型依赖较旧的技术数据，缺乏全面的不确定性分析能力，不利于维持评估结果的稳健性。

整体来看，经济社会影响评估不足、多维风险及收益不明，制约了减排技术与潜力的政策转化。非二氧化碳温室气体减排措施对粮食安全、能源安全、产业链稳定性产生一定程度的影响，但相关经济社会效应未纳入现有评估框架，导致政策效果和潜在风险难以进行量化比较。特别是各地区、各行业差异很大，如在农业等重点领域，监测与核算成本高昂、基线确定困难，使基于排放绩效的政策工具在推广时面临障碍[59]。因此，非二氧化碳温室气体减排路径与治理策略需要综合考虑生态环境、粮食安全、能源安全、人类健康的协同效应，明确长期减缓目标中的角色与优先级。

四、我国非二氧化碳温室气体排放系统治理构思

（一）系统治理需求与原则

在全经济范围温室气体减排目标下，非二氧化碳温室气体排放管控不再是单一气体或单一部门的问题，而是涉及排放认知、过程机理、系统耦合、政策响应的综合性议题。非二氧化碳温室气体排放治理与农业生产、能源开发、工业体系、城乡发展高度耦合，涉及农业农村、生态环境、能源、工业等多个部门。然而，现有研究和治理实践存在认知断层、方法不足的情况。气候政策体系仍以碳减排为焦点，针对非二氧化碳温室气体减排的治理措施相对分散，跨部门协调机制、系统性政策工具尚未健全[7]，战略定位、目标设定、实施路径缺乏系统性的方案，难以推动全经济范围温室气体协同减排[60]。有必要超出单一气候目标，明确非二氧化碳温室气体涉及可持续发展目标框架下的气候行动、生态环境保护、经济结构调整、社会发展等政策定位，遵循系统统筹、协同推进、分阶段实施、科技驱动的基本原则，构建统一的治理框架，列入“双碳”行动目标与政策体系，支撑控制行动的系统推进。

（二）治理总体架构与目标

对于人为源非二氧化碳温室气体排放管控，应坚持系统思维与协同导向，将之纳入国家“双碳”战略整体框架，统筹并协调发展与减排、整体与局部、短期与长远、政府与市场四方面关系。阶段推进与重点突破相结合，科学设定减排目标并量化减排空间，细化行业和区域尺度的减排任务，在国家层面负责顶层设计与总体目标，在区域层面因地制宜制定差异化方案，在行业层面推动能源、农业、工业、废弃物等重点领域落实减排路径，强化科技创新与政策机制的“双轮”驱动，构建“一体、两翼、三层架构、四类支撑”的总体治理框架（见图2）。推动形成目标清晰、路径科学、机制健全、支撑有力的系统治理格局，有效提升全经济范围温

室气体排放整体治理效率与治理能力，确保经济社会安全发展。

提出非二氧化碳温室气体排放管控战略目标的构思如下。① 近期（2026—2035年），“十五五”时期统筹推进CO_2与非二氧化碳两类温室气体的减排，以CO_2达峰为核心目标，同步建设非二氧化碳温室气体重点行业减排试点和监测核算体系，推动尽早实现非二氧化碳温室气体排放总体达峰；“十六五”时期各类气体进入较为稳定的平台期，支持实现2035年国家自主贡献目标。② 中期（2036—2050年），推动非二氧化碳与CO_2排放的并行控制，形成覆盖全国的系统性政策框架和市场激励机制，推动非二氧化碳温室气体排放的稳步下降，2045年左右进入快速下降通道。③ 远期（2051—2060年），依托技术突破和制度完善，推动非二氧化碳温室气体排放进入深度减排阶段，为2060年实现碳中和目标提供关键支撑。

（三）一体化协同治理策略

构建系统联动、相互支撑的治理策略，实现多气体协同、减污降碳协同、社会经济协同、国内治理与全球治理协同，是非二氧化碳温室气体排放系统治理落地的关键内容，需要采用一体化协同管控机制。

1. 非二氧化碳温室气体管控的行业内及行业间协同

不同温室气体虽在排放来源、物理化学特性、减排路径方面存在差异，但相应的监测体系、治理技术、政策工具仍有良好的协同潜力。统一规划监测网络和核算体系，可实现多种气体的同步监测与综合评估，提高关联行业内部及行业间的治理效率并降低实施成本。农业、工业、废弃物处理等重点领域的内部协同潜力尤为突出，具有多种气体协同减排甚至跨行业协同减排的可行性。例如，农业活动、废弃物处理领域减排需要注意CH_4、N_2O减排

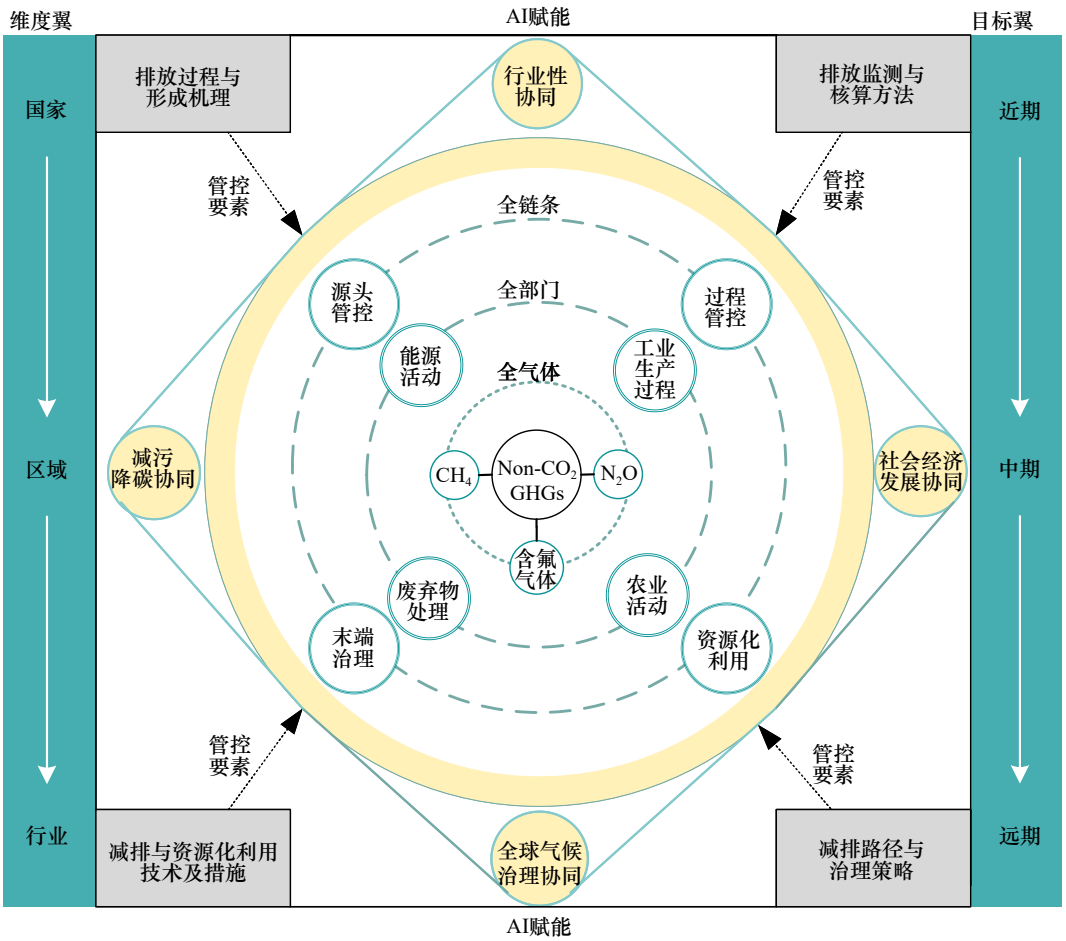

图2　总体治理思路与一体化协同架构示意图

注：Non-CO_2 GHGs表示非二氧化碳温室气体；AI表示人工智能。

的协同，一些生产方式调整和工艺优化措施可同时降低 CH_4、N_2O 排放[22]；油气全产业链均有 CH_4 产生，需要开展协同管控。

2. 非二氧化碳温室气体管控与减污降碳任务协同

非二氧化碳温室气体与 CO_2 及传统大气污染物（不同气体间）在排放源、治理路径方面高度重叠，为减污降碳协同提供了现实基础。煤炭产业链上游开采产生大量的 CH_4，下游的燃煤发电是 CO_2 排放的重要来源。制冷、化工行业的技术升级可在减少含氟气体排放的同时提升系统的能效。统筹 CO_2 与非二氧化碳减排，有助于避免不同气体管控之间的结构性失衡，支持整体脱碳效率提升。同时，CH_4 减排有利于减轻近地面臭氧污染，如油气领域可以兼顾 CH_4 与挥发性有机物的协同减排。通过在统一框架下设计跨气体减排标准和评估体系，实施综合性减排措施，可协同推进温室气体减排与环境质量改善，避免将非二氧化碳温室气体治理与减污降碳工作“割裂”处理。能源系统低碳转型、废弃物资源化利用、生物质能源发展等措施，均有降低污染物与温室气体排放的协同效应，应作为重点推进方向。

3. 非二氧化碳温室气体管控与经济社会发展协同

非二氧化碳温室气体排放管控与粮食安全、能源安全、产业竞争力等发展目标耦合，应在系统评估的基础上开展与经济社会发展的协调推进，促进气体资源化利用和减排产业化。农业、能源、工业过程、废弃物处理是重点排放领域，相应减排路径设计需充分考虑区域发展阶段、经济安全、产业承载能力等政策目标，防止简单化管控引发系统性风险。非二氧化碳温室气体减排也需要统筹与可持续发展目标的协同效应及权衡关系。设计差异化政策、推动产业转型、建设社会保障机制，促进减排与资源化利用、产业升级相结合，壮大绿色低碳产业，在降低治理成本的同时释放新的经济增长空间。

4. 非二氧化碳温室气体治理与全球气候治理协同

非二氧化碳温室气体排放管控议题与全球气候治理进程密切关联，统筹国内管控与国际气候谈判、强化自主性议题的设置能力，有助于提升我国在全球气候治理体系中的参与度和话语权。《巴黎协定》《联合国气候变化框架公约》要求，各国将所有经济部门、全部类型温室气体纳入国家行动与报告范围，依据“最佳可得的科学知识”采取削减非二氧化碳温室气体排放的行动，通过“强化透明度框架”机制来确保自主贡献目标的可靠落实。发达国家在核算方法学、国际标准制定、模型工具开发等方面仍占据主导地位，我国在 IPCC 方法学讨论、国际标准制定方面的参与深度和影响力有待提升。加强基础研究和技术研发、推动具有中国特色的排放核算方法和治理实践转化为国际规则，积极参与国际标准和方法学制定，以增强我国减排成果的国际认可度，为全球非二氧化碳温室气体治理贡献新方案、新路径、新模式。

（四）AI 赋能治理路径创新

AI 技术为非二氧化碳温室气体排放管控提供治理路径创新工具，是提升治理精度、效率与前瞻性的关键支撑。以 AI 赋能排放监测、情景预测、技术筛选、政策评估，可强化数据整合能力和模型表达能力，推动实时演化型知识治理，支持多目标约束下非二氧化碳温室气体排放系统治理的范式创新。

1. AI 赋能排放监测与近实时核算

非二氧化碳温室气体排放源分散且变化频繁，传统的统计与报告方式不适应精细化治理的需求。应用 AI 技术，融合“自上而下”的卫星遥感数据、“自下而上”的清单和现场监测数据，支持构建多尺度、近实时的排放监测体系[61]。应用机器学习和计算机视觉方法（如异常检测、物理信息神经网络），对遥感影像进行自动识别和异常检测，高效定位 CH_4 等气体的高排放点源和“超级”排放源，提升核算时效性和监管针对性。AI 赋能的实时监测网络与区块链存证技术将促进排放数据生产主体多元化，故卫星遥感运营商、工业互联网平台、第三方算法服务商成为新型治理节点。

2. AI 赋能减排技术筛选与成熟度评估

基于自然语言处理与大模型技术，由 AI 系统挖掘科研文献、专利数据库、工程实践数据，快速识别不同行业的关键减排技术及其发展趋势。应用深度学习模型，实时抓取专利、价格等数据信息，预测特定技术路径的市场渗透轨迹与减排成本拐点，将知识更新周期从数年缩短至季度。引入多目标优化算法和预测性分析，由 AI 系统分析技术减

排潜力、经济成本、成熟度水平，为不同区域和应用场景提供减排技术优选方案。面向待突破的技术瓶颈，建立自动化机器学习辅助识别能力，为技术研发和产业化布局提供决策支持。

3. AI赋能排放预测、情景模拟与政策评估

非二氧化碳温室气体排放演化具有显著的非线性和不确定性，传统的情景分析方法难以全面刻画这个复杂的反馈过程。应用AI技术学习历史排放、经济活动、政策实施等数据信息，构建数据驱动的排放预测模型，提高中长期情景分析的精度[62]。引入因果推断与结构因果模型，应用数字孪生、强化学习等方法构建虚拟仿真系统，模拟不同政策组合和技术路径的排放响应，优化多目标约束条件下的路径选择，评估政策实施效果及潜在风险[63]。通过制度设计，分级选用AI输出结果，将高置信度输出纳入监管决策、中置信度结果触发靶向监测验证、低置信度信号作为风险预警备案，化解技术不确定性与治理确定性需求之间的冲突。

4. AI赋能温室气体治理体系的协同与融合

AI技术应用至CO_2、非二氧化碳减排具有共通性，但后者的排放更为分散且有间歇性特征，对AI的广域监测、异常识别、跨学科知识整合能力提出更高的要求。构建涵盖多气体的一体化大数据平台、云计算底座，融合可解释AI、复杂网络分析、元学习等技术，开展多气体协同分析与治理，为构建智能化、系统化的温室气体治理体系提供技术支撑。在知识生产、治理主体关系层面，AI技术解构传统的“中心–边缘”监管架构，催生分布式智能协同新范式，形成“多源数据交叉验证–智能合约自动执行–异常信号即时响应”的扁平化架构，重新界定管理部门、市场、社会的权责边界。

此外，随着技术应用的深入，审慎评估AI在温室气体治理中的应用边界（数据、算力、成本约束）和潜在风险。例如，对于AI赋能温室气体排放清单编制而言：① 在数据层面，卫星遥感反演受地面验证站点分布制约，中西部地区的观测网络稀疏易引发系统性偏差；② 在算法层面，排放数据的算法加工可能放大系统性偏见，深度学习模型的“黑箱”特性与MRV体系透明度要求存在冲突，需强化可解释性以支撑第三方核查；③ 在识别层面，若训练数据过度覆盖大型排放源，会导致小型分散源的识别盲区，CH_4等气体的“超级”排放源监测易受气象与地表条件干扰，需结合人工复核以平衡查全率与查准率；④ 在合规层面，高分辨率监测涉及企业敏感信息，应建立数据分级分类与脱敏管理规范。为此，在AI技术应用的过程中，需建立监管规则，防范控制伦理风险，构建人机协同的校验机制，筑牢数据质量保障体系。

五、相关建议

人为源非二氧化碳温室气体排放管控是环境、气候、可持续发展领域的新挑战和重要任务。科学推进全经济范围温室气体减排行动，将非二氧化碳温室气体排放管控系统性纳入国家气候治理框架，事关我国温室气体减排与气候治理进程、绿色科技竞争、新兴产业培育、全球气候治理话语权。实施这类排放管控，应立足长远、着眼国际国内两方面，以能源安全、粮食安全、产业链供应链安全、经济社会稳定为底线约束，筑牢科技支撑，通过技术、管理、制度创新协同，推动从控制排放转向系统减排、协同增效，构建适应国情的系统治理生态体系。

（一）加强顶层设计与制度建设

统筹温室气体减排与经济社会发展，加快将非二氧化碳温室气体控排全面纳入国家“双碳”战略整体框架，由相关管理部门协同谋划“十五五”以及更长时期的全经济范围温室气体减排顶层设计。研究和制定指导性文件，统筹全温室气体减排时序、重点区域和行业以及相应的路径，明确非二氧化碳温室气体排放治理目标、原则、阶段性重点任务、实施路线，形成“自上而下”、分级分类推进的治理框架与监督考核机制。结合行业当前实际与后续规划，制定行业性差异化管控行动方案，明确管理部门管控责任，实施重点行业、重点排放单位的管控工作。有序部署专项行动计划，协调跨区域、跨部门治理矛盾，消除各类气体减排政策碎片化与路径冲突，追求减污降碳协同增效，整体性推进管控工作。依据先易后难、统筹协调原则，将资源化利用规划置于优先位置，提供政策倾斜、引导资源配置，优先在技术成熟、经济性较好的行业实施有效减排。结合区域发展实际，分解目标任务、制定实施细则、推动区域协同，选取典型地区开展

试点示范。借鉴长三角地区、京津冀地区大气污染联防联控经验，建立跨省份的温室气体联合监测与执法响应机制。建立包括技术规范、产品标准、检测认证、安全管理在内的标准体系，分层次推进各类标准，为产业发展和市场监管提供支撑。

（二）强化科技创新与人才支撑

以“十五五”时期非二氧化碳温室气体减排重大工程项目布局为牵引，围绕排放机理、监测核算、协同减排、资源化利用等重点方向，加强基础研究、关键技术装备攻关与工程应用示范。科学布局面向非二氧化碳温室气体减排的重大科技任务、工程科技攻关重点项目、科技创新平台，完善管控理论、技术、方法、数据支撑。重点攻关低成本高效率减排技术、智能化监测仪器设备、资源化利用工艺，构建面向全球的“天空地海”一体化监测网络。推动AI赋能排放识别、动态监测、预测评估、政策模拟，深化机器学习、大数据分析、智能传感等技术在泄漏检测、排放预警、气体回收与资源化利用等场景中的应用。建设自主可控的数据基础设施与支撑体系、全国非二氧化碳温室气体排放数据库和工程技术发展动态监测系统，提高相关数据的规范化、透明化、共享化水平，为政策制定与评估提供可靠支撑。依托国家级科技创新平台，聚集高校、科研院所、企业的优势资源，形成“产学研用”协同创新机制，推动关键技术工程转化与规模化应用。加强非二氧化碳温室气体减排相关的专业性人才培养，推进减排技术创新联盟等学术共同体建设。

（三）激发市场活力与产业创新

健全市场化机制和经济金融工具，探索将非二氧化碳温室气体全面纳入碳市场或与碳市场衔接的激励机制，提高行业企业参与减排的积极性。优化基于GWP的当量折算机制，使减排CH_4、N_2O、含氟气体的行为能够获得更加突出的碳信用收益。健全强制性温室气体信息披露制度，将非二氧化碳温室气体排放信息纳入上市企业环境、社会和公司治理报告体系，统一核算方法和认证机制，减少企业合规成本并激励绿色技术创新。推动全面温室气体减排理念融入重点产业规划、项目审批、企业运营的全过程。强化绿色金融支持和商业模式创新，引导金融资源向减排与资源化利用领域集聚，有效降低项目融资成本。实施科学普及宣传，推动协同减排理念向产业链和消费端延伸，形成低碳产品需求的牵引效应。发挥相关行业协会的“桥梁”作用，组织龙头企业率先实施非二氧化碳温室气体减排，开展供应链全温室气体排放管理试点。建立排放管控的综合效益评估体系，开发效益评估工具和新方法，以权威数据库和信息平台的方式，为利益相关方提供及时准确的决策信息支撑，引导企业因地制宜开展减排。

（四）布局全球议程与国际合作

统筹国内非二氧化碳温室气体排放管控与全球气候治理进程，积极参与全球气候治理中的非二氧化碳温室气体减排议程，提升我国在相关国际规则和标准制定中的参与度。提高在IPCC、国际标准化组织中的方法学贡献度，推动我国经验和核算体系的国际转化。倡导建立全球气候科技合作机制、全球性非二氧化碳温室气体减排合作组织，推动减排技术标准互认、研发成果共享、人才交流培养等务实合作，形成优势互补的国际创新网络。参照全球碳项目运行模式，建立非二氧化碳温室气体的开放性国际科学数据库、全球范围清单数据库平台、统一的数据标准和共享机制，为各国政策制定、技术选择、效果评估提供科学依据。深化与主要排放国、技术先进国家在监测、核算、减排技术方面的双边和多边合作，构建开放务实的国际协作网络。依托“一带一路”“南南合作”平台，向发展中国家提供适用的技术和治理经验，支持提升减排能力。推动将非二氧化碳温室气体减排纳入更多的国际合作机制，增强我国在非二氧化碳温室气体治理中的全球影响力。

致谢

感谢自然资源保护协会（NRDC）对本研究的协助。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 25, 2026; **Revised date:** March 15, 2026

Corresponding author: Gao Junlian is an associate professor from the School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing. Her major research field is resource and environment policy. E-mail: junliangao@cumtb.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Path of Methane Control Engineering Science and Technology under the ‘Dual Carbon’ Goals” (2025-XZ-53); The National Natural Science Foundation of China Projects (72374175, 72404270)

参考文献

[1] Montzka S A, Dlugokencky E J, Butler J H. Non-CO_2 greenhouse gases and climate change [J]. Nature, 2011, 476(7358): 43–50.

[2] Jones M W, Peters G P, Gasser T, et al. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850 [J]. Scientific Data, 2023, 10: 155.

[3] Ou Y, Roney C, Alsalam J, et al. Deep mitigation of CO_2 and non-CO_2 greenhouse gases toward 1.5 ℃ and 2 ℃ futures [J]. Nature Communications, 2021, 12: 6245.

[4] Lin J, Khanna N, Liu X, et al. China’s non-CO_2 greenhouse gas emissions: Future trajectories and mitigation options and potential [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 16095.

[5] Shindell D, Borgford-Parnell N, Brauer M, et al. A climate policy pathway for near- and long-term benefits [J]. Science, 2017, 356(6337): 493–494.

[6] West J J, Fiore A M, Horowitz L W, et al. Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(11): 3988–3993.

[7] 张博, 郭金玲, 高俊莲, 等. 我国甲烷排放控制的中长期挑战与应对 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 185–197.
Zhang B, Guo J L, Gao J L, et al. Medium-and long-term challenges and countermeasures for China’s CH_4 emission control [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 185–197.

[8] Xu G Y, Huang Z L, Jiang M Q, et al. “Gray” prediction of carbon neutral pathways in the G7 economies by 2050 [J]. Applied Energy, 2024, 373: 123924.

[9] Sarpong K A, Xu W Z, Gyamfi B A, et al. A step towards carbon neutrality in E7: The role of environmental taxes, structural change, and green energy [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 337: 117556.

[10] Shirizadeh B, Villavicencio M, Douguet S, et al. The impact of methane leakage on the role of natural gas in the European energy transition [J]. Nature Communications, 2023, 14: 5756.

[11] 王佳雨. 欧美能源行业甲烷减排立法: 规则对比、趋势展望与中国因应 [J]. 国际石油经济, 2025, 33(4): 40–50.
Wang J Y. Methane emission reduction legislation in the European and American energy sector: Rule comparison, trend outlook, and China’s response [J]. International Petroleum Economics, 2025, 33(4): 40–50.

[12] Velders G J M, Daniel J S, Montzka S A, et al. Projections of hydrofluorocarbon (HFC) emissions and the resulting global warming based on recent trends in observed abundances and current policies [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(9): 6087–6101.

[13] Zhao Y H, Su Z P, Chen Y F, et al. Rising importance of agricultural nitrogen oxide emissions in China’s future $PM_{2.5}$ pollution mitigation [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2025, 8: 93.

[14] Xu P, Houlton B Z, Zheng Y, et al. Policy-enabled stabilization of nitrous oxide emissions from livestock production in China over 1978—2017 [J]. Nature Food, 2022, 3(5): 356–366.

[15] Pan D, Tao L, Sun K, et al. Methane emissions from natural gas vehicles in China [J]. Nature Communications, 2020, 11: 4588.

[16] Gao Y Y, Li Z M, Hong S B, et al. Recent stabilization of agricultural non-CO_2 greenhouse gas emissions in China [J]. National Science Review, 2025, 12(4): nwaf040.

[17] Lu X, Ye X P, Zhou M, et al. The underappreciated role of agricultural soil nitrogen oxide emissions in ozone pollution regulation in North China [J]. Nature Communications, 2021, 12: 5021.

[18] Ma N, Liu X J, Wang L, et al. A meta-analysis on the mitigation measures of methane emissions in Chinese rice paddy [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 202: 107379.

[19] Jiang J J, Yin D Y, Sun Z L, et al. Global trend of methane abatement inventions and widening mismatch with methane emissions [J]. Nature Climate Change, 2024, 14(4): 393–401.

[20] 张博, 王建良, 庄明浩. 迈向全面减排: 非二氧化碳温室气体排放管控的关键挑战与应对策略 [J]. 能源与气候变化, 2025 (4): 457–458.
Zhang B, Wang J L, Zhuang M H. Towards comprehensive emission reduction: Key challenges and strategies for non-carbon dioxide greenhouse gases emissions reduction [J]. Journal of Energy and Climate Change, 2025 (4): 457–458.

[21] 刘长松. 非二氧化碳温室气体减排的中国行动、国际经验与政策启示 [J]. 阅江学刊, 2024, 16(3): 57–71.
Liu C S. International practices and policy implications for non-CO_2 greenhouse gas mitigation in China [J]. Yuejiang Academic Journal, 2024, 16(3): 57–71.

[22] 胡永浩, 张昆扬, 胡南燕, 等. 中国农业碳排放测算研究综述 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 163–176.
Hu Y H, Zhang K Y, Hu N Y, et al. Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 163–176.

[23] Lee D, Sparrow S N, Willeit M, et al. Quantifying CO_2 and non-CO_2 contributions to climate change under 1.5 ℃ and 2 ℃ adaptive emission scenarios [J]. Earth’s Future, 2025, 13(3): e2024EF005580.

[24] Chen M P, Cui Y R, Jiang S, et al. Toward carbon neutrality before 2060: Trajectory and technical mitigation potential of non-CO_2 greenhouse gas emissions from Chinese agriculture [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 368: 133186.

[25] 戴刘新, 梁明珺, 张莹, 等. 非二氧化碳温室气体氧化亚氮的卫星遥感研究综述 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2081–2094.
Dai L X, Liang M J, Zhang Y, et al. Review of the satellite remote sensing researches on the non-CO_2 greenhouse gas N_2O [J]. China Environmental Science, 2023, 43(5): 2081–2094.

[26] 刘和平, 马寅, 段华波, 等. 我国氟碳化学品类非二氧化碳温室气体的深度脱碳潜力研究 [J]. 环境科学学报, 2024, 44(8): 98–109.
Liu H P, Ma Y, Duan H B, et al. Exploring the potential for deep decarbonization of non-CO_2 greenhouse gases in China: In-depth study on fluorocarbons [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(8): 98–109.

[27] 王志豪, 韩颖慧, 姜泓宇, 等. 多源卫星遥感支持下的全球–国

家–省域氧化亚氮排放高精度反演与源贡献解析 [J]. 能源与气候变化, 2025 (4): 491–500.
Wang Z H, Han Y H, Jiang H Y, et al. High-precision inversion and source contribution analysis of global–national–provincial nitrous oxide emission via multi-source satellite remote sensing [J]. Journal of Energy and Climate Change, 2025 (4): 491–500.

[28] Ou Y, Iyer G, Fawcett A, et al. Role of non-CO_2 greenhouse gas emissions in limiting global warming [J]. One Earth, 2022, 5(12): 1312–1315.

[29] Yan H B, Liu L C, Kang J N, et al. Non-carbon dioxide emissions modeling in integrated assessment models: A review [J]. Energy Strategy Reviews, 2024, 52: 101358.

[30] Yuan W P, Liang M Q, Gao Y Y, et al. China's greenhouse gas budget during 2000—2023 [J]. National Science Review, 2025, 12(4): nwaf069.

[31] Liu Q, Teng F, Nielsen C P, et al. Large methane mitigation potential through prioritized closure of gas-rich coal mines [J]. Nature Climate Change, 2024, 14(6): 652–658.

[32] Luo J J, Wang H L, Li H, et al. Structural shifts in China's oil and gas CH_4 emissions with implications for mitigation efforts [J]. Nature Communications, 2025, 16: 2926.

[33] Liang M Q, Zhou Z Y, Ren P Y, et al. Four decades of full-scale nitrous oxide emission inventory in China [J]. National Science Review, 2023, 11(3): nwad285.

[34] Gao J L, Guan C H, Zhang B, et al. Decreasing methane emissions from China's coal mining with rebounded coal production [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(12): 124037.

[35] Zhuang M H, Lu X, Caro D, et al. Emissions of non-CO_2 greenhouse gases from livestock in China during 2000—2015: Magnitude, trends and spatiotemporal patterns [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 242: 40–45.

[36] 赵旭, 杨慧文, 朱玥, 等. 我国污水处理行业非二氧化碳温室气体排放核算的现状、挑战与减排策略综述 [J]. 能源与气候变化, 2025 (4): 459–475.
Zhao X, Yang H W, Zhu Y, et al. A review of the current situation, challenges and emission reduction strategies of non-carbon dioxide greenhouse gas emissions accounting in China's wastewater treatment industry [J]. Journal of Energy and Climate Change, 2025 (4): 459–475.

[37] 李志慧, 王艺霏, 邓祥征. 东北黑土地区稻田甲烷排放时空演变及排放潜力分析 [J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3814–3829.
Li Z H, Wang Y F, Deng X Z. Spatiotemporal evolution and potential prediction of methane emission from paddy fields in the black soil region of Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3814–3829.

[38] Teng F, Su X, Wang X. Can China peak its non-CO_2 GHG emissions before 2030 by implementing its nationally determined contribution? [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(21): 12168–12176.

[39] Harmsen M, Tabak C, Höglund-Isaksson L, et al. Uncertainty in non-CO_2 greenhouse gas mitigation contributes to ambiguity in global climate policy feasibility [J]. Nature Communications, 2023, 14: 2949.

[40] 张博, 熊欣仪, 刘合. 企业非二氧化碳温室气体信息披露进展及展望 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(5): 130–142.
Zhang B, Xiong X Y, Liu H. Information disclosure of corporate non-CO_2 greenhouse gases: Progress and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(5): 130–142.

[41] Wu Z Q, Su X, Zhu W N, et al. Climate benefits from China's adherence to the Kigali amendment [J]. Cell Reports Sustainability, 2025, 2(8): 100431.

[42] 刘润, 邵敏, 陆克定, 等. 我国大气环境问题系统治理的构思 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(3): 164–174.
Liu R, Shao M, Lu K D, et al. Systematic governance of atmospheric environmental issues in China [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(3): 164–174.

[43] Saunois M, Martinez A, Poulter B, et al. Global methane budget 2000—2020 [J]. Earth System Science Data, 2025, 17(5): 1873–1958.

[44] Han B B, Yao Y Z, Liu B, et al. Relative importance between nitrification and denitrification to N_2O from a global perspective [J]. Global Change Biology, 2024, 30(1): e17082.

[45] Tian H, Pan N, Thompson R L, et al. Global nitrous oxide budget (1980—2020) [J]. Earth System Science Data, 2024, 16(6): 2543–2604.

[46] Jacob D J, Varon D J, Cusworth D H, et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(14): 9617–9646.

[47] Sun Y W, Yin H, Wang W, et al. Monitoring greenhouse gases (GHGs) in China: Status and perspective [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022, 15(16): 4819–4834.

[48] Zhang X R, Zhou C H, Zhang Y Z, et al. Where to place methane monitoring sites in China to better assist carbon management [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2023, 6: 32.

[49] Jiang Y H, Zhang L, Zhang X Y, et al. Methane retrieval algorithms based on satellite: A review [J]. Atmosphere, 2024, 15(4): 449.

[50] Wang D, Wang K, Zheng X H, et al. Applicability of a gas analyzer with dual quantum cascade lasers for simultaneous measurements of N_2O, CH_4 and CO_2 fluxes from cropland using the eddy covariance technique [J]. Science of the Total Environment, 2020, 729: 138784.

[51] Khanna N, Lin J, Liu X, et al. An assessment of China's methane mitigation potential and costs and uncertainties through 2060 [J]. Nature Communications, 2024, 15: 9694.

[52] 王丽, 王小青, 王玉高, 等. 非二氧化碳温室气体的来源、捕集及利用技术研究进展 [J]. 中国科学: 化学, 2025, 55(9): 2705–2720.
Wang L, Wang X Q, Wang Y G, et al. Research progress on sources, capture, and utilization of non-CO_2 greenhouse gases [J]. Scientia Sinica Chimica, 2025, 55(9): 2705–2720.

[53] Bai F L, An M D, Wu J, et al. Pathway and cost-benefit analysis to achieve China's zero hydrofluorocarbon emissions [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(16): 6474–6484.

[54] 严圣吉, 尚子吟, 邓艾兴, 等. 我国农田氧化亚氮排放的时空特征及减排途径 [J]. 作物杂志, 2022 (3): 1–8.
Yan S J, Shang Z Y, Deng A X, et al. Spatiotemporal characteristics and reduction approaches of farmland N_2O emission in China [J].

Crops, 2022 (3): 1–8.

[55] Rosa L, Gabrielli P. Achieving net-zero emissions in agriculture: A review [J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(6): 063002.

[56] 何美霞, 段鹏鹏, 李德军. 土壤氧化亚氮产生路径及其研究方法进展 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1497–1508.
He M X, Duan P P, Li D J. Review on the pathways of soil nitrous oxide production and its research methods [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(6): 1497–1508.

[57] Pennacchio L, Mikkelsen M K, Krogsbøll M, et al. Physical and practical constraints on atmospheric methane removal technologies [J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(10): 104058.

[58] Milne A E, Glendining M J, Bellamy P, et al. Analysis of uncertainties in the estimates of nitrous oxide and methane emissions in the UK's greenhouse gas inventory for agriculture [J]. Atmospheric Environment, 2014, 82: 94–105.

[59] Guan K Y, Jin Z N, Peng B, et al. A scalable framework for quantifying field-level agricultural carbon outcomes [J]. Earth-Science Reviews, 2023, 243: 104462.

[60] 张博, 郭金玲, 仲冰, 等. 全球甲烷控排行动逻辑、议题博弈与中国对策 [J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(12): 2037–2047.
Zhang B, Guo J L, Zhong B, et al. Action logic and agenda game of global methane emission control and China's countermeasures [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(12): 2037–2047.

[61] Erland B M, Thorpe A K, Gamon J A. Recent advances toward transparent methane emissions monitoring: A review [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(23): 16567–16581.

[62] Li P J, Zhu R Q, McJeon H, et al. Using deep learning to generate key variables in global mitigation scenarios [J]. Nature Climate Change, 2025, 15(7): 760–768.

[63] Wu L B, Huang Z H, Zhang X, et al. Harmonizing existing climate change mitigation policy datasets with a hybrid machine learning approach [J]. Scientific Data, 2024, 11: 580.