

农食系统绿色低碳转型年度报告

农业农村低碳现代化的 地方实践

2025 年 6 月

致 谢

衷心感谢以下专家为报告案例调研或报告审阅提供支持与建议（按姓氏首字母排列）：

董利锋 中国农业科学院饲料研究所研究员
马 中 中国人民大学特聘教授
牛坤玉 中国农业科学院农业经济与发展研究所研究员
王 斌 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员
徐湘博 中国科学院地理科学与资源研究所副研究员
庄明浩 中国农业大学资源与环境学院副教授

感谢云南思力生态替代技术中心、成都家园行动公益服务中心、北京中科原动力科技有限公司、内蒙古西乌珠穆沁旗牧区信息服务中心和江西省碳中和研究中心对案例调研的支持。感谢绿色低碳农食系统实践者平台（GAAP）伙伴机构和专家提供的帮助。感谢 iGDP 同事汪燕辉、陈思敏对案例调研的支持，感谢胡敏和汪燕辉对报告提供的建议和反馈。感谢包林洁提供报告版面设计。

作 者

朱彤昕 马越 陈美安

免责声明

本报告内容均基于公开、可得、可靠的信息来源，旨在加强相关领域的讨论交流。报告中包含的内容及观点仅代表作者迄今为止的认识和判断，不代表参与专家及其所在机构观点。

引用建议

绿色创新发展研究院. (2025). 农食系统绿色低碳转型年度报告：农业农村低碳现代化的地方实践. 北京：绿色创新发展研究院.

目 录

1. 农食系统绿色低碳转型将带来多重效益	1
1.1 农食系统与气候变化	1
1.2 农食系统转型的重要性	2
1.3 我国农食系统转型的机遇	2
2. 助力农食系统转型的主要驱动因素	4
2.1 政策支持	4
2.2 技术创新	4
2.3 资金支持	4
2.4 能力建设	5
2.5 多方参与	5
3. 助力农食系统绿色低碳转型的地方实践	6
3.1 气候友好的水稻种植	8
3.1.1 稻田种植与气候变化	8
3.1.2 气候友好水稻种植的多样化尝试	8
3.1.3 气候友好稻作实践落地的主要推力	10
3.1.4 气候友好稻作的推广前景	10
3.2 农业机械绿色低碳转型	12
3.2.1 农机绿色低碳转型的政策助力	13
3.2.2 电动农机技术创新	13
3.2.3 地方农机服务探索	14
3.2.4 农机绿色低碳转型的主要驱动因素与展望	15
3.3 反刍动物日粮调控策略	16
3.3.1 青贮饲料和益生菌添加剂推广的政策背景	16
3.3.2 内蒙古西乌珠穆沁旗全混合日粮	17
3.3.3 云南大理白族自治州洱源县青贮饲料	18
3.3.4 低碳畜牧养殖实践的驱动因素与展望	19
3.4 种养结合的循环农业	20
3.4.1 种养结合与绿色循环农业	20
3.4.2 种养结合推广的政策背景	20
3.4.3 种养结合的江西实践	21
3.4.4 种养结合的主要驱动和推广前景	22
3.5 生物炭助力农业废弃物利用	24
3.5.1 生物炭与耕地保育和减排固碳	24
3.5.2 生物炭推广的政策背景	24
3.5.3 生物炭技术的具体探索	25
3.5.4 生物炭技术发展的主要驱动因素与前景	25
4. 推广农食系统绿色低碳地方实践的建议	27
4.1 加强政策支持和跨部门协同	27
4.2 促进绿色低碳农食系统技术创新	27
4.3 增加资金支持，促进商业模式创新	28
4.4 推进农食系统实践者能力建设	28
4.5 完善农食系统基础设施建设	29
4.6 推动多方参与和国际合作	29
参考文献	30

1. 农食系统绿色低碳转型将带来多重效益

1.1 农食系统与气候变化

农食系统是人类为了满足食物需求所开展的农业生产、食品加工、包装、运输、零售、消费以及处置的各个活动环节所组成的一个整体系统。其中既包括参与其中的农户、企业和政策制定者等利益相关方，也覆盖了不同参与主体所处的社会、经济和自然环境^[1]。

不同主体在农食系统的范围内进行的活动都会带来相应的温室气体排放，无论是生产准备阶段的耕地和牧场管理、化肥农药饲料等农业投入品的生产，生产阶段的种植和养殖，到食品加工、包装、运输和销售，再到食物的烹饪和餐厨垃圾的处理，每一个环节都会产生不同类型的温室气体^[2]。若将上述环节的温室气体排放全部纳入其中，全球范围内农食系统的排放占人类活动温室气体排放的三分之一左右^[3,4]。在我国，2019年农食系统的温室气体排放约为16.5亿吨CO₂e，占当年我国温室气体总排放量的14%左右^[5]。

除了对温室气体排放的贡献，农食系统对水资源、化肥、农药等资源和投入品的消耗也值得关注。目前，我国农业生产投入高但产量不高^[6]。虽然我国的化肥农药施用量已连续多年保持下降趋势，但化肥^[7]、农药^[8]的使用强度仍远超国际公认的安全上限。2023年全国总用水量中农业用水量占62%，在农业用水中农田灌溉用水占比达到86%^[9]。农业是我国节水行动的重点和节水潜力所在，采取农业节水措施可降低农业生产中的能源消耗和碳排放，例如滴灌技术相比漫灌能够节水60%，同时实现能耗和碳排放分别降低19%和33%；与传统水稻种植模式相比，节水抗旱稻可降低甲烷排放量达90%^[10]。因此，亟需推动资源节约、环境友好的农业生产，发挥农食系统应对气候变化的作用。

2020年9月，中国作出了“2030年前碳达峰，2060年前碳中和”的重大战略决策。2020年，我国农食系统温室气体排放中非二氧化碳温室气体的占比超过40%，农食系统是我国乃至全球实现气候目标的重要参与部分^[11]，此外，我国在COP29提到“中方将提交覆盖全经济范围、包括所有温室气体的2035年国家自主贡献，努力争取2060年前实现碳中和”，强调了我国对于非二氧化碳温室气体减排的决心。在此背景下，农食系统的绿色低碳发展将在国家应对气候变化的行动中发挥重要作用。



1.2 农食系统转型的重要性

全球范围内，农食系统的温室气体排放在 2000 至 2022 年间增加了 10%，虽然同期内农食系统温室气体排放占有所有温室气体排放的比例从 38% 下降到 30%，但农食系统的温室气体排放体量相当可观，2022 年达到 162 亿吨二氧化碳当量（CO₂e）^[12]。根据联合国粮食及农业组织（FAO）的预测，全球未来的食物需求仍会持续增长，若保持当前的食物生产模式，2050 年农食系统的温室气体排放量将比 2020 年增加 38%^[4]。在我国，随着经济发展、居民对食物的消费种类和品质需求提升，在延续现有政策强度和绿色低碳转型趋势的情况下，未来农食系统的温室气体排放量也将持续缓慢上升，2060 年将比 2019 年增加超过 30%^[5]。因此，控制农食系统的温室气体排放对于实现我国和全球气候目标不容忽视。

另一方面，农食系统的转型也能为提升公共营养和健康、改善农户生计和促进生物多样性等带来多重效益^[13]。例如，减少化肥的过量使用可以减少环境污染、改善土壤酸化和板结^[14]。有机农业、保护性农业和再生农业等可持续农业模式能够增加土壤有机质、提高生物多样性^[15]。在减排效益方面，根据世界银行的报告，农食系统减排投资的回报远高于成本。实现 2030 年农食系统排放减半的目标所带来的经济、健康和环境收益将达到 4.3 万亿美元，相当于年均减排成本的 16 倍^[16]。

此外，绿色低碳的农食系统能够提升农业的气候韧性。“大国小农”是我国的基本国情农情，根据第三次农业普查数据，我国小农户数量占农业经营主体的 98%，小农户经营耕地面积占总耕地面积 70%。在气候变化的背景下，小农户面临更大冲击，气候变化导致极端天气和病虫害发生频率增加，极大削弱了农业生产能力，威胁粮食安全和农民生计^[17]。农食系统转型涉及适应和减缓气候变化，也关乎农业韧性和农民生计。

1.3 我国农食系统转型的机遇

农食系统关乎国计民生，在我国政策体系中一直处于重要位置，自 2003 年起的中央一号文件大多聚焦于农业农村问题。2025 年中央 1 号文件《中共中央 国务院关于进一步深化农村改革 扎实推进乡村全面振兴的意见》从增强粮食供给能力、确保不发生规模性返贫、发展乡村产业和提升乡村治理水平的角度来促进乡村振兴。强调“大力发展绿色、特色农产品种养”，“提升农业产业化水平”。由此可见，农食系统绿色低碳转型与我国的粮食安全、乡村振兴和农业农村现代化等战略高度契合。

农食系统绿色低碳转型与“双碳”目标、生物多样性等生态文明建设的重要内容密不可分。习近平总书记在 2021 年 12 月中央农村工作会议上指出，实现“双碳”目标，农业农村减排固碳既是重要举措，也是潜力所在。《农业农村减排固碳实施方案》指出，农业农村减排固碳有利于提升我国农业的适应能力，同时为全球应对气候变化做出积极贡献。2022 年，COP15 正式通过“昆明—蒙特利尔全球生物多样性框架”，其中包括若干农食系统与生物多样性的具体目标^[18]。随后我国出台《中国生物多样性保护战略与行动计划（2023—2030 年）》，将农林牧渔可持续管理作为生物多样性保护优先行动之一，提出全面推进绿色低碳循环农业，发展生态农业，提升病虫害绿色防控水平、促进土壤健康。

当前，随着社会发展和生活水平的提升，我国居民对食物营养提出了更高要求，食物消费追求更加多元和营养健康^[18]。近年来，“大食物观”作为保障食物有效供给、高质量满足人民群众食物消费和营养健康需求的重要举措多次在政策文件和会议中被提及。《国务院办公厅关于践行大食物观构建多元化食物供给体系的意见》指出加快构建粮经饲统筹、农林牧渔结合、植物动物微生物并举的食物供给体系，同时坚持生态优先，绿色开发的原则，促进食物营养健康消费。因此，农食系统绿色低碳转型同时面临改善居民营养和健康的发展机遇。

我国长期重视农业生产和粮食安全，制定和实施了多项针对农业绿色发展、乡村振兴、土壤保育和粮食安全的政策。在食物加工、运输和消费环节，也有出台促进循环经济、冷链物流绿色发展的政策措施，以及垃圾分类、节约粮食和反食物浪费等政策和法规。进入“十四五”以来，我国发布的多项政策措施（见表 1）都与农食系统转型关系密切，农食系统转型与我国的粮食安全、“双碳”目标、农业农村现代化、乡村振兴、“无废城市”、循环经济等多项长期战略具有协同作用。

表 1 “十四五”以来我国农食系统主要减排行动和相关政策文件

阶段	具体减排行动	相关政策文件
农业生产	• 推进氮肥减量增效；全国化肥施用量实现稳中有降；因地制宜推进水肥一体化智慧管控设施。 • 实行生物农药、高效低风险农药替代；推进农药减施增效。 • 大力推进绿色种养循环农业试点。 • 增强农田土壤固碳能力；增加土壤有机质。 • 综合采取秸秆还田、畜禽粪肥还田、种植绿肥还田等措施，提高耕地地力和产出能力。 • 统筹发展高效节水灌溉，推动管理节水，推进农业节水监测。 • 因地制宜推广稻田节水灌溉技术；选育推广高产、优质、低碳水稻品种。 • 推广先进适用的低碳节能农机装备；支持绿色农业机具、智能装备纳入补贴范围。 • 推广低蛋白日粮、全株青贮等技术和高产低排放畜禽品种；建设智慧牧场，精准配方饲喂。 • 提高畜禽粪污处理水平；加强畜禽粪污资源化利用。 • 推进秸秆肥料化、饲料化和基料化利用。 • 推进地膜科学使用；推进农膜回收利用；开展高收净率残膜回收机械应用。 • 减少生产环节粮食损耗浪费。	《2030 年前碳达峰行动方案》 《农业农村减排固碳实施方案》 《“十四五”全国农业绿色发展规划》 《“十四五”推进农业农村现代化规划》 《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》 《到 2025 年化肥减量化行动方案》 《到 2025 年化学农药减量化行动方案》 《关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》 《全国智慧农业行动计划（2024—2028 年）》 《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》
农场到餐桌	• 推广应用绿色储粮技术，利用信息化手段降低存储损失损耗。 • 推动包装和包装印刷减量化；健全绿色包装等标准规范。 • 加快绿色高效、节能低碳的农产品精深加工技术集成应用。 • 推动绿色加工、废弃物回收利用等产业集聚发展。 • 实施农产品仓储保鲜冷链物流设施建设工程。 • 提高冷链物流质量效率，减少农产品产后损失和食品流通浪费。 • 制冷设备由 HFCs 向低碳环保制冷剂替代转换。 • 推进智能农机创新，在规模化场景实现收获、运输、仓储减损。	《粮食节约和反食品浪费行动方案》 《“十四五”循环经济发展规划》 《“十四五”全国农业绿色发展规划》 《关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》 《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》 《“十四五”冷链物流发展规划》 《基加利修正案》 《全国智慧农业行动计划（2024—2028 年）》
食物消费	• 提高炊事电气化普及率。 • 探索绿色优质农产品生态价值实现路径。 • 开展优质农产品消费促进活动，引导城乡居民采购绿色优质农产品。 • 坚决制止餐饮浪费行为；深化“光盘行动”。 • 减少消费环节粮食损耗浪费。 • 推动厨余垃圾源头减量和资源化利用；有序推进厨余垃圾处理设施建设。 • 推广健康烹饪模式和营养均衡配餐；推动饮食有节、绿色低碳的健康生活方式。	《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》 《“十四五”全国农业绿色发展规划》 《关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》 《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》 《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》 《粮食节约和反食品浪费行动方案》 《中国食物与营养发展纲要（2025—2030 年）》

来源：iGDP 整理

2. 助力农食系统转型的主要驱动因素

农食系统涉及多个活动环节和相关参与方，其转型也需要多个助力因素的支持。政策、制度和政府治理是影响农食系统转型的强大驱动力，其直接作用于整个农食系统的运转以及农食系统所处的环境（如社会、经济、自然环境），也会对农食系统转型的其他助力因素产生影响^[19]。技术创新是农食系统转型的重要驱动因素，生物技术、数字化、大数据等创新技术在支持可持续转型方面发挥着重要作用^[19]。农食系统转型离不开资金支持，近年来农食系统的投资规模不断增长，但除了传统的公共投资者之外，仍需要进一步吸引大量私人资本来弥补融资缺口^[20]。此外，由于农食系统转型的系统性和复杂性，需要推进能力建设来提升农食系统实践者应对转型挑战、落实绿色低碳转型实践的能力，包括内外部沟通、调整组织架构、系统性思维能力等^[21]。上面提到的这些驱动因素都需要通过利益相关方参与来达到最佳效果，在复杂多样的农食系统中，各参与方的利益和价值观可能存在差异或冲突，然而农食系统的转型很大程度上取决于各参与方的求同存异的意愿和能力^[22]，因此农食系统的转型也离不开各相关方的参与协作。

2.1 政策支持

农食系统转型离不开政策支持。从“九五”期间到“十二五”期间，我国粮食主产区的农作物播种面积增长 7.57%，而化肥施用强度却增长 31.26%，农业生产主要依靠化肥投入驱动^[23]。“十三五”时期以来，我国陆续出台了各种政策支持农食系统绿色低碳发展，包括化肥农药减量增效行动、农业废弃物资源化利用、农业面源污染防治、种养结合循环农业等措施。这些措施在减少农业污染的同时，减少了化学投入品的使用，提升农业废弃物资源化利用水平，从而减少了碳排放。此外，政策支持对于推广绿色低碳农业技术和设施、激励农户采用绿色低碳的种植、养殖方式，以及消费者行为改变也至关重要^[24]。

2.2 技术创新

技术创新是农食系统转型的强大驱动力，农食系统转型技术包括但不限于生物技术、数字化技术、自动化技术、智慧农业技术和设施、智能灌溉技术等^[25]。数字化、自动化和智能化技术能够提升资源利用效率，同时为农业生产提供早期预警，从而提升生产效率^[26]。而绿色农业技术（如精准施肥、减肥增效、绿色农药等）和因地制宜的智能灌溉技术等则可以通过减少投入而减少碳排放。例如，将农业废弃物转化为生物炭并施用于土壤，能够改善土壤质量，提高土壤肥力，提高农田增汇减排，不过选择适当的生物炭施用量至关重要^[27]。因此，农食系统绿色低碳技术的创新和推广，还需要通过能力建设来提升实践者的接受度和操作准确性。

2.3 资金支持

资金支持为农食系统转型提供经济动能，农食系统转型需要来自政府补贴、绿色金融和私营部门投资的多元资金来源^[20]。研究发现，政府补贴对农户采纳绿色生产技术有正向影响^[28]。2019 年，我国累计安排秸秆粉碎还田机、打捆机、免耕播种机购置补贴 13 亿元，全国共实施机械化秸秆还田面积 8.15 亿亩^[29]，大力促进了我国的低碳农业生产。2020 年，农业农村部提出建立有机肥推广激励专项资金和出台有机肥施用补贴政策^[30]，助力有机肥的推广。不过，除政府补贴以外，我国支持农食系统的转型金融创新与实践仍处于早期阶段，主要集中在贷款和债券的形式，未来更多金融工具有望在农食系统转型中发挥作用^[20]。

2.4 能力建设

加强能力建设是农食系统转型的重要保障，在农户层面进行能力建设对于农食系统转型意义重大，通过培训农户，支持其获得新技术和技能，能够提高农户对市场需求变化的分析能力和信息获取能力，从而提高收入和改善生活水平^[17]，提升农食系统对极端天气 / 气候事件的抵御能力和应对气候变化的能力^[31]。我国自 1993 年就出台了《中华人民共和国农业技术推广法》，要求基层农业技术推广机构组织农户学习农业科学技术知识，同时农业、林草、水利、科技等部门应当给予支持，以提升农户应用技术的能力。此外，对基层农业技术推广人员等绿色低碳农业技术人才队伍的能力建设，对推动农食系统转型也必不可少。

2.5 多方参与

农食系统涉及多个领域和部门，其绿色低碳转型离不开多方参与。目前，我国农食系统的决策部门多元且相互独立，生产、储藏、运输、加工、消费等领域的管理决策缺乏联动^[32]，尚未有针对农食系统整体的减排行动方案，因此需要加强农食系统内部各领域和部门的协同。在决策部门之外，农食系统各环节上的农户、合作社、企业、地方政府、地方专家、高校和研究机构，以及其他社会组织的参与和互动对于农食系统转型同样不可或缺。农户、合作社和企业是农食系统绿色低碳行动的实践者，能够直接影响技术落地的效果；地方政府为农食系统绿色低碳行动的落地提供各方面支持，地方专家能够因地制宜促进农食系统绿色低碳技术的本地化；高校和研究机构通过研发和技术创新推动绿色低碳行动的发展；社会组织在其中参与能力建设或发挥平台作用，促进各方的有效沟通和互动。

图 1 推动农食系统转型的关键因素与策略

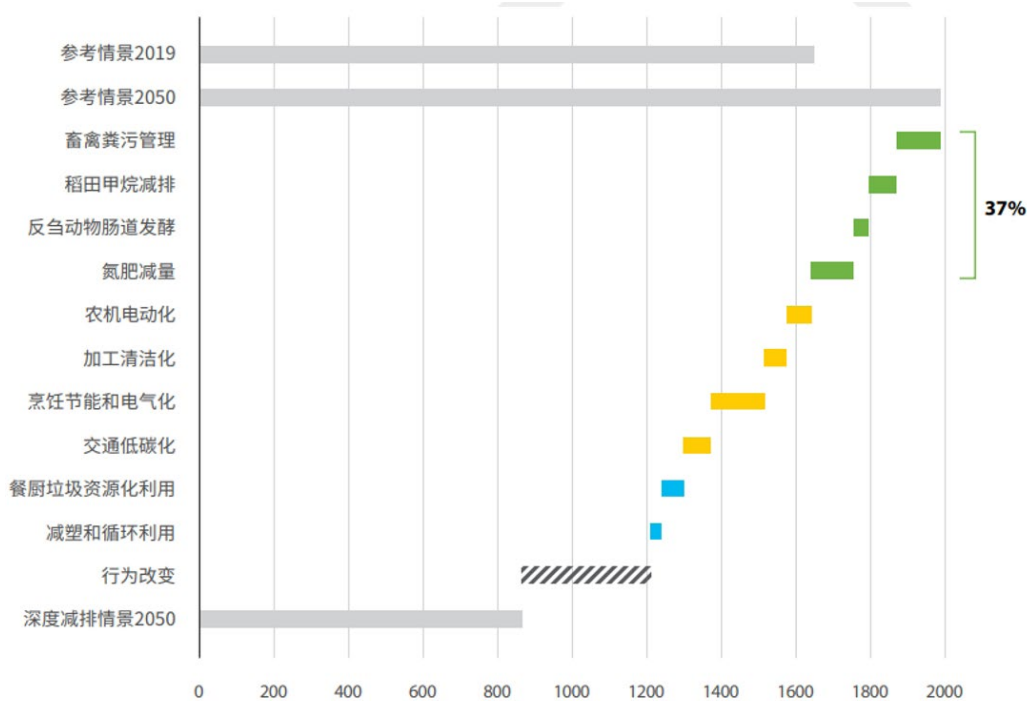


来源：iGDP 绘制

3. 助力农食系统绿色低碳转型的地方实践

农业生产阶段的低碳发展对农食系统绿色低碳转型贡献巨大。基于 iGDP 此前的研究，农食系统的温室气体排放可以划分为农业生产（包括农业投入品生产、加工和运输；农业机械使用；农作物种植田间排放；动物养殖和粪污处理）、农场到餐桌（食物加工；包装；运输；零售）以及食物消费和浪费（烹饪；餐厨垃圾处置）三个主要阶段。其中农业生产阶段的排放最高，约占整个农食系统温室气体排放的 59%，且在我国目前的社会经济发展和绿色低碳转型趋势下，仍将持续增长^[5]。

图 2 深度减排情景下农食系统主要减排行动的减排潜力（百万吨 CO₂e）



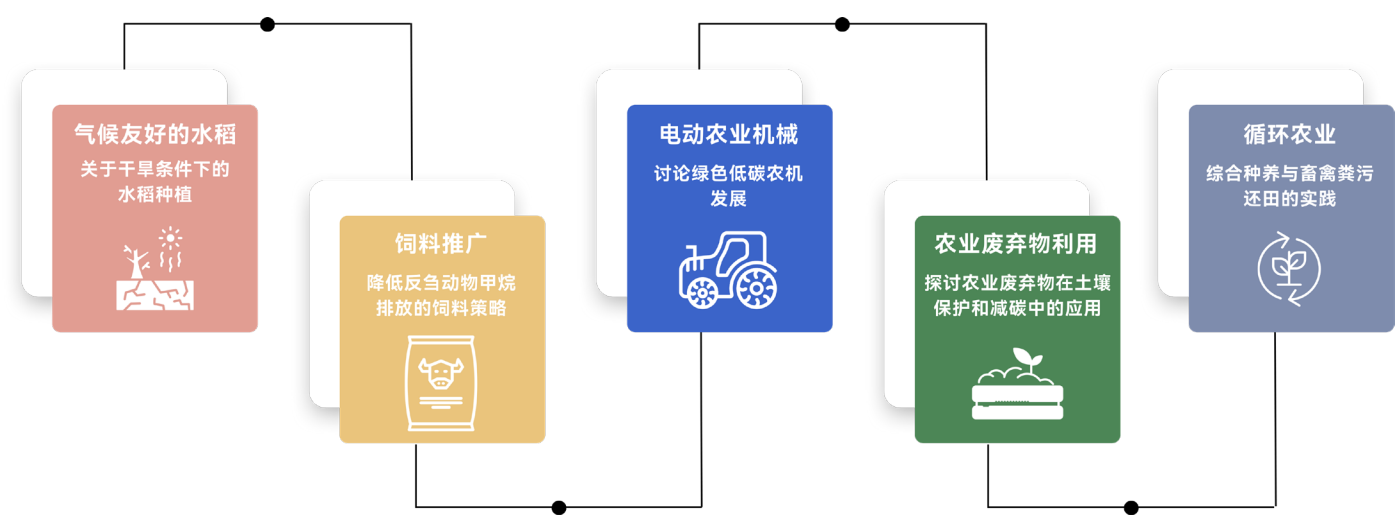
来源：绿色创新发展研究院 . (2023). 《农食系统与碳中和：中国农业与食物相关温室气体减排路径分析报告》

此外，农业生产阶段所涵盖的活动和减排潜力相较其他两个阶段更多，iGDP 此前的情景分析显示在强化减排情景和深度减排情景下，农业生产阶段的累计减排潜力均大于农场到餐桌阶段和食物消费阶段，对农食系统实现碳中和至关重要。并且，很多减排的潜力是来自强化已有的绿色发展行动，包括在绿色农业、能源低碳化和循环经济为防治环境污染和保护公众健康所采取的行动^[33]。

因此，本报告将聚焦农食系统的农业生产阶段的主要活动，选取位于我国不同地理区域和气候条件的重要农、牧产区的绿色低碳农食系统实践和前沿技术组成案例，并对其进行分析。这些案例覆盖农业投入品生产、农业机械使用、农作物种植、牲畜饲养，以及农业废弃物资源化利用等活动，具体而言，案例包括：

- 在季节性干旱背景下，云南、四川的气候友好稻作
- 适用于不同作物、地形、作业环境的电动农业机械
- 推广青贮饲料（云南）和混合饲料（内蒙古），降低反刍动物甲烷排放
- 发展循环农业，农业大省江西推动综合种养和畜禽粪污还田
- 农业废弃物资源化利用，生物炭促进土壤保育和减排固碳

图 3 农食系统绿色低碳转型的地方实践示意图



来源：iGDP 绘制

在案例分析中，我们从气候变化对地方农业生产的影响与地方农业生产如何回应的现实背景出发，探索不同地方在发展绿色低碳农食系统实践的主要推手，并识别相关实践进一步推广的前景和所需要的助力。最后，基于案例分析和文献资料，为农食系统转型的各参与方提出扩大绿色低碳农食系统实践、促进农食系统转型的建议。



3.1 气候友好的水稻种植

3.1.1 稻田种植与气候变化

中国是水稻生产和消费量最大的国家，稻米是全国 60% 以上居民的重要口粮^[34]。2023 年，我国稻谷产量为 2.07 亿吨，占粮食总产量 31.8%^[35]。因此，水稻生产对于保障粮食安全、人民生活，乃至国民经济平稳运行意义重大。水稻的生产受到太阳辐射、气温和水分供应等气候因素的影响。在气候变化日益加剧的背景下，水稻生产受到越来越多的极端天气事件，如高温、干旱和洪水的影响，另一方面，水稻生产中以甲烷为主的温室气体排放也对气候变化带来影响。

极端天气加剧水稻生产的波动性

极端高温对我国的农业生产率和作物产量都有负面影响，研究显示，作物每在气温高于 33℃ 的热害胁迫下多暴露一天，生产率和产量就会额外下降 2.6% 和 4.4%^[36]。对于我国南方水稻种植区而言，夏季的连续高温可能会影响水稻的分蘖、孕穗、抽穗、扬花、灌浆等关键生长期，易导致水稻的产量和稻米质量下降^[37]。相较于晚稻，高温对于早稻和中稻的负面影响更大，这是由于对水稻生长不利的高温发生在 7-8 月的频率更高，而这一时期正值早稻和中稻的幼穗分化、扬花、灌浆等关键生长期，高温易导致幼穗分化障碍、颖花不育、灌浆期缩短、灌浆速度加快，导致稻米空壳率增多，粒径变小、重量下降，同时品质变差^[38]。在湖南、江西、浙江、福建、广东和广西六省，水稻生长季温度每增加 1℃，早稻产量的下降幅度达到 8.1%^[38]。事实上 2022 年夏季，长江中下游及川渝地区持续高温少雨，对处于孕穗开花和灌浆期的水稻发育造成不利影响，水稻单产、总产略有下降^[39]。

极端降水事件也会对农业生产带来显著的负面影响。2023 夏季，受到台风带来的强降雨影响，黑龙江五常市的 250 万亩稻田中有 100 多万亩遭洪水侵袭，淹水的水稻减产大约 40%-50%^[40]。研究显示，过去 20 年极端降水造成我国水稻年均减产 8.1% 左右，到本世纪末，极端降水加之气候变暖的基础上，水稻有可能额外减产 7.6% 左右，减产区域主要集中在东北地区 and 东南沿海^[41]。

水稻生产的甲烷排放也在影响气候变化

在水稻种植过程中，其淹水厌氧土壤条件中的有机物被产甲烷菌分解时产生的甲烷排放是我国农业温室气体的主要排放源之一。根据中国 2024 年 12 月提交的中华人民共和国《气候变化第一次双年透明度报告》^[42]，2021 年我国共排放甲烷 6064.5 万吨（包含土地利用、土地利用变化和林业 LULUCF），农业活动的甲烷排放占比 40%；而在农业甲烷排放中，水稻种植的甲烷排放占比超过 36.5%，是农业甲烷的第二大排放源。

水稻种植既是气候危机的促成者，同时也是气候危机的受害者。因此，水稻种植如何适应和减缓气候变化，在稳产增产前提下有效控制甲烷排放，是各地在农食系统绿色低碳转型实践中持续进行的探索。

3.1.2 气候友好水稻种植的多样化尝试

伴随极端天气的加剧和我国推进农业应对气候变化行动的加速，近年来，我国不同地区在相继探索如何进行更加气候友好型的水稻种植。例如通过灌溉方式和播种方式的调整来减少土壤淹水时间来控制甲烷排放，或者是种植和选育合适的水稻品种来减少水稻种植的需水量。

近年来，地处四川省中部的简阳市的季节性干旱日益严重，给水稻种植带来挑战。简阳市踏水镇的寨子村开始尝试不同的水稻种植方式和技术来应对挑战。寨子村自 2020 年成立合作社，以农户自愿入股的形式壮大发展集体经济，集体经营约 5000 亩耕地。为了应对日益严重的季节性干旱，寨子村开始在四川省农科院的支持下推行水稻覆膜技术。随后在东溪街道农业综合服务中心（简称“农业综合服务中心”）和成都家园行动公益服务中心（简称“家园行动”）的支持下，从 2022 年开始尝试起垄种植，通过在平整好的田地里每隔 5 尺开沟（大约 25cm 宽，10cm 深）用于灌溉和排水，沟与沟之前形成的厢面上种植水稻^[43]，以此大幅减少稻田与水接触的时间，从而减少甲烷排放^[44]。2023 年起，寨子村在起垄种植的基础上增加了免耕覆盖的实践，在 500 亩稻田和 1000 亩旱地

上使用当地在冬季种植的油菜的菜籽壳、秸秆等材料进行覆盖，起到增温保湿、控制杂草的作用。项目组在调研中了解到，起垄种植 + 免耕覆盖的实践能够节水 60%，加上减少了化肥、除草剂等投入品的使用，能够大幅减少能耗和碳排放。根据四川省农业科学院多年的示范，水稻开厢垄作、厢沟节水灌溉的技术具有节水 60%~70%、减少甲烷排放 60%~80% 的效果^[45]。

图 4 钟大爷介绍自家稻田起垄 + 免耕覆盖的具体情况



来源：项目组拍摄

在简阳市东溪街道万古社区的叶女士则是通过在邻居家帮忙了解到农业综合服务中心和家园行动正在推广的生态农业种植方式，随后在自己的 5 亩多土地上进行实践。采用起垄的方式种植水稻，同时以菜籽壳、秸秆和竹叶等当地材料进行覆盖。通过稻油轮作的方式来保持土壤肥力，并将油菜籽压榨后形成的油枯和羊粪作为有机肥。她提到，采用生态农业种植方式后，作物病虫害很少发生，产量也会相对稳定，尤其是在遇到极端天气时，减产量远小于使用化肥的种植方式。

与四川相邻的云南在近年也饱受夏季高温少雨的困扰，2023 年云南全省平均气温已连续 12 年偏高；平均降水量已连续 5 年偏少^[46]，气象干旱所导致的农业旱情对于春耕的播种影响较大^[47]。针对这种现象，当地一家专注推动生态农业和农业应对气候变化的机构云南思力生态替代技术中心（简称“思力中心”）也在探索一些新型的水稻种植技术，来促进稻田适应气候变化的同时协同实现甲烷减排。云南有很长的传统旱稻种植历史，经过对云南多个地市的调研和多个稻种的筛选，思力中心选定了水稻旱作技术作为当地农业应对气候变化的实践。“水稻旱作”是指将水稻品种或者陆稻品种在不具备水稻“水种水养”条件的平地、坡地上进行种植，因地制宜的一种生产途径^[48]。

为了推动技术落地，思力中心与云南各市县的农业科学研究所和农技部门合作，进行水稻旱作技术的示范和推广。2024 年共打造 20 余块示范田，围绕湿润栽培、纯旱栽等旱作技术进行水分和肥料管理的探索，并结合不同的场景来推广相应的技术。其中，思力中心与石林县农业技术推广总站（简称“石林农技站”）合作推广气候友好稻作的种植形式便是其中之一。合作模式主要由思力中心提供技术指导，石林农技站来进行技术推广，双方通过共建试验田的方式推动技术落地。

图 5 石林县板桥街道的水稻旱作稻田



来源：项目组拍摄

成果后，有一部分自发采用了这种种植方式。2024 年，板桥街道水稻旱作的面积达到 2000 多亩。

农业综合服务中心和家园行动也会定期举办工作坊来为周边的农户分享气候友好的种植方式。来自寨子村的农户钟大爷有 9 亩土地流转给了村集体，剩余 7、8 亩土地自行耕种。通过参加工作坊了解到水稻免耕覆盖的实践，出于健康和绿色食品的角度考虑，钟大爷采取了起垄种植 + 免耕覆盖的耕种方式。2023 年夏季四川多地包括简阳遭遇了持续的高温干旱，钟大爷的地块因为免耕覆盖土壤湿度保持较好，水稻和玉米的长势明显好于村里其他未采用免耕覆盖的地块。

图 6 石林县小屯村的气候友好稻作示范田



来源：项目组拍摄

石林县板桥街道小屯村水稻种植合作社在 2023 年春季，与思力中心在小屯村的试验田采用起垄沟灌和覆盖的方式种植水稻，很多农户起初持观望和怀疑的态度。但到了 5 月下旬，试验田的水稻在雨水较少的情况下长势并未受到明显影响，有更多农户愿意学习和接受这种种植方式。石林板桥街道农业综合服务中心谢主任提到，2023 年这批水稻亩产达到 510kg/ 亩，高于周边常规水稻 470kg/ 亩的产量。石林农技站的姜站长介绍，这是由于起垄的方式有效增加了土壤温度，有利于水稻分蘖，而适当的控水有利于有效穗的形成。小屯村在 2023 年一共推广了 10 亩气候友好型水稻，2024 年则达到了 52 亩。

水稻旱作最大的挑战是草害，水稻在旱地种植的防草和除草难度都比淹水稻田更大^[49]。思力中心气候友好稻作工作组的龙海燕指出，在推广水稻旱作技术时结合当地实践给出指导，鼓励农户根据自身情况选择稻草、秸秆或农膜等进行覆盖，以起到防治杂草、减少病虫害的作用，也可以减少农户的成本投入和劳动时间，对于农户来说有很大的激励。

对于思力中心和石林县各级农技站而言，通过试验田的方式引导农户看到气候友好稻作实践对于产量提升的效果和省时省力的益处，从而产生带动效应，远比强制性的推广更为直接有效。

3.1.3 气候友好稻作实践落地的主要推手

政策的支持：云南省在《“十四五”农业农村现代化发展规划》^[50]中提出大力发展杂交稻旱种，并于同年印发了《2022 年云南省杂交水稻旱作技术指导意见》^[51]，对水稻旱作的适宜区域、种植模式、品种选育和播种施肥的操作进行引导，同时开展线上线下技术指导，培训各级农技人员、合作社、种粮大户共计 40 余万人^[52]。

农户自身适应气候变化的需求：世界经济论坛的文章显示水稻种植消耗了全球 40% 的灌溉用水^[53]，水稻种植所需的用水量对于干旱日益严重的西南地区提出了挑战，农户也需要一些技术来帮助他们适应这种情况，更好地抵御气候变化给水稻种植带来的风险。

地方机构的试验和示范：致力于生态农业、可持续农业的地方研究和实践型机构，通过调研和试验，提出因地制宜的、轻简化的气候友好水稻种植的技术导则和模式；并与农技站和农业综合服务中心合作，形成试验落地和规模化的抓手。例如，四川省农科院通过示范项目在简阳市、资阳市、内江市等地推广水稻覆膜节水抗旱技术^[54]。

农技站 / 农业综合服务中心的推动：农技站 / 农业综合服务中心与农户、合作社在农技层面的交流具有天然优势，将技术语言翻译成便于农户理解和操作的形式，便于实施；同时与地方机构合办示范田，让农户更直观感受到气候友好稻作的技术所能带来的益处，促进技术的推广。

合作社 / 村集体的规模效应：相比于面向农户挨家挨户的推广，与村集体合作的能够节省沟通成本，易于实现技术的大面积落地^[43]。

3.1.4 气候友好稻作的推广前景

四川省农科院在多年多点示范水稻覆膜节水栽培应用（即开厢垄作、厢沟节水灌溉 + 地膜覆盖）中发现，这种耕种方式具有节水 60%~70%，增产 20%~30%，减少甲烷排放 60%~80% 的显著效果^[45]。四川省农科院指出，这种耕种方式适宜在冬水田应用，在冬季种植小麦、油菜、蔬菜、绿肥等旱地作物而非淹水，既能大幅减少冬季稻田甲烷排放，还能为农户增加收益^[45]。我国的冬水田主要分布于川渝陕南浅山丘陵地带^[55]，起垄沟灌 + 免耕覆盖的耕种方式可在其他省份的冬水田因地制宜推广，取得规模化的增产、增收和减排效益。

2022 年和 2023 年，云南省分别推广了 53.12 万亩^[56] 和 28.54 万亩^[57] 旱作水稻，云南省科技厅表示，水稻旱作技术符合云南实际且简单易行，但技术专家同时指出，水稻旱作对于海拔、降水量和水稻品种都有要求，并非所有地区和品种都适宜旱作^[58]。因此，水稻旱作目前主要在云南省推广，不过湖南省^[59]、福建省^[60]、海南省^[61]、内蒙古自治区^[62]、广东省^[63] 等地也有几十亩到十万余亩不同规模的旱作水稻，说明水稻旱作在其他省份也具备较好的推广前景。

进一步加强能力建设：为进一步推广增产减排的水稻种植技术，地方农技站和农业综合服务中心应充分发挥能力建设的作用，针对有意愿的种粮大户和小农户，定期举办培训和工作坊，促进种植户对气候友好种植方式的了解，并通过示范田的形式更直观的展示和带动种植户采取这种种植方式。

打开生态产品市场销路：对于发展集体经济和合作社而言，使用包括上述方式种植的水稻目前面临销售渠道打不开的困境，虽然更加健康生态、气候友好，但水稻粮食作物的属性和消费者对生态农产品的价值认可程度，导致这些水稻在销售时并不具有优势。寨子村村集体认为理想状态是能打造自己的品牌，做农产品加工和附加值提升，如今他们正在打造自己的“兴寨子”品牌，已有了初步效果^[64]。

生态农产品的价值实现：小农户也面临类似的困境，水稻种植本身不具备太多经济激励，因此农户对于推广气候友好稻作所能带来的增产增收积极性并不高^[44]。地方机构若能发挥研究能力，帮助农户和合作社就气候友好稻作进行经济和生态效益的核算，与产品碳足迹和绿色、有机等认证相结合，将有助于让气候友好稻作的价格反映其真正价值，进一步扩大其种植范围。

以农业补贴带动市场机制的健全：“十三五”以来，我国以绿色生态为导向的农业补贴制度取得了积极进展，但仍存在不足，例如农业绿色补贴的绩效不高，难以真正激励小农户进行绿色生产，且现有的基层队伍不足以支持量化政策目标背后的数据收集、核实工作量^[65]。未来，随着农业新质生产力的发展，若能对农户在水稻种植过程中采取的低碳措施（如间歇性灌溉、起垄沟灌 + 免耕覆盖等实践）进行有效的监测和并提供相应的补贴，能够为农户提供减排的经济激励^[66]。此外，若气候友好稻作的相关种植方式能够纳入的我国温室气体自愿减排方法学，也能为规模化经营的稻田提供甲烷减排经济激励。长远来看，在完善数据基础和政策性经济激励的前提下，量化此类生态农产品的价值和健全农业生态产品市场交易机制，并引导全社会对农业生态产品价值实现的重视^[67]，以推动市场力量来持续促进农业绿色低碳发展。



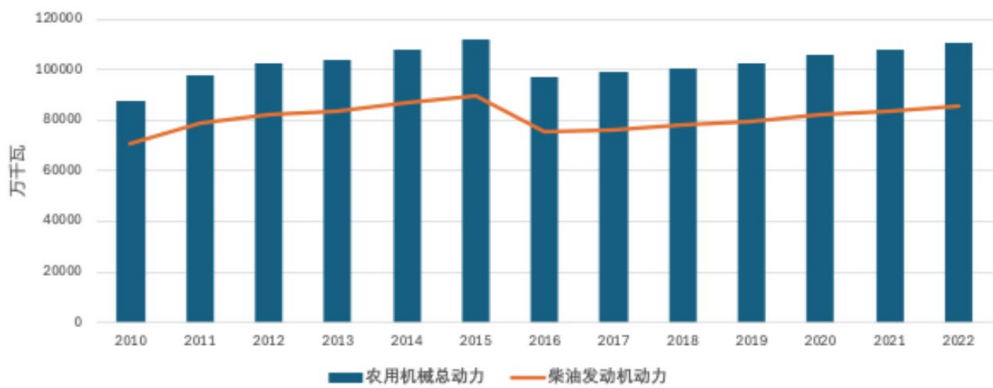
3.2 农业机械绿色低碳转型

作为农食系统绿色低碳转型中的重要一环，农业机械的绿色低碳转型不仅可以提高资源利用效率，还将减少温室气体排放和缓解空气污染，在助力“双碳”目标实现的同时提高生态环境质量。

我国作为农业大国，农业机械化水平在过去的二十年得到快速增长，既为粮食安全提供有力保障，也为推动农业现代化和乡村振兴提供了新的动能。2023 年我国农机装备总量接近 2 亿台（套），农业机械的总动力从 2003 年的 6.04 亿千瓦上升到 2023 年的 11.37 亿千瓦^[68]，全国农作物耕种收综合机械化率已超过 73%^[69]。

由于我国农业机械基本以柴油作为动力，农业机械化水平提高也增加了柴油消费量。统计数据显示，2021 年柴油发动机动力占我国农业机械总动力的 77%，农用柴油使用量为 1802 万吨，比 2003 年增加了 14%^[69]。同年我国农业能源相关的温室气体排放达到 2.8 亿吨二氧化碳当量（CO₂e），比 2003 年增加了 45%^[70]。此外，研究表明农业机械化带来的能源消耗将成为农业碳达峰最大的不确定因素^[71]。

图 7 农业柴油发动机动力占比



数据来源：国家统计局

另一方面，农机柴油使用对空气质量影响也不容忽视。来自 2023 年《中国移动源环境管理年报》的数据显示，2022 年全国非道路移动源的颗粒物（PM）排放是机动车的 4 倍，其中 40% 来自农用机械。PM 排放中的细颗粒物也会损害人体呼吸系统和增加心血管疾病，对公众健康带来负面影响。大气颗粒物沉积在农作物表面会影响光合作用效率，对作物产量带来不利影响^[72]。

此外，最新研究显示，1985-2020 年期间我国农业机械的碳排放增加了近 7 倍，与此相关的空气污染物排放增加了 4 到 7 倍^[73]。在此背景下，农业机械的绿色低碳转型也在获得越来越多的关注，其中既包括国家相继出台的政策关注，也有企业在绿色农机技术的创新和地方在绿色农机推广的探索。

3.2.1 农机绿色低碳转型的政策助力

提高农业机械化率和加强先进农机研发推广是我国推进农业现代化和乡村振兴的重要组成部分。2004 年，我国出台《农业机械促进法》和相关配套政策对农民和农业生产组织购置农业机械提供直接补贴，加快推动农业机械化发展。2004-2014 年我国对农机购置的财政补贴逐年上升，到 2017 年后进入缓慢增长阶段^[74]。随着我国对农业农村绿色发展的日益重视，补贴政策中的绿色元素也在增加。2016 年，我国出台《建立以绿色生态为导向的农业补贴制度改革方案》。2017 年发布的《2018-2020 农业机械购置补贴实施指导意见》提到要优先保证粮食等主要农产品生产和支持农业绿色发展机具的补贴需要^[75]。2021 年发布的《“十四五”全国农业绿色发展规划》中提到将更多支持农业绿色发展机具、智能装备纳入农机购置补贴范围，加快绿色机械应用推广^[76]。2024 年，农业农村部 and 财政部共同印发的《2024—2026 年农机购置与应用补贴实施意见》中指出将提高部分重点机具补

贴额，补贴比例由 30% 提高到 35%，其中包括混合动力和电动在内的新能源农机^[77]。

针对柴油为主的农业机械的污染物排放标准也在提高。基于我国在 2020 年 12 月颁布的《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（中国第三、四阶段）》（GB 20891-2014）修改单和配套的技术规范，我国生产、进口和销售的农机排放标准从 2022 年 12 月由“国三”升级到“国四”^[78]。新标准由于对污染物排放限值有更为严格的要求，将进一步推动绿色农机发展并助力空气质量改善。

与此同时，我国也在加快能耗大污染重的老旧农机的报废更新速度。2020 年我国发布《农业机械报废更新补贴实施指导意见》，对从事农业生产的个人和农业生产经营组织的农机的报废和更新提供补贴^[79]。2024 年我国印发《关于加大工作力度持续实施好农业机械报废更新补贴政策的通知》，提出持续实施好农业机械报废更新补贴政策，加快农业机械结构调整，提升农机高端化、智能化、绿色化水平。其中涉及补贴范围和最高报废补贴标准均有增加^[80]。

此外，我国也陆续发布政策支持绿色高效农机技术的推广。例如 2016 年《农机装备发展行动方案（2016—2025）》明确将“清洁燃料与新能源农用动力、电控喷射与新能源拖拉机”列为重点发展主机产品。2018 年国务院发布《关于加快农业机械化和装备产业转型升级的指导意见》提出支持绿色高效机械装备和技术的推广示范^[81]。2022 年我国发布的《农业减排固碳实施方案》中强调加快老旧农机报废更新力度，推广先进适用的低碳节能农机装备，降低化石能源消耗和二氧化碳排放。

3.2.2 电动农机技术创新

随着绿色农机政策的相继出台，企业电动农机的技术创新也在涌现。在我国目前以柴油为主的农业机械动力中，电动机动力仅占不到 20%，因此在推动农业农村新能源建设的基础上，电动农机的研发和推广将可以在农机的节能减排中发挥重要作用。我国电动农机起步较晚，目前主要集中在微小型电动农业设备上，例如电动割草机和微耕机^[82]，以及我国农用机械中电动比例最高的植保无人机。多数农机电动化技术还处于批量和示范运营阶段，主要依靠电机进行作业，分为固定作业和移动作业两种模式。前者主要用在脱谷机械和农作物烘干设备等，后者则是通过在移动作业农业机械中配备电池，以小功率电动机为主，包括电动喷雾机和播种机等^[83]。尽管大功率农业机械电动化受电池技术限制，但是不少企业也在进行技术研发和小范围的示范运营，例如针对农机行业规模最大的拖拉机，电动拖拉机的研发正在加速^[84]。

2020 年，国家农机装备创新中心发布了由其牵头研制的国内首台氢燃料电动无人驾驶拖拉机^[85]。江苏悦达集团下的黄海金马拖拉机厂在 2021 年推出了 YL254ET 和 YU1004 两款电动拖拉机。前者可以在大棚、果园里进行轻负荷作业，后者是专门在水田旋耕、播种、田间管理开发的水田拖拉机。目前两款电动拖拉机均已进入小批量生产并投入到实际使用中^[86]。另外一家开展电动拖拉机研发的企业是来自甘肃酒泉的铸陇机械制造有限公司，公司针对甘肃山区丘陵为主的地块特点，研制出了电动小麦播种机、电动中耕除草机、电动追肥机等电动系列机具，并且在定西、临夏等地开展试验示范^[87]。

图 8 中科原动力创始人介绍电动拖拉机



来源：项目组拍摄

位于北京的一家专注农业机器人创新的公司——中科原动力科技有限公司，也在 2022 年推出了适用于山地、丘陵、温室的万途 500 系列电动拖拉机^[88]，并且在 2024 年发布了大马力的智能电动拖拉机万途 2604ET。这款大马力的电动拖拉机近期在江苏镇江投入农业生产作业，在田间的不同地块进行旋耕、播种、开沟等作业^[89]。

电动拖拉机推出后，其可以带来的节能减排效应和成本也受到关注。在项目组的调研中了解到，以中科原动力的等轮折腰丘陵山地纯电拖拉机为例，在 50 亩左右的农场作业，

大概可以持续 6-8 小时，充电则可以在 1 小时左右完成，充电可以享有农业用电价格，和同马力的传统柴油拖拉机相比，每年可以减排 100 吨 CO₂ 左右¹。但是，与同马力的燃油拖拉机 5-6 万的价格相比，电动拖拉机的价格偏高，大约在 25 万左右，其中主要的成本来自电池，单个电池价格在 17 万左右，寿命大概是 4000 次，可用 10 年^[89]。因此尽管电动拖拉机在减排和减污上有优势，但是价格与传统拖拉机相比并不具备优势，未来仍需政策支持和技术赋能。

3.2.3 地方农机服务探索

农机电动化不仅需要提高绿色农机的技术创新和产品推广，同时也需要有相应的农机社会化服务模式和配套设施的完善，从而以尽可能低的农业机械总动力实现尽可能高的农业生产综合机械化水平^[90]。新型的社会化经营方式可以通过提供农机作业委托或者农机租赁服务，用尽可能少的农机动力装备来实现农业机械化，同时也降低农机作业成本和提高作业效率。

在我国以小农为主的农业生产经营方式下，小规模农业经营中农机使用效率较低。另外，虽然政府有农机补贴，但是农户的收入仍然较难支付相对较高的农机购置成本^[91]。因此近年多地已经开展农机作业托管服务，在不改变农民土地承包权和经营自主权的前提下，农户与农机合作社签订农机作业合同，由合作社来为农户提供耕种收管作业环节服务，并收取费用^[92]。

在安徽省的亳州市，当地农机合作社与村委会签订托管协议，约定好农机作业价格、服务的农地面积等信息，然后由农机合作社组织和提供农机服务。另外，政府也对农机合作社的作业托管提供补贴。实施农机作业托管一方面可以降低农户的种地成本，例如规模化农机服务在耕、种、收三个环节每亩地可以节省农户作业费 30-40 元^[93]。并且可以节省外出务工农户在农忙时节需要返乡的交通费用。同时也可以增加农机使用效率和农机手的收入。此外，农机作业托管还带来了一定的环境效益。通过农机作业提供秸秆还田中的灭茬服务，减少了过去农户在下茬作物播种时，把遗留的秸秆进行焚烧的方式，也因此减少了由秸秆焚烧带来的环境污染^[93]。

在农机作业托管之外，推动新型的绿色节能农机的推广使用还需要基础配套设施的完善，例如充电站和充电桩的建设。不同地区也在进行农业生产电气化的探索和尝试。2021 年，在安徽省凤阳县小岗村，国网凤阳县供电公司与北大荒农服集团凤阳小岗农业服务有限公司签订智慧农业电气化生产示范区建设协议，对后者的一批农机具进行电气化改造。6 台电动运输机、2 台无人扬肥机、1 台电动浸种机等设备投入使用^[94]。并且在田埂上建立电气化农机具专用充电桩，可以满足小岗村农业生产中植保无人机、电动运输车等电动农机具的快速充电。当地农户通过扫码或者刷卡即可充电^[94]。针对乡村临时抽水不便以及电网高峰时期排灌线路台区负载过高的问题，国网凤阳县供电公司建立了共享排灌柜，将村里的屋顶光伏所发电量储存到电池柜的储能电池中，这样农户可以从共享排灌柜租用电池装到水泵上进行抽水灌溉。这种方式既能用于应急灌溉，又能平抑抽水台区季节性负荷峰谷差^[95]。

¹ 信息基于调研访谈

3.2.4 农机绿色低碳转型的主要驱动因素与展望

政策支持：随着我国“双碳”目标的推进，农机的绿色低碳转型也备受关注。在我国农业农村绿色发展政策支持下，农机购置补贴开始纳入支持农业绿色发展农具和智能农具。最新的补贴政策中也提到了对包括混合动力和电动的新能源农机的补贴。此外，2024年3月农业农村部农业机械化总站也发布了“关于公开征求《电动轮式拖拉机》农机机械推广鉴定大纲意见的函”，一旦电动拖拉机的农机推广鉴定大纲得到通过，其将获得农机购置补贴^[84]。这个政策信号也将助力农机电动化。针对农机污染物排放的标准也在加强，从2022年底开始，我国农机进入“国四”标准，农机购置补贴也已经向新标准靠拢。与此同时，我国对老旧农机的报废和更新也在加速。在国家发展改革委和财政部发布的《关于2025年加力扩围实施大规模设备更新和消费品以旧换新政策的通知》中明确各地区可自行确定的报废更新补贴农机种类范围上限由6个提高至12个。

技术创新：电动农机的技术创新是带动农机绿色低碳转型的核心力量。我国电动农机起步较晚，目前进入商业化阶段的多为微小型电动农机，例如电动植保机的发展。大型农机在技术创新下也有了新的进展，例如电动拖拉机在一些地方已经进入了小批量运营。但是，电动农机的商业化还面临诸多挑战。首先是电池技术的发展，电动农机目前电池购买成本偏高，使用成本也受到电池8年衰减期的影响，因此如何在降低成本的同时还能提高续航时间仍需技术研发。此外，农机使用对速度要求低，但是扭矩要求高，这一特点也对电池的功率特性提出了更高的要求^[96]。由于在短期内大马力长距离作业的电动农机发展受电池限制较大，因此，农机的电动化较多体现在对作业时长的续航要求不高的轻负荷作业场景的农机^[97]。同时在田间作业区域光照资源丰富的地区，可以考虑将光伏组件与电动农机结合，利用太阳能充电来提升续航能力^[98]。从长远来看，由于我国耕地地块分散、多山地丘陵，还需要开发多种类型和多功能的电动农机产品^[97]。

农机配套设施与服务的推广：农机绿色低碳转型除了需要有政策和技术支持，还需要有配套的设施和服务来实现落地推广。例如农业生产托管服务中的农机作业托管，由农机合作社来为农户提供农机服务，这样可以缓解小农户在电动农机购买的高成本和低使用率上面面临的挑战。研究显示，农业生产托管服务可以促进农户绿色技术的采纳^[99]。此外，电动农机发展还需要有完善的充电基础设施和新型的微电力系统^[98]。随着我国新能源汽车下乡的推进和相应充电设施的加速布局，如果电动农机和电动汽车充电的标准和接口的一致，后者的充电桩可以支持电动农机的充电^[84]。此外，探索电动农机一源多用（用能、储能和供能）的技术路径，并且建立基于新能源电动农机的源网荷储一体化的新型微电力系统不仅可以消纳农村的新能源，也将可以为其他农业生产提供电力支持^[98]。



3.3 反刍动物日粮调控策略

畜牧养殖是我国农业部门温室气体排放的主要来源。其中，反刍动物肠道发酵带来的甲烷排放是农业部门温室气体排放的最主要来源，占比超过 1/3^[42]。反刍动物胃肠道发酵的甲烷排放是其消化过程的副产物^[100]，可通过改善饲养管理（如调整日粮结构、精粗料比例，对饲料进行化学处理或物理加工等）、提高动物的生产性能、添加脂类物质和使用甲烷抑制剂等策略来调控^[101]。由于脂类添加剂不当或过量使用会损害动物健康，化学抑制剂的残留和安全问题也有待继续研究^[102]，因此通过营养调控策略来改善反刍动物饲养管理是最为现实有效的途径^[101,65]。青贮饲料和益生菌饲料添加剂是调控反刍动物营养代谢，降低碳排放的有效途径。

青贮饲料是将含水量 60%~70% 的青绿饲料切碎后，在密闭缺氧的环境下通过厌氧乳酸菌发酵，抑制各种杂菌的繁殖，而得到的一种粗饲料^[103]。青贮饲料营养损失较少、易消化、适口性好、能够减少消化道疾病，同时便于贮存^[104,105]，还可以降低甲烷排放^[102]。而在反刍动物饲料中添加益生菌（主要包括酵母菌、枯草芽孢杆菌等），能够提高反刍动物干物质采食量和饲料转换效率，进而改善营养利用效率和生产性能，同时降低甲烷排放和相关能量损失^[106]。

青贮饲料和益生菌添加剂具有多重优势，能够促进家畜养殖业降本增效。青贮饲料能够有效保持青绿饲料的营养成分，其营养损失一般低于 15%，仅为干草风干过程损失的一半^[103]。青贮饲料的营养价值还体现在其适口性好，具有良好的饲喂效果和效益。针对不同养殖规模的研究表明，青贮饲料相比干草能够提升每头奶牛的经济收益 839 元~1682 元，在普通青贮的基础上添加其他营养物质能够进一步提高青贮品质，降低饲料成本；在肉牛饲料中添加青贮饲料也有良好的育肥效果^[107]。益生菌饲料添加剂也能起到调节肠道菌群、促进动物发育、降低生产成本等作用^[108]。

青贮饲料及益生菌添加剂能够提高饲料的消化率，减少反刍动物的甲烷排放。我国畜牧养殖中农作物秸秆等低质粗饲料消耗较多，其中纤维含量较高，导致反刍动物甲烷排放量较高。将粗饲料中的部分水稻秸秆替换成青贮玉米，可以提升日粮中淀粉的含量、降低纤维素的含量，同时奶牛对纤维素的消化率能够提高 9% 左右，甲烷排放量下降 7% 左右^[109]。益生菌添加剂可以打破秸秆的纤维结构，有利于秸秆在瘤胃内的消化^[110]。在青贮玉米中添加益生菌能进一步促进青贮饲料的纤维降解，酵母菌可将青贮饲料消化率提升 24%^[111]，进一步降低反刍动物肠道发酵甲烷排放。

推广青贮饲料和益生菌添加剂能够提升饲料能量利用效率和饲养效率。胃肠道甲烷排放是反刍动物饲养过程中的重要能量损失，占日粮消化能的 2%~12%，占日粮代谢能的 6.5%~18.7%^[112]。若能减少甲烷排放，反刍动物可以利用这些能量合成更多肉、奶等畜产品。例如，添加淀粉酶的青贮饲料促进奶牛淀粉摄入量增加，提高了牛奶产量，从而使甲烷排放强度降低了 7%^[113]。在奶牛饲料中添加微生物菌剂，也能促使奶牛产奶量和乳质品质提升。用添加酵母菌微生物粉剂的饲料饲喂奶牛，可将奶牛的平均产奶量提升 7% 以上^[114]。因此，利用青贮技术和益生菌添加剂可以在减少温室气体排放的同时节约饲料资源，提高畜牧养殖的生产效率。

在保障重要乳畜产品供给和控制甲烷排放的背景下，我国在国家和地方层面陆续出台了一系列促进青贮饲料推广和益生菌饲料添加剂的政策，内蒙古、云南等全国和地方性的重要乳制品生产基地基于资源和气候条件进行了相关实践。

3.3.1 青贮饲料和益生菌添加剂推广的政策背景

2015 年的中央一号文件首次提出加快发展草牧业，支持青贮玉米和苜蓿等饲草料种植，开展粮改饲试点。其主要目的在于在减少饲料粮消耗、保障粮食安全的基础上促进草食畜牧业的发展^[112]。同时，能够引导玉米籽粒收储利用转变为全株青贮利用，带动秸秆循环利用和转化增值^[115]。2020 年国务院办公厅《关于促进畜牧业高质量发展的意见》进一步提出，增加青贮玉米种植，研发推广新型安全高效饲料添加剂，以健全饲草料供应体系。近年来《农业农村减排固碳实施方案》《甲烷排放控制行动方案》等政策相继提出推广低蛋白日粮、全株青贮等技术，合理使用基于植物提取物、益生菌等饲料添加剂和多功能营养舔砖，降低单位畜产品的肠道甲烷排放，促

进畜禽养殖绿色低碳发展。

相关数据显示，我国的青贮饲料种植面积和产量近年来快速增长，产量从 2015 年的 1.72 亿吨增加到 2023 年约 3.2 亿吨，其中以青贮玉米为主，苜蓿、麦草、高粱等也是重要的组成部分^[116]。然而，我国青贮饲料供应仍存在巨大缺口，若按照标准化饲养技术进行日粮配给，仅考虑牛羊的情况下我国青贮饲料缺口率达到 48%，若仅考虑非作物秸秆的优质青贮饲料，缺口率高达 80%^[103]。基于此，我国进一步出台政策促进青贮饲料发展。2024 年，国家发改委、农业农村部和国家林草局发布《关于推动饲草产业高质量发展的意见》，从饲草产业链的角度，提出稳步扩大青贮玉米等优质饲草种植面积，强化青贮窖等设施建设，积极发展裹包青贮等便于商品化流通的饲草产品等具体措施。

3.3.2 内蒙古西乌珠穆沁旗全混合日粮

内蒙古是我国重要的农畜产品生产基地，牛奶、牛羊肉、羊绒产量均居全国第一，每年有 630 万吨牛奶、155 万吨牛羊肉运往自治区外^[117]。西乌珠穆沁旗（西乌旗）位于锡林郭勒盟东部，土地面积 2.24 万平方公里，其中可利用草场面积 2.02 万平方公里，占土地面积的 90%^[118]。西乌旗的牧民世代以来过着逐水草而居的游牧生活，改革开放后，“草畜双承包”责任制在锡林郭勒草原全面推开，在划定界限、一家一户的草牧场上，牧民们使用网围栏把自家的草场围封起来。政策调动了牧民的生产积极性，然而由于牲畜数量的急剧增加和日益密集的围栏网，草场资源严重退化，生态多样性和生态平衡出现问题^[119]。

于是，西乌珠穆沁旗牧区信息服务中心（简称“服务中心”）决定推行牧区合作社的经营方式，自 2007 年开始推动牧民合作化。通过把单户经营的方式转变为合作经营生产生活的方式，恢复季节性轮牧机制，科学利用草场资源促进牧区可持续发展。

在遭遇自然灾害、外部市场变化或应对气候变化时，单户牧民的能力较弱，往往无法抵抗风险或有效应对。考虑到近年来牛羊肉市场一直在下滑，养殖业饲料成本占比较高，牧民难以负担高额的饲料成本，服务中心在嘎查（村）股份经济合作社开展了“牧草银行”试点。“牧草银行”由村集体合作社牵头和出资，基础设施建造和牧草购买的资金来自当地政府的乡村振兴项目资金。在干旱、雪灾、气候变化应急状态之下，牧民可以用远低于市场价的价格购买牧草银行的牧草，若是少量牧草也可以“赊账”，牧民在夏天丰草期的时候再将自己牧场的牧草还给牧草银行。“牧草银行”为牧民提供牧草储备的同时也考虑兼顾饲料的营养均衡，探索以“本地饲料 + 营养元素”的方式制作全混合日粮，来替代工业化生产出来的颗粒饲料，为牛羊提供低成本的营养物质，同时降低反刍过程的温室气体排放。

图 9 “牧草银行”制作的混合饲料



来源：服务中心提供

大养殖的经济收益，促进牧民增收。饲喂混合饲料的牛羊，每天分别消耗 15 斤和 4 斤的混合饲料，不再需要补充其他食物便可获得均衡的营养。使用全混合日粮的成本相比工业饲料每吨能够节省 650 元，此外每制作一吨全

“牧草银行”生产的混合饲料的主要成分有当地的干草、燕麦、秸秆、玉米和益生菌。干草、燕麦、秸秆和玉米均来自本地，秸秆经粉碎以后会加入益生菌。由于添加了益生菌，有助于饲料在牛羊的胃肠道中的消化，缩短饲料在胃肠道中停留的时间，从而减少甲烷排放。同时，经过益生菌发酵的饲料更易消化吸收，也能够有效降低甲烷排放。

尽量使用本地干草、燕麦、秸秆等原料作为饲料还能降低饲料的成本，在近年来牛羊肉价格下降的市场环境下^[120]，有助于合作社牧民节约饲料成本、扩

混合日粮还能得到 200 元的政府补贴²。

内蒙古是我国畜牧大区，通过饲草料的科学利用，有效降低成本同时兼顾草畜平衡^[121]。以集体合作为基础的“牧草银行”通过资源共享实现风险共担，在提高牧民的抗灾减灾、应对气候变化的能力的同时，降低饲养成本，有力促进了草原畜牧业可持续发展。

3.3.3 云南大理白族自治州洱源县青贮饲料

大理白族自治州是云南省主要的奶源生产基地，也是我国南方重要的奶牛养殖、牛奶加工和乳制品出口外销基地。得益于良好的气候环境和适宜的自然条件，大理奶牛养殖历史悠久。而洱源县水草丰腴，盛产乳牛，有“乳牛之乡”的美誉^[122]。2022 年洱源县奶牛存栏量超过 3.4 万头，生鲜乳产量约 16 万吨，占大理州产量 45.2%。同年，全县种植优质牧草 3 万余亩，推广玉米青贮 2.3 万吨^[123]。

然而，随着养殖规模逐步扩大，生态环境保护与高效养殖之间的矛盾日益突出。在洱海流域转型发展、推动乳业绿色发展的背景下，2023 年初，FAO 的技术合作项目“云南喀斯特生态系统奶牛低碳养殖”（简称“技术项目”）在洱源县启动，由中国农业科学院饲料研究所主持承担。2024 年 7 月，项目组前往洱源县调研，参加了 FAO 与农科院共同举办的培训会，并参观了参与项目的两个家庭牧场。

图 10 常乐奶牛养殖专业合作社的青贮饲料



来源：项目组拍摄

洱源县常乐奶牛养殖专业合作社在技术项目的支持下进行了奶牛生态绿色养殖的尝试。合作社存栏 130 头牛，其中约 30 头泌乳奶牛，每天共产奶 600 余公斤。泌乳奶牛的日粮以青贮玉米为主（25~28kg/日），以精饲料（6~7kg/日）、酒糟和干草（2~3kg/日）作为补充。近年来不断下跌的原奶收购价格给合作社带来经营压力^[124]，在奶牛养殖中，饲料成本占生鲜乳成本的 70% 左右^[125]。对于养殖户而言，用青贮玉米替代饲料，不但能够大幅节省饲料成本，还能提升泌乳期奶牛的健康状况。合作社负责人陈子华表示，青贮玉米

的成本约为 650 元 / 吨，每吨饲料还能从农业局获得 50~60 元的补贴，而饲料的成本则为 3700 元每吨。有调查显示，奶牛产后代谢病（如产后不食和真胃移位）的主要表现为食欲不振，而多喂优质粗饲料如青贮玉米、苜蓿干草等能够增强奶牛产后健康^[126]。这主要是由于青贮玉米可以增加奶牛采食量，同时减少饲料在瘤胃的停留时间和发酵程度，增强肠道营养吸收^[102]。

事实上，奶牛寿命较低是长期困扰我国奶牛养殖业的一个问题。奶牛一般在 3~5 胎时达到牛奶产量高峰，2019 年我国奶牛的实际寿命约为 2.5 胎，低于新西兰（4.2 胎）、英国（3.9 胎）和荷兰（3.7 胎）^[127]，主要也是由于上文提到的代谢疾病。在常乐奶牛养殖专业合作社，采用青贮玉米 + 精饲料 + 酒糟 + 干草的饲喂方式喂养的奶牛胎次可以达到 6 胎，在增强奶牛健康的同时降低其产生牛奶的单位甲烷排放。

炽松奶牛养殖合作社的 200 多头奶牛的日粮也以青贮玉米、精饲料和酒糟为主。成年奶牛每天需要消耗约 60 斤青贮玉米，合作社女主人并未对日粮中各种原料的比例进行精确计算，不过她对于调整饲料结构带来的饲料成本节约和奶牛产量上升表示认可。参加培训的负责人杨炽松也认为技术项目提供的实用的养殖方式是他们迫切需要的^[122]。

技术项目历时两年，共举办 3 期培训班，培训 100 多名养殖户，辐射带动周边养殖户 400 余人；编制低碳养殖材料 4 套，发放数量 1200 余份^[122]，促进了洱源县奶牛低碳养殖的实践。

² 信息来自专家访谈

3.3.4 低碳畜牧养殖实践的驱动因素与展望

地方政策支持促进饲料技术的推广：内蒙古和云南均出台了一系列促进草食畜牧业可持续发展的政策。自2006年起，内蒙古制定并持续修订《内蒙古自治区饲料和饲料添加剂管理办法》，为生产、经营和使用益生菌等饲料添加剂提供了依据。《内蒙古自治区农牧业产业发展资金使用管理实施细则》^[128]为饲料添加剂的安全监管、检测提供资金支持，促进饲料添加剂产业的健康发展。《云南“十四五”畜牧业高质量发展实施意见》^[129]《云南省加快奶牛产业高质量发展三年行动方案（2023—2025年）》^[130]中，云南省提出大力发展奶牛“全株玉米青贮+苜蓿干草”高效饲喂技术，以及支持大理州等地建设高产优质饲草基地。洱源县也积极制定出台了《关于加快乳业高质量发展的意见》，积极向省州争取“粮改饲”项目支持，大力推广全株玉米青贮技术和牧草种植^[131]。2024年12月出台的《云南省甲烷排放控制实施方案》也提出推广低蛋白日粮、全株青贮等技术，并实施精准饲喂。

多方合作提升牧民的饲料科学调配能力：在西乌旗，服务中心近两年来联合内蒙古农科院、内蒙古财经大学等高校，分管畜牧业的政府部门、科协等单位，当地股份经济合作社和牧户代表等一线牧民，以及保险公司等企业，举办了多场牧区应对气候变化主题的交流培训会，提升牧民对气候变化的认识并提升应对能力。邀请内蒙古农业大学的畜牧营养专家讲解科学调配草料，帮助牧民掌握了科学养殖技术^[132]。相似地，洱源县也有FAO和中国农科院等机构为当地动物卫生监督所、畜牧兽医站的工作人员和牧民代表举行能力建设活动，参加培训的学员提到其通过培训认识到添加青贮玉米等奶牛低碳养殖技术在保护生态环境的同时提高了奶牛的生产性能，降低了养殖成本，为农民带来了显著的经济效益。

农业补贴助力饲料技术的落地：内蒙古自治区发布《推进奶业振兴若干政策措施》^[133]《内蒙古自治区2021—2023年农机购置与应用补贴机具种类范围》^[134]《内蒙古自治区2024—2026年农机购置与应用补贴实施方案》^[135]等政策，对不同容量的全混合日粮制备机进行补贴，自治区在中央财政补贴的基础上额外提供约为中央财政补贴额1/3的补贴。此外，受访专家提到制备全混合日粮能够获得每吨200元的补贴。云南省也出台了《云南省2024—2026年农机购置与应用补贴实施方案》^[136]，对重点机具的补贴比例提升至35%，高性能青饲料收获机单机最高补贴15万元。对于全株青贮玉米、黑麦草、饲用燕麦等优质饲草料收储，每吨给予不高于60元补助^[137]。在调研中，养殖户指出云南省确实有相关补贴，但其2023年购置的秸秆利用机具的补贴尚未完全收到，农业补贴的发放存在一定滞后问题。

青贮饲料进一步推广仍需更多支持：云南省饲草饲料工作站的分析指出，近年来受雨季前气候干旱和牲畜存栏量增加的影响，全省饲草料供需不平衡，2023年饲草料理论缺口达1300余万吨^[138]。在地方层面的主管部门对饲草产业于农业发展的重要性认识和投入不足，一定程度导致饲草行业资金不足、产业基础薄弱和机械化水平滞后，致使青贮玉米、苜蓿、燕麦等优质饲料收储不及时^[37]。为进一步推广青贮饲料，仍需扩大优质饲草料种植面积，完善收储运等基础设施，加大对青贮饲料生产的补贴力度。

加快推进乡村人才振兴，提高牧民养殖和经营能力：乡村振兴的关键在于本土人才的培养。“十四五”初期，我国印发《关于加快推进乡村人才振兴的意见》^[139]，在国家政策的引导和支持下内蒙古也出台了一系列政策，乡村人才队伍建设不断加强，但仍存在一些问题，包括农业科技人才、致富带头人不足、人才政策落实经费缺乏、基层人才培养专项资金投入不足等^[140]。服务中心的专家在与项目组沟通过程中提到，牧区发展缺少产业发展人才和思路，需要加快对村集体经济合作社的带头人的培养。内蒙古财经大学已与内蒙古多地的合作社开展交流活动^[141]，展望未来，应继续深化高校和牧区的合作，例如定期联合高校与社区共同举办能力建设活动，促进牧民对饲料营养技术、合作社经营等能力的提升。

3.4 种养结合的循环农业

3.4.1 种养结合与绿色循环农业

我国是全球农业废弃物产生量最多的国家之一。据统计，2019 年我国产生了近 40 亿吨农业废弃物，超过全球总量的 19%，其中，畜禽粪污和农作物秸秆为主要贡献者，产生量分别达到 30.5 亿吨和 8.7 亿吨^[142]。这些农业废弃物若不进行资源化利用或无害化处理，可能会造成严重的乡村环境污染问题，并加剧温室气体排放。对此，种养结合技术将畜禽养殖产生的粪污作为种植业肥源、利用种植业为养殖业提供饲料^[143]，展现出消纳大量农业废弃物、减轻环境领域衍生问题的巨大潜力。目前，秸秆饲料化利用、畜禽粪肥还田以及稻渔综合种养等常见的种养结合实践形式在我国得到了广泛应用。

应用种养结合技术可以实现农业废弃物减量和资源循环，进而减轻环境污染、减少温室气体排放和提高农业资源利用效率，有助于促进我国农业的绿色低碳发展。

一方面，农业废弃物是造成我国农业面源污染的主要原因之一。具体来说，未经处理的畜禽粪污在流入水体后易造成水体富营养化、水质恶化，灌入田地后可能导致土壤板结和盐渍化^[144]，而秸秆不加约束的随意露天燃烧会加剧颗粒物污染^[145]。种养结合技术可以通过将畜禽粪污肥料化、秸秆饲料化等手段减少污染源，2021 年《农业面源污染治理与监督指导实施方案》将其列为深入推进的农业面源污染防治的重要手段。据统计，当前我国畜禽粪污综合利用率达 78%^[146]，秸秆饲料化利用率约为 20.7%^[147]。

另一方面，畜禽粪便管理是农业温室气体排放的重要来源，其排放约占我国农业温室气体排放量的 18%^[42]。而在实践种养结合技术将畜禽粪便转化为粪肥等资源循环利用时，可以采取多种手段兼顾减排效益。例如，好氧堆肥过程中通过翻堆和强制通风可以减少甲烷和氧化亚氮排放；在猪粪堆肥中添加生物炭，甲烷和氧化亚氮排放会分别下降 19% 和 37.5%^[148]。此外，研究指出，稻渔综合种养的形式对于稻田减排还有额外的效益。例如，稻虾共作较常规稻作的氧化亚氮排放减少 56%^[149]，并可以依靠小龙虾钻洞增加土壤含氧量、嚼食枯叶或杂草之类有机残体等方式降低甲烷排放^[150]。

此外，种养结合技术还可以强化资源的有效利用，推进农业循环经济发展，帮助农民减少成本投入、实现增收。秸秆和畜禽粪污通过肥料化、饲料化等方式加以利用，可以形成“资源 - 产品 - 再生资源 - 产品”的循环经济链条。例如，1 吨干秸秆的养分相当于 50-60 公斤化肥、可以替代 0.25 吨粮食饲料；1 吨粪便的养分含量大约相当于 20-30 公斤化肥^[151]。同时，稻渔综合种养可以实现水产动物和水稻间氮素^[152]、有机质等资源的互补，显著减少农户在农药化肥领域的投入，而渔业更高的经济性还可以帮助农户扩大收入。与水稻单作相比，稻鲤、稻虾、稻蟹、稻鳖、稻鳊这 5 种稻渔共作模式平均能减少约 34% 的氮肥投入和 60% 农药投入，平均增加经济产出 168%^[153]。

得益于在环境 and 经济领域的显著效益，种养结合技术在我国推广迅速。我国出台了多项政策大力支持地方因地制宜发展种养结合产业，相关企业、农户也开展了多样化的种养结合模式探索。

3.4.2 种养结合推广的政策背景

2015 年至 2024 年，我国有 6 份一号文件直接提出要推广种养结合模式、发展生态循环农业。在涉及农业可持续发展的政策中，如《全国农业可持续发展规划（2015—2030 年）》《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》等，将种养结合列为了农业绿色发展的一项重要技术。2024 年底发布的《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》，强调了畜禽粪肥还田利用、秸秆饲料化利用等综合种养模式在促进废弃物资源化利用方面的重要作用。

对于畜禽粪肥还田这类种养结合模式，2021 年，中央财政宣布支持北京、上海、黑龙江、江西、河南等 17 个省份开展相关试点工作，以推进粪肥就地就近还田利用为重点，对专业化服务主体粪污收集处理、粪肥施用到田等服务予以适当补奖支持；同年发布的《“十四五”全国畜禽粪肥利用种养结合建设规划》支持畜牧大省、粮食和蔬菜主产区、生态保护重点区域的 299 个县（农场），整县开展粪肥就地消纳、就近还田试点。这些政策促进

了畜禽粪肥还田模式在我国多地的农业实践中落地开花，截至 2023 年，我国粪肥还田面积达到 3.7 亿亩次^[154]。

对于秸秆饲料化利用模式，相关政策多将之与其他秸秆综合利用技术一起推广。《关于做好 2022 年农作物秸秆综合利用工作的通知》中指出，要推进秸秆变饲料养畜，减少粮食消耗，提升秸秆在种养循环中的纽带作用，壮大秸秆养畜产业。2023 年的《做好农作物秸秆综合利用工作的通知》对河北、山西、内蒙古等 26 个省份下达了开展秸秆养畜、形成有效利用模式的任务要求。

而对于稻渔综合种养这一模式，《关于推进稻渔综合种养产业高质量发展的指导意见》、《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》指出，我国将稳步提升稻渔综合种养地区粮食生产能力，到 2030 年稻渔综合种养面积稳定在 5000 万亩左右，到 2035 年实现稻渔综合种养的高质量发展格局。截至 2023 年，全国稻渔综合种养面积已达到 4490 万亩，稻谷和各类水产品产量分别约为 2250 万吨和 417 万吨^[154]。

3.4.3 种养结合的江西实践

江西省是我国的农业大省。在种植业方面，江西省是我国 13 个粮食主产区之一，全省粮食产量连续常年稳定在 2150 万吨以上^[155]；在畜牧业方面，江西省是我国生猪产能大省和调出大省。2024 年，全省生猪出栏 3143.6 万头^[156]，常年外调生猪 800 万头左右，位居全国前列。为支持稻米、畜牧、水产等农业产业发展，“十四五”期间，江西省出台了《江西省农业七大产业高质量发展三年行动方案（2023-2025 年）》，指出要打造生猪优势产区，加快发展稻米品牌，加快稻虾、稻渔综合种养模式的创新与推广等目标。南昌市作为江西省省会城市，位于江西省中部偏北、东北方濒临鄱阳湖。鄱阳湖平原中心的优越地理、气候条件使其成为江西水稻的主产区之一。近几年来，南昌市年出栏生猪均超过 200 万头，具备一定规模，其下的进贤县、南昌县等是主产地^[157]。

江西省国营恒湖垦殖场——稻渔综合种养

江西省国营恒湖垦殖场位于南昌市东北郊的鄱阳湖畔，垦殖场内有大面积低洼田地，年年面临水淹困扰，只能种植一季水稻^[158]。为了提高耕地产出、改善承包农户的经济收入情况，垦殖场从 2016 年起开始探索“稻 +”的综合种养方式，并形成了水稻种植和小龙虾养殖相结合的产业模式，至 2024 年稻虾轮作面积已近 5 万亩。

图 11 恒湖垦殖场的稻虾综合种养模式



来源：项目组拍摄

目前，恒湖垦殖场主要采取两种稻虾轮作模式。在有环沟的稻田内，每年 6 月到 10 月，农户们会在农田里种植晚稻，收割后可以在田内上水，依靠新投放的种虾或生活在环沟内的种虾繁育虾苗、开展养殖；而在没有挖掘环沟的田块中，一般会在第二年 3 月上水形成平养塘，并移入垦殖场自繁的虾苗，直到水稻季的来临。通过这两种模式，恒湖垦殖场成为了江西省集中连片规模最大的小龙虾生产基地，2022 年，垦殖场实现年产稻谷 8000 万斤、小龙虾 1000 万斤、附属产品（黄鳝、泥鳅、甲鱼、杂鱼等）140 余万斤，养殖户每户

增收 6.5 万元 / 年（不包括附属产品）^[158]。

与此同时，种养结合模式降低了稻田对化肥的需求量，帮助恒湖垦殖场兼顾了减排效益。因为小龙虾养殖过程中产生的粪便会为水稻种植提供大量有机物，垦殖场在水稻种植期间对于化肥的需求降低，根据项目组调研时收集到的数据，恒湖垦殖场在这种模式下每亩稻田大约只需要施用底肥 30 斤，追肥 10 余斤。并且，为了维持小龙虾的存活率，垦殖场在种植时会尽量避开氮肥的施用，以缓释复合肥取而代之。研究指出，推行缓释肥、长效肥料可减少单位面积农田氧化亚氮 50%-70%^[159]。除此以外，本着低碳高效的原则，垦殖场还采取了一系列其他具有减排、增产效益的手段。例如，进行水稻干湿交替灌溉以增强水稻的抗倒伏性和实行减排；在田埂种植大豆等固氮作物；晚稻秸秆离田腐熟处理后还田等。

江西省南昌牧原农牧有限公司——畜禽粪污还田

南昌牧原农牧有限公司是全国生猪养殖龙头企业牧原食品股份有限公司的子公司。项目组调研的南昌牧原二场位于南昌市南昌县广福镇，年生猪存栏量 4 万头，出栏量约 10 万头，生猪每日产粪量能达到 400-500 吨。对于这些粪污的处理上，牧原二场一直在进行粪肥就近还田的实践。

牧原二场首先会将其固液分离，干粪进行持续 2、3 天至半个月不等的好氧堆肥，随后作为固体有机肥进行销

售，而液体部分则会在沼气池进行厌氧发酵。牧原二场会将这一过程所产生的沼气发电供给到自己的饲料厂，而处理后的沼液会作为液体有机肥，经由牧原二场铺设的管道，免费提供给周边的农户。通过实施这项举措，牧原二场能够帮助农户将化肥使用减少到原来的 80% 左右、实现每亩地 200-300 元的增收。

图 12 南昌牧原二场的干粪处理设施



来源：项目组拍摄

3.4.4 种养结合的主要驱动和推广前景

政策支持：江西省在其《“十四五”农业农村现代化规划》中提出要充分挖掘低洼田、冷浆田、内涝田等宜渔稻田潜力，亩产“百斤鱼（虾、蟹）、千斤粮、万元田”的要求，推进稻渔综合种养高质量发展；要实施畜禽粪污资源化利用整县推进和绿色种养循环农业试点项目。2024 年，江西省为 12 个绿色种养循环农业试点项目县提供了 1.2 亿元项目资金^[160]。此外，针对稻渔综合种养，《江西省“十四五”渔业渔政发展规划》指出，要创新集成推广稻虾等“七大”稻渔综合种养技术模式；建立稻渔综合种养技术体系、生产体系、营销体系和配套服务体系；实现全省稻渔综合种养面积达 350 万亩。对于畜禽粪污，《江西省人民政府办公厅关于加快推进畜牧业高质量发展的意见》要求促进粪肥就近就地还田利用；至 2030 年，畜禽粪污综合利用率保持在 80% 以上。

技术支撑：2023 年，我国首个稻渔种养领域国家标准《稻渔综合种养通用技术要求》发布，明确了水稻和水产产量，化肥、农药、饲料等投入量，以及沟坑设置等系列技术指标，例如，平原地区单季稻产量每亩不低于 500 千克，单位面积化肥、农药使用量比水稻单作平均减少 30% 以上等^[161]。该技术要求有利于改善技术理论不足、重渔轻稻等现象，为我国稻渔综合种养高质量发展提供了科学技术支撑。

多方参与和农业社会化服务：农业社会化服务通过政府公共服务体系、企业、高校和其他社会力量为农业生产提供物资、技术、信息、金融等服务^[162]，是衔接小农户和现代农业的基本途径。调研中，两种种养结合模式的发展正得益于多方参与的农业社会化服务。

恒湖垦殖场与众多社会化服务组织广泛合作，破解了农户面临的技术、生产、销售等难题。例如，在技术问题上，恒湖垦殖场在最初探索稻虾轮作时，因缺乏技术面临亏损状况。对此，垦殖场在江西省农业农村厅农垦局等单位支持下向武汉百汇生物科技有限公司购买了技术支持，后又在该公司和江西农业大学等的支持下，针对农户开展了系列培训^[163]。在生产问题上，恒湖垦殖场南昌市供恒农业开发有限公司成立了服务中心，为农户提供代耕、代插、代割等“九代”服务^[158]。在销售渠道上，垦殖场联合南昌市水产大市场设立恒湖小龙虾专售点，减少了中间交易环节^[158]。南昌牧原二场拓展了多种社会化服务，承担了惠农、环保、减排等社会责任。除了免费提供液体有机肥外，牧原二场还会向周边农户推广测土配方施肥。公司每年会在养殖场周边农场进行土壤取样，并将样本送往实验室检测。同时，养殖场工作人员会逐一与农户沟通，介绍合适的施肥时间和施肥量。

多种途径加强种养结合能力建设：由于稻渔等综合种养技术难度大，在农户缺乏相关种养殖经验的情况下，初期可能面临较多问题与挑战。对此，基层农技推广机构应加强与种养殖户的沟通，组织相关的技术培训班、现场教学和示范活动；同时，垦殖场、集体经济和合作社也可以考虑采购社会化服务，针对性地解决生产技术难题。

培育市场力量解决种养结合的销售和投资问题：尽管稻渔综合种养的经济收益相较于传统的水稻种植要明显提升，但稻渔共作的产品仍可能在市场衔接环节面临问题。例如，相较往年，2024 年的小龙虾供应不断增加，但市场相对遇冷，导致小龙虾市场价格大幅下降，可能给农户造成一定经济损失。对此，垦殖场、集体经济和合作社可以结合市场情况拓展与地方特色产业的合作，探索更多“稻+”形式；可以通过统一品种、管理和服务，建立集体品牌，对接销售渠道；可以发展深加工，地方机构还可以支持稻渔产业与休闲观光旅游等第三产业相结合。除此以外，有条件的地方机构加强政策支持绿色低碳农产品的认证工作，同时，当地科研机构帮助种养养殖户评估稻渔综合种养的生态效益，将有助于产品获得更高的市场认可度，增加农户经济收益。

而对于推进养殖企业、养殖户的畜禽粪污还田，完善资金支持将是推广该实践的最有利支撑。目前，畜禽粪污的处置工程建设成本较高，所形成的有机肥盈利空间有限，导致养殖场缺乏建设处置工程的能力和动力。对此，安排专项补贴资金、开发温室气体自愿减排方法学等，将强化社会资本在该领域的投入。



3.5 生物炭助力农业废弃物利用

3.5.1 生物炭与耕地保育和减排固碳

土壤资源数量和质量是制约我国农业发展的重要因素之一。调查显示，截至 2019 年，我国人均耕地面积仅 1.36 亩，不足世界平均水平的 40%；且总体耕地质量不高，平均质量等级仅为 4.76 等，平均有机碳含量低于世界均值 30% 以上^[164]，低质量耕地占比达到 22%^[165]。与此同时，我国耕地还在面临多重退化挑战：退化耕地占据总耕地面积 40% 以上，土壤 pH 值平均相比 80 年代下降 0.5 个单位^[166]，耕地点位超标率达到 19.4%、重金属和有机污染物影响严重^[167]。

针对我国耕地土壤所面临的严峻挑战，《全国农业可持续发展规划（2015-2030 年）》中提出支持利用“生物炭改良土壤”。生物炭是由生物质在低氧或缺氧条件下高温裂解形成的物质，其单独或作为添加剂合理施用于农田时可以实现改善土壤质量、治理土壤污染和减排温室气体等功能^[168]。

通过生物炭改良土壤、治理污染，有利于实现耕地保育。在土壤改良领域，由于生物炭本身的理化性质，其合理施用可以实现增加土壤肥力，增大土壤孔隙度、含水量，平衡土壤酸碱性等功能。具体而言，生物炭的全碳含量大多在 30%-90% 之间^[169]，施入土壤后可以提升土壤肥力；生物炭的多孔隙使其具有较大比表面积和较小容重，有利于增加土壤孔隙度、含水量^[169,170]，生物炭中的钾、钠、钙、镁等盐基离子使其 pH 值一般呈碱性^[171,172]，可以改善因过度施肥造成的盐基离子流失和土壤酸化。而在污染治理方面，生物炭可以降低土壤中铜、镍、锌等重金属的生物有效性^[173,174]，吸附多环芳烃、多氯联苯等有机污染物^[169]。

此外，值得重视的是，通过改善耕地土壤健康状况，生物炭可能可以间接促进作物产量增加。有研究指出，生物炭施用可增加中国农田土壤有机碳储量 1.9 Pg C，提高作物产量 19%^[175]。

生物炭属于负碳技术，它的合理利用可以推进农业减排固碳，在应对气候变化领域发挥重要作用。在生产过程中，生物质中的有机碳经过高温裂解被转化为生物炭中结构稳定、不易分解的惰性碳，能封存长达数百至上千年^[176]，固碳潜力巨大。并且在特定条件下，生物炭还具有减少其他非二氧化碳温室气体排放的潜力：通过增加土壤孔隙度、形成好氧环境，施用生物炭能够减少一定甲烷排放；通过减少氮肥需求、调控微生物活性，施用生物炭可以减少氧化亚氮的生成^[177]。Woolf 的研究指出，全球范围内，可持续施用生物炭每年最高可减排 18 亿吨二氧化碳当量的温室气体^[178]，Lehmann 等人则提出，全球生物炭系统可减排量达到 34-63 亿吨二氧化碳当量^[179]。在中国，研究认为，在考虑可持续发展目标的情况下，生物炭的负排放潜力每年最大可达到 9.2 亿吨二氧化碳^[180]。

在农业可持续发展与应对气候变化的背景下，国家和地方对于生物炭的关注不断增加。一方面，国家陆续出台多项文件强化对生物炭技术的支持和推介；另一方面，多个科研团队和企业也在尝试将生物炭技术与地方特色产业结合，以帮助农户解决生产过程中面临的部分问题。

3.5.2 生物炭推广的政策背景

在生物炭具体的利用模式方面，相关政策主要鼓励开展秸秆生物炭基肥方向的探索。生物炭基肥是指以生物炭为载体与传统肥料复合而成的新型缓释肥料^[181]，其在施入土壤时能延缓肥料养分释放，减少肥料损失^[182]。2017 年，农业农村部发布的《关于推介发布秸秆农用十大模式的通知》纳入了以生物炭为介质生产炭基肥料的“秸-炭-肥”模式。2020 年，秸秆炭基肥利用增效技术当选农业农村部十大引领性技术，并在辽宁省、云南省、吉林省和河南省等地进行集成示范与推广。次年，秸秆炭化还田减排固碳技术当选重大引领性技术。此外，《秸秆综合利用目录（2021）》《农业农村减排固碳实施方案》等多份文件也都将探索秸秆炭基肥生产技术列为了秸秆肥料化利用的重要技术，并鼓励推动秸秆资源转化为碳基产品。

3.5.3 生物炭技术的具体探索

辽宁省岫岩满族自治县

辽宁省是我国粮食主产省，2023 年全省粮食产量达到了 2563 万吨左右，且单产比全国平均水平高 22%^[183]。辽宁省的产粮优势与其省内丰富的黑土地资源密切相关，据统计，辽宁省黑土区面积约 2800 万亩，占全省耕地面积的 37.8%^[184]。因此，辽宁省多年始终坚持加强耕地和黑土地保护，先后出台了《辽宁省黑土地保护规划(2021-2030 年)》《辽宁省黑土地保护实施方案(2021-2025 年)》、《辽宁省高标准农田建设规划(2021-2030 年)》等多份政策文件。岫岩满族自治县隶属于辽宁鞍山市，位于辽东半岛北部，区域内多山地，种植业生产适宜面积相对较小。

生物炭基肥技术入选成为十大引领性技术，得益于辽宁省前期进行的试点探索。早在十年前，辽宁省生物炭工程技术研发中心就选择了岫岩县等地开展生物炭试点。据当年的数据显示，包括岫岩县在内的超 30000 亩试点土地在施用生物炭基肥后，实现了水稻平均增产 8%、玉米增产 7.55%、花生和马铃薯平均增产 9.44% 和 8.5%；并且，通过秸秆综合利用、生物炭材料销售、炭基产品应用等活动，还可实现农民增收 328.28 万元，二氧化碳减排 3078.8 吨^[185]。近几年来，当地企业的生物炭基肥技术越发成熟，探索出了适用于玉米、水稻等不同作物的专用炭基肥。《农民日报》对岫岩等试点县村民的采访显示，在施用炭基肥后，玉米地土壤的板结现象有所好转，化肥用量相比以往也出现了减少；对比临近地块，施用生物炭的田地玉米长势更好，生物炭在保墒、增产方面的优势突出^[186]。

内蒙古兴安盟

内蒙古作为粮食生产大区，年农作物秸秆产生量高达 5000 万吨，位列全国第五^[187]。而位于内蒙古东北部的兴安盟，是我国玉米优势产区 and 重要农畜产品基地，年秸秆产量近 1500 万吨^[188]，秸秆露天无序焚烧曾一度给当地造成空气污染的困扰^[189]。

为解决秸秆废弃物问题，兴安盟决定大力发展秸秆饲料化、肥料化等综合利用产业，其中，在生物炭产业领域，兴安盟引入了爱放牧生物质新材料有限公司，不仅助力了当地农业向绿色转型，还为当地经济发展做出了一定贡献：爱放牧生物质新材料有限公司利用秸秆中低温厌氧快速炭化分离技术，每年可消耗秸秆量近 30 万吨，生产炭基缓释复合肥约 9 万吨，实现年销售收入超 2 亿元，新增就业岗位 160 余个^[190]。

3.5.4 生物炭技术发展的主要驱动因素与前景

技术和产业支撑：总体而言，生物炭的发展仍处于起步阶段，但相比其他国家，我国的技术和产业发展均走在世界前列。在技术开发领域，我国学者发表的关于生物炭的 SCI 论文占比接近 50%^[191]，国家生物炭研究院、农业农村部生物炭与土壤改良重点实验室以及部分省级生物炭技术研究中心的成立，为生物炭技术发展和推广提供了重要平台。例如，辽宁省生物炭工程技术研究中心起草的生物炭基肥料农业行业标准、生物炭基肥料田间试验标准等，推动了技术的标准体系建设；河南省生物炭工程技术研究中心研制的生物炭基肥在河南、湖南、山东、福建等全国 16 个植烟省区示范推广，累计推广面积超过 524 万亩^[192]。在产业化方面，我国制炭设备和工艺流程相对成熟，成本可以低至国外同类产品的 15%^[193]。2022 年，我国生物炭产量和需求量分别在 3.61 万吨和 3.49 万吨左右，市场价格约 2750 元每吨^[194]。但值得注意的是，尽管相比于国外，我国的生物炭展现出价格优势，然而作为固碳产品，其价格依旧较高，不利于产品进一步市场化推广。

多方参与：基层治理机构、科研机构和企业间的合作对生物炭技术的推广发挥了重要作用。在辽宁省，金和福农业科技股份有限公司根据沈阳农业大学陈温福院士的建议，采取了“分散制炭、集中制肥”的运作模式，即在乡镇设立生物炭厂，企业深入田间地头收集秸秆制造生物炭；在县内合作设立炭基肥厂，通过生物炭厂为其供给原料；同时，当地农户可以用秸秆换取炭基肥。这种模式降低了秸秆的回收成本，加速了生物炭基肥的推广速度，目前与金和福公司合作建立的炭基肥生产工厂已经达到了 15 家^[195,196]。

在内蒙古兴安盟，生物炭产业发展与当地的扶贫工作形成紧密连结。爱放牧集团、科右前旗扶贫办和合作社共同出资建设了 5 家村级秸秆造粒扶贫车间，企业通过车间以每吨 600 元的价格回收秸秆颗粒，车间将 2% 的利润投向扶贫专项基金，用于精准脱贫。此外，爱放牧集团还与 32 个村合作，开展“百村千户一秸秆换炭肥”行动，向 584 户贫困户赠送了近 38 吨肥料^[188]。

为促进生物炭技术的推广，仍需进一步深化生物炭基础研究：由于生物炭的原料、制备过程、土壤的基本情况等都会影响生物炭施用的效果，不同研究对生物炭促进作物增产、减少甲烷或氧化亚氮排放等效用仍存在争议。例如，相关研究认为，在玉米苗期施入生物炭会在一定程度上抑制玉米的生长^[177]、在稻田中施入生物炭可能会增加有机物或微生物活性，进而导致甲烷排放增加等^[177]。并且，大量、长期施用生物炭可能导致新的环境风险，因为生物炭的制备过程可能会富集部分重金属污染物、生成多环芳烃等有机污染物，并在施入土壤后影响环境^[198]。因此，还需要对生物炭的作用机制进行更深入研究、确定其最有效、安全的制备和施用方式。并且，在未来的技术推广过程中，各地的科研机构、基层农技推广机构需因地制宜，研究更适合本地土壤情况的生物炭类型，为农户提供相应指导。

强化对生物炭技术的政策规范的重视：首先，当前我国尚缺乏针对生物炭产品的统一质量评价标准，将不利于生物炭产业长期的健康发展。因此，需加快出台国家层面的生物炭基肥技术规范和质量评价标准，并依据此加强针对生物炭基肥企业的产品质量约束。其次，生物炭基肥仍属于新兴产业，有限的社会认知度也阻碍了其进一步发展。对于这一现状，未来可以考虑将生物炭基肥纳入新型肥料推广目录或政府耕地保护项目等^[193]，推动更多农业从业者了解生物炭基肥产品和技术。

加强对生物炭技术的激励与扶持：我国生物炭及炭基肥产业处于起步阶段，行业内以中小型企业为主、资金相对缺乏，较高的价格使得市场需求也较为有限，我国 2022 年的生物炭需求仅在 3.5 万吨左右^[194]。面对现状，加强激励与扶持将有助于加速推进产业和技术发展，帮助实现生物炭产品成本下降、市场扩大，促进产业发展逐步进入良性循环。对此，可以通过设立专项资金、给予生物炭生产设备相应购置补贴等方式扶持企业发展。另外，考虑到生物炭在固碳减排上的卓越性能，可以推动关于生物炭技术的温室气体自愿减排方法学开发，激励行业与市场扩张。有研究认为，纳入自愿碳市场的生物炭项目可实现项目利润增加 2.4%、生物炭价格下降 40.2%^[199]。但在开发方法学的同时，也应留意其所可能带来的可持续领域负面影响，即可能导致部分企业对最大生物量作物的盲目追求^[200,201]，进而影响农作物的正常生产并导致更多农业废弃物产生。



4. 推广农食系统绿色低碳地方实践的建议

4.1 加强政策支持和跨部门协同

我国农食系统的绿色低碳转型离不开政策支持，“十三五”时期以来，我国陆续出台了包括化肥农药减量增效行动、农业废弃物资源化利用、农业面源污染防治等在内的多项措施，在减少农业污染的同时减少了碳排放。在此基础上，“十四五”时期中央和地方出台了更多针对农业绿色发展、农村现代化和乡村振兴的政策，促进农食系统绿色低碳的地方实践落地。例如，云南省《“十四五”农业农村现代化发展规划》《2022年云南省杂交水稻旱作技术指导意见》等政策对种植模式、品种选育和播种施肥的操作进行引导，大力促进水稻旱种；《江西省农业七大产业高质量发展三年行动方案（2023-2025年）》加快稻虾、稻渔综合种养模式的创新与推广。在生产环节外，政策支持对消费者行为改变也至关重要，未来有条件的地方应加强政策支持绿色低碳农产品的认证工作，通过碳标签、农业产品生态价值实现等手段进一步引导消费者。

我国农食系统绿色低碳实践的进一步落地和推广仍需要加强相关政策支持。《2024—2026年农机购置与应用补贴实施意见》将包括电动农机在内的重点机具补贴比例由30%提高到35%，然而与同马力的燃油拖拉机5-6万的价格相比，电动拖拉机的价格大约在25万左右，价格与传统拖拉机相比并不具备优势，未来推广仍需政策支持来进一步促进产业规模化发展、降低价格。

此外，农食系统绿色低碳转型需要加强跨部门见的协同。目前，我国食物系统的决策主体部门多元且相互独立，缺乏农食系统多元目标和多主体决策的联合联动^[32]，因此亟需制定综合性的农食系统碳中和战略，并推动各利益相关方的参与。例如，长期以来我国农业农村部的职权范围更多关注农业生产领域，未来可考虑协调其与市场监督管理总局、卫生健康委等部门的关系，制定包含食物分配、消费等各环节的综合减排战略。

4.2 促进绿色低碳农食系统技术创新

技术创新是我国农食系统转型的强大驱动力。“十三五”时期，《农机装备发展行动方案（2016—2025）》《关于加快农业机械化和装备产业转型升级的指导意见》等政策明确将清洁燃料与新能源农机列为重点发展主机产品，并提出支持绿色高效农机技术的推广示范，促进我国绿色高效农机技术的发展和推广。然而我国电动农机起步较晚，多数农机电动化技术还处于批量和示范运营阶段。目前的应用主要集中在微小型电动农业设备上，例如电动割草机、微耕机、植保无人机等。针对农机行业规模最大的拖拉机，电动拖拉机的研发正在加速。不过大功率农业机械电动化受电池技术限制，仍需要突破更多技术壁垒。

此外，我国“大国小农”的国情农情是农机技术研发不能忽略的现实背景，因此电动农机技术的创新应注重适应小农户的实际需求，例如开发适用于小农田、适用于不同地形、价格低廉、易于操作的农机。数字化、智能化的发展趋势，也是农机技术的创新绕不开的话题。未来的农机技术创新也应该结合数字化和智能化，例如通过传感器采集农田数据，结合大数据分析技术为农户提供农田管理和等方面的决策支持^[202]。

生物炭的发展和推广也离不开技术的进展和突破。技术研究层面，国家生物炭研究院、农业农村部生物炭与土壤改良重点实验室以及部分省级生物炭技术研究中心的成立，为生物炭技术发展和推广提供了重要基础。得益于研究基础和政策对生物炭技术的示范推广，我国生物炭的产业化发展较为成熟，成本可以低至国外同类产品的15%，市场价格与复合肥价格基本持平，大大降低了农食系统实践者使用生物炭的成本。然而，我国生物炭产业未来仍需要对生物炭的作用机制进行更深入研究，探索出更加有效、安全的制备技术和施用方式，避免生物炭的使用带来环境污染和温室气体排放。

4.3 增加资金支持，促进商业模式创新

我国农食系统绿色低碳实践的进一步推广，需要增加对绿色低碳生产技术和行为的资金支持。对处在示范运营阶段的技术给予研发支持和补贴，能够促进技术的快速发展、普及和相关成本的下降。以电动拖拉机为例，其成本仍是相同马力柴油拖拉机的 5 倍左右，这主要是由于农机作业的特性对电池的功率特性提出了更高的要求。参考日、德、法等发达国家的经验，若能在农机补贴的比例方面向电动农机倾斜、提供低息贷款等普惠金融支持^[202]，将能够进一步鼓励农户购买电动农机。对于农业生产者层面的绿色低碳生产行为也应给予相应的补贴。例如，对采用间歇灌溉、种养结合等低碳措施进行补贴，为农户提供减排的经济激励。在内蒙古和云南的奶牛养殖案例中也可以看到，地方政府针对混合饲料和青贮饲料制备的补贴有助于低碳养殖技术的进一步落地。

除了补贴之外，还可以利用市场机制为农食系统绿色低碳转型提供资金支持。集体经济和合作社可以通过开展深加工或者建立集体品牌的方式来提升初级农产品的附加值，提升绿色低碳农产品的市场价值。以气候友好水稻和稻虾综合种养为例，此类农产品的生态价值尚未获得广泛的市场认可，对农户来说难以形成较高的经济收益。寨子村依托村集体经济成立农业公司并打造“兴寨子”商标，在 2024 年底推出了生态种植的稻米、小麦、菜籽油和手工腊肉礼盒，在简阳本地和网络平台大受欢迎^[64]。恒湖垦殖场旗下的农业公司也建立了精米加工生产线、小龙虾集中交易市场、冷库和加工厂，提升了水稻和小龙虾的附加值和规模化加工，同时通过冷冻错峰销售提升了养殖户的收益。

此外，地方政府、研究机构还可以为集体经济和合作社的生态农产品经济和生态效益的核算提供支持，将生态农产品与碳足迹、绿色有机等认证相结合，将有助于反映农产品的真正价值，提升消费者的认识和接受度。

通过社会化服务的商业模式创新，也有助于农食系统绿色低碳实践的推广。电动农机的所有者可以通过提供社会化服务的模式，给农户或合作社提供农机委托作业或农机租赁服务，在促进乡村振兴的同时推动农食系统绿色低碳发展，还大大提升了电动农机的利用效率。垦殖场向科技公司购买技术支持，帮助农户掌握稻虾综合种养技术，减排的同时实现增收。南昌牧原二场也拓展了多种社会化服务，如免费提供液体有机肥、向周边农户推广测土配方施肥技术，承担了惠农、环保、减排等社会责任。

4.4 推进农食系统实践者能力建设

加强对农食系统实践者的能力建设是农食系统绿色低碳转型的重要保障。在气候友好水稻案例和反刍动物日粮营养调控案例中，基层农技站和畜牧兽医站的工作人员与分别与地方专业机构、高校、国际组织等合作，发挥绿色低碳技术“说明书”的作用，帮助农户、牧户实现相关技术的落地。因此，应大力支持基层农技推广站、畜牧兽医站和农业综合服务中心的工作，定期举办关于绿色低碳农业生产能力提升的培训班、工作坊等形式的活动，鼓励通过试验田和对照组的形式直观展示绿色低碳种养殖方式。此外，相关的能力建设活动需要尽可能邀请地方社会组织和研究机构，一方面有利于长期持续地开展能力建设，另一方面可以借助在地组织对当地农户、牧户的了解，有助于将政策语言和专业技术转换成实践。

其次，也应关注农户对气候变化的认识和应对气候变化的能力建设。农户对于气候变化感知是其采取适应策略的重要前提，然而研究显示农户的了解和认知可能存在不足^[203]，因此各类机构在倡导和推动农食系统绿色低碳转型时，应注重对采用农户熟悉的语言来对气候变化与农业生产的关系的进行介绍，提高农户对采取必要措施应对气候变化的认识。

4.5 完善农食系统基础设施建设

随着农业农村部《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》的实施，进一步加强农田等基础设施建设，包括水利设施、排涝系统等，提升农田对气候变化和极端天气下的应对能力，对于农业生产稳定性将起到重要作用，完善的农田水利设施对于实施交替灌溉等稻田节水灌溉技术。类似地，政策还提出加强秸秆收储和利用、推进秸秆饲料化利用的措施，鼓励专业化生产服务组织收储加工生产饲料产品。秸秆收储运等基础设施的完善，将为青贮饲料、饲料添加剂等绿色低碳牲畜养殖实践的推广提供良好的基础。

在农食系统产业链层面，加强农产品收储运和加工环节的基础设施建设，实施农产品仓储保鲜冷链物流建设工程，减少农产品流通过程的损失和浪费。据有关机构估算，每年损失浪费的食物超过 22.7%，若能减少一半的损失，相当于 1.9 亿人一年的食物^[204]。农食系统全产业链减损有利于保障粮食安全、减少食物浪费，同时可以降低因处理有机废弃物带来的能源消耗和甲烷排放^[205]。

此外，电动农机发展也需要有完善的充电基础设施和新型微电力系统。随着我国新能源汽车下乡的推进和相应充电设施的加速布局，农村地区充电桩等基础设施将进一步完善。如果能够统一电动农机和电动汽车充电的标准和接口，将可以促进农机电动化技术进一步扩展，并提高充电基础设施的利用率。此外，探索电动农机一源多用（用能、储能和供能）的技术路径，并且建立基于新能源电动农机的源网荷储一体化的新型微电力系统不仅可以消纳农村的新能源，也将可以为其他农业生产提供电力支持^[82]。

4.6 推动多方参与和国际合作

农食系统涉及多个领域和部门，其绿色低碳转型离不开多方参与。协会等社会组织、高校通过与政府合作，能够促进各项绿色低碳种养殖技术的标准化与流程化，例如全国水产技术推广总站联合多个地方水产技术推广总站和高校起草国家标准计划《稻渔综合种养通用技术要求》。促进农业社会化服务供应商和政府部门之间的合作，有利于绿色低碳实践的推广，例如安徽省亳州市当地农机合作社与村委会签订托管协议，由农机合作社组织和提供农机服务，可以降低农户的成本，同时也可以增加农机使用效率和农机手的收入。促进在地社会组织和政府部门、高校之间的合作，有利于精准传播绿色低碳农业技术，提升农户的绿色低碳种植养殖能力。内蒙古西乌珠穆沁旗牧区信息中心便是通过与本地高校和分管畜牧业的政府部门合作，邀请牧民和集体经济合作社共同参与交流培训会，来提升牧民采取绿色低碳养殖技术和应对气候变化的能力。

加强国际合作也可以促进绿色低碳农食系统技术的实践转化。FAO 与中国农业科学院饲料研究所在云南大理州洱源县开展的技术合作项目“云南喀斯特生态系统奶牛低碳养殖”起到了良好的示范作用。云南省农业农村厅相关负责人表示，今后云南省将继续加强与 FAO 的合作，推动畜牧业及相关产业绿色转型和农业高质量发展^[122]。农业农村部国家合作司相关负责人也展望道，“洱源县的奶牛养殖提供了国际化视野和本地化实践方案，提升了家庭养殖户的生产能力与韧性，彰显了中国在全球农业发展中的责任与担当。希望各方积极合作，围绕气候变化、粮食安全、绿色农业发展等全球议题，贡献更多中国智慧和方案。”^[122] 未来，面对复杂的国际形势和市场条件，我国在立足本土的基础上也可以通过此类项目合作形式，积极参与全球农食系统治理体系的建设^[206]。



参考文献

- [1] NGUYEN H. Sustainable food systems: Concept and framework[R/OL]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b620989c-407b-4caf-a152-f790f55fec71/content>.
- [2] NILES M, ESQUIVEL J, AHUJA R, 等. Climate Change & Food Systems: Assessing Impacts and Opportunities[R/OL]. Meridian Institute, 2017: 55. <https://merid.org/wp-content/uploads/2019/07/CC-FS-Final-Report-November-2017.pdf>.
- [3] CRIPPA M, SOLAZZO E, GUIZZARDI D, 等. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions | Nature Food[EB/OL]. [2025-05-16]. <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00225-9>.
- [4] COSTA C, WOLLENBERG E, BENITEZ M, 等. Roadmap for achieving net-zero emissions in global food systems by 2050[J/OL]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 15064. DOI:10.1038/s41598-022-18601-1.
- [5] 陈美安, 胡敏, 杨鹏, 等. 农食系统与碳中和: 中国农业与食物相关温室气体减排路径分析 [R/OL]. 北京: 绿色创新发展研究院, 2022: 18. <https://www.igdp.cn/wp-content/uploads/2022/12/2022-11-22-IGDP-Working-Paper-CN-Chinas-Agri-food-System-and-Carbon-Neutrality.pdf>.
- [6] 韦璐. 张福锁院士: 农业绿色低碳转型任重道远, 技术优化与创新成关键驱动力 [EB/OL]. (2025-04-21)[2025-05-16]. <https://www.cenews.com.cn/news.html?aid=1240774>.
- [7] 陈美安. NDC 系列简报: 中国氧化亚氮减排努力与前景展望 [R/OL]. 北京: 绿色创新发展研究院, 2024: 13. <https://ccnt.igdp.cn/zh/insights>.
- [8] 仇相玮, 胡继连. 我国农药使用量增长的驱动因素分解: 基于种植结构调整的视角 [J/OL]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(3): 325-333. DOI:10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0487.
- [9] 周怀宗. 我国高效节水灌溉面积达 4.1 亿亩 [EB/OL]. (2024-09-15)[2025-05-16]. <https://m.bjnews.com.cn/detail/1726358539168389.html>.
- [10] 翟家齐, 王秀青, 张舰, 等. 节水措施对碳排放影响及节水低碳目标实施路径浅议 [J]. 中国水利, 2023(19): 47-51.
- [11] 牛坤玉, 葛若昊, 陈美安, 等. 双碳目标下中国农食系统温室排放结构、发展趋势及国际比较 [J]. 中国农业科学, 2024, 57(21): 4290-4307.
- [12] FAO. Greenhouse gas emissions from agrifood systems. Global, regional and country trends, 2000-2022[EB/OL]. (2024-11-14)[2025-05-16]. <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/greenhouse-gas-emissions-from-agrifood-systems.-global--regional-and-country-trends--2000-2022/en>.
- [13] RUGGERI LADERCHI, C., LOTZE-CAMPEN, H., DECLERCK, F., 等. The Economics of the Food System Transformation[R/OL]. Food System Economics Commission, 2024: 117. https://foodsystemeconomics.org/wp-content/uploads/FSEC-Global_Policy_Report.pdf.
- [14] 农业农村部. 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知 [A/OL]. (2017-11-29)[2025-05-21]. http://www.moa.gov.cn/nybg/b/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm.
- [15] 韩明会, 李保国, 张丹, 等. 再生农业——基于土地保护性利用的可持续农业 [J/OL]. 中国农业科学, 2021, 54(5): 1003-1016. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2021.05.012.
- [16] SUTTON, WILLIAM R., LOTSCH, ALEXANDER, PRASANN, ASHESH. Recipe for a Livable Planet: Achieving Net Zero Emissions in the Agrifood System[R/OL]. The World Bank Group, 2024. <https://hdl.handle.net/10986/41468>.
- [17] 樊胜根, 高海秀, 冯晓龙, 等. 农食系统转型与乡村振兴 [J]. 华南农业大学学报 (社会科学版), 21(1): 1-8.
- [18] 周亚楠. 农食系统能为生物多样性保护做什么? 这场高级别总结交流论坛找答案! [N/OL]. 中国环境报, 2023-10-12[2025-05-21]. <https://res.cenews.com.cn/h5/news.html?id=1088504>.
- [19] FAO. 粮食和农业的未来: 转型的驱动力量和诱导因素 [M/OL]. 粮农组织, 2023[2025-05-21]. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc1024zh>.
- [20] 邵丹青, 张静依, 何晓贝, 等. 金融支持中国农食系统气候转型: 迈向净零、气候韧性与社会公正的未来 [R/OL]. (2024-10). https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-10/cbi_undp_chi_agrifood_cn_02b1.pdf.
- [21] CHARLES O'MALLEY, HENRIETTE FRILING. Navigating Complexity in Food Systems: From Clockwork To Cloudwork[R/OL]. United Nations Development Programme, 2024: 69[2025-05-21]. <https://www.undp.org/foodsystems/publications/navigating-complexity-food-systems-clockwork-cloudwork>.
- [22] LEEUWIS C, BOOGAARD B K, ATTA-KRAH K. How food systems change (or not): governance implications for system transformation processes[J/OL]. Food Security, 2021, 13: 761-780. DOI:10.1007/s12571-021-01178-4.
- [23] 于法稳. 新时代农业绿色发展动因、核心及对策研究 [J]. 中国农村经济, 2018, 2018(5): 19-34.
- [24] 雷明. 低碳农业: 发展现代农业的关键一环 [J/OL]. 可持续发展经济导刊, [2025], 2024(12)[2025-05-21]. http://www.sdg-china.net/NewsList/info_itemid_70777.html.

- [25] FAO, IFAD, UNICEF, 等. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023[M/OL]. 2023[2025-05-24]. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc3017en>.
- [26] FAO. Science, Technology and Innovation[EB/OL]. [2025-05-24]. <https://www.fao.org/science-technology-and-innovation/technology/en>.
- [27] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3534-3641.
- [28] 陈沛雯, 杨虹, 宁可. 政府激励、社会化服务对特色林产品绿色生产技术采纳的影响研究[J/OL]. 云南农业大学学报(社会科学), 2025, 19(0): 1-9. DOI:10.12371/j.ynau(s).202503037.
- [29] 陈阜, 尹小刚, 姜上川. 中国气候智慧型农业从政策到投资[M/OL]. 罗马: FAO, 2023[2025-05-24]. <http://www.fao.org/documents/card/zh/c/cc2200zh>. DOI:10.4060/cc2200zh.
- [30] 农业农村部. 农业农村部: 设立有机肥推广激励专项资金和出台有机肥施用补贴政策[EB/OL]. (2020-09-30)[2025-05-24]. <http://www.gdsnjx.com/pub/detail/1795>.
- [31] 牛志明. 联合国新倡议: 农食系统可持续转型, 关键在农民[N/OL]. 中国日报, 2023-02-13[2025-05-24]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202302/13/WS63ea128da3102ada8b22ed49.html>.
- [32] 樊胜根, 孟婷. 新形势下中国农食系统转型的理论构建与政策路径[J/OL]. 学习与探索, 2024, 5. <https://link.cnki.net/urlid/23.1049.C.20240510.0839.002>.
- [33] 陈美安, 胡敏, 杨鹏, 等. 农食系统与碳中和: 中国农业与食物相关温室气体减排路径分析报告[R]. 北京: 绿色创新发展研究院, 2023: 48.
- [34] 澎湃新闻. 中国是全球水稻产销第一大国, “十三五”育种都有哪些突破?[EB/OL]. (2021-01-15)[2025-05-25]. https://m.thepaper.cn/kuaibao_detail.jsp?contid=10803799&from=kuaibao.
- [35] 国家统计局. 国家统计局关于 2024 年粮食产量数据的公告[EB/OL]. (2024-12-13)[2025-05-25]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202412/t20241213_1957744.html.
- [36] CHEN S, GONG B. Response and adaptation of agriculture to climate change: Evidence from China[J/OL]. Journal of Development Economics, 2021, 148: 102557. DOI:10.1016/j.jdeveco.2020.102557.
- [37] 湖南省农业农村厅. 持续高温干旱天气对水稻生产的影响及应对措施[EB/OL]. (2022-08-17)[2025-05-25]. https://agri.hunan.gov.cn/agri/xxgk/yjgl/202208/t20220817_27584853.html.
- [38] SONG Y, WANG C, LINDERHOLM H W, 等. The negative impact of increasing temperatures on rice yields in southern China[J/OL]. Science of The Total Environment, 2022, 820: 153262. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.153262.
- [39] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 2022 年我国水稻产业发展分析及 2023 年展望[J/OL]. 中国稻米, 2023, 29(2): 1-4. DOI:10.3969/j.issn.1006-8082.2023.02.001.
- [40] 央视网. 黑龙江五常: 灾后大米生产重启 洪灾将致新米减产 存粮可保市场稳定[EB/OL]. (2023-08-29)[2025-05-25]. <https://news.cctv.com/2023/08/29/ARTI4N2PUf1AdH6DXyi836yq230829.shtml>.
- [41] 晋浩天. 我国科学家揭示极端降水对水稻产量影响与机制[EB/OL]. (2023-05-14)[2025-05-25]. https://www.cas.cn/kj/202305/t20230515_4887219.shtml.
- [42] 生态环境部. 中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告[R]. UNFCCC, 2024: 307.
- [43] 朱若淼. 不卖农药化肥的农技培训长什么样?[EB/OL]. (2024-06-06)[2025-05-25]. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_27609910.
- [44] 夏志坚. 稻田甲烷减排: 中国水稻种植正在发生的变化[EB/OL]. (2023-02-08)[2025-05-25]. <https://dialogue.earth/zh/5/96736/>.
- [55] 王成栋. 四川设立全国首家冬水田研究院[EB/OL]. (2021-09-08)[2025-05-16]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202109/t20210908_6375954.htm.
- [56] 于文静, 王立彬. 依法合规科学利用好“坡耕地”——全国农技中心、耕地质量中心负责人就“水稻上山”等话题答记者问[EB/OL]. (2023-06-24)[2025-05-16]. https://www.news.cn/fortune/2023-06/24/c_1129714224.htm.
- [57] 云南省农业技术推广总站. 云南省农业技术推广总站 2023 年度部门决算[EB/OL]. (2024-08-28)[2025-05-16]. https://nync.yn.gov.cn/html/2024/caizhenggongkai_0828/1414488.html?cid=3029.
- [58] 云南省科技厅. 云南澜沧探索水稻旱作种植模式[EB/OL]. (2023-06-08)[2025-05-16]. https://kjt.yn.gov.cn/html/2023/meitijujiao_0608/7297.html.
- [59] 张天磊. “水稻旱作”在永州试验成功 平均亩产可望超 400 公斤[EB/OL]. (2023-11-06)[2025-05-16]. <https://caijing.chinadaily.com.cn/a/202311/06/WS6548807ea310d5acd876d7b8.html>.
- [60] 泉州市农业农村局, 惠安县政府办. 泉州市召开旱稻种植示范推广现场会 更多旱坡地变成“米粮仓”线[EB/OL]. (2023-08-23)[2025-05-16]. https://www.quanzhou.gov.cn/zfb/xxgk/zfxgkzl/qzdt/qzyw/202308/t20230823_2924569.htm.
- [61] 海南日报. 琼海旱作水稻首次在晚稻时期试种成功[EB/OL]. (2024-08-28)[2025-05-16]. <https://www.hainan.gov.cn/hainan/sxian/202408/b3743975fabf408198eabe7e25fef894.shtml>.
- [62] 安路蒙. 内蒙古兴安盟首次大规模种植旱作水稻[EB/OL]. (2020-05-05)[2025-05-16]. https://www.xinhuanet.com/politics/2020-05/05/c_1125944519.htm.

- [63] 乌天宇. 惠州旱地水稻丰产丰收! 产量不输传统水田 [EB/OL]. (2023-11-08)[2025-05-16]. <https://static.nfapp.southcn.com/content/202311/08/c8276417.html>.
- [64] 宋林. 简阳人冬日标配! 那一口地道的“寨子腊肉”, 太香了吧! [EB/OL]. (2024-12-10)[2025-05-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s/lh3Y7ykD8yRD01ZCYlgrMQ>.
- [65] 蔡保忠, 王秀秀, 史芳, 等. 我国农业绿色补贴的环境效应、效果评价与政策优化 [J/OL]. 农业现代化研究, 2023, 44(4): 567-574. DOI:10.13872/j.1000-0275.2023.0055.
- [66] 王斌, 蔡岸冬, 宋春燕, 等. 稻田甲烷减排: 技术、挑战与策略 [J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(10): 10-19.
- [67] 孙眉, 沈大军. 建立健全农业生态产品价值实现机制, 对现阶段农业农村发展有着怎样的意义? [EB/OL]. (2025-03-29)[2025-05-16]. <https://see.ruc.edu.cn/kxyj/mtsd/e65a729a48c0413788c73c299c200c3a.htm>.
- [68] 国家统计局. 国家数据 [DS/OL]. (2025)[2025-05-25]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [69] 付胜南, 郎珺荷. 跑出农业机械化的加速度 [N/OL]. 经济日报, 2024-07-04[2025-05-25]. http://www.moa.gov.cn/ztlz/ymksn/jjrbbd/202407/t20240704_6458374.htm.
- [70] FAO. FAOSTAT [DS/OL]. (2025)[2025-05-25]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/Gt>.
- [71] 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.
- [72] WOLFFE M C, WILD O, LONG S P, 等. Temporal variability in the impacts of particulate matter on crop yields on the North China Plain [J/OL]. Science of The Total Environment, 2021, 776: 145135. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.145135.
- [73] ZHUANG M, WANG X, YANG Y, 等. Agricultural machinery could contribute 20% of total carbon and air pollutant emissions by 2050 and compromise carbon neutrality targets in China [J/OL]. Nature Food, 2025: 1-10. DOI:10.1038/s43016-025-01163-6.
- [74] 吕卓阳. 农业机械行业深度报告 [R/OL]. 华鑫证券, 2024: 52. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202403311629187369_1.pdf.
- [75] 农业部办公厅, 财政部办公厅. 农业部办公厅 财政部办公厅关于印发《2018—2020 年农机购置补贴实施指导意见》的通知 [A/OL]. (2018-03-20)[2025-05-25]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2018/201803/201805/t20180528_6143198.htm.
- [76] 农业农村部, 国家发展改革委, 科技部, 等. 农业农村部 国家发展改革委 科技部 自然资源部 生态环境部 国家林草局关于印发《“十四五”全国农业绿色发展规划》的通知: 农规发〔2021〕8 号 [A/OL]. (2021-08-23)[2025-05-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/07/content_5635867.htm.
- [77] 农业农村部办公厅, 财政部办公厅. 农业农村部办公厅 财政部办公厅关于印发《2024—2026 年农机购置与应用补贴实施意见》的通知: 农办机〔2024〕3 号 [A/OL]. (2024-04-30)[2025-05-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6955539.htm.
- [78] 大气环境管理司. 《<非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第三、四阶段)>(GB 20891-2014)修改单》及《非道路柴油移动机械污染物排放控制技术要求》(HJ1014-2020)的解读 [EB/OL]. (2021-01-04)[2025-05-25]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202101/t20210104_816001.shtml.
- [79] 农业农村部办公厅, 财政部办公厅, 商务部办公厅. 农业农村部办公厅 财政部办公厅 商务部办公厅关于印发《农业机械报废更新补贴实施指导意见》的通知: 农办机〔2020〕2 号 [A/OL]. (2020-03-03)[2025-05-25]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/NYJXHGLS/202003/t20200302_6338034.htm.
- [80] 郁静娴. 以旧换新进行时: 更多种类农机纳入报废更新补贴范围 [N/OL]. 人民日报, 2024-07-18[2025-05-25]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963355.htm.
- [81] 国务院. 国务院关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见: 国发〔2018〕42 号 [A/OL]. (2018-12-21)[2025-05-25]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2018-12/29/content_5353308.htm.
- [82] 王杰, 张学敏, 张波, 等. 电动农机发展现状与趋势 [J/OL]. 中国农机化学报, 2019, 40(10): 35-41. DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.10.08.
- [83] 贾承谧, 王祎才, 杨正. 双碳目标下农业机械发展趋势探究 [J/OL]. 机械研究与应用, 2024, 37(2): 182-186. DOI:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.02.048.
- [84] 柳琪. 千亿级赛道即将开启, 谁将是农机版的比亚迪? [EB/OL]. (2024-03-18)[2025-05-25]. <http://vcearth.com/p/N2VjMzU0YzlxNWJlMjdIMzIiY2QyNmQ2Zjc2N2M5NmE=>.
- [85] 田宜龙, 陈辉. 5G+ 氢燃料电动拖拉机在河南亮相 [N/OL]. 河南日报, 2020-06-18[2025-05-25]. http://iot.china.com.cn/content/2020-06/18/content_41190201.html.
- [86] 柳琪. 国家队混动拖拉机下线, 国产拖拉机提前进入电动时代 [EB/OL]. (2022-08-01)[2025-05-25]. <https://m.jiemian.com/article/7840604.html>.
- [87] 冯正睿, 赵岚. 电动农机技术优势分析及未来工作建议 [EB/OL]. (2022-12-04)[2025-05-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Ovehk1t4xm6KAkjuujmzEQ>.
- [88] 中科原动力. 开创电拖新时代 | 中科原动力发布全球最大马力智能电动拖拉机 [EB/OL]. (2024-10-30)[2025-05-26]. <https://www.aiforcetech.com/newsinfo/7702379.html>.
- [89] 中科原动力. 加速农业现代化! 中科原动力首批电动农机下田! [EB/OL]. (2025-01-03)[2025-05-26]. <https://www.aiforcetech.com/newsinfo/7919111.html>.

- [90] 杨印生, 韦鑫. 低碳农业机械化的发展逻辑、影响因素与实现路径 [J/OL]. 智慧农业, 2023, 5(4): 150. DOI:10.12133/j.smartag.SA202304008.
- [91] 蔡键, 刘文勇. 社会分工、成本分摊与农机作业服务产业的出现——以冀豫鲁三省农业机械化发展为例 [J]. 江西财经大学学报, 2017, 0(04): 83-92.
- [92] 陈战志. 大力推行农机作业托管服务 搭建小农户与现代农业发展衔接新途径 [J]. 中国农机监理, 2019(5): 32-34.
- [93] 农机化司. 安徽亳州推行农机作业“网格化”托管创新小农户与现代农业对接新途径 [EB/OL]. (2019-06-28)[2025-05-27]. http://www.njhs.moa.gov.cn/nyjxhqk/201906/t20190628_6319898.htm.
- [94] 刘恋. 电“亮”未来 小岗村的智慧新生活 [EB/OL]. (2022-12-09)[2025-05-27]. <http://ah.people.com.cn/n2/2022/1209/c374164-40225788.html>.
- [95] 杨丹丹. 电动农机“唱主角”种地更有“科技范” [EB/OL]. (2024-06-14)[2025-05-27]. <https://www.farmer.com.cn/2024/06/14/99956904.html>.
- [96] 宋裕民, 高琦, 许宁, 等. 新能源智能农机装备发展现状和趋势 [J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(1): 1-6.
- [97] 农机新闻网. 深壹度: 电动农机很难吗? 有企业卖了 5000 台! [EB/OL]. (2024-05-21)[2025-05-27]. <https://www.nongji1958.com/node/73357>.
- [98] 胡春雨, 沈春雷, 唐莎莎, 等. 新能源电动农机一源多用创新供能赋能农网农机融合发展 基于全国 536 份调查问卷分析 [J]. 农业工程, 14(2): 61-72.
- [99] 耿宁, 潘佳燕. 农业生产托管如何影响农户绿色技术采纳? [J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(4): 210-220.
- [100] 胡敏, 梁红, 陈美安, 等. 甲烷减排: 碳中和新焦点 [R]. 北京: 北京绿色金融与可持续发展研究院, 2022: 40.
- [101] 胡红莲, 卢德勋, 高民. 反刍动物甲烷的排放及其减排调控技术 [J/OL]. 畜牧与饲料科学, 2011, 32(9): 26. DOI:10.12160/j.issn.1672-5190.2011.09.012.
- [102] 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/OL]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 732-742. DOI:10.11654/jaes.2020-0105.
- [103] 刘忠宽, 刘振宇, 李江, 等. 中国青贮饲料产业发展现状分析 [J/OL]. 草学, 2020, 1: 70-75. DOI:10.3969/j.issn.2096-3971.2020.01.013.
- [104] 随县农业农村局. 什么是青贮饲料? 青贮饲料有哪些好处? [EB/OL]. (2024-07-24)[2025-05-27]. http://www.zgsuixian.gov.cn/jcxcxgk/bmxcxgk/xyncj/fdzdgnr_15756/qtzdgk_56111/hyq_56117/202407/t20240724_1239855.shtml.
- [105] 内蒙古农牧厅. 玉米青贮饲料的优点 [EB/OL]. (2024-07-23)[2025-05-27]. https://mp.weixin.qq.com/s/ebzIDaKi_fU7Jqw4uAPKpw.
- [106] 高尕, 石红梅, 刘汉丽, 等. 益生菌对反刍动物生产及降低甲烷排放的研究进展 [J]. 中国牛业科学, 2022, 48(2): 67-72.
- [107] 李忠秋, 刘春龙. 青贮饲料的营养价值及其在反刍动物生产中的应用 [J/OL]. 家畜生态学报, 2010, 31(3): 95-98. DOI:10.3969/j.issn.1673-1182.2010.03.021.
- [108] 罗朝淑, 衣晓峰, 杨宝峰. 加大新型饲料添加剂的研发力度 [N/OL]. 科技日报 [2025-05-27]. https://www.stdaily.com/web/fangtan/2024-08/08/content_212187.html.
- [109] WANG M, WANG R, XIE T Y, 等. Shifts in Rumen Fermentation and Microbiota Are Associated with Dissolved Ruminant Hydrogen Concentrations in Lactating Dairy Cows Fed Different Types of Carbohydrates [J/OL]. The Journal of Nutrition, 2016, 146(9): 1714-1721. DOI:10.3945/jn.116.232462.
- [110] 《玉米秸秆饲料化应用指南》起草小组. 农业行业标准《玉米秸秆饲料化应用指南》(征求意见稿) 编制说明 [S/OL]. (2023-03). <http://www.reea.agri.cn/ststny/202303/P020230320516391519038.pdf>.
- [111] GUEDES C M, GONÇALVES D, RODRIGUES M A M, 等. Effects of a *Saccharomyces cerevisiae* yeast on ruminal fermentation and fibre degradation of maize silages in cows [J/OL]. Animal Feed Science and Technology, 2008, 145(1): 27-40. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2007.06.037.
- [112] 钟瑾, 郭旭生, 邵涛, 等. 草产品加工及利用的生物学基础及研究进展 [J]. 中国科学基金, 2024, 38(4): 668-676.
- [113] HRISTOV A N. Invited review: Advances in nutrition and feed additives to mitigate enteric methane emissions [J/OL]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(7): 4129-4146. DOI:10.3168/jds.2023-24440.
- [114] 岳林芳, 成立新, 李蕴华, 等. 益生菌在反刍动物生产中应用的研究进展 [J/OL]. 畜牧与饲料科学, 2019, 40(9): 54-62. DOI:10.12160/j.issn.1672-5190.2019.09.011.
- [115] 晏国政. 农业部: 积极稳妥推进粮改饲发展草食畜牧业试点工作 [EB/OL]. (2015-09-01)[2025-05-27]. https://www.gov.cn/xinwen/2015-09/01/content_2923173.htm.
- [116] 智研咨询. 青贮饲料产业百科 [EB/OL]. (2024)[2025-05-27]. <https://www.chyxx.com/wiki/1185986.html>.
- [117] 李云平. 农业农村部支持内蒙古加快建设国家重要农畜产品生产基地 [EB/OL]. (2024-01-05)[2025-05-27]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/ymksn/xhsbd/202401/t20240105_6444098.htm.
- [118] 西乌旗. 西乌珠穆沁旗概况 [EB/OL]. (2025-01-03)[2025-05-27]. <https://www.xwq.gov.cn/xwzmqq/xwfy/qxgk/dqgk/2022061410463962848/index.html>.
- [119] 哈丽娜. 拆除牧场网围栏 内蒙古牧民过上“共享生活” [EB/OL]. (2020-06-17)[2025-05-27]. https://www.xinhuanet.com/politics/2020-06/17/c_1126124971.htm.

- [120] 谢艺观. 民生调查局 | 价格创近 5 年同期最低, 牛羊肉为何便宜了? [EB/OL]. (2024-06-04)[2025-05-27]. <https://www.chinanews.com.cn/cj/2024/06-04/10228314.shtml>.
- [121] 余健. 肉牛产业如何破局——来自内蒙古自治区的调查 [EB/OL]. (2024-09-19)[2025-05-27]. <https://www.news.cn/food/20240919/e74bd33d5c4a444f9ffb6fea9d0161df/c.html>.
- [122] 尤星宇, 霍春悦. 绿色低碳, 开启畜牧养殖新未来 [EB/OL]. (2025-02-25)[2025-05-27]. <https://mp.weixin.qq.com/s/xRgiJtcDORtgNBZYRgLD5g>.
- [123] 施新弟. 洱源: 牛乳飘香致富路 [EB/OL]. (2023-02-20)[2025-05-27]. https://www.dalidaily.com/content/2023-02/20/content_43187.html.
- [124] 刘艺晨. 奶价连跌三年, 乳业是否已至“黎明前夜”? [EB/OL]. (2025-02-07)[2025-05-27]. <https://wallstreetcn.com/articles/3740571>.
- [125] 乔金亮. 畜牧业“增产不增收”如何破解 [N/OL]. 经济日报, 2024-06-11[2025-05-27]. http://www.moa.gov.cn/ztlz/ymksn/jjrbbd/202406/t20240611_6456937.htm.
- [126] 施春美, 角根琴, 陈中秀. 洱源县奶牛产后代谢病调查与原因分析 [J/OL]. 中国乳业, 2021, 0(2): 38-40. DOI:10.12377/1671-4393.21.02.11.
- [127] 雷少斐. “坐月子”难题, “包饺子”解决——过瘤胃技术服务奶牛超百万头 [EB/OL]. (2022-03-14)[2025-05-27]. <https://www.farmer.com.cn/2022/03/14/99890610.html>.
- [128] 赤峰财政. 一图读懂 | 《内蒙古自治区农牧业产业发展资金使用管理实施细则》_来源_财政 [EB/OL]. (2024-07)[2025-05-27]. https://www.sohu.com/a/www.sohu.com/a/795753378_121106854.
- [129] 云南省人民政府. 云南省农业农村厅关于印发云南“十四五”畜牧业高质量发展实施意见的通知 [A/OL]. (2022-03-02)[2025-05-27]. https://www.yn.gov.cn/zttg/ynghgkzl/sjqtgh/zxgh/202203/t20220314_238562.html.
- [130] 云南省农业农村厅. 中共云南省委农村工作领导小组办公室关于印发《云南省加快奶牛产业高质量发展三年行动方案(2023—2025年)》的通知: 云农办通〔2022〕22号 [A/OL]. (2022-10-12)[2025-05-27]. https://nync.yn.gov.cn/html/2022/zuixinwenjian_1012/391703.html.
- [131] 徐睿. 新形势下洱源县生鲜乳质量安全监管措施探讨 [J/OL]. 食品安全导刊, 2023: 10-12. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2023.06.002.
- [132] 西乌珠穆沁旗牧区信息服务中心. 西乌珠穆沁旗巴彦花镇巴彦温都嘎查股份经济合作社抗灾救灾基地启动会议暨社区气候变化应对能力建设 [EB/OL]. (2024-07-03)[2025-05-27]. https://mp.weixin.qq.com/s/l_B58VwZvVYwe1xAFxdGSA.
- [133] 内蒙古自治区人民政府. 内蒙古自治区人民政府办公厅关于印发推进奶业振兴若干政策措施的通知: 内政办发〔2019〕33号 [A/OL]. 2020: 5. <https://www.nmg.gov.cn/zwgk/zfxgk/zfxgkml/zzqzfbgtwj/202012/P020201208452708012391.pdf>.
- [134] 内蒙古自治区人民政府. 关于内蒙古自治区 2021—2023 年农机购置与应用补贴机具种类范围及补贴额一览表 (2023 年第一次修订) 的公示: 公告〔2023〕32 号 [A/OL]. (2023)[2025-05-27]. https://www.alszq.gov.cn/art/2023/8/17/art_3724_513011.html.
- [135] 内蒙古自治区人民政府. 内蒙古自治区推进奶产业高质量发展若干政策措施 [EB/OL]. (2023-09-27)[2025-05-27]. <https://www.dwq.gov.cn/dwq/zwgk/zfxgkzl/fdzdgnr/zdlyxx/zqsk/jsjf/2023100915221950929/index.html>.
- [136] 云南省农业农村厅. 云南省农业农村厅 云南省财政厅关于印发《云南省 2024—2026 年农机购置与应用补贴实施方案》的通知 [A/OL]. (2024-11-05)[2025-05-27]. https://nync.yn.gov.cn/html/2024/zuixinwenjian_1105/1415870.html.
- [137] 云南省农业农村厅. 云南省农业农村厅 云南省财政厅 中国人民银行云南省分行 国家金融监督管理总局云南监管局关于印发云南省推进肉牛产业加快发展若干措施的通知: 云农牧〔2024〕10 号 [A/OL]. (2024-10-31)[2025-05-27]. https://nync.yn.gov.cn/html/2024/zuixinwenjian_1030/1416630.html.
- [138] 杨琪梁, 赵一豪. 云南省 2023 年饲草生产形势分析_云南省农业农村厅 [EB/OL]. (2024-12-05)[2025-05-27]. https://nync.yn.gov.cn/html/2024/yunnongkuanxun-new_1205/1416402.html.
- [139] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 《关于加快推进乡村人才振兴的意见》: 2021 年第 7 号 [A/OL]. (2021-02-23)[2025-05-27]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5591402.htm.
- [140] 康媛璐. 为全面推进乡村振兴提供人才支撑 [EB/OL]. (2023-10-18)[2025-05-27]. http://www.legaldaily.com.cn/Village_ruled_by_law/content/2023-10/18/content_8915014.html.
- [141] 康晓虹. 内蒙古农牧区治理之乡村振兴经验交流座谈会在我校召开 [EB/OL]. (2024-05-17)[2025-05-27]. https://www.imufe.edu.cn/dwxcb_236/info/1051/22043.htm.
- [142] 经济日报. 加快推行农业清洁生产 [EB/OL]. (2023)[2025-05-27]. http://www.moa.gov.cn/ztlz/ymksn/jjrbbd/202304/t20230411_6425144.htm.
- [143] 农业农村部. 农业部关于印发《种养结合循环农业示范 工程建设规划(2017—2020 年)》的通知 [EB/OL]. (2017-09-20)[2025-05-27]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/djq/201802/t20180202_6136360.htm.
- [144] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1168-1176.
- [145] 唐建初, 燕惠民, 傅源. 农业产地环境污染危害、原因及其防治对策 [EB/OL]. (2005-06-16)[2025-05-27]. <https://sfnc.caas.cn/swsc/37673.htm>.

- [146] 杨舒. 我国农业绿色发展水平稳步提升 [EB/OL]. (2024-09-01)[2025-05-27]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content_6971692.htm.
- [147] 农业农村部科技司. 2024 年全国秸秆综合利用现场推进会召开 [EB/OL]. (2024-06-14)[2025-05-27]. http://www.kjss.moa.gov.cn/gzdt/202406/t20240614_6457216.htm.
- [148] 朱志平, 董红敏, 魏莎, 等. 中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(04): 743-748.
- [149] LIU S, HU Z, WU S, 等. Methane and Nitrous Oxide Emissions Reduced Following Conversion of Rice Paddies to Inland Crab-Fish Aquaculture in Southeast China[J/OL]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(2): 633-642. DOI:10.1021/acs.est.5b04343.
- [150] 赵考诚, 马军, 叶迎, 等. 稻虾生态种养综合效应研究进展 [J/OL]. 作物杂志, 2021, 37(2): 22-27. DOI:10.16035/j.issn.1001-7283.2021.02.003.
- [151] 农业农村部. 农业部关于印发《种养结合循环农业示范 工程建设规划 (2017—2020 年) 》的通知 [A/OL]. (2017-09-20)[2025-05-27]. http://www.moa.gov.cn/nybg/b/2017/djq/201802/t20180202_6136360.htm.
- [152] HU L, REN W, TANG J, 等. The productivity of traditional rice-fish co-culture can be increased without increasing nitrogen loss to the environment[J/OL]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 177: 28-34. DOI:10.1016/j.agee.2013.05.023.
- [153] 王晨, 胡亮亮, 唐建军, 等. 稻鱼种养型农场的特征与效应分析 [J]. 农业现代化研究, 2018, 39(5): 875-882.
- [154] 张辉. 加快推进农业产业发展绿色循环畅通 [EB/OL]. (2025-01-16)[2025-05-27]. http://www.jhs.moa.gov.cn/lfsz/202501/t20250116_6469216.htm.
- [155] 许国吟, 潘琳, 陈唯蓉, 等. 江西统计年鉴 2024[DS/OL]. [2025-05-27]. <https://tjj.jiangxi.gov.cn/resource/nj/2024CD/zk/indexch.htm>.
- [156] 江西省统计局. 解读: 2024 年全省农业数据 [EB/OL]. (2025-01-21)[2025-05-27]. https://www.jiangxi.gov.cn/jxsrnzf/sjjd/pc/content/content_1887872552976818176.html.
- [157] 南昌市统计局. 统计年鉴 [DS/OL]. (2023-12-21)[2025-05-27]. https://tjj.nc.gov.cn/ncstjj/tjnj/nav_list.shtml.
- [158] 杨明, 白红胜. 社会化服务农垦在行动 | “稻 +”综合种养 生态经济双丰收 [EB/OL]. (2023-10-20)[2025-05-27]. https://www.crnews.net/cy/nk/958477_20231020102235.html.
- [159] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273.
- [160] 定南县人民政府. 定南县获 2024 年度绿色种养循环农业试点项目 [EB/OL]. (2024-01-02)[2025-05-27]. <https://www.dingnan.gov.cn/dnxxxgk/dn382/202401/702064dc13f5494f9a769128cd660c59.shtml>.
- [161] 全国水产技术推广站, 中国水产协会. 首个稻渔领域国家标准《稻渔综合种养通用技术要求》发布 [EB/OL]. (2024-01-05)[2025-05-27]. http://www.nftec.agri.cn/tzgg/202401/t20240105_8598859.htm.
- [162] 高强, 孔祥智. 我国农业社会化服务体系演进轨迹与政策匹配: 1978~ 2013 年 [J]. 改革, 2013(4): 5-18.
- [163] 汪熹, 万多. 政府购买社会化服务 解江西“恒湖小龙虾”养殖难题 [N/OL]. 农民日报, 2023-08-24[2025-05-27]. <https://www.cfsn.cn/news/detail/97/9142.html?view=pc>.
- [164] 陈能场, 何小霞, 林大松. 时隔 40 年, 中国再次启动土壤普查意义重大 [EB/OL]. (2022-08-04). <https://dialogue.earth/zh/6/85136/>.
- [165] 金观平. 确保耕地质量提升落地见效 [N/OL]. 经济日报 [2025-05-27]. <http://theory.people.com.cn/n1/2024/1005/c40531-40333220.html>.
- [166] 彭新华. 多方发力治理退化耕地 [N/OL]. 经济日报, 2024-11-19[2025-05-27]. http://paper.ce.cn/pad/content/202411/19/content_304582.html.
- [167] 环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. [2025-05-27]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [168] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望 [J/OL]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417. DOI:10.11674/zwylf.14539.
- [169] 陈温福, 孟军, 韩晓日, 等. 沈阳农业大学国家生物炭研究院 [EB/OL]. (2018)[2025-05-27]. <http://biochar.cn/class/34>.
- [170] 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展 [J/OL]. 中国生态农业学报 (中英文), 2012, 20(8): 963-967. DOI:10.3724/SP.J.1011.2012.00963.
- [171] SINGH B, SINGH B P, COWIE A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment[J/OL]. Soil Research, 2010, 48(7): 516-525. DOI:10.1071/SR10058.
- [172] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展 [J]. 土壤与作物, 2021, 1(4): 219-226.
- [173] 李鸿博, 钟怡, 张昊楠, 等. 生物炭修复重金属污染农田土壤的机制及应用研究进展 [J/OL]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 173-185. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2020.13.021.
- [174] 王宏胜, 唐朝生, 巩学鹏, 等. 生物炭修复重金属污染土研究进展 [J/OL]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 1064-1077. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2017-360.

- [175] BO X, ZHANG Z, WANG J, 等. Benefits and limitations of biochar for climate-smart agriculture: a review and case study from China[J/OL]. Biochar, 2023, 5(1): 77. DOI:10.1007/s42773-023-00279-x.
- [176] LEHMANN J. A handful of carbon[J/OL]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144. DOI:10.1038/447143a.
- [177] 谢祖彬, 刘琦. 生物质炭的固碳减排与合理施用 [J/OL]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 901-907. DOI:10.11654/jaes.2020-0034.
- [178] WOOLF D, AMONETTE J E, STREET-PERROTT F A, 等. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J/OL]. Nature Communications, 2010, 1(1): 56. DOI:10.1038/ncomms1053.
- [179] LEHMANN J, COWIE A, MASIELLO C A, 等. Biochar in climate change mitigation[J/OL]. Nature Geoscience, 2021, 14(12): 883-892. DOI:10.1038/s41561-021-00852-8.
- [180] DENG X, TENG F, CHEN M, 等. Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China[J/OL]. Nature Communications, 2024, 15(1): 1085. DOI:10.1038/s41467-024-45314-y.
- [181] 李艳梅, 张兴昌, 廖上强, 等. 生物炭基肥增效技术与制备工艺研究进展分析 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 1-14.
- [182] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
- [183] 李越. 刚刚公布: 2563.4 万吨! 辽宁粮食产量创历史新高! [EB/OL]. (2023-12-11)[2025-05-28]. <https://nync.ln.gov.cn/nync/index/ywgl/scgl/zygl/2023121810595162873/index.shtml>.
- [184] 王金晶. “养好”耕地中的“大熊猫”——辽宁省政协加强黑土地保护专题协商会小记 [EB/OL]. (2022-06-13)[2025-05-28]. <http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2022/06/13/ART11655087425320336.shtml>.
- [185] 王辉. 铁岭: “生物炭”变“废”为宝 肥地力增效益 [EB/OL]. (2015-01-27)[2025-05-28]. <http://218.60.149.76/njw/details.aspx?catalogid=54&articleid=37602>.
- [186] 孙眉. 秸秆变“炭”遍地金 [N/OL]. 农民日报, 2022-01-22. https://szb.farmer.com.cn/2021/20210122/20210122_007/news-nmr-11729-20210122-m-007-300.pdf.
- [187] 薛来. 内蒙古农业面源污染治理成效显著 [EB/OL]. (2025-03-14)[2025-05-28]. <http://nmg.news.cn/20250314/c292542323fd4f9dae0d0722fd9b04d4/c.html>.
- [188] 罗霄. 内蒙古兴安盟秸秆综合利用调查: 隐形财富变真金白银 [N/OL]. 经济日报, 2018-11-20[2025-05-28]. https://www.ts.cn/xwzx/gnxw/201811/t20181120_6292160.shtml.
- [189] 李烨琳. 610 万吨 内蒙古兴安盟捡回了“另一半农业”[N/OL]. 内蒙古商报, 2024-02-06. <http://szb.nmgsb.com.cn/lmg/2024/2/p20240206b6190eae03234383bfba3d0a8eb16857.pdf>.
- [190] 胡日查, 高敏娜. “秸”尽所能照亮美丽乡村 [N/OL]. 内蒙古日报, 2018-05-26[2025-05-28]. http://grassland.china.com.cn/2018-05/26/content_40355079.htm.
- [191] 中国农业新闻网. 生物炭拓展秸秆还田新路径——辽宁推广生物炭技术促进秸秆肥料化利用见闻 [EB/OL]. [2025-05-28]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/201903/t20190314_6176112.htm.
- [192] 河南省生物炭工程技术研究中心. 河南省生物炭工程技术研究中心生物炭技术河南省工程实验室 [EB/OL]. [2025-05-28]. <http://www.hnbiochar.com/c/about/swt/>.
- [193] 于险峰, 李纯. 农民日报: 生物炭产业亟须政策扶一把 - 新闻网 [N/OL]. 农民日报, 2018-07-18[2025-05-28]. <https://news.syau.edu.cn/info/1010/10581.htm>.
- [194] 梁尧. 2023 年中国生物炭行业全景速览: 碳中和背景下行业迎来飞快发展机遇 [EB/OL]. (2024-02-17)[2025-05-28]. <https://www.chyxx.com/industry/1174239.html>.
- [195] 于险峰, 张仁军. 呵护国土健康规范产业发展——生物炭产业发展热下的冷思考 [N/OL]. 农民日报, 2019-03-21[2025-05-28]. <https://news.syau.edu.cn/info/1010/10516.htm>.
- [196] 中国农业新闻网. 生物炭拓展秸秆还田新路径——辽宁推广生物炭技术促进秸秆肥料化利用见闻 [EB/OL]. (2017-08-25)[2025-05-28]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/201903/t20190314_6176112.htm.
- [197] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响 [J/OL]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2713. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906(2010)11-2713-05.
- [198] 秦雅鑫, 李桂英, 安太成, 等. 生物炭环境应用过程中的生态和健康风险研究进展 [J/OL]. 科学通报, 2021, 66(1): 5-20. DOI:10.11654/jaes.2020-0034.
- [199] LI Y, LI L, SUN H, 等. Machine learning enhancing biochar abatement predictions: Advancing China climate goals for food production and promoting application[J/OL]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 218: 108248. DOI:10.1016/j.resconrec.2025.108248.
- [200] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 394-400.
- [201] ANJA CHALMIN. Growing concerns about Biochar safety and carbon markets - Geoengineering Monitor[EB/OL]. (2023-08-21)[2025-05-28]. <https://www.geoengineeringmonitor.org/growing-concerns-about-biochar-safety-and-carbon-markets>.
- [202] 魏涛, 金诚谦, 张宗毅. 以系统视角推进农机智能化——对话魏涛、金诚谦、张宗毅 [Z/OL]. (2024-05-23)[2025-05-28]. https://nyncw.cq.gov.cn/zwx_161/rdt/202405/t20240523_13231015_wap.html.

- [203] 祁新华, 杨颖, 金星星, 等. 农户对气候变化的感知与生计适应——基于中部与东部村庄的调查对比 [J/OL]. 生态学报, 2017, 37(1): 286-293. DOI:10.5846/stxb201608181683.
- [204] 《求是》. 习近平: 加快建设农业强国 推进农业农村现代化 [EB/OL]. (2023-03-15)[2025-05-28]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-03/15/content_5746861.htm.
- [205] 白雪. “100 个土豆仅 25 个上桌”, 剩下的去哪了? [N/OL]. 中国发展改革, 2025-05-11[2025-05-28]. https://mp.weixin.qq.com/s/k-ZiYwqS_CNFhdZIV_ZS_w.
- [206] 许聃. 樊胜根: 各国应该积极参与粮食安全合作 [N/OL]. 中国日报, 2024-08-23[2025-05-28]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202408/23/WS66c82ce9a310b35299d38259.html>.



©Unsplash

关于绿色创新发展研究院

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress), 简称: 研究院 (iGDP), 是专注绿色低碳发展的战略咨询平台, 2014 年成立于北京, 旨在成为具领先专业素养和独立影响力的国际化智库。研究院根植我国地方绿色低碳实践, 面向全球应对气候变化进程, 为决策者、投资者和社区提供具有国际视野和前瞻思考的解决方案及公益性知识产品。



关于 GAAP

绿色低碳农食系统实践者平台 (Green and Low-carbon Agri-food Actors Platform, GAAP) 由绿色创新发展研究院联合多家合作伙伴机构, 于 2024 年 7 月 1 日发起。平台由多领域、多地域的专家及机构共建, 分享农食系统应对气候变化的实践和政策进展、交流领域所面临的问题和挑战, 了解和探索不同的解决方案。发展至今, 汇聚了来自全国的二十余名专家。平台追踪农食领域传播热点话题, 在国内政策发布与实施的关键节点, 举办调研和交流活动, 以促进绿色低碳农食系统的良好实践的推广。



联系方式:

电话: 86-10-8532 3096

邮箱: igdpooffice@igdp.cn

网站: www.igdp.cn

地址: 中国北京市朝阳区秀水街 1 号建外外交公寓 6-2-62

