中国农业大学学报 2026,31(12):97-106
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

郭占斌,马本刚,沈秀丽,丛宏斌,刘欢,邵思,邢浩翰. 秸秆能源化利用碳足迹评价研究进展[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):97-106.
GUO Zhanbin, MA Bengang, SHEN Xiuli, CONG Hongbin, LIU Huan, SHAO Si, XING Haohan. Research progress on the carbon footprint of straw energy utilization[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 97-106.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.08

秸秆能源化利用碳足迹评价研究进展

郭占斌[1] 马本刚[1,2] 沈秀丽[2] 丛宏斌[2] 刘 欢[2] 邵 思[2] 邢浩翰[2*]

(1. 黑龙江八一农垦大学 工程学院,黑龙江 大庆 163319;
2. 农业农村部规划设计研究院/农业农村部农业废弃物能源化利用重点实验室,北京 100125)

摘 要 “双碳”目标下,农业减排需要精准可靠的碳排放核算方法体系支撑、秸秆能源化利用的减排效应也需要评估与量化。本研究采用碳足迹理论阐述与文献综述法,对秸秆厌氧发酵、热解气化、制燃料乙醇3种主流方式的核算方法与碳足迹特征开展研究。结果表明:秸秆厌氧发酵的核算多采用生命周期评价法与联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)方法核算,碳足迹多为负值,净温室气体排放量为−1.654~−0.436 t CO_2-eq/t(以秸秆干物质计);秸秆热解气化核算需关注加热方式对排放的影响,单位能源碳排放较低。外加热炭气联产技术规模化应用中,每消耗1 t秸秆可减排1.01~1.07 t CO_2-eq。部分情景可达净零排放;秸秆制燃料乙醇核算关键在于共产物分配,系统扩展法应用广泛,碳足迹为−0.610~−0.107 t CO_2-eq/t。上述结果可为相关碳核算研究提供参考。未来应强化全流程碳排放管控,发展全生命周期系统性评估框架。

关键词 秸秆;能源化利用;碳足迹;核算方法

中图分类号 X71;X82 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0097-10 **文献标志码** A

Research progress on the carbon footprint of straw energy utilization

GUO Zhanbin[1], MA Bengang[1,2], SHEN Xiuli[2], CONG Hongbin[2], LIU Huan[2], SHAO Si[2], XING Haohan[2*]

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
2. Chinese Academy of Agricultural Engineering/Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agricultural Residue, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract Under “dual carbon” goals, agricultural emission reduction calls for accurate and reliable carbon accounting methodologies, and the mitigation effects of straw-to-energy utilization need to be evaluated and quantified. Drawing on carbon footprint theory and a literature review, this study examined the accounting methods and carbon footprint characteristics of three mainstream straw utilization pathways: anaerobic digestion, pyrolysis and gasification, and fuel ethanol production. The results showed that the accounting of straw anaerobic digestion mostly relied on life cycle assessment (LCA) and the methods of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), with mostly negative carbon footprints and net greenhouse gas emissions ranging from −1.654 to −0.436 t CO_2-eq per ton of straw dry matter. For pyrolysis and gasification, accounting should pay particular attention to the influence of heating methods on emissions, as this pathway yields relatively low carbon emissions

收稿日期:2026-01-10;接受日期:2026-06-22
基金项目:国家重点研发计划(2022YFD2002100)
第一作者:郭占斌(ORCID:0009-0005-6199-7793),教授,主要从事材料成形技术与增材制造研究,E-mail:329984136@qq.com
通讯作者:邢浩翰(ORCID:0000-0003-2758-6745),高级工程师,主要从事农业农村废弃物能源化利用、农业生物环境与能源工程研究,E-mail:xhh523059864@126.com

per unit of energy. In the large-scale application of externally heated biochar-gas co-production, each ton of straw consumed reduces emissions by 1.01 to 1.07 t CO_2-eq, and net-zero emissions are achievable in some scenarios. For fuel ethanol production, the key to accounting lies in co-product allocation, where the system expansion method is widely applied, with carbon footprints of −0.610 to −0.107 t CO_2-eq per ton of straw dry matter. These findings provide a reference for carbon accounting studies on straw energy utilization. Future efforts should strengthen whole-process carbon emission management and develop systematic life-cycle assessment frameworks.

Keywords straw; energy utilization; carbon footprint; accounting methods

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告显示,全球温室气体年排放量(以CO_2当量为计,下同)已达4.0×10^{10} t,过高的碳排放量导致陆地与海洋生态系统碳汇能力呈现下降[1]。生物质资源的循环利用已成为国际社会实现碳中和目标的关键路径之一。我国秸秆年产量达到8.65×10^{8} t,资源总量居世界前列[2-3]。受农村经济与生产条件制约,秸秆露天焚烧与随意堆放现象仍较普遍。秸秆能源化技术日趋多元[4],但碳足迹评价缺乏系统总结,南北运输碳排放差异及利用模式分化问题未形成针对性分析框架,制约了农业减排政策的精准实施。识别碳排放关键环节、制定减排政策,是本研究的核心目标。

国内外已有相关研究,但仍存在薄弱环节:1)国外研究起步较早,已形成较完善的全生命周期评价框架,证实厌氧发酵、热解气化等技术可有效降低碳排放[5-6],预处理环节能耗是关键因素。部分研究核算了秸秆制沼气的净减排量,但多聚焦规模化农业场景[7],结论直接适用于我国;2)国内研究明确我国秸秆资源呈现“北多南少,东密西疏”的分布特征及南北运输碳排放差异[8-9];梳理了主流能源化工技术碳排放特征,初步建立碳足迹核算方法并明确3种主流核算方法的适配场景,关注副产物利用的减排作用。但仍存在不足:多聚焦于单一技术或区域,缺乏适配我国南北地域特征的分析框架、核算参数与实际生产脱节,且核算边界、排放因子、副产物分配尚无统一标准。

本研究拟采用文献梳理、归纳分析与对比研究相结合的方法,系统梳理秸秆厌氧发酵、热解气化、燃料乙醇制备3种主流能源化利用方式的碳足迹,明确碳排放的关键环节,结合我国秸秆资源分布特征,以期为优化利用路径、提升资源化效率提供参考,为农业农村减排固碳政策制定提供科学依据。

1 秸秆能源化利用碳足迹概述

碳足迹是生态足迹理论的重要衍生概念[10]。目前广泛认可的碳足迹定义为:某一产品、活动或服务在全生命周期内或在特定地理范围内,直接与间接产生的CO_2及其他温室气体(以全球增温潜势折算)的总和,单位为二氧化碳当量[11]。碳足迹的核算方法主要聚焦于产品或活动的全生命周期,当前国内外相关研究主要采用以下3种方法:生命周期评价法(Life cycle assessment,LCA),投入产出分析法(Input output analysis,IOA)及IPCC法[12]。碳足迹的研究有助于识别农业系统中的高碳排放环节,从而采取节能、优化施肥、改进田间管理等针对性措施。此外,碳足迹评估也为制定农业政策与气候变化适应策略提供关键依据。

1.1 3种主流核算方法比较

生命周期评价法(LCA)适用于微观层面,采用“自下而上”模式评估研究对象在生产、加工、利用、废弃等全环节的碳排放投入与产出[13-14]。投入产出分析法(IOA)是一种“自上而下”的宏观核算方法,利用投入产出表建立平衡方程,反映部门间碳排放关系,适用于国家或行业尺度。IPCC法由联合国政府间气候变化专门委员会提出,将研究区域划分为多类关键部门,以活动数据与排放因子乘积计算碳排放量,可适用于不同尺度[4]。3种方法的差异见表1。

从秸秆能源化工程的实践需求来看,其核心目标是精准评估特定技术路线的全流程减排潜力,需兼顾原料获取、加工转化、产物利用等环节的细节差异。上述3种方法中,LCA(生命周期评价法)能够实现全生命周期维度的精细化核算,匹配工程级别的减排分析需求,因此是目前主流且适用的核算方法。

1.2 秸秆能源化利用碳足迹核算边界

秸秆能源化利用全生命周期碳足迹边界涉及农田秸秆收储运、能源化转化到产物利用与固碳减

表 1　3种碳足迹核算方法对比

Table 1　Comparative analysis of mainstream accounting methods

核算方法 Accounting method	优缺点 Merits and demerits	适用尺度 Applicable scale	数据需求 Data requirement
LCA	优点：能精准识别全流程排放热点，贴合工程实际；缺点：耗时耗力，依赖微观数据	微观工艺（如秸秆厌氧发酵、热解气化生产线）	高，需原料运输距离、加工能耗、副产物利用等环节的实测或统计数据[5,11]
IOA	优点：宏观视野清晰，可反映产业关联排放；缺点：分辨率低，无法捕捉工艺细节	宏观政策（如区域、行业秸秆能源化减排规划）	中，需区域投入产出表、行业能源消耗及碳排放总量数据[9]
IPCC	优点：操作简便、通用性强；缺点：忽略流程差异，精准度不足	多尺度（以宏观清单编制为主）	低，需部门活动水平数据（如秸秆消耗量）及对应默认排放因子[2,4]

注：LCA为生命周期评价方法；IOA为投入产出分析法；IPCC为联合国政府间气候变化专门委员会提出的通用方法。

Note: LCA is the whole life cycle assessment method; IOA is the input-output analysis method; IPCC is a general method proposed by the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change.

排的全流程。厌氧消化路径的核算覆盖秸秆预处理、厌氧消化反应的过程排放，以及沼气用于发电/供热的能源利用环节，同时纳入沼渣/消化液还田的土壤固碳效应。热解气化路径的核算边界包含秸秆热解/气化过程的加热能输入与过程排放，合成气的热电利用环节，以及副产物生物炭的固碳与能源利用去向。秸秆制燃料乙醇路径的核算边界涵盖秸秆酶解发酵、蒸馏提纯的酶制剂与蒸馏能源输入、过程排放、燃料乙醇的车用燃料利用环节，以及副产物木质素的电厂混燃利用路径。上述路径完整呈现了各路径直接排放、间接排放、化石能源替代减排与土壤固碳的全链条（图1）。

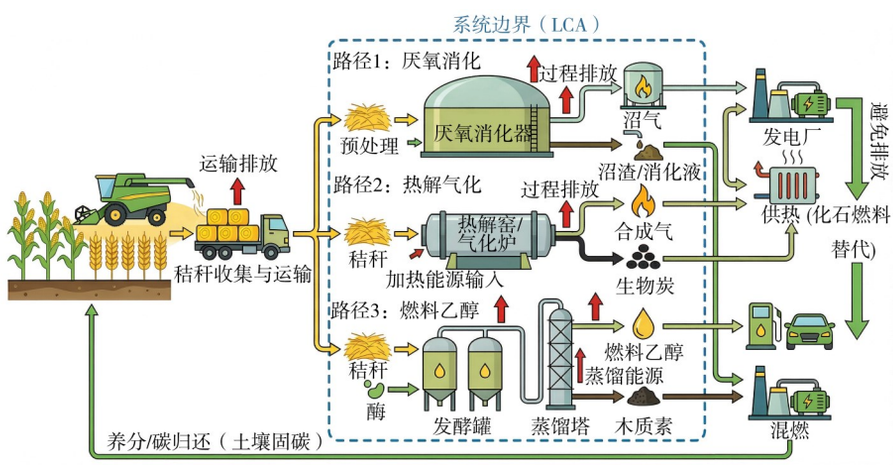


图 1　秸秆能源化利用全生命周期碳足迹系统边界示意图

Fig. 1　System boundary diagram of life cycle carbon footprint for straw energy utilization

2　秸秆能源化利用碳足迹进展

秸秆能源化利用是将秸秆中的生物质转化为能源的过程。据估算，中国生物质资源折合标准煤约5亿 t[15]，主要技术路径包括厌氧发酵、热解气化、制燃料乙醇等。

2.1　秸秆沼气工程

农作物秸秆沼气化是秸秆资源高效转化的经典途径。该技术成熟度高、环境兼容性强，是农业废弃物能源化利用的重点方向。其碳足迹评价与减排潜力研究也起步较早，国内外学者围绕核算方法、减排效果及技术优化展开了探索[16-17]。

国内研究主要聚焦于量化秸秆厌氧发酵制沼气的碳减排效益。主流核算方法包括生命周期评价与IPCC法，结果均验证了秸秆厌氧发酵技术的温室气体减排价值。王艺鹏等[18]采用生命周期评

价法，张婷婷等[19]则基于IPCC法，结合国内秸秆特性与区域能源结构参数开展分析，二者研究结论一致：秸秆沼气化利用可显著降低碳足迹，相较于传统化石能源（天然气、煤炭）及秸秆随意露天焚烧等处置方式，碳排放强度降低幅度可达60%以上。程正涛等[20]在采用生命周期评价法的基础上，参考王艺鹏等[18]研究中提出的秸秆直燃碳排放系数作为基准情景，构建了“资源化-碳减排”协同分析框架。研究发现，秸秆沼气化不仅实现了农业废弃物向清洁能源（沼气）与有机肥（沼渣、沼液）的转化，有效解决了传统秸秆处置带来的环境污染问题，还可通过替代燃煤供暖、减少化肥施用（沼肥替代）等间接效应，实现资源化利用与碳减排的协同增效。在该路径下，单位秸秆沼气化的综合碳减排量较直燃情景提升约45%～55%，为农业“双碳”目标下的废弃物处置方案提供了数据支撑。

国外研究则更侧重于技术创新对碳足迹的优化机制及区域适应性分析，在减排路径细化与工艺性能对比方面形成了特色成果。在减排机制与技术优化层面，Wojciech等[5]采用分阶段评估框架，将沼气生产划分为原料预处理、厌氧消化、产物提纯等关键环节，系统解析了各阶段对碳足迹的贡献度与减排潜力。研究发现，生产环节的技术创新是降低系统碳足迹的核心。其中，加压厌氧消化技术可将甲烷体积分数提升至90%以上，从而有效减少后续提纯过程的能源消耗与碳排放，使系统直接碳足迹较传统常压消化技术降低20%～30%，同时显著提升沼气的能源利用效率。在区域适应性与能源替代价值研究中，Sreevidhya等[6]以高海拔低温地区的那拉社区为研究对象，结合当地秸秆资源禀赋与能源需求特征，系统评估了秸秆沼气化的应用潜力与环境效益。结果表明，在低温、高海拔等传统化石能源运输成本高、供应不稳定的区域，秸秆沼气可作为一种可靠的清洁替代能源，满足居民炊事、供暖等基础用能需求，同时有效避免秸秆露天焚烧引发的颗粒物污染与温室气体排放，缓解当地生态环境压力，为特殊气候与地理条件下的能源转型提供了可行路径。

在秸秆沼气工程工艺的环境影响对比方面，Fedeli等[21]在验证秸秆制沼可降低碳足迹的基础上，进一步系统比较了沼气热电联产、二甲醚制备及其他利用工艺的性能与环境影响。全球增温潜势（GWP）分析结果表明，沼气热电联产工艺的GWP最低，单位能源产出的温室气体排放较其他工艺低15%～25%；二甲醚制备技术在多轮工艺迭代中均展现出更优的综合环境性能，其能源转化效率与碳排放控制效果仅次于热电联产。该研究为秸秆沼气的高值化、低排放利用提供了工艺选择依据。Buchspies等[7]测算得出：秸秆转化为沼气的净温室气体减排量为436～1654 kg CO_2-eq/t（以秸秆干物质计），转化为燃料乙醇的净减排量为107～610 kg CO_2-eq/t。

2.2 秸秆热解气化工程

秸秆热解气化多联产工程同属能源化利用范畴，相关碳足迹研究较为丰富。丛宏斌等[22]与朱奕霖团队[23]的研究均表明，与传统供暖方式相比，秸秆供暖具有更低的碳排放强度，更适用于乡镇级小型生物质热电联产系统。Yang等[24]采用低温热解联产生物质能，指出生物炭还田可实现净零排放，并通过多情景分析量化了运输半径等影响因素，为区域政策制定及工业化应用提供了参考。该研究还发现，除碳减排效益外，该工程可产生直接的经济效益，与霍丽丽等[25]的研究结论一致，表明秸秆热解气化多联产工程兼具经济与环境效益。综合减排通常在1.01～1.07 t CO_2-eq/t（以秸秆计），生物炭的固碳稳定性是热解技术碳减排的核心优势。Cross等[26]和Fryda[27]提出的方法被认为是研究土壤中生物炭长期氧化降解的经典方案，通过模拟自然条件下的氧化过程评估其持久性。在秸秆沼气与热解气化技术耦合方面，陈冠英等[28]、唐爱红等[29]和何伟等[30]3个团队研究了耦合厌氧发酵制沼气及热电肥多联产技术的耦合模式，该模式表现出显著的减排效果，且所产生的生物有机肥料可改善土壤。此外，何伟团队[30]还提出了1种计极热网热惯性的沼气热电联产系统灵活性评估方法。

国外方面，Thompson等[31]和Loeser等[32]早在2009—2010年便开展了生物质热电联产耦合风光系统的研究，结果表明能源成本与CO_2排放量均有所降低，可显著减少区域温室气体排放。此后，Amirant等[33]研究同样表明，相关系统可以降低乡村社区的热能和电能成本，同时减少对传统化石燃料的依赖和温室气体排放。Kavindi等[34]量化了慢速热解生物炭生产各阶段温室气体排放，发现其较传统生物质处理可显著减排。上述研究一致表明，

生物质热电联产技术在降低碳足迹方面效果明显，但仍存在优化空间。

2.3　秸秆制燃料乙醇

农作物秸秆作为典型的木质纤维素类生物质，其主要成分纤维素、半纤维素和木质素为燃料乙醇提供了丰富原料。当前主流制备路径可划分为物理法、化学法以及物理化学结合法3类。在燃料乙醇的可持续性评估领域，李攀等[35]通过对燃料乙醇炼制过程及其生命周期碳足迹的系统研究指出，以木质素为原料的第二代燃料乙醇在综合碳减排能力与整体可持续性方面表现最优，为生物质能源的开发提供了核心方向。沈钊丞等[36]则创新性地结合生命周期评价与层次分析法，对比研究了杨木、玉米秸秆和甘蔗渣3种典型生物质材料发酵制备燃料乙醇的环境影响。结果表明，杨木的环境友好性最为突出，玉米秸秆与甘蔗渣次之，该结论为原料选择的环境效益优化提供了直接参考。

在木质纤维素基乙醇生产的关键资源利用和系统优化方面，国外学者开展了大量针对性研究。Scown等[37]以美国纤维素乙醇生产为研究对象，聚焦木质素这一核心副产物的利用路径，生命周期评估发现，将木质素外输至燃煤电厂与煤共燃，能够在碳减排效果、水资源消耗控制与生产成本降低之间实现良好平衡，是兼具环境与经济价值的优选方案。然而，该研究同时指出，受美国燃煤电厂退役趋势影响（预计2050年前约50%燃煤电厂退役），木质素外输共燃的应用规模将面临限制；且木质素碳减排信用的归属主体（生物炼制厂或燃煤电厂）这一关键问题，仍需明确的政策与核算机制加以解决，否则易引发减排效益重复计算的争议。在乙醇生产代际整合与资源效率提升方面，Maga等[38]以巴西甘蔗乙醇产业为研究场景，采用生命周期评估方法对比分析了第一代乙醇、第二代乙醇及二者整合生产模式的环境影响。结果表明，第二代乙醇及一代、二代整合乙醇生产模式均展现出显著的减排优势，其中第二代乙醇的土地利用效率提升尤为突出，较一代乙醇降低约97%，大幅缓解了能源生产与土地资源占用的矛盾。此外，该研究还强调，无论是一代乙醇还是二代乙醇生产系统，均需通过提升余热回收效率、优化热电联产系统等方式降低对化石能源的依赖，最终实现生产过程的能源自给，进一步削减碳排放，提升整体可持续性。当前LCA研究难点在于系统边界是否涵盖间接排放及共产物分配方式的界定[35,37]。

尽管秸秆厌氧发酵、热解气化、制备燃料乙醇的技术路径存在差异，但三者均遵循“碳捕获-转化-替代”的核心闭环减排机理：农作物通过光合作用从大气中捕获CO_2并固定于秸秆中，秸秆经能源化转换后生产清洁能源，既能替代化石燃料又能减少新增碳排放，又能通过生物炭还田、沼肥施用等方式实现碳元素向土壤的固存，最终形成“大气碳-生物碳-能源碳-土壤碳”的循环链路，从源头削减温室气体排放。图2展示了作物通过光合作用捕获大气CO_2，转化为秸秆，再经过能源化利用替代化石燃料和产生生物炭还田固碳的过程。

2.4　不同秸秆能源化利用技术碳足迹对比

表2系统对比了秸秆厌氧发酵、秸秆热解气化、秸秆制燃料乙醇3种主流技术的碳足迹核心特征，涵盖利用技术、主要核算边界、主要碳排放环节、平均碳减排率及典型文献共6个维度。秸秆厌氧发酵的核算边界覆盖原料收集预处理、厌氧发酵至沼肥施用的全流程，碳排放集中于原料处理、发酵能耗及沼渣沼液储运环节，主要通过沼气替代化石能源、沼渣替代化肥及避免秸秆焚烧实现减排，较化石能源碳减排率达60%以上。秸秆热解气化以“原料收储-热解气化-生物炭还田”为核算边界，以热解加热、原料运输等为主要碳排放环节，依托燃气替代化石能源、生物炭固碳及规避秸秆腐烂甲烷排放实现减排，较传统处理方式减排率约78%。秸秆制燃料乙醇的核算边界包含原料预处理至副产物处置全流程，预处理能耗、发酵化石能源消耗等为主要排放环节，通过乙醇替代交通化石燃料、木质素共燃及余热回收完成减排，较化石燃料减排率达80%～95%。

3　秸秆能源化利用碳足迹评价存在的挑战

秸秆厌氧发酵、热解气化、制燃料乙醇3类主流能源化技术的碳足迹核算已积累大量研究成果，但受核算边界、排放因子、副产物分配三大核心要素不统一的制约，不同研究结果可比性差，数据偏差20%～30%，难以得出统一的核算结论，这是在未来的研究中仍面临的主要挑战。

3.1　核算边界差异

界定核算边界是碳足迹量化的前提。当前3类技术的碳足迹研究均未形成全生命周期统一边界

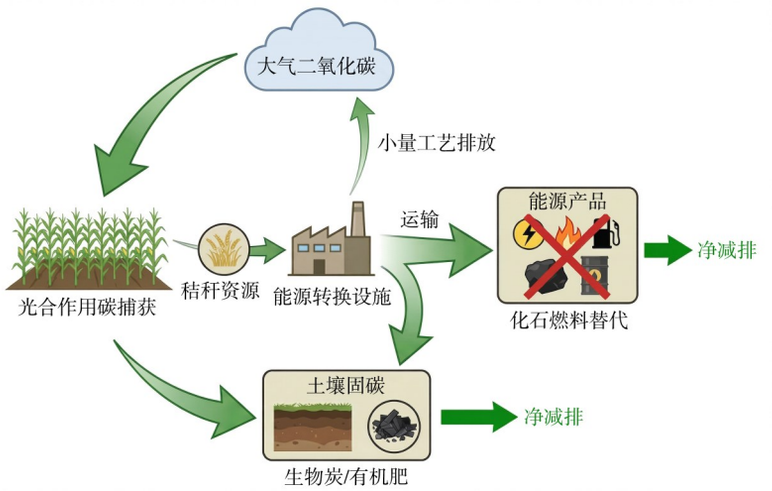


图 2 秸秆能源化利用的“碳捕获-转化-替代”闭环减排机理图

Fig. 2 Mechanism diagram of closed-loop emission reduction for “carbon capture-conversion-substitution” in straw energy utilization

表 2 3种主流技术的碳足迹核心特征对比

Table 2 Comparison of core carbon footprint characteristics of three mainstream technologies

利用技术 Utilization technologies	主要核算边界 Main accounting boundary	主要碳排放环节 Main carbon emission links	主要减排环节 Main emission reduction links	较露天焚烧平均碳减排率 The average carbon emission reduction rate compared with open burning	典型文献 Typical literature
秸秆厌氧发酵 Straw anaerobic fermentation	原料收集与预处理；厌氧发酵、固液分离；沼渣、沼液利用；沼渣运输；沼气燃烧/发电；沼肥施用	1. 原料收集和预处理；2. 发酵过程的加热和搅拌；3. 沼液沼渣的处理和运输	1. 替代燃煤产热和供电；2. 沼渣替代化肥；3. 避免秸秆露天焚烧排放	60%～70%	[15, 39-42]
秸秆热解气化 Stalks gasification	原料收、储、运；预处理；热解气化；产物利用；生物炭还田	1. 热解过程加热能耗（外加热方式占比高）；2. 原料运输；3. 燃气燃烧尾气；4. 设备制造与维护	1. 替代化石热电/燃煤供暖；2. 生物炭还田固碳；3. 避免秸秆自然腐烂甲烷排放	75%～80%	[22-23, 43-44]
秸秆制燃料乙醇 Straw to fuel ethanol	原料收集和预处理；发酵；蒸馏提纯；乙醇利用；副产物（木质素）处置	1. 预处理能耗（酶解、高温降解）；2. 蒸馏环节化石能源消耗；3. 原料运输；4. 废水处理能耗	1. 替代汽油等交通化石燃料；2. 木质素外输共燃减排；3. 余热回收	80%～95%	[35-38]

规范，边界选取的随意性导致核算结果不一致，这是最主要的研究差异。多数研究聚焦于秸秆转化利用的反应环节，简化或忽略原料秸秆的收储运、预处理、副产物处置、厂区建设、设备运维、间接排放等环节。部分研究仅核算秸秆能源化利用工程的CO_2的直接排放量，未核算电力、化石燃料等间接排放，边界范围较小，导致碳足迹被严重低估。具体而言：在秸秆厌氧发酵的碳排放核算中，边界是否包含沼渣沼液储运、还田施用环节，直接决定碳排放的核算结果；部分研究未核算发酵过程中加

热、搅拌的能耗排放，导致碳排放测算较低。在秸秆热解气化的碳排放核算中，边界是否包含生物炭还田固碳、焦油资源化处置环节，直接决定是否能实现负排放；外加热热解工艺消耗的电力、化石能源产生的碳排放是否纳入核算边界，目前尚无统一标准。在秸秆制燃料乙醇的碳排放核算中，是否包含废水处理、木质素副产物终端处理环节，会导致碳足迹数据偏差超25%；酶解、高温降解等预处理环节的能耗排放经常被排除在边界之外。

3.2　排放因子的不适用性

碳排放因子是碳足迹核算的核心参数。当前研究过度依赖IPCC默认排放因子，缺乏适配我国秸秆特性、工艺水平、区域能源结构的本土化实测数据，核算精准度严重不足。IPCC默认排放因子基于欧美农业生产条件与能源结构设定，与我国秸秆理化特性、农村能源体系、工艺设备水平不匹配。秸秆发酵甲烷排放、热解碳排放、运输碳排放等关键因子的实测值与IPCC默认值偏差达10%～18%，直接降低了核算可信度。同时，针对秸秆能源化利用等工艺的专用排放因子尚未建立本土化数据库，碳足迹仍然采用传统工艺排放因子，无法准确反映技术升级带来的减排效益。

3.3　副产物分配法不统一

秸秆能源化多为多产物联产体系，副产物的碳分配方法直接决定主产品碳足迹结果。当前物理分配法、经济分配法、系统扩展法混用，缺乏统一适用规范，同一技术、相同工况下数据偏差超过30%。在秸秆厌氧发酵中，沼渣、沼液作为有机肥替代化肥的减排效益如何在沼气与沼肥之间分配，尚无统一规则，导致负排放核算结果差异显著。在秸秆热解气化中，生物炭还田固碳是核心的减排路径，但固碳量是否全额计入系统、如何分配至燃气和生物炭等产品，研究结论不明确，缺乏统一标准。在秸秆制燃料乙醇中，木质素副产物用于热电联产、外输共燃的减排量归属生物炼制厂还是燃煤电厂，尚无明确定论；系统扩展法虽应用广泛，但实施口径不统一。

3.4　不同敏感因子对工程碳排放的影响

利用文献数据开展敏感性分析表明，运输距离、能源结构、副产物利用率与工艺关键参数是影响秸秆3类技术碳足迹的核心敏感因子，各因子的数值波动会直接改变系统整体的碳减排效果。运输距离的影响最为突出：运输半径每增加10 km，全系统碳足迹便会上升8%～12%，且南方秸秆分散产区受运输距离的影响程度显著高于北方规模化产区。能源结构的清洁程度直接作用于发酵加热、热解、乙醇蒸馏等高能耗环节，能源清洁度每提升1个等级，系统碳足迹可降低10%～15%。副产物利用率同样对减排效果影响显著：沼肥还田率、生物炭还田率、木质素共燃率每提高10%，系统碳减排量可提升5%～8%。在工艺关键参数方面，厌氧发酵采用加压消化较常压消化可降低系统碳足迹20%～30%；热解气化采用外加热方式较自加热方式碳排放占比高出15%～20%；制燃料乙醇采用余热回收蒸馏较常规蒸馏可减少环节碳排放15%～20%。

4　结论与展望

4.1　结论

本研究系统梳理农作物产量与分布、碳足迹的定义及核算方法，并聚焦秸秆能源化利用的碳足迹研究进展，得出以下核心结论：

1）生命周期评价法（LCA）、投入产出法（IOA）、联合国政府间气候变化专门委员会法（IPCC）3种核算方法在秸秆能源化碳足迹评价中各有适配场景。LCA是微观工程核算主流方法，可实现全流程精细化评估；IOA适用于区域/行业宏观减排规划；IPCC法操作简便，多用于多尺度清单快速核算。3种方法共同构成秸秆能源化碳足迹核算方法体系。

2）秸秆厌氧发酵、热解气化、制燃料乙醇三类技术均具备显著碳减排效益，碳足迹特征差异明确。厌氧发酵碳足迹为负值，为－1.654～－0.436 t CO_2-eq/t（以秸秆干物质计）（净减排效果突出）；热解气化依托生物炭固碳可实现近零排放，每吨秸秆减排1.01～1.07 t CO_2-eq；制燃料乙醇减排率最高，达80%～95%；碳足迹为－0.107～－0.610 t CO_2-eq/t（以秸秆干物质计）。

3）秸秆利用碳足迹研究仍处于发展阶段，需要建立统一的核算边界、评价方法和副产物分配规范。现有研究系统边界不一致，导致结果难以比较，应推动方法学统一，开展多样化利用方式的系统性评估，为农业废弃物碳减排提供更充分的科学依据。

4.2　展望

基于上述研究结论，结合“双碳”目标与可持续

发展需求，未来秸秆利用碳足迹研究应重点聚焦以下方向：

1）深化副产物资源化利用研究。针对制乙醇的木质素、沼气化的沼渣沼液等副产物，开展定向利用技术研发，包括木质素的高效共燃工艺优化、材料化高值转型技术，以及沼渣沼液的精准还田配比技术，通过副产物全价值利用进一步削减系统碳足迹。

2）强化全流程碳排放管控与净零目标导向。建立中国本土化秸秆利用碳排放因子数据库，涵盖不同区域（如东北玉米秸秆、南方水稻秸秆）、利用技术（沼气化、热解、制乙醇）及关键环节（原料收储运、预处理、产物处置）的实际测量排放因子，为全流程核算提供精准数据支撑。提高对秸秆能源化利用各阶段环境影响的关注度，重点攻克废弃物处理、蒸馏能耗等关键环节的碳排放削减技术，推动生产材料在生产、加工、处置全链条实现净零碳排放目标。

3）推进秸秆热解气化多联产工程应用与技术耦合。秸秆热解气化多联产工程技术适配乡镇及农村场景，依托地广人稀的地理优势便于建厂，且产生的生物炭可直接还田以缩短运输距离。部分研究涉及工程碳交易领域，证实其兼具经济效益与环境效益，能够为农民增收提供助力。未来可进一步耦合厌氧发酵制沼气技术，强化热电肥多联产效能。

4）构建覆盖秸秆利用全生命周期的系统性、标准化评估框架。针对当前秸秆碳足迹核算局限于单一工程、单一环节，存在系统边界不统一、区域资源特征适配性弱的短板，应深化碳足迹理论与方法的本土化适配研究，构建“区域秸秆资源-工程全流程环节-经济-环境协同效益”的全生命周期评估框架，破解单一维度核算的局限性，实现不同区域、不同技术的碳足迹与综合效益精准量化，为秸秆能源化路径选型及农业减排政策制定提供标准化评估工具。

参考文献 References

[1] 樊星，秦圆圆，高翔. IPCC 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护，2021，49(17)：44-48

Fan X，Qin Y Y，Gao X. Interpretation of the main conclusions and suggestions of the IPCC AR6 working group I Report[J]. *Environmental Protection*，2021，49(17)：44-48 (in Chinese)

[2] 农业农村部：2021年我国农作物秸秆综合利用率达88.1%[J]. 再生资源与循环经济，2022，15(10)：2

Ministry of Agriculture and Rural Affairs. comprehensive utilization rate of crop straw in China will reach 88.1% in 2021 [J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*，2022，15(10)：2 (in Chinese)

[3] 宗诗涵. 秸秆变饲料，草垛垛成“香饽饽”[N]. 科技日报. 2024-06-12(6)

Zong S H. Straw turned into feed，straw stacks become sought-after commodities[N]. *Science and Technology Daily*，2024-06-12(6) (in Chinese)

[4] 刘俊杰，严晓斌，张美怡，刘天舒，孙志梅. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. 农业资源与环境学报，2025，42(3)：751-760

Liu J J，Yan X B，Zhang M Y，Liu T S，Sun Z M. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*，2025，42(3)：751-760 (in Chinese)

[5] Budzianowski W M，Postawa K. Renewable energy from biogas with reduced carbon dioxide footprint：Implications of applying different plant configurations and operating pressures[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*，2017，68：852-868

[6] Sreevidhya C，Balamurugan S. An assessment of biogas adoption potential：A pathway to sustainable development in Nala，Rudraprayag，Uttarakhand，India[J]. *Sustainable Futures*，2025，10：100856

[7] Buchspies B，Kaltschmitt M，Junginger M. Straw utilization for biofuel production：A consequential assessment of greenhouse gas emissions from bioethanol and biomethane provision with a focus on the time dependency of emissions[J]. *GCB Bioenergy*，2020，12(10)：789-805

[8] 张红阳，高小涵，王恒，王占武，曲青青. 基于生命周期评价的秸秆发电供应链模式研究[J]. 河南农业大学学报，2024，58(4)：663-673

Zhang H Y，Gao X H，Wang H，Wang Z W，Qu Q Q. Study on supply chain mode of straw power generation based on life cycle evaluation[J]. *Journal of Henan Agricultural University*，2024，58(4)：663-673 (in Chinese)

[9] 杨传文，邢帆，朱建春，李荣华，张增强. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J]. 环境科学，2023，44(2)：1149-1162

Yang C W，Xing F，Zhu J C，Li R H，Zhang Z Q. Temporal and spatial distribution，utilization status，and carbon emission reduction potential of straw resources in China[J]. *Environmental Science*，2023，44(2)：1149-1162 (in Chinese)

[10] 戴晓虎，陈淑娴，蔡辰，戴翎翎，华煜. 秸秆主流能源化技术研究与经济性分析[J]. 环境工程，2021，39(1)：1-17

Dai X H，Chen S X，Cai C，Dai L L，Hua Y. Research and economicanalysis of mainstream energy technologiesforstraw[J]. *Environmental Engineering*，2021，39(1)：1-17 (in Chinese)

[11] 周志花. 利用LCA法核算农作物生产碳足迹[D]. 北京：中国农业科学院，2018

Zhou Z H，Estimates of carbon footprint of crop production by life cycle assessment(LCA)method[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation，2018 (in Chinese)

[12] 卢露. 碳中和背景下完善我国碳排放核算体系的思考[J]. 西南金融，2021(12)：15-27

Lu L. Thoughts on perfecting China's carbon emission accounting system under the background of carbon neutrality [J]. *Southwest Finance*，2021(12)：15-27 (in Chinese)

[13] 董雪，柯水发．国内外碳足迹计算方法、评估标准及研究进展[C]//绿色经济与林业发展论——第六届中国林业技术经济理论与实践论坛论文集．赣州：中国林业出版社，2012：97-104

Dong X，Ke S F. An overview of carbon footprint calculation method，evaluation standard and research progress[C]. In：*Green Economy and Forestry Development Theory：Proceedings of the 6th China Forum on Forestry Technical Economics Theory and Practice*. Ganzhou：China Forestry Publishing House，2012：97-104（in Chinese）

[14] 冯玥，聂正标，孙东宝，张远东，黄玫，顾峰雪．农产品碳足迹评测方法和碳标签制度建立[J]．农业展望，2022，18(6)：35-40

Feng Y，Nie Z B，Sun D B，Zhang Y D，Huang M，Gu F X. Carbon footprint evaluation of agricultural products and establishment of carbon label system[J]. *Agricultural Outlook*，2022，18(6)：35-40（in Chinese）

[15] 赵新月，刘旭丹，陆佳．农作物秸秆资源综合利用的碳排放趋势预测[J]．黑龙江科学，2024，15(14)：67-69，73

Zhao X Y，Liu X D，Lu J. Prediction of the trend of carbon emissions from the comprehensive utilization of crop straw resources[J]. *Heilongjiang Science*，2024，15(14)：67-69，73（in Chinese）

[16] 霍丽丽，姚宗路，赵立欣，罗娟，张沛祯．秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]．农业机械学报，2022，53(1)：349-359

Huo L L，Yao Z L，Zhao L X，Luo J，Zhang P Z. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2022，53(1)：349-359（in Chinese）

[17] 覃诚，毕于运，高春雨，王亚静，周柯，王莹．中国农作物秸秆禁烧管理与效果[J]．中国农业大学学报，2019，24(7)：181-189

Qin C，Bi Y Y，Gao C Y，Wang Y J，Zhou K，Wang Y. Management and effect of straw burning prohibition in China[J]. *Journal of China Agricultural University*，2019，24(7)：181-189（in Chinese）

[18] 王艺鹏，杨晓琳，谢光辉，程娅丽．1995—2014年中国农作物秸秆沼气化碳足迹分析[J]．中国农业大学学报，2017，22(5)：1-14

Wang Y P，Yang X L，Xie G H，Cheng Y L. Temporal variation in carbon footprint of crop residue for biogas utilization in China from 1995 to 2014[J]. *Journal of China Agricultural University*，2017，22(5)：1-14（in Chinese）

[19] 张婷婷，冯永忠，李昌珍，任广鑫，杨改河．2011年我国秸秆沼气化的碳足迹分析[J]．西北农林科技大学学报：自然科学版，2014，42(3)：124-130

Zhang T T，Feng Y Z，Li C Z，Ren G X，Yang G H. The carbon footprint analysis of straw biogas utilization of China in 2011[J]. *Journal of Northwest A&F University：Natural Science Edition*，2014，42(3)：124-130（in Chinese）

[20] 程正涛，徐彪，刘治航，李忠华，张无敌，梁承月．云南省农作物秸秆资源量及沼气化碳减排效益分析[J]．环境科学与技术，2025，48(9)：210-220

Cheng Z T，Xu B，Liu Z H，Li Z H，Zhang W D，Liang C Y. Analysis of crop straw resources and carbon emission reduction benefits from biogas production in Yunnan Province[J]. *Environmental Science & Technology*，2025，48(9)：210-220（in Chinese）

[21] Fedeli，M，di Pretoro A，Montastruc L，Manenti F. Conventional vs. alternative biogas utilizations：An LCA-AHP based comparative study[J]. *Cleaner Environmental Systems*，2023，11：100150

[22] 丛宏斌，姚宗路，赵立欣，孟海波，霍丽丽，袁艳文，任雅薇，刘广华，刘圣勇．基于价值工程原理的乡村秸秆清洁供暖技术经济评价[J]．农业工程学报，2019，35(9)：200-205

Cong H B，Yao Z L，Zhao L X，Meng H B，Huo L L，Yuan Y W，Ren Y W，Liu G H，Liu S Y. Technical and economic evaluation for clean heating using straw in rural areas based on the principle of value engineering[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2019，35(9)：200-205（in Chinese）

[23] Zhu Y L，Li W Y，Li J，Li H J，Wang Y Z，Li S. Thermodynamic analysis and economic assessment of biomass-fired organic Rankine cycle combined heat and power system integrated with CO_2 capture[J]. *Energy Conversion and Management*，2020，204：112310

[24] Yang Q，Han F，Chen Y Q，Yang H P. Greenhouse gas emissions of a biomass-based pyrolysis plant in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*，2016，53：1580-1590

[25] 霍丽丽，赵立欣，姚宗路，孟海波，丛宏斌．秸秆热解炭化多联产技术应用模式及效益分析[J]．农业工程学报，2017，33(3)：227-232

Huo L L，Zhao L X，Yao Z L，Meng H B，Cong H B. Utilization model and its efficiency analysis of biochar-gas-oil polygeneration by straw pyrolysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2017，33(3)：227-232（in Chinese）

[26] Cross A，Sohi S P. A method for screening the relative long-term stability of biochar[D]. *Gcb Bioenergy*，2013，5(2)：215-220

[27] Fryda L，Visser R，Schmidt J. Biochar replaces peat in horticulture：Environmental impact assessment of combined biochar & bioenergy production[J]. *Detritus*，2018，5：1

[28] 陈冠英，马宗虎，张万钦，刘凡，李剑，张中亮．干湿耦合厌氧发酵制沼及热电肥多联产技术模式探析[J]．中国沼气，2024，42(4)：31-37

Chen G Y，Ma Z H，Zhang W Q，Liu F，Li J，Zhang Z L. Analysis on operation technology mode of dry-wet fermentation system and thermoelectric fertilizer poly-gen-eration[J]. *China Biogas*，2024，42(4)：31-37（in Chinese）

[29] 唐爱红，王庆铭，周淼，王文浩，刘俊．考虑沼气发电与新型热力循环的农村“化学-热-电”耦合系统低碳调度模型[J]．中国电机工程学报，2025，45(5)：1847-1859

Tang A H，Wang Q M，Zhou M，Wang W H，Liu J. Low-carbon scheduling model of “chemical-thermal-electric” coupling system in rural areas considering the new thermodynamic cycle and biogas power generation[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*，2025，45(5)：1847-1859（in Chinese）

[30] 何伟，赵伟哲，饶臻，李佳，单文亮．计及热网热惯性的沼气热电联产发电灵活性评估[J]．电气传动，2023，53(4)：71-77

He W，Zhao W Z，Rao Z，Li J，Shan W L. Flexibility evaluation of biogas driven combined heat and power considering the thermal inertia of district heating systems[J]. *Electric Drive*，2023，53(4)：71-77（in Chinese）

[31] Thompson S，Duggirala B. The feasibility of renewable energies at an off-grid community in Canada[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*，2009，13(9)：2740-2745

[32] Loeser M，Redfern M A. Balancing power supply and demand in remote off-grid regions by means of a novel micro-scale combined feedstock biomass generation plant[J]. *International Journal of Energy Research*，2010，34(11)：986-1001

[33] Amirante R，Bruno S，Distaso E，La Scala M，Tamburrano p. A biomass small-scale externally fired combined cycle plant for heat and power generation in rural communities[J]. *Renewable Energy Focus*，2019，28：36-46

[34] Kavindi G A G, Tang L L, Sasaki Y. Assessing GHG emission reduction in biomass-derived biochar production via slow pyrolysis: A cradle-to-gate LCA approach[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 212: 107900

[35] 李攀, 张璐璐, 陈海, 吴兴国, 陈玮, 白净, 常春, 胡俊豪. 燃料乙醇炼制及生命周期碳足迹研究进展[J]. 工程科学学报, 2025, 47(6): 1350-1359

Li P, Zhang L L, Chen H, Wu X G, Chen W, Bai J, Chang C, Hu J H. Research progress of fuel ethanol refining and life cycle carbon footprint[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(6): 1350-1359 (in Chinese)

[36] 沈钊丞, 仲兆平, 郑翔, 汪维, 潘小天. 典型生物质发酵制取燃料乙醇环境影响分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 280-285

Shen Z C, Zhong Z P, Zheng X, Wang W, Pan X T. Environmental impact analysis of fuel ethanol from typical biomass fermentation[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2024, 45(4): 280-285 (in Chinese)

[37] Scown C D, Gokhale A A, Willems P A, McKone T E. Role of lignin in reducing life-cycle carbon emissions, water use, and cost for United States cellulosic biofuels[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8446-8455

[38] Maga D, Thonemann N, Hiebel M, Sebastião D, Lopes T F, Fonseca C, Gírio F. Comparative life cycle assessment of first-and second-generation ethanol from sugarcane in Brazil[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(2): 266-280

[39] Pöschl M, Ward S, Owende P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(11): 3305-3321

[40] 党乐, 胡文博, 邱泽晶, 佟敏, 崔亚茹, 刘华财. 中国农业沼气工程生命周期评价[J]. 可再生能源, 2023, 41(4): 442-451

Dang L, Hu W B, Qiu Z J, Tong M, Cui Y R, Liu H C. Review of life cycle assessment of agricultural biogas plants in China[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(4): 442-451 (in Chinese)

[41] 王双喜, 扬军. 浅议池州市沼液沼渣用途及利用模式[J]. 中国沼气, 2015, 33(3): 81-82

Wang S X, Yang J. Discussion on the use and utilization mode of biogas slurry and biogas residue in Chizhou city[J]. *China Biogas*, 2015, 33(3): 81-82 (in Chinese)

[42] 陈理, Yousuf M, 陈帅宇, 马明旭, 赖有春, 柳珊. 基于LCA的沼气工程3种沼液处理工艺综合效益分析[J]. 可再生能源, 2025, 43(7): 869-877

Chen L, Yousuf M, Chen S Y, Ma M X, Lai Y C, Liu S. Comprehensive benefit analysis of three biogas slurry treatment processes for biogas engineering based on LCA[J]. *Renewable Energy Resources*, 2025, 43(7): 869-877 (in Chinese)

[43] 丛宏斌, 姚宗路, 赵立欣, 贾吉秀, 兰珊. 生物质连续热解炭气油联产中试系统开发[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 173-179

Cong H B, Yao Z L, Zhao L X, Jia J X, Lan S. Development of carbon, gas and oil poly-generation pilot system based on biomass continuous pyrolysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 173-179 (in Chinese)

[44] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 姚宗路, 丛宏斌, 王冠. 秸秆类生物质气炭联产全生命周期评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 261-266

Huo L L, Zhao L X, Meng H B, Yao Z L, Cong H B, Wang G. Life cycle assessment analysis for cogeneration of fuel gas and biochar[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S1): 261-266 (in Chinese)

责任编辑: 梁芷健



第一作者简介: 郭占斌,教授,博士生导师。中国机械工程学会高级会员,先进成型技术学会理事,中国工业设计协会教育分会理事,中国农业机械学会工业设计分会副主任委员,黑龙江省工业设计协会常务理事。教育部学位中心博士学位论文评审专家,科技部国家重点研发项目评审专家。多维时空自由制造有限公司CTO(首席技术官兼技术总师)。主要从事工业设计、机械设计及理论、农业机械化工程领域的教学与科研工作。近年来主要从事农业废弃物资源化利用工艺技术与装备及先进制造(增材制造)技术、数字模具等技术研究。主持和参与省部级以上纵向项目(课题)以及横向课题20余项,获省科技进步奖一等奖1项,获农牧渔丰收奖一等奖1项。发表学术论文八十余篇,SCI、EI检索十余篇。出版专著3部。编写规划教材2部。



通讯作者简介: 邢浩翰,博士,高级工程师。主要从事农业农村废弃物资源化利用、农业生物环境与能源工程领域的科研工作。近年来主要开展生物质能利用技术工艺、碳足迹和水足迹评价方法及工程设计等技术研究。主持和参与省部级以上纵向项目(课题)以及横向课题10余项,发表学术论文13篇,其中SCI 4篇,获授权专利8项,参与制定国家标准《农业工程术语标准》,主持/参与制定《村镇社区污染类型区划技术导则》等团体标准4项,作为行业专家参与秸秆综合利用、农村沼气安全生产等政府服务工作,作为主要完成人参与起草有关政策报告7份,多次获得部级领导肯定性批示。