

农业食物系统甲烷减排的全链条治理框架与路径

田妮可¹, 汪 瑞¹, 刘蓓蓓^{1,2,*}

1. 南京大学 环境学院 水污染控制与资源绿色循环全国重点实验室, 南京 210023;
2. 南京大学-约翰斯·霍普金斯大学中美文化研究中心, 南京 210093



摘 要 : 甲烷减排对遏制短期气候变暖具有重要意义。农业食物系统作为最主要的人为甲烷排放源, 是我国履行《全球甲烷承诺》、推进农业低碳转型的核心领域。本文构建了农业食物系统“生产-贸易-消费”全链条治理框架, 系统解析了稻田种植、畜牧养殖、粪便管理等生产环节的技术减排路径, 揭示了省际与国际贸易中的隐含排放转移机制, 探讨了膳食结构转型与食物浪费治理的消费端倒逼策略, 综合研判了各减排措施的环境-经济-社会影响、可行性及成本效益, 讨论了不同减排措施在短期效益释放与长期战略布局中的差异化定位, 为全链条、系统性减排政策制定提供科学依据。

关 键 词 : 农业食物系统; 甲烷减排; 全链条治理; 生产-贸易-消费; 综合绩效评估

中图分类号 : X322 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 2097-4981(出版年)0期-fpage-12

DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2025-0017

A Whole-Chain Governance Framework and Pathways for Methane Mitigation in Agri-Food System

TIAN Nike¹, WANG Rui¹, LIU Beibei^{1,2,*}

1. State Key Laboratory of Water Pollution Control and Green Resource Recycling, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2. The Johns Hopkins University-Nanjing University Center for Chinese and American Studies, Nanjing 210093, China

Abstract : Methane mitigation holds important significance in curbing short-term climate warming. As the largest anthropogenic methane source, the agri-food system represents a pivotal domain for China to fulfill the *Global Methane Pledge* and advance agricultural decarbonization. This study constructs a comprehensive “production-trade-consumption” governance framework for methane mitigation across the entire agri-food chain. It evaluates production-stage mitigation technologies in rice cultivation, livestock breeding and manure management; analyzes emission transfer mechanisms embedded in interprovincial and international trade flows; and explores consumption-side approaches such as dietary restructuring and food waste reduction. A multidimensional assessment is further conducted across environmental, economic, social, and feasibility performances, to clarify the distinct contributions of stage-specific strategies in balancing immediate impact with long-term goals. These analyses provide a scientific basis and policy roadmap for systemic, full-chain methane mitigation in China's agri-food sector.

Key Words : agri-food system; methane emission reduction; full-chain governance; production-trade-consumption; comprehensive performance assessment

收稿日期: 2025-04-20; **接受日期:** 2025-05-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (72174085); 国家自然科学基金国家合作研究项目 (W2412026); 江苏省自然科学基金面上项目 (BK20221448)

作者介绍: 田妮可 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为农业食物系统环境影响评估。E-mail: tiannikee@163.com

通讯作者: 刘蓓蓓 (1981—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为生态环境的政策决策、环境与农业气候韧性管理。E-mail: lbeibei@nju.edu.cn

0 引言

甲烷作为仅次于二氧化碳的第二大温室气体，其大气寿命虽仅约为11.8年，但其增温潜能可达二氧化碳的70倍，对其快速减排可有效抑制短期升温^[1-2]。政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第六次评估报告指出，人为甲烷排放已导致约0.5℃的观测温升，成为关键气候强迫因子^[3]。在此背景下，《全球甲烷承诺》确立了到2030年将人为甲烷排放量较2020年基准至少减少30%的核心目标，为实现《巴黎协定》中1.5℃的温控目标提供了关键路径^[4]。农业食物系统是全球最大的人为甲烷排放源，其排放量占人为甲烷排放总量的33%~40%^[5-6]。中国是世界上甲烷排放量较高的国家，2020年的农业食物系统甲烷排放量达到23.39Mt^[6-7]。基于这一排放特征，农业食物系统甲烷减排成为中国履行国际气候承诺的重点领域。2023年颁布的《甲烷排放控制行动方案》系统搭建了农业减排政策框架，重点围绕稻田甲烷排放控制、反刍动物肠道发酵控制以及畜禽粪污资源化利用3个路径展开，标志着中国农业甲烷治理工作迈入以目标为导向的新阶段。

长期来看，中国农业食物系统的甲烷减排空间较大，其减排路径需统筹生产、贸易、消费的整个供应链，通过全链条协同治理实现减排的成本有效性。据测算，农业食物系统甲烷减排潜力最高可达21.52Mt，仅从生产侧减排可削减56.0%的排放量，加上消费侧，削减力度可提升至84.7%^[7-8]，这凸显了多环节联动减排的重要性。

基于此，本文构建了农业食物系统“生产-贸易-消费”的全链条治理框架，系统探讨各环节的甲烷减排路径，梳理现有研究进展与局限，综合研判兼具针对性与系统性的管理策略，为农业食物系统甲烷减排提供全链条治理思路。

1 甲烷减排全链条治理框架

本文首先构建了“生产-贸易-消费”的甲烷减排全链条治理框架，如图1所示。在该框架中，生产环节为甲烷排放的主要贡献环节，也是减排重点；

贸易环节作为衔接生产环节与消费环节的关键纽带，通过优化资源配置，可有效缓解局部地区的高排放压力；消费环节则可通过需求侧调控，倒逼生产系统规模与结构调整，实现甲烷源头减排。三者相互影响、协同作用，形成一个有机闭环。

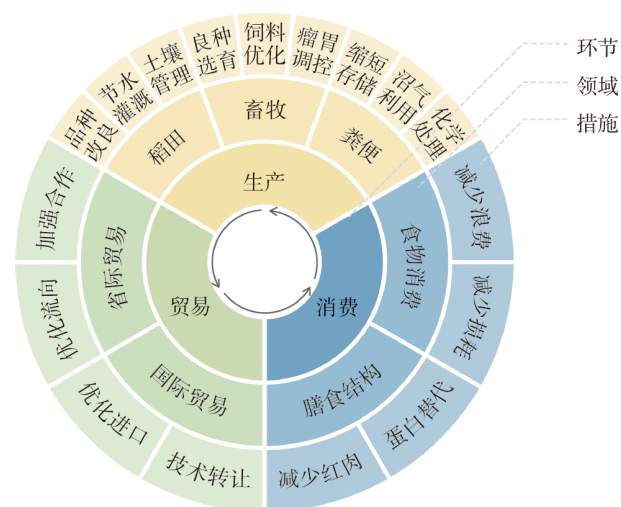


图1 农业食物系统甲烷减排全链条治理框架

Fig.1 Whole-chain governance framework for methane mitigation in agri-food system

具体而言，生产环节是中国甲烷排放的核心源头，主要为水稻种植和畜牧业生产。其中，肠道发酵排放量占比最高，达到43.90%，其次为水稻种植（41.86%）和粪便管理（14.24%）^[7]。从区域分布上看，甲烷排放主要集中于中、西部地区。其中，水稻种植引起的排放主要集中于长江中下游地区，并逐渐向东北地区转移；随着畜牧业生产区域西移，西部地区的甲烷排放量持续增加，其中，西南地区因生猪养殖集中，成为粪便管理相关甲烷排放的重点区域^[7,9]。农业生产关乎粮食安全，因此，必须在保障食品供应的前提下，从生产环节入手落实减排措施，实现农业高质量发展与生态环境的高质量保护。

贸易是造成甲烷排放空间转移的重要作用环节。国际方面，有数据表明，通过国际贸易转移的隐含甲烷排放总量达339.8Mt二氧化碳当量，占全球农业甲烷排放总量的11.6%^[10]。其中，发达国家与大型经济体的消费需求在这一过程中发挥了关键驱动作用，例如，美国和欧盟的农产品消费直接导致墨西哥、

巴西、中国等主要农业生产国产生大量隐含甲烷排放^[10]。国内方面，中国省际贸易网络中的隐含甲烷排放量在2012—2017年维持在11.36~12.10Mt，占同期直接排放量的80%以上，凸显了区域间贸易在国内排放转移中的重要地位^[11]。作为连接生产与消费的桥梁，统筹考虑区域间的产业关联，优化贸易结构，可促进甲烷减排的跨区域综合调控。

农业食物系统消费环节也对甲烷排放有间接贡献。一方面，全球饮食结构持续向高肉类消费转变。由于畜牧业甲烷排放强度显著高于植物性生产，该饮食结构的转变推高了产业链上游的排放负荷^[12]；另一方面，全球每年因食物损失与浪费产生的甲烷排放量接近50Mt^[2]，消费末端仍有巨大减排空间。消费环节可通过需求侧驱动减排倒逼机制，通过减少不合理消费、优化饮食结构和降低食物损耗，促进生产规模和结构优化，从而推动源头减排。

2 生产环节甲烷减排路径分析

农业食物系统生产环节是全球甲烷排放的重点源。其中，稻田系统、畜牧养殖及粪便管理是主要排放源和关键调控领域。针对不同领域的排放机制和特征，可通过技术创新与管理优化形成系统性减排路径，具体措施如下。

2.1 稻田系统减排

稻田系统作为农业生产环节的核心排放源，其甲烷产生源于淹水条件下土壤厌氧环境中产甲烷菌对有机物质的分解。针对稻田系统中甲烷的生成机制，水稻种植领域已形成品种改良、节水灌溉、土壤管理三大减排技术集群。

不同水稻品种的甲烷排放差异受遗传特性与生理机制的综合影响。短生育期品种因淹水时间较短、根系较小、根系氧化活性和收获指数较高以及根系分泌物较少，可减少甲烷累积^[13-14]。基于生理特性的改良方向包括减少根系分泌物和优化碳分配。例如，SUSIBA 2转基因品种通过调控碳代谢路径，在提高水稻淀粉含量的同时，实现单位产量甲烷排放量降低22%~51%^[15]。通过培育和种植可控制水稻分泌物富马酸盐和乙醇的新品种，可使水稻生产的甲

烷排放量减少70%^[16]。然而，要精准选择和培育低甲烷排放品种，仍需对相关生化机制展开深入研究。

水分管理是稻田系统甲烷减排的有效手段，核心为通过节水灌溉打破长期厌氧环境。干湿交替灌溉技术通过周期性排水、落干烤田，改善土壤通气性，提升氧化还原电位，抑制产甲烷菌活性并促进甲烷氧化^[17-18]。一项基于201对观测数据的荟萃分析结果显示，非连续淹没较连续淹没减少了53%的甲烷排放量，且减排潜力因具体时间比例等因素存在差异^[19]。中国北方稻区广泛应用的控制灌溉技术以根层土壤含水率作为控制指标确定不同生育期的灌水时间和灌水量，可达到节水和减排的双重效益^[20]。直接播种技术通过减少移栽过程的淹水时间实现减排并节省劳动力成本^[21]。水稻旱作模式，通过调控产甲烷菌群落结构与碳源供给，相比于常规水作模式可降低生育期内约46%的甲烷排放量^[22]，具有良好的甲烷减排潜力。

土壤管理通过调节有机质分解路径和微生物群落减少甲烷产生。在有机改良剂方面，生物炭作为常用土壤改良剂，可通过增加土壤通气性和吸附产甲烷菌代谢产物实现40%以上的减排，经生物炭处理后，土壤生产水稻的碳足迹显著减少^[23-24]。采用秸秆错季还田策略可避免秸秆施用增加甲烷排放，在亚洲温带地区，秸秆秋季还田比春季还田可降低甲烷浓度24%~65%^[25-26]。化肥调控方面，可使用含硫肥料，通过与产甲烷菌的竞争抑制作用实现甲烷减排^[27]。

综上，结合各地区水稻生产特征，提出如下区域针对性甲烷减排建议：华东、华中、华南等重点生产区域在水稻生长期降水充沛，可重点推广间歇灌溉等水分管理措施，并探索“稻渔共生”“稻鸭共生”等生态循环模式，以充分挖掘减排潜力、提升农民经济收益；北方稻区水资源短缺但可利用平原规模化种植优势，聚焦节水灌溉与秸秆生物炭还田等管理措施，种植高产、低排放品种，在节水的同时提高养分利用效率和水稻产量。

2.2 畜牧养殖调控

在畜牧养殖过程中，反刍动物（如牛、羊等）会在消化过程中由肠道微生物发酵饲料，从而产生

甲烷,并通过打嗝或呼气排出。据估计,此类来源的甲烷排放量占中国农业甲烷总排放量的43.9%^[7]。削减这一排放源的主要应对措施包括牲畜品种选育、饲料配方优化、瘤胃调控技术等。

品种选育方面,可通过遗传手段培育低甲烷排放的品种。当前,全球范围内仅有少数育种计划将甲烷排放指标纳入考量。理论模型显示,定向选育高产、低排放奶牛品种可在10年内实现11%~26%的甲烷减排量,结合基因组选择技术可进一步提升减排效率^[28]。荷兰通过整合基因组测序与遗传标记技术,已筛选出甲烷排放强度降低13%~24%的优质奶牛种群^[29];新西兰则在绵羊育种中证实遗传性状优化可同步维持生产性能与提高甲烷减排效率^[30]。该措施面临的核心挑战在于表型数据获取。甲烷排放监测需使用专用设备进行长期个体追踪,然而现有技术条件下,大规模数据采集的准确性与经济性仍难以保证。

饲料配方优化主要通过改变瘤胃发酵底物,抑制产甲烷过程。提高饲料效率可使动物获取的能量更多,增加肉、奶产量,从而减少动物养殖数量实现减排^[31]。研究表明,提高日粮精粗比能够有效降低后备奶牛甲烷排放量和甲烷能与总能的比值,同时提高干物质采食量以及粗蛋白质的表观消化率^[32];而低精料比例会显著降低周岁后荷斯坦奶牛的生产性能、营养物质消化率和瘤胃内丙酸的相对含量,同时显著提高瘤胃甲烷产量和甲烷转化因子^[33]。补充脂质(如椰子油、棕榈仁油)可通过抑制产甲烷菌活性和改变氢代谢途径实现减排。有研究表明,6%的脂肪酸浓度能够降低15%甲烷排放量^[34]。

瘤胃调控技术主要通过改变瘤胃菌群结构抑制产甲烷过程,目前多采用各类饲料添加剂、补充剂及疫苗等方法。一些特定饲料添加剂,如3-硝基丙醇(3-NOP),能够抑制瘤胃中甲烷生成的最后一步,从而抑制甲烷生成。多项体内研究表明,此类特定添加剂对牛的甲烷减排量高达80%,对绵羊可达29%,且对反刍动物健康无不良影响^[35-36]。在饲料中添加红海藻(*Asparagopsis*)补充剂时,受其中的溴仿等化合物作用影响,反刍动物消化系统中的甲烷生成也可得到抑制。肉牛体内研究数据表明,饲喂0.10%和0.20%红海藻的阉牛,其甲烷减排量分别可高达

40%和98%,体重分别增加53%和42%,但存在残留物安全性与适口性问题^[37]。疫苗策略尚处于研发阶段,针对产甲烷菌表面抗原的免疫应答可降低体外甲烷产量,但体内试验效果仍待验证^[38]。

整体而言,中国西南、西北地区是畜牧养殖甲烷排放的热点地区,且相比于东、中部地区,受益于更高的土地可用性和经济效益,其更适宜推进规模化工业养殖^[7,39],提高畜牧业饲料效率和生产力成为这些地区甲烷减排的重要路径。在实施上述策略时,需考虑系统适应性,如粗放化放牧系统更适合应用遗传改良与疫苗技术,集约化养殖系统则可综合应用饲料添加剂与精准营养调控措施。

2.3 粪便管理优化

农业生产中的粪便也是甲烷产生的重要源头,主要形成过程为液体粪肥中的有机质在厌氧储存条件下通过微生物进行代谢。针对粪便收集、储存和利用环节,目前形成了以缩短储存周期、生物能转化和化学调控为核心的减排技术路径。

缩短储存周期能够减少有机物在厌氧环境中的滞留时间,从而直接降低甲烷排放量。例如,提高清粪频率、定期冲洗笼舍、加速粪污转移至露天储存池等措施,可以有效减少厌氧反应时间窗口,实现减排^[40]。固液分离也可以缩短液体粪肥的厌氧反应时间,通过重力沉淀池或机械离心装置将粪肥分为固体与液体组分:固体组分因碳含量较高,经堆肥或干燥后用作垫料,减少厌氧降解风险;液体组分因碳源较少,甲烷生成潜力显著下降。研究表明,分离出的固体比例越高,甲烷减排效果越显著^[41]。

生物能转化通过在沼气收集与利用时使用厌氧消化系统将甲烷转化为能源,实现减排与资源化双重目标。例如,在气密式储存设施中,甲烷可被完全捕获并用于发电或供热^[41]。此外,粪污与秸秆共消化技术通过优化碳氮比提升产气效率,成为新兴发展方向^[42-43]。尽管亚洲地区已推广数百万个小型户用沼气池,但大型工业化沼气工程仍受限于运营成本,需进一步进行技术突破与政策补贴支持^[44]。

化学调控处理通过改变粪污理化性质抑制产甲烷菌活性,从而实现甲烷减排。例如,絮凝技术通过添加聚合硫酸铁等试剂促进固体絮凝并加速分离,

可使液态粪肥甲烷排放量减少90%~98%^[45]；酸化处理通过调节pH至6.0以下，直接抑制产甲烷菌代谢活性，实现甲烷和一氧化二氮排放量分别降低89%与76%，同时减少氨挥发^[46]，但此类技术需考虑化学药剂成本与环境安全风险问题。

总体而言，中国西南部生猪养殖区作为甲烷排放热点区域，其粪便管理问题尤为突出^[7]。在实际应用过程中，需根据农场规模、经济条件及环境需求选择适宜策略，如小型养殖场可优先考虑缩短储存周期与固液分离；规模化企业可结合厌氧消化系统，进一步获得能源收益。

3 贸易环节甲烷减排路径分析

贸易作为连接不同地区农业生产与消费的纽带，在农业甲烷系统性减排调控中具有巨大潜力。从省际贸易和国际贸易两个维度看，省际贸易需聚焦农产品流通过程的优化，利用区域比较优势，优化分工格局，减少因贸易活动产生的额外甲烷排放；国际贸易则需着重关注消费地对生产地排放的间接影响，通过优化全球贸易资源配置，降低跨国贸易中的甲烷排放。具体减排路径如下。

3.1 国内省际贸易优化

中国食物系统中，谷物和肉类生产与消费区域分化特征显著，食品贸易供需分离促使甲烷排放发生转移和流动。数据显示，2017年省际贸易中总隐含甲烷排放量达到11.48Mt，温室气体跨区域转移比例从57.01%提升至71.74%^[11,47]。省际贸易构建的农业资源流通网络，因各省份^①自然条件、产业基础和生产模式的差异，形成了不同的农业甲烷排放格局，为通过贸易手段实现甲烷减排提供了重要突破口。围绕甲烷减排目标，中国省际贸易可从优化农产品贸易流向和强化省际合作机制建设两方面制定策略。

在优化农产品贸易流向方面，各省份在农业生产消费结构与甲烷排放强度上存在明显差异。研究表明，江苏、浙江、山东、河南和广东等省份为输入甲烷排放量的主要贡献方，而内蒙古、黑龙江等

省份为输出隐含甲烷排放量的重要源头^[11]。以稻米贸易为例，黑龙江稻米供应覆盖了全国超90%的地区，长距离贸易流通叠加其生产环节的甲烷排放，导致东北平原成为输出隐含甲烷排放的热点地区。基于华东、华中和华南地区稻田甲烷排放强度较高，东北地区相对较低的分布格局^[48]，可引导东北地区等低排放区域的稻米产品进行贸易输出并建立相应生态补偿机制；针对长江中下游地区等稻米产量较高的区域，重点挖掘本地减排技术的应用潜能，并提高当地稻米自给率，可有效降低由长距离跨区域贸易导致的隐含甲烷排放和转移。

强化省际合作机制建设可提高协同减排力度。扩大农业部门的贸易开放度，促进不同地区之间的技术转让和经验共享对减排有显著促进作用，尤其是在欠发达地区^[49]。当前，中国食品供需格局基本稳定，形成了以13个粮食主产区为核心、区域协同保障的供给格局。北京、上海等城市化地区食品依赖外省供应，运输、加工环节的甲烷排放不容忽视；青海、西藏等地以畜牧业为主，粮食依赖外部供给，其畜牧业甲烷排放是减排重点^[47]。建立省际合作机制可实现优势互补，主要消费区凭借技术和资金优势，为生产区提供技术支持，推广高效生产技术，减少投入物料浪费。为此，需建立统一规范的省际农产品甲烷排放监测核算体系，将生产环节直接排放与贸易隐含排放纳入全链条统计，促进减排责任分配，完善农业甲烷国家核证自愿减排量方法学，将农业甲烷减排规模纳入碳市场交易范畴。

3.2 国际贸易结构调整

在全球化深入发展的当下，国际贸易网络覆盖范围不断扩大，农产品跨境流动日益频繁，这一过程中的农业甲烷排放问题也愈发凸显。研究表明，部分“一带一路”国家在贸易规模扩张的过程中，出现了以牺牲环境为代价换取经济增长的现象^[50]。在此背景下，通过国际贸易路径推动农业甲烷减排，成为实现全球碳中和目标的关键环节，优化进口来源、促进甲烷减排技术转让是国际贸易层面农业甲烷减排的核心策略。

① 指省级行政区，包括省、自治区、直辖市，下同。

优化进口来源需优先选择低排放强度的进口渠道。在农产品进出口贸易中，不同地区的排放强度差异是影响甲烷排放的核心因素。数据显示，巴西农业部门出口至中国所蕴含的甲烷排放量在所有中国进口路径中位居首位^[51]。中国作为全球重要的农产品进口大国，大量进口了来自巴西、乌拉圭和阿根廷的牛肉，但这些国家的牛肉生产排放强度显著高于中国，由此产生的额外隐含甲烷排放量达到0.4729Mt^[52]。为有效遏制进口环节的甲烷增量，中国应优化进口策略，在同等条件下优先选择排放强度较低的国家作为牛肉进口来源。同时，在其他农产品进口决策过程中，也需严格遵循这一原则，优先与农业生产甲烷排放管控良好的国家开展贸易合作，加快构建“低碳农产品”认证体系，将环境影响指标纳入贸易协定，从源头上降低国际贸易活动中的甲烷排放量。

促进甲烷减排技术转让可以有效降低地区的排放强度。当前，全球甲烷减排技术发展存在显著的不均衡性，不同国家在技术研发与应用能力上差距较大。尽管中国在甲烷减排技术领域取得了一定进展，但农业相关的甲烷减排技术依然严重稀缺，难以满足农业领域甲烷减排的实际需求^[53]。因此，中国一方面需深化与发达国家在农业甲烷减排技术领域的合作，引进畜牧高效饲料添加剂、稻田减排新种植模式等生产端减排技术；另一方面，可依托“一带一路”倡议，凭借自身技术优势，与沿线国家开展农业技术合作，推广成熟减排技术应用与实践。通过双向技术交流，推动全球农业甲烷减排技术共享，实现各国农业减排协同发展。

4 消费环节甲烷减排路径分析

在农业甲烷减排中，消费环节减排至关重要。近年来，全球反刍动物肉类和牛奶消费量的快速增长，可能抵消生产端的甲烷减排成效。此外，食物损失与浪费问题也间接引发大量甲烷排放。消费侧的饮食结构调整和食物损失浪费的减少，能够在生产端产生倒逼作用，目前已被证明是最有效的甲烷减排措施之一^[7]。

4.1 饮食结构调整

全球肉类消费呈显著增长趋势。目前，中国人均家禽和猪肉消费量已超过《中国居民膳食指南（2022）》建议的代谢需要量，导致肥胖、高血脂、高血压、高血糖等健康问题频繁发生^[54]。加之反刍动物每单位肉类的甲烷排放量远超其他常见食物，使得调整饮食结构成为应对环境与健康双重挑战的必然选择，对减少农业甲烷排放量、促进可持续发展意义重大。

引导高消费群体减少反刍动物肉类消费，可显著降低甲烷排放量。营养调查数据表明，高收入、高教育程度的城市人群反刍动物肉类消费量较高，其饮食行为改变对甲烷减排影响显著^[54]。在各类权威饮食指南推荐的饮食模式中，EAT-Lancet健康膳食情景因大幅减少动物性食物消费，在甲烷减排方面潜力最大，预计到2060年可累积实现37%（343.31Mt）的甲烷减排^[55]。同时，通过媒体宣传、社区科普等渠道，向高消费人群普及反刍动物肉类生产的环境影响和红肉的健康风险，可促使其主动降低牛肉、羊肉等食用频率，采用低排放饮食结构，助力甲烷减排目标的实现。

推广家禽肉类、植物性蛋白质及培养肉、昆虫蛋白等替代蛋白质的消费，能够多维度改善环境效益。这些替代蛋白质在显著降低饮食过程中甲烷排放量的同时，还能减少农业用地需求，降低因森林砍伐产生的二氧化碳排放。研究数据显示，若依据《中国居民膳食指南（2022）》，采用动物性食物消费量较低推荐值、植物性食物消费较高推荐值的饮食结构，预计到2060年可累积实现30%（284.34Mt）的甲烷减排量^[55]。

此外，由于水稻的生产过程中甲烷排放量较高，调整主粮结构，增加小麦、玉米、土豆等其他主粮的消费比例，同样有助于减少整体食物消费环节的甲烷排放量以及进一步优化膳食结构，形成更加低碳、健康的饮食模式。

4.2 食物浪费治理

全球粮食系统仍面临粮食安全的严峻挑战，然而，每年大约有三分之一的食物在生产至消费的链

条中被损失或浪费,相关甲烷排放量达50Mt^[6]。减少食物浪费和损失不仅是粮食安全与资源效率问题,也是减少甲烷排放量的关键举措。具体可从供应链损耗控制与消费端减少浪费两个维度着手。

在供应链损耗控制方面,技术提升和资源化利用是核心策略。在发展中国家,由于冷链技术匮乏以及运输过程中的不必要损耗,大多数食物浪费发生在农场和配送阶段。对此,可通过强化冷链技术应用与智能监测系统,提升易腐农产品的储存运输效率,减少腐败损耗;对新鲜农产品、肉类和海鲜的塑料包装进行改进,从而延长食品购买后的保质期,减少变质^[56];同时,将加工残渣和未变质过剩食品等食物废物通过生物转化技术制成生物肥料或沼气,从而在避免填埋产生的甲烷排放的同时,实现资源的循环利用,契合循环生物经济对可持续废物管理的要求^[57]。

在消费端减少浪费方面,重塑消费习惯是核心策略,需从消费者行为干预和餐饮服务两方面入手。在行为干预方面,优化食品日期标签标识,以减少消费者对“最佳食用期”与“保质期”的认知混淆,结合社区教育、媒体宣传推广“按需购买”“适度备餐”理念,可在源头减少家庭食物囤积与过期丢弃现象,该策略已在英国验证有效并得到推广^[58]。在餐饮服务领域,推广“小分量菜品”“自助餐按需取餐”等模式和价格机制(如小份菜折扣)引导理性消费,并对废物进行跟踪和分析记录,优化食品采购和准备,以最大限度地减少浪费。

5 全链条甲烷减排措施的综合绩效研判

作为目前甲烷减排的关键领域,农业食物系统减排治理需统筹生产、贸易、消费全链条的措施协同。本章对各环节的不同措施建立包含环境-经济-社会影响及可行性的多维评估矩阵,总结并对比不同措施的实施成本、效益和效益释放周期,开展综合绩效评估,以期对不同场景减排策略的差异化选择提供理论依据。

5.1 环境-经济-社会影响及可行性分析

不同农业食物系统的甲烷减排措施实践受技术

适配性、成本有效性、社会接受度等多重约束,本文基于已有研究,从环境、经济、社会及可行性等维度进行分析,结果如图2所示。

在环境效益维度,各项减排措施均展现出可观的甲烷减排潜力。当减排潜力超过50%时,可认定为具备较大减排效益,典型措施包括节水灌溉(53%)^[19]、水稻育种(51.0%)^[59]、生物炭还田(40%~51.8%)^[23-24]以及饮食结构调整(49%~59%)^[55]等。多数减排措施未产生额外环境负担,且部分措施具备协同效益,如生物炭还田在减少甲烷排放量的同时,可降低16.94%~20.51%的氧化亚氮(N₂O)排放量并促进土壤固碳^[60]。然而,节水灌溉在非连续淹水环境下,可能加剧N₂O排放、削弱土壤固碳能力并增加杂草滋生风险^[19];粪便化学处理则面临长期环境影响不确定性及土壤酸化等安全隐患。在资源消耗方面,部分措施可实现水、土地、能源节约与甲烷减排的协同收益。例如,节水灌溉较传统技术节水20%~30%^[61];畜牧良种选育与饲料优化通过提升消化率和产出率减少饲料消耗,进而降低土地和水资源压力^[62];沼气利用可实现沼渣肥料化与能源自给,有效减少能源消耗^[63]。

在经济效益维度,高产低排放水稻选育、生物炭应用及畜牧良种推广均能通过提升产量和生产效率创造经济收益。例如,饲料优化中的低蛋白日粮和提高精料比技术可减少饲料成本,并已得到牧原、新希望等农牧企业的商业运用。沼气工程通过能源生产与有机肥供应,促进农户增收^[44]。同时,多数减排措施的实施都需要经济支持,生产阶段的技术应用、贸易阶段的省际合作及消费阶段的宣传教育均需额外资金投入。例如,沼气工程的小规模农户因初始投资与运营成本较高,需依赖可再生能源补贴及碳交易市场实现盈利^[44];调整牛肉进口来源可能增加采购成本,省际水稻贸易中的生态补偿可达49.557亿元^[64];消费者教育活动和标准化日期标签等消费干预措施在美国的年度实施成本达1.26亿~5.95亿美元^[56];消费产品选择中的新兴养殖肉的生产成本较传统肉制品高出100~10000倍^[65]。

在社会效益维度,土壤管理中秸秆还田、畜牧瘤胃调控以及缩短粪便存储时间等技术由于需要更频繁的场地操作,增加了人力投入成本。低甲烷畜

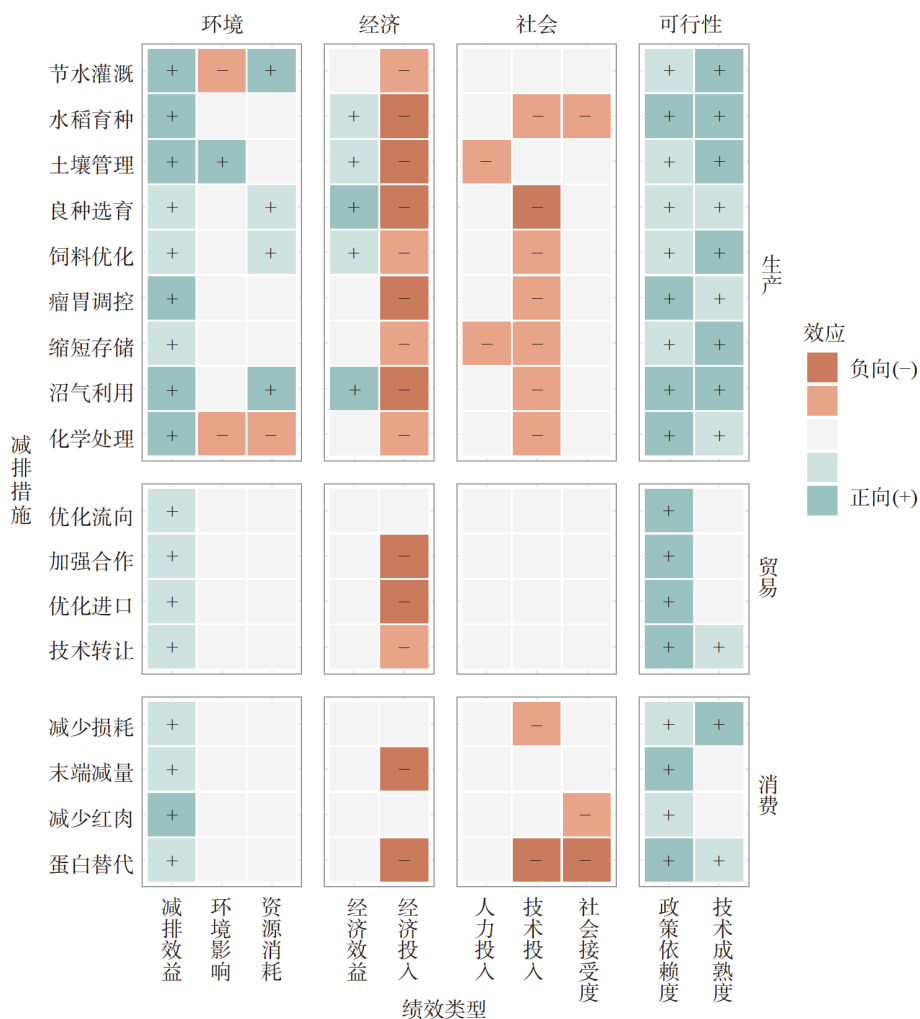


图2 减排措施实施的环境-经济-社会影响及可行性分析

Fig.2 Analysis of the environmental-economic-social impacts and feasibility of emission reduction measures implementation

牧品种培育及新型蛋白肉研发则受制于基因分型的不确定性与高昂的技术成本，亟待加大技术研发投入与推进技术迭代升级。从社会接受度来看，转基因水稻育种尚未被农民和消费者广泛接受，在实际应用中受阻；农业食物系统长期存在的种植与养殖分离格局，导致种养结合生产模式的调整面临固有产业结构的制约^[47,66]；减少红肉消费、推广蛋白替代的策略，与当前饮食消费习惯趋势相悖，难以在短期内获得广泛社会认同。

在可行性维度，贸易与消费阶段的减排举措涉及生产布局、贸易网络及消费模式的系统性调整，高度依赖政策制度变革，其应用可行性受区域资源禀赋差异显著影响，成本效益需通过跨区域利益再

分配实现，对碳定价、生态补偿等政策与市场激励机制依赖度高。生产阶段减排措施的应用成效也依赖于政策引导。其中，农村沼气工程已在中国形成规模效应，累计建成沼气池超3000万个，但项目盈利仍依赖政策补贴。“十三五”期间，中央政府的500亿元农村沼气项目投资为其发展奠定经济基础。瘤胃调控添加剂（如3-NOP）虽已在全球40多个国家得到应用，但因对生产率提升有限且缺乏非饲养场系统长期研究，在发展中国家的推广受阻，尚未在中国上市。粪便化学减排技术本身不会带来实际经济效益，缺乏政策驱动，难以规模化应用。从技术成熟度来看，多数减排举措已具备研究与应用基础，且部分已实现商业化，但品种选育优化类技术因基

因型鉴定困难、作用机理不明、技术成熟度不足，其大规模推广应用受到制约。

5.2 成本效益综合研判

在环境-经济-社会影响及可行性分析基础上，进一步整合减排措施的成本投入规模、效益产出水平及效益释放周期进行综合研判（图3），厘清不同减排措施在短期效益与长期策略方面的差异化定位，为跨期减排政策的制定提供决策参考。

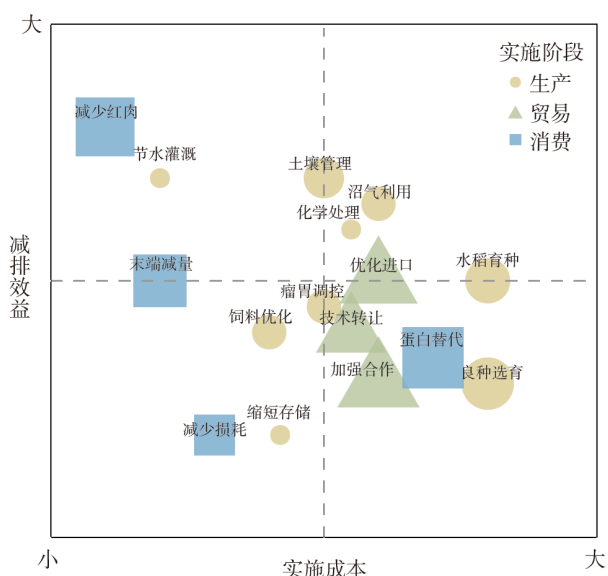


图3 减排措施实施成本效益综合评价

Fig.3 Comprehensive evaluation of the cost-effectiveness of emission reduction measures implementation

注：未纳入没有效益或成本参考数据的减排措施，形状大小代表效益周期长短。

生产阶段的减排措施以技术调整为主，多数效益释放周期较短。其中，水稻种植系统节水灌溉、畜牧饲料优化等技术无需额外建设成本，可在短期内实现高效益的减排效果，还能通过更高的资源利用效率减少对水、土地资源的消耗，协同实现经济增收与甲烷减排，适用于早期快速推广。而育种技术（如低甲烷排放水稻品种选育）与沼气工程研发成本或建设投入较高，效益适中且周期较长，技术成熟度与商业化运营依赖于持续的资金投入，短期减排效益释放受技术与成本的限制。针对反刍动物瘤胃发酵的减排措施由于动物的生理特性，减排潜力相对有限，难以通过技术手段实现大幅减排^[67]。

贸易阶段和消费阶段的减排均需依赖于政策引导逐步推进，减排效益释放周期较长。贸易阶段的措施调整可能会影响现有生产与贸易格局，需要短期资金补贴及中长期政策引导的介入。消费阶段的行为改变表现出低成本、高效益的特点，无需额外技术投入，但受消费习惯惯性制约，需通过长期引导、市场激励（如碳标签制度）等手段渐进式推进。若能形成减少反刍动物消费的长期消费偏好和行为习惯，从长时间尺度看，其减排潜力将十分可观^[7]。此外，新型蛋白替代技术（如养殖肉技术）目前生产成本极高，其发展需要更长的投资周期以支撑商业推广。

6 结论与展望

6.1 结论

本研究系统构建了农业食物系统“生产-贸易-消费”全链条甲烷协同治理框架，揭示了多环节联动的减排增效机制。在生产环节，稻田节水灌溉、畜牧品种选育与饲料优化、粪便厌氧消化等技术已展现显著的减排潜力，且采用区域差异化策略，如东、中部地区采用稻田水分管理、西部地区采用规模化养殖，可进一步释放减排效能；贸易环节需关注隐含排放的空间转移特征，通过省际贸易流向优化与低排放强度国家贸易合作，降低跨区域与跨国贸易的额外隐含排放；消费环节依赖膳食结构转型与食物浪费治理，通过引导高消费群体减少反刍动物肉类消费、推广植物基替代蛋白及强化供应链损耗控制，形成需求侧倒逼减少生产排放。

6.2 展望

农业食物系统的甲烷减排需统筹长短期目标，立足区域资源禀赋与发展阶段，根据不同环节甲烷减排措施的环境-经济-社会多维综合绩效，制定区域异质的系统性、差异化、全链条减排实施方案，提高减排的科学性和有效性。具体而言，短期内生产端技术措施减排效益显著，投资回报周期短，建议优先推广；同时，通过建立政策引导与市场驱动相结合的激励机制，对高初始投资措施（如沼气工程、育种技术）优先给予财政补贴、税收降低等政

策支持, 引导社会资本投入高初始投资领域, 缓解技术研发与推广壁垒, 推动生产端减排技术的持续发展。中长期则需在贸易与消费端推动涉及产业链重整与社会认知转型的系统性变革, 充分释放长期减排效益。

未来研究需持续关注在农业食物系统“生产-贸易-消费”全过程中, 甲烷减排与农业生产效率提升、资源集约利用、民生保障、贸易安全、膳食结构转型等多维目标间的协同机制, 为中长期系统性减排政策制定提供科学依据和决策参考。

参考文献

- [1] Saunio M, Jackson R B, Bousquet P, et al. The growing role of methane in anthropogenic climate change[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(12): 120207.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: The physical science basis[R]. Geneva, 2021.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2023: Synthesis report[R]. Geneva, 2023.
- [4] International Energy Agency. Global methane pledge[R]. Paris, 2022.
- [5] Saunio M, Stavert A R, Poulter B, et al. The global methane budget 2000–2017[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1561–1623.
- [6] United Nations Environment Programme. Global methane assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions [R]. Nairobi, 2021.
- [7] Duan Y, Gao Y, Zhao J, et al. Agricultural methane emissions in China: Inventories, driving forces and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(36): 13292–13303.
- [8] 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(1): 9694.
- [9] Xu Z, Zheng Y, Wu Y. Paving the way for sustainable agriculture: An analysis of evolution and driving forces of methane emissions reduction in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 202: 107392.
- [10] Han M, Zhang B, Zhang Y, et al. Agricultural CH₄ and N₂O emissions of major economies: Consumption-vs. production-based perspectives[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 276–286.
- [11] Pan H, Zheng X, Wu R, et al. Agriculture related methane emissions embodied in China's interprovincial trade[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 113850.
- [12] 王晓, 齐晔. 我国饮食结构变化对农业温室气体排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(10): 1876–1883.
- [13] Setyanto P, Makarim A K, Fagi A M, et al. Crop management affecting methane emissions from irrigated and rainfed rice in Central Java (Indonesia)[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 85–93.
- [14] Malyan S K, Bhatia A, Kumar A, et al. Methane production, oxidation and mitigation: A mechanistic understanding and comprehensive evaluation of influencing factors[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 572: 874–896.
- [15] Su J, Hu C, Yan X, et al. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice[J]. *Nature*, 2015, 523(7562): 602–606.
- [16] Jin Y, Liu T, Hu J, et al. Reducing methane emissions by developing low-fumarate high-ethanol eco-friendly rice[J]. *Molecular Plant*, 2025, 18(2): 333–349.
- [17] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1): 69–76.
- [18] 李婷婷, 冯钰枫, 朱安, 等. 主要节水灌溉方式对水稻根系形态生理的影响[J]. *中国水稻科学*, 2019, 33(4): 293–302.
- [19] Jiang Y, Carrijo D, Huang S, et al. Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: A global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2019, 234: 47–54.
- [20] 孙小淋, 杨立年, 杨建昌. 水稻高产节水灌溉技术及其生理生态效应[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(3): 253–257.
- [21] Liu S, Zhang Y, Lin F, et al. Methane and nitrous oxide emissions from direct-seeded and seedling-transplanted rice paddies in southeast China[J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1): 285–297.
- [22] 李大明. 免耕和秸秆覆盖旱作稻田甲烷排放及甲烷产生菌群落结构和数量的变化特征[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [23] Somboon S, Rossopa B, Yodda S, et al. Mitigating methane emissions and global warming potential while increasing rice yield using biochar derived from leftover rice straw in a tropical paddy soil[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 8706.
- [24] 秦晓波, 李玉娥, Wang H, 等. 生物质炭添加对华南双季稻田碳排放强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 226–234.
- [25] Takakai F, Goto M, Watanabe H, et al. Effects of the autumn incorporation of rice straw and application of lime nitrogen on methane and nitrous oxide emissions and rice growth of a high-yielding paddy field in a cool-temperate region in Japan [J]. *Agriculture*, 2021, 11(12): 1298.
- [26] Song H J, Lee J H, Jeong H C, et al. Effect of straw incorporation on methane emission in rice paddy: conversion factor and smart straw management[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2019, 62 (1): 70.
- [27] Yagi K, Sriphrom P, Cha-un N, et al. Potential and promising-ness of technical options for mitigating greenhouse gas emissions from rice cultivation in Southeast Asian countries[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 66(1): 37–49.
- [28] de Haas Y, Windig J J, Calus M P L, et al. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection[J]. *Journal of Dairy*

- Science, 2011, 94(12): 6122–6134.
- [29] de Haas Y, Veerkamp R F, Jong G D, et al. Selective breeding as a mitigation tool for methane emissions from dairy cattle[J]. *Animal*, 2021, 15: 100294.
- [30] Rowe S, Hickey S, Jonker A, et al. Selection for divergent methane yield in New Zealand sheep - A ten year perspective [C]// Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics. Armidale, Australia: 2019.
- [31] Reynolds C K, Crompton L A, Mills J A N. Improving the efficiency of energy utilisation in cattle[J]. *Animal Production Science*, 2011, 51(1): 6–12.
- [32] 李斌昌, 董利锋, 王贝, 等. 日粮不同精粗比对9月龄后备奶牛甲烷排放与生长性能及营养物质消化率的影响[J]. *饲料工业*, 2019, 40(11): 12–18.
- [33] 董利锋, 杨修竹, 高彦华, 等. 日粮不同NDF/NFC水平对周岁后荷斯坦奶牛生产性能、营养物质消化率、瘤胃发酵特征和甲烷排放的影响[J]. *草业学报*, 2021, 30(2): 156–165.
- [34] Patra A K. The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: A meta-analysis[J]. *Livestock Science*, 2013, 155(2–3): 244–254.
- [35] Almeida A K, Cowley F, McMeniman J P, et al. Effect of 3-nitrooxypropanol on enteric methane emissions of feedlot cattle fed with a tempered barley-based diet with canola oil[J]. *Journal of Animal Science*, 2023, 101: skad237.
- [36] Martínez-Fernández G, Abecia L, Arco A, et al. Effects of ethyl-3-nitrooxy propionate and 3-nitrooxypropanol on ruminal fermentation, microbial abundance, and methane emissions in sheep[J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(6): 3790–3799.
- [37] Kinley R D, Martinez-Fernandez G, Matthews M K, et al. Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120836.
- [38] Wedlock D N, Pedersen G, Denis M, et al. Development of a vaccine to mitigate greenhouse gas emissions in agriculture: Vaccination of sheep with methanogen fractions induces antibodies that block methane production in vitro[J]. *New Zealand Veterinary Journal*, 2010, 58(1): 29–36.
- [39] Wang Y, Zhu Z, Dong H, et al. Mitigation potential of methane emissions in China's livestock sector can reach one-third by 2030 at low cost[J]. *Nature Food*, 2024, 5(7): 603–614.
- [40] Ambrose H W, Dalby F R, Feilberg A, et al. Additives and methods for the mitigation of methane emission from stored liquid manure[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 229: 209–245.
- [41] VanderZaag A C, Baldé H, Crolla A, et al. Potential methane emission reductions for two manure treatment technologies[J]. *Environmental Technology*, 2018, 39(7): 851–858.
- [42] Shen F, Li H, Wu X, et al. Effect of organic loading rate on anaerobic co-digestion of rice straw and pig manure with or without biological pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 155–162.
- [43] 孟艳, 李屹, 杜中平, 等. 蔬菜秸秆与牲畜粪便共消化特性及关键微生物分析[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(S1): 136–148.
- [44] 陈廷贵, 赵梓程. 规模养猪场沼气工程清洁发展机制的温室气体减排效益[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 210–215.
- [45] Cameron K C, Di H J. Discovery of a new method to reduce methane emissions from farm dairy effluent[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(11): 3543–3555.
- [46] Sokolov V, VanderZaag A, Habtewold J, et al. Greenhouse gas mitigation through dairy manure acidification[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(5): 1435–1443.
- [47] Xuan X, Zhang F, Deng X, et al. Measurement and spatio-temporal transfer of greenhouse gas emissions from agricultural sources in China: A food trade perspective[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 197: 107100.
- [48] 夏唯一, 樊畅, 张戈丽. 基于优化IPCC方法的中国稻田甲烷排放量估算[J]. *生态学报*, 2024, 44(21): 9826–9835.
- [49] Wang W, Chen Y, Pei X. Can agricultural trade openness facilitate agricultural carbon reduction? Evidence from Chinese provincial data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 441: 140877.
- [50] Xiang T, Du M, Yang L, et al. Impacts of trade facilitation on greenhouse gas emissions in the Belt and Road Initiative countries[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 209: 107777.
- [51] Cheng Z, Liu X. Methane emissions embedded in China's international trade and domestic production networks: A linkage level study on the evolution and driving factors[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 485: 144372.
- [52] Chen K, Huang T, Zhang X, et al. Drivers of global methane emissions embodied in international beef trade[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(16): 11256–11265.
- [53] Jiang J, Yin D, Sun Z, et al. Global trend of methane abatement inventions and widening mismatch with methane emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2024, 14(4): 393–401.
- [54] 杨云淇, 项春, 贾小芳, 等. 2018年中国成年居民肉类消费状况和影响因素分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2024, 36(10): 1185–1190.
- [55] 华而实, 陈敏鹏, 崔焱绒. 健康膳食对农业甲烷排放的影响分析[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(5): 559–572.
- [56] Read Q D, Muth M K. Cost-effectiveness of four food waste interventions: Is food waste reduction a “win-win?”[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105448.
- [57] Du C, Abdullah J J, Greetham D, et al. Valorization of food waste into biofertiliser and its field application[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187: 273–284.
- [58] Hanson C, Mitchell P. The business case for reducing food loss and waste[R]. *Champions* 12.3, 2017.
- [59] Du L, Wang Y, Shan Z, et al. Comprehensive analysis of SUSI-BA2 rice: The low-methane trait and associated changes in soil

- carbon and microbial communities[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 764: 144508.
- [60] Chang F, Yue S, Li S, et al. Periodic straw-derived biochar improves crop yield, sequesters carbon, and mitigates emissions [J]. *European Journal of Agronomy*, 2025, 164: 127516.
- [61] 曾远, 李泽楷, 陈苏娟, 等. 节水灌溉措施下中国稻田CH₄排放因子的计量与评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41(2): 196–204.
- [62] Worden D, Hailu G. Do genomic innovations enable an economic and environmental win-win in dairy production?[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 181: 102807.
- [63] 王站付, 黄璐璐, 朱元宏, 等. 施用沼渣肥料对水稻产量及土壤环境的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (10): 64–72.
- [64] Yang J, Gao B, Xia F, et al. Internalizing the external costs to achieve environmental and economic Goals: A Case study of rice production in China[J]. *Food Policy*, 2025, 132: 102857.
- [65] Vergeer R, Sinke P, Odegard I. TEA of cultivated meat. Future projections for different scenarios[R]. Delft: CE Delft Consultants for the Environment, 2021.
- [66] Gu B. Recoupling livestock and crops[J]. *Nature Food*, 2022, 3 (2): 102–103.
- [67] Harmsen M, van Vuuren D P, Bodirsky B L, et al. The role of methane in future climate strategies: Mitigation potentials and climate impacts[J]. *Climatic Change*, 2020, 163(3): 1409–1425.