DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.07.007

我国甲烷排放控制的中长期挑战与应对

张博[1]，郭金玲[2]，高俊莲[2]，张国生[3]，刘合[4*]

（1. 厦门大学管理学院，福建厦门 361005；2. 中国矿业大学（北京）管理学院，北京 100083；3. 中国石油勘探开发研究院，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：甲烷（CH_4）是全球第二大温室气体，控制CH_4排放兼具气候、环境、安全与经济效益；我国的CH_4排放量较大，开展中长期CH_4控排战略研究是强化我国温室气体减排能力体系建设的重要环节。本文从CH_4排放控制的科学基础出发，辨识了我国CH_4排放特征并剖析了CH_4排放控制面临的中长期挑战；从总体管控思路、各领域CH_4排放控制行动方向、减排技术与措施体系架构等方面阐明了我国中长期CH_4排放控制的行动逻辑，进而提出了我国中长期CH_4排放管控对策。研究认为，我国中长期CH_4控排行动将面临排放总量大且部门及区域间迥异、排放演变趋势及具体路径不确定、技术减排与措施减排的潜力不明晰、减排风险量化及目标设定能力不足等问题。建议着眼长远，从设定全口径目标、责任分配与落实、筑牢减排能力、增强管控合力出发，战略谋划CH_4排放控制工作，协同推进制度创新、科技创新、模式创新，加速实现我国从控制CH_4排放向减少CH_4排放的进程转变。

关键词：CH_4排放控制；减排技术；减排措施；管控对策；温室气体减排

中图分类号：F407.2；F416.2　　**文献标识码：**A

Medium- and Long-Term Challenges and Countermeasures for China's CH_4 Emission Control

Zhang Bo[1], Guo Jinling[2], Gao Junlian[2], Zhang Guosheng[3], Liu He[4*]

(1. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 2. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083; 4. National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, Daqing 163712, Heilongjiang, China)

Abstract: Methane (CH_4) is the second largest greenhouse gas in the world, and controlling CH_4 emissions has climate, environment, safety, and economic benefits. China's CH_4 emissions are relatively large, and conducting medium- and long-term research on CH_4 emission control strategies is crucial for the construction of a greenhouse gas emission reduction capacity system in China. Considering the scientific basis of CH_4 emission control, this study analyzes the characteristics of CH_4 emissions in China and explores the challenges faced by CH_4 emission control. The logic of medium- and long-term CH_4 emission control is clarified from three aspects: overall management and control idea, action directions of CH_4 emission control in various fields, and system architecture of technologies and measures to reduce emissions. Corresponding countermeasures are then provided. The study concludes

收稿日期：2024-01-29；**修回日期：**2024-03-02

通讯作者：[*]刘合，多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室教授级高级工程师，中国工程院院士，研究方向为采油工程技术及装备研发、工程管理创新与实践等；E-mail：liuhe@petrochina.com.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“中国中长期甲烷控排战略研究”(2023-XZ-44)，“面向2040的我国能源系统转型重大风险防控战略研究”(2023-ZCQ-11)，国家自然科学基金项目(72088101, 72374175)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

that China's medium- and long-term actions regarding CH_4 emission control will be constrained by the following problems: (1) large amount of CH_4 emissions and differences among sectors and regions, (2) uncertain trends in emissions and specific paths, (3) unclear potentials of technologies and measures for emission reduction, and (4) insufficient capabilities to quantify risks and set targets for emission reduction. The CH_4 emission control work of China should be strategically planned based on a long-term perspective, starting from setting overall emission control targets, assigning and implementing responsibilities, consolidating emission reduction capabilities, and enhancing the joint force of management and control. Additionally, institutional, technological, and model innovation should be promoted in a coordinated manner to accelerate the reduction in CH_4 emissions.

Keywords: CH_4 emission control; emission reduction technologies; emission reduction measures; management and control countermeasures; greenhouse gas emission reduction

一、前言

甲烷（CH_4）是全球排放量第二大的温室气体类型，在全球范围内控制CH_4排放已成为高度共识并正在转化为实际行动。自《联合国气候变化框架公约》第26次缔约方大会（2021年）以来，CH_4减排议题受到全球性关注，标志性事件是“全球甲烷承诺”，即倡议2030年前将全球CH_4排放量在2020年的排放水平上至少减少30%。在《联合国气候变化框架公约》第28次缔约方大会（2023年）上，控制CH_4排放依然是焦点议题。欧盟、美国、加拿大等国家和地区提出了包括政策法规、国家承诺在内的CH_4减排新措施。减少化石燃料开采产生的CH_4排放最受政策关注，成为CH_4减排的首要目标领域。《全球甲烷承诺能源路径》（2022年）提出了强化油气行业CH_4管控的具体举措，约50家石油公司（合计占全球石油产量的40%以上）签署了《石油和天然气脱碳宪章》，承诺在2030年前实现CH_4零排放并取消常规火炬[1]。

目前，我国是全球CH_4排放量较大的国家，关于我国CH_4排放问题的研究逐渐成为热点，又以CH_4排放清单最受学者关注。在煤炭开采、油气系统、畜牧业、水稻种植、垃圾填埋、废水处理等排放源的清单编制及其多尺度应用方面，研究与应用也在取得进展[2~6]。应用“空天地”一体化的CH_4排放测量体系，尤其是高精度、高分辨率的CH_4监测卫星，能够准确评估设施级CH_4排放规模[7]。自下而上、自上而下相结合的清单编制方法进行相互校验，可改善CH_4排放清单的数据质量并降低其不确定性[8]。整体上，学术界的研究重点开始从CH_4排放基础数据分析逐步转向排放趋势预测、减排技术、管控政策与模式等，研究水平稳步提升。

针对CH_4排放开展控制行动，在我国已有广泛的实践和政策基础。在“双碳”目标提出后，为应对气候变化，我国在政策层面提高了对CH_4排放控制问题的重视程度。作为负责任的大国，我国积极开展CH_4排放控制行动与政策设计。一方面是应对国际气候谈判的需要。在国际气候谈判中，CH_4减排责任分配涉及各国的排放空间，发达国家提出的减排政策目标及行动措施会对其他国家产生挤压效应；事关发展空间的争夺，需要积极谋划和主动应对。另一方面是正确处理好发展、安全与CH_4排放控制之间关系的需要。“十四五”规划纲要中首次提出控制CH_4排放。《中国甲烷排放控制方案》（2023年）的发布标志着我国正式将CH_4排放控制工作落实到应对气候变化和生态环境保护领域，是对2030年前开展CH_4排放控制的顶层设计。也要注意到，对于今后更长时期内如何有效开展CH_4排放控制行动，仍缺乏深刻的宏观研究准备；阶段性任务与实施路径尚不够清晰，亟需积极谋划中长期CH_4控排战略。

本文立足我国人为源CH_4排放的现状及趋势，梳理国内外相关形势动态，剖析我国CH_4排放特征以及CH_4排放控制行动面临的中长期挑战；综合考虑CH_4减排的技术与措施需求，辨明CH_4管控逻辑，统筹提出能源、农业、废弃物处理等领域中CH_4减排潜力与技术体系架构，进而形成中长期CH_4排放控制的应对策略建议。

二、甲烷排放控制的科学基础

（一）甲烷的基本性质与排放来源

常规天然气，煤层气（瓦斯）、页岩气、天然气水合物等非常规天然气，沼气，垃圾填埋气等的主要成分都是CH_4。CH_4是一种优质气体燃料，排放到大气中的CH_4则成为一种温室气体。目前，全球大气中的CH_4浓度已是工业化前的2.6倍，由此带来的气候变化具有强烈的辐射强迫影响，CH_4的全球增温潜势（GWP）远高于CO_2是重要原因。联

合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）历次评估报告中CH_4的GWP及寿命值如表1所示。IPCC第6次评估报告指出，2010—2019年的全球平均气温相对于1850—1900年水平上升1.1 ℃，其中约有0.5 ℃与CH_4排放相关[9]。排放的CH_4在大气中存在时间较短（平均寿命约为12 a），是一种典型的短寿命气体；采取减缓CH_4排放行动，可对大气中CH_4浓度产生直接的降低效果。

CH_4排放的主要来源有能源活动、农业活动、废弃物处理，其中人为源约贡献全球CH_4排放总量的60%[10]。① 能源活动进一步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CH_4逃逸排放以及矿后活动。废弃煤矿的CH_4排放也是近年来受到关注的重要排放源类型。油气系统的CH_4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CH_4排放。燃料燃烧可分为化石燃料燃烧、生物质燃料燃烧2种。② 与农业活动相关的CH_4排放主要源于动物肠道发酵（如牛、羊等牲畜的消化系统消化饲料），水稻种植（如植株–土壤–微生物相互作用、厌氧环境下产生CH_4），动物粪便管理（如牲畜粪便储存和管理过程中的厌氧发酵），秸秆等农业废弃物田间焚烧。③ 废弃物处理过程涉及的CH_4排放主要源自固体废弃物处置（常见于垃圾填埋过程），废水处理（包括生活废水和工业废水厌氧处理、污泥产生的CH_4排放）。一些工业生产过程也会产生少量的CH_4排放。

（二）甲烷减排的重要性与特殊性

减少CH_4排放是中短期内减缓全球变暖速度及气候变化影响的有效方式，也是将全球升温控制在1.5~2 ℃以下的关键举措[11]。如果人为源的CH_4排放量在2030年前减少45%，到2045年将避免近0.3 ℃的全球变暖[12]。如将升温限制在1.5 ℃左右，需要全球温室气体排放最迟在2025年前达到峰值、在2030年前减少43%，也需要减少约1/3的CH_4排放[11]。

控制农业活动、能源活动、废弃物处置排放的CH_4，兼具气候效益、环境效益、安全效益、经济效益[13]。CH_4排放到大气中，与气候–化学过程关联，影响地表臭氧浓度，造成空气污染[14]。控制CH_4排放有助于避免因气候变化导致的粮食减产，改善空气质量并改善人类健康问题。如果在2030年前实现45%的CH_4减排，则每年可防止26万人过早死亡、避免77.5万人因哮喘住院、减少2.5×10^7 t的作物损失[12]。CH_4减排的独特性还体现在，经回收、提纯、处理后的CH_4可作为替代燃料和工业原料，产生显著的经济效益。例如，2021年全球能源部门泄漏的CH_4排放量约为1.35×10^8 t，如果大部分能够得到利用，则基本满足欧洲电力行业的天然气需求，能源企业也能从中获利[15,16]。

CH_4与其他温室气体、多种污染物具有一定的同源性，CH_4减排在不同程度上可以协同减污降碳。在农业部门，减排农业活动相关的CH_4、N_2O、CO_2排放具有协同性，如粪便管理过程中排放的CH_4通常与N_2O排放同源。在能源行业，除了考虑能源相关的CO_2排放，还需考虑能源生产过程中的CH_4逃逸排放以及燃料燃烧排放的CH_4，因而核算能源开发利用全过程 / 全生命周期内的温室气体排放或者碳足迹均需纳入CH_4。油气系统泄漏过程中的挥发性有机物也与CH_4排放同源。对于工业废水和生活污水处理，CH_4、N_2O的排放同样具有高度的同源性。此外，减缓CH_4排放与联合国2030年可持续发

表1　IPCC历次评估报告中CH_4的GWP及在大气中的寿命值

IPCC评估报告	温室气体	GWP			平均寿命/a
		20	100	500	
AR1	CH_4	63	21	9	10
AR2	CH_4	56	21	6.5	12.2
AR3	CH_4	62	23	7	12
AR4	CH_4	72	25	7.6	12
AR5	CH_4	84	28	—	12.4
AR6	CH_4（化石来源）	82.5	29.8	10	11.8
	CH_4（非化石来源）	79.7	27	7.2	11.8

展议程中的多项可持续发展目标直接关联，有助于各国实现可持续发展目标。

三、我国甲烷排放特征与开展甲烷排放控制面临的挑战

（一）我国甲烷排放总体规模及特征

我国是《联合国气候变化框架公约》非附件I缔约方，已公布了1994年、2005年、2012年、2010年、2014年、2017年、2018年的官方国家温室气体排放清单[17~21]。我国含土地利用、土地利用变化和林业（LULUCF）的CH_4排放总量如表2所示。按照CH_4在100 a尺度的GWP值（28）计算，2018年我国CH_4排放总量相当于1.8×10^9 t CO_2，与澳大利亚、加拿大、英国的温室气体排放总和相当。因此，在全球温室气体排放格局中，我国的CH_4排放相对突出。

2018年，我国除LULUCF以外的CH_4排放总量为6.013×10^7 t。其中，能源活动是最大的排放源，相应排放量为2.866×10^7 t，占比为47.7%；农业活动产生的CH_4排放量为2.385×10^7 t，占比为39.6%；废弃物处理相关CH_4排放量为7.622×10^6 t，占比为12.7%。从重点排放源、行业部门来看，2018年的逃逸CH_4排放量比2014年增加4.859×10^6 t，固体燃料（主要指煤炭开采）是最大的单一排放源，油气系统的CH_4逃逸排放占比很低，但两者均有增长；动物肠道发酵、水稻种植、动物粪便管理相关CH_4排放在农业源CH_4中占据主导地位，合计从2014年的2.192×10^7 t增长到2018年的2.363×10^7 t。近年来，废弃物处理相关CH_4排放持续增长，2018年比2010年增加3.221×10^6 t，其中固体废弃物处理贡献了2.507×10^6 t的增量，废水处理贡献了7.14×10^5 t的增量。

（二）我国甲烷排放控制的难点与中长期挑战

1. 排放总量大且部门及区域结构迥异

我国CH_4排放总量较大且结构复杂，影响因素多元，行业之间排放成因差异明显，减缓CH_4排放

表2　2010年以来我国公布的CH_4排放清单情况

（单位：$\times10^4$ t）

甲烷排放源类别	时间/年				
	2010	2012	2014	2017	2018
总量（包括LULUCF）	5539.4	5591.5	5529.2	6473.6	6411.3
总量（不包括LULUCF）	5365.4	5590.1	5357.2	6075.1	6013.2
1. 能源活动	2683.4	2758.6	2475.7	2867.7	2865.8
1.1 燃料燃烧	300.0	262.0	261.4	177.7	165.8
1.2 逃逸排放	2383.4	2496.6	2214.2	2690.0	2700.1
1.2.1 固体燃料	2287.0	2384.7	2101.5	2518.7	2512.2
1.2.2 油气系统	96.4	111.9	112.7	171.4	187.9
2. 工业生产过程	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5
2.1 金属制品生产	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5
3. 农业活动	2241.4	2288.6	2224.5	2470.8	2384.6
3.1 动物肠道发酵	1032.9	1074.3	985.6	1112.3	1084.1
3.2 动物粪便管理	304.8	333.1	315.5	354.8	346.1
3.3 水稻种植	872.9	845.8	891.1	962.8	932.9
3.4 农业废弃物田间焚烧	30.7	35.4	32.3	41.0	21.6
4. 土地利用、土地利用变化和林业	174.0	1.4	172.0	398.5	398.1
4.1 湿地	174.0	—	172.0	398.3	398.0
5. 废弃物处理	440.1	542.3	656.4	736.1	762.2
5.1 固体废弃物处理	220.7	253.1	384.2	445.5	471.4
5.2 废水处理	219.4	289.2	272.1	290.6	290.8

注：根据各年度的官方国家温室气体排放清单整理。

首先面临规模性与结构性挑战。从主要排放源来看，我国能源活动产生的CH_4排放主要源自煤炭开采，相应排放量的大小主要取决于煤矿生产活动水平、CH_4逃逸排放因子、瓦斯回收利用率[22]。农业排放源种类多、排放分散、机制复杂。牛、羊等反刍动物肠道发酵过程中产生的排放与存栏量、动物品种、饲养方式以及动物不同生长阶段的瘤胃发育程度有关[23]。我国水稻种植的CH_4排放总量大，排放水平取决于水稻品种、土壤特性、气候条件、农艺措施等因素的影响[24]。废弃物处理领域的CH_4排放与城市化进程、废弃物处理规模及能力水平等因素密切相关[25,26]。

我国CH_4排放的地理分布极不平衡，各地区的排放构成呈现显著的差异性。随着高瓦斯煤矿的持续关闭，煤炭生产向低瓦斯排放煤炭产区转移，煤矿CH_4排放逐步集中于“晋陕蒙新”“云贵”等区域[2,27]。动物肠道发酵的CH_4排放集中在畜牧业发达的华北平原等地。受水稻播种面积与气候条件的影响，水稻CH_4排放呈东南高、西北低的空间分布特征，主要分布于长江中下游平原、珠江流域河谷平原和三角洲地带的水稻主产区[28]。东部发达地区废弃物处理的CH_4排放量和排放强度都较大[5]。各类型CH_4排放的空间分布差异性以及地区的不平衡性，使整体性和行业性减排进程极具复杂性。

2. 排放演变趋势及具体路径不确定

我国重点领域CH_4排放的演变趋势尚有较大的不确定性，总体及主要排放源的达峰情况也不明晰，给研判中长期排放控制形势造成困难。官方国家温室气体排放清单显示[17~21]，2018年固体燃料的逃逸排放比2010年增长了2.252×10^6 t，说明我国煤矿CH_4排放并未进入稳定期。自2021年来，我国煤炭产量屡创新高，煤炭产量变化成为未来影响CH_4排放波动的主要因素。长期以来，我国油气需求旺盛且尚未达到峰值[29]，油气系统CH_4排放呈明显上升趋势。2018年的油气系统逃逸的CH_4量相比2014年上升66.7%[19,21]。研究预测[30]，我国石油需求将于2030年左右达峰，天然气需求将于2040年左右达峰；2018—2060年，我国油气CH_4排放将呈现先上升、后下降的趋势[31]。我国水稻种植和畜牧业CH_4排放整体处于平台期，变化幅度较为稳定，但也表现出重点排放源的小幅增长；农业源CH_4分散、波动频繁且缺乏集成化减排实践验证，短期内针对水稻种植、动物反刍等排放源实现规模化的CH_4减排并不可行。我国废弃物处理领域的CH_4排放持续呈增长趋势，尚未实现达峰，加之中西部地区伴随着工业化和城市化进程，在废弃物产生量、处理量以及相应的CH_4排放量上均有较大增长空间。

受预测模型方法与数据资源的限制，开展我国中长期CH_4排放的科学预测还存在诸多的现实困难。一方面，CH_4监测基础薄弱，数据统计与管理体系不健全，CH_4排放监测、报告及核查体系尚未完全建立，导致相关基础数据的不确定性依然较大。我国现有不同尺度的CH_4排放清单在完整性、准确性、连续性、一致性、透明度等方面都存在一定的不足。清单编制所需统计资料、基础数据的可获得性及透明度有待提升，适合国情的CH_4排放清单编制方法学还需持续完善，本土化排放因子的不确定性较大，CH_4排放核算范围与边界的扩大都会直接影响排放评估与未来预测。另一方面，开展中长期不同尺度的CH_4排放预测，需要综合宏观社会经济模型并与其他大模型相嵌套，才能实现科学预测，而目前的基础数据、算法以及相应的模型能力并不齐备。

3. 技术减排与措施减排的潜力不明晰

人为源CH_4排放在不同行业的产生机理具有较大差异，实现系统性减排需协同应用技术减排与措施减排。然而，我国CH_4减排技术短板突出，CH_4排放的监测检测、控制、回收利用等技术不够成熟[32]，相关研究与科技支撑力量薄弱。以往受制于技术与资金投入的不足，CH_4减排的措施主要以环境保护、生产安全、资源再利用等为出发点；而着眼未来CH_4减排行动的需要，规模化的示范应用与工程实践缺乏，遑论减排潜力的精准评价。

在我国CH_4排放的各来源领域中，不同领域的减排潜力因其减排成本、时间周期的不同而各异。从单位减排成本角度看，天然气行业因回收的CH_4作为产品出售而可以实现负成本减排[33,34]，煤炭开采、固废处置领域通常因为有条件部分回收CH_4而使单位减排成本较低。因此，能源和废弃物管理部门在技术经济条件适宜的情况下，可望以相对低的单位减排投入实现较大的减排量[35]。然而，若继续提高单位减排投入的承受上限，带来的减排量通常较低，即边际减排成本增长。长期来看，在一定单位成本内减排潜力最大的排放源是富含中高浓度瓦

斯的煤矿开采、天然气系统泄漏；减排潜力较大的还有实施水肥耦合管理、水稻旱作等措施的水稻种植[36]，有机废水和固废处置；减排潜力次之的有低浓度瓦斯煤矿治理[37]、选育高产 / 低排放畜禽品种的动物肠道发酵、实施水分管理等措施的水稻种植等排放源。因此，在总体资金投入有限的条件下，亟需加强技术减排与措施减排潜力评估，根据减排效果差异化的影响因素，优化配置资金，统筹各领域CH_4排放行动进程与减排路径。

4. 减排风险量化及目标设定能力不足

由于系统性量化研究缺乏，对实施CH_4排放控制行动可能引发的短期和长期风险认知不完整，因而有效的控排行动需要统筹重大风险的防范化解。我国CH_4排放源与发达国家存在显著差异，故在风险防控策略上的侧重点也有明显不同。例如，强制性的CH_4排放控制会对初级产品的供给保障产生直接或间接的影响，我国煤炭和油气行业的生产将首当其冲，需要针对CH_4排放强约束对化石能源供应成本与安全保供的影响开展综合分析；农业温室气体排放管控会干扰稻米、畜牧等产品的生产供应及成本，也需研判对粮食安全及农产品竞争力的影响。

受限于排放现状不明、演变趋势不清、减排潜力难估、控排风险难测等因素的制约以及能力支撑的不足，《中国甲烷排放控制行动方案》（2023 年）提出的“十四五”“十五五”期间主要目标集中于行业层面，也以定性描述为主，着眼于政策标准体系完善、甲烷排放管控基础能力的提升[38]。发达国家发布的CH_4减排政策都强调了能源、农业、废弃物等部门行动的重要性，但具体目标确定则立足各自的CH_4排放结构特点。例如，欧盟提出2030年的温室气体排放总量比1990年下降至少55%，加拿大提出 2030 年的 CH_4 排放总量比 2020 年至少减少35%。对于重点领域的CH_4减排，往往侧重于能源行业提出明确的减排目标要求。例如，欧盟提出2030年能源部门的CH_4排放总量比2020年减少约58%；加拿大率先承诺达到国际能源署建议目标，即2030年实现油气行业CH_4排放量比2012年至少下降75%。因此，我国中长期全口径的CH_4排放控制目标应建立在各领域目标集成的基础上，可量化战略目标的设定还需充分考虑各区域、各部门的差异性和能力水平。

整体上，我国中长期CH_4排放控制行动将持续面临基础数据薄弱、行业与区域差异大、技术减排与措施减排潜力不明、控排政策体系与风险防范不完备等问题[35]，目前尚处于总结政策与行动经验、完善顶层设计阶段，没有形成系统性的CH_4排放管控能力，尚不具备短期内迅速开展规模性减排的实施条件，亟待全面开展CH_4减排的能力基础与支撑体系建设。

四、我国中长期甲烷排放控制行动逻辑

（一）总体管控思路

1. 基本原则

我国CH_4排放控制应立足长远，着眼国际、国内两个大局，通盘考虑并统筹兼顾，从确保能源安全、粮食安全、供应链与产业链安全、社会经济发展的角度出发，在《中国甲烷排放控制行动方案》的基础上，坚持技术和管理“双轮”驱动、约束与激励同步推进、生产和消费协同控制，加快探索适应国情的中长期CH_4排放控制战略；积极参与全球CH_4减排行动，提出CH_4减排的“中国方案、中国模式、中国路径”，为我国深度参与全球气候治理、在国家层面逐步实现温室气体中和提供坚实的基础。

2. 管控逻辑

我国中长期CH_4排放管控涉及的关键任务与核心内容主要涉及：顶层制度与政策工具设计、多尺度CH_4排放清单数据库构建、“空天地”一体化测量技术研发与实践、CH_4减排技术研发与工程示范（见图1）。① 加快设定中长期全口径的CH_4排放控制目标。量化性政策目标的设定应起到统领全局的作用，推动尽早实现从控制排放向减少排放的历史性转变，力争2030年前实现全国性CH_4排放达峰并步入稳定的平台期，2040年左右实现规模性减排。② 科学规划重点领域及具体行业部门的责任分配与落实。借鉴发达国家较为成熟的CH_4减排经验，协同推进制度创新、科技创新、模式创新，识别中长期最佳减排路径和策略；因地制宜、分类施策、多点突破，推动各领域建立有效的CH_4排放控制体系，强化各责任主体的行动力度。③ 筑牢技术减排与措施减排的能力基础。针对能源活动、农业活动、废弃物处理等领域，掌握关键排放源的排放水平和减排潜力，推动关键减排技术获得重大突破；加强各地区、各部门CH_4排放控制战略规划与政策

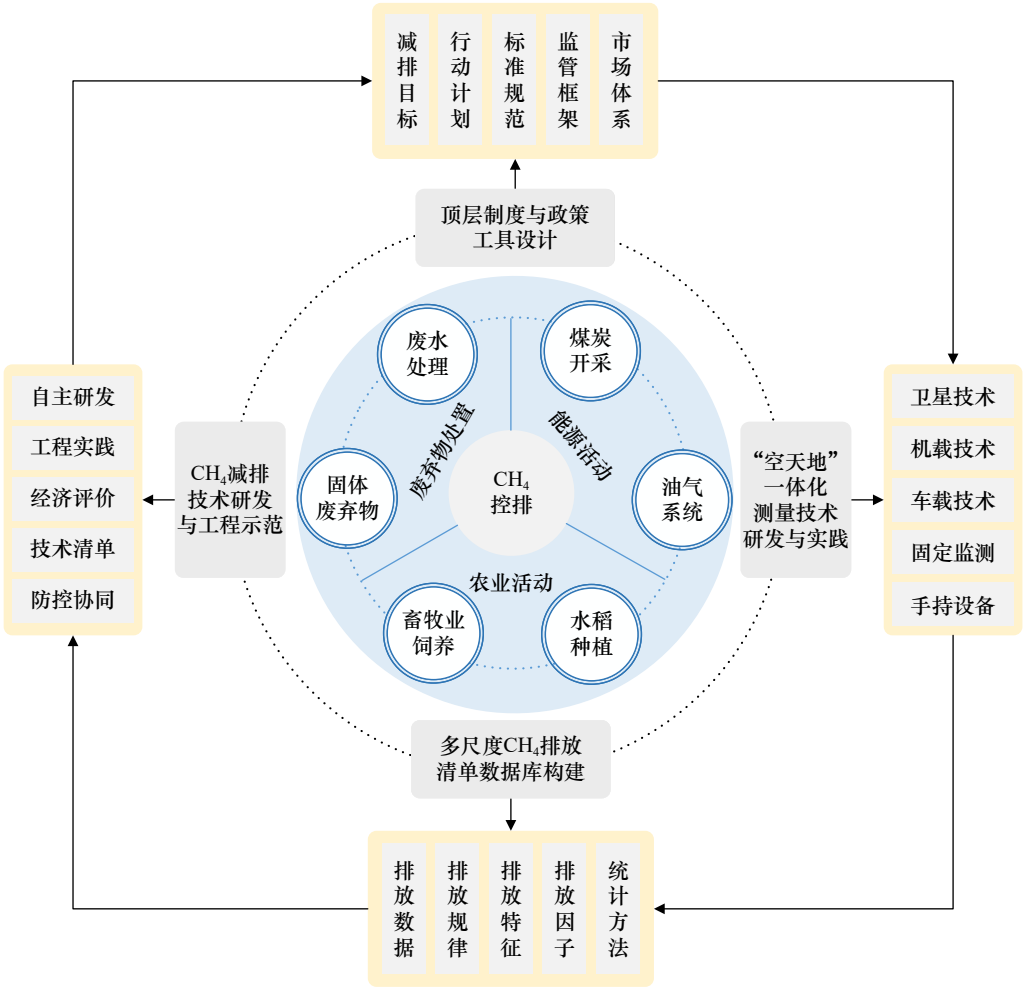

图1　我国中长期CH_4排放的总体管控逻辑

选择储备，不断探索新的潜力空间与减排机会。④ 全面增强CH_4排放管控合力。详细论证CH_4排放控制的行动路径并采取稳健节奏，协同减污降碳，防范化解CH_4控排可能带来的风险，确保CH_4减排路径与各类发展规划相协调；深化国际交流与合作，形成国家及地区、行业、企业多元主体共同治理模式，协同推进CH_4控排工作创新发展。

（二）各领域甲烷排放控制行动方向

1. 能源领域

针对煤炭开采活动，率先实现煤矿瓦斯排放的动态科学监测。在煤田区安装CH_4排放测量装置，构建气体监测网络，对经营中的煤矿进行持续测量，建立全面的监测和统计制度，强化数据报送质量，进行统计监测数据的分析和管理。为了明确煤矿CH_4排放量，需更多关注不同类型煤矿的煤炭产量统计、矿井级CH_4排放因子测算及更新、废弃煤矿排放核算方法学等。煤炭开采相关CH_4排放管控重在优化生产格局，开展全浓度瓦斯利用，加强废弃矿井CH_4排放治理。煤矿CH_4排放量下降直接关联于瓦斯全浓度阶梯式综合利用技术的发展与应用。我国煤矿CH_4以低浓度瓦斯为主，其中83%为通风瓦斯（CH_4浓度<0.75%）、11%为其他低浓度煤矿瓦斯（CH_4浓度为1%~30%），而低浓度瓦斯的利用率极低[37]。井下煤矿瓦斯与地面煤层气抽采利用率由2011年的42%增长至2019年的55%。2019年，井下煤矿瓦斯利用率为42%，地面煤层气利用率为90%。目前，对煤矿瓦斯的处理进入了资源化抽采与减排利用协同的阶段[37]，初步实现瓦斯全浓度梯级利用，但关键技术仍待突破，现有项目多采用国外技术且建设及运行维护成本较高[39]。在措施层面，需加强地面预抽采、关闭 / 废弃矿井抽采、低

浓度瓦斯与乏风瓦斯回收利用；加大煤矿CH_4减排相关科技研发投入，通过示范项目推动煤矿CH_4减排相关技术–装备–产业发展；加强对废弃煤矿的监管，建立废弃煤矿清单，攻克废弃矿井瓦斯高效抽采与利用技术。

在油气行业，亟需优化现行的CH_4排放监测、核算方法和制度，细化全产业链CH_4排放清单。依托“中国油气企业甲烷控排联盟”等组织，建立各层级统一的CH_4排放核算方法，油气行业统一的CH_4监测、报告和核证体系。以泄漏检测与修复（LDAR）的方式对CH_4、挥发性有机化合物浓度进行协同监测，明确排放量和排放浓度阈值。加强CH_4监测与控制技术装备的自主研发，以技术创新实现油气CH_4实地监测能力。加强对放空、火炬燃烧的管理，推行低CH_4排放设备的安装与替代，严格管控生产设施、输配管网等环节的CH_4逸散，重视天然气全产业链的CH_4排放监管。对于管线法兰、阀门、压缩机等一般环节排放源，推广使用管线LDAR技术，及时发现并修复排放源；对于管线破裂、井喷等意外事故导致的“超级”排放源，应用卫星监测等技术进行定位和处理，完善CH_4泄漏突发事件应急响应机制。

2. 农业领域

加强农业领域温室气体排放核算方法学研究。在不同稻作区设立稻田CH_4排放长期监测站点，明确不同气候、土壤、管理方式、稻作类型的排放规律和关键参数，完善田块尺度监测、区域尺度方法学评估与模拟，构建全国CH_4排放台账。改进畜禽养殖CH_4排放核算方法学，提升畜牧业统计与测算数据质量。研发适合国情的畜牧业CH_4排放监测技术及装备，实现精准动态监测。引导大型企业运用反刍动物CH_4排放监测技术，加强对畜牧业CH_4排放的检测及管理，提高监测的准确性和适用性。

推广水稻干湿交替种植技术、改善畜禽粪便管理方式、加强畜牧业饲养管理、重视生物天然气的生产和利用、深化农产品全生命周期CH_4足迹分析等措施，具有一定的减排潜力。尽管可用的减排技术类型丰富，但仍需以集约化农业生产基地作为试点开展CH_4减排实践，重点通过改进种植技术、培育低排放品种来控制CH_4排放。加强丰产减排技术创新与减排产品研发，引导大型农业企业、生产合作社、种植大户应用CH_4减排技术平台，对关键技术开展先行先试，建立集成化CH_4减排农田示范区。改进畜牧业饲养管理模式，合理添加CH_4抑制剂，推广应用高品质饲料与海藻等新型饲料。鼓励大型畜牧业企业建设最优牧场管理示范区，推广集成化CH_4减排技术。改进粪污存储及处理设施装备，提高粪污资源化利用水平。编制农业领域最佳CH_4减排实践指南，总结精细化管理经验，形成技术清单，促进相关技术的推广应用。

3. 废弃物处理领域

完善废弃物领域统计、监测和管理体系，统计生活垃圾清运量、填埋处理量、焚烧处理量、不同处理系统的废水处理量、CH_4回收利用量等活动水平数据。推动重点设施CH_4排放监测、数据收集与分析，促进排放因子的本土化、精准化、动态化，降低清单数据不确定性，为CH_4排放管控提供基础数据。

在固体废弃物填埋处置过程中，重点开展填埋气的收集、控制和利用，同时将治理重心转向垃圾产生的源头与处置全过程，加快建立分类投放、分类收集、分类运输、分类处理的垃圾处理系统。处理好垃圾焚烧与垃圾分类的关系，减少固体废弃物的生产与填埋。在国际实践中，废水处理领域的CH_4减排与废水处理规模、废水类型及相应的处理技术相关，CH_4排放刚性大。需研究低成本减排技术，优化废水处理工艺流程，强化污泥处置，推动与各类型废水处理相关的CH_4减排技术攻关及产业化。

（三）技术减排与措施减排体系架构

CH_4减排的关键技术与措施可简化为CH_4排放的监测检测、CH_4排放的综合治理（涉及范围最广）、CH_4的回收与再利用。《中国甲烷排放控制行动方案》在重点任务中从不同方面提及了技术减排与措施减排相关的内容。在煤矿瓦斯治理、沼气工程、垃圾焚烧替代填埋等方面，我国已形成众多的CH_4减排实践与成功案例，但相关案例散落在各领域，仍需进行系统性的总结提升。深入到行业层面，掌握国内外CH_4减排技术发展动态以及不同类别技术的适用性和经济性，明确重点领域技术创新发展方向，形成资料库、信息库、案例库，据此形成典型的技术、模式、经验并进行归纳集成与推广应用。

当前，众多CH_4减排技术与措施的成熟度和可推广度不高，在成本、可行性、生产者接受程度等

方面存在较大差异。发达国家的CH_4减排行动计划都强调了减排激励措施的重要性，以为CH_4减排行动提供政策指导、资金支持、法律法规保障[40]。例如，政策激励与资金支持能显著提高部门和企业的减排积极性，有效推动各部门的技术研发和应用部署，据此提高CH_4管控的技术与能力水平。

本研究梳理提出了CH_4排放控制相关技术与措施减排体系架构（见图2）。中高浓度瓦斯利用、LDAR、水稻旱种、集中式畜牧场沼气发电等技术措施，成熟度较高且应用推广可产生一定的经济效益，宜列入优先支持的减排技术行列。对于已经相对成熟但收益不足以覆盖成本的减排技术措施，如低浓度瓦斯提纯技术等，应被视为重点发展对象；可辅以一定的财税金融支持，如提供补贴、减免税收、引入减排市场化机制等，以提高投资回报率和市场化水平，改善此类技术应用的经济可行性。对于技术上有突破但经济性较差的技术，宜列为技术储备，如多孔介质预混燃烧、脉动燃烧与催化燃烧、通风瓦斯蓄热氧化、掺混燃烧发电等技术；需要管理部门持续支持研发与工程示范，以进一步降低成本并提高效率。对于不成熟、难度大，但实施后具有较大减排潜力的技术，应增加科技攻关投入，尽快实现自主可控。

为此，在CH_4减排技术与措施体系构建过程中，首要任务是加快实现不同技术措施成熟度、适用性、经济性的精准评估，支持针对性制定技术研发、推广应用、配套财税金融等政策。各类技术的突破、发展与成熟，实现各类型减排技术措施的适用性、经济可行性与推广应用价值，需要“产学研”协同并孵化培育创新型企业，才能保障未来数十年各领域CH_4排放控制行动的成效。

五、我国中长期甲烷排放管控对策建议

（一）加强制度创新

围绕中长期减排目标、行动规划、标准规范、监管体系、市场体系设计，全面建立适合国情的CH_4排放控制政策体系；强化《中国甲烷排放控制行动方案》在更长时期内的实施，制定分行业的CH_4减排行动方案，明确具体的阶段性量化行动目标和实施计划。强化重点领域CH_4排放的监测、核算、报告、核查制度体系建设。开展煤矿瓦斯排放标准修订工作，制定油气全产业链、农业生产及废弃物处理领域的CH_4排放控制国家标准，构建系统完备的CH_4排放管控标准体系并定期更新。

注重CH_4排放控制政策与现行环境管理政策的协调联动，建立健全以减污降碳协同增效为导向的CH_4排放管理机制，发挥CH_4减排的减污降碳协同作用、对温室气体减排全局的推动与促进作用。明确CH_4控排的责任划分原则、优先领域、重点对象，构建多元治理协同机制，健全源头管控责任约束机制。国家层面在财政补贴、市场机制、标准体系、管理措施等方面发布实施细则，激励CH_4减排技术研发和实现中长期各行业低排放发展目标。支持具备条件的地区制定强制性的政策目标，率先开展各领域CH_4排放控制行动的试点，定期评估风险并总结成效。

（二）突出科技创新

加大CH_4减排领域的科技资源投入，构建CH_4减排与资源环境治理协同的科技创新体系。支持CH_4的辐射强迫影响、GWP、大气化学模式等机理性研究。开展以CH_4卫星监测综合平台为代表的基础攻关项目，提升我国对全球范围内重点CH_4排放设施与事故性“超级”排放源的监测能力。加强设备级、场站级、大气级CH_4监测技术研发，构建“空天地”一体化的CH_4监测网络，形成覆盖全球、多尺度的CH_4排放监控平台与重点排放源精细化管控系统。依托新一代信息技术，开展CH_4排放清单编制，数据库与信息库构建，CH_4排放规律识别、情景量化与预测，CH_4技术减排与措施减排能力评估、减排政策模拟等方面的基础和应用研究，推进CH_4减排路径设计与风险量化评估，筑牢CH_4排放管控的科学基础。

加快CH_4减排技术研发与工程示范，结合技术经济评价，构建CH_4减排技术体系，支撑防控协同。协同建设CH_4监测体系、污染物检测体系，制定各领域CH_4减排技术发展路线图，评定“优先发展”“重点发展”“技术储备”次序并定期更新；加快煤矿全浓度瓦斯梯级利用与治理、废弃煤矿瓦斯资源抽采利用、油气开采LDAR、反刍动物饲养管理（如遗传选育品种和改善饲料管理）、水稻旱作、生物CH_4资源化利用、污泥处置、微生物CH_4去除等技术的攻关、集成示范与实践。以科技示范项

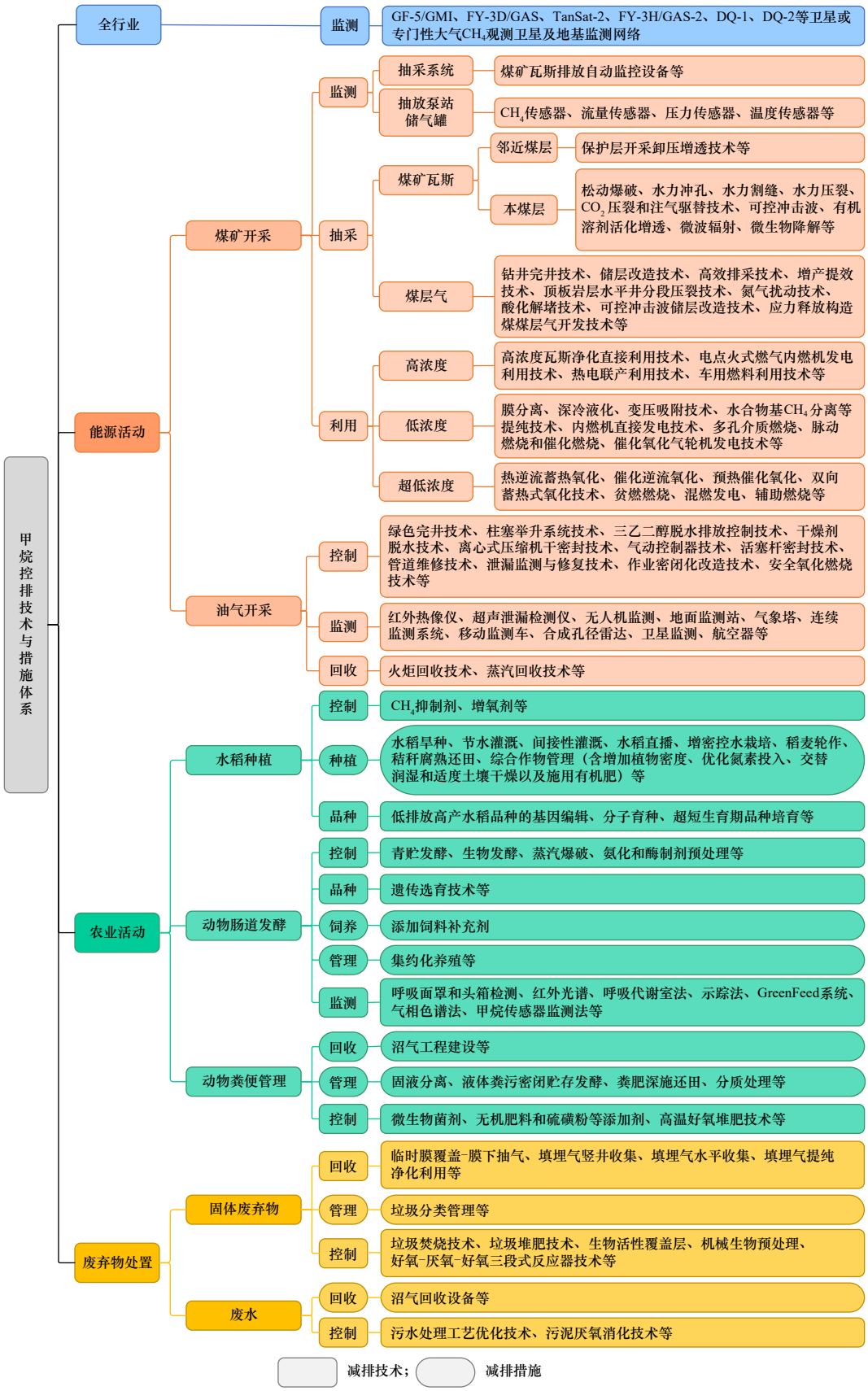

图2　CH_4控排技术与措施体系架构

注：GreenFeed系统表示分析和测量反刍动物排放CO_2、CH_4的技术系统。

目、重大工程为牵引，推动相关前沿技术、装备和产业发展，培育CH_4减排领域的专业人才队伍。加强国际科技交流与合作，倡导成立国际性和区域性的CH_4减排学术组织及团体，支持双边、多边共同开展共性技术研发与推广应用，以科技实力为支撑，提升我国在相关国际规则及标准制定中的话语权和参与度。

（三）加快模式创新

鉴于CH_4减排的特殊性，开展“政产学研金服用”深度协同。积极运用市场手段与市场力量，激发企业开展CH_4排放控制的积极性。建立金融与财税支持配套机制，制定CH_4减排投融资指南，设立专项基金并发布投资指引，为CH_4减排项目提供资金支持，激励重点行业实施CH_4减排。加快绿色金融、气候金融模式创新，探索建立具有中国特色的CH_4市场化机制与交易平台；形成CH_4减排价格发现机制，支持企业通过碳交易等市场化机制开展CH_4减排，构建多元且成熟的商业模式。建立CH_4信息数据共享平台，面向社会公布各相关部门和行业主体的CH_4排放浓度、回收利用量等数据信息，增强CH_4排放数据透明度与精细化管理能力。

提高回收利用CH_4气体的商品化率，促进煤层气就近利用，合理提高财税优惠力度和政策补贴标准，以财税政策和市场机制联合支持低浓度煤矿瓦斯利用项目发展。结合不同类型的碳汇收益机制，形成稻田CH_4减排激励。合理补贴农业低成本减排技术应用，抵消生产者在减排技术上的投入，增加农户收益以提高积极性。协同“无废城市”建设等政策措施，建立废弃物处理领域CH_4减排激励机制。支持国际化程度较高的我国企业积极参与全球CH_4治理，在国际性CH_4减排行业组织中发挥良好作用，围绕CH_4减排领域优势技术、产品、基础设施开展全球性布局。

积极开展社会宣传，将CH_4减排与碳减排、碳汇能力建设并列，凝聚形成更广泛的社会行动共识。倡导可持续消费、绿色消费，鼓励行业企业与居民个体将共识转换为意识引领、行动自觉；以行为类措施为重点，形成需求侧CH_4减排行动指南，促进供应链减排措施的广泛渗透，实现供需两侧协同的温室气体减排，营造全社会绿色低碳的发展氛围与生产生活方式。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 29, 2024; **Revised date:** March 2, 2024

Corresponding author: Liu He is a professor-level senior engineer from National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include the research and development of oil production engineering technology and equipment, and the innovation and practice of engineering management. E-mail: liuhe@petrochina.com.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering projects “Research on China’s Medium and Long-term Methane Control Strategy” (2023-XZ-44), “Research on Major Risk Prevention and Control Strategies for China’s Energy System Transformation towards 2040” (2023-ZCQ-11); National Natural Science Found of China (72088101, 72374175)

参考文献

[1] Oil & gas decarbonization charter [EB/OL]. (2023-12-03)[2024-01-18]. https://www.cop28.com/en/news/2023/12/Oil-Gas-Decarbonization-Charter-launched-to--accelerate-climate-action.

[2] 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.

[3] 杨梓诚, 高俊莲, 唐旭, 等. 中国油气行业甲烷逃逸排放核算与时空特征研究 [J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 302–314.
Yang Z C, Gao J L, Tang X, et al. Accounting and spatial-temporal characteristics of fugitive methane emissions from the oil and natural gas industry in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(2): 302–314.

[4] 胡婉玲, 黄玛兰, 王红玲. 低碳背景下畜牧业甲烷排放现状与减排策略研究 [J]. 华中农业大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 115–123.
Hu W L, Huang M L, Wang H L. Methane emission and mitigation strategy of animal husbandry under low carbon background [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 41(3): 115–123.

[5] Zhao X, Jin X K, Guo W, et al. China’s urban methane emissions from municipal wastewater treatment plant [J]. Earth’s Future, 2019, 7(4): 480–490.

[6] Cai B F, Lou Z Y, Wang J N, et al. CH_4 mitigation potentials from China landfills and related environmental co-benefits [J]. Science Advances, 2018, 4(7): eaar8400.

[7] 张岑, 李伟. 欧美甲烷减排战略与油气行业减排行动分析 [J]. 国际石油经济, 2021, 29(12): 16–23.
Zhang C, Li W. Analysis of methane emission reduction strategies in Europe and America and actions of oil and gas industry [J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(12): 16–23.

[8] 杨啸, 刘丽, 解淑艳, 等. 我国甲烷减排路径及监测体系建设研究 [J]. 环境保护科学, 2021, 47(2): 51–55, 70.
Yang X, Liu L, Xie S Y, et al. Research on methane emission reduction path and monitoring system construction in China [J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(2): 51–55, 70.

[9] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis [R]. Ge-

neva: IPCC, 2021.

[10] Jackson R B, Saunois M, Bousquet P, et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources [J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(7): 071002.

[11] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: Mitigation of climate change [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.

[12] United Nations Environment Programme. Global methane assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions [R]. Kenya: United Nations Environment Programme, 2021.

[13] 张博, 唐旭. 迈向“碳中和”, 甲烷减排不容忽视 [N]. 中国能源报, 2021-01-04(04).
Zhang B, Tang X. Moving towards “carbon neutrality”, methane emission reduction cannot be ignored [N]. China Energy News, 2021-01-04(04).

[14] 惠婧璇, 朱松丽. 全球甲烷控排政策措施评述及其对中国的启示和建议 [J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(6): 683–692.
Hui J X, Zhu S L. Overview on global policies and measures to control methane emissions and its implications for China [J]. Climate Change Research, 2023, 19(6): 683–692.

[15] International Energy Agency. Global methane tracker 2022 [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.

[16] 董文娟, 孙铄, 李天枭, 等. 欧盟甲烷减排战略对我国碳中和的启示 [J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(2): 37–43.
Dong W J, Sun S, Li T X, et al. European Union methane strategy and its implications on China’s 2060 carbon neutrality vision [J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(2): 37–43.

[17] 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国家信息通报 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. The third national information bulletin on climate change of the People’s Republic of China [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China, 2019.

[18] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. The first biennial update report on climate change in the people’s republic of China [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China, 2019.

[19] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. The second biennial update report on climate change in the People’s Republic of China [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China, 2019.

[20] 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.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. The fourth national information bulletin on climate change of the People’s Republic of China [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China, 2023.

[21] 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.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. The third biennial update report on climate change in the People’s Republic of China [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China, 2023.

[22] Gao J L, Guan C H, Zhang B. China’s CH_4 emissions from coal mining: A review of current bottom-up inventories [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 725: 138295.

[23] 叶岩, 祝天宇, 吴泽全, 等. 反刍动物甲烷排量监测技术应用研究进展 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 277–292.
Ye Y, Zhu T Y, Wu Z Q, et al. Research progress on application of methane emission monitoring technology in ruminants [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 277–292.

[24] 唐志伟, 张俊, 邓艾兴, 等. 我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 582–591.
Tang Z W, Zhang J, Deng A X, et al. Spatiotemporal characteristics and reduction approaches of methane emissions from rice fields in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 582–591.

[25] Du W J, Lu J Y, Hu Y R, et al. Spatiotemporal pattern of greenhouse gas emissions in China’s wastewater sector and pathways towards carbon neutrality [J]. Nature Water, 2023, 1: 166–175.

[26] 詹静芳, 王珊珊. 中国生活垃圾填埋场甲烷源碳排放量预测评估 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(11): 147–155.
Zhan J F, Wang S S. Assessment of methane generation and relevant carbon emission from MSW landfills in China [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(11): 147–155.

[27] 柳君波, 徐向阳, 霍志佳, 等. 中国煤炭格局变化对煤矿甲烷排放的影响及原因 [J]. 生态经济, 2021, 37(7): 176–182.
Liu J B, Xu X Y, Huo Z J, et al. Influence of coal pattern change on coal mine methane emission in China [J]. Ecological Economy, 2021, 37(7): 176–182.

[28] 范紫月, 齐晓波, 曾麟岚, 等. 中国农业系统近40年温室气体排放核算 [J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9470–9482.
Fan Z Y, Qi X B, Zeng L L, et al. Accounting of greenhouse gas emissions in the Chinese agricultural system from 1980 to 2020 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9470–9482.

[29] 逄锦福, 杨芳, 王晓, 等. 我国油气行业甲烷减排投融资支持政策框架研究 [J]. 油气田环境保护, 2023, 33(3): 1–7, 14.
Pang J F, Yang F, Wang X, et al. Study on the policy framework for methane abatement investment and financing in China’s oil and gas industry [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2023, 33(3): 1–7, 14.

[30] 潘继平, 焦中良. 面向碳达峰碳中和目标的中国油气发展战略思考 [J]. 国际石油经济, 2022, 30(8): 1–15.
Pan J P, Jiao Z L. Study on China’s development strategy for oil & gas industry toward the goal of carbon peaking and carbon neutrality [J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(8): 1–15.

[31] 李政, 孙铄, 麻林巍. 中国能源行业甲烷逃逸排放估计方法及减排策略分析 [J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(1): 59–65.
Li Z, Sun S, Ma L W. Estimationmethods and emission reduction policies for methane emission in the Chinese energy sector [J]. Coal Economic Research, 2024, 44(1): 59–65.

[32] 贾国伟, 许邦, 符书辉, 等. 国外甲烷管控政策进展及对中国的

启示 [J]. 全球科技经济瞭望, 2023, 38(4): 62–67.
Jia G W, Xu B, Fu S H, et al. Progress of foreign methane control policies and its enlightenment to China [J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2023, 38(4): 62–67.

[33] 仲冰, 张博, 唐旭, 等. 碳中和目标下我国天然气行业甲烷排放控制及相关科学问题 [J]. 中国矿业, 2021, 30(4): 1–9.
Zhong B, Zhang B, Tang X, et al. Methane emission controls and related scientific issues in China's natural gas industry under the goal of carbon neutrality [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(4): 1–9.

[34] 古小东, 吴晓雅, 周丽旋. "双碳"目标下我国甲烷排放控制制度的完善 [J]. 环境保护, 2023, 51(6): 32–36.
Gu X D, Wu X Y, Zhou L X. Perfection of methane emission control system in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Environmental Protection, 2023, 51(6): 32–36.

[35] 张博, 李蕙竹, 仲冰, 等. 中国甲烷控排面临的形势、问题与对策 [J]. 中国矿业, 2022, 31(2): 1–10.
Zhang B, Li H Z, Zhong B, et al. The situation, problems and countermeasures for the controls of China's methane emissions [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(2): 1–10.

[36] 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.

[37] 桑树勋, 刘世奇, 韩思杰, 等. 中国煤炭甲烷管控与减排潜力 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 159–175.
Sang S X, Liu S Q, Han S J, et al. Coal methane control and its emission reduction potential in China [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 159–175.

[38] 中华人民共和国生态环境部. 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.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Action plan for methane emission control [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2023.

[39] 马占云, 李照濛, 刘舒乐, 等. 全球甲烷控排对我国的启示 [J]. 中国能源, 2023, 45(S1): 20–30.
Ma Z Y, Li Z M, Liu S L, et al. Global experiences in mitigating methane emissions and its implication for China [J]. Energy of China, 2023, 45(S1): 20–30.

[40] 安康欣, 王灿. 甲烷减排战略: 国际进展与中国对策 [J]. 环境影响评价, 2023, 45(3): 8–16.
An K X, Wang C. Methane emission reduction strategies: International progress and China's countermeasures [J]. Environmental Impact Assessment, 2023, 45(3): 8–16.