

系统性释放农业甲烷 减排多重效益

——案例实证与实践启示

2026.05



系统性释放农业甲烷减排多重效益

——案例实证与实践启示

主要作者（按姓氏拼音排序）

- | | |
|-----|----------------------|
| 陈秋楠 | 河南科技学院 |
| 陈志钢 | 浙江大学中国农村发展研究院 |
| 董利锋 | 中国农业科学院饲料研究所 |
| 樊庆奎 | 内蒙古优然牧业有限责任公司 |
| 郭李萍 | 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 |
| 侯伟 | 内蒙古优然牧业有限责任公司 |
| 胡荣桂 | 华中农业大学资源环境学院 |
| 霍伟华 | 现代牧业（集团）有限公司 |
| 李丹宁 | 美国环保协会北京代表处 |
| 雒诚龙 | 中国农业大学动物科学技术学院 |
| 倪依琳 | 中节能咨询有限公司 |
| 裘盈 | 美国环保协会北京代表处 |
| 史毓心 | 美国环保协会北京代表处 |
| 孙芳 | 美国环保协会北京代表处 |
| 孙道 | 南京农业大学草业学院 |
| 滕战伟 | 河南科技学院 |
| 王丹英 | 中国水稻研究所 |
| 王蔚 | 中国农业大学动物科学技术学院 |
| 王晓 | 中节能生态产品发展研究中心有限公司 |
| 王砚 | 华中农业大学资源环境学院 |
| 王元龙 | 河南科技学院 |
| 吴万祺 | 澳亚集团有限公司 |
| 徐祥玉 | 湖北省农业科学院植保土肥研究所 |
| 徐子淇 | 美国环保协会北京代表处 |
| 杨芳 | 中节能咨询有限公司 |
| 叶伟伟 | 山东劲牛集团股份有限公司 |
| 余凯 | 中国水稻研究所 |
| 张龙 | 山东劲牛集团股份有限公司 |
| 张鲜鲜 | 上海市农业科学院生态环境保护研究所 |
| 周胜 | 上海市农业科学院生态环境保护研究所 |
| 朱伟云 | 南京农业大学动物科技学院 |



本报告部分内容来源于公开网络渠道，信息收集过程中未对内容进行实质性修改。具体案例内容及照片由合作伙伴提供，个别案例由于相关结果尚未经过同行评议，研究结论为初步成果，后续可能随着进一步研究和数据补充而发生调整或修订。由于网络信息存在时效性、准确性差异，使用者需自行对信息的真实性、完整性、适用性进行审慎判断，并独立承担因使用本报告内容所产生的一切风险及后果，本报告作者不为此承担任何法律责任。

目 录

目录	5
摘要	6
第一部分：农业甲烷排放现状、多重效益分析以及全球行动框架	8
1. 农业甲烷排放现状及减排技术措施	10
1.1 全球及中国农业甲烷排放现状	10
1.2 农业甲烷减排技术及措施	12
2. 农业甲烷减排多重效益分析	14
2.1 环境效益	15
2.2 经济效益	16
2.3 社会效益	17
3. 关键发现与行动框架	19
3.1 关键发现	19
3.2 行动框架建议	20
3.2.1 面向中国的政策着力点	20
3.2.2 面向全球的行动框架建议	22
第二部分：农业甲烷减排多重效益案例集锦	25
4. 农业甲烷减排多重效益案例	25
4.1 饲料添加剂：澳亚牧场通过饲料添加剂实现肠道甲烷减排与经济效益双提升	26
4.2 牧场修复：南山牧场退化草地修复与可持续管理的协同效益实践	28
4.3 生物垫床技术：肉牛养殖粪污污染治理与碳排放控制的协同增效	32
4.4 全生命周期减排：现代牧业全生命周期低碳牧场减排模式实现全链条多重效益协同	34
4.5 粪污沼气发电：济南平阴优然奶牛养殖粪污处理实现多重效益	36
4.6 粪污高效发酵：山东劲牛集团奶牛粪污高效发酵实现减排增收	38
4.7 咖啡渣饲料化：咖啡渣转化为功能性奶牛饲料实现降本和减排协同	40
4.8 旱管种植节水抗旱稻：稻田甲烷减排与节水协同增效的实践	42
4.9 稻虾共作：稻田甲烷减排与经济效益的双赢实践	44
4.10 水稻规模化种植：资源利用效率与减排效益协同提升实践	46
4.11 水稻与绿肥轮作：减排与固碳双向增益实践	50
4.12 水稻种植综合减排方案：浙江省杭州市青山村稻田甲烷减排综合实践	54
参考文献	58

摘要

农业是全球甲烷排放的重要来源，畜牧业肠道发酵、畜禽粪污管理与水稻种植是三大核心排放途径。甲烷作为短寿命、高增温潜势温室气体，对全球气候变化影响突出。当前全球气候治理进入攻坚阶段，农业甲烷约占人为甲烷排放总量的 40%（UNEP, 2025），已成为实现全球控温目标的关键领域。各国相继出台政策，加快农业甲烷减排技术研发与推广，强化温室气体管控。

中国已将全经济范围温室气体纳入自主贡献目标，出台系列政策推动农业协同减排，重点支持畜禽肠道甲烷控制、粪污资源化利用、水稻低碳种植等技术落地，助力农业绿色转型。中国生产体系分散、区域差异显著、自然条件约束强，因此，农业甲烷减排需在保障粮食安全与农户生计前提下，破解技术适配、推广落地等难题，实现多目标统筹协调。实践表明，农业甲烷减排技术普遍兼具经济、社会等多重效益，可在助力温控目标的同时，推动农业绿色低碳转型，实现农牧业提质增效、节本增收。

本报告立足实践、聚焦价值转化、彰显协同效应，系统梳理全球与中国农业甲烷排放现状、减排技术和措施，从环境、经济、社会三维度阐释多重效益的内在逻辑与联动关系；甄选 12 个国内典型案例，覆盖畜牧业肠道发酵、水稻种植、农业有机废弃物处理等关键领域，剖析技术模式、实施路径、减排成效与实践启示；提炼形成四大核心发现：

农业甲烷减排以资源效率提升为核心；多重效益协同是减排可持续的关键；监测、报告、核查（Monitoring, Reporting, and Verification, MRV）体系是生态价值转化为经济价值的核心通道；需构建规模化主体引领、小农户包容参与的多元联动格局。

在此基础上，报告提出针对性行动框架：面向国内，聚焦三大政策着力点——构建跨部门协同治理体系，完善 MRV 体系与技术推广机制；健全气候融资与碳市场激励，补齐国家核证自愿减排（Chinese Certified Emission Reduction, CCER）方法学短板，激活生态价值；推行分类精准推广与多元共治，将减排融入乡村振兴，构建多方利益共享机制。面向全球，提出四大战略方向——将农业甲烷减排纳入气候—粮食—发展协同议程；建立分层级、可互认的 MRV 标准体系；撬动私营部门与金融资本深度参与；搭建全球知识共享平台，强化南南合作，推广适配小农的低碳技术方案。

综上，农业甲烷减排是气候目标实现、农业绿色低碳转型与乡村可持续发展的关键交汇点。未来应以多重效益为导向，强化跨部门协同、激活市场机制、赋能基层主体并加强国际合作，推动农业甲烷减排规模化、标准化、长效化落地，在支撑国家双碳战略的同时，为农业高质量发展与乡村振兴注入持久动力。

第一部分：农业甲烷排放现状、多重效益分析以及全球行动框架

1. 农业甲烷排放现状及减排技术措施
2. 农业甲烷减排多重效益分析
3. 关键发现与行动框架

甲烷是全球第二大温室气体，其增温效应显著高于二氧化碳。在 20 年时间尺度下，甲烷的全球增温潜势为二氧化碳的 84 倍（FAO, 2025），对当前全球变暖的贡献率约 25%（IPCC, 2021），远超其他非二氧化碳温室气体。《巴黎协定》签署后的十年间，全球气候变暖速度超出预期，气候系统不稳定性显著增强。2024 年全球地表平均温度较工业化前升温 1.55°C，首次在年度尺度上超过 1.5°C 这一关键气候安全阈值（WMO, 2025）。虽短期升温波动属气候系统正常变化，但这种状态长期常态化将引发冰川融化加速、极端气象灾害频发等不可逆气候灾害。当前趋势表明，全球升温在未来 20 年内突破 1.5°C 目标的风险显著上升。有报告预测 2025 年至 2029 年间，全球平均近地表温度将比 1850 年至 1900 年的年平均值高出 1.2°C 至 1.9°C，即进入所谓的“气候过冲”（climate overshoot）阶段（WMO, 2025）。在此背景下，国际社会形成共识：甲烷作为短生命周期、高增温潜势的温室气体，其高效减排是短期内减缓全球气候变暖的关键举措。联合国环境规划署（United Nations Environment Programme, UNEP）与气候与清洁空气联盟联合发布的《全球甲烷评估：减少甲烷排放的收益和成本》明确指出，2030 年全球甲烷排放量需实现至少 40%-45% 的削减，这是实现《巴黎协定》长期气候目标的必要前提（UNEP, 2021）。

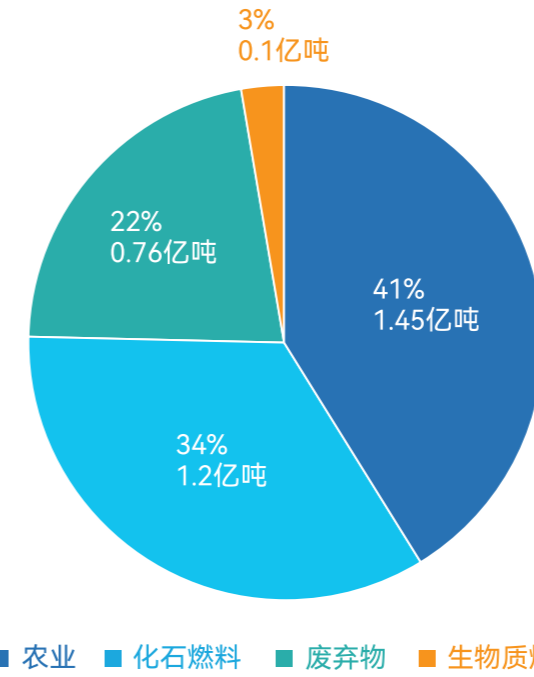


图 1. 全球人为甲烷排放源

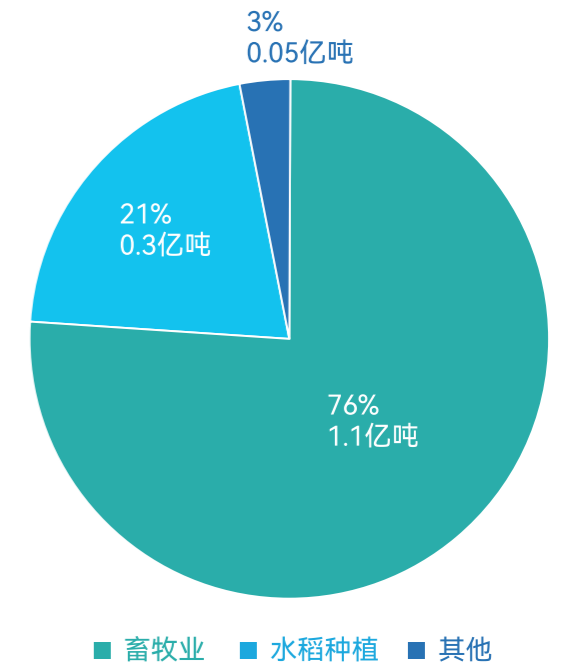


图 2. 全球农业甲烷排放

根据《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》，2021 年，中国甲烷排放总量（包括土地利用、土地利用变化和林业（Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF））为 6064.5 万吨，其中农业活动甲烷排放为 2427.9 万吨，约占中国甲烷排放总量的 40%（图 3）；细分来看，畜牧业甲烷排放 1527.1 万吨，占农业甲烷排放比例约为 63%；水稻种植甲烷排放 885.1 万吨，占比约 36%。畜牧业与水稻种植为主要的农业甲烷排放源（图 4）（中华人民共和国生态环境部，2024）。

1. 农业甲烷排放现状及减排技术措施

1.1 全球及中国农业甲烷排放现状

2023 年全球甲烷排放总量为 5.8 亿吨（IEA, 2024）。其中能源、农业、废弃物以及生物质燃烧等人为源甲烷排放量约为 3.51 亿吨，占全球甲烷排放总量的 60%（图 1）。在农业人为源排放中，全球农业领域甲烷排放约为 1.45 亿吨，其中畜牧业排放甲烷 1.1 亿吨，占农业领域甲烷排放的 76%，水稻种植甲烷排放 0.3 亿吨，占农业领域甲烷排放的 21%（图 2）（FAO, 2023; UNEP, 2025）。由此可见，畜牧业与水稻种植共同构成全球农业甲烷排放的两大核心来源。

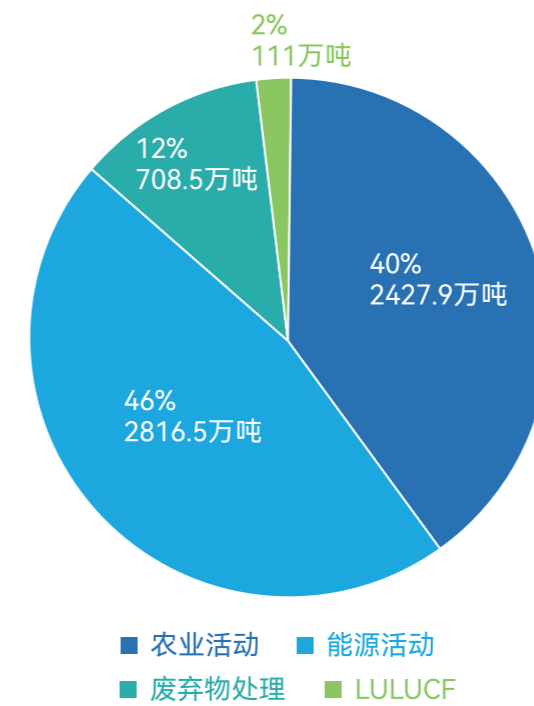


图 3. 中国人均为甲烷排放源

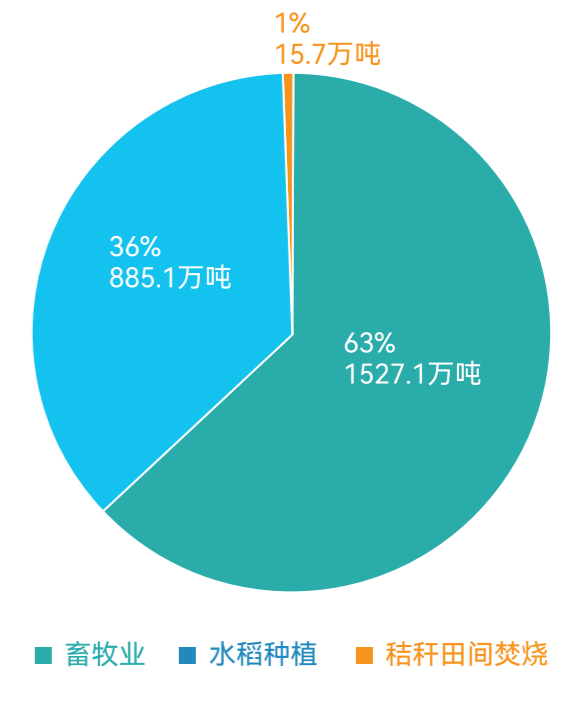


图 4. 中国农业甲烷排放

1.2 农业甲烷减排技术及措施

农业领域主要通过源头减排、过程管控和末端利用多途径相结合减少甲烷的排放。表 1 根据参考文献汇总了水稻种植和畜牧领域甲烷减排的主要技术措施。其中，针对水稻种植的相关甲烷减排技术措施包括：选育高产低甲烷排放水稻品种、稻田水分管理（如干湿交替灌溉）、直播法、秸秆腐熟后还田、施用硫酸盐抑制剂等（生态环境部等，2023；王斌，2026）。针对畜牧生产过程相关的甲烷减排技术措施包括：优化反刍动物饲料结构（生态环境部等，2023）；改善动物的营养和遗传特征（FAO，2023）；提高粪污资源化利用水平及管理水平（如堆肥处理、厌氧发酵等）（农业农村部，2023；生态环境部等，2023）。

表1. 主要农业甲烷减排技术与措施

领域	分类	甲烷减排技术措施	技术描述	
水稻种植	水分管理	干湿交替灌溉	采用干湿交替灌溉等水分管理方式，改善土壤氧化还原环境，减少稻田甲烷排放	
	有机添加剂	施用特定有机添加剂	调节稻田土壤微生物群落，抑制产甲烷菌，降低甲烷排放	
	肥料和其他改良剂	施用含硫酸盐肥料	硫酸盐对产甲烷菌具有抑制作用	
	种植与耕作方式管理	水稻直接播种	—	
		水旱轮作、休耕	—	
		起垄种植法	—	
		旱管种植	旱管种植是利用节水抗旱稻的耐旱特性，出苗后整个生长发育期间仅在缺水敏感期进行适当灌溉的种植方式，无需保持水层	
	水稻品种选育	低甲烷排放水稻品种选育	筛选抗病性强、光合作用效率高、甲烷排放低的水稻品种	
		节水抗旱稻	—	

领域	分类	甲烷减排技术措施	技术描述
	秸秆处理	秸秆堆肥后还田	—
		秸秆离田	避免秸秆直接还田于稻田
		生物质炭还田	—
	新兴技术研发	使用重氮营养菌等甲烷抑制剂	—
畜牧业	反刍动物肠道发酵	饲料调控	优化饲料结构，提高饲料消化率
		饲料添加剂	使用饲料甲烷抑制添加剂，如3-硝基氧丙醇（3-NOP）、含溴仿海藻等
		动物福利	健康的牛群是高产出、低发病率、长寿的基础
		动物管理	通过种群管理提高动物生产与繁殖性能、免疫健康能力，减少热应激等
		饲养管理	科学化、集约化、智能化饲养
		高产低排放反刍动物品种育种	培育高生产力、甲烷排放强度较低的反刍动物畜种
	动物粪便管理	厌氧发酵产生沼气收集与利用	收集粪便厌氧消化产生的沼气并利用，减少甲烷排放，沼液还田
		粪便好氧堆肥	粪便堆肥或曝气处理增加氧气供应，抑制厌氧产甲烷，减少甲烷排放并生成有机肥
		固-液分离	对粪便进行固-液分离，改变发酵环境，减少甲烷排放，产物可分别利用
		甲烷抑制剂	粪便中添加甲烷抑制剂，直接抑制产甲烷菌，需关注残留与环境影响

2. 农业甲烷减排多重效益分析

畜禽养殖和水稻种植不仅产生了大量甲烷，关乎气候安全，还与粮食生产、资源利用、乡村发展深度绑定。在中国双碳战略与农业绿色转型协同推进的背景下，农业甲烷减排不再是单一的环境治理任务，而是兼具环境效益、经济效益与社会效益的系统工程（图 5）。

农业甲烷减排环境效益、经济效益和社会效益相互支撑、有机统一，共同构成农业低碳转型的完整价值体系：环境效益作为生态基础，核心是减排固碳、适应气候变化、减少水土气污染、保护生物多样性，可通过饲料优化、粪污处理、稻田管理等措施实现；经济效益作为内生动力，核心是增产增收、节约成本，体现在提升生产效率、降本增收、获取碳信用及政策收益、推动产业升级等方面，为低碳转型提供动力；社会效益作为支撑，核心是创造就业、带动产业协同、增强低碳共识，涵盖农村就业、绿色人才培养、乡村振兴、人居环境改善等内容。同时，环境、经济、社会三大效益构成可持续发展的“三重底线”，三者既存在协同（Synergy）与传导（Spillover Effect）的良性互动，也可能因资源限制等出现权衡取舍（Trade-offs），但在此并未对这三种关系做详细讨论，本章主要梳理了农业甲烷减排环境效益、经济效益和社会效益体现在哪些方面及具体涵义，并总结了第二部分案例集锦中 12 个案例的多重效益。



图 5. 农业甲烷减排的主要环境效益、经济效益和社会效益归纳

2.1 环境效益

环境效益指农业生产方式优化后，对生态系统结构、功能及环境质量产生的正向影响，核心是降低温室气体排放、增强碳汇能力、减少污染物排放，从而减缓气候变化、保护生物多样性、改善区域生态环境，是农业可持续发展的生态基础。

(1) 减排固碳：指通过减少二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等温室气体排放和增加碳吸收与储存，以降低大气中温室气体浓度、减缓气候变化。如通过饲料优化（如调节日粮精粗比、添加 3-NOP、海藻提取物等）、精准饲喂等方式降低反刍动物瘤胃发酵产生的甲烷（联合国粮食及农业组织，2024）；通过厌氧处理可以减少畜禽粪污甲烷和氧化亚氮的排放（强淑雅等，2026）；通过用水管理（如早管种植水稻）、种植低甲烷排放水稻（种植节水抗旱稻）等措施降低稻田甲烷排放（生态环境部等，2023；王斌，2026）；通过改变耕作措施、增施有机肥、合理轮作等管理措施，可以有效提升农田土壤的固碳能力（任浩奇等，2026；王树会等，2022；朱利群等，2016）。

(2) 适应气候变化：适应气候变化是指自然或人类系统针对已发生或预期发生的气候变化及其相关影响，通过主动或被动的调整与应对措施，降低气候风险的暴露度和脆弱性，提升系统的韧性与恢复能力，从而减少潜在损失并在一定程度上实现协同发展的过程。该过程强调在不确定气候情景下的风险管理与能力建设，是实现长期可持续发展的关键组成部分。如在气候变化导致降水减少的区域种植旱管节水抗旱稻，既可以实现水稻种植甲烷减排，还能通过改变水稻种植品种以适应气候变化。

适应气候变化还兼具显著社会效益。通过各类气候适应举措平稳调整生产生活模式，有效筑牢区域粮食安全底线，稳定农业生产经营收入，拓宽基层就业增收渠道，完善乡村发展基础保障，缩小气候差异带来的发展失衡问题，持续改善民生生活条件，提升社会防灾减灾与应急保障能力，凝聚全民气候治理共识，维护城乡社会和谐稳定，助力乡村全面振兴与社会整体平稳可持续发展。

(3) 减少水、土和气污染：农业生产活动中的不合理种养措施与废弃物处理易造成大气污染、土壤退化、水土流失和面源污染。通过科学的粪污处理和循环利用（种养结合）模式，可以节约用水，减少污染物对土壤和水体的污染，减少农业面源污染（王越，2026；农业农村部，2023；生态环境部等，2023），例如粪污沼气发电可避免畜禽粪便直接排放导致的水体富营养化（张琦琦，2026）；减少水稻田秸秆还田可降低秸秆腐解过程中产生的甲烷排放（朱雅婷等，2023）；发酵咖啡渣可将农业废弃物转化为资源，避免焚烧或堆放导致大气与土壤污染，同时改善区域生态环境质量。

(4) 保护生物多样性：保护生物多样性，指的是维护物种、基因与生态系统多样性，提升生态系统稳定性与韧性的工作。集约化农业造成的环境污染会破坏生物栖息地，甲烷减排倡导生态循环、低化学品投入、低干扰生产方式，可减轻生态压力，保护动植物资源（农业农村部，2024）。这一效益可丰富农业甲烷减排案例的生态维度，展示多元价值。

2.2 经济效益

经济效益是指低碳农业实践在提升资源利用效率、优化投入产出结构、拓展产业链条等方面产生的经济价值，核心是实现增产、增收与节约成本，提升农业经营主体的盈利能力与抗风险能力，为低碳转型提供内生动力。

(1) 提升生产效率：指通过技术或管理措施提升单位面积或单头畜禽的产量，提升劳动生产率和资源利用效率。将甲烷减排措施锚定高效生产模式，可缩短生产周期、降低损耗、提升产品合格率，以高效率支撑高效益。例如，稻虾共作可在不减少水稻产量的前提下增加小龙虾产出；牲畜育种可提升畜禽生长速度与出栏率；节水抗旱稻种植可在旱作管理条件下稳定水稻产量并节约农业用水，从而提高农业生产的产出效率与抗风险能力，保障粮食安全与农产品供给。

(2) 降本增收：指的是通过优化生产要素配置、提升资源利用效率，在降低单位产品生产成本的同时拓展收益渠道，实现经营效益提升。农业甲烷减排与精准种养、循环利用模式高度协同，可减少饲料、化肥、水电等生产资料投入，降低物化与运营成本；同时，通过增产提质、资源化利用等方式拓展收入来源，形成“成本下降 + 收益提升”的双向效益，是农业甲烷减排案例中最具推广价值的经济动力之一。

(3) 碳信用收益及其他收益：碳信用收益指的是指通过实施温室气体减排或碳汇项目，获得可交易的碳信用（廖舫仪，2026）。其他收益包括补贴、税收优惠、信贷支持政策性金融支持，以及资源化收益，如将养殖粪污、秸秆等废弃物转化为有机肥、沼气、饲料等产品，从而获得经济收益等（澳亚集团有限公司，2025）。

(4) 产业升级：指以技术创新、模式创新、制度创新为核心，推动传统农业向绿色化、集约化、智能化、高端化转型，优化产业结构，提升核心竞争力与发展质量的过程。农业甲烷减排作为“十五五”时期农业绿色低碳转型的重要抓手，通过推广清洁生产、循环利用与数字农业技术，推动农业产业链供应链向低耗高效、高附加值方向延伸，推动低碳循环、生态循环发展，助力现代化农业产业体系构建。

(5) 品牌价值溢价：品牌价值溢价，指的是基于低碳、生态、安全等绿色属性，增强产品的市场认可度与溢价能力，构建农业品牌体系和机制，引导并促进绿色农产品消费（农业农村部，2023；张一鸣，2025；徐继东，2025）。采用甲烷减排与绿色生产模式的农产品更易获得消费者信任，实现优质优价，彰显绿色品牌的经济价值。

(6) 动物健康：动物健康指的是通过改善养殖环境、优化日粮、强化防疫等措施，提高生产力和畜禽健康水平，降低发病与死亡率（联合国粮食及农业组织，2024）。甲烷减排与健康养殖高度协同，可减少兽药使用，提升畜禽成活率、出栏率与产品品质，稳定生产效益，为健康养殖发展与养殖经济增效提供支撑。

2.3 社会效益

社会效益指低碳农业模式在促进就业、推动产业升级、提升公众认知等方面产生的社会价值，核心是创造就业机会、带动产业协同发展、增强社会对低碳转型的共识与参与度，为农业绿色低碳转型提供社会支撑与制度保障。

(1) 创造就业机会：指通过农业产业链延伸、绿色低碳产业模式创新，拓宽农村劳动力就业渠道，新增就业机会。甲烷减排可带动废弃物处理、有机肥生产、低碳服务等相关产业发展，提供大量就地就近就业机会，促进农民增收，体现出重要的社会效益。例如，秸秆收储运、生物炭加工、稻虾共作等模式可吸纳当地农户参与生产、加工、销售环节，尤其是为妇女、留守劳动力提供就近就业岗位，促进农民增收，助力乡村振兴与共同富裕。

(2) 培养绿色人才：指通过农业技能培训和实际生产活动，培养农业绿色生产相关领域高素质人才，加强农业农村实用人才队伍建设，为减排工作长效落地提供人才支撑（农业农村部，2021）。通过产学研用融合实践，帮助技术人员和一线工人在减排技术研发、田间落地、项目运营中积累经验，推动减排技术标准化推广，为农业绿色低碳转型筑牢人才根基。

(3) 促进产业发展：指通过低碳农业技术推广与模式创新，推进农业产业要素聚集，推进企业集中、功能集合，推动企业提质增效，促进产业融合发展和转型升级。例如，粪污沼气发电可带动清洁能源产业发展（荆忠平，2025）；生物炭基肥料应用可催生土壤调理、农资销售等新业态；稻虾共作能够促进水产养殖与水稻种植产业协同发展（胡康，2023），提升农业产业链的韧性与竞争力，推动农业现代化与高质量发展。

(4) 提升低碳认知：指通过示范项目、技术推广与科普宣传，提升农业从业者、管理者及公众对低碳农业、气候变化应对的认知与参与度。例如，规模化低碳种植、秸秆离田利用等案例可作为示范样本，引导农户转变传统生产理念，主动采用低碳技术，推动农业绿色低碳转型的社会共识形成，为农业碳中和目标的实现奠定社会基础。

(5) 推动乡村振兴：指的是以产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕为方向，全面提升乡村发展水平。农业甲烷减排与乡村振兴战略高度契合，可带动产业、生态、农民增收协同发展（农业农村部，2024）。其综合效益可为农业甲烷减排实践案例提供政策与场景支撑。

(6) 改善农村人居环境：改善农村人居环境，指的是整治农业面源污染、粪污、臭气、污水等问题，提升农村生产生活条件。农业甲烷减排与农村环境整治协同推进，可显著改善村容村貌、减少异味污染，建设宜居宜业和美乡村。

(7) 保障生态健康：保障生态健康，指的是通过修复农业生态环境、减少化学品投入与控制污染物排放，维护生态系统结构完整与功能正常，从而保障人类赖以生存的自然环境安全的状态。农业甲烷减排伴随粪污资源化利用与清洁生产推广，可有效降低空气、水体与土壤污染负荷，保障农产品质量安全，增强生态系统疫病调控与自净能力（刘浩，2024；董景奎，2011）。该效益既是农业甲烷减排多重效益实践案例集合，也是维护民生福祉、筑牢公共卫生安全防线的重要基石和民生贡献的重要体现。

(8) 提升国际形象：提升国际形象，指的是通过全经济范围积极参与全球气候与环境治理，展示负责任大国的担当与行动力。积极参与全球甲烷治理，推进农业甲烷减排，开展全球甲烷交流合作，体现了中国应对气候变化的决心（生态环境部等，2023）。

总之，减少农业甲烷排放具有环境效益、经济效益与社会效益在内的多重效益，三者相互支撑、有机统一，共同构成农业低碳转型的完整价值体系：环境效益是生态基础，为农业可持续发展提供底线保障；经济效益是内生动力，提升经营主体参与低碳实践的积极性和可持续性；社会效益是制度与社会支撑，为技术推广、模式复制与产业升级营造良好环境。三者协同发力，既实现了温室气体减排、生态环境改善的气候目标，也达成了生产增效、农民增收、产业升级与社会认同的综合成效。表 2 集中展示了 12 个案例的多重效益。

表2. 本报告评估的12个案例多重效益汇总

实践案例	环境效益				经济效益					社会效益								
	减排固碳	适应气候变化	减少水土和空气污染	保护生物多样性	提升生产效率	降本增收	碳信用及其他收益	产业升级	品牌价值溢价	动物健康	创造就业机会	培养绿色人才	促进产业发展	提升低碳认知	推动乡村振兴	改善农村人居环境	保障生态健康	提升国际形象
1 饲料添加剂	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓				✓
2 牧场修复	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	
3 生物垫床技术	✓		✓			✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
4 全生命周期减排	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
5 粪污沼气发电	✓		✓			✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	
6 粪污高效发酵	✓		✓			✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
7 发酵咖啡渣饲料减排	✓		✓			✓			✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	
8 旱管种植节水抗旱稻	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9 稻虾共作	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	
10 水稻规模化种植	✓		✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	
11 水稻与绿肥轮作	✓				✓	✓		✓			✓		✓	✓		✓	✓	
12 水稻种植综合方案	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓			✓	✓	

通过对畜牧业与水稻种植领域甲烷减排的 12 个典型案例进行系统和深入分析，我们归纳提炼出 4 个核心关键发现。在此基础上，进一步总结出三条既根植于中国基本国情，又具备跨区域普遍适用性的政策推进路径。同时，结合当前全球农业甲烷减排的现实需求，从协同治理、MRV 体系建设、融资支持以及全球合作这 4 个战略层面，给出了全球农业甲烷减排的行动框架建议。

3. 关键发现与行动框架

3.1 关键发现

资源效率提升：农业甲烷减排的核心根基

农业甲烷减排以提升农业资源效率为核心导向，其核心逻辑在于通过农业生产技术革新与经营模式创新，将资源效率提升贯穿于甲烷减排全过程，在着力提升土地、水资源、养分等农业核心资源利用效率的基础上，实现农业生产各环节（如畜禽养殖、稻田种植等）甲烷排放总量的有效管控。提升资源效率作为甲烷减排的核心抓手，决定了减排工作并非单纯的“控排降量”被动举措，而是与农业生产全流程资源优化配置深度绑定、有机融合，既契合农业绿色低碳发展的内在诉求，也为后续多重效益的协同实现筑牢坚实基础，更是推动减排行动从政策驱动的被动执行向经营主体自觉主动推进转变的核心前提。

效益协同：减排与发展的双向赋能

农业甲烷减排工作的可持续推进，关键在于实现多重效益的协同共生，其核心目标是达成减排与增效、减排与乡村振兴的内生统一。从经济与生态效益协同维度来看，那些能够同步提升农业资源利用效率、降低生产资料消耗与人力成本，或通过生态产品价值实现拓展农业附加价值的减排路径，更易获得各类农业经营主体的广泛认同与主动参与，有效破除“减排必增本、控排必减收”的传统认知误区，真正实现减排与增效的内生统一、双向赋能；从社会与环境效益融合视角分析，甲烷减排不仅是响应全球气候治理、落实双碳战略目标的重要抓手，更可通过优化畜禽养殖废弃物处置、改进稻田灌溉模式等具体路径，有效改善农村人居环境质量、促进农民增收致富、推动农业现代化提质升级，与乡村振兴战略要求深度契合，最终实现环境效益、经济效益与社会效益的多元共赢。

打通MRV体系：效益转化的关键通道

MRV 体系是农业甲烷减排工作从“环境效益”向“社会经济效益”转化的关键枢纽，更是保障减排行动规范化、长效化推进的核心支撑。若缺乏完善的 MRV 体系，甲烷减排的实际成效将无法得到科学量化、精准核算与有效追溯，减排所产生的生态环境价值也难以转化为可落地的市场价值、可兑现的政策支持价值，进而无法为政府、企业、农户等多方参与主体提供明确的激励依据与责任界定标准。唯有打通 MRV 体系建设的堵点与难点，建立科学规范、贴合农业生产实际的监测指标体系，实现减排数据的可监测、可报告、可核查、可追溯，才能清晰界定各参与主体的减排成效，搭建起环境效益与社会经济效益之间的坚实转化桥梁，为减排行动的长效有序推进提供坚实的制度支撑。

主体联动：规模化主体引领，小农户包容性参与

农业甲烷减排工作涵盖农业生产、技术研发推广、政策治理等多个关键环节，覆盖不同生产规模、不同产业类型的各类农业经营主体，单一主体的力量难以实现全链条、广范围的减排落地，因此需构建“规模化主体引领，小农户包容性参与”的分类实施减排行动路径。一方面，重点发挥农业龙头企业、规模化家庭农场、专业合作社等大经营主体的技术、资金、管理与市场优势，将其作为减排技术推广、经营模式创新的核心载体，通过示范引领、技术帮扶、利益联结等方式，带动周边小农户积极参与减排行动，破解小农户减排能力不足、技术储备匮乏的现实困境；另一方面，结合不同经营主体的生产规模、产业类型（如畜禽养殖、稻田种植、农产品加工等）、资源禀赋及区域农业发展特征，分类制定差异化、可操作的减排路径，坚决杜绝“一刀切”的推进模式，确保减排行动贴合实际、切实可行。同时，强化政府的政策引导、监管保障职能与科研机构的技术支撑作用，构建“大主体引领、小主体参与、政府引导、科研支撑”的多方协同减排格局，推动减排工作落地见效。

3.2 行动框架建议

3.2.1 面向中国的政策着力点

中国作为全球最大的水稻生产国和畜牧业大国，其农业甲烷减排的进展对于全球气候治理具有标志性意义。从本报告所呈现的12个案例中，可以观察到三条正在形成中的政策推进路径。这些路径虽根植于中国的制度环境与农业特征，但其背后的问题意识——如何将技术潜力转化为规模化实践、如何使减排效益内化为经营主体的经济激励——具有跨区域的普遍性。

着力点一：构建部门联动、系统治理的减排框架

农业甲烷减排工作涉及生态环境、农业农村、国家发展改革等多个职能部门。从案例推进过程来看，单一部门的政策和行动难以满足甲烷减排的治理需求，跨部门政策衔接与协同治理是打通执行堵点的关键环节。

在部门协同方面，应重点推进生态环境部与农业农村部、国家发展改革委等部门的政策衔接，建立部际联席会议等协调机制。以中国提出的2030年前碳达峰、2060年前碳中和目标及2035年国家自主贡献新目标为时间表，以《甲烷排放控制行动方案》为顶层指引，在农业甲烷减排目标与责任、政策与标准、技术与措施等领域形成政策合力，构建农业甲烷的协同治理体系。

在核算与标准方面，农业甲烷排放受自然禀赋与管理因素影响显著，需建立精细化监测核算体系以摸清排放基数。应依托现有监测点位，建设和完善覆盖主要农业区的甲烷排放监测网络，形成具有区域特征的动态排放因子数据库，制定适用于国家温室气体清单、省级温室气体清单、组织/企业层级及项目层级的核算标准。

在技术推广方面，农业甲烷排放的核心领域包括畜牧业肠道发酵、畜牧业粪污处理和水稻种植，减排技术丰富多样，然而农民和养殖户或养殖企业对甲烷减排技术缺乏了解。建议出台农业甲烷减排技术目录，筛选低成本、高可行性、高协同效益的成熟技术（如间歇灌溉、粪污厌氧消化、精准饲喂）进行优先推广；对抑制剂、低甲烷品种等前沿技术分阶段布局，结合规模、区域与政策梯度推进；通过建设区域示范基地、形成标准化技术组合，结合财政补贴或专业化服务外包机制，有效降低基层主体的采用门槛，提高技术落地率并带动农业生产方式的绿色转型。

在区域示范方面，由地方政府统筹协调生态环境、农业及能源等相关部门，在畜牧业密集区和稻作主产区开展综合治理示范工程，整合多渠道资金与项目资源，构建集减排、资源化利用与生态修复于一体的系统性解决方案，总结凝练成功模式的发展经验，逐步形成具有区域适应性的可复制路径，放大示范项目的政策外溢效应。

着力点二：完善气候融资机制，激活减排的生态价值

聚焦农业甲烷减排的资金需求与市场激励短板，构建“政策引导+市场主导”的经济激励体系，推动减排效益转化为经济收益，是案例实践中反复印证的关键支撑条件。

在拓宽气候融资渠道方面，应统筹利用农业面源污染综合治理、畜禽粪污资源化利用整县推进等专项资金，向农业甲烷减排重点区域倾斜；设立农业低碳转型专项基金，对稻田节水灌溉、畜禽粪污沼气回收等项目给予直接补贴或贷款贴息，降低项目前期投入成本。同时，引导社会资本参与，推动气候投融资试点与农业甲烷减排项目对接；鼓励

金融机构创设农业甲烷减排专属绿色信贷、碳挂钩债券产品，探索“碳收益质押融资”模式等，引导社会资本投向减排领域。构建多层次的资金支持体系，由财政部门与金融机构协同发力，通过补贴、贴息贷款及专项基金等工具，支持农业甲烷减排项目实施，缓解资金约束并推动项目规模化发展。此外，深化国际合作融资，与多边机构争取国际气候资金与技术支持，参与国际甲烷减排融资机制，探索跨境碳交易合作，拓宽资金来源渠道。

在健全碳市场激励机制方面，目前生态环境部已发布《农业废弃物集中处理工程》和《规模化猪场粪污沼气回收利用工程》两个粪污处理的CCER方法学，但针对畜牧业和水稻种植甲烷减排技术措施的方法学严重欠缺，建议尽快开发和发布更多农业甲烷减排相关的CCER方法学，弥补当前农业甲烷减排方法学不足的短板。同时，加强农业CCER项目的开发，通过碳资产开发、交易及相关金融产品，使减排成果转化为可交易、可融资的资产，形成稳定收益预期，从而增强市场主体参与积极性，实现农业甲烷减排的多元效益。

在价值转化路径方面，应推动农业甲烷减排项目与绿色金融、生态产品价值实现机制衔接，探索“碳信用+农产品”品牌化模式，将减排成效转化为农产品绿色溢价，实现生态价值向经济价值的高效转化，提升农业减排的综合效益。

着力点三：构建适应不同主体特征的分类推广与共享共治路径

本报告案例覆盖了从万头规模化牧场到家庭农场、从企业化种植基地到小农户的完整主体谱系。这一多样性揭示出一个重要规律：不同经营主体在减排动机、技术需求、资金能力和风险偏好上存在显著差异，单一的政策工具和推广模式难以全面覆盖。因此，需立足乡村振兴与农业绿色发展的协同导向，构建适应不同主体特征的分类推广路径，同时强化多方参与和利益共享机制，推动农业甲烷减排在改善农村人居环境、促进农民增收与提升治理能力中发挥综合作用。

在分类推广方面，应充分尊重不同主体的差异化需求。对于规模化牧场和大型种植企业，政策重点可放在支持其建立自主碳核算能力、对接绿色金融市场、参与自愿减排交易上，发挥其技术创新和产业链带动优势；对于中小规模养殖场和种植户，减排技术的推广须与“降本增收”紧密绑定，将技术嵌入现有的农技推广体系和惠农补贴渠道，降低采纳门槛；对于广大小农户，应优先推广节水抗旱稻、稻虾共作、绿肥轮作等兼具增产提质和节本增收效应的技术模式，使减排效益通过直接经济回报得以体现。这一分层施策的思路，有助于实现技术推广的精准性和资源配置的有效性。

在融入乡村振兴方面，应将农业甲烷减排与乡村振兴战略融合，由地方政府统筹推进，将其融入农村人居环境改善、清洁能源利用及产业发展布局。通过发展绿色农业与循环经济模式，不仅提升农村生态环境质量，也带动农民就业与收入增长，增强减排行动的社会基础。

在提升基层主体实施能力方面，应加强对农户及基层主体的技术培训与能力支持，由农业技术推广部门、科研机构及基层政府共同推进，通过现场示范与数字化工具应用，提高低排放技术的可及性与应用水平。同时，通过优化服务体系，降低参与门槛，促进农户由被动执行向主动参与转变。

在构建多方参与与利益共享模式方面，应推动建立政府、企业、农户及科研机构多方协同机制，通过订单农业、技术服务外包及收益分成等方式，形成风险共担、利益共享的合作模式。该机制有助于提升项目实施效率与稳定性，并保障农业甲烷减排的长期可持续推进。

3.2.2 面向全球的行动框架建议

中国农业甲烷减排的实践探索，为全球特别是广大发展中国家提供了一个重要的参照样本。中国农业生产体系复杂、小农户数量庞大、区域差异显著——这些特征与东南亚、南亚、撒哈拉以南非洲等地区高度相似。因此，从中国案例中提炼的经验，具有超越国界的参考价值。以下四个战略方向，既是基于中国实践的总结，也构成了加速全球农业甲烷减排进程的共同议程。

战略方向一：将农业甲烷减排确立为气候-粮食-发展协同议程的核心支柱

来自中国的观察：

节水抗旱稻案例提供了最具说服力的协同证据——在实现稻田甲烷减排 90% 以上的同时，灌溉用水减少 50%，肥料投入降低约 30%，产量保持稳定。这不是以牺牲粮食安全为代价的减排，而是以提升资源效率为驱动的增产减排。稻虾共作案例进一步显示，在同一块土地上，甲烷排放较传统模式降低近 30%，而公顷均产值因小龙虾的加入增长了 1.5 倍以上。南山牧场的退化草地修复项目则证明，当生态修复与生产管理协同推进时，草地固碳能力提升、牲畜甲烷排放强度下降、牧民收入同步增长。

这些案例共同揭示了一个规律：农业甲烷减排与粮食安全、农民生计、资源保护之间不存在根本性矛盾；相反，以系统思维设计的减排路径往往能实现多重目标的协同优化。这一发现对于全球南方国家尤其重要——它们既面临气候脆弱性，又承担着保障粮食供给和消除贫困的迫切任务。

全球层面的行动方向：

- **国家自主贡献（Nationally Determined Contributions, NDCs）的深化与细化：** 倡导各国在更新 NDCs 时，将农业甲烷减排列为独立行动领域或量化指标。当前多数国家的 NDCs 对农业甲烷的覆盖仍较为笼统，缺乏具体的措施描述和量化目标。报告中呈现的技术路径（水分管理、饲料调控、粪污资源化）可作为 NDCs 行动清单的参考模板。
- **全球甲烷承诺的农业议程强化：** 在全球甲烷承诺框架下，推动建立农业甲烷专项工作组或倡议，聚焦于水稻和畜牧业两大排放源的解决方案。这一平台可发挥三方面功能：技术清单的共享、MRV 方法学的协调、示范项目的联合融资。
- **可持续发展目标（Sustainable Development Goals, SDGs）关联叙事的系统建构：** 农业甲烷减排同时贡献于 SDG 2（零饥饿，通过提升生产效率）、SDG 6（清洁饮水，通过节水灌溉）、SDG 13（气候行动）、SDG 15（陆地生态，通过土壤碳汇）等多项目标。这一多维贡献尚未在国际发展议程中得到充分呈现。建议粮农组织、环境署等机构联合编制农业甲烷减排的 SDGs 协同效益评估报告，帮助各国将甲烷减排嵌入更广泛的发展融资框架。

战略方向二：建立分层级、可互认的MRV基础设施

来自中国的观察：

报告案例清晰地展示了 MRV 能力建设的三条平行路径：现代牧业代表的企业级 MRV 体系（“模型 + 实测”双轨，国际研究通用气体监测系统设备监测，第三方认证），青山村代表的科研级原位监测（静态箱 - 气相色谱法连续两年追踪，为方法学开发提供数据基础），以及优然牧场代表的国际标准认证路径（VCS 核证，签发近 5 万吨碳信用）。三条路径各有适用场景，但共同指向一个结论：可信、透明的排放数据和减排量核算，是连接技术行动与市场激励的桥梁。

当前全球农业甲烷 MRV 面临的核心挑战在于：发展中国家普遍缺乏本土化排放因子，高度依赖 IPCC 缺省值，导致核算结果难以反映真实减排效果；同时，不同认证体系之间的互认机制缺失，增加了跨境碳交易的交易成本。

全球层面的行动方向：

- **分层级 MRV 标准体系的构建：** 针对不同主体特征，建立差异化的核算标准。对于大型商业牧场和种植企业，可采用基于实测或精细化模型的方法，追求高精度；对于中小规模经营主体，可采用基于活动数据和缺省因子的简化方法，追求可操作性。关键是确保各层级标准在方法论上具有一致性和可向上聚合性。
- **区域排放因子数据库的建设：** 支持在东南亚、南亚、东非、拉美等主要水稻和畜牧业主产区，依托已有的农业研究网络，系统开展原位监测和数据积累，逐步建立区域化、气候带特异性、管理措施特异性的排放因子数据库。这对于提升发展中国家国家温室气体清单的准确性具有基础性意义。
- **跨境互认机制的探索：** 推动自愿碳市场（Voluntary Carbon Market, VCM）和《巴黎协定》第六条框架下，对不同认证体系产出的农业甲烷减排量建立互认规则。特别是对于采用同一方法学但在不同国家实施的项目，应允许核证结果的跨境适用，避免重复核证带来的高昂成本。

战略方向三：撬动私营部门和金融资本的系统性参与

来自中国的观察：

报告中的企业案例提供了私营部门参与农业甲烷减排的三种典型模式。第一种是效率驱动型：澳亚牧场和咖啡渣饲料案例证明，当减排技术（精准饲喂、非粮饲料开发）同时提升饲料转化率和产奶量时，企业减排的经济账本身即成立，碳收益是增量回报。第二种是资源循环型：劲牛集团的智能发酵罐将粪污处理转化为高值有机肥生产，年收益达数十万元，循环经济价值远超潜在的碳收益。第三种是品牌溢价型：现代牧业的低碳牧场认证，将碳管理绩效转化为企业环境、社会及治理（Environmental, Social and Governance- ESG）评级提升和品牌差异化优势。

这三种模式共同表明：私营部门参与的核心动力在于减排行动与核心业务目标的同向性。当碳管理能够降低运营成本、创造新产品收入或增强品牌价值时，企业的参与将是主动且可持续的。

全球层面的行动方向：

- **供应链激励机制的设计：** 推动国际食品和零售行业头部企业设定科学碳目标倡议（Science Based Targets initiative, SBTi），特别是范围三减排目标，并通过绿色采购承诺向上游农牧供应商传递减排需求。全球乳业

平台（Global Dairy Platform, GDP）、可持续水稻平台（Sustainable Rice Platform, SRP）等行业倡议可作为技术标准输出和能力建设的载体。

- **混合融资工具的规模化应用：**农业甲烷减排项目（特别是中小规模项目）面临投资回报周期长、技术风险较高”的融资障碍。公共资金可通过首损担保（First-Loss Guarantee）、优惠贷款、技术援助赠款等方式降低私营资本的风险感知，撬动更大规模的商业投资。可持续发展挂钩贷款（Sustainability-Linked Loan, SLL）等工具可将贷款利率与减排绩效挂钩，形成正向激励。
- **低碳农产品市场识别体系的建设：**支持开发适用于农产品的碳足迹核算标准和碳标签制度，帮助消费者和机构采购方识别低碳产品。这一体系的关键在于核算方法的简化与成本的降低——过于复杂和昂贵的认证流程将抵消碳标签的市场价值。

战略方向四：构建全球知识共享网络，加速南南经验流动

来自中国的观察：

本报告所呈现的 12 个案例本身就构成了一部“解决方案图谱”：覆盖肠道发酵减排（饲料添加剂、咖啡渣饲料、全生命周期管理）、粪污管理减排（厌氧发酵、生物垫床、高效堆肥）、稻田减排（水分管理、品种选育、种养结合、绿肥轮作）三大技术簇，涉及从东北到华南的多气候带，从万头牧场到家庭农场的多主体类型。

尤其值得关注的是，节水抗旱稻、稻虾共作等技术与东南亚、南亚的水稻种植体系具有高度的气候适应性和农作制度相似性；低成本粪污处理技术（如生物垫床）对于非洲和南亚的小规模养殖户具有直接的借鉴价值。这意味着，中国经验的溢出效应不仅体现在技术层面，更体现在“如何在小农主导的生产体系中推动绿色转型”的制度知识层面。

全球层面的行动方向：

- **解决方案知识平台的建设：**支持联合国粮食及农业组织（Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAO）、国际农业研究磋商组织（Consultative Group for International Agricultural Research, CGIAR）等国际机构建立开放的农业甲烷减排解决方案知识库，系统收录全球范围内的成功案例，包含技术参数、成本效益数据、适用条件、推广障碍等结构化信息。报告中的案例可作为首批入库内容。
- **南南合作专项基金的设立：**在多边气候基金（如绿色气候基金（Green Climate Fund, GCF）、全球环境基金（Global Environment Facility, GEF））下设立农业甲烷减排的南南合作窗口，支持技术适应性试验、示范项目建设和能力培训。重点领域包括节水抗旱稻品种的区域适应性测试、低成本粪污资源化技术的本土化改造、稻田甲烷 MRV 的简化方法学开发。
- **跨国能力建设网络的搭建：**依托已有的区域农业研究网络（如国际水稻研究所（International Rice Research Institute, IRRI）、国际畜牧研究所（International Livestock Research Institute, ILRI）），组织面向发展中国家农业技术推广人员的专题培训，内容涵盖排放监测方法、减排技术筛选、碳资产开发流程等实操性主题。培训材料可直接采用报告案例作为教学素材。



第二部分：农业甲烷 减排多重效益案例集锦

4. 农业甲烷减排多重效益案例

本章精选 12 个中国农业甲烷减排典型实践案例，以各场景面临的现实挑战为切入点，按统一框架展开分析：先针对核心问题提出具体解决方案，再明确方案实施的主体与利益相关方，继而从环境效益、经济效益、社会效益三个维度系统解析多重效益，最后提炼得到实践启示。

4.1 饲料添加剂：澳亚牧场通过饲料添加剂实现肠道甲烷减排与经济效益双提升

吴万祺¹，雒诚龙²

¹澳亚集团有限公司 ²中国农业大学动物科学技术学院

背景

在当前全球应对气候变化、推进双碳目标的大背景下，农业碳减排已成为实现可持续发展的关键一环。澳亚集团作为中国大型牧场的领军企业，积极响应国家绿色低碳发展的号召，将低碳转型视为企业长期战略的核心组成部分。在奶牛养殖的全生命周期中，肠道发酵产生的甲烷排放是温室气体排放的主要来源之一。澳亚集团在致力于提升奶牛单产的同时，提前布局“肠道甲烷减排饲料添加剂”领域，确立了以“增产降碳”为核心的目标导向，不仅关注环境效益的提升，更致力于在生产效率上实现突破。

本案例以澳亚集团旗下的东营牧场为核心试点，开展了针对甲烷抑制型营养添加剂的生产条件验证与规模化应用评估。通过建立“精准添加—稳定饲喂—实测核证—效果评估”的闭环运行机制，成功实现了“单产提升”与“甲烷排放强度下降”的协同效应。该案例不仅证明了在规模化、高产奶牛养殖场景下，营养调控手段具备兼顾生产性能与减排绩效的巨大潜力，更为整个乳业提供了可量化、可复制、可推广的甲烷减排技术路径。

面临的挑战

在奶牛养殖的温室气体结构中，肠道发酵产生的甲烷是影响环境的关键因子。因此，在不牺牲单产的前提下实现“甲烷可降、效果可证、收益可算”，是牧场端面临的挑战。饲料添加剂作为一种具有高度操作性和规模化潜力的营养调控工具，被视为目前最具应用前景的解决方案之一。尽管实验室数据表明多种添加剂具有减排潜力，但在真实的生产条件下落地仍面临以下三重严峻挑战：

效果稳定性挑战：奶牛的减排效应受其泌乳阶段、日粮营养结构、环境应激及日常管理细节的复杂影响。若缺乏在真实生产环境、足够样本量下的长期验证，很难获得具有行业对标意义的科学结论。

经济可行性挑战：当前全球奶价波动剧烈，牧场经营面临巨大的成本压力。任何减排方案若不能转化为“增产”或“提效”，便无法形成可持续的投入产出逻辑，难以被广大生产经营者接受。

数据可核查性挑战：目前行业内缺乏公认的甲烷排放因子和标准化的监测手段。若没有实测数据的支撑，减排效果将停留在定性描述层面，难以沉淀为可用于碳核算与行业对标的参数基础。

解决方案

澳亚集团将“甲烷减排饲料添加剂的规模化应用与验证”作为案例主轴，形成以“营养调控为核心、实测核证为支撑、参数沉淀为延伸”的实施路径。

(1) 核心措施：饲料添加剂规模化应用与“增产降碳”验证

澳亚以东营牧场为试点，在生产条件下开展甲烷减排饲料添加剂的规模化应用评估。试验采用对照与添加剂处理的方式，在高产经产牛群中持续一段周期，持续将饲料添加剂投入全混合（Total Mixed Ration, TMR）日粮，在不改变常规饲养管理的前提下，同步跟踪产奶表现、饲喂效率与肠道甲烷排放等关键指标，用于验证添加剂在真实场景下实现“增产降碳”的综合效果。

为保证结果可比性与可解释性，牧场实行了标准化数据采集流程：个体产奶量由自动流量监测系统连续记录；干物质采食量在圈舍层面按投喂量与剩料计算；甲烷排放采用国际研究通用气体监测系统（GreenFeed）实测，并在试验前对奶牛进行设备使用训练，确保采样行为稳定；同时采集瘤胃发酵与血液生化指标，用于判断机理方向与安全性边界。

(2) 围绕添加剂效果的实测核证、低碳基因育种评估与排放因子开发

在添加剂验证基础上，澳亚集团将实测数据用于持续评估不同阶段牛群的甲烷排放特征，逐步沉淀可用于内部核算及决策的参数与基线信息，包括（i）使添加剂效果能够在更长时间尺度与更广牛群范围内被追踪和对比，持续优化 TMR 配方以提升单产；（ii）针对具有高遗传潜力特性的核心奶牛种群及其胚胎移植后代，开展“低碳奶牛”性状数据积累与分析，为后续基因选育提供依据；以及（iii）在核算奶牛肠道发酵碳排放时，将 IPCC 默认值替换成本土实测数据，以提升碳排放报告的准确性。

主体与利益相关方

案例实施主体涵盖了澳亚集团总部及东营牧场的管理与运营团队，具体包括牧场场长、营养师、饲喂执行人员、饲料添加剂供应商及数据评估专家。利益相关方形成了紧密的协作体系：饲料添加剂供应商和营养师共同制定实验方案，牧场生产团队保障 TMR 混料和投料的精准性和一致性，甲烷监测设备方则支撑实测的数据质控。这种多方协作机制确保了减排技术能够从实验室走向生产一线，并转化为可持续、可复盘的生产实践。

多重效益分析

该实践在环境、经济与社会三个维度均取得了显著成效。在环境方面，添加剂组奶牛的肠道甲烷绝对排放下降了约 9.21%，产奶甲烷强度（CH₄/MY）下降 11.5%，且瘤胃发酵指标显示营养转化效率得到增强，具备良好的安全性。在经济方面，添加剂组实现了“产奶量+效率”的双重改善，平均产奶量提升 1.98kg/天（约 3.64%），饲喂效率提升约 4.68%。在社会效益方面，通过大样本实测数据，案例增强了行业对营养减排协同生产收益的认知，并形成了以甲烷绝对排放与强度指标为核心的可复用评价框架。

经验启示

此东营试点牧场的单产为 14 吨/成母牛/年（澳亚集团有限公司，2025）。本案例证明，在高产牧场场景下，牧场可抓住饲料添加剂这一“可操作性高、可规模化复制”的工具，实现不俗的“增产降碳”表现，以确立商业可持续性。生产条件下的减排成效必须做到“可测、可证、可复盘”，利用实测手段并辅以强度指标来验证“增产降碳”效果。同时，围绕添加剂应用同步开展数据沉淀与参数建设，有助于持续优化 TMR 日粮配方与低碳奶牛基因选育的研究，完善本土奶牛碳排放因子，并且提升企业碳排放报告的准确性。

4.2 牧场修复：南山牧场退化草地修复与可持续管理的协同效益实践

孙道¹，朱伟云²

¹南京农业大学草业学院 ²南京农业大学动物科技学院

背景

南山牧场位于中国湖南省邵阳市城步苗族自治县西南部，是中国南方最大的现代化山地牧场，被誉为“南方的呼伦贝尔”和“中国第一牧场”。20世纪80年代，国家开发南方草山草坡发展人工草地畜牧业，建植以高产优质黑麦草、鸭茅和白三叶为优势物种的混播草地，使南山牧场成为南方最重要的现代化牧场。然而自2012年以后，由于草地的长期不合理利用和管理，加之气候变化，导致人工草地严重退化、奶牛存栏量和奶农养殖户急剧减少。近年来，在城步苗族自治县政府的支持下，南京农业大学、南山牧场与南山牧业有限公司联合组建团队，探索出了一条集草地生态修复、畜牧养殖技术提升与农户增收于一体的可持续发展路径。本案例总结了南山牧场的经验：以技术创新和经营模式融合为抓手，实现了退化草原生态恢复与生产力绿色可持续的双重目标。这对南方中高山草地畜牧业的低碳转型有实际参考价值。

面临的挑战

当前，南山牧场主要面临以下三方面的挑战：

- (1) 草地退化严重：2012年以来，由于超期利用及自然灾害，人工草场出现快速退化，植被覆盖率一度从90%下降至50%甚至出现秃斑，产草量骤降，生态系统多功能明显下降。
- (2) 经济循环受阻：退化草山产草量低、营养品质差，导致家畜养殖高度依赖外调饲草和精饲料，推高养殖成本，致使养殖户面临持续亏损。
- (3) 技术与投入挑战：由于退化草地面积很大，高效修复技术还不够成熟，资金也相对不足。单靠牧场自身的经济实力，要扭转生态和生产的下滑趋势难度较大。

解决方案

为应对上述挑战，多方联合形成了综合治理方案（图6）：政策上，城步苗族自治县政府建立养殖和生态补偿机制，发挥政策引导作用；科技上，南京农业大学主攻草地农业生态系统碳汇提升、畜牧业精准减排和资源高效利用等技术，帮助打通绿色、稳定、高效的全链条；市场上，企业牵头改进产品加工工艺，增加产品种类，打造品牌，提升市场竞争力；养殖端，调动农户积极性，让他们主动提高养殖技术、转变养殖习惯，共享绿色红利。通过多方合作，共同打造绿色产业链。



图6.“校-地-企-农”四方合作模式

(1) 退化人工草地复壮。科学混播：筛选适合南方丘陵海拔的优质牧草新品种，进行牧草最优组合（如多年生黑麦草、白三叶等8种草种混播），利用多物种生态位的互补性，提高产草量并促进土壤肥力恢复。精准施肥与改良：研发有机无机施肥组合，使土壤有机碳含量增加15%。采用“种子丸粒化”技术，并将根瘤菌包裹，改善根际环境以提高出苗率。机械化修复：首次开展无人机与地面动力机械联动施肥、混播，并使用自主研发的免耕补播设施，在减少动土带来的碳排放的同时高效修复秃斑地。

(2) 低碳畜牧管理。划区轮牧：改变传统无序放牧，利用围栏将草地划分为不同小区，轮牧周期平均25天，既保护草地再生能力，又提高牲畜采食效率，间接减少单位产品的甲烷排放。高效饲草加工：在生长旺季关闭部分坡度较小的小区进行割草青贮，利用抑菌防腐贮藏技术提升粗蛋白含量，改善动物肠道健康，通过饲料改良实现生产力提升与减排双赢。调整日粮结构，减少甲烷排放：首先是优化精粗比，适度降低高排放、高成本的精饲料投入，因地制宜利用南山牧场丰富的青饲料资源（如青贮玉米、黑麦草等），构建“以草代粮”的低排放日粮模式。其次是科学补饲，调控瘤胃发酵，针对性补充微量元素及非常规饲料添加剂，改善瘤胃发酵环境，提高饲料养分利用率。粪便资源化利用，实现末端减排与循环增效：首先是厌氧发酵制肥，对养殖过程中产生的粪便实施集中收集与厌氧发酵处理，将其转化为高品质有机肥。其次是构建草-畜-肥闭环，将发酵后的有机肥结合无机肥还田利用，培肥地力，促进高产优质饲草生产，进一步反哺低碳养殖。

融资与保障机制

本实践实施的资金主要来自国家专项资金、省财政专项资金、地方财政补贴和以工代赈四个方面，详见表 3。

表3. 资金支持方式和类型

国家专项资金引导	争取“湘桂岩溶地区石漠化综合治理项目”和“奶业生产能力提升整县推进项目”等国家级专项资金，解决退化人工草地复壮初期的重投入问题
省财专项资金引导	争取“湖南省科技帮扶项目”等省级专项资金，争取“湖南省科技帮扶项目”等省级资金，减轻奶牛粪污处理的前期投入负担
地方财政补贴	城步县财政对成年母牛投保、集中挤奶站运营、鲜奶收购及基础设施建设给予额外补贴，降低了小农户的经营风险
以工代赈	吸引农牧民直接参与草原修复项目，不仅解决了建设用工问题，还通过现场培训提升了农户的管护能力

运营主体与利益相关方

政府部门（城步县委 / 政府等）：负责法制保障（如出台《奶业发展条例》）及资金统筹。

科研机构（南京农业大学等）：依托南京农业大学成立“南山草畜牧业可持续发展技术创新中心”，聚焦退化草地修复、碳汇提升、精准减排与资源高效利用等关键技术研发，并为牧场提供草种选育、草地建植及草畜转化的现场技术指导。

企业主体（南山牧场、南山牧业）：承担项目实施与运营管理职责，负责乳制品加工与品牌建设，作为龙头企业带动产业循环。

牧民：既是草地保护的实施者，也是减排增效的直接受益者，通过专业合作社与企业建立稳定的利益联结。

多重效益分析

环境效益：（1）草地固碳能力增强。通过修复，草地植被覆盖率比治理前提高了 19 个百分点，修复后草地每公顷增加 1.35 吨干草产量，优质牧草增加 1.7 倍，杂草降低 26%。土壤有机碳含量增加 15%，意味着土地作为碳库的蓄积能力得到实质性提升。（2）废弃物氮素减排。研发的养分阻控材料能降低牲畜粪便氮素流失 26.9% 以上。

（3）甲烷减排。通过优化日粮结构、推广非常规饲料应用及配套草场改良措施，奶牛养殖甲烷排放水平显著下降。根据 Niu 等人 2018 发表的利用跨洲数据库预测奶牛肠道甲烷产生量、产率及强度的文章中等式 (iii) 进行甲烷排放估算（Niu et al., 2018）。初步结果表明：南山牧场牧草改良后，仅改变采食量，泌乳奶牛日均甲烷排放量从 422.8g 降低到 390.4g，减排幅度为 7.7%。

经济效益：节本增效与产值飞跃。（1）养殖收益翻番。对牧民 6.7 公顷退化人工草地实施修复及围栏建设，扣除技术研发成本后的总投入为 14 万元。通过后定期施肥与补播，草地可维持 8 年，其间累计实现利润 20 万元。相比此前，奶农仅能维持成本甚至亏损的状态，生产效益显著提升，基本实现每头奶牛年均盈利约 3000 元。（2）产业带动作用强。城步县牧业产值占农林牧渔业总产值的比例平均达到 44.42%，畜牧业产值位居各产业之首，极大地推动了地方经济增长。

社会效益：品牌价值与社区增兴。（1）就业与增收。以工代赈模式直接增加了牧民在建设期的劳务收入，同时通过“基地 + 联系户 + 龙头企业”模式带动了牧户参与规模化养殖。（2）品牌知名度。“南山牌”奶粉曾闻名全国，优质的草场生境是品牌最核心的资产，提升了区域公共品牌价值。（3）低碳认知普及。通过项目实施，奶农对草地保护与气候变化的认知水平显著提升，从被动管护逐渐转向主动保护。

经验启示

南山牧场案例证明，农业甲烷减排并非以牺牲经济为代价，而是可以通过科学利用和管理实现生态与生计的和谐。

（1）技术集成：要获得持久效益，必须突破种植或养殖的单一思维，研发涵盖“土 - 草 - 畜”全生命周期的减排技术。

（2）利益联结：通过政府补贴引导和企业带动，将农户利益与减排固碳目标捆绑，使生态工程转化为民生工程。

（3）模式复制：该模式尤其适用于南方海拔 800-3100 米的亚高山地带，具有极强的地域推广性，可向外辐射至越城岭和雪峰山脉周边的高山草地。

通过持续投入与科学治理，南山牧场正从传统的“第一牧场”蜕变为“绿色发展”的碳中和样板，为中国乃至全球的南方山地畜牧业低碳发展贡献了宝贵的“南山智慧”。

4.3 生物垫床技术：肉牛养殖粪污污染治理与碳排放控制的协同增效

胡荣桂，王砚
华中农业大学资源环境学院

背景

中国是畜禽养殖大国，牛养殖可为肉牛养殖和奶牛养殖。2024年，中国牛存栏量为1.05亿头，约占全球10%，仅次于印度和巴西，排名全球第三；其中肉牛出栏量是5099万头，占全球肉牛出栏量（263336万头）的19.4%（东方戴瑞咨询，2025）。中国畜禽粪污产生量大，年均产量约为30.5亿吨（赵立欣，2025），其中肉牛粪污产生量6.3亿吨。相比中国奶牛百头以上规模化养殖比例达78%（中国奶业协会等，2025），肉牛养殖的规模化程度仅37%（中国青年网，2024），从而导致肉牛粪污的资源化处理与利用率相对较低，环境污染问题突出。养牛场的环境问题包括：一是养殖废水直接排放，牛尿、冲洗废水、消毒废水等未经处理直接排入沟渠、坑塘、农田或河流，导致多项污染物指标严重超标；二是固体废物露天堆放，牛粪、垫料、医疗垃圾等露天堆放，无防渗措施，雨水冲刷后外溢污染土壤和地下水。当前，畜禽养殖粪便处理基本走向是沼气。随着双碳战略的深入，养殖粪污处理的甲烷排放列为农业领域甲烷减排的重点行动之一，这使得粪污处理既可以实现资源化利用，又具有温室气体减排的效益。

面临的挑战

粪污处理方式主要包括厌氧处理和好氧处理两种方式，厌氧处理是进行粪污固液分离处理，液体部分通过厌氧发酵产生的沼气可用于生产电能和热能，沼渣成为优质的牛床垫料，沼液则通过管道或车辆输送至牧场周边种植基地替代化肥进行还田施肥。好氧处理主要是通过好氧堆肥技术生产有机肥，用于经济作物或高经济附加值的果蔬生产。无论厌氧还是好氧处理，养殖户或企业都面临着投入成本高、需要大量劳力等挑战，寻找一种简单、低成本的粪污处理方法成为养殖户的迫切需求。而利用生物垫床技术进行肉牛养殖粪污处理，不仅解决了粪污的环境污染问题，还具有减少温室气体排放的潜力。

解决方案

(1) 项目技术原理：生物垫床技术模式的关键是在经过防渗漏处理的养牛棚内养殖肉牛，养殖初期投入稻草或稻壳花生壳等木质化高的生物质垫料和前期发酵底料，后续根据养殖需要再投入垫料，形成60cm到70cm深的生物发酵床，经过发酵的粪污，养殖户可以半年或者根据需要适时清出。

(2) 技术及监测：本项目执行过程中，华中农业大学项目组提供主要技术，并对不同时期的甲烷、氧化亚氮、二氧化碳等气体排放进行监测；以及项目开始时免费提供全部技术，后期由农场主按照要求执行，并随时联系相关技术人员及时咨询或请教以解决出现的问题。

(3) 项目资金来源：本项目开发所需资金一部分来自农场。本项目是在沙阳县科牧秸秆饲料有限公司开展，故开展养殖和相关管理活动的费用，包括饲料、粪便出栏、堆肥利用等均由农场负担。美国环保协会（Environmental Defense Fund, EDF）为华中农业大学提供部分经费，支持从取样到样品分析所需的费用。

(4) 未来项目选择：在未来的项目执行过程中，建议以大型农场为主体并负责运行，同时联合周边或省市行政区内采样相同技术模式的养殖农户或农场共同组成联合体，这样不仅利于推广相关减排技术，完善相关管理，也有利于碳减排项目的管理和交易。项目的监测和分析则可交由第三方公司进行。

主体与利益相关方

本项目开发过程中，养殖生产和后续粪肥出栏、堆肥利用、发售等方面的主体执行方均为农场。华中农业大学负责技术及相关管理和监测等，美国环保协会提供资金支持。

多重效益分析

环境效益：从2025年8月18日开始连续测定，根据监测数据计算得出，每头牛每年的甲烷排放量为0.869-4.096 CH₄ kg/头/年；氧化亚氮的年间排放为4.004-345.082 N₂O g/牛/年。依据国家推荐的省级排放清单，中南地区肉牛粪便处理甲烷排放因子为11.7-15.1kg/头/年，氧化亚氮排放因子为0.94kg/头/年。以省级清单排放因子为基线情景，生物垫床为项目情景，依据保守性原则，选取最高值进行计算，采用生物垫床技术每头牛甲烷减排约为11kg/头/年，氧化亚氮减排0.595kg/头/年。按养殖场每年养牛400头计算，甲烷减排4400kg，氧化亚氮减排238kg。

经济效益：采用生物垫床技术进行肉牛养殖的粪污处理不仅减少了每日清理粪便的人工，以及粪便频繁移出的功耗；还减少了工程处理方法所需的工程建设费用和设备运行所需费用；此外，发酵的垫料经粉碎过筛后可以直接用于种植业，减少了堆肥或其他处理环节的能源和人工消耗，还实现污水零排放，避免了环境污染。

经验启示

从生物垫床养殖模式得到了以下启示：

(1) 生物垫床的养殖模式是由农民在实际工作中自主摸索出来，后经多年的实践才获得广泛应用。尽管一开始，农民并不是奔着温室气体减排来开发这个技术，但由于该技术在减少人工费用和工程设施等方面效益显著，获得了广大养殖从业者推崇，而其减排效果是后续的科研监测验证。这意味着在开发减排技术时，我们不应该随便否认一项成功应用的技术，而要切实地用科学数据进行验证。

(2) 在开发减排技术和减排项目过程中，研发及推广主体要注重与行业正在推广施用的技术结合，在成熟的技术或模式中寻找和发现新的问题，突破相关技术瓶颈，实现温室气体减排，从而使减排技术迅速得到推广和确认。

(3) 在减排项目开发和减排技术推广过程中，研发及推广主体一定要与企业或业主共同进行，这样不仅能节省开发经费，对减排措施的推广应用也起到重要推动作用。

4.4 全生命周期减排：现代牧业全生命周期低碳牧场减排模式实现全链条多重效益协同

霍伟华¹，王蔚²

¹现代牧业（集团）有限公司 ²中国农业大学动物科学技术学院

背景

在双碳目标和农业绿色转型持续推进的背景下，奶业既是重要的民生保障产业，也是农业领域温室气体减排的重要对象。与传统工业部门相比，奶牛养殖的排放来源更加分散，涉及饲草种植、投入品运输、肠道发酵、粪污处理、能源利用和原奶运输等多个环节，决定了其低碳转型不能依赖单一技术突破，而必须以全链条协同和系统集成成为基本路径。现代牧业（集团）有限公司依托全国布局的规模化牧场体系，于2022年启动“全生命周期低碳牧场”示范项目，逐步将温室气体管理从单点治理拓展为覆盖上游饲草供应、养殖端甲烷控制、粪污资源化利用、能源结构优化和运输减排的系统性实践。

面临的挑战

对规模化奶牛养殖而言，甲烷是温室气体管理的核心议题，其主要来源为肠道发酵和粪污管理。因此，奶业减排需双管齐下：既要聚焦奶牛肠道甲烷的控制，也须统筹推进粪污、能源与种植环节的协同治理。作为全国性龙头牧企，现代牧业面临的挑战具有鲜明的行业代表性：一是多区域、多气候和多饲养条件并存，同一减排技术在不同牧场间复制应用存在效果波动；二是若长期依赖国际缺省排放因子，难以真实反映中国规模化牧场的甲烷排放特征，也难以支撑精细化管理和外部核证；三是在行业周期波动背景下，减排措施必须与提质增效、降本增效同向推进，才能在集团层面持续实施。更重要的是，作为行业龙头企业，现代牧业不仅需要回答“自身如何减排”，还需要回答“如何为行业提供可复制、可验证、可扩散的低碳路径”。

解决方案

现代牧业的实践可概括为“甲烷减排牵引、全链协同推进、成果认证扩散”的总体路径，并通过种养结合、能源替代和数据核证，逐步把减排要求转化为可持续的运营机制和行业共享能力。

(1) “模型+实测”双轨：先核查、再校准、再优化。项目以2021年为碳排放基准年，建立覆盖饲料种植、养殖、粪污处理和能源消耗等环节的核查模型，并据此设定2035年单位排放强度下降20%的目标。同时，引入国际研究通用气体监测系统（GreenFeed）开展多牧场动态实测，形成“模型-实测”双轨验证机制，用实测数据推动排放因子本土化校准、减排路径优化和绩效结果验证。其意义不仅在于提升集团内部管理精度，也在于为中国奶业甲烷排放核算和行业方法完善提供基础数据支撑。

(2) 上游饲草与营养：提高本地化与消化率，降低甲烷生成潜力。在上游，现代牧业通过高品质饲草基地建设及“收购+协同种植”机制提升本地化比例，降低进口饲料占比和远距离运输带来的排放；在养殖端，通过优化饲料结构、推行低蛋白日粮与精准配方、提升瘤胃消化率，从源头减少肠道甲烷生成，并通过提升生产效率和改良遗传性状降低单位产品排放强度。这一路径把甲烷减排与饲料效率提升、氮排放控制和种植端稳定收益连接起来，体现了“减排-提效-协同”的一体化思路。

(3) 粪污资源化闭环：沼气替代化石能源、有机肥替代化肥。现代牧业将粪污从传统意义上的处理成本转化为可利用资源，通过厌氧发酵系统将粪污转化为沼气，用于供热和发电，同时将沼液、沼渣用于还田和垫料。2025年，集团沼气产量约1.96亿立方米，沼气发电量约1.23亿度，形成沼渣垫料烘干约240万方；下游端建设粪肥输送管道915公里，累计施用生物肥超800万吨，替代化肥6.6万吨，逐步形成“种植-养殖-能源-肥料”闭环。该模式既降低了粪污环节甲烷与氧化亚氮排放风险，也带动了区域种养循环和农业投入结构优化。

(4) 能源结构与设备电动化：牧光互补+节能改造+低碳运输。在能源侧，现代牧业持续推进光伏等清洁能源应用与节能设备改造，推广永磁电机、精准喷淋、全自动刮粪、感应风机等设备，并通过场内作业设备替代和物流新能源化降低化石能源依赖。2024年，可再生能源占比超过60%。尽管该环节并非甲烷减排的直接来源，但其有效降低了全生命周期边界下的综合排放强度，为甲烷主线减排提供了配套支撑。

主体与利益相关方

现代牧业提供了低碳技术落地的真实场景、组织实施能力和连续运营数据，是案例推进的核心主体；高校和科研机构负责方法设计、排放监测、技术研发与减排评估，为甲烷减排和全链条管理提供科学支撑；行业组织和创新平台在经验总结、成果传播、示范认定和资源整合中发挥桥梁作用；饲草种植主体、农田利用主体、物流和装备服务主体则通过参与有机肥还田、低碳运输和节能升级，共同构成产业链协同减排的重要一环。

多重效益分析

环境效益：现代牧业已形成“集团强度指标+示范牧场认证结果”的双层绩效。从集团层面看，2025年单位矫正乳（Fat- and Protein- Corrected Milk, FPCM）温室气体排放量为0.82kg CO₂e/kg FPCM，较2021年下降10%；单位矫正乳甲烷排放强度为0.62 kg CO₂e/kg FPCM，较2021年同样下降8%。同时，集团提出以2021年为基准，到2035年单位强度下降20%的目标路径。从示范场层面看，2024年首批低碳示范牧场通过认证并挂牌，产品碳排强度较实施前下降10%以上。配套基础设施方面，2025年沼气发电约1.23亿度、粪肥管网915公里、有机肥施用超800万吨、替代化肥6.6万吨，为甲烷控制和间接减排提供了可量化抓手。

经济效益：现代牧业的减排路径突出“降本增效同向”。一方面，粪污资源化降低外购能源成本，并通过沼气发电和供热替代化石能源形成持续收益；另一方面，化肥替代减少种植端投入，提升土壤培肥能力和饲草稳定供给水平，增强上游抗波动能力。实现牛垫料资源100%替代，剔除系统运行费用外，每年直接经济效益达2亿元以上。通过提升生产效率、优化牛群结构和精准配方管理，使单位产品碳强度下降与单位成本下降同步发生，增强了低碳模式在集团范围持续推广的经济可行性。

社会效益：现代牧业连续三年协同生态环境部宣传教育中心等举办“绿色牧场开放日”活动，提升了公众对奶业绿色转型的认知度和可见度，也增强了产业链各方对低碳养殖的理解与参与。与此同时，通过“低碳示范牧场”发布、第三方认证挂牌以及相关成果传播，企业逐步将内部实践转化为行业共享经验，带动更多牧场采用监测-核算-改造-评估”的体系化路径，提升了奶业绿色转型的社会示范效应和行业带动作用。

经验启示

(1) 要以甲烷减排为主线推进奶业低碳转型。现代牧业的实践表明，抓住肠道发酵这一关键排放源，并用实测数据校准排放因子和技术效果，能够显著提升减排工作的针对性和可信度。通过设定基准年、建立核算模型、开展甲烷实测、引入第三方认证和全生命周期评价，企业构建起可量化、可验证、可优化的闭环管理机制，这对行业完善排放核算方法和碳管理体系具有重要借鉴意义。

(2) 低碳牧场必须做成多环节耦合的系统工程。饲草本地化与营养调控决定甲烷减排潜力，粪污资源化决定后端排放控制和资源转化能力，能源结构优化和设备升级则提供全生命周期边界下的支撑条件。只有把这些环节协同起来，才能形成稳定、持续、可复制的减排成果。

(3) 龙头企业的价值不仅在于率先减排，更在于把企业实践沉淀为行业公共产品。现代牧业通过联合科研机构、行业组织和认证机构，将真实场景数据、示范经验和管理成果进一步转化为标准、白皮书、认证结果和示范样本，提升了行业整体推广效率。这说明，企业减排若能与标准化建设、方法学创新和产业链协同结合起来，就能够实现从“企业减排”走向“行业共赢”的扩散效应。

4.5 粪污沼气发电：济南平阴优然奶牛养殖粪污处理实现多重效益

樊庆垚，侯伟
内蒙古优然牧业有限责任公司

背景

济南平阴优然牧场坐落于中国山东省济南市平阴县孝直镇前洼村南部，于2021年1月13日投产运行，年存栏奶牛规模约10000头。牧场采用完全混合式厌氧反应器（Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR）对奶牛粪便开展专业化处理。牛粪通过发酵产生沼气，配套建设装机容量0.8MW的沼气发电厂（现阶段已安装0.5MW，剩余0.3MW处于规划阶段），所产生电力全部供牧场自身辅助设备使用；同时安装余热回收锅炉，对沼气发电过程中产生的余热进行回收，为项目辅助设备供应热能，形成“粪污发酵产沼气—沼气发电—余热回收再利用”的能源循环体系（VCS, 2024）。该牧场的废弃物处理方式属于典型的畜禽养殖粪污管理碳减排项目，可为行业低碳转型提供标准化、可复制的实践路径。

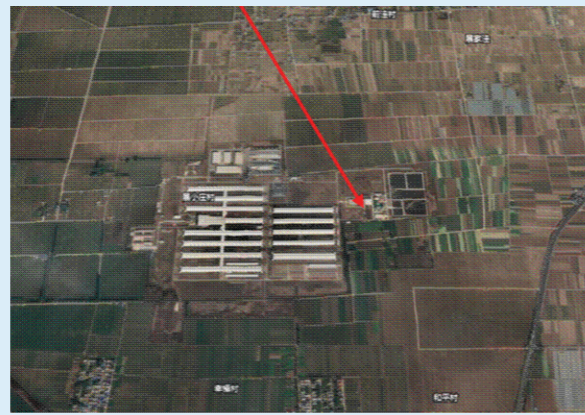


图 7. 济南平阴优然奶牛粪便管理项目地点

面临的挑战

在项目实施前，牧场的奶牛粪便废弃物通过氧化塘厌氧储存池进行处理，该过程中产生的甲烷气体未经过任何回收和销毁设施，直接无组织排放至大气中，不仅造成了严重的温室气体排放污染，也导致粪便中的能源资源被浪费，未能实现有效利用。此外，传统粪污处理模式也存在环境隐患，易对周边土壤、水体造成污染，不符合国家低碳环保、资源循环利用的发展要求，也与畜禽养殖行业绿色转型的趋势相悖。

解决方案

牧场通过建设一体化厌氧动物粪便处理系统，围绕粪污处理、沼气回收、能源利用、碳减排形成综合的解决方案。具体实施内容如下：

- (1) 核心发酵设备配置：安装3台由杭州能源环境工程有限公司（Hangzhou Energy and Environmental Engineering Co., Ltd., HEEE）生产的CSTR型厌氧消化器，单台有效容积4000m³，总有效容积达12000m³，同时配套1台有效容积3000m³的一体化沼气储存柜，保障沼气稳定发酵与储存，项目预计年产生沼气8500000m³。
- (2) 沼气发电系统建设：建设0.5MW装机容量的沼气发电机，配套ZQHJ-20型应急火炬系统（高15m，外径1m），将回收的沼气主要用于发电，电力全部供给牧场自身辅助设备运行，应急火炬则在突发情况下对沼气进行燃烧处理，确保无甲烷直接排放。
- (3) 余热回收利用：配置专业余热回收锅炉，对沼气发电过程中产生的余热进行高效回收，将热能供应给牧场辅助设备，提升能源整体利用效率，减少能源浪费，实现能源的梯级利用。
- (4) 粪污资源化收尾：CSTR厌氧消化器产生的沼渣沼液（消化物）直接输送至周边农田作为有机肥料，实现粪污的全量资源化利用，同时避免消化物二次储存产生的甲烷排放。
- (5) 全程监测与管控：安装流量计、电表、热电偶等专业监测设备，对沼气产量、发电功率、火炬温度等关键参数进行实时、连续监测，设备按行业标准定期校准，保障系统稳定运行和数据可追溯。

主体与利益相关方

济南优然牧业有限公司（Jinan Youran Animal Husbandry Co., Ltd.）是项目投资、建设、运营主体，拥有项目的合法控制权和运营权，负责项目日常运行、数据监测与记录等工作。

平阴县环境保护局、当地村委会及村民、设备供应商（HEEE等）、施工单位等利益相关方，其中平阴县环境保护局负责项目环保审批与日常监管。

成果效益

环境效益：（1）牧场通过回收沼气，从源头减少甲烷等温室气体排放，经核证碳标准（Verified Carbon Standard, VCS）核证18个月减排量49634tCO₂e。（2）牧场彻底替代了传统的厌氧氧化塘的粪污处理方式，有效减少了粪污降解对周边土壤、水体、大气的污染；产生的沼渣沼液作为有机肥返还农田，形成“养殖—粪污—种植”的生态循环，沼气发电与余热回收则替代了部分常规能源消耗，降低了能源生产过程中的间接碳排放，提升了能源利用效率。

经济效益：（1）利用牧场牛只粪便为原料生产沼气，既解决了能源紧张状况，同时生产的沼渣沼液可减少农药、化肥用量，提高农作物产品质量。（2）本项目年产沼气547.5万m³，年发电量219万Kwh，节约电费113.8万元。生产沼渣3.6万吨，每吨按照100元计算年产值360万元，产生沼液32.5万吨/每年。每吨按10元计算，年产值325万元。预计可实现产值798万元。（3）碳信用效益：2021-09-05到2023-04-30监测期获得VCS签发49634吨碳汇，未来申请CCER碳信用年收益预计在百万元左右。

社会效益：（1）助力地方就业与经济发展。牧场运营后为当地提供了19个长期就业岗位，涵盖设备操作、监测、维护等多个岗位，助力地方居民增收，推动乡村经济发展，契合联合国可持续发展目标SDG8（体面工作和经济增长）。（2）推动行业绿色转型。作为畜禽养殖粪污处理的标准化碳减排项目，为行业提供了“废弃物处理—能源回收—碳减排—资源化利用”的一体化解决方案，推动畜禽养殖行业从传统模式向低碳、循环模式转型。（3）契合可持续发展目标。项目的实施直接契合联合国SDG13（气候行动）、SDG12（负责任消费和生产），助力中国双碳目标实现，也为地方农业生态循环发展奠定了基础。

经验启示

（1）废弃物资源化与碳减排协同发展，打造行业标杆：该项目充分证明畜禽养殖废弃物（如奶牛粪便）可通过厌氧消化技术实现“变废为宝”，在解决养殖粪污环境污染问题的同时，通过沼气发电实现能源回收，还能有效减少温室气体排放，形成“环境治理—能源回收—碳减排”的协同效应。项目将养殖粪污从环境污染物转化为能源资源和有机肥料，为畜禽养殖行业探索循环经济模式和碳减排路径提供了可行的实践参考，打造了行业标杆。

（2）标准化认证助力项目规范实施，提升项目公信力：项目严格遵循VCS Version 4.4国际标准及AMS-III.D Version 21.0、Tool 14 Version 02.0等方法论，从项目设计、实施、监测到减排量核算均按照标准化流程开展，相关文档（项目设计文件、监测报告、核证报告等）按要求公开并接受第三方独立核证。项目在核证过程中虽收到3项澄清请求、2项纠正措施请求，但均已完成整改并关闭，确保了项目的透明度、合规性和减排量的真实性，为同类碳减排项目通过国际标准认证、提升项目公信力和碳资产价值提供了重要参考。

（3）技术选择适配项目需求，保障项目高效运行：项目根据奶牛粪便的特性和牧场的实际规模，选择成熟、适配的CSTR型厌氧消化器技术，配套建设沼气储存、发电、余热回收和应急火炬系统，同时结合项目需求采用“发电自用+余热回收+沼肥还田”的资源化路径，确保了沼气生产、能源利用、粪污处置的整体效率。此外，项目配备专业的监测设备并定期校准，建立了完善的监测管理体系，保障了系统稳定运行和数据的准确性，体现了“技术适配性+管理标准化”对碳减排项目成功实施的重要性，为同类畜禽粪便处理项目的技术选型和运营管理提供了宝贵借鉴。

（4）全流程合规管控，保障项目可持续性：项目从立项到运营，严格遵守中国《环境保护法》《固体废物污染环境防治法》《畜禽规模养殖污染防治条例》等法律法规，完成了环境影响评价、项目审批等全部法定程序，运营过程中接受环保部门的日常监管，同时充分开展利益相关方咨询，兼顾环保合规、社会认同与项目可持续性，为同类项目的合规实施提供了范本。

4.6 粪污高效发酵：山东劲牛集团奶牛粪污高效发酵实现减排增收

张龙¹，郭李萍²，叶伟伟¹

¹ 山东劲牛集团股份有限公司 ² 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所

背景

随着中国经济持续发展及居民生活水平不断提升，社会对肉类、蛋类和乳制品等畜产品的需求稳步增长，社会对养殖环境质量和生产方式可持续性的关注也日益增强，推动畜禽粪污资源化利用成为农业绿色转型的重要方向。山东劲牛集团股份有限公司研发了畜禽粪污高效发酵技术，该技术在济南佳宝乳业第二牧场实现落地运用，该牧场集中养殖有 2000 头青年牛，每头牛每天平均产生 12kg 粪尿（含水量 85%），农场每日共计产粪尿 24 吨（含水量 85%），干湿分离后含水量 60% 的物料约 8 吨。通过高效发酵堆肥技术进行粪污处理，不仅能够有效减少温室气体及污染物排放，还可实现快速高效的高值化有机肥生产、实现粪污资源循环利用，在减排、资源利用及养殖场环境改善等方面具有显著的综合效益。

面临的挑战

畜禽粪污高值化利用具有显著的环境与经济效应，然而在实际生产过程中，由于奶牛养殖主要生产牛奶等系列产品，奶牛的饮水量大，粪尿混合物的含水量高，加之一些养殖场用水清粪，奶牛养殖场的粪污处理难度尤为突出，体现在如下几个方面：（1）粪污无害化处理需要一定的时间，每日积累的粪污需要一定的场地支持，有的养殖场在粪污处理配套场地方面有一定难度，不进行发酵，每日直接施肥对作物有风险（发酵烧苗、病虫害蔓延）。（2）奶牛养殖场粪污含水量大（高达 80% 以上），需要干湿分离及氧化池，粪污干湿分离后的粪便含水量依然较大（60%），运输及贮存都有很大的环境风险，而常规发酵由于物料堆内部的氧气、温度、湿度在堆内和表层差异大，发酵无法处于最优状态，一次发酵周期即使在夏天也需要 25-30 天，对场地面积要求较高；且直接发酵获得的有机肥增值系数低。（3）快速发酵技术需要科技支撑，如针对性的发酵菌、发酵装置等需要一定的投入，小型养殖场难以支撑；而一些发酵装置成本高、耗电量大，经济实用性差。

解决方案

粪污快速发酵资源化利用技术是针对畜禽养殖场粪污处理及高值化资源化利用的一项技术，本技术的核心装置为“智能发酵罐”（专利号 ZL2019 22206045.5），好氧发酵罐设计科学、简单易操作，罐体内的加热管道由热风机生成并注入热风给初始物料增温，使得罐体内物料温度处于适宜发酵的温度，罐内设有温度等监测系统可自动控制翻料 / 通风频率；配合适宜温度的专性发酵菌剂以及指导说明书（包括物料碳氮比（C/N）、含水量等），可快速处理畜禽养殖场的粪污，3 天即可完成一罐发酵，陈化 30 天后，外加有益菌，可制成高值化生物有机肥，粪污资源化进一步增值。

主体与利益相关方

粪污快速发酵资源化利用技术的利益相关方包括技术研发方（相关科研院所）与设备生产方（企业）、养殖场经营主体、技术推广人员以及地方政府与生态环境监管部门等。为使养殖经营主体接受和采用新型技术，需各级政府、环保监管部门、技术推广人员及研发机构进行理念宣传与能力建设，需要技术研发方和生产方进行样板示范，地方政府给予基础配套设施及场地建设及设备购置补贴等方面的配合和支持，技术人员技术指导到位，帮助经营主体实现废弃物的高效处理和增收，实现养殖场减排增收、资源高效利用和环境优化多赢。

多重效益分析

环境效益：佳宝乳业第二牧场采用智能发酵罐技术后，养殖场的氨挥发和硫化氢等臭气量明显降低，粪污臭味基本消除。根据 T/CGFA014-2025 方法学对养殖场温室气体排放的估算表明，养殖场温室气体减排了 12.5%，其中，粪便管理过程的甲烷减排 98%、氧化亚氮减排 21.9%，效果显著。

社会效益：该技术在山东、河南、内蒙及东北等地的奶牛养殖场、肉牛养殖场、养鸭场等进行高效粪污处理推广使用，明显改善了养殖场地面环境及空气环境，养殖场周边的空气质量也明显改善。

经济效益：一个 35 方的标准发酵罐（可装料的操作空间为 25 方），3 天后出料 15 吨（含水量 45%），陈化 1 个月后约 12 吨（含水量 35% 以下），按照市场价 600 元 / 吨，可收益 7200 元，每月收益 7.2 万元。若添加菌剂，制成生物有机肥，则收益翻倍，市场价可达 1200 元 / 吨，每月收益约 14.4 万元，3 个月可收回设备成本。

经验启示

粪污快速发酵资源化利用技术已在山东、河南等地的奶牛养殖场、肉牛养殖场及养鸭场得到了较为广泛的推广应用，在技术与模式的推广应用过程中，形成了若干具有代表性的实践经验，对同类项目具有较强的借鉴意义：

（1）有机肥企业积极主动调研行业问题，企业自身设有研发部门，积极走进养殖场，主动设计和研发了实用装置的技术专利；

（2）有机肥企业积极联系科研院所，在菌剂研发等关键环节进行合作，通过产学研协同创新，开发和挖掘高温快速发酵的菌种；

（3）有机肥生产企业结合销售人员及企业各部门人员积极宣传，寻求政府支持，主动申请省、市、区颁发的各项科研指南，提升自身科研能力，并通过各种渠道积极宣传各项技术，技术得以达到受众养殖场需求方；地方政府通过政策扶持、项目支持及宣传引导，多方发力进行技术宣传和推广；

（4）畜禽养殖场经营主体也表现出较强的主动性，积极寻求适合自身条件的粪污处理解决方案，寻求不同合作模式解决养殖场粪污及环境问题；技术方和需求方双向奔赴，达成了众多合作推广案例。

4.7 咖啡渣饲料化：咖啡渣转化为功能性奶牛饲料实现降本和减排协同

董利锋¹，滕战伟²，陈秋楠²，王元龙¹，
¹中国农业科学院饲料研究所 ²河南科技学院

背景

农业和废弃物处理是主要的甲烷排放源，其中畜牧业反刍动物肠道发酵是农业甲烷的主要排放源，填埋和焚烧处理等废弃物处理也是甲烷的主要排放源。在中国双碳战略背景下，绿色低碳转型已经成为各行业和部门的必然发展趋势。中国的畜牧业，尤其是奶牛养殖，在保障国民营养需求的同时，还面临着甲烷减排和生产成本控制的双重压力。与此同时，农业有机废弃物，如咖啡渣，由于缺乏高效的利用途径，通常被填埋或焚烧，造成了资源的浪费和环境的污染。因此，探索将农业有机废弃物的环境治理与畜牧业的减排增效相结合，提出解决农业绿色发展的创新解决方案具有重要意义。本案例分析了一项利用生物处理技术将咖啡渣转化为功能性奶牛饲料的创新实践，并通过在四川、云南等地的实地应用，验证了其在提升奶牛生产性能与降低甲烷排放方面的协同效应，探索出了一条具有韧性的低碳养殖新模式。

面临的挑战

咖啡是全球第二大贸易商品，中国特别是云南地区作为重要的咖啡产地，加工过程中会产生大量的咖啡渣。这些咖啡渣富含纤维素、蛋白质和脂类等有机物质，但由于含有抗营养因子（如单宁、咖啡因）以及极易霉变的特点，长期以来无法直接作为饲料利用。传统处理方式以填埋或焚烧为主，不仅占用土地资源，还会产生渗滤液和温室气体排放，给生态环境带来巨大压力。另一方面，奶牛养殖业正面临双重挑战：一是饲料成本居高不下，人畜争粮矛盾突出；二是在保障动物健康和生产效益的前提下，通过饲料管理降低奶牛养殖肠道发酵的甲烷排放已经成为行业研究的焦点，而可替代的非粮饲料以其减排增效等多重效益进入养殖业的视线。

解决方案

针对咖啡渣难储存、难消化、利用价值低的问题，该案例提出了一套基于复合微生物发酵技术的创新解决方案，成功将“环境负担”转化为“生产资源”。

(1) 复合菌剂协同发酵。为了改善咖啡渣的适口性和营养价值，优选了黑曲霉菌、植物乳杆菌、酿酒酵母菌三种功能不同的菌株。通过优化每种菌的添加比例和培养条件，研究了不同发酵模式对咖啡渣常规养分的影响。黑曲霉能够有效降解纤维素和部分抗营养因子，植物乳杆菌通过产酸降低 pH 值、抑制杂菌生长，酿酒酵母则产生丰富的菌体蛋白和维生素。三菌协同作用，不仅提升了咖啡渣的蛋白质含量，还显著改善了其风味。

(2) 科学评估与动物试验。在实验室发酵条件优化的基础上，研究团队分别在四川省成都市和云南省大理市开展了荷斯坦奶牛的饲养试验，系统评估了发酵咖啡渣对生产性能、乳品质量和瘤胃甲烷排放的影响。

运营主体与利益相关方

科研机构 and 高校：作为技术核心的研发方，负责菌种筛选、发酵工艺优化及动物饲养试验的数据监测与分析，为技术的科学性与有效性提供了理论支撑（中国农业科学院饲料研究所、中国农业大学动物科技学院、河南科技学院等）。

奶牛养殖场：作为技术的最终应用端，通过在日粮中添加发酵咖啡渣，直接提高了奶牛的产奶量，降低了饲料成本（新希望生态牧业有限公司以及云南省大理州洱源县养殖户等）。

饲料加工企业：作为模式的关键枢纽，负责收集咖啡渣并进行标准化生物发酵处理。该主体需具备一定的发酵设备和质量控制能力，将废弃咖啡渣转化为标准化的饲料产品（山西海元森生物科技有限公司等）。

多重效益分析

经济效益：生产增效显著。四川试验结果：与对照组相比，在奶牛日粮中添加发酵咖啡渣后，奶牛产奶量提升了 11.8%，且未对奶牛的乳品质及生产性能产生负面影响。云南试验结果：取得了更为显著的提升效果，产奶量提高了 9.08%，同时乳品质量得到明显改善：乳脂率提高了 16.85%，乳蛋白率提高了 7.41%。牛奶体细胞数的降低和抗氧化指标的提高，意味着牛奶品质更优，有助于提升奶产品的市场竞争力。

环境效益：甲烷减排协同。在四川、云南两地的试验结果：瘤胃甲烷排放量下降了 14%，综合考虑产奶量提升后，单位牛奶的甲烷排放强度下降了 21%。表明，发酵咖啡渣的添加不仅没有增加环境负担，反而通过改善瘤胃发酵功能，减少了能量以甲烷形式的损失，实现了“增产”与“减排”的双重协同。

生态效益：废弃物资源化。该模式将咖啡渣从“环境污染物”转变为“非常规饲料资源”，避免了因填埋产生的土壤和水体污染，减少了饲料粮（如玉米、豆粕）的消耗，缓解了人畜争粮的矛盾，构建了从消费端到生产端的绿色低碳循环。

经验启示

(1) 咖啡渣之所以能实现从“不能用”到“高效用”的跨越，关键在于微生物发酵技术的突破。针对不同废弃物的特性，筛选特定功能的菌种组合，优化发酵工艺，可以有效降解抗营养因子，提升营养价值。加大利用生物技术开发非粮饲料资源的力度，建立相应的技术标准体系。

(2) 低碳养殖可以实现“减排”与“增效”的共赢。传统观点往往认为环保措施会增加成本，但本案例中甲烷排放强度下降 21% 的同时，产奶量也大幅提升。这说明，通过营养调控手段优化瘤胃功能，提高饲料转化效率，是降低畜牧业碳排放强度的重要路径。这不仅有利于环境，更能直接增加养殖户收入。

(3) 构建闭环产业链是模式落地的保障。该案例的成功离不开“咖啡渣产生 - 收集 - 发酵 - 饲喂 - 效益反馈”这一完整链条的打通。未来，应继续推动食品工业、餐饮业的副产物与畜牧业紧密结合，建立基于循环经济的绿色供应链体系。

综上所述，以生物处理咖啡渣为代表的农业废弃物循环利用模式，为奶牛养殖业提供了优质的非粮饲料，实现了经济效益与环境效益的高度统一，是构建具有韧性的绿色低碳养殖模式的优秀范本。

4.8 旱管种植节水抗旱稻：稻田甲烷减排与节水协同增效的实践

周胜，张鲜鲜

上海市农业科学院生态环境保护研究所

背景

当前，控制甲烷排放成为最快最有效减缓气候变化方案之一。水稻种植作为重要的农业甲烷排放源，对于实现双碳目标以及应对全球气候变化具有重要意义。2024 年中国水稻播种面积 2900 万公顷（中国统计年鉴；2025），由于水稻种植过程中习惯性淹灌管理，造成每年稻田甲烷排放量居高不下。根据《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》，2021 年中国水稻种植甲烷排放量为 885.1 万吨，相当于 2.48 亿吨二氧化碳当量，占农业活动总排放量的 26.6%。另一方面，中国水稻生产过程中对水的依赖性强，水稻种植耗水量巨大，大多采用淹灌的种植方式，用水量约占中国农业用水总量的 70%，占总用水量的 50% 左右。因此，如何在保障粮食安全的前提下，减少稻田甲烷排放，提升水资源利用效率，对于中国水稻生产实现绿色低碳转型至关重要。

面临的挑战

长期以来种植水稻的主要目的是保障粮食安全，忽略了水稻种植甲烷排放的气候影响，需要提升农民对水稻种植甲烷减排的认知。

目前仅安徽、湖北、浙江、江苏、广东等地种植节水抗旱稻，种植面积约占中国水稻种植面积的 1%，而且农民几十年的传统水稻种植经验难以改变，因此，旱管种植节水抗旱稻（Dry-cultivated Water-saving and Drought-resistance Rice, D-WDR）的推广和扩大种植规模方面还存在着挑战。

旱管种植节水抗旱稻具有显著的甲烷减排效果，旱管种植节水抗旱稻的清洁发展机制（Clean Development Mechanism, CDM）或者地方碳普惠方法学已经被发布，为水稻种植碳信用进入碳市场奠定了基础，但农民缺乏开发具体减排项目的能力。

解决方案

节水抗旱稻（Water-saving and Drought-resistance Rice, WDR）是一种新型栽培稻类型，可采用水直播或旱直播旱管种植方式，在节水减排的同时保证产量稳定。旱管种植是利用节水抗旱稻的耐旱特性，出苗后整个生长发育期间仅在缺水敏感期进行适当灌溉的种植方式，无需保持淹水层。因此，旱管种植节水抗旱稻甲烷减排技术能很好地平衡产量、灌溉量与甲烷减排三者之间的关系。

D-WDR 甲烷减排技术通过筛选耐旱性强的栽培稻品种，筛选的耐旱性品种的抗旱性要高于 3 级；种子采用水直播（在有泥浆层的土壤表面，将经过浸种、催芽的种子进行播撒）或旱直播（在经过旱整平的土壤上播撒干种子），出苗后采用旱管种植方式，充分利用降水，减少生育期的稻田灌溉水量，大幅降低稻田土壤体积含水率及水分饱和时间，仅在关键生育期补充灌溉且不留水层，提高土壤氧化还原电位，抑制产甲烷菌生成甲烷，同时强化甲烷氧化消耗能力，并配套施肥与病虫害防治技术，在确保产量的同时，大幅降低甲烷排放量。

主体与利益相关方

旱管种植节水抗旱稻推广过程的利益相关方包括相关科研院所、种子生产商、种子经销商、种植合作社、技术推广人员以及地方政府等。为使种植户接纳新型技术，必须依靠良好的营销模式、技术服务手段以及配套基础设施，还要加上地方政府的支持，切实增产增收，获得利益。

各利益相关方采用“上联科研成果、下联应用落地、减少环节、联购分销”的农资采购方式，通过“优质产品 + 田埂技术 + 贴心服务”让节水抗旱稻生根发芽，切实实现了农民的增产增收。县农技中心召开多轮节水抗旱稻栽培技术培训会，通过邀请稻种研发中心专家、种业集团负责人等介绍节水抗旱稻的推广情况，面向不同受众侧重宣传节水抗旱稻精简栽培、节水节肥、降本增效、减污降碳等多元化特征，普及节水抗旱稻种植过程中的除草、施肥、灌溉等主要栽培技术要领，加大节水抗旱稻的宣传力度，促进产学研深度合作。

多重效益分析

环境效益：2019 年在安徽省推广 8 万公顷节水抗旱稻，根据对安徽 7 个县的原位监测甲烷排放通量，和原有淹灌水稻种植相比，采用旱直播的 D-WDR 甲烷减排技术的稻田甲烷减排率≥90%（张鲜鲜，2022）；同时利用国际通用反硝化 - 分解模型（DeNitrification-DeComposition, DNDC）过程模型对于 8 万公顷 D-WDR 甲烷减排技术应用效果进行评估，和原有淹灌种植相比，D-WDR 甲烷减排技术合计减排 51.6 万吨二氧化碳当量（Zhang, 2022）。D-WDR 甲烷减排技术比常规淹灌种植减少灌溉次数 50% 以上，可以实现节水 7500 立方米 / 公顷（约合 1500 元 / 公顷）、减少肥料施用量 30% 左右（约合 900 元 / 公顷）、少打农药 3 次（约合 1725 元 / 公顷）以及减少育秧程序（约合 1200 元 / 公顷）。

经济效益：旱管种植节水抗旱稻应用可以通过减少灌溉用水及劳动力等减少生产投入成本。如果开发成碳普惠减排项目，还可以获得额外的碳减排收益。例如安徽 8 万公顷旱管种植节水抗旱稻的减排量，如按当时上海碳交易市场平均交易价格 42 元 / 吨计算，经济效益相当于 2167 万元。如参考浙江首笔旱管种植节水抗旱稻减排稻田甲烷项目碳交易的交易价格（72 元 / 吨）测算，经济收益为 3715 万元，每公顷可增加 450 元 / 公顷的额外碳减排经济收益。

社会效益：旱管种植节水抗旱稻的种植范围从传统水田拓展至旱地、复垦地、山坡地乃至红壤土、盐碱地等边际土地，使大量边缘土地转化为有效耕地并被充分利用，扩大了水稻种植面积，不仅提供了农民就业机会，还为粮食增产和保障国家粮食安全开辟了新路径。旱管种植节水抗旱稻甚至是稻田甲烷减排项目的开发，促使农民认识到水稻种植排放甲烷温室气体，通过改变水稻种植品种或者种植方式可以减少稻田甲烷排放，应对气候变化，增强了农民的低碳意识。

综上，开展旱管种植节水抗旱稻既可以提升水资源利用效率，减少稻田温室气体排放，还可以通过稻田甲烷减排的碳普惠或者自愿减排机制，获得碳信用收益，增加农民收入，达到节水、减排和增收的多重效益。

经验启示

D-WDR 甲烷减排技术能够获得较大规模的推广应用，主要有以下几点经验：

（1）强化技术韧性与技术规范。结合各地气候水土条件，选育适用品种、优良品质及抗旱性、机械化适应性，强化丰产低碳韧性，提升技术的稳定性，确保粮食安全及减排效应相协同，同时制定相应的配套栽培与减排核算技术规范。

（2）加强农户技术培训。针对旱管种植技术的认知误区、杂草控制难度大等问题，依托农技推广部门和经销商，开展科学节水灌溉及除草用药指导。

（3）加大宣传与政策争取。运用多种传媒手段，举办品种推介会、栽培观摩会，提升技术认知度；抓住农业绿色转型发展机遇，争取地方政府在推广中的政策与资金支持。

（4）科学制定推广计划。发挥节水抗旱、优质高产、易管理优势，一方面向水田拓展以节本减排增效，另一方面在缺水干旱区、丘陵荒山、撂荒地等适配多种种植场景，扩大种植空间，助力农民增收与粮食安全。

4.9 稻虾共作：稻田甲烷减排与经济效益的双赢实践

胡荣桂¹，徐祥玉²，王砚¹

¹华中农业大学资源环境学院 ²湖北省农业科学院植保土肥研究所

背景

稻田甲烷减排不仅是中国农业绿色低碳转型的关键环节，也是落实全球甲烷承诺与实现双碳目标的重要抓手。中国不同领域的科技人员在长期研究的基础上，已研发出多项单项减排技术及多路径协同的减排技术体系，并已在不同区域开展示范推广与应用。如节水抗旱稻、低甲烷水稻等新品种培育等，这些措施可实现30%-60%的甲烷减排；间歇灌溉、干湿交替等模式可减少40%-70%的排放；稻鱼、稻虾、稻鸭共生可减少近30%的甲烷排放。其中稻虾模式以其经济效益高，管理方便，易于学习和推广等优势备受农民欢迎。至2024年底，全国稻虾模式发展面积达到157万公顷，主要集中在湖北、安徽、江苏等长江中下游稻作区。

面临的挑战

稻虾模式由于经济效益高，农民盲目追求规模和效益，不仅出现了土壤潜育化程度加重、水稻产量降低、小龙虾偏小、商品价值下降等问题，使稻虾整体效益下滑。更为严重的是，在传统的稻虾模式中，稻田全年都处在淹水的环境中，导致甲烷排放比双季稻或单季稻后冬泡休闲的稻田更高。

解决方案

为了解决传统稻虾模式带来的土壤退化、水稻和小龙虾产量变低等问题，虾农在长期的种稻养虾实践中逐步发展出繁养分离技术。该技术的核心是虾苗是由专业繁育公司提供。每年养虾季节，虾农从种苗公司购买大小规格整齐一致的虾苗按照要求投放到准备好的养殖田中。在整田插秧时，小龙虾随水进入稻田周围的养殖沟。插秧后以及在整個水稻生长期，小龙虾可在稻田或养殖沟中活动，直至成虾收获。水稻收获前后，田面水即被排干，直到下一年养虾季节才灌水。故在这个模式中稻田在水稻收获后至次年灌水养虾期间杂草可自然生长，并成为灌水后虾苗的食物和栖息场所。此外，稻蔸和少量残留稻草也有同样的作用，遗漏的少量成虾可残留在养殖沟中。

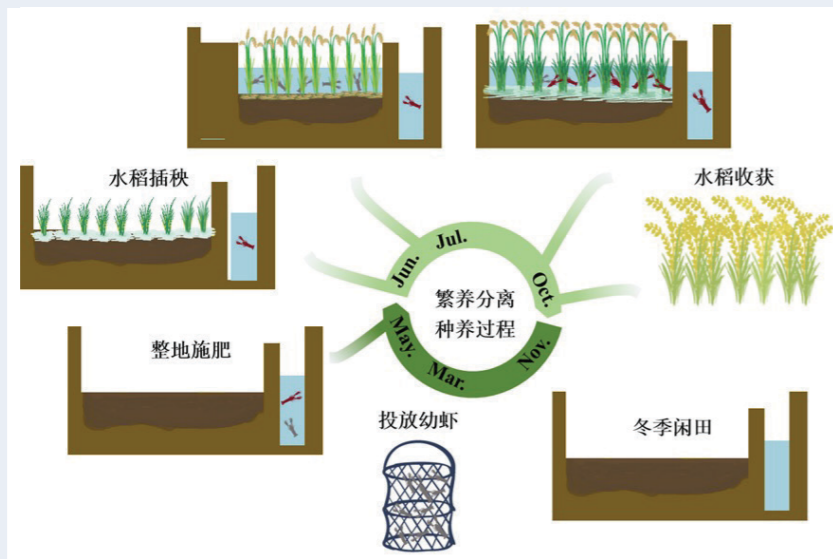


图 8. 稻田养虾流程示意图

华中农业大学资源环境学院环境生态团队与湖北省农业科学院植保土肥研究所合作，自2023至2025年项目组在湖北省荆州市沙市区观音当镇丫角村，依托金穗家庭农场进行虾稻繁养分离模式甲烷减排试验研究。研究结果表明稻虾繁养分离模式不仅在改善土壤结构、提高有机碳库质量和微生物活性、增加养分供应能力显著优于传统模式；而且虾稻繁养分离模式在增产提质和甲烷减排方面效果明显。

主体与利益相关方

本项目农业生产方面的主体执行方为农场。金穗家庭农场负责所有农事活动及费用，包括稻田的耕作、施肥、灌溉、收获、稻种、虾苗、饲料等。华中农业大学项目组主要负责技术支持工作。包括项目设计和执行要求，水稻生产季和冬闲季甲烷排放监测和核算，以及解决项目执行过程中出现的问题。美国环保协会提供资金支持取样、分析、核算等研究工作。

多重效益分析

环境效益：（1）根据实验数据估算甲烷减排量：应用稻虾繁养分离技术模式的每公顷稻田可减少甲烷244.7kg/ha。项目示范区所在全镇约10000公顷与项目所用技术相同的稻虾养殖稻田，全镇稻田甲烷减排量为2447000kg，若全国157万公顷虾稻都应用稻虾繁养分离技术，其甲烷减排效益将十分可观。（2）稻田淹水时间的减少，土壤物理化学性质有所改善，土壤有机质含量提高。（3）繁养分离技术所投入的农药较传统养殖模式少或无农药投入，使稻田生物多样性显著提高。

经济效益：2023年，湖北省全省单季稻平均产量在8265kg/ha，2024年为8295kg/ha。在虾稻繁养分离模式中，水稻每公顷产量为8250-9000kg/ha，小龙虾每公顷产量1500-2250kg/ha（平均1875kg/ha）。若稻谷公顷产取平均值8625kg/ha，收购价2.4元/kg，收益为8625×2.4=20700元/ha。小龙虾（市场价变动较大，10-40元/kg不等），每公顷产量取平均值1950kg，收购价16元/kg，收益为31200元/ha，每公顷总收益为51900元。若考虑产量变化，最低总收益为43800元/ha（水稻8250kg/ha+小龙虾1500kg/ha），最高为57600元/ha（水稻9000kg/ha+小龙虾2250kg/ha）。从上述计算可以看出，繁养分离模式增产增收效果显著。多年试验研究结果显示，该模式在湖北省应用时，水稻增产在5-10%；小龙虾则能够维持多年不减产，最主要的是其商品性有显著提高，成虾大小一致，可一次性收获，极大地节省了人工成本。此外，虾稻繁养分离模式由于农药投入少，或者没有农药等化学品的投入，农产品品质提升，所生产的稻米可按照有机大米或绿色大米出售，增加了农民的经济收入。

社会效益：该模式由于虾苗投入时间统一，在小龙虾生长管理上比较简单，好控制，所投入的成本较传统养殖大幅度降低，促进了产业的发展，更重要的是其增产增收让广大虾农获得了实际的效益。

经验启示

（1）新技术新模式的开发和推广是引领稻田甲烷减排的关键。在现有投入模式和管理条件下，开发稻田种养新技术新模式是未来稻田甲烷减排的必由之路。

（2）任何新技术、新模式只有能带给农民实际效益才会快速得到推广与应用。尽管科研院所研究出了大量减排技术，但稻田甲烷减排技术若不能让农民获得直观、可感知的收益，便难以落地普及。稻虾繁养分离技术之所以获得了农民的青睞，根本原因就是让农民获得了实实在在的经济收益。

4.10 水稻规模化种植：资源利用效率与减排效益协同提升实践

王晓¹，杨芳²，倪依琳²

¹中节能生态产品发展研究中心有限公司 ²中节能咨询有限公司

背景

双碳战略下，农业农村减排固碳是绿色低碳转型关键抓手。水稻作为中国首要口粮，其种植产生的甲烷、氧化亚氮是农业碳排放重要来源，保障水稻稳产与减排固碳协同，是农业领域重要课题。湖南作为全国水稻第一主产区，率先开展水稻碳足迹研究与低碳生产实践。本案例研究以益阳市为样本，选取典型企业及普通农户作为调研对象，对比规模化与小农户种植模式碳足迹，发现规模化种植可提升资源利用效率、降低碳排放强度，为水稻产业低碳转型提供可复制推广路径。立足水稻产业低碳转型需求与国家战略导向，国家及湖南省先后出台农业减排固碳专项方案，明确低碳农业分阶段目标，科学碳排放核算是落实目标的核心前提。作为水稻生产大省，湖南省虽已建成绿色高效示范片区，但水稻种植面临稳产与减排的双重博弈，低碳转型之路仍存在诸多实践挑战。

面临的挑战

实践层面的挑战主要体现在三个维度：一是生产端排放结构复杂，稻田直接排放与农资、农机、电力等间接排放共同构成了减排“硬骨头”；二是经营模式制约显著，小农户分散经营粗放，资源效率低、碳排放强度高，与规模化经营差距明显；三是核算体系尚不完善，全流程数据获取难度大，且土壤碳汇效应暂未纳入核算范围，为精准量化与管理碳足迹带来了现实障碍。因此，开展不同经营模式下的碳足迹对比研究，探索兼具效率与减排效益的种植路径，成为破解当前困局的必然选择。

解决方案

针对上述背景与挑战，本研究采用生命周期评价方法（Life Cycle Assessment, LCA），参照联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）、省级温室气体清单编制指南以及《水稻碳足迹评价技术指南》中的相关核算要求，系统开展水稻种植全流程碳足迹核算与对比分析，通过精准识别不同模式的碳排放特征，提出针对性的低碳生产解决方案。其中，核算边界涵盖水稻种植全过程中产生的主要温室气体排放源，包括田间生产环节的直接排放（如稻田甲烷、氧化亚氮排放，以及农机燃油燃烧产生的二氧化碳）和与农资、能源使用相关的间接排放（如燃油、电力、农资生产）。核算环节覆盖育秧、整地、移栽、施肥、植保、灌溉、收获等水稻种植关键阶段，不包括贮藏、运输及加

工环节的碳排放。研究数据获取主要来源于2025年对湖南省益阳市典型企业及其周边普通农户的实地走访和调研，并结合相关文献、统计资料和专家咨询进行补充与校验，确保核算结果科学可靠。

在生产实践中，规模化种植模式依托集中连片的耕地优势，通过全程优化机械化作业，避免地块分散重复耕作，同时统筹安排农机作业提升设备利用率，从源头削减重复耕作带来的能耗与燃油排放；通过推行集中育秧、节水灌溉与智能调控技术，提升水电利用效率，优化生产运行排放结构；同时集成高标准农田提质改造、有机肥替代、化肥减量、绿色防控等绿色生产措施，以精准化、标准化投入替代小农户经验性过量投入，以减少农资消耗与温室气体排放，实现减排与稳产的协同推进。

主体与利益相关方

本案例水稻规模化种植碳足迹研究与低碳实践的推进，涉及多方主体与利益相关方，核心主体包括政府部门、农业企业、普通农户，同时依托科研机构与行业专家提供技术支撑（表4）。

表4. 水稻规模化种植模式主体与利益相关方

参与主体	角色定位	核心职责
政府部门	政策引导与制度保障者	国家与地方两级联动，出台专项实施方案、划定阶段性目标、建设示范片区，提供顶层设计与政策依据。
科研机构与行业专家	技术支撑与方法赋能者	主导碳排放核算科学设计与数据校验，提供专业理论依据，推动实践科学化、系统化发展。
农业企业	模式践行与示范引领者	以益阳市大型企业为代表，依托规模化、机械化、标准化生产体系，成为减排固碳标杆，提供核心实践数据与可复制产业模式。
普通农户	基础参与和推广受体	以传统分散经营模式提供参照基准，作为低碳技术最终落地端，是产业整体减排关键基础。

多重效益分析

环境效益：本案例核算分析结果显示，现代化规模种植相较于普通小农户种植模式，在碳排放与生产效益方面实现了双重优化，展现出显著的资源利用效率提升与减排效益，其核心成果与效益体现在单位面积碳排放、单位产量碳排放强度、温室气体排放结构、各环节排放控制等多个维度。

(1) 在碳排放总量方面，两种种植模式单位面积碳排放差异较小，其中规模化种植略低 3.1%，实现了种植全流程的轻度减排。在碳排放强度方面二者差异显著，规模化种植碳排放效率提升 21.3%，核心原因在于规模化种植单产远高于普通农户，实现了“增产减排”的协同效应，这也是规模化种植最核心的效益体现。

(2) 在温室气体排放结构方面，甲烷排在两种模式中均占主导地位；二氧化碳、氧化亚氮排放规模化种植模式均低于普通农户，这一差异反映出普通农户在能耗结构与农资管理的短板，同时也体现出规模化种植的排放结构更优，减排潜力进一步释放。

(3) 在各环节排放控制方面，规模化种植展现出全方位优势。在机械作业与农资生产环节，规模化种植在机械耕地、插秧施肥、机械收割耗能及农资生产排放上均低于普通农户，普通农户相关环节能源消耗高出 13.2% ~ 41.3%，农资投入量高出 13.3% ~ 42.2%；在电力使用环节，规模化种植虽育秧电耗略高，但灌溉电耗比普通农户低 11.3%，整体水电利用效率更优。

(4) 从行业参照来看，本案例规模化种植的单位面积碳排放与单位产量碳排放强度处于国内中等偏低区间，表明该区域水稻生产已具备良好的绿色发展基础，其实践成果为全国水稻主产区的减排固碳工作提供了真实参考，也为农产品碳标签认证、低碳品牌打造奠定了数据基础。



图 9. 案例企业规模化种植模式下的设备

注：图中由左到右，由上至下，分别是规模化种植无人机、收割机、测土配方肥料、粮食烘干中心等设备设施

经济效益：水稻规模化种植通过集中连片、机械高效作业与精准化管理，实现单产显著提升，每公顷产量达 7500kg/ha，高于普通农户 6375kg/ha，粮食产出与种植收益同步增加；同时有效降低农资与能源消耗，化肥、农药投入，减少生产浪费与成本支出，全程机械化进一步降低用工依赖，提升生产效率与经营效益，标准化生产也为稻米品质提升与品牌化发展奠定基础。

社会效益：水稻规模化种植后，不仅提升了生产效率，更在多个层面产生了深远的社会效益，具体体现在以下几个方面：

(1) 创造新型就业机会，促进人才结构转型。规模化种植打破了传统农业仅靠体力的就业模式，催生了一系列技术型和服务型岗位，如无人机飞手、联合收割机驾驶员、烘干中心技术员等。

(2) 提升农业社会化服务水平，完善产业分工。规模化经营促使农业生产走向专业化、细分化，形成了良性的产业循环。催生了可以服务于小农户的专业服务组织，如植保队、农机合作社等。

(3) 提高农业抗风险能力与粮食安全保障水平。规模化种植所采用的无人机、烘干机等现代化的设施，能快速应对气象和病虫害爆发，减少农业灾害的风险，保障了粮食产量和品质。

(4) 推动农民素质提升与社会文明进步。采用无人机和智能设备需要农民接受专业的培训，培训的过程提升了农民的科学素养和技能水平，使其从传统农民向“职业农民”转变。

经验启示

湖南省益阳市水稻规模化种植的实践，为中国水稻产业乃至农业领域的减排固碳、绿色低碳转型提供了重要的经验启示，核心在于实现规模化经营、标准化管理、技术化赋能与机制化保障的协同推进，推动资源利用效率与减排效益的同步提升，同时兼顾粮食安全与低碳发展的双重目标，具体总结如下：

(1) 土地适度规模经营是基础前提。推进土地适度规模经营，依托集中连片耕地实现农机高效利用、资源整合配置，将规模效应转化为减排效应，推动小农户与现代农业有机衔接。

(2) 机械化与精准化管理是核心手段。提升农业机械化、智能化水平，以精准施肥、绿色防控、智能水肥调控等精细化管理，减少农资粗放投入与能耗浪费，实现精耕细作与低碳生产协同。

(3) 绿色生产技术集成是重要支撑。结合区域生产实际，整合耕地提质、农资减量、节能降耗等绿色生产技术，构建系统化技术体系，让绿色技术与种植模式深度融合，兼顾产量质量与减排需求。

(4) 科学的碳排放核算与数据是关键保障。建立标准化碳排放核算方法，构建区域农产品碳足迹数据库，强化数据收集与校验，为低碳政策制定、碳标签认证等提供科学数据支撑，推动低碳转型系统化。

(5) 政策引导与多方协同是重要动力。构建“政策引导—企业示范—农户参与—技术支撑”的协同机制，发挥政府、农业企业、普通农户、科研机构各方作用，形成农业减排固碳的系统推进合力。

4.11 水稻与绿肥轮作：减排与固碳双向增益实践

王晓¹，杨芳²，倪依琳²

¹中节能生态产品发展研究中心有限公司 ²中节能咨询有限公司

主体与利益相关方

本案例模式以湖南省长沙市全域为推广区域，以示范基地与试验点位为实施载体，形成了政府统筹引导、技术团队支撑、农户落地实施的三级主体体系（表5）。

表5. 水稻与绿肥轮作模式参与主体及利益相关方

参与主体	角色定位	核心职责
政府部门	政策引导与统筹规划者	制定全省农业减排固碳、绿肥生产相关政策；将绿肥生产纳入化肥减量考核；统筹省市县三级资金；规划模式整体推广布局。
科研机构与行业专家	科学技术与方法赋能者	参照IPCC等权威指南，运用生命周期评价法开展全流程碳足迹核算、减排固碳成效分析；提供科学技术支撑。
区域实施方	模式研究与示范落地者	作为模式研究与示范落地主体，建设试验点位与示范基地，开展紫云英还田田间试验、示范推广及农户调研。
普通农户	模式实施与数据提供者	作为模式实施的主要主体，负责紫云英播种、翻压还田及双季稻种植全流程田间作业；为模式碳足迹核算提供实地生产数据。

背景

农业领域是双碳目标落地的重要板块，水稻种植作为中国主要粮食生产方式，其生态系统的温室气体排放管控与碳汇潜力挖掘，直接关系到农业绿色转型成效。本案例立足湖南省长沙市双季稻生产实际与区域减排固碳政策导向，以长沙双季稻种植系统为整体研究对象，选取市域内绿肥紫云英还田典型示范基地、同质配对田间试验地块及示范片区周边普通小农户田块，系统对比绿肥紫云英还田与常规种植的碳排放特征，通过生态循环种植实现稻作减排与土壤固碳协同增效，为水稻减排固碳提供实践参考。

面临的挑战

在生态保护与生产发展的双重要求下，水稻种植体系面临诸多亟待破解的现实困境，同时相关政策导向也为模式创新提供了方向。从政策层面看，实践需求日益迫切。现有农业绿色发展相关政策将稻作系统减排固碳列为重点工作，要求依托具体技术模式建立规模化示范。同时 CCER 市场重启后，农业减排项目成为重要方向，稻作轮作类减排固碳模式的实践探索，成为衔接政策要求与市场需求的关键载体。从生产实践看，当前稻作生产仍面临以下核心挑战。一是温室气体排放与耕地质量的双重矛盾。传统稻作模式下，稻田淹水环境与化肥施用方式，导致温室气体排放问题突出，同时长期的单一种植模式使得耕地土壤肥力呈现下降趋势，土壤有机质积累不足，形成生产与生态的双重制约。二是减排固碳与产量协同保障难题。以往部分稻作减排措施的实施，容易出现“减排减收”的情况，如何在落实减排固碳举措的同时保障水稻产量稳定成为稻作体系绿色转型的核心挑战。

解决方案

针对上述稻作生产面临的核心挑战，结合政策导向与长沙双季稻种植实际，本案例采用 LCA 研究方法，研究选取同一土壤类型、同一地形单元的田块，通过同质配对试验设计，参照 IPCC、省级温室气体清单编制指南以及《水稻碳足迹评价技术指南》中的相关核算原则，系统量化了绿肥紫云英翻压还田情景下稻田生产全过程的碳足迹，并梳理了水稻与绿肥轮作模式的标准化实施流程。其中，核算边界确定为绿肥紫云英模式一个完整的种植周期，核算范围涵盖育秧、耕地整地、移栽、田间管理、收获等关键环节，核算对象覆盖三种主要温室气体——甲烷、氧化亚氮与二氧化碳，主要排放源包括农资生产、电力使用、燃料燃烧等间接排放。碳汇量核算绿肥紫云英翻压还田后，稻田耕作层的土壤有机碳含量较常规种植模式的增量。研究数据获取主要来源于 2025 年对湖南省长沙市绿肥紫云英还田推广示范及其周边普通农户的实地走访和调研，并结合相关文献、统计资料和专家咨询进行补充与校验。

具体实施路径为：晚稻收获前撒播紫云英，利用冬季闲田让紫云英自然生长，来年早稻移栽前完成紫云英翻压还田，替代常规冬闲种植模式，既实现稻田全年生态利用，又能破解肥力下降、减排与稳产矛盾等痛点。

多重效益分析

本案例模式基于示范基地的实践数据，从生态、生产、经济三个维度，系统呈现了水稻与绿肥轮作模式的实施成果。

(1) 减排减碳成效突出。该模式的早、晚稻单位面积碳排放较常规模式分别下降 20.6%、21.68%，单位产量碳效率提升超 30%，甲烷、氧化亚氮、二氧化碳等关键温室气体排放均有效管控，核心生产环节农资、能耗排放大幅减量。

(2) 固碳增汇双向增益。该模式通过紫云英翻压还田新增 116.1kg/ha 土壤碳汇，外源有机碳输入改善土壤结构与肥力，实现农业生产“减源”与“增汇”协同。

(3) 化肥减量增效降污。该模式依托紫云英生物固氮替代早稻 20%、晚稻 17% 的化学氮肥，减少化肥生产高排放，降低农业面源污染风险，且保障水稻产能。

(4) 适配生产现状且降本增效。该模式利用冬闲田种植紫云英，契合双季稻区种植特点，不改变现有种植制度、不额外占用耕地；化肥减量降低采购成本，翻压作业小幅能耗成本远被农资节约抵消，同时土壤培肥为水稻稳产高产奠定了基础。此外，结合碳生态价值转化潜力，进一步拓宽了农业收益渠道，实现减化肥、降成本、提地力、减排排放四重共赢。

经验启示

基于本案例呈现的实践过程与成效，结合长沙双季稻种植的实际情况，可提炼出水稻与绿肥轮作模式成功落地的核心经验，具体如下。

(1) 生态替代是低碳农业的核心路径。该模式以紫云英绿肥生物固氮替代化学氮肥，从源头削减农资生产与施用的高排放，同时通过翻压还田增加土壤有机碳输入，实现减排与固碳同步发力，破解稻田高排放与土壤肥力不足的双重难题。

(2) 利益协同是模式可持续的关键。该模式的规模化推进，核心在于构建多元利益共享机制。通过政府财政补贴、技术推广和示范创建降低参与门槛、企业溢价收购提升生产收益，将生态效益转化为各主体的实际经济利益，解决以往农业生态实践“动力不足”的问题，以实现各方利益的共赢。

(3) 因地制宜是模式规模化的前提。不同稻区的种植制度、土壤与气候条件存在差异，该模式在推广过程中，并未采用“一刀切”的方式，而是根据区域特点优化轮作组合，形成不同的适配类型，这是其能够在多地成功推广的重要前提，也为同类农业生态模式的推广提供了借鉴。



4.12 水稻种植综合减排方案：浙江省杭州市青山村稻田甲烷减排综合实践

王丹英¹，余凯¹，陈志钢²

¹ 中国水稻研究所 ² 浙江大学中国农村发展研究院

解决方案

背景

稻田甲烷排在农业温室气体排放结构中占据关键地位。作为世界最大的水稻生产国，中国稻田面积广、灌溉强度高，稻田甲烷排放约占种植业温室气体排放总量的60%，是农业领域实现温室气体减排和双碳目标的重要突破口。探索在保障粮食安全和农民收益前提下，实现稻田甲烷减排与碳足迹降低的可行路径，已成为农业绿色低碳转型中的核心议题。本案例依托浙江省杭州市青山村连续两年的稻田原位试验（图10），系统评估不同水分管理、氮肥类型和秸秆管理措施对稻田甲烷排放、水稻产量及碳足迹的综合影响，形成农业甲烷减排多重效益的实例，为区域农业低碳发展提供科学依据和示范路径。



图 10. 浙江省杭州市青山村稻田原位试验点位置图

针对上述问题，本案例在青山村建立了连续两年的田间定位试验，构建了以水分管理优化、氮肥调控和秸秆管理优化为核心的稻田甲烷减排技术体系。

(1) 好氧灌溉技术：突破传统灌溉的模式，通过甲烷排放高峰期 - 分蘖期的干湿交替的水分管理缩短稻田持续厌氧时间，改善耕层土壤氧化还原状态，抑制产甲烷菌的繁殖与代谢，从源头减少甲烷的生成过程；同时通过精准水位调控，保障水稻不同生育期的水分需求，兼顾减排与稳产。

(2) 氮肥精准调控技术：以缓控释肥料替代传统速效化学肥料，同时设置化学氮肥减量处理，在减少氮肥施用带来的间接碳排放的同时，优化土壤氮素供应节奏，避免氮素过量造成的土壤厌氧环境加剧，实现“减氮 - 减排 - 增效”协同。

(3) 秸秆协同管理技术：针对秸秆直接还田加剧甲烷排放的问题，通过配施秸秆腐解微生物菌剂，加速秸秆的好氧腐解进程，减少秸秆厌氧分解产生的甲烷；同时结合磷钾肥配施，平衡土壤养分，弥补秸秆还田带来的养分失衡问题。

水稻全生育采用静态箱 - 气相色谱法定期监测稻田甲烷排放通量，结合水稻生育期核算季节累计甲烷排放量；同时监测水稻农艺性状、产量构成因素，核算单位面积产量；基于生命周期评价方法，核算稻田系统直接与间接碳足迹，包括肥料生产、灌溉、耕作等环节的碳排放，量化单位面积和单位产量碳足迹。

主体与利益相关方

本实践案例由科研团队牵头实施，联合地方农业技术推广部门和农户共同完成。科研团队负责试验设计、甲烷原位监测和碳足迹核算；农户负责具体田间管理措施实施；地方政府和农业部门为试验提供政策协调和示范推广支持。多方协作确保了减排措施在真实生产条件下的可操作性和可复制性。

面临的挑战

青山村位于南方水稻种植区，稻作历史悠久，灌溉条件良好，农户采用的种植技术在南方稻区具有代表性：水稻移栽后淹水直至分蘖末期排水搁田，孕穗灌浆期干湿交替；肥料以常规复合肥和尿素为主；同时，随着秸秆焚烧政策的实施，秸秆还田比例逐年提高。由于稻田处于持续的还原环境，稻田甲烷排放高，减排面临多重挑战：一是粮食安全底线不可突破，减排措施需以稳产为前提，农户因担心减产、减收，对减排新技术、新模式的采纳意愿普遍不高；二是减排效果缺乏长期、连续的原位监测数据支撑，减排量难以精准核算，无法满足政策考核、碳交易核算及示范推广的实际需求；三是减排带来的生态效益难以直接转化为农民可感知、可获得的经济效益，导致生态环保目标与农户生产收益目标脱节，难以形成长效推进机制。因此，亟需在真实农业生产场景中，系统评估不同减排措施的环境效益与经济效益，探索兼顾甲烷减排、碳足迹降低与稳产增收的综合解决方案，通过原位试验形成可量化、可核算、可复制的实践案例，为全国同类稻区提供参考。

多重效益评估

环境效益：“单一减排”到“系统碳强度下降”。试验结果表明，农户方式对照处理（Control Check, CK）的总碳排放量为 14.84 t CO₂-eq ha⁻¹，其中甲烷排放占比高达 96%，表明甲烷是稻田温室气体排放的核心控制点，其减排对降低稻田碳足迹具有决定性作用。

(1) 不同减排措施对稻田甲烷排放的抑制效果存在显著差异，秸秆还田配施腐解菌剂（Straw Returning + Decomposing Microbial Inoculant, S+DMI）和秸秆移除（No Straw Returning, NS）是甲烷减排效果最显著的措施，使稻田季节累计甲烷排放量降低 22% ~ 26%；缓控释肥（Controlled Release Fertilizer, CRF）较常规化肥（Conventional Fertilizer, CF）使甲烷排放降低约 15%；好氧灌溉（Aerobic Irrigation, AI）通过改善土壤氧

化还原状态，显著降低甲烷排放强度。

(2) 在碳足迹层面，农户方式 CK、CRF 处理、S+DMI 处理的单位产量碳足迹分别为 2.39、1.84 和 1.68t CO₂-eq ha⁻¹，与 CK 相比，CRF 和 S+DMI 使每生产 1 吨稻谷的碳排放强度下降 23%~30%；2024 年 AI 处理的单位产量碳足迹为 1.52 t CO₂-eq ha⁻¹，减排效果同样显著。

(3) 从系统层面分析，优化管理措施使稻田单位面积碳排放强度较常规管理减少约 3 t CO₂-eq ha⁻¹，实现了“总排放量下降”与“碳效率提升”的同步推进。

经济效益：从“减排不减产”到“减排又增产”。在产量表现方面，不同减排措施对水稻产量影响存在显著差异。秸秆移除处理虽具有最强的 CH₄ 减排效果，但水稻产量下降约 12%，不利于农户长期采纳。相比之下，CRF 和 S+DMI 处理在实现高效减排的同时，实现了产量的显著提升。2025 年试验中，CRF 处理水稻产量为 8.10 t ha⁻¹，S+DMI+AI 处理达 8.80 t ha⁻¹，较 CK (7.54 t ha⁻¹) 分别提高 7.4% 和 16.7% (约 17%)，实现了“减排又增产”。从种植收益来看：

(1) 增产带来的直接增收：按照当前稻谷市场收购价格 2.6 元 /kg 测算，2025 年 S+DMI+AI 处理较 CK 每公顷增产约 1252.5kg/ha，扣除秸秆促腐菌剂成本，增收约 2356.5 元 /ha；CRF 处理较 CK 每公顷增产约 565.5kg/ha，直接增收约 1470 元 /ha。

(2) 成本优化带来的间接增收：缓控释肥虽单价略高于常规化肥，但氮肥利用率提升约 15%~20%，秸秆还田配施腐解菌剂利用了秸秆的培肥作用，应用这两种技术可适量减少了肥料的施用量，从而降低每公顷种植成本。从综合来看，核心减排技术模式可使农户单季每公顷增收 1500-2400 元 /ha 左右，在实现温室气体减排的同时，显著提升了农户的种植收益，解决了农业减排“生态效益外部性”的问题，将减排的生态价值转化为农户可感知、可获得的经济价值，增强了农户采纳减排技术的内生动力。

社会效益：从“技术示范”到“模式推广”。青山村稻田甲烷减排案例的社会效益体现在技术范式输出、农户认知提升、产业转型推动三个层面，其示范价值不仅在于验证了减排技术的有效性，更在于形成了可复制、可推广的稻田低碳管理模式，为中国南方稻区农业绿色低碳转型提供了实践参考，助力乡村振兴与农业现代化的协同推进。

(4) 原位连续监测和碳足迹核算是支撑农业甲烷减排政策制定和示范推广的关键基础。

青山村连续两年的稻田原位试验表明，通过优化水分管理、氮肥类型和秸秆管理措施，可以在保障水稻产量甚至增产的前提下，实现稻田甲烷排放显著降低和碳足迹有效下降。其中，以缓控释氮肥和秸秆还田配施腐解微生物菌剂为代表的综合管理模式，实现了环境效益、经济效益和社会效益的协同提升，为中国稻田甲烷减排和农业低碳发展提供了可复制、可推广的实践范例。



经验启示

(1) 甲烷是稻田碳足迹的核心控制点，减排重点应聚焦于水分管理和土壤厌氧过程调控。

(2) 农业减排必须坚持多目标协同，兼顾粮食安全与农民收益。只有实现“减排 - 稳产 - 增收”的协同，才能调动农户的参与积极性，形成长效推进机制。

(3) 协同技术应用是实现减排与增产平衡的关键路径：单一减排技术的效果有限，且易对产量造成负面影响，缓控释氮肥与秸秆腐解微生物菌剂的协同应用实现了“养分优化供应 - 土壤环境改善 - 甲烷排放抑制”的多重效果，是稻田低碳管理的优选路径。

参考文献

1. 澳亚集团有限公司 . 2025. 2024 环境、社会及管治报告 [R]. 新加坡 : 澳亚集团 . <https://static.cninfo.com.cn/finalpage/2025-04-22/1223216097.PDF>
2. 董景奎 . 2011. 循环农业方式下农产品质量安全研究 [J]. 内蒙古农业大学学报 (社会科学版), 13(06): 54-55+6
3. 东方戴瑞咨询 . 2025. 2025 中国肉牛统计资料 [R]. 安格斯杂志
4. FAO. 2023. Global Agricultural Methane Mitigation Technologies and Policies[R]
5. FAO. 2023. Methane emissions in livestock and rice systems – Sources, quantification, mitigation and metrics. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc7607en>
6. FAO. 2025. Farm—FAO Actions for Reduction of Methane[R/OL]. <https://www.fao.org/climate-change/areas-of-work/farm---fao-actions-for-reduction-of-methane/en>
7. 胡康 . 2023. 湖北省稻虾共作不同模式和地域差异的温室气体排放特征研究 [D]. 武汉 : 华中农业大学
8. International Energy Agency (IEA). 2024. Global Methane Tracker 2024[R]. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024>
9. IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896
10. 荆忠平 . 2025. 规模化肉羊养殖场粪污治理及资源化利用 [J]. 养殖与饲料 , 24(03): 110-112
11. 廖昉仪 , 段茂盛 . 2026. 全球自愿碳市场发展中的关键问题及启示 [J]. 气候变化研究进展 , 22(2): 164-175
12. 刘浩 . 2024. 规模奶牛养殖场粪污资源化利用研究 [D]. 北京 : 中国农业科学院
13. 联合国粮食及农业组织 (FAO). 2024. 畜牧业和稻田系统甲烷排放报告 [M]. 北京 : 中国农业科学技术出版社
14. Niu M, Kebreab E, Hristov AN, Oh J, Arndt C, Bannink A, Bayat AR, Brito AF, Boland T, Casper D, Crompton LA, Dijkstra J, Eugène MA, Garnsworthy PC, Haque MN, Hellwing ALF, Huhtanen P, Kreuzer M, Kuhla B, Lund P, Madsen J, Martin C, McClelland SC, McGee M, Moate PJ, Muetzel S, Muñoz C, O’Kiely P, Peiren N, Reynolds CK, Schwarm A, Shingfield KJ, Storlien TM, Weisbjerg MR, Yáñez-Ruiz DR, Yu Z. Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database. *Glob Chang Biol*. 2018 Aug;24(8):3368-3389. doi: 10.1111/gcb.14094. Epub 2018 Mar 8. PMID: 29450980; PMCID: PMC6055644.
15. 农业农村部 . 2023. 农业农村减排固碳实施方案 [Z]. <https://kjs.moa.gov.cn/hbny/202206/P020220630332772898679.pdf>
16. 农业农村部 . 关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见 [Z]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202412/content_6995343.htm
17. 农业农村部等 . 2021. “十四五”全国农业绿色发展规划 [Z]. <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/07/5635867/files/737ff96c0cc74f788394eb6194cc44c6.pdf>
18. 强淑雅, 韩雪, 黄一彬, 等 . 2026. 畜牧业甲烷排放分析 [J]. 气候变化研究进展 , 22(2): 186-197
19. 任浩奇, 杨荣, 李彤 . 2026. 土壤固碳影响研究 [J]. 中国沙漠 , 46(01): 50-62
20. 生态环境部 . 2024. 中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告 [R]. <https://unfccc.int/reports>
21. 生态环境部等 . 2023. 甲烷排放控制行动方案 [Z/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6914109.htm
22. United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition. 2021. Global Methane Assessment. Nairobi: UNEP
23. United Nations Environment Programme (UNEP). 2025. Global Methane Status Report[R]. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/48921>
24. United Nations Environment Programme (UNEP). 2025. 2025 Global Methane Assessment[R]. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48921>
25. VCS. 2024. Jinan Pingyin Youran Dairy Cattle Manure Management Project. <https://registryverra.org/app/projectDetail/VCS/4443>
26. 王斌, 张梦, 徐源, 等 . 2026. 水稻气候变化研究进展 [J]. 气候变化研究进展
27. 王树会, 陶雯, 梁硕, 等 . 2022. 土壤固碳与 N₂O 排放 [J]. 中国农业科学 , 55(06): 1159-1171
28. 王越, 丁京涛, 周海宾, 等 . 2026. 农业废弃物资源化研究 [J]. 农业工程学报 , 42(8): 254
29. World Meteorological Organization (WMO). 2025. Global Annual to Decadal Climate Update (2025-2029)
30. World Meteorological Organization (WMO). 2026. State of the Global Climate 2025[R]. <https://doi.org/10.59327/WMO/S/CRI/SOC/1>
31. 现代牧业 (集团) 有限公司 . 2025. 碳排放目标页面 [EB/OL]. https://esg.moderndairyir.com/zh-cn/03_carbon_emission_target/
32. 徐继东, 姚瑶, 曹爱兵, 等 . 2025. 绿色农产品碳标签研究 [J]. 江苏农村经济 , (04): 25-27
33. 优然牧业有限公司 . 2025. 碳中和战略与低碳实践 [R]
34. Zhang, Xianxian, et al., 2022. Estimate greenhouse gas emissions from water-saving and drought-resistant rice paddies by DeNitrification-DeComposition model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24: 161-171. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02094-z>
35. 张琦琦, 梁军青, 陈辉, 等 . 2026. 粪污处理路径 [J]. 中国畜牧业 , (05): 68-70
36. 张一鸣, 张玉梅, 曾玉珍 . 2025. 碳标签农产品研究 [J]. 天津农业科学 , 31(12): 53-58
37. 张鲜鲜, 毕俊国, 孙会峰, 等 . 2022. 节水抗旱稻减排 [J]. 上海农业学报 , 38(4): 134-140
38. 赵立欣 . 2025. 农业废弃物资源化利用 [N]. https://jhs.moa.gov.cn/lshfz/202501/t20250117_6469257.htm
39. 中国奶业协会 . 2025. 中国奶业质量报告 (2025) [R]. 北京 : 中国奶业协会
40. 中国青年网 . 2024. 数字金融“贷”动肉牛产业发展 [N]
41. 国家统计局 . 2025. 中国统计年鉴 2025[EB/OL]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/html/index.htm>
42. 朱利群, 王春杰, 陈利根, 等 . 2016. 固碳潜力分析 [J]. 浙江农业学报 , 28(07): 1249-1261
43. 朱雅婷, 倪远之, 张敏, 等 . 2023. 稻田甲烷排放研究 [J]. 浙江农业学报 , 35(10): 2436-2445



美国环保协会北京代表处

中国北京市东城区安定门东大街28号

C501室, 100007

+86-10-64097088

www.edf.org | www.cet.net.cn