

中国造纸行业碳排放研究进展： 核算、影响与路径



作者简介：赵耘墨，在读本科生；主要从事碳经济领域等方面的研究。

赵耘墨¹ 周在峰^{2,*} 和珊珊³ 董凤霞² 周军⁴ 雷明^{5,*}

(1. 中央民族大学经济学院, 北京, 100081; 2. 中国制浆造纸研究院有限公司, 北京, 100102; 3. 丽江文化旅游学院, 云南丽江, 674199; 4. 南宁职业技术大学, 广西南宁, 530008; 5. 北京大学光华管理学院, 北京, 100871)

摘要：本文首先从生命周期评价(LCA)、投入产出分析及核算边界等维度，评述了碳排放核算方法与关键议题。其次，分析了中国造纸行业碳排放的时空演变特征，并运用因素分解模型揭示了经济增长、能源强度与能源结构等核心驱动因素的作用机制。进而，从源头控制、过程节能、末端治理、系统协同等层面，归纳了碳减排的关键技术与路径体系。最后，指出现有研究在数据基础、动态模拟、技术经济综合评估及政策协同分析等方面的不足，并展望了构建统一核算平台、深化系统集成优化、加强多情景模拟与政策协同效应评估、拓展全球价值链碳责任等未来研究方向，以期为推动中国造纸行业深度脱碳与高质量发展提供理论参考。

关键词：造纸行业；碳排放；碳核算；碳足迹；低碳转型；生命周期评价

中图分类号：TS7 文献标识码：A DOI: 10.11980/j.issn.0254-508X.2026.01.008

Research Progress on Carbon Emissions in China's Paper Industry: Accounting, Impacts, and Pathways

ZHAO Yunmo¹ ZHOU Zaifeng^{2,*} HE Shanshan³ DONG Fengxia² ZHOU Jun⁴ LEI Ming^{5,*}

(1. School of Economics, Minzu University of China, Beijing, 100081; 2. China National Pulp and Paper Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100102; 3. Lijiang Culture and Tourism College, Lijiang, Yunnan Province, 674199; 4. Nanning Vocational and Technical University, Nanning, Guangxi Zhuang Autonomous Region, 530008; 5. Guanghua School of Management, Peking University, Beijing, 100871)

(*E-mail: 17913177@qq.com; leiming@gsm.pku.edu.cn)

Abstract: This paper systematically reviewed carbon emission accounting methods and key issues from the perspectives of life cycle assessment (LCA), input-output analysis, and accounting boundaries. Secondly, it analyzed the spatiotemporal evolution characteristics of carbon emissions in China's paper industry and employed decomposition models to reveal the mechanisms of core driving factors such as economic growth, energy intensity, and energy structure. Finally, the paper pointed out deficiencies in existing research regarding data foundations, dynamic simulation, techno-economic comprehensive assessment, and policy synergy analysis. It also prospected future research directions, including building a unified accounting platform, deepening research on system integration and optimization, strengthening multi-scenario simulation and policy synergy effect evaluation, and expanding research on carbon responsibilities within global value chains, aiming to provide theoretical references for promoting deep decarbonization and high-quality development in China's pulp and paper industry.

Key words: pulp and paper industry; carbon emissions; carbon accounting; carbon footprint; low-carbon transition; life cycle assessment (LCA)

以二氧化碳(CO₂)为主的温室气体排放导致的全球气候变化已成为人类社会面临的重大挑战。为应对这一危机，中国作为负责任的大国，于2020年正式提出了“力争2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和”的宏伟目标（简称“双碳”目标）。造纸行业作为国民经济的重要基础性原材料产业，与日常生活和社会经济发展息息相关，但在制浆、造纸及废

水处理等环节需要消耗大量的能源、水和木材原料^[1-2]，因此造纸及纸制品业被纳入我国能源消耗和温

收稿日期：2025-11-02；修回日期：2025-11-28

*通信作者：周在峰，博士，正高级工程师；研究方向：产业经济、科技创新。雷明，教授，博士生导师；研究方向：环境经济管理、可持续发展。

室气体排放的重点行业之一。在国家持续推进“双碳”战略，加快可持续发展的环境下，造纸行业的低碳转型压力巨大，同时也蕴含着通过技术创新和模式变革实现绿色发展的历史机遇。

学术界和产业界对造纸行业碳排放问题的关注度不断上升。近20年来，尤其是“双碳”目标提出后，相关研究成果呈现井喷式增长，研究视角从宏观的行业碳排放核算与预测，逐步深入到微观的企业碳管理实践、产品碳足迹评价以及具体的低碳技术路径。这些研究为理解造纸行业的碳源碳汇特征、识别关键减排环节、评估政策效果提供了宝贵的知识积累。然而，现有研究分散于不同学科和领域，缺乏系统性的梳理与整合。鉴于此，本文通过对已有文献进行全面、系统的综述，厘清中国造纸行业碳排放研究的发展脉络、主要议题、核心发现与理论共识，指出现有研究的局限性与未来的研究方向，以期为该领域的后续研究以及行业与政府的决策提供参考依据。

1 造纸行业碳排放核算方法与系统边界研究

准确核算碳排放是开展一切减排工作的基础。对造纸行业而言，由于其产业链条长、工艺复杂、涉及生物质碳流，核算方法的选择与系统边界的界定直接决定了结果的科学性和可比性。造纸行业碳排放研究核心方法体系与关键议题如表1所示。

1.1 主流核算方法及其应用

当前，针对造纸行业的碳排放核算主要形成了两类方法：一是基于过程的生命周期评价法，二是基于

经济关联的投入产出法，以及二者结合的混合模型。

生命周期评价法是评估造纸产品从“摇篮到坟墓”全过程环境影响的主流工具。该方法强调对具体工艺过程的详细追踪。早期研究如陈莎等^[3]对中国纸产品全生命周期温室气体排放的分析，涵盖了林木种植、制浆造纸、运输、废纸回收处理等阶段，定量揭示了各环节的贡献。马倩倩等^[4]专门构建了适用于我国纸产品碳足迹的生命周期评估(LCA)框架，为标准化核算提供了方法学参考。该方法在评价特定产品(如包装用纸^[5]、文化用纸)，比较木浆、草浆、废纸浆等不同原料路线^[6]或工艺技术的碳排放优劣方面具有明显优势^[7]。近年来，随着“双碳”目标的深化，基于LCA的碳足迹研究更加精细化，孙明星等^[8]针对生物基打印纸的全生命周期碳足迹进行评估，考虑了更复杂的碳源碳汇过程。国外研究同样广泛应用LCA方法。Carrejo等^[9]对美国东南部典型硫酸盐法制浆造纸厂进行改造碳捕集与封存(CCS)的生命周期评估，应用了静态和动态LCA方法，并比较了以捕获的CO₂、生物质输入和纸张产出为功能单位的评估结果，展示了CCS改造如何将传统工厂从净排放源转变为净碳汇。Liang等^[10]从生命周期角度重新思考了纸产品的碳足迹核算标准，指出了现有国际标准(如PAS2050, GHG Protocol, ISO14067)之间的不一致性，并提出了更全面的核算框架。

投入产出法更多应用于宏观层面，分析行业间的隐含碳排放流动。赵庆建等^[11]构建了基于林浆纸供应链的多层次投入产出模型，用以追踪和计量隐含碳流

表1 造纸行业碳排放研究核心方法体系与关键议题

Table 1 Core methodological framework and key issues for carbon emissions research in the pulp and paper industry

核算与分析层面	主流研究方法与技术	关键议题与演变焦点
宏观:行业/区域层面	排放因子法(核算指南)、指数分解法(如LMDI)、情景模拟(SD, LEAP)	核算系统边界:从范围1、范围2向范围3拓展 生物质碳处理:从单列说明向动态评估深化 碳汇效应评估:从忽视向系统纳入与量化发展
中观:供应链/企业层面	投入产出分析(IOA)、生命周期评价(LCA)	绿色供应链管理:从关注内部生产向构建绿色供应链、优化利益分配演变 企业碳管理与披露:从合规性核算向战略性碳预算、碳资产管理和环境会计信息披露深化 市场机制响应:从成本视角看待碳交易向主动参与、开发碳汇项目等资产运营视角转变
微观:产品/工艺层面	生命周期评价(LCA)、流程模拟与优化	产品碳足迹精算:从行业平均数据向企业特定数据、追求核算标准统一与标签互认发展 过程碳热点识别:从整体能耗分析向识别干燥、蒸煮等具体高耗能工段并研发针对性技术演变 低碳技术评估:从单一技术可行性评价向技术经济性及系统集成可行性综合评价深化

与碳排放，能够有效连接市场需求与企业生产活动。这种方法有助于识别供应链上的热点排放环节，并从产业关联角度理解碳排放的驱动机制。黄丹^[12]利用投入产出模型计算我国纸制品出口贸易中的隐含碳排放。Zhou等^[13]以造纸产量与能源消耗为核心指标对比确认一种碳排放核算方法，并预测碳达峰碳中和时间。相较于LCA，投入产出法数据获取相对便捷，适用于大尺度的趋势分析和政策模拟。

此外，为适应企业温室气体核算与报告的需求，以《造纸和纸制品生产企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》为代表的排放因子法在实践中被广泛应用。该方法基于活动水平数据和相应的排放因子进行计算，主要覆盖范围一（直接排放）和范围二（外购电力热力排放）。陈诺等^[14]在此基础上，进一步优化了核算边界、温室气体种类和绩效指标，构建了更为全面科学的造纸企业碳排放核算模型，并通过案例对比发现，更全面的核算边界会导致碳排放结果更高，揭示了精确核算的重要性。

1.2 核算边界与关键议题

确定核算边界是核算工作的首要挑战。现有研究在边界设定上存在差异，主要围绕以下几个关键议题展开。

一是生物质碳排放的处理。造纸行业大量使用木材、竹材、秸秆等生物质原料，其燃烧或降解产生的CO₂是否计入总排放，是核算中的焦点问题。主流观点遵循IPCC指南，认为生物质能源的碳排放应在能源排放部分单列，因其碳来自大气中的生物循环，不计入化石燃料碳排放总量，但需在报告中予以说明^[15]。然而，对土地利用变化（如林地转化为纸浆林）引发的碳排放，以及废纸填埋处理产生的甲烷排放，是否纳入边界，不同研究处理不一。

二是碳汇效应的考量。造纸行业具有独特的“碳源”和“碳汇”双重属性。一方面，生产过程中排放CO₂；另一方面，通过林浆纸一体化模式营造的人工林、产品在使用和废弃阶段封存的碳，构成了碳汇。杨言朝等^[16]较早研究了木浆造纸的碳平衡问题，论证了可持续经营下的林纸一体化可以实现正的碳平衡。后续研究如张婷婷等^[17]在评估包装用纸碳排放时，明确考虑了碳汇特性，拓展了多尺度核算模型。将碳汇纳入核算框架，对于全面评价造纸行业的净碳排放乃至实现“零碳工厂”目标至关重要^[18]。

三是系统边界的拓展。早期核算多聚焦于生产环节（范围一和范围二）。随着研究的深入，边界不断向上下游拓展，包括原料获取的运输排放（范围三的

上游）、产品运输及废弃处理排放（范围三的下游）。陈姝岐等^[19]构建了纸产品全生命周期碳排放模型，系统纳入了原材料获取、生产、运输、使用和处置各阶段。边界的拓展使得碳足迹评估更为完整，但也对数据收集的广度和精度提出了更高要求。

目前多种核算方法并存且各有所长，但尚未形成完全统一、可无缝对接的核算标准体系。未来研究需推动核算方法的融合与标准化，特别是在生物质碳、碳汇核算以及供应链范围三排放方面建立更清晰、一致的准则。

2 造纸行业碳排放特征、影响因素与驱动机制研究

在明晰核算方法的基础上，大量研究致力于刻画我国造纸行业碳排放的时空特征，并运用多种模型解析其背后的驱动因素，为制定减排策略提供依据。

2.1 造纸行业碳排放的时空演变特征

从时间序列看，我国造纸行业碳排放总量在过去20多年间总体呈上升趋势。叶佳蓉^[20]的研究显示，1998—2014年行业碳排放量持续增长。徐士莹等^[21]指出，2000—2015年，尽管碳排放强度（单位产值碳排放）逐步下降，但总量受经济规模扩张驱动仍保持上升。这种“总量增、强度降”的特征在“双碳”目标提出前的快速发展阶段尤为明显。李海霞等^[22]对江西省2013—2022年的分析也表明，该省造纸行业碳排放年均增长率约为7%。国际研究关注全球及特定区域的趋势。Joyo等^[23]的分析表明，全球制浆造纸行业占工业直接CO₂排放的约2%，是能源密集型产业之一，脱碳压力显著。Kong等^[24]研究了中国造纸行业2005—2021年的能源使用和碳排放，指出尽管能源结构正向减少煤炭、增加生物质和电力转变，但煤炭仍占主导地位，总碳排放量呈增长趋势。

从空间分布看，碳排放呈现显著的区域不均衡性，与产业布局高度相关。山东、广东、浙江、江苏、福建等造纸大省，因其产业规模庞大，碳排放总量也位居全国前列。然而，不同区域的碳排放强度、能源结构、技术进步水平存在差异，导致了减排潜力和路径的多样性。

值得关注的是，造纸行业碳排放与经济增长之间的关系是研究热点。徐士莹等^[25]基于脱钩理论分析发现，2000—2015年大部分时间行业产值增长与碳排放呈“弱脱钩”状态，即经济增长速度快于碳排放增长速度，但绝对量仍在增加。实现从“弱脱钩”向“强脱钩”即经济增长而碳排放下降的转变，是行业低碳转型的核心目标。

2.2 造纸行业碳排放影响因素分解

为探究碳排放变化的驱动机制，对数平均迪氏指数（LMDI）分解模型被广泛应用。研究普遍将碳排放变化分解为几个核心效应：经济规模效应、能源强度效应、能源结构效应等。

经济规模效应（或产业规模效应）被认为是推动碳排放增加的最主要因素。研究表明，经济发展（产出增长）对碳排放增加的贡献率最大，资产规模（代表经济产出能力）是重要的因素。这反映了行业快速发展期，规模扩张带来的碳排放刚性增长。Wang^[26]对中国造纸行业2005—2019年碳排放影响因素的分析也证实，人均工业产值是主要的促进因素。

能源强度效应（即能效提升）是抑制碳排放增长的关键力量。几乎所有运用LMDI的研究均证实，单位产值能耗的下降有效抵消了部分由经济增长带来的碳排放增量，这体现了技术进步和能源管理在节能减排中发挥的积极作用。Kong等^[24]的研究强调了能源强度下降对中国造纸行业碳减排的贡献。

能源结构效应的影响则较为复杂。多数研究发现，以煤炭为主的能源消费结构是导致高碳排放的根源，能源结构优化对减排有积极作用，但其贡献在历史时期相对较弱。唐国民等^[27]通过排放因子分析，定量指出造纸系统中耗热工段和废物处理系统是CO₂排放的热点。因此，改变能源结构，特别是过程热能的绿色替代，被认为是深度脱碳的突破口。

此外，部分研究还纳入了原料结构效应（木浆、废纸浆、非木浆比例的变化）、劳动力效应等因素。综合来看，驱动我国造纸行业碳排放演变的是一个多因素共同作用的复杂系统，其中经济和产量增长带动了碳排放量的增长，技术进步和结构调整是阻止碳排放持续增长的主要力量。

3 造纸行业碳减排路径、技术与实践研究

基于对碳排放特征和影响因素的认识，学术界和产业界探索并提出了多条低碳转型路径，相关研究覆盖了技术、管理和政策等多个维度。造纸行业碳减排技术路径集成框架如表2所示。

3.1 源头控制：能源与原料结构优化

能源结构清洁化与替代是减排路径研究的重中之重。具体包括：①生物质能源利用，利用树皮、黑液、污泥等生产过程中产生的生物质废料进行资源化利用，替代部分化石燃料，这是造纸行业特有的优势^[28]。②可再生能源接入，在条件允许的地区和工厂，增加太阳能、风能等可再生能源电力的使用比例。③电气化与氢能应用，在低温干燥等环节探索电加热替代蒸汽，并前瞻性研究氢能的高温热源替代方面的潜力^[29]。

原料结构优化与循环经济是另一条根本性路径。①提高废纸回收利用率：赵晓迪^[30]的研究表明，废纸回收利用是造纸产业重要的碳减排途径。提高国内废纸回收质量和利用率，减少对进口纤维原料的依赖，不仅能降低原料获取阶段的碳排放，还能减少废弃物处理压力^[31]。②发展林浆纸一体化：该模式通过自营或合作造林，保障原料供应，同时林木生长过程吸收CO₂形成碳汇，部分抵消生产排放，是实现产业内部碳平衡的关键战略^[32]。侯雅楠等^[18]研究表明，典型的林浆纸一体化企业通过系统减排，完全有可能达到“零碳”工厂目标。

3.2 过程节能：技术创新与装备升级

节能技术改造贯穿于生产全过程。研究关注的焦点包括：制浆过程的节能蒸煮、高效黑液提取与蒸发；造纸过程的高效脱水、干燥部优化、余热回收；通用系统的电机变频、真空系统节能、泵与风机效率

表2 造纸行业碳减排技术路径集成框架

Table 2 Integrated framework of technology pathways for carbon reduction in the pulp and paper industry

战略路径	重点领域	核心技术/措施示例
源头控制(优化输入)	能源结构转型	生物质能源利用;绿电与可再生能源;供热电气化与氢能
	原料结构优化	提升废纸回收与利用;发展林浆纸一体化;非木纤维资源化利用
过程节能(提升效率)	节能技术改造	高效脱水与干燥技术;余热回收与梯级利用;电机变频等通用系统节能
	工艺与智能化革新	低碳新工艺研发;智能优化控制;区块链碳足迹追溯
末端治理(负碳技术)	碳捕集利用与封存	生物质CO ₂ 捕集(BECCS);燃烧后捕集(胺法);污泥热解制生物炭
	碳汇与资产管理	林业碳汇项目开发;企业碳预算体系构建
系统协同(集成优化)	产业链协同	构建绿色供应链;设计供应链协调机制
	综合系统规划	工业综合能源系统(PPIES)优化;多技术耦合与集成规划

提升等。这些技术通过降低单位产品的综合能耗，直接减少化石能源消耗和碳排放^[33]。具体的技术创新研究不断深入。Barrios等^[34]评估了利用无细胞酶混合物处理纤维，以改善脱水、提高纸张强度并显著降低干燥能耗的技术，为行业脱碳提供了生物技术创新路径。Robano等^[35]通过建模分析，指出利用纸浆厂的余热来满足胺基碳捕集系统的热能需求，可以有效降低碳捕集的电力惩罚，是实现过程集成的优化策略。

工艺革新与智能化是未来的研究方向。研发低能耗、低碳技术的造纸新工艺，以及通过工业互联网、大数据和人工智能技术，实现生产全流程的智能监控与优化调度，提升整体能效和资源利用率。袁祺等^[36]构建了基于区块链的碳足迹追溯系统，以解决碳排放数据管理中的可信与透明问题。

3.3 末端治理：碳捕集与利用及碳资产管理

碳捕集、利用与封存（CCUS）被认为是难以避免的碳排放的最后处理手段。国内外对此有较多探讨，Carrejo等^[37]论证了在现有硫酸盐法浆厂通过钠添加工艺结合石灰窑富氧燃烧煅烧，捕集生物源CO₂的技术可行性。Lefvert等^[38]研究了适用于中小型硫酸盐法浆厂的富氧燃烧和电弧等离子体煅烧等替代性碳捕集概念，旨在降低额外能源需求。此外，Sudibyo等^[39]研究了造纸厂污泥的热解，通过工艺条件和催化剂优化，旨在生产高碳稳定性的生物炭，这也是一种有效的碳移除与封存策略。尽管目前成本高昂，但作为技术储备，CCUS在造纸行业的应用前景已被纳入研究视野。

碳资产管理随着全国碳市场建设而日益重要。研究内容包括企业碳预算体系的构建^[40]、碳配额盈亏分析、碳汇项目开发与交易等。岳阳林纸股份有限公司等企业参与林业碳汇交易的实践表明，碳汇交易不仅能带来经济效益，还能显著提升企业的环境绩效和社会形象^[41]。同时，环境会计与碳会计信息披露的质量，也成为衡量企业低碳管理水平和履行社会责任的重要标尺^[42-43]。

3.4 系统优化：构建绿色供应链与集成规划

减排行动已从单个企业延伸到整个产业链。研究开始关注林浆纸绿色供应链的构建与利益分配问题^[44]，探讨如何通过供应链协同，优化资源配置，降低全链条的碳排放和环境成本。周柏旭等^[45]研究了考虑消费者低碳偏好和碳税政策的三级纸制品供应链协调机制，发现通过收益共享契约可以实现供应链整体优化和可持续发展。在系统集成规划方面，Zhou等^[46]提出了针对制浆造纸工业综合能源系统（PPIES）的

优化改造规划框架，该框架详细考虑了碳交易机制、碳减排设备（如碳捕集）和储热模型，并深入探索了生产调度的灵活性，为行业系统级降碳规划提供了方法支持。Skoglund等^[47]通过夹点分析，探讨了在化学浆厂同时进行木质素提取和碳捕集时，如何影响工厂的热回收目标、燃料使用和发电，揭示了不同技术路径间的相互作用。

除了具体技术，学者们也对行业整体脱碳路径进行了系统性梳理。Joyo等^[23]全面回顾了制浆造纸行业的脱碳路径，包括能效措施、纸张回收、转向生物质和氢能等碳中和燃料、供热电气化以及碳捕集与封存等。Buitrago等^[48]针对箱纸板生产，评估了包括高效回收锅炉、电锅炉、机械蒸汽再压缩以及先进纸机干燥技术在内的多种能效替代方案的生命周期和经济效益，绘制了边际减排成本曲线。

4 研究评述与未来展望

4.1 现有研究的主要贡献与共识

经过近20年的积累，特别是“双碳”目标提出后的集中攻关，我国造纸行业碳排放研究取得了丰硕成果，形成了若干重要共识：第一，明确了造纸行业碳排放核算的复杂性和系统性，生命周期思想成为主流。第二，定量揭示了经济增长与能源结构是驱动我国造纸行业历史碳排放增长的核心因素，而能效提升是关键抑制力量。第三，构建了以“能源结构优化、资源循环利用、林浆纸一体化、技术创新”为核心的减排路径体系。国际研究强化了这些共识，特别是在碳捕集与封存、生物质资源化利用、先进节能技术以及系统集成优化等方面提供了丰富的技术细节和案例分析。第四，肯定了环境规制等政策工具和企业主动转型在推动减排中的重要作用。

4.2 当前研究存在的不足

然而，现有聚焦造纸行业碳排放的研究仍存在一些局限，亟待突破。

（1）数据基础薄弱与核算口径不一：企业层面精细化的能源与物料流动数据难以获取，导致许多核算研究依赖于宏观统计或假设参数。不同研究在核算边界、排放因子、碳汇处理上存在差异，使得研究结果的可比性和叠加性受限。

（2）动态与前瞻性模拟不足：多数影响因素分析基于历史数据，对未来在技术突破、政策加码、市场剧变等多重情景下行业碳排放的演化路径、达峰时间及减排潜力的动态模拟研究尚显不足。

（3）技术-经济-环境综合评估欠缺：对单项低碳

技术的研究较多,但对技术群集成应用的系统性优化研究较少;对减排技术的环境效益关注多,而对其经济成本、投资回报周期及大规模推广的市场壁垒进行综合评价的研究较少。

(4) 政策协同与有效性评估不深:对单一政策的讨论较多,但对碳税、补贴、绿色信贷、技术标准、环保督察等多种政策工具如何组合搭配、形成协同效应,从而以最小社会成本实现减排目标的机制研究还不够深入。

(5) 国际视野与价值链责任有待拓展:在全球产业链分工背景下,对中国造纸行业贸易隐含碳、碳泄漏风险以及在全球纸产品低碳供应链中定位和责任的研究,仍有较大拓展空间。

4.3 未来研究方向展望

面向未来,为更好地支撑造纸行业深度脱碳,早日实现碳达峰碳中和目标,需要在以下方向继续深化和拓展。

(1) 构建统一、动态的行业碳排放数据库与核算平台:推动产学研合作,建立涵盖主要工艺、装备、原料和产品的权威排放因子数据库。利用物联网、区块链等技术,开发企业碳数据实时监测与管理系统,为精准核算和动态监管奠定基础。

(2) 深化减排技术集成与系统优化研究:从关注单项技术转向研究整个生产系统的低碳化重构。运用流程模拟、人工智能等方法,对能源系统、物料系统、生产系统进行协同优化设计,寻求全局最优的低碳解决方案。同时注重不同脱碳技术之间的相互作用与协同效应。

(3) 加强多情景动态模拟与路径优化研究:构建集成技术学习曲线、政策干预、市场响应等因素的系统动力学或可计算一般均衡模型,模拟在不同转型力度和速度下,行业碳排放的演化轨迹、经济影响及社会效应,为制定分阶段、差异化的转型路线图提供科学依据。

(4) 开展多政策工具协同效应的机制设计与评估:运用政策模拟和案例对比方法,研究不同政策工具的组合策略、作用条件及交互影响,为政府设计高效、公平的政策组合包提供决策支持。

(5) 拓展全球价值链视角下的碳责任与合作研究:在全球碳中和浪潮下,研究中国造纸行业如何通过绿色技术输出、低碳产品贸易、国际标准对接等方式,深度参与并引领全球纸业低碳转型。对具有全球分布特点的“一带一路”沿线国家造纸行业的隐含碳排放及影响因素研究也值得关注。

5 结 语

推动造纸行业绿色低碳转型,是我国实现“双碳”目标不可或缺的一环。通过系统回顾造纸行业碳排放研究进展,表明学术界已在碳排放核算方法、特征影响因素、减排技术路径及企业实践等方面取得了显著成果,为行业转型提供了重要的理论依据和实践指引。当前,造纸行业的低碳发展已从概念探讨进入实质性推进阶段,共识在于必须依靠技术创新、结构优化、管理提升和政策引导的综合施策。然而,面对深度脱碳的艰巨任务,现有研究在数据基础、动态分析、技术经济综合评价及政策协同等方面仍存在不足。未来研究需朝着更精细化、系统化、动态化和国际化的方向努力,通过跨学科协作和产学研深度融合,持续为造纸行业破解低碳转型难题、探索高质量发展新范式贡献智慧与方案,助力造纸行业在生态文明新时代焕发新的生机,为我国乃至全球的碳中和愿景做出应有贡献。

参 考 文 献

- [1] 吕泽瑜,蒋彬,孙慧,等.我国造纸行业碳排放现状及减排途径[J].中国造纸学报,2017,32(3):64-69.
LYU Z Y, JIANG B, SUN H, et al. Present Situation and Reduction Approach of Carbon Emission of China's Paper Industry[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2017, 32(3): 64-69.
- [2] 何旭丹,王焕松,贾学桦,等.中国造纸和纸制品行业碳排放特征及减排路径分析[J].中国造纸,2023,42(11):144-151.
HE X D, WANG H S, JIA X H, et al. Analysis of Carbon Emission Characteristics and Emission Reduction Path in China's Paper and Paper Products Industry[J]. China Pulp & Paper, 2023, 42(11): 144-151.
- [3] 陈莎,杨孝光,李焱佩,等.中国纸产品全生命周期GHG排放分析[J].北京工业大学学报,2014,40(6):944-949.
CHEN S, YANG X G, LI Y P, et al. GHG Emissions Analysis of Paper Products in China Based on Life Cycle Assessment[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(6): 944-949.
- [4] 马倩倩,卢宝荣,张清文.基于生命周期评价(LCA)的纸产品碳足迹评价方法[J].中国造纸,2012,31(9):57-62.
MA Q Q, LU B R, ZHANG Q W. Carbon Footprint Assessment Method of Paper Products Based on Life Cycle Assessment[J]. China Pulp & Paper, 2012, 31(9): 57-62.
- [5] 廖海昆,孙彬青,邱浩伦,等.基于LCA的纸包装碳排放计算及减排案例分析[J].天津造纸,2024,46(3):34-43.
LIAO H K, SUN B Q, QIU H L, et al. Carbon Emission Calculation and Reduction Case Analysis of Paper Packaging Based on LCA[J]. Tianjin Paper Making, 2024, 46(3): 34-43.
- [6] 张欢,张辉.麦草造纸碳足迹算法及低碳路径研究[J].林产化学与工业,2012,32(6):11-16.
ZHANG H, ZHANG H. Wheat Straw Pulping Carbon Footprint Calculation and Low Carbon Pathway Research[J]. Chemistry and In-

- dustry of Forest Products, 2012, 32(6): 11-16.
- [7] 徐士莹. 中国纸产品碳排放核算及低碳发展路径研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
- XU S Y. Research on Carbon Emission Accounting and Low-carbon Development Path of Paper Products in China[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.
- [8] 孙明星, 石磊. 碳中和背景下生物基产品碳足迹评估[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5607-5617.
- SUN M X, SHI L. Carbon Footprint Assessment of Bio-based Products under the Background of Carbon Neutrality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5607-5617.
- [9] CARREJO E, ORTEGA R, LAN K, et al. Quantifying Atmospheric Carbon Removal at Pulp and Paper Mills: A Life Cycle Assessment across System Boundaries [J]. Carbon Neutrality, DOI: 10.1007/s43979-025-00156-5
- [10] LIANG Z, DENG H, XIE H, et al. Rethinking the Paper Product Carbon Footprint Accounting Standard from a Life-cycle Perspective [J]. Journal of Cleaner Production, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136352.
- [11] 赵庆建, 温作民, 张敏新, 等. 基于林浆纸供应链的隐含碳流与碳排放计量研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(8): 39-46.
- ZHAO Q J, WEN Z M, ZHANG M X, et al. Research on Embodied Carbon Flow and Carbon Emission Measurement Based on Forest-pulp-paper Supply Chain[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(8): 39-46.
- [12] 黄丹. 碳关税对我国纸制品出口影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- HUANG D. Research on the Impact of Carbon Tariff on China's Paper Products Export[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [13] ZHOU Z, WEI F. Research on Carbon Peak and Carbon Neutrality Technological Pathways in the Chinese Papermaking Industry [J]. Paper and Biomaterials, 2023, 8(4): 69-79.
- [14] 陈诺, 刘路, 姚久迪, 等. 造纸和纸制品行业企业碳排放核算模型构建及应用[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2025, 51(3): 134-142.
- CHEN N, LIU L, YAO J D, et al. Construction and Application of Carbon Emission Accounting Model for Enterprises in Paper and Paper Products Industry [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2025, 51(3): 134-142.
- [15] 刘焕彬, 李继庚, 陶劲松. 发展低碳造纸工业的几点思考[J]. 中国造纸, 2011, 30(1): 51-56.
- LIU H B, LI J G, TAO J S. Thoughts on Developing Low-carbon Paper Industry[J]. China Pulp & Paper, 2011, 30(1): 51-56.
- [16] 杨言朝, 李怒云. 木浆造纸的碳平衡研究[J]. 世界林业研究, 2007(5): 77-80.
- YANG Y C, LI N Y. Carbon Balance Study on Wood Pulp Paper-making[J]. World Forestry Research, 2007(5): 77-80.
- [17] 张婷婷, 满奕, 韩育林. 包装用纸行业多尺度碳排放核算评估及低碳转型策略分析[J]. 中国造纸, 2025, 44(2): 98-106.
- ZHANG T T, MAN Y, HAN Y L. Multi-scale Carbon Emission Accounting Assessment and Low-carbon Transition Strategy Analysis for Packaging Paper Industry [J]. China Pulp & Paper, 2025, 44(2): 98-106.
- [18] 侯雅楠, 张亮, 贾学桦, 等. 典型林浆纸一体化企业“零碳”工厂创建路径研究[J]. 中国造纸, 2023, 42(8): 31-36.
- HOU Y N, ZHANG L, JIA X H, et al. Research on the Path to Create a “Zero Carbon” Factory for a Typical Forest-Pulp-Paper Integrated Enterprise[J]. China Pulp & Paper, 2023, 42(8): 31-36.
- [19] 陈殊岐, 孙豪祥. 碳交易视角下的纸质产品全生命周期碳排放建模研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(2): 48-51.
- CHEN S Q, SUN H X. Research on Carbon Emission Modeling for the Whole Life Cycle of Paper Products from the Perspective of Carbon Trading[J]. Paper Science & Technology, 2025, 44(2): 48-51.
- [20] 叶佳蓉. 中国造纸和纸制品业碳排放时空分布及其驱动因素研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- YE J R. Research on the Spatio-temporal Distribution and Driving Factors of Carbon Emissions in China's Paper and Paper Products Industry[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [21] 徐士莹, 杨加猛, 刘梅娟. 中国造纸及纸制品业碳排放因素分解与减排潜力分析[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(5): 638-643.
- XU S Y, YANG J M, LIU M J. Factor Decomposition and Emission Reduction Potential Analysis of Carbon Emissions in China's Paper and Paper Products Industry[J]. Resource Development & Market, 2018, 34(5): 638-643.
- [22] 李海霞, 孙李媛, 谢运生, 等. 江西省造纸和纸制品行业碳排放影响因素分析[J]. 能源研究与管理, 2024, 16(4): 49-56.
- LI H X, SUN L Y, XIE Y S, et al. Analysis of Influencing Factors of Carbon Emissions in Paper and Paper Products Industry in Jiangxi Province[J]. Energy Research and Management, 2024, 16(4): 49-56.
- [23] JOYO F H, NASTASI B, GARCIA D A. Decarbonization pathways for the pulp and paper industry: A comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, DOI: 10.1016/j.rser.2025.1160700.
- [24] KONG L, CHEN L, EICHHAMMER W. Assessing energy use, carbon emissions and its driving factors for the pulp and paper industry in China [J]. Journal of Cleaner Production, DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144832.
- [25] 徐士莹, 杨加猛. 中国造纸及纸制品业碳排放与经济增长的脱钩关系研究[J]. 中华纸业, 2018, 39(5): 54-58.
- XU S Y, YANG J M. Analysis on the Decoupling between Carbon Emissions and Economic Growth in China Pulp and Paper Industry [J]. China Pulp & Paper Industry, 2018, 39(5): 54-58.
- [26] WANG H. Analysis on influencing factors of carbon emissions from China's pulp and paper industry and carbon peaking prediction[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(37): 86790-86803.
- [27] 唐国民, 赵光磊. 浆纸企业CO₂排放因子分析及计算方法研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 757-761.
- TANG G M, ZHAO G L. Analysis and Calculation Method of CO₂ Emission Factors for Pulp and Paper Enterprises [J]. China Environmental Science, 2012, 32(4): 757-761.
- [28] 程言君, 张亮, 王焕松, 等. 中国造纸工业碳排放特征与“双碳”目标路径探究[J]. 中国造纸, 2022, 41(4): 1-5.
- CHENG Y J, ZHANG L, WANG H S, et al. Carbon Emission Characteristics and Pathway Exploration for “Dual Carbon” Goals in China's Paper Industry[J]. China Pulp & Paper, 2022, 41(4): 1-5.
- [29] 陈诺. 造纸和纸制品行业企业碳排放核算模型构建及减排路径分析研究[D]. 上海: 东华大学, 2025.
- CHEN N. Research on the Construction of Carbon Emission Ac-

- counting Model and Analysis of Emission Reduction Pathways for Enterprises in the Paper and Paper Products Industry [D]. Shanghai: Donghua University, 2025.
- [30] 赵晓迪. 废纸回收利用对中国造纸产业碳减排的影响研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
ZHAO X D. A Research on Impact of Waste Paper Recycling and Utilization to Chinese Papermaking Industry [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [31] 唐晓秘. 城市生活垃圾回收利用对纸类和塑料碳排放影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
TANG X M. Impact of Recycling Municipal Solid Waste on Life-cycle Greenhouse Gas Emissions of Paper and Plastic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [32] 杨加猛, 万文娟, 季小霞, 等. 林纸低碳供应链的共生动力研究 [J]. 林业经济问题, 2014, 34(4): 314-318.
YANG J M, WAN W J, JI X X, et al. Research on Symbiosis-driving Factors of Low Carbon Supply Chain for Forestry-paper Industry [J]. Problems of Forestry Economics, 2014, 34(4): 314-318.
- [33] 徐克辉, 刘江博. 基于循环利用的造纸厂给排水管网节能技术应用分析 [J]. 华东纸业, 2025, 55(11): 87-89.
XU K H, LIU J B. Application Analysis of Energy-saving Technology for Water Supply and Drainage Pipe Networks in Paper Mills Based on Recycling [J]. East China Pulp & Paper Industry, 2025, 55(11): 87-89.
- [34] BARRIOS N, GONZALEZ M, VENDITTI R, et al. Synergistic cell-free enzyme cocktails for enhanced fiber matrix development: improving dewatering, strength, and decarbonization in the paper industry [J]. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, DOI: 10.1186/s13068-025-02646-1.
- [35] ROBANO E, KLINGMANN J, FATEHI H. Reducing Electricity Penalty of Carbon Capture by Waste Heat Valorization in an Industrial Pulp Mill [J]. BioEnergy Research, DOI: 10.1007/s12155-025-10888-y.
- [36] 袁 祺, 孙希云. 基于区块链技术的纸业碳足迹追溯系统 [J]. 中华纸业, 2025, 46(10): 115-117.
YUAN Z, SUN X Y. Blockchain-based Carbon Footprint Traceability System for the Paper Industry [J]. China Pulp & Paper Industry, 2025, 46(10): 115-117.
- [37] CARREJO E, JAMEEL H, PARK S, et al. Biogenic Carbon Capture at Pulp Mills via Sodium Spiking and Oxy-fuel Calcination [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, DOI: 10.1016/j.ijggc.2025.104409.
- [38] LEFVERT A, GRÖNKVIST S. Smarter Ways to Capture Carbon Dioxide-Exploring Alternatives for Small to Medium-scale Carbon Capture in Kraft Pulp Mills [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, DOI: 10.1016/j.ijggc.2025.104409.
- [39] SUDIBYO H, DURÁN-JIMÉNEZ G, SUDIYANI Y, et al. Pyrolysis of Pulp and Paper Mill Sludge: Mechanistic Effects of Process Conditions and Feldspar Catalysis on Product Formation and Biochar Carbon Permanence [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, DOI: 10.1016/j.jaap.2025.107376.
- [40] 徐思易, 谢 煜, 马金霞. 造纸和纸制品生产企业的碳预算体系构建研究 [J]. 中国造纸, 2025, 44(11): 163-171.
XU S Y, XIE Y, MA J X. Research on the Construction of Carbon Budget System for Paper and Paper Products Production Enterprises [J]. China Pulp & Paper, 2025, 44(11): 163-171.
- [41] 赵 元. 岳阳林纸碳汇交易对环境绩效的影响研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
ZHAO Y. Research on the Impact of Yueyang Paper's Carbon Sink Trading on Environmental Performance [D]. Beijing: North China University of Technology, 2023.
- [42] 王晓天, 卓 娜. “双碳”背景下造纸行业环境会计信息披露研究——以青山纸业为例 [J]. 老字号品牌营销, 2024(16): 142-144.
WANG X T, ZHUO N. Research on Environmental Accounting Information Disclosure in the Paper Industry under the Background of “Dual Carbon”—Taking Qingshan Paper as an Example [J]. Time-honored Brand Marketing, 2024(16): 142-144.
- [43] 汤艺萌. 造纸及纸制品行业碳会计信息披露质量评价研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
TANG Y M. Research on the Quality Evaluation of Carbon Accounting Information Disclosure in the Paper and Paper Products Industry [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.
- [44] 刘美娟, 侯旭晖. 双碳视角下林浆纸绿色供应链权益分配优化模型搭建研究 [J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(8): 35-38.
LIU M J, HOU X H. Research on the Construction of an Optimization Model for Benefit Distribution of Forest-pulp-paper Green Supply Chain from the Perspective of Dual Carbon [J]. Paper Science & Technology, 2025, 44(8): 35-38.
- [45] 周柏旭, 吴金卓, 王 卉. 考虑消费者低碳偏好和碳税政策的三级纸制品供应链协调机制研究 [J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(4): 461-470.
ZHOU B X, WU J Z, WANG H. Research on Coordination Mechanism of Three-level Paper Products Supply Chain Considering Consumer Low-carbon Preference and Carbon Tax Policy [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 461-470.
- [46] ZHOU S, MOU R, GU W, et al. Optimal retrofit planning of pulp and paper industrial integrated energy system for enhancing flexibilities and carbon reduction capabilities [J]. Applied Energy, DOI: 10.3389/fther.2023.1282028.
- [47] SKOGLUND H, FU C, HARVEY S, et al. Integration of Carbon Capture in a Pulp Mill—Effect of Strategic Development towards Better Biomass Resource Utilization [J]. Frontiers in Thermal Engineering, DOI: 10.3389/fther.2023.1282028.
- [48] BUITRAGO-TELLO R, VENDITTI R A, JAMEEL H, et al. Energy Efficient Alternatives to Decarbonize the Pulp and Paper Industry—the Case of Linerboard Production [J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2025, 19(6): 1887-1903. CPP