



中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
ISSN 2096-6237, CN 13-1432/S

《中国生态农业学报(中英文)》网络首发论文

题目: 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
作者: 汪笑溪, 李佳珂, 叶蕾, 林斌
收稿日期: 2024-05-06
网络首发日期: 2024-07-19
引用格式: 汪笑溪, 李佳珂, 叶蕾, 林斌. 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[J/OL]. 中国生态农业学报(中英文).
<https://link.cnki.net/urlid/13.1432.S.20240718.1731.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.12357/cjea.20240242

汪笑溪, 李佳珂, 叶蕾, 林斌. 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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, DOI: 10.12357/cjea. 20240242
WANG X X, LI J K, YE L, LIN B. Policy measures, technology application and implications for non-CO₂ greenhouse gases emissions mitigation in China's agricultural sector[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, DOI: 10.12357/cjea. 20240242

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*

汪笑溪, 李佳珂, 叶蕾, 林斌
(浙江大学中国农村发展研究院 杭州 310058)

摘要: 非二氧化碳温室气体具有升温潜势高和排放增速快等特点, 对全球气候变化具有不可忽视的影响。为应对全球气候变化, 针对甲烷和氧化亚氮等非二氧化碳温室气体减排刻不容缓。本文聚焦甲烷与氧化亚氮温室气体排放, 搜集并整理了中国农业源非二氧化碳温室气体排放的总量、来源及时间趋势等现状; 通过政策和文献梳理, 从减排政策和技术应用两个方面对比分析了中国和国际典型的农业非二氧化碳温室气体减排行动; 并基于排放现状和对比分析, 总结了中国在减排工作中面临的困境与挑战, 进而提出相应的减排对策。虽然中国已逐步将非二氧化碳温室气体减排纳入国家战略规划, 农业部门也出台了针对性政策, 但非二氧化碳温室气体减排工作仍存在有待完善之处, 应持续加强技术研发和完善推广机制, 健全碳交易市场与公共低碳投资机制。本文为进一步完善非二氧化碳温室气体减排政策措施的制定和开展相关研究提供了科学依据。
关键词: 非二氧化碳温室气体减排; 农业源非二氧化碳温室气体; 甲烷; 氧化亚氮; 排放现状; 政策建议
中图分类号: X511

Policy measures, technology application and implications for non-CO₂ greenhouse gases emissions mitigation in China's agricultural sector*

WANG Xiaoxi, LI Jiake, YE Lei, LIN Bin
(China Academy for Rural Development, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Mitigating non-CO₂ greenhouse gas (GHG) emissions, particularly methane and nitrous oxide, is crucial for addressing climate change due to its significant warming potential. This study systematically reviews the policy measures and technological advancements related to methane and nitrous oxide emissions from China's agricultural sector, providing insights for non-CO₂ GHG mitigation. We comprehensively analyze the emission sources, total amounts, and temporal trends of non-CO₂ emissions in China's agricultural industry. By comparing China's policies and technologies with key international practices, we identify current challenges and propose targeted strategies for reducing non-CO₂ GHG emissions in China's agricultural sector. Despite the integration of non-CO₂ GHG mitigation into national strategic planning, further enhancements are necessary. Key recommendations include (1) Sustained investment in research and development for non-CO₂ GHG mitigation; (2) Strengthening technology dissemination systems, carbon trading markets, and public investment; and (3) Improving the institutional environment for non-CO₂ GHG mitigation. This study offers critical insights for future policy design and research to reduce non-CO₂ GHG emissions and mitigate global warming.
Keywords: Reduction of non-CO₂ greenhouse gases; Non-CO₂ greenhouse gases from agricultural sources; Methane; Nitrous oxide; Emission status; Mitigation policies

根据《联合国气候变化框架公约》框架下的《京都议定书》与《〈京都议定书〉多哈修正案》, 非二氧化碳温室气体包括甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF₆)和三

* 国家自然科学基金面上项目(72273126)、国家重点研发计划项目(2020YFA0608604)和中央高校基本科研业务费专项资金(S20230139)资助
汪笑溪, 主要研究方向为农业经济学、食物系统转型、综合评估建模、气候变化影响及减缓等领域。E-mail: xiaoxi_wang@zju.edu.cn
收稿日期: 2024-05-06 接受日期: 2024-07-02
* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (72273126), the National Key R&D Program of China (2020YFA0608604), and the Fundamental Research for the Central Universities (S20230139).
Corresponding author: WANG Xiaoxi, E-mail: xiaoxi_wang@zju.edu.cn
Received May 6, 2024; accepted Jul. 2, 2024

氟化氮(NF₃)等。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)显示, 2019 年该类气体排放量占温室气体排放总量的比重超过四分之一。虽然非二氧化碳温室气体的排放量低于二氧化碳, 但其具有排放增速较快与全球增温潜势(GWP)较高等特点^[1-2]。根据 AR5 的数据, 甲烷与氧化亚氮的百年 GWP 分别为二氧化碳的 28~30 倍与 265 倍, 且甲烷与氧化亚氮是全球排放量最高的两种非二氧化碳温室气体, 因此, 非二氧化碳温室气体排放受到越来越广泛的关注。IPCC 的研究进一步揭示, 非二氧化碳温室气体减排不仅可以有效降低气候变暖的峰值^[3], 也是实现全球温室气体净零排放目标的必要条件^[4]。

中国的非二氧化碳温室气体减排工作面临来自国际和国内的双重压力。一方面, 气候变暖是全人类共同面临的难题, 《联合国气候变化框架公约》已将该类温室气体纳入控制排放的范畴, 加之 151 个国家签署了“全球甲烷承诺”(Global Methane Pledge), 这无疑增加了中国在国际层面做出相关承诺的压力。另一方面, 为了改善中国的大气环境质量并保障国民健康, 中国迫切需要减少非二氧化碳温室气体的排放。例如, 甲烷不仅是烟雾空气污染的关键成因, 还会对人体健康产生负面影响^[2]。然而, 中国的非二氧化碳温室气体排放总量相对较高, 且温室气体减排政策长期以二氧化碳减排为主^[2]。因此, 加快推进中国的非二氧化碳温室气体减排工作势在必行。

中国农业部门的非二氧化碳温室气体排放占比较大, 具有较强的减排潜力, 并且其减排工作具有显著的环境和社会经济效益^[5]。因此, 本文聚焦甲烷与氧化亚氮气体, 基于非二氧化碳温室气体排放现状, 系统梳理中国农业部门非二氧化碳温室气体减排的相关政策和技术并研究对比国际典型减排措施, 分析当前中国农业在非二氧化碳温室气体减排中面临的困境与挑战, 进而提出针对性的减排政策措施。

1 中国非二氧化碳温室气体排放现状

根据 AR6 的数据, 2019 年全球非二氧化碳温室气体的排放量约为 151 亿 t CO₂-eq, 占温室气体排放总量的 25.59%。其中, 甲烷的排放量约为 110 亿 t CO₂-eq, 占非二氧化碳温室气体排放总量的 72.85%, 其对全球增温的贡献仅次于二氧化碳^[6]; 氧化亚氮和含氟气体(包括氢氟碳化物、全氟化碳、六氟化硫和三氟化氮等温室气体)的排放量分别约为 27 亿 t CO₂-eq 和 14 亿 t CO₂-eq, 分别占非二氧化碳温室气体排放总量的 17.88%和 9.27%。因此, 减少非二氧化碳温室气体排放, 尤其是减少甲烷和氧化亚氮排放, 对于应对气候变化至关重要。

中国的非二氧化碳温室气体排放情况较为严峻。据全球大气研究排放数据库(EDGAR)基于 AR5 中 100 年时间尺度计算的排放数据, 中国非二氧化碳温室气体排放总量呈逐年上升趋势, 2019 年达到 27.53 亿 t CO₂-eq, 占中国温室气体总排放量的 18.87%。在各类非二氧化碳温室气体中, 中国甲烷和氧化亚氮的排放量共占非二氧化碳温室气体总排放量的 83.71%; 其中, 中国农业部门的甲烷和氧化亚氮排放量占 37.94%, 在各部门中位居首位。因此, 本文聚焦农业非二氧化碳温室气体减排, 分析农业部门甲烷和氧化亚氮的排放现状。

中国面临着甲烷排放总量大且排放量持续上升的问题。EDGAR 的数据显示, 1970—2019 年, 中国的甲烷排放总量从 10.58 亿 t CO₂-eq 上升至 19.06 亿 t CO₂-eq, 总体呈持续增长趋势(图 1a)。在排放来源方面, 中国的甲烷排放主要源于能源、农业和废弃物处理部门(图 2a)。其中, 能源部门是最主要的甲烷排放来源, 2019 年共产生甲烷 7.47 亿 t CO₂-eq, 占全国甲烷总排放量的 39.18%, 且排放量仍在逐年上升。农业部门是中国甲烷排放的第二大来源, 2019 年共产生甲烷 6.04 亿 t CO₂-eq, 占甲烷排放总量的 31.70%; 从时间趋势来看, 农业部门的排放量略有下降, 但依然维持在较高水平。中国农业部门甲烷排放的主要来源是水稻(*Oryza sativa*)种植, 其次是反刍动物肠道发酵。目前能源部门的甲烷排放量已超过农业部门, 但考虑到农业部门同时是中国氧化亚氮排放的第一大来源和甲烷排放的第二大来源, 农业技术进步对氧化亚氮和甲烷减排具有协同作用, 加之粮食安全保障的考虑, 因此, 本文主要关注农业部门的非二氧化碳温室气体排放。

根据 EDGAR 的数据, 2019 年中国氧化亚氮排放量为 3.98 亿 t CO₂-eq, 位居全球首位。1970—2019 年, 中国的氧化亚氮排放量逐年增加, 但自 2006 年以来增长幅度减小(图 1b)。农业部门是最主要的排放源, 其产生的氧化亚氮占 2019 年全国氧化亚氮排放总量的 67.82%, 但近年的排放量已趋于稳定(图 2b)。在农业活动中, 土壤和畜禽管理(包括秸秆处理、微生物和粪肥直接施用等)与化肥施用会产生大量的氧化亚氮^[7], 排放量分别为 1.45 亿 t CO₂-eq 和 1.01 亿 t CO₂-eq, 分别占全国农业部门氧化亚氮排放总量的 53.69%和 37.25%。

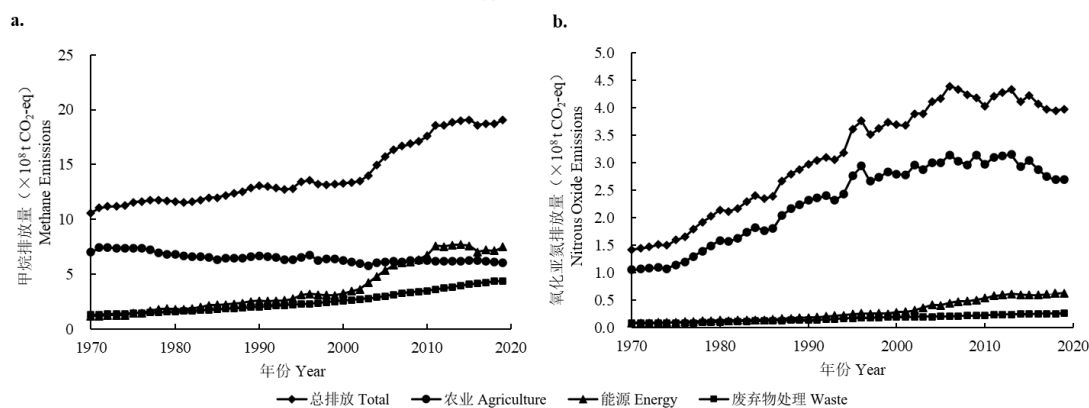


图 1 1970—2019 年中国甲烷(a)与氧化亚氮(b)总排放量与各部门排放量

Fig. 1 Total emissions and emissions of each sector of methane (a) and nitrous oxide (b) in China from 1970 to 2019

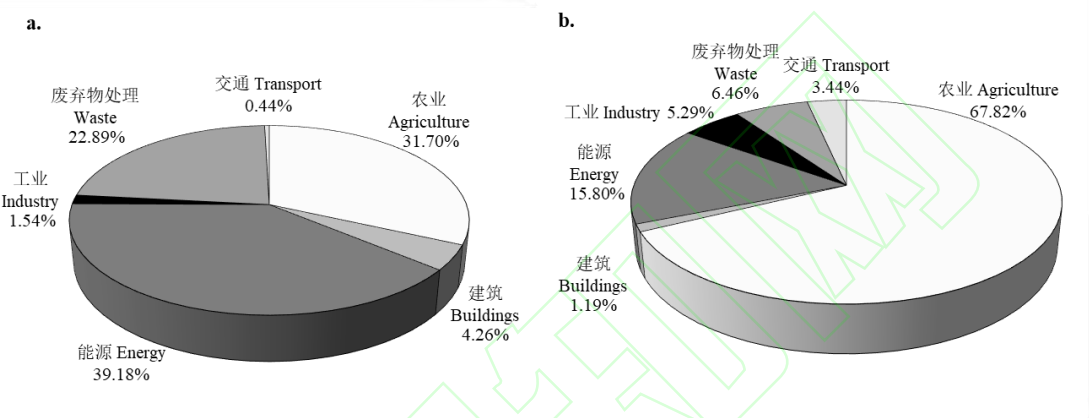


图 2 2019 年中国各部门甲烷(a)与氧化亚氮(b)排放占比

Fig. 2 Sector-wise emissions of methane (a) and nitrous oxide (b) in China in 2019

2 农业源非二氧化碳温室气体减排的国内外技术与政策

在明确非二氧化碳温室气体排放现状的基础上,本部分对比典型国际政策,并进一步聚焦农业部门,系统梳理中国现有减排政策和减排技术,分析和探索非二氧化碳温室气体减排政策的发展脉络,探明当前中国减排措施的改进潜力并提出可行的改进对策。

2.1 农业源非二氧化碳温室气体减排技术

技术创新被视为实施非二氧化碳温室气体减排的关键^[8],因此从利用和源头减量两方面梳理当前国外和中国农业部门使用的相关减排技术,总结减排技术使用现状并探究可能存在的局限(表 1)。

甲烷减排技术主要包括稻田甲烷减排技术、反刍动物肠道发酵减排技术和粪便处理减排技术。在稻田减排技术方面,国外技术主要包括间歇灌溉技术和深水稻种植技术。间歇灌溉技术由日本和菲律宾等水稻种植较多的国家研发,通过控制灌溉时间和水位来减少厌氧条件,可减少约 15%的甲烷排放。深水稻种植技术是利用深水环境,减少土壤中的厌氧条件,可减少约 25%的甲烷排放。

目前,中国采用的稻田甲烷减排技术主要集中在水稻品种优化和稻田水分与耕作管理两个方面。一方面,选育和推广低碳水稻品种具有较高的甲烷减排效益。譬如中国水稻研究所研发的‘SUSIBA2’水稻品种能够同时实现增产和减少 90%以上的甲烷排放^[9];上海农业科学院研发的旱管种植节水抗旱稻(D-WDR)技术结合了节水抗旱稻品种和旱管种植方式,可通过减少灌溉实现 70%~90%的甲烷减排^[10]。另一方面,稻田水分和耕作管理可以通过减少厌氧环境实现减排^[11],所涉及技术主要为水稻灌溉技术与轮作等耕作管理技术。在水稻灌溉技术方面,中国水稻研究所提出的好氧碳减排灌溉模式可有效减少 30%~60%的稻田甲烷排放,全国应用面积达到 133.33 万 hm^2 ^[12];使用喷灌和滴灌等节水灌溉技术相较传统漫灌可减少 71.25%的土壤甲烷排放^[13],并减少秸秆还田后的甲烷排放^[14]。此外,水分管理技术还包括中期晒田与覆膜栽培等。其中,中期晒田配合传统灌溉可减少 20%~60%的稻田甲烷排放,且操作简便,具有较高的技术覆盖率^[15]。稻田耕作管理主要包括轮作和休耕等管理方式,可通过减少播种面积、改变土壤通气性和微生物群落等方式减少甲烷排放^[16]。此外,生物炭技术在国内外均有所应用。生物炭可以作为土壤改良剂和生物炭基肥料,

增加土壤中的甲烷氧化菌^[17], 实现 11.3%的甲烷减排^[18]。

针对反刍动物肠道发酵减排, 国内外均大量使用畜禽饲料调整技术。畜禽饲料调整技术包括秸秆青贮、氨化和多功能舔砖饲喂技术(舔盐砖中加入了钙、磷、碘等元素)等, 可使单位畜产品的甲烷排放减少 10%~40%^[19]。中国政府也提出调整牲畜的日粮结构, 降低牧草成熟度和饲料精粗比等措施^[20]。该类措施可以在提高牲畜生产力的同时减少 12%的甲烷排放^[21-22]。

在粪便处理减排方面, 国外主要使用沼气工程和生物炭研制技术。沼气工程中的厌氧消化技术由德国、丹麦和荷兰等欧洲国家研发, 利用微生物分解畜牧业废弃物, 产生沼气用于发电或作为生物燃料, 使用该技术可减少约 70%的甲烷排放。由美国 and 英国等研发的生物炭研制技术可将畜牧业废弃物高温炭化, 制成生物炭作为土壤改良剂, 可减少约 50%的甲烷排放。在该减排领域, 中国同样主要使用沼气工程以及配合沼气工程使用的粪污干湿分离与液体粪污密闭贮存发酵等粪便处理减排技术。粪污干湿分离与液体粪污密闭贮存发酵等技术已被用于沼气工程的粪便发酵装置中。该技术可进一步减少畜禽粪便处理过程中的甲烷排放。目前沼气工程在中国的推广情况良好, 2017 年中国沼气产量位列世界第二^[23]。从减排效益来看, 1991—2005 年中国农村沼气工程共减少了 1340.924 万 t CO₂-eq 粪便与秸秆处理的甲烷排放; 同时, 沼气作为能源替代共减少 356.001 万 t CO₂-eq 甲烷排放^[24]。

氧化亚氮减排技术主要针对化肥施用导致的排放, 包括测土配方施肥技术、缓释肥和水溶肥技术、肥料高效施用技术与有机肥腐熟还田技术等化肥减量增效技术。其中, 测土配方技术在中国推广时间最长, 技术覆盖率最高, 使用该项技术能够降低 13.98%因施用氮肥而导致的氧化亚氮排放^[25]。其他技术虽然也具有减排潜力, 但多数使用成本较高, 技术推广度偏低。如缓释肥有在 2060 年减少 330 万 t CO₂-eq 非二氧化碳温室气体排放的潜力^[26], 但使用缓释肥将导致成本提高 30%~60%, 同时存在安全隐患与高操作门槛的壁垒^[27], 导致其推广程度有限。

表 1 农业部门的非二氧化碳温室气体减排技术

Table 1 Technologies for non-CO₂ greenhouse gases emissions mitigation in the agricultural sector

温室气体 Greenhouse gas	减排措施 Mitigation measure	减排技术核心内容 Key element of emissions mitigation technologies	技术类型 Technology type
甲烷 Methane	选育和推广低碳水稻品种 Breeding and promotion of low-carbon rice varieties 稻田管理 Paddy management	低甲烷排放水稻品种技术 Low-methane-emission rice variety	源头减量 Source reduction
		旱管种植节水抗旱稻技术	
		Dry cultivation for water-saving and drought-resistance rice variety	
		间歇灌溉技术 Intermittent irrigation	
		深水稻种植技术 Deep-water rice cultivation	
		稻田节水灌溉技术 Water-saving paddy irrigation	
	畜禽饲料管理 Livestock and poultry feed management	中期晒田和覆膜栽培 Medium-term soil solarization and film mulching cultivation	废弃物利用 Waste utilization
		轮作休耕 Rotation with fallow	
		秸秆青贮和氨化技术, 多功能舔砖饲喂技术	
		Straw silage and ammonia, multi-functional licking brick feeding	
氧化亚氮 Nitrous oxide	化肥减量增效 Fertilizer reduction and efficiency enhancement	调整日粮结构, 降低牧草成熟度和饲料精粗比	源头减量 Source reduction
		Dietary structure adjustment, forage maturity reduction and feed concentrate/crude ratio reduction	
		沼气工程: 厌氧消化技术 Biogas engineering: anaerobic digestion	
		生物炭研制技术 Biochar development	
		沼气工程: 沼气预处理设施和发酵装置	
		Biogas engineering: biogas pre-treatment facilities and fermentation plants	
		粪污干湿分离和液体粪污密闭贮存发酵技术	
		Manure dry-wet separation and liquid manure storage and fermentation	
		测土配方施肥技术 Soil testing and formulated fertilization	
		肥料高效施用技术 Efficient fertilizer application	
		缓释肥和水溶肥 Slow-release and water-soluble fertilizer	
		有机肥腐熟还田 Returning decomposed organic fertilizer to the field	

2.2 农业源非二氧化碳温室气体减排的国外政策

部分经济合作与发展组织(OECD)成员国较早实施了非二氧化碳温室气体减排工作。欧盟、澳大利亚、新西兰、美国、日本和加拿大等地区和国家于 1997 年签署了《京都协议书》^[28], 将非二氧化碳温室气体纳入减排目标。其中, 新西兰承诺在 2008—2012 年间将包括甲烷在内的温室气体排放量在 1990 年的基础上减少 10%, 日本和加拿大承诺在 1990 年的基础上减少 6%。此外, 美国在 1990 年颁布了《清洁空气法案》, 该法案将氧化亚氮列为受管控的空气污染物并明确了减排目标^[29]; 澳大利亚通过鼓励农民调整牲畜管理方法来降低甲烷排放, 包括提高饲料转化率和改善牲畜健康状况等。上述国家的减排经验可能相对丰富, 因此, 本部分梳理并提炼了国际典型政策中具有借鉴意义的相关内容。

一方面,有关甲烷减排的国际合作取得了一定进展。例如,联合国粮农组织(FAO)推出了“全球甲烷承诺”,旨在鼓励各国政府和企业采取行动减少甲烷排放;全球环境基金(GEF)和气候与清洁空气联盟(CCAC)也积极参与了农业甲烷减排的国际合作,资助相关项目并推动技术创新。此外,国家间也逐步开展了减排双边合作,例如中美两国在农业甲烷减排领域开展了交流与合作,共同推动了低甲烷饲料和畜禽养殖技术的研发与推广。另一方面,区域或国家内部的减排行动方案通常涉及多部门协同合作,并综合运用经济、行政与法律等多种手段。欧盟的“农场到餐桌”战略纳入了农业甲烷减排,并通过设立减排目标、提供财政补贴和制定相关法律法规等措施,鼓励农民采用低甲烷排放的农业技术,同时建立完善的碳交易市场,以促进农业甲烷减排^[30]。为此,欧盟加强了技术研发,为农民提供技术支持和培训,并通过宣传教育提高公众对农业甲烷减排的重视。新西兰制定了《应对气候变化(零碳)修正案》,目标在2030年将农业甲烷排放量减少10%。该法案包含了多项措施,包括鼓励农民采用低甲烷排放的饲料和养殖技术、设立农业甲烷减排基金、推行农业碳税以及建立农业排放交易体系等^[31]。

在各类涉及农业源非二氧化碳温室气体减排的方案中,公共投资尤为重要。目前,相较发展中国家,发达国家对该领域的投资规模更大。针对农业源非二氧化碳温室气体减排的投资政策,多数旨在通过环境保护和低碳技术研发与推广,以降低排放量。例如,欧盟的“地平线欧洲”研究与创新框架计划投入超过1000亿欧元用于农业减排技术研发;美国农业部设立了“自然资源保护局”,旨在支持农业生态环境保护项目,预计投资超过100亿美元用于农业生态环境保护;新西兰政府也积极推动农业领域的低碳技术研发和推广,例如低甲烷饲料和低甲烷养殖等技术,预计投入超过5亿纽元用于农业减排技术研发和推广;2022年,芬兰农林部启动了70亿欧元基金,用于支持畜牧业的甲烷减排项目,如饲料调整等。

部分国家在减少甲烷和氧化亚氮等非二氧化碳温室气体方面已取得显著进展。根据欧盟环境署(EEA)的数据,2005—2020年,欧盟28个成员国的甲烷排放量减少了23%,氧化亚氮排放量减少了17%,这在一定程度上得益于农业部门的减排措施。但在全球范围内,非二氧化碳温室气体减排工作仍面临亟待解决的问题。首先,虽然国际社会已经认识到非二氧化碳温室气体减排的重要性,但在政策和法规层面上仍缺乏对排放的明确约束,这制约了各国的减排行动。其次,部分非二氧化碳温室气体减排技术的实施成本相对较高,对政策实施的可行性提出了挑战。鉴于上述问题,加之非二氧化碳温室气体传播和影响具有全球性,国际社会有必要加强合作,共享经验和技术,共同应对非二氧化碳温室气体减排困境。

当前国际上普遍实施的农业源甲烷减排政策措施主要集中在反刍动物肠道发酵、畜禽粪便处理与稻田种植甲烷减排3方面。针对反刍动物肠道发酵的甲烷减排,中国可以考虑借鉴部分发达国家制定的政策措施,如推广相关技术、利用市场机制与提供公共投入等。例如,2020年的《欧盟甲烷减排战略》强调了畜禽甲烷减排技术的研发与推广,并提出进一步强化对低碳畜禽品质选育与畜禽饮食的管理;加拿大发布的《牲畜饲料管理协议》将动物肠道甲烷减排纳入抵消信用体系;芬兰农林部于2022年建立公共基金,以支持畜禽饲喂方法改良和减排添加剂研发等涉及畜禽甲烷减排的饲料技术项目。

发达国家启动畜禽粪便污染处理措施的时间较早,政策框架相对完善。以美国为例,早在2003年美国发布的《国家污染物排放清除系统许可条例与集中式动物饲养作业污水限制指南和标准》就为畜禽污染处理制定了详细标准。为减少畜禽粪便处理过程中的甲烷排放并推广沼气工程,美国启动了“美国农村能源计划(REAP)”与“农业之星计划(AgSTAR)”两项计划,旨在为农户提供购买相关技术所需的融资贷款、基金支持、数据收集与培训服务,同时也为农户采纳沼气回收技术与液体粪肥管理技术提供基础。澳大利亚政府通过制定《1994年畜牧业登记注册法》《1998年家禽条例》《2005年畜禽养殖场登记条例》等,促进将畜禽粪便转化为肥料或清洁能源,以降低污染物的传播与扩散^[32]。新西兰政府也积极推动畜禽粪便处理技术的研发和推广,例如畜禽粪便堆肥技术和生物降解等处理技术,并为农民提供技术培训和咨询服务。

在稻田甲烷减排方面,国际上采取的措施主要为稻田甲烷排放监测与农业管理方式转变。以欧盟为例,《欧盟甲烷减排战略》提出制定数字化模板,以鼓励在农场层面监测甲烷排放数据。同时,《欧盟甲烷减排战略》要求将温室气体排放量作为衡量农田经营绩效的指标之一,并建议实施更严格的温室气体排放限额制度。此外,《欧盟甲烷减排战略》特别强调引入实施“碳耕作”政策,即通过采用精准施肥和节水灌溉等农业管理方式以提高稻田固碳能力。与此同时,在亚太地区主要的水稻生产国中,印度政府推出了“国家行动计划”,通过提供资金支持和技术援助,鼓励农民采纳秸秆还田等技术;泰国和菲律宾政府积极推广间歇灌溉技术^[33],以减少稻田甲烷排放。

2.3 农业源非二氧化碳温室气体减排的国内政策

为贯彻落实碳达峰与碳中和(以下简称“双碳”)决策部署,更好地应对气候变化与推进绿色化发展,中国出台了一系列温室气体减排政策。尽管当前中国的温室气体减排政策仍以二氧化碳减排为核心^[34],但已有部分国家战略以及农业部门的政策涉及非二氧化碳温室气体减排议题^[35]。

通过梳理国家总体规划可以发现,生态文明建设、五年规划和“双碳”目标等国家重大战略均已涉及非二氧化碳温室气体减排工作。早在 2015 年,《中共中央国务院关于加强推进生态文明建设的意见》就提出有效控制包括甲烷在内的温室气体排放;2016 年,《“十三五”控制温室气体排放工作方案》提出要加大“甲烷等非二氧化碳温室气体控排力度”,这标志着中国首次将非二氧化碳温室气体减排写入五年规划。相较甲烷减排,中国在氧化亚氮减排方面起步较早,且已取得了初步成效。2015 年中国颁布《中华人民共和国大气污染防治法》,提出对氮氧化物实施协同控制;“蓝天保卫战”于 2018 年开展,制定了具体的氮氧化物减排目标,并于 2020 年超额完成目标;2018 年施行的《中华人民共和国环境保护税法》正式将氧化亚氮列为应税污染物。近年来,中国也出台了甲烷减排的市场机制构建方案与针对甲烷排放控制的顶层设计方案。例如,2023 生态环境部和农业农村部等部门联合发布《甲烷排放控制行动方案》,明确提出要加强甲烷排放的监测、报告和核查体系建设,并通过技术创新、进一步完善法律法规以及国际合作等方式实现农业等多部门的甲烷减排。上述综合减排政策虽涉及多个部门,但也为中国农业部门的减排提供了行动依据和工作指导。

在颁布和实施非二氧化碳温室气体减排的综合政策以外,中国政府也针对细分部门出台了相关政策。考虑到农业部门既是中国氧化亚氮排放的首要来源(占比 67.82%),也是中国甲烷排放的第二大来源(占比 31.70%),农业源非二氧化碳温室气体减排是应对气候变化的重要任务和潜力所在,本文进一步聚焦农业部门,梳理并总结农业部门现有政策措施(表 2)。中国农业部门排放的非二氧化碳温室气体主要来自水稻种植、畜禽粪便、动物肠道发酵、秸秆焚烧与化肥施用,农业农村部发布的《农业农村减排固碳实施方案》同样将上述活动视为减排重点领域。现阶段,农业部门非二氧化碳温室气体减排政策制定的政府部门主要包括国务院、农业农村部、生态环境部与国家标准化委员会等。本文将从水稻种植、畜禽管理、秸秆综合利用与化肥减量增效 4 个方面,对中国目前促进农业部门非二氧化碳温室气体减排所采取的政策措施进行详细的整理与分析。

1)稻田甲烷排放量约占全国农业部门甲烷总排放量的 62.45%,《农业农村减排固碳实施方案》也将稻田甲烷减排列为首个减排行动。中国早在 2015 年发布的《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》中就提出要控制稻田甲烷和氧化亚氮排放。2022 年发布的《农业农村减排固碳实施方案》进一步明确了水稻种植减排具体措施,包括强化稻田水分管理、因地制宜推广节水灌溉技术与选育推广低碳水稻品种等。

2)在畜牧业中,畜禽粪污处理和反刍动物肠道发酵产生的甲烷排放量占中国农业部门甲烷排放总量的 37.46%。对此,政府以畜禽粪便处理利用与饲料调整为核心,出台了相关管控政策。

畜禽粪便在自然分解过程中会产生大量甲烷^[36],但当前中国的畜禽养殖场普遍存在着粪污处理和利用方式不规范等问题^[37]。基于此,政府针对粪便资源化利用制定了一系列政策。2020 年《国务院办公厅关于促进畜牧业高质量发展的意见》与 2021 年《国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知》均从粪肥处理设施配套、粪肥利用标准与粪肥使用推广 3 个方面提出畜禽粪便资源化利用的具体措施。2022 年发布的《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021—2025 年)》基于已有措施,分别从以下 3 个方面进一步提出要求:在设施技术方面,推动粪污处理设施配套与升级,并核查设施配套情况;在粪肥利用方面,建设粪肥还田利用示范基地,并进一步完善粪肥限量标准;在排放监测方面,建立规模养殖场的碳排放核算、报告与核查标准,并制定重点畜产品全生命周期碳足迹标准。在畜禽废物利用方面,2023 年国家标准化委员会等 3 部门联合印发《关于推进畜禽粪污资源化利用标准体系建设的指导意见》,为畜禽养殖温室气体减排技术规范和排放测定标准的修订与研制指明了工作重点并制定了工作计划。

中国在畜禽饲料调整方面的减排政策仍处于起步阶段。当前涉及甲烷减排的畜禽饲料调整政策主要集中在降低饲料精粗比方面,而对低碳饲料的研发与推广缺乏重视。2022 年《国务院办公厅关于促进畜牧业高质量发展的意见》要求调整牲畜的日粮结构,推动玉米与豆粕减量替代;2023 年的“中央一号”文件则提出加快发展青贮饲料和推进秸秆养畜,即通过提高饲草占比来降低饲料精粗比。

3)传统的秸秆处理方式,即露天焚烧,会同时产生甲烷与氧化亚氮等非二氧化碳温室气体。因此,如何实现农作物秸秆高效和低碳化处理成为农业领域亟需解决的问题之一。当前中国主要通过发展秸秆饲料和秸秆能源化利用等措施来减少秸秆处理过程中的甲烷排放。近年来,随着国家对环境保护重视程度的不断提升以及政策支持力度的加大,中国秸秆资源得到了有效开发。2020 年发布的《国务院办公厅关于促进畜牧业高质量发展的意见》提出促进在农牧交错带综合利用饲草与秸秆,即发展秸秆饲料。此外,《农业农村部办公厅关于做好 2022 年农作物秸秆综合利用工作的通知》提出推进“秸秆变能源”,推广以秸秆为原料的沼气工程和打捆直燃等利用方法。

4)化肥施用是农业部门氧化亚氮排放的主要来源之一,占全国农业部门氧化亚氮总排放量的 37.25%。对此,政府以化肥减量增效为核心出台了一系列政策措施。2015 年发布的《到 2020 年化肥使用量零增长

行动方案》聚焦化肥施用技术、方式和结构 3 方面，提出通过减少不合理的化肥投入以降低氧化亚氮排放。2021 年发布的《“十四五”推进农业农村现代化规划》再次强调推广测土配方等施肥技术和改善肥料投入结构，以减少氧化亚氮排放。2022 年，农业农村部宣布化肥减量增效工作达成预期目标，并印发《到 2025 年化肥减量化行动方案》，继续强化该项工作。除化肥减量增效外，2016 年农业农村部印发的《农业综合开发区域生态循环农业项目指引(2017—2020 年)》还从基础设施建设与回收利用角度出发，建议大力发展化肥控源治理基础设施和坡耕地拦截再利用技术，以减少氮肥施用后农田排水引起的氧化亚氮排放。

表 2 农业源非二氧化碳温室气体减排的国内政策措施

政策措施 Policy or measure	发布部门 Government agency	相关主要内容 Main content	发布时间 Date of release
《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》 Action Plan for Zero Growth in Fertilizer Use by 2020	原农业部 Former Ministry of Agriculture	推进精准施肥，调整化肥施用结构，改进施肥方式，用有机肥替代化肥，减少不合理化肥投入 Promote precision fertilization, adjust the structure of fertilizer application, improve fertilization methods, replace fertilizers with organic alternatives, and reduce excessive fertilizer input	2015 年 2 月 February 2015
《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》 Enhanced Actions on Climate Change: China's Intended Nationally Determined Contributions	国务院 The State Council	推进农业低碳发展，到 2020 年努力实现化肥农药使用量零增长；控制稻田甲烷和农田氧化亚氮排放，构建循环型农业体系，推动秸秆综合利用、农林废弃物资源化利用和畜禽粪便综合利用 Promote low-carbon agricultural development, making efforts to achieve zero growth of fertilizer and pesticide utilization by 2020; control methane emissions from rice fields and nitrous oxide emissions from farmland; build a circular agriculture system, promoting comprehensive utilization of straw, reutilization of agricultural and forestry wastes and comprehensive utilization of animal waste	2015 年 6 月 June 2015
《农业综合开发区域生态循环农业项目指引(2017—2020 年)》 Guidelines for Ecological Circular Agriculture Projects in Agricultural Comprehensive Development Areas (2017—2020)	农业农村部 Ministry of Agriculture and Rural Affairs	发展农药化肥氮磷控源治理设施，实施坡耕地氮磷拦截再利用，建设坡耕地生物拦截带和径流集蓄再利用设施，降低农田排水的氮磷等污染物含量 Develop facilities for nitrogen and phosphorus removal, implement interception and reuse of nitrogen and phosphorus on sloping land; build biological interception zones and facilities for runoff collection and reuse on sloping land; reduce nitrogen, phosphorus and other pollutants from farmland drainage	2016 年 9 月 September 2016
《国务院办公厅关于促进畜牧业高质量发展的意见》 Opinions of the General Office of the State Council on Promoting High-Quality Development of Animal Husbandry	国务院 The State Council	推进畜禽养殖废弃物资源化利用。支持符合条件的县整县推进畜禽粪污资源化利用，鼓励液体粪肥机械化施用。完善畜禽粪污肥料化利用标准，支持种植业生产中施用粪肥 Promote the utilization of livestock and poultry breeding waste; support counties that meet the conditions to promote the utilization of livestock and poultry manure, and encourage the mechanized application of liquid manure; improve the standards for utilization of livestock and poultry manure, and encourage the manure application in crop production	2020 年 9 月 September 2020
《“十四五”推进农业农村现代化规划》 Plan for Advancing Agricultural and Rural Modernization during the 14th Five-Year Plan Period	国务院 The State Council	要持续推进化肥农药减量增效，深入开展测土配方施肥，持续优化肥料投入品结构，增加有机肥使用，推广肥料高效施用技术 Promote the reduction and enhance efficiency of fertilizers and pesticides, promote soil testing and fertilization recommendation, continuously optimize fertilizer application structure, promote organic fertilizers, and promote efficient fertilizer application technologies	2021 年 11 月 November 2021
《国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知》 Notice of the State Council on Issuing the Comprehensive Work Plan for Energy Conservation and Emissions Reduction during the 14th Five-Year Plan Period	国务院 The State Council	深入推进规模养殖场污染治理，整县推进畜禽粪污资源化利用；到 2025 年，畜禽粪污综合利用率达到 80% 以上 Promote pollution control in large farms and promote utilization of livestock and poultry manure in the county; by 2025, achieve a comprehensive utilization rate of livestock and poultry manure exceeding 80%	2021 年 12 月 December 2021
《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021—2025 年)》 Action Plan for Tackling Agricultural and Rural Pollution (2021—2025)	生态环境部 Ministry of Ecology and Environment	整县推进畜禽粪污资源化利用，改造提升粪污处理设施。 Promote the utilization of livestock and poultry manure and waste, upgrade manure and waste treatment facilities	2022 年 1 月 January 2022
《农业农村部办公厅关于做好 2022 年农作物秸秆综合利用工作的通知》 Notice of the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on Utilization of Crop Straw in 2022	农业农村部 Ministry of Agriculture and Rural Affairs	推进秸秆变能源降碳，助力“双碳”工作。 Promote utilization of straw, contributing to the Carbon Peaking and Carbon Neutrality goals	2022 年 4 月 April 2022
《农业农村减排固碳实施方案》 Implementation Plan for GHG Emissions Mitigation and Carbon Sequestration in Rural Areas	农业农村部 Ministry of Agriculture and Rural Affairs	在强化粮食安全保障能力的基础上，优化稻田水分灌溉管理，降低稻田甲烷排放 Optimize paddy water management to mitigate methane emissions while ensuring food security	2022 年 6 月 June 2022

《到 2025 年化肥减量化行动方案》 Action Plan for Reducing Fertilizer Use by 2025	农业农村部 Ministry of Agriculture and Rural Affairs	着力实现进一步减少农用化肥施用总量, 提高有机肥资源还田量, 提高测土配方施肥覆盖率, 提高化肥利用率 Lower fertilizer inputs, increase organic fertilizer resources returned to the fields, increase the coverage rate of soil testing and formula fertilization, and improve fertilizers use efficiency	2022 年 11 月 November 2022
《农业农村部办公厅关于做好 2023 年农作物秸秆综合利用工作的通知》 Notice of the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on Comprehensive Utilization of Crop Straw in 2023	农业农村部 Ministry of Agriculture and Rural Affairs	推进秸秆科学还田, 示范推广翻埋、碎混、堆沤腐熟等秸秆还田技术模式, 形成适应机械化生产、助力后茬作物稳产优质的秸秆还田规程。 Promote crop-residue incorporation; demonstrate and promote incorporation methods such as burial, crushing and mixing, and composting; establish standardized procedures for crop-residue incorporation that support mechanized production and ensure stable yield and high quality of subsequent crops	2023 年 6 月 June 2023
《关于推进畜禽粪污资源化利用标准体系建设的指导意见》 Guiding Opinions on Advancing the Construction of a Standard System for the Utilization of Livestock and Poultry Manure	国家标准委 Standardization Administration	建立畜禽粪污资源化利用标准体系, 提升畜禽粪污资源化利用标准化、规范化、科学化水平。 Establish a standardized system for the utilization of livestock and poultry manure; and promote the standardized, regulated and scientific application of manure	2023 年 8 月 August 2023

3 农业源非二氧化碳温室气体减排的困境与挑战

中国仍是发展中国家, 同时受制于有限的自然禀赋, 因此较发达国家而言, 在推动非二氧化碳温室气体减排方面面临更多挑战。中国尽管已针对各部门, 尤其是针对农业部门, 制定并实施了减排政策且取得初步成效, 但仍面临减排技术研发与推广难度大、市场机制建设不健全以及相关顶层设计不完善不足等一系列困境与挑战。

首先, 部分非二氧化碳温室气体减排技术未被充分重视, 导致相关技术的推广与研发受阻。例如, 目前涉及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, 而该类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, 农业源甲烷和氧化亚氮减排技术的推广也面临着多重障碍。一方面, 中国农业经营主体仍以分散的小农户为主, 这对农业推广体制机制与劳动力投入提出了更高要求^[38]。另一方面, 使用一些化肥减量增效技术(如缓释肥等)与水分管理技术要求农业从业者具备较高的技术素养, 这进一步提高了技术推广难度。

其次, 非二氧化碳温室气体减排的市场机制和公共低碳投资亟待完善。在市场机制方面, 中国的碳排放权交易市场虽已于 2021 年开市, 但仍未纳入甲烷和氧化亚氮等非二氧化碳温室气体的排放权交易; 当前碳市场已纳入发电行业, 且参与主体多为国有企业, 覆盖的行业与企业类型均有待扩展。此外, 相关市场规则也有待完善, “重履约轻交易”现象普遍存在^[39]。在公共低碳投资方面, 当前中国公共低碳投资主要面向节能、可再生能源与碳汇等经济效益较高的领域, 针对非二氧化碳温室气体减排技术研发的财政投入则有所不足。当前相关领域的公共投资以财政补贴或税收优惠为主, 投资方式较为单一, 难以利用市场机制调动社会投资进入低碳领域^[40]。

同时, 非二氧化碳温室气体减排的顶层设计有待完善。建立准确和科学的非二氧化碳温室气体检测、报告与核查制度(MRV)是制定减排路径和目标的前提, 而中国的非二氧化碳温室气体基础数据较为有限^[41]。其制约因素主要有两点: 第一, 虽然中国已制定涵盖部分领域甲烷排放的核算方法(如 GB/T 32151.11—2018 和 GB/T 32151.12—2018), 但部分核算方法存在核算定义模糊、部分参数不易计算^[42]与参数不统一等问题^[43], 有待出台更为系统的排放核算标准; 第二, 虽然中国已多次发布气候变化信息通报, 但最新公布的温室气体排放数据年份为 2014 年, 相关数据有待进一步更新。由于相关数据监测体系尚未完善等客观因素, 中国暂未发布氧化亚氮减排的顶层设计文件, 也暂未在国家自主贡献(NDCs)中明确甲烷减排措施。此外, 在国内层面, 现有非二氧化碳温室气体减排政策多由细分的政府管理部门针对各自领域提出, 部门之间缺乏合作, 跨部门的协同作用有待更好地发挥^[42]; 在国际社会有序推进减排合作的背景下, 中国也亟待出台非二氧化碳温室气体减排目标、路径与时间表。此外, 考虑到粮食安全、基础数据薄弱以及系统的减排体系尚未形成等客观因素, 中国暂未加入“全球甲烷减排承诺”, 但中国仍应当通过国际合作来获取承诺缔约国在非二氧化碳温室气体减排领域的制度经验与前沿技术等资源。

4 政策启示与建议

鉴于中国当前面临的非二氧化碳温室气体减排问题, 尤其是在农业领域面临的减排挑战, 本文基于中国国情和现有政策, 并借鉴国际有效措施, 提出以下政策启示与建议:

第一, 采取多方面措施解决技术难题。首先, 应进一步探索符合中国国情的减排方案。例如基于保障中国粮食安全的重要性, 一方面, 针对稻田甲烷排放占比较大的问题, 应加强对水稻低碳种植技术的研发与

推广,通过优化稻田灌溉模式、改良品种和引入高效施肥技术等方式,以降低稻田甲烷排放;另一方面,针对化肥施用导致的氧化亚氮排放,应加强对农田氧化亚氮减排技术的研发和推广,通过优化氮肥施用方式、推广氮肥减施技术和实施秸秆还田等措施,以降低农田氧化亚氮排放。其次,部分畜禽品种选育与饲料改进等技术能够有效减少畜禽排放的甲烷,应提高对研发相关技术的重视程度,通过将甲烷减排作为后续畜禽领域的技术研发重点,或通过国际合作(如中美甲烷减排合作)合理借鉴经验,以加快攻克技术难题。最后,应因地制宜选取减排技术。例如在西北干旱地区,可以推广耐旱减排作物品种、节水灌溉技术和水稻间歇灌溉技术;在南方湿润地区,可以推广高效氮肥利用技术。

第二,进一步完善碳交易市场建设与公共低碳投资机制。在碳交易市场建设方面,应尽快将甲烷与氧化亚氮等非二氧化碳温室气体纳入碳市场交易范围,并更新和完善相关市场规则和交易方法。与此同时,应充分利用重启中国核证自愿减排项目(CCER)对碳交易市场的辅助作用。例如通过认证与核证,CCER 可以将一些碳减排项目纳入监测和报告体系,推动低碳技术应用、能源效率改进与可再生能源开发。CCER 的认证与核实也可以提供可信的减排证书,为碳市场提供更多认可和可交易单位,进而推动碳市场发展,促进碳定价机制的建立和运行。此外,应扩大碳市场覆盖范围,推动其他高排放行业和更多类型企业参与碳交易,并借鉴欧盟碳交易系统的分阶段完善方式,制定阶段性计划,逐步完善碳市场的相关法规条例,调整配额总量与分配方式,以更好地规范交易机制。在完善低碳公共投资机制方面,应重视涉及非二氧化碳温室气体减排的公共低碳投资,制定针对该减排领域的中长期财政预算规划或投入方案,推动建立稳定的财政投入机制;同时,丰富低碳投资方式,如更好地运用财政奖补和政府绿色采购等手段,引导私人投资进入非二氧化碳温室气体减排领域。

第三,进一步完善非二氧化碳温室气体减排的顶层设计。一方面,应加快构建中国的 MRV 机制,通过成立专家小组等方式,推动建立科学和统一的非二氧化碳温室气体排放核算框架与方法标准;通过实地试点测试并收集相关工作人员的反馈,确保基础数据核算的可行性与准确性。另一方面,基于中国基本国情,结合排放监测数据,制定针对非二氧化碳温室气体的减排目标、行动计划与时间表,例如在后续的 NDCs 中补充具体的甲烷减排方案。此外,还应加强非二氧化碳温室气体减排的跨部门合作^[44],促进相关战略规划融合,以确保政策设计的系统性与政策实施的高效性,例如成立联合行动小组,或在联合施策时进一步明确各部门的责任范围。此外,还应在独立自主的基础上,积极与具有丰富非二氧化碳温室气体减排经验的国家开展交流与合作,并有效利用国际组织的资源。在政府层面的双边合作方面,可以在现有的中美甲烷减排合作(如《中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》)等国际合作的基础上,深化与其他国家在相关减排领域的技术交流与研究合作。在多边合作方面,可在适当时机加入“全球甲烷协议”及其他相关国际协议与组织。此外,可鼓励更多国内企业参与国际减排合作框架,以更好地借助相关组织的资源推动减排行动。

参考文献 References

- [1] 贾国伟, 杨念, 吴轩浩. 我国非二氧化碳温室气体管控面临的形势及建议[J]. 环境影响评价, 2023, 45(3): 1–7, 16
JIA G W, YANG N, WU X H. The situation and suggestions for the control of non-carbon dioxide greenhouse gas emissions in China[J]. Environmental Impact Assessment, 2023, 45(3): 1–7, 16
- [2] 刘哲, 田春秀, 潘家华, 等. 我国非二氧化碳温室气体控制面临的形势与对策[J]. 环境保护, 2013, 41(23): 41–42
LIU Z, TIAN C X, PAN J H, et al. Situation and countermeasures of non-carbon dioxide greenhouse gas control in China[J]. Environmental Protection, 2013, 41(23): 41–42
- [3] IPCC. Global Warming of 1.5 °C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022
- [4] IPCC. Climate Change 2022 — Mitigation of Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023
- [5] IPCC. Synthesis Report of the Sixth Assessment Report[R/OL]. IPCC, 2023. <https://www.ipcc.ch/ar6-syr/>
- [6] WANG X, TENG F, ZHANG J J, et al. Challenges to addressing non-CO₂ greenhouse gases in China's long-term climate strategy[J]. Climate Policy, 2018, 18(8): 1059–1065
- [7] WANG X X, XU M, LIN B, et al. Reforming China's fertilizer policies: implications for nitrogen pollution reduction and food security[J]. Sustainability Science, 2023, 18(1): 407–420
- [8] WANG X X, DU R Y, CAI H, et al. Assessing the impacts of technological change on food security and climate change mitigation in China's agriculture and land-use sectors[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024, 107: 107550
- [9] SU J, HU C, YAN X, et al. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice[J]. Nature,

2015, 523: 602–606

- [10] 农业农村部. 37 项生态绿色低碳成果在宁推介 科技赋能农业发展新赛道[R/OL]. 2023. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202308/t20230822_6434757.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Thirty-seven ecological, green and low-carbon achievements promoted in Ning, providing a new track of science and technology enabling agricultural development[R/OL]. 2023. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202308/t20230822_6434757.htm
- [11] 夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪. 我国农田温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 834–841
XIA L L, YAN X Y, CAI Z C. Research progress and prospect of greenhouse gas mitigation and soil carbon sequestration in croplands of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 834–841
- [12] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 长江中下游稻区不同水旱轮作模式和氮肥水平对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14): 2484–2499
LIU S W, YIN M, CHU G, et al. Effects of various paddy-upland crop rotations and nitrogen fertilizer levels on CH₄ emission in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(14): 2484–2499
- [13] GU X Y, WENG S M, LI Y E, et al. Effects of water and fertilizer management practices on methane emissions from paddy soils: synthesis and perspective[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(12): 7324
- [14] 宋春燕, 李玉娥, 万运帆, 等. 节水减氮和品种管理对双季稻 CH₄ 的减排效果[J]. 生态学杂志, 2024, 43(3): 724–732
SONG C Y, LI Y E, WAN Y F, et al. Effects of water-saving irrigation, reduced nitrogen application and different cultivars on CH₄ emissions in a double rice cropping system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(3): 724–732
- [15] LI C S, SALAS W, DEANGELO B, et al. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1554–1565
- [16] 王书伟, 吴正贵, 孙永泉, 等. 太湖地区典型轮作与休耕方式对稻田水稻季 N₂O 和 CH₄ 排放量的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 63–71
WANG S W, WU Z G, SUN Y Q, et al. Effects of typical crop rotation systems and land fallow on paddy soil N₂O and CH₄ emissions in Taihu Lake Region of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(1): 63–71
- [17] 许欣, 陈晨, 熊正琴. 生物炭与氮肥对稻田甲烷产生与氧化菌数量和潜在活性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1517–1527
XU X, CHEN C, XIONG Z Q. Effects of biochar and nitrogen fertilizer amendment on abundance and potential activity of methanotrophs and methanogens in paddy field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1517–1527
- [18] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 不同时期施用生物炭对稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 839–848
LI L, ZHOU Z Q, PAN X J, et al. Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 839–848
- [19] 王应和, 吴敏. 牛羊舔砖的研究、应用现状[J]. 中国草食动物, 2011, 31(3): 44–47
WANG Y H, WU M. Status quo of MMUB research and application in cattle and sheep[J]. China Herbivores, 2011, 31(3): 44–47
- [20] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 关于科学利用林地资源 促进木本粮油和林下经济高质量发展的意见[R/OL]. 北京: 中华人民共和国国家发展与改革委员会, 2020(2020-11-08). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202011/t20201124_1251122.html
National Development and Reform Commission. Opinions on scientific utilization of forest resources to promote high-quality development of woody grain and oil crops and understory economy[R/OL]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2020(2020-11-08). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202011/t20201124_1251122.html
- [21] 张秀敏, 王荣, 马志远, 等. 反刍家畜胃肠道甲烷排放与减排策略[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 732–742
ZHANG X M, WANG R, MA Z Y, et al. Enteric methane emissions and mitigation strategies in ruminants[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 732–742
- [22] 廖琴. 全面采用现有减缓策略有助于到 2030 年实现畜牧业甲烷减排目标[J]. 气候变化科学动态监测快报, 2022(11): 13
LIAO Q. Comprehensive adoption of existing mitigation strategies aids in achieving methane emission reduction goals in livestock industry by 2030[J]. Climate Change Scientific Dynamic Monitoring Brief, 2022(11): 13
- [23] LU J B, GAO X Y. Biogas: potential, challenges, and perspectives in a changing China[J]. Biomass and Bioenergy, 2021, 150: 106127
- [24] 刘宇, 匡耀求, 黄宁生. 农村沼气开发与温室气体减排[J]. 中国人口 资源与环境, 2008, 18(3): 48–53
LIU Y, KUANG Y Q, HUANG N S. Rural biogas development and greenhouse gas emission mitigation[J]. China Population

Resources and Environment, 2008, 18(3): 48–53

- [25] 李夏菲, 杨璐, 于书霞, 等. 湖北省油菜测土配方施肥下 N_2O 减排潜力估算[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3817–3823
LI X F, YANG L, YU S X, et al. Estimation of N_2O mitigation potential from rape planting through soil testing and formulated fertilization in Hubei Province[J]. China Environmental Science, 2015, 35(12): 3817–3823
- [26] 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
- [27] TIMILSENA Y P, ADHIKARI R, CASEY P, et al. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1131–1142
- [28] United Nations. Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change[R/OL]. United Nations: 2023. https://unfccc.int/process/parties-non-party-stakeholders/parties-convention-and-observer-states?field_partys_partyto_target_id%5B512%5D=512
- [29] United States Environment Protection Agency. Clean Air Act Overview. Progress Cleaning the Air and Improving People's Health[R/OL]. 2024. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/progress-cleaning-air-and-improving-peoples-health>
- [30] European Union. The Farm to Fork Strategy[R/OL]. 2023. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/293547/de-van-boer-tot-bord-strategie#:~:text=The%20main%20initiatives%20are%3A%201%20an%20evaluation%20and,nitrous%20oxide%20emissions%29%3B%203%20specific%20actions%20targeting%20agriculture%3A,2023>
- [31] New Zealand Legislation. Climate Change Response (Zero Carbon) Amendment Act 2019[R/OL]. 2019. <https://www.legislation.govt.nz/act/public/2019/0061/latest/LMS183736.html>
- [32] 徐磊, 胡惠文, 张伟臣. 畜牧业环境污染防治立法存在问题及完善——基于中国与澳大利亚立法措施的比较[J]. 法制博览, 2017(18): 59–61
XU L, HU H W, ZHANG W C. Problems and perfection of legislation on prevention and control of animal husbandry environmental pollution — based on the comparison of legislative measures between China and Australia[J]. Legality Vision, 2017(18): 59–61
- [33] CHECHERINA P. Using Climate-Smart Rice to Reduce Methane Emissions in Agriculture[R/OL]. 2022. <https://www.ccacoalition.org/zh-CN/news/using-climate-smart-rice-reduce-methane-emissions-agriculture>
- [34] 林斌, 徐孟, 汪笑溪. 中国农业碳减排政策、研究现状及展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 500–515
LIN B, XU M, WANG X X. Mitigation of greenhouse gas emissions in China's agricultural sector: current status and future perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 500–515
- [35] YAO B, ROSS K, ZHU J, et al. Opportunities to Enhance Non-carbon Dioxide Greenhouse gas Mitigation in China[M]. Washington D.C.: World Resources Institute, 2016
- [36] 陈瑞蕊, 王一明, 胡君利, 等. 畜禽粪便管理系统中甲烷的产排特征及减排对策[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 815–823
CHEN R R, WANG Y M, HU J L, et al. Methane emission and mitigation strategies in animal manure management system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 815–823
- [37] 生态环境部. “十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划[R/OL]. 2021. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/04/content_5666421.htm
Ministry of Ecology and Environment. Soil, Groundwater, Agricultural and Rural Eco-Environment Protection Plan During the 14th Five-Year Plan Period[R/OL]. 2021. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/04/content_5666421.htm
- [38] 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
- [39] 吴茵茵, 齐杰, 鲜琴, 等. 中国碳市场的碳减排效应研究——基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J]. 中国工业经济, 2021(8): 114–132
WU Y Y, QI J, XIAN Q, et al. The carbon emission reduction effect of China's carbon market — from the perspective of the coordination between market mechanism and administrative intervention[J]. China Industrial Economics, 2021(8): 114–132
- [40] 冯俏彬, 白雪苑, 李贺. 支持碳达峰、碳中和的财税理论创新与政策体系构建[J]. 改革, 2022(7): 106–116
FENG Q B, BAI X Y, LI H. Fiscal and tax theoretical innovation and policy system construction to support carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Reform, 2022(7): 106–116
- [41] 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
- [42] 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

[43] 金书秦, 林煜, 牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型: 中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. 改革, 2021(5): 29–37

JIN S Q, LIN Y, NIU K Y. Driving green transformation of agriculture with low carbon: characteristics of agricultural carbon emissions and its emission reduction path in China[J]. Reform, 2021(5): 29–37

[44] WANG X X, BODIRSKY B L, MÜLLER C, et al. The triple benefits of slimming and greening the Chinese food system[J]. Nature Food, 2022, 3: 686–693

