

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.016

论文标题： 基于生命周期评价的芦竹替代木材制浆减排潜力与森林碳汇保护效益

作　　者： 胡晓丹，李 莹，黄雪宁，等

收稿日期： 2025-07-27

引文格式： 胡晓丹,李莹,黄雪宁,等.基于生命周期评价的芦竹替代木材制浆减排潜力与森林碳汇保护效益[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):159-171.

Hu X D, Li Y, Huang X N, et al. The potential for reducing emissions through the substitution of giant reed for wood in pulp production and the benefits of forest carbon sequestration based on life cycle assessment[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026, 46(8):159-171.

相关论文推荐

Recommended articles

中国林产工业嵌入全球价值链对贸易隐含碳排放的影响

Influences of China’s forest product industry embedding in the global value chain on the embodied carbon emissions in trade

湖南省碳排放强度与森林碳汇地域差异分析

Research on the regional difference of carbon emission intensity and forest carbon sequestration in Hunan Province

城市常见植被固碳与VOC排放的相关性及其应用潜力

Correlation between carbon fixation and volatile organic compounds emission of common urban afforestation tree species and theirs application potential

我国林业经济周期的区制状态划分与转移分析——基于MS-AR模型的实证

Analysis on the regime division and dynamic change of China’s forestry economic cycle: an empirical study based on MS-AR model

纤维板生产环境影响的生命周期分析模型研究

Methodological model of effect of fiberboard production environments on life cycle

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.016
http: //qks.csuft.edu.cn

基于生命周期评价的芦竹替代木材制浆减排潜力与森林碳汇保护效益

胡晓丹[1]，李　莹[1]，黄雪宁[1]，刘孝贤[1]，许茜茜[1]，胡　玥[1]，刘海英[2]，武曙红[1]
（1. 北京林业大学，北京 100083；2. 新乡化纤股份有限公司，河南 新乡 453000）

摘　要：【目的】我国纸浆行业是温室气体排放的重要贡献者，其木材原料获取过程导致的森林碳汇损失尤为突出。国内木浆产量和消耗量持续攀升，进一步加剧了碳排放与木材资源压力，对实现行业减排目标构成严峻挑战。为应对这一挑战，缓解森林碳储量损失并降低行业碳排放水平，提出芦竹原料替代木浆原料生产纸浆，并评估其减排潜力及森林碳汇保护效益。【方法】采用生命周期评价法，量化分析木浆与芦竹浆产业链的温室气体排放，系统评估原料替代策略（芦竹替代木材）在纸浆行业减排中的潜在贡献。【结果】芦竹替代木材生产纸浆可显著降低温室气体排放，不同纸浆类型（BCP、UBCP、CMP）的单位产量（1 Adt）减排量为 0.056 ～ 0.214 tCO_2e，相当于减少 3.42% ～ 14.76% 的温室气体排放，其中原料收集和运输阶段是关键减排环节。同时，使用 1 Adt 芦竹浆可减少约 4.732 m^3 的木材采伐，保留约 4.844 tCO_2e 的森林碳储量。基于 2025 年我国 46 家制浆工厂 65 条生产线的木浆产能规划情景分析表明，漂白化学浆（BCP）的减排潜力最大，山东、湖北和广西是减排的关键区域。在 2060 碳中和目标下，全面实施芦竹原料替代策略，预估每年可保留 39.26 ～ 157.05 $TgCO_2e$ 的森林碳储量，并显著降低我国对进口木材的依赖。【结论】芦竹原料替代木材原料生产纸浆，具有显著的温室气体减排与森林碳汇保护的协同效益，不仅能降低我国对进口木材的依赖，还能为纸浆行业落实国家 2060 碳中和目标提供科学可行的技术支撑。

关键词：纸浆行业；原料替代；芦竹；生命周期评估；GHG 减排；森林碳储量
中图分类号：S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)08-0159-13

The potential for reducing emissions through the substitution of giant reed for wood in pulp production and the benefits of forest carbon sequestration based on life cycle assessment

Hu Xiaodan[1], Li Ying[1], Huang Xuening[1], Liu Xiaoxian[1], Xu Xixi[1], Hu Yue[1], Liu Haiying[2], Wu Shuhong[1]

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Xinxiang Chemical Fiber Co., Ltd, Xinxiang 453000, Henan, China)

Abstract:【Objective】China's pulp industry is a significant contributor to greenhouse gas emissions, and the loss of forest carbon sinks due to the process of obtaining wood raw materials is particularly significant. Domestic wood pulp production and consumption continue to rise, further intensifying carbon emissions and pressure on timber resources, posing a serious challenge to achieving industry emission reduction targets. To address this challenge, mitigate the loss of forest carbon stocks and reduce carbon emissions from the industry, this study proposes the replacement of wood pulp raw materials with giant reed raw materials in the production of pulp and evaluates the potential for emission reduction and avoidance of the loss of forest carbon stocks.【Method】This study adopts the Life Cycle Assessment (LCA) method to quantitatively analyze the greenhouse gas (GHG) emissions of the wood pulp and giant reed pulp industry chain, and systematically assesses the potential contribution of the raw material substitution strategy (giant reed instead of wood) in the reduction of emissions in the pulp industry.【Result】The replacement of wood by giant reed in the production of pulp significantly reduces greenhouse gas emissions. The life cycle assessment shows that the emission reduction per unit of production

收稿日期（Received）：2025-07-27　　**修订日期**（Revised）：2025-10-20
基金项目：国家林业和草原局林业标准制修订项目（2021-LY-025）。
第一作者：胡晓丹（huxiaodan@bjfu.edu.cn），硕士研究生。**通信作者：**武曙红（wshuhong@126.com），教授，博士，博士研究生导师。
引文格式：胡晓丹 , 李莹 , 黄雪宁 , 等 . 基于生命周期评价的芦竹替代木材制浆减排潜力与森林碳汇保护效益 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(8):159-171.
Hu X D, Li Y, Huang X N, et al. The potential for reducing emissions through the substitution of giant reed for wood in pulp production and the benefits of forest carbon sequestration based on life cycle assessment[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026, 46(8):159-171.

(1 Adt) for different pulp type (BCP, UBCP, CMP) is about 0.056-0.214 tCO_2e, which is equivalent to a reduction of GHG emissions by 3.42%-14.76%, with the raw material collection and transportation stages being the key emission reduction links. At the same time, the use of 1 ton of ruderalis pulp reduces timber harvesting by about 4.732 m^3 and retains about 4.844 tCO_2e of forest carbon stocks. The analysis of wood pulp capacity planning scenarios based on 65 production lines in 46 pulp mills in China in 2025 shows that bleached chemical pulp (BCP) has the greatest potential for emission reductions, and that Shandong, Hubei, and Guangxi are key regions for emission reductions. Under the 2060 carbon neutrality goal, the full implementation of the giant reed feedstock substitution strategy is predicted to retain about 39.26-157.05 $TgCO_2e$ of forest carbon stocks per year and significantly reduce dependence on imported wood. 【Conclusion】Substitution of giant reed raw materials for wood raw materials for pulp production has significant synergistic benefits of greenhouse gas emission reduction and forest carbon sink protection, which not only reduces dependence on imported wood, but also provides scientific and feasible technological support for the pulp industry to implement the national 2060 carbon neutrality goal, while significantly reducing dependence on imported wood.

Keywords: pulp industry; raw material substitution; giant reed; life cycle assessment; GHG emission reduction; forest carbon stock

纸浆行业是全球温室气体（Greenhouse gas，GHG）的重要贡献者，同时也是我国温室气体的重点排放行业之一[1]。纸浆木材获取过程可能导致森林损失[2]，从而产生大量温室气体[3-4]。2010—2050 年，林木采伐产生 3 500 ～ 4 200 $TgCO_2e$ 的年化碳成本[5]，其中 50% 由国际贸易驱动[6]。因此，基于消费的核算框架，需要将林木采伐产生的排放纳入统计范围[7]。我国是全球最大的纸浆生产国之一，亟须通过原料替代策略降低木材依赖，实现行业低碳转型[8]。

纸浆中的木浆由各类木材制成。制浆是一个涵盖林业、化工制造、交通运输、能源消耗和废弃物处理等多环节的复杂产业链[9]，仅针对单一阶段开展温室气体（GHG）减排，难以取得系统性的减排效果。因此，本研究基于生命周期视角，系统评估芦竹替代木材原料应用于制浆产业链的综合减排效益[10]。

目前，我国正在积极推进非木纤维原料的开发利用[11]。国家与地方层面已相继出台多项政策，支持非木纤维原料产业的发展。已有研究发现，秸秆[1,12-18]、芦苇[12,19]、甘蔗渣[20]、大麻和亚麻[21-22]等非木材原料虽可用于制浆，但其生产过程中的能源消耗和废弃物产生量显著高于木浆[13,17]，在减排效益方面存在明显局限。因此，我们需要寻找更具环境友好性的原料，来替代木材原料生产纸浆。

芦竹 *Arundo donax* 作为一种潜在的木材替代原料日益受到学界关注[23-24]。在相同制浆工艺条件下，芦竹浆的主要性能指标（包括纤维长度、纤维宽度等）均优于阔叶木浆（如杨木浆、桉木浆）。相关研究还发现，国产芦竹新品种的制浆性能显著优于其他非木原料（如秸秆、甘蔗渣、麦草等）[25]。此外，芦竹具备优良的抗逆性（耐旱、耐盐碱等）[26]、改良盐碱地和生态修复功能[27]。然而，现有研究多集中于芦竹的理化性质和制浆工艺，对其生命周期温室气体排放的系统研究尚属空白。

现有研究已经对我国木浆全生命周期 GHG 排放进行了较为系统的评估。Xu 等[28]研究发现，桉树种植过程中施用化肥会对环境产生显著影响，其中上游原料和能源的生产过程所造成的酸化影响占比超过一半。Zhang 等[29]统计了木材采伐、制浆、废水处理过程中 GHG 的排放量，发现纸浆的碳强度为 0.23 tCO_2/Adt。Man 等[30]估算了纸浆产业链中水与能源的消耗量，并探索了该产业资源节约潜力。Zhao 等[31]评估了林业 - 纸浆 - 造纸生产过程中各步骤的 GHG 排放，发现材料运输和制浆是 GHG 排放的主要来源。Man 等[1,32]统计了各生命周期的能耗，进一步量化了不同类型木浆的 GHG 排放特征。高逸翔等[33]分析了国产木浆与进口木浆（巴西木浆）的环境影响差异，得出国产木浆的环境影响比巴西木浆低 2% ～ 41%。然而，现有研究仍存在两个重要局限：首先，未充分考虑进口木材原料的排放归属问题，根据 Pendrill 等[7]提出的消费端核算原则，由国际贸易驱动的木材采伐排放应计入消费国；其次，对于原料运输环节的 GHG 排放估算过于简化，未能反映我国木材原料获取的实际运输状况。

目前，已有部分研究围绕木浆行业提出了相应的减排策略。Gao 等[34]提出通过提高木材的制浆得率减少原料消耗，但该技术存在能耗显著升高的局限性。Man 等[1,32]通过情景分析指出，优化能源结构和采用低碳技术可实现减排目标。然而，上述研究主要聚焦于生产工艺的改进，未能充分挖掘原料阶段的减排潜力，而原料获取恰恰是木浆全生命周期排放的重要来源之一。

综上所述，本研究创新性地提出了以芦竹替代木材原料生产纸浆的减排策略，并系统评估了该策略对纸浆行业 GHG 减排的潜在贡献。基于生命周期评价方法，量化并对比分析芦竹浆与木浆在全流程、各阶段的 GHG 排放差异，并估算采用

芦竹替代木材制浆对森林碳储量的保护效应。本研究结合 2025 年我国 46 家工厂 65 条生产线的木浆产能规划，分析了不同纸浆工艺的减排潜力及其区域分布特征。本研究结果为我国纸浆行业实现低碳转型提供了全新的技术路径。通过原料替代，不仅能够降低产品全生命周期的碳排放，还可以减少我国对木材进口的依赖，同时对森林碳汇功能实现有效保护。

1　材料与方法

1.1　功能单位和系统边界

本研究采用生命周期评价方法（Life cycle assessment，LCA），对木浆与芦竹浆生产过程中的温室气体排放进行系统分析 [35-36]。本研究以每吨风干浆（Adt）作为功能单位，对木浆和芦竹浆全生命周期的 GHG 排放进行量化对比。研究对象包括传统氯漂白化学浆、无元素氯漂白化学浆、全无氯漂白化学浆、未漂白化学浆和化学机械浆共 5 种常见纸浆类型（图 1）。

系统边界涵盖原料收集（S1-1）、化学品生产（S1-2）、运输（S2）、制浆（S3）和废水处理（S4）5 个关键阶段 [1,37]（图 2）。本研究通过量化单位产量（1 Adt）芦竹浆替代木浆的 GHG 减排效益，基于 2025 年我国 46 家制浆工厂 65 条生产线的木浆产能规划，评估该原料替代策略的区域减排潜力。

1.2　计算方法

1.2.1　基于生命周期的减排量

芦竹替代木材原料生产纸浆的减排量是通过木浆的碳排放量减去芦竹浆的碳排放量计算得出的。每吨木浆或芦竹浆的总碳排放量是系统边界内生命周期各阶段所有排放源的排放数据总和。生命周期由原料收集阶段、化学品生产阶段、运输阶段、制浆阶段、废水处理阶段组成 [9,32]。原料收集阶段（S1-1）的 GHG 排放主要来源于采伐作业中化石燃料和电力消耗 [38]；化学品生产阶段（S1-2）的 GHG 排放由不同制浆方法中化学品的类型和消耗量决定 [39]；运输阶段（S2）包括原料运输和化学品运输，其 GHG 排放来源为交通工具运输过程中燃料的消耗 [40]；制浆阶段（S3）的 GHG 排放主要来源于电力、煤、蒸汽及其他能源消耗 [40]；废水处理阶段（S4）的 GHG 排放主要来源于废水厌氧处理导致的甲烷排放。各生命周期的减排量计算参考文献 [1,41]。

1.2.2　替代木材原料而保留的森林碳储量

本研究通过芦竹原料替代木材原料生产纸浆，可有效减少原生林木采伐量，从而保护森林碳储量。本研究仅考虑原生木材原料，不包括采伐剩余物、造材剩余物和加工剩余物 [42]。采伐木碳储量计算方法参考文献 [43]。

1.3　数据收集

原料收集阶段的 GHG 排放主要来源于作业过程中的能源消耗。木材原料选择我国制浆常用的树种（包括桉木、桦木、杨木、相思木和辐射松）[31,44-47]，各工艺制浆的树种构成如表 1 所示，各工艺不同树种的占比根据行业数据设定。木材原料收集涉及伐木、集材、装车、运材、贮木场 5 项工序，其能耗数据参考 LY/T 1062—2025《木材生产及板材加工生产综合能耗》。芦竹原料收集主要包括机械收割和打捆作业，相关数据通过实地调研和文献 [32] 获得。不同制浆工艺和制浆方法需要不同类型的化学品，本研究分别采用文献

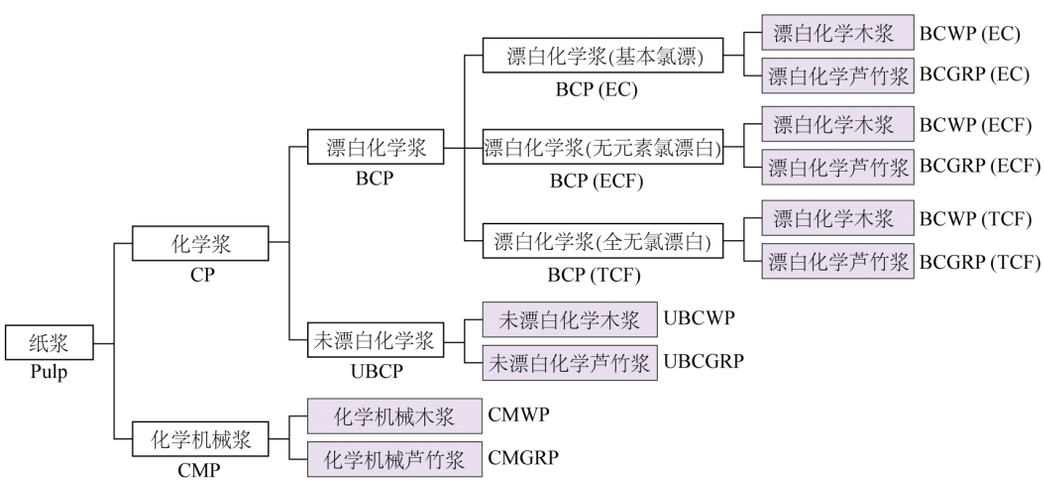


图 1　纸浆类型
Fig. 1　Pulp types

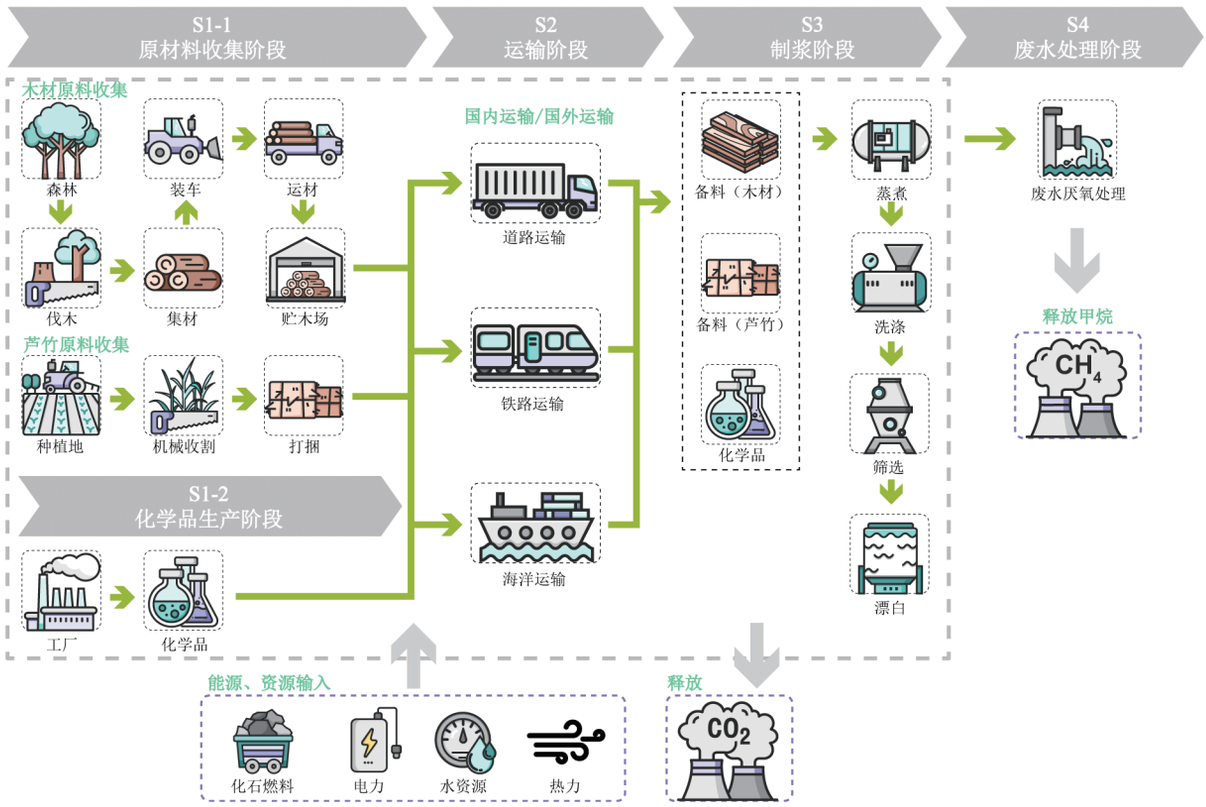


图 2 系统边界
Fig. 2 System boundary

数据 [1] 和专利数据作为木浆和芦竹浆化学品生产的能耗数据。

本研究将运输阶段分为原料运输和化学品运输模式，其中原料运输包括国产木材和进口木材运输。如表 2 所示，进口木材假设为 3 种运输模式，综合海洋运输和陆地运输环节；国产木材基于我国纸浆林基地实际分布，假设为道路运输和铁路运输 2 种运输模式。化学品运输统一假设为 200 km 公路运输，该假设符合我国制浆企业的平均运输距离。

化学浆生产包括备料、蒸煮、洗涤、筛选、漂白 / 未漂白、碱回收等工序，化学机械浆的工艺包括化学预浸渍、磨浆等过程。考虑到企业间技术水平和生产规模的差异，无法以某一企业的能源消耗作为平均水平进行计算。因此，本研究采用 GB 31825—2024《制浆造纸单位产品能源消耗限额》中规定的能耗指标作为全国木浆生产的平均能耗水平，芦竹制浆的能源消耗数据则基于企业实地调研获取。

表 1 制浆常用木材树种构成 †
Table 1 Common wood species composition for pulping

木浆类型 Wood pulp type	制浆树种 Pulping tree species	比例 Proportion /%
漂白化学木浆 BCP	桉木	25
	杨木	11
	相思木	4
	桦木	2
	辐射松	25
未漂白化学木浆 UBCP	桉木	14
	杨木	5
	相思木	6
	辐射松	30
化学机械浆 CMP	杨木	37
	桉木	11
	相思木	5

† 比例设定按照各制浆工艺针阔比投料折算为木材占比。
The proportion setting is calculated based on the softwood-to-hardwood ratio of each pulping process and then converted to the proportion of all the wood.

表 2 原料和化学品的运输模式
Table 2 The transportation mode of raw materials and chemicals

运输对象 Transportation object	模式编号 Mode No.	运输模式 Transportation mode
国产木材 Domestic timber	模式 A	道路运输
	模式 B	铁路运输
进口木材 Import timber	模式 C	铁路运输 + 道路运输
	模式 D	海洋运输 + 铁路运输
	模式 E	海洋运输 + 道路运输
国产芦竹 Domestic reed	模式 1	道路运输
	模式 2	铁路运输
化学品 Chemicals		道路运输

本研究依据国家发展和改革委员会等部门 2015 年发布的《制浆造纸行业清洁生产评价指标体系》以及环境保护行业标准《制浆造纸废水治理工程技术规范》中的相关行业要求，选取其中的行业指标作为本研究的废水产生量评价指标。我国 2025 年木浆产能数据汇总自行业报告、企业官网及企业可持续发展报告，涵盖我国 46 家制浆企业的 65 条木浆生产线规划产能。木浆的总产能为 3 792.26 万 Adt，其中漂白化学浆产能为 1 933.16 万 Adt，未漂白化学浆产能为 452.60 万 Adt，化学机械浆产能为 1 406.50 万 Adt。本研究在该数据的基础上，对其减排潜力进行预估分析。

2　结果与分析

2.1　木浆和芦竹浆生命周期各阶段的 GHG 排放特征

2.1.1　原料收集阶段

如图 3 所示，在木材原料收集阶段，化学浆和化学机械浆的平均 GHG 排放量分别为 0.107 和 0.065 tCO_2e/Adt；而芦竹原料收集阶段的 GHG 排放量显著低于木材原料收集阶段，化学浆和化学机械浆的平均 GHG 排放量分别为 0.072 和 0.033 tCO_2e/Adt。结果表明，采用芦竹原料替代传统木材原料，化学浆和化学机械浆产生的减排量分别为 0.035 和 0.032 tCO_2e/Adt，有效降低原料收集阶段 32.7% ～ 49.2% 的 GHG 排放量。

2.1.2　化学品生产阶段

如图 4 所示，在木浆的化学品生产阶段，木浆的 GHG 排放量为 0.067 ～ 0.465 tCO_2e/Adt，其中无元素氯漂白化学木浆的 GHG 排放量最高，未漂白化学木浆的 GHG 排放量最低；在芦竹浆的化学品生产阶段，芦竹浆的 GHG 排放量为 0.056 ～ 0.386 tCO_2e/Adt，无元素氯漂白化学芦竹浆的 GHG 排放量最高，未漂白化学芦竹浆的 GHG 排放量最低。总体来看，化学品生产阶段，芦竹浆 GHG 排放量较木浆平均减少 17%。

2.1.3　运输阶段

从图 5 可以看出，木材原料运输的 GHG 排放量为 0.006 ～ 0.406 tCO_2e/Adt，模式 E 的 GHG 排放量最高，其中化学木浆和化学机械木浆的 GHG 排放量分别为 0.406、0.246 tCO_2e/Adt；模式 B 的排放量最低，其中化学木浆和化学机械木浆的 GHG 排放量分别为 0.010、0.006 tCO_2e/Adt。芦竹原料运输模式的 GHG 排放量差异不显著，与木材原料运输相比，平均可以产生 93.1% ～ 94.8% 的减排量。由图 6 可见，与原料运输相比，化学品运输的减排量较小，为 0.000 10 ～ 0.000 57 tCO_2e/Adt。研究结果表明，采用芦竹替代木材原料，原料运输产生的减排效果十分显著。

2.1.4　制浆阶段

基于能源消耗计算得出制浆阶段的 GHG 排放量（图 7），以芦竹为原料制成的漂白化学芦竹浆、未漂白化学芦竹浆、化学机械芦竹浆的 GHG 排放量均高于以木浆为原料制成的漂白化学木浆、未漂白化学木浆、化学机械木浆。芦竹浆相较于木浆，漂白化学浆、未漂白化学浆和化学机械浆的 GHG 增排量分别为 0.012、0.120、0.049 tCO_2e/Adt。

2.1.5　废水厌氧处理阶段

如图 8 所示，以芦竹为原料制成的漂白化学芦竹浆、未漂白化学芦竹浆、化学机械芦竹浆的 GHG 排放量均高于以木浆为原料制成的漂白化学木浆、未漂白化学木浆、化学机械木浆。芦竹浆废水处理相较于木浆废水处理，漂白化学浆、未漂白化学浆和化学机械浆的 GHG 增排量分别为 0.048、0.120、0.023 tCO_2e/Adt。

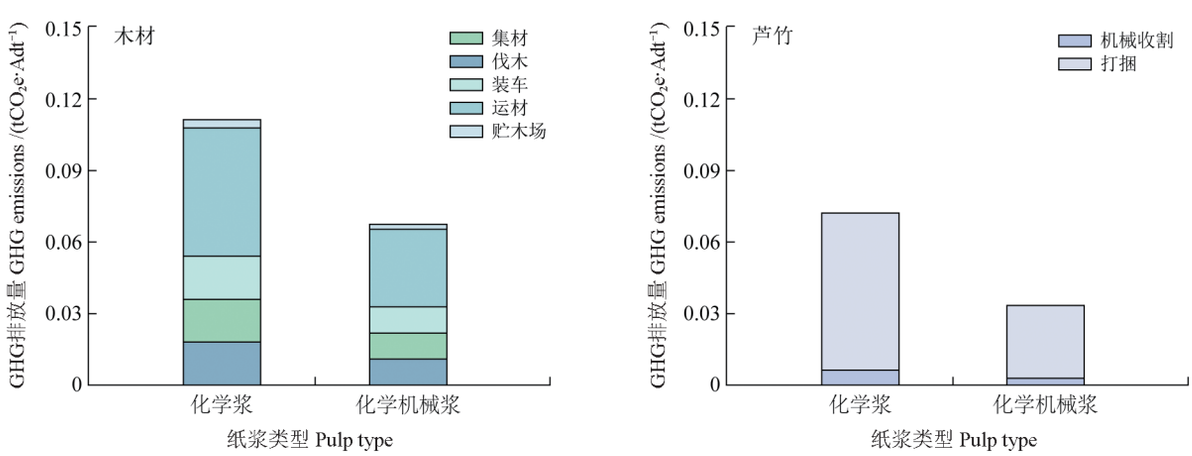


图 3　原料收集阶段的 GHG 排放量

Fig. 3　GHG emissions in the raw material collection stage

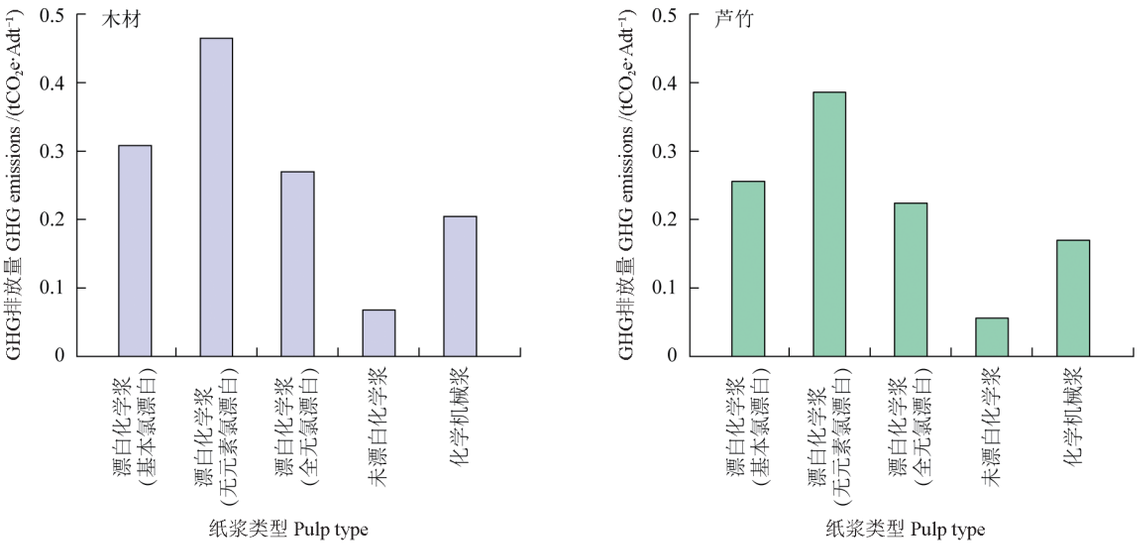


图 4　化学品生产阶段的 GHG 排放量
Fig. 4　GHG emissions in the production stage of chemicals

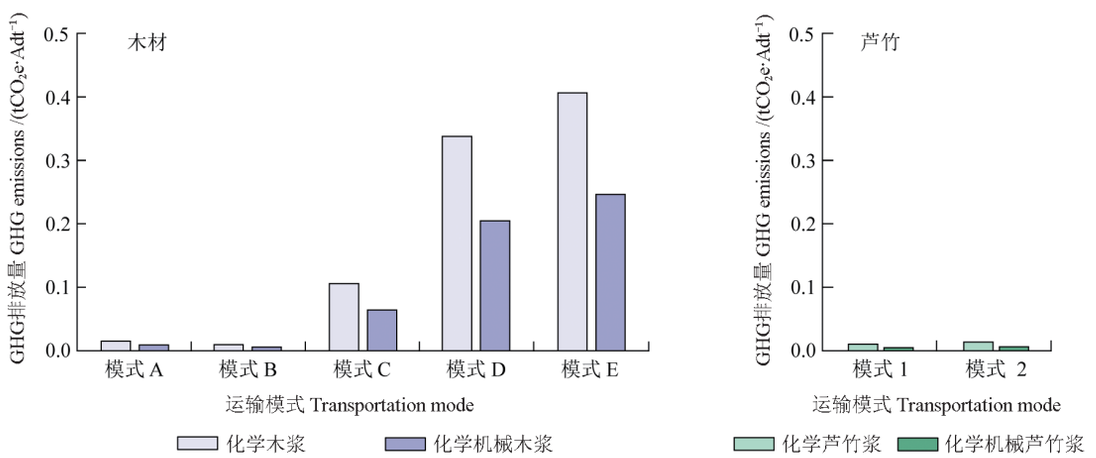


图 5　原料运输的 GHG 排放量
Fig. 5　Greenhouse gas emissions from raw material transportation

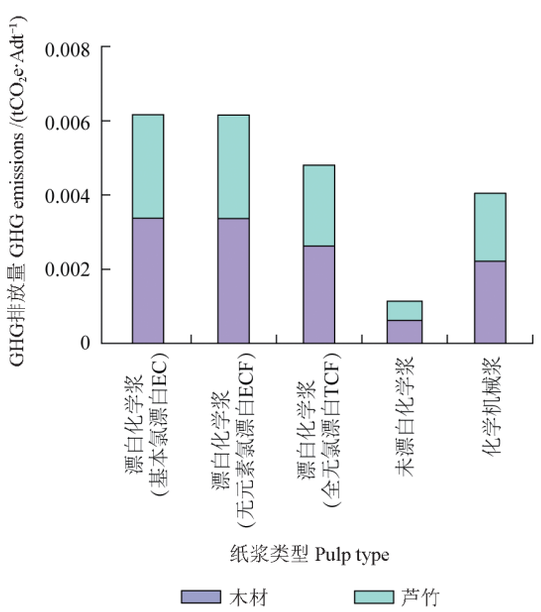


图 6　化学品运输的 GHG 排放量
Fig. 6　Greenhouse gas emissions from the transportation of chemicals

2.2　芦竹原料替代的 GHG 减排效益

如图 9 所示，芦竹原料替代策略可显著降低木浆生产的 GHG 排放量。木浆生命周期的 GHG 排放量为 0.847 ～ 1.649 tCO_2e/Adt，而芦竹浆生命周期的 GHG 排放量为 0.790 ～ 1.593 tCO_2e/Adt。在不同的制浆方法下，使用芦竹原料生产各类型纸浆的 GHG 排放量普遍低于相应的木浆。整个生命周期各阶段 GHG 排放量占比（表 3）显示，木浆的主要排放源为制浆和废水处理阶段，其中未漂白化学浆在制浆阶段的 GHG 排放量占比高达 47.8%；而芦竹浆的主要排放源为制浆阶段，未漂白化学浆在制浆阶段的 GHG 排放量占比高达 66.4%。值得注意的是，芦竹原料替代木材制浆，使运输阶段的排放量占比从 6.6% ～ 20.7% 降至 0.5% ～ 1.6%，这主要得益于本土芦竹原料避免了国际木材运输的高碳排放量。

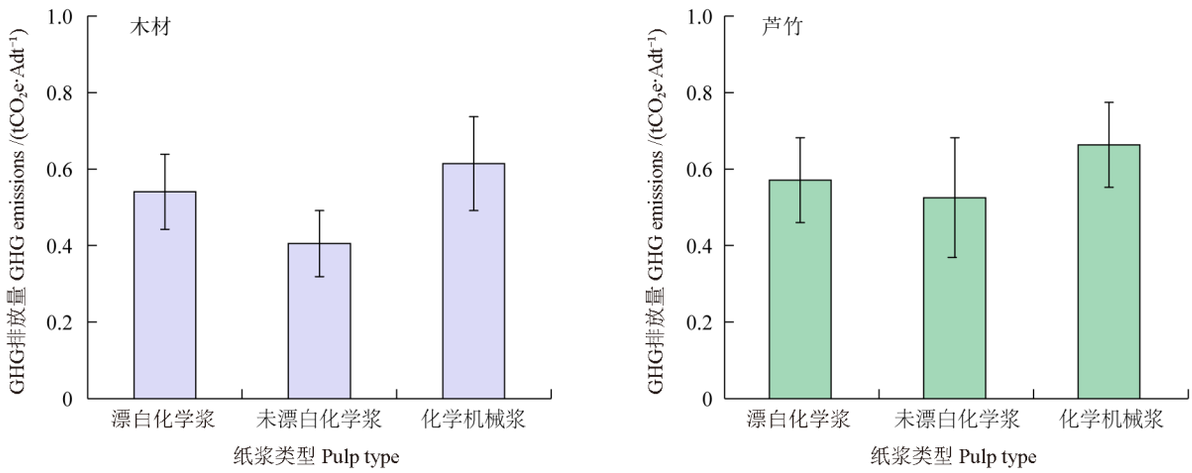


图 7　制浆阶段的 GHG 排放量
Fig. 7　GHG emissions in the pulping stage

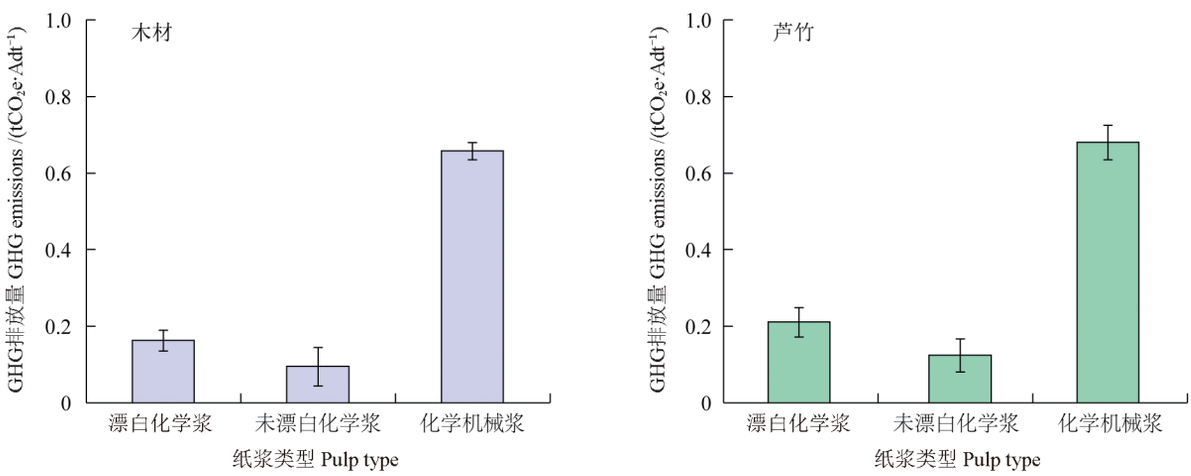


图 8　废水处理阶段的 GHG 排放
Fig. 8　GHG emissions in the wastewater treatment stage

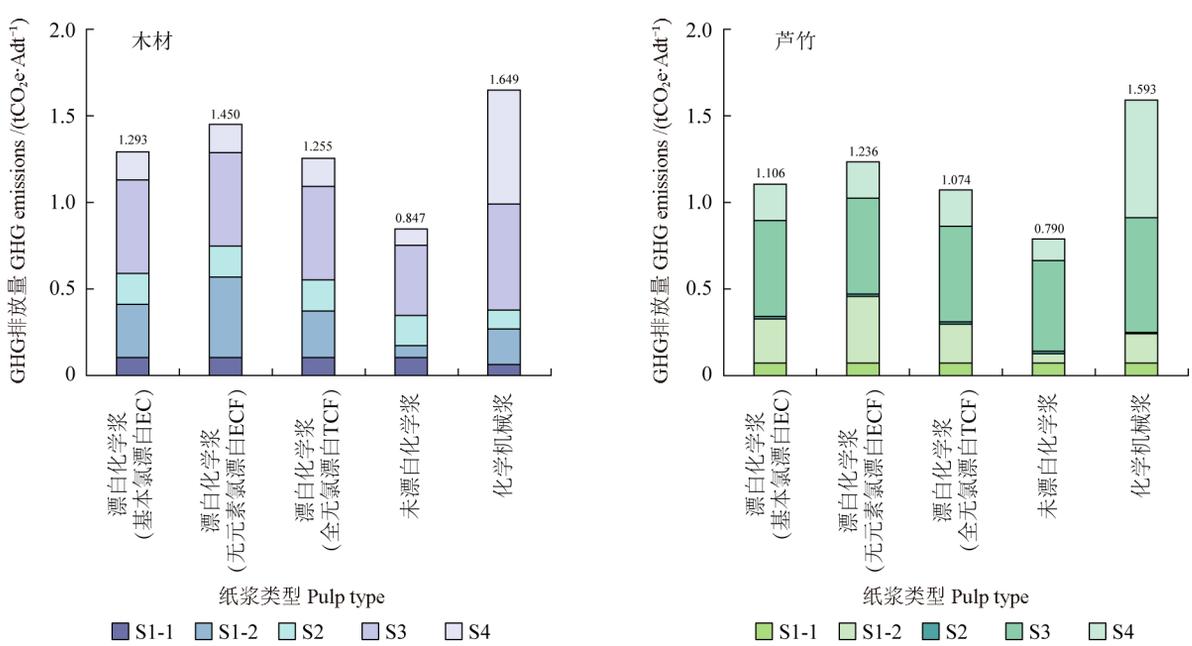


图 9　单位木浆和芦竹浆的生命周期 GHG 排放量
Fig. 9　Life cycle emissions per unit (1Adt) of wood pulp and giant reed pulp

表 3 生命周期各阶段的 GHG 排放量占比
Table 3 The proportion of GHG emissions in each stage of the life cycle

纸浆类型 Pulp type	原料类型 Type of raw materials	GHG 排放量占比 The proportion of GHG /%				
		原料收集阶段 S1-1	化学品生产阶段 S1-2	运输阶段 S2	制浆阶段 S3	废水处理阶段 S4
漂白化学浆（基本氯漂）BCP (EC)	木材	8.0	23.8	13.8	41.8	12.6
	芦竹	6.0	23.1	1.3	50.0	19.1
漂白化学浆（无元素氯漂白）BCP (ECF)	木材	7.1	32.0	12.3	37.3	11.3
	芦竹	5.8	31.2	1.2	44.7	17.1
漂白化学浆（全无氯漂白）BCP (TCF)	木材	8.3	21.5	14.2	43.1	13.0
	芦竹	6.7	20.8	1.3	51.5	19.6
未漂白化学浆 UBCP	木材	12.2	8.0	20.7	47.8	11.2
	芦竹	9.1	7.1	1.6	66.4	15.8
化学机械浆 CMP	木材	3.9	12.4	6.6	37.2	39.9
	芦竹	4.5	10.7	0.5	41.6	42.7

2.3 芦竹原料替代的减排潜力预估

基于 2025 年我国 46 家主要制浆企业 65 条生产线的木浆年产能规划，本研究量化评估了芦竹浆在不同替代比例（25% ～ 100%）下的区域减排潜力（表 4）。结果显示，从全国尺度来看，不同替代比例下的年减排量为 122.198 ～ 488.787 万 tCO_2e。从纸浆类型来看，漂白化学浆贡献了主要的减排潜力，其在不同替代比例下的年减排量为 93.760 ～ 375.033 万 tCO_2e，未漂白化学浆的减排贡献则相对有限。区域分析表明，广西、山东和湖北这三大制浆产业集聚区展现出突出的减排优势，减排量分别占全国总减排量的 28.7%、19.3%、16.8%，该结果为制定差异化的区域减排策略提供了科学依据。

2.4 芦竹原料替代产生的森林碳储量协同效应

本研究量化评估了芦竹原料替代对森林碳储量的保护效益（图 10）。结果表明，化学浆所需

表 4 区域减排潜力预估
Table 4 Estimation of emission reduction potential in each region

序号 No.	省（区、市）Province (Autonomous region, municipality)	减排潜力 Emission reduction potential / 万 tCO_2e			
		漂白化学浆 BCP	未漂白化学浆 UBCP	化学机械浆 CMP	总计 Total
1	广西	24.056 ～ 96.224	2.588 ～ 10.351	7.428 ～ 29.714	34.072 ～ 136.289
2	山东	19.883 ～ 79.530	0.399 ～ 1.596	2.590 ～ 10.360	22.872 ～ 91.486
3	湖北	15.763 ～ 63.050	0.428 ～ 1.710	3.710 ～ 14.840	19.901 ～ 79.600
4	海南	9.700 ～ 38.800	—	—	9.700 ～ 38.800
5	广东	5.456 ～ 21.825	0.926 ～ 3.705	1.828 ～ 7.314	8.210 ～ 32.844
6	福建	6.242 ～ 24.970	—	0.840 ～ 3.360	7.082 ～ 28.330
7	江苏	3.395 ～ 13.580	—	2.440 ～ 9.761	5.835 ～ 23.341
8	吉林	2.910 ～ 11.640	—	—	2.910 ～ 11.640
9	四川	1.455 ～ 5.820	—	0.343 ～ 1.372	1.798 ～ 7.192
10	云南	1.310 ～ 5.238	0.356 ～ 1.425	—	1.666 ～ 6.663
11	辽宁	1.552 ～ 6.208	—	—	1.552 ～ 6.208
12	河南	1.067 ～ 4.268	—	0.420 ～ 1.680	1.487 ～ 5.948
13	重庆	—	0.855 ～ 3.420	0.560 ～ 2.240	1.415 ～ 5.660
14	江西	—	0.499 ～ 1.995	0.700 ～ 2.800	1.199 ～ 4.795
15	安徽	0.728 ～ 2.910	—	—	0.728 ～ 2.910
16	湖南	—	0.143 ～ 0.570	0.560 ～ 2.240	0.703 ～ 2.810
17	浙江	—	—	0.571 ～ 2.285	0.571 ～ 2.285
18	甘肃	0.243 ～ 0.970	—	—	0.243 ～ 0.970
19	河北	—	—	0.140 ～ 0.560	0.140 ～ 0.560
20	内蒙古	—	0.114 ～ 0.456	—	0.114 ～ 0.456
合计 Total		93.760 ～ 375.033	6.308 ～ 25.228	22.130 ～ 88.526	122.198 ～ 488.787

木材材积量（5.425 m^3/Adt）显著高于化学机械浆（3.208 m^3/Adt）。在主要制浆树种中，桉树的材积量最大（化学浆为 5.425 m^3/Adt，化学机械浆为 3.041 m^3/Adt），而辐射松的碳储量最高（化学浆为 6.585 tCO_2e/Adt，化学机械浆为 4.116 tCO_2e/Adt）。

基于 2025 年中国 46 家制浆工厂 65 条生产线的木浆产能规划估算得出，当替代比例从 25% 增至 100% 时，年均可保护的森林碳储量可达 39.26 ～ 157.05 $TgCO_2e$（表 5），其中漂白化学浆贡献近 60% 的碳汇保护效益。另外，基于制浆用木材树种的构成比例计算结果表明：在替代漂白化学木浆的情景下，桉木、辐射松、杨木每年可实现的保留碳储量为 14.28 ～ 57.12 $TgCO_2e$，占所有树种总保留碳储量的 91%；在替代未漂白化学木浆的情景下，每年保留碳储量则主要来源于辐射松（1.64 ～ 6.58 $TgCO_2e$）与桉木（0.77 ～ 3.07 $TgCO_2e$）。这一结果与两类树种在对应制浆原料构成中的核心地位相吻合。因此，通过芦竹原料替代木材，减少林木采伐，可以间接增强森林碳汇功能，为减缓气候变化提供了重要的基于自然的解决方案 [48]。

3　讨论与结论

3.1　芦竹替代木材的纸浆生产减排效益与关键因素

本研究采用生命周期评价方法，系统分析了以芦竹原料替代木材原料的减排效益，并揭示了不同阶段的减排机制。在原料收集阶段，芦竹原料替代可实现 0.032 ～ 0.035 tCO_2e/Adt 的减排量，

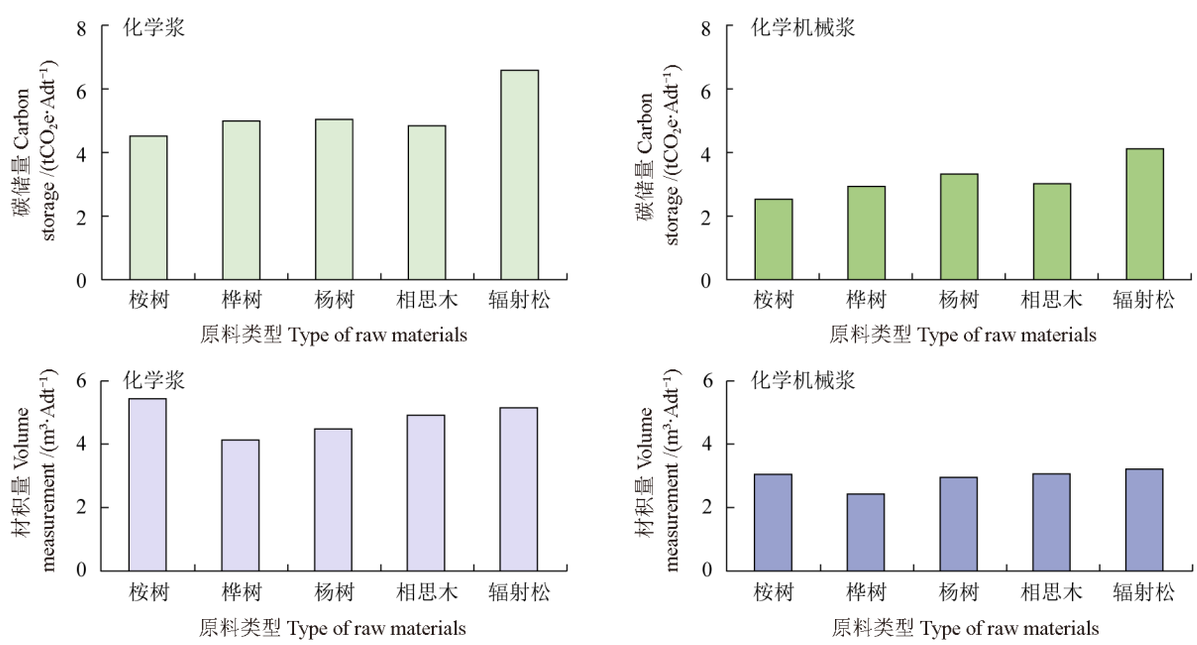


图 10　原料替代情景下保留的森林碳储量和材积量

Fig. 10　Forest carbon storage and volume of wood retained under feedstock substitution scenarios

表 5　不同原料替代比例下所保留采伐木的碳储量潜力

Table 5　Carbon stock potential of retained harvested wood at different feedstock substitution ratios

替代比例 / 制浆用树种 Proportion of substitution/Tree species used for pulping	碳储量 Carbon storage /$TgCO_2e$			
	漂白化学木浆 BCWP	未漂白化学木浆 UBCWP	化学机械浆 CMWP	总计 Total
25%	23.41	5.48	10.37	39.26
50%	46.82	10.96	20.75	78.53
75%	70.23	16.44	31.12	117.79
100%	93.64	21.92	41.49	157.05
桉木 Eucalyptus	5.85 ～ 23.41	0.77 ～ 3.07	1.14 ～ 4.56	7.76 ～ 31.04
桦木 Birch	0.47 ～ 1.87	—	—	0.47 ～ 1.87
杨木 Poplar	2.58 ～ 10.30	0.27 ～ 1.10	3.84 ～ 15.35	6.69 ～ 26.75
相思木 Acacia	0.94 ～ 3.75	0.33 ～ 1.32	0.52 ～ 2.07	1.79 ～ 7.14
辐射松 Radiata pine	5.85 ～ 23.41	1.64 ～ 6.58	—	7.49 ～ 29.99

这一结果与 Man 等 [1] 的研究结论一致。这种减排优势主要来源于工艺差异，木材采伐包括伐木、集材、装车等多个高耗能工序，而芦竹作为禾本科植物可通过机械化一次性完成收割，显著降低了能源消耗。本研究还发现，在化学品生产阶段，使用芦竹浆可减少 17% 的排放量，这一结果与 Man 等 [41] 关于秸秆浆和木浆的 GHG 排放研究结论形成对比。导致这一差异的原因有两点：一是原料特性差异，芦竹相比秸秆具备更优良的纤维特性 [23]，能够降低制浆过程的化学品消耗量；二是工艺创新优势，本研究采用的芦竹制浆专利技术优化了化学品的使用效率。研究结果表明，原料特性与工艺创新共同决定了化学品生产阶段的减排潜力，同时也凸显了生命周期评价方法在全面评估减排效益方面的重要性。

本研究揭示了运输阶段在原料替代策略中的关键减排作用。研究结果表明，采用国产芦竹替代进口木材，可使运输阶段平均减排 0.132 tCO_2e/Adt。这一显著减排效益主要源于两方面：首先，我国作为全球最大的木浆生产国之一，木材原料大部分依赖进口，主要来源为泰国、越南、澳大利亚、智利、巴西等国，长距离海运导致碳排放大幅增加，这与 Man 等 [32] 的研究结果一致；其次，本研究创新性地构建了涵盖多国进口路线的混合运输模型，相比以往仅考虑国内运输的研究，本研究能更准确地反映实际生产运输情况。然而，本研究还发现，芦竹原料在制浆和废水处理阶段存在碳排放劣势，制浆阶段增排 0.012 ～ 0.120 tCO_2e/Adt，废水处理阶段增排 0.023 ～ 0.120 tCO_2e/Adt，这也与 Man 等 [1] 的研究结论一致。这些额外碳排放主要归因于两方面：一方面，现有芦竹制浆产业规模较小，尚未形成规模效应；另一方面，制浆环节需要消耗大量原料，进一步增加了化石燃料与其他资源的消耗量 [15,49]。

尽管如此，全生命周期评估结果表明，采用芦竹替代传统原料仍可实现 3.42% ～ 14.76% 的净减排，其中原料收集阶段与运输阶段是减排的主要贡献来源。这些发现为纸浆行业的低碳转型提供了重要启示：在推进原料替代的同时，必须配套开发适配芦竹特性的高效制浆工艺与废水处理技术，以实现全产业链的协同减排。

3.2 中国芦竹原料替代的减排潜力与区域策略

与中国造纸协会 2023 年度报告公布的木浆产量数据相比，我国木浆预计到 2025 年产能增幅可达 64%，这一快速增长趋势凸显出我国木浆需求正处于急剧扩张阶段。本研究开展的替代情景分析结果表明：1）漂白化学浆占总产能的 51%，具有绝对规模优势，应作为原料替代的优先推进领域，通过加速漂白化学芦竹浆的工艺研发，可以最大化实现减排效益；2）减排量与原料替代比例呈显著线性关系，为当前我国推行的木材替代政策提供了量化支撑；3）区域分布分析显示，东部沿海地区与中部省份集聚了全国 78% 的木浆产能和 64.8% 的减排量，应当作为实施差异化减排策略的重点区域。

总而言之，本研究不仅从全生命周期角度证实了芦竹原料替代木材原料生产纸浆的可行性，更为制定契合区域特点的减排策略提供了科学支撑，对推动纸浆行业实现减排目标具有重要意义。

3.3 减少木材采伐的气候减缓效益

中国造纸行业发展数据表明，木浆产量与消费量之间存在显著缺口，2023 年木浆产量为 2 312 万 t，消耗量为 4 931 万 t。持续增长的木材资源需求，给全球森林生态系统带来了严峻挑战 [7]。本研究提出的芦竹原料替代策略，具备多重显著环境效益。首先，在森林碳储量方面，不同替代比例（25% ～ 100%）下，所保留采伐木的森林碳储量为 39.26 ～ 157.05 $TgCO_2e$；其次，从生态保护维度来看，该策略能够有效缓解过度采伐引发的生物多样性丧失、生态系统服务功能退化等问题 [50]。尤其值得关注的是，我国作为全球最大的木浆消费国，推行原料替代所实现的碳汇保护效益具有全球性意义，该策略影响的森林资源分布不仅限于国内，还覆盖了东南亚、南美等全球主要木材出口地区 [50]。这些研究结果为理解我国纸浆行业在实现减排目标中的特殊责任提供了全新视角，同时也为制定兼顾产业发展与生态保护的可持续原料战略提供了科学支撑。

3.4 芦竹种植可行性分析

芦竹作为潜在的纤维原料，实现大规模种植的核心在于解决生态安全性和土地资源两大关键问题。在生态安全性层面，现代育种技术已成功培育出生态风险可控的芦竹新品种，例如“超级芦竹”。这类品种通常表现为不育系，花粉和种子都不具备繁殖能力，完全依靠人工分株完成扩繁。同时，经改良后的芦竹根系不存在横走茎，自然扩散范围被严格限制。已有的种植观测记录显示，这类品种从未出现生态失控或物种入侵的情况，具备较高的生态安全性 [51]。在土地资源层

面，我国拥有广阔的盐碱地，能够为芦竹种植提供充足的土地空间，且不会占用耕地资源。据统计，我国盐碱地总面积约为 3 670 万 hm^2，其中具备农业开发利用潜力的面积约为 1 230 万 hm^2[52-53]。若以 75 t/hm^2 的芦竹产量进行保守估算，全国芦竹原料替代所需土地面积为 136.52 万 hm^2，仅开发利用华北地区约 300 万 hm^2 盐碱地，理论上可实现年原料供应量达到约 2.25 亿 t，能够稳定满足大型浆纸项目的纤维原料需求。因此，在盐碱地等边际土地发展芦竹种植，既能够构建可持续的非木纤维原料供应链，也符合“不与粮争地”的国家战略导向，兼具显著的生态价值与产业价值。

4　局限性与展望

本研究的系统边界未纳入芦竹与木材的种植阶段，该设定主要基于两方面原因：一方面，木材与芦竹的生长周期差异显著，木材生长周期长达数年至数十年，而芦竹为连年收割作物，二者在时间尺度上难以统一，不仅种植阶段的碳排放数据获取困难，也缺乏公认可靠的清单数据支持；另一方面，农业种植过程中涉及的肥料、灌溉、土地利用等投入，会随地域与管理模式的不同产生较大差异，进一步增加了标准化核算与对比的难度。需要说明的是，尽管本研究未核算种植阶段，但这一边界设定对核心结论的影响十分有限。制浆生产环节是整个生命周期中能耗与化学品消耗最集中的环节，通常贡献了绝大部分碳排放。因此，聚焦该环节得到的核算结果仍能有效反映不同制浆种类的排放差异，可为生产工艺的优化提供可靠依据。

本研究基于生命周期视角，首次明确了芦竹替代木材的减排量与森林碳汇的保留潜力。但是，要实现规模化应用，仍需从工艺、供应链与政策 3 个维度开展系统优化。结合上述研究结论，后续研究可从以下 3 个方面进行优化：1）工艺层面：以漂白化学浆为突破口，构建“原料 - 工艺 - 装备”协同创新体系。漂白化学浆产能占我国原生木浆总产能的 51%，其带来的减排贡献可达 60%，建议将其作为优先开展原料替代的纸浆类型。企业应加强工艺创新，突破当前制浆阶段的能源消耗瓶颈，重点解决制浆工艺中使用芦竹纤维存在的能耗高、废水产生量大的问题。2）区域实施策略方面：结合产业集聚特征，制定差异化的区域减排实施策略，在山东、湖北、广西等纸浆产业密集区建立原料替代示范区，配套建设芦竹种植 - 浆粕生产一体化基地，以降低原料运输成本。3）政策层面：建立“LCA- 技术经济 - 政策”多维耦合框架，将静态 LCA 扩展为全生命周期“成本 - 环境 - 社会”集成评估体系，量化芦竹种植对农户生计、生物多样性及土壤碳库的长期影响。

综上，以芦竹原料替代木材制浆，能够在全生命周期内显著削减温室气体排放，同时实现森林碳汇的保全，可为纸浆行业实现碳中和目标提供兼具减排与增汇双重效益的发展范式。该替代路径不仅以“零毁林”的模式减缓气候变化，更通过重塑资源循环体系，将纸浆生产转化为维系全球森林碳库稳定的关键支点。

参考文献：

[1] Man Y, Li J G, Hong M N, et al. Energy transition for the low-carbon pulp and paper industry in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2020,131:109998.

[2] Kan S Y, Chen B, Persson U M, et al. Risk of intact forest landscape loss goes beyond global agricultural supply chains[J]. One Earth,2023,6:55-65.

[3] Harris N L, Gibbs D A, Baccini A, et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes[J]. Nature Climate Change,2021,11:234-240.

[4] Peng L Q, Searchinger T D, Zionts J, et al. The carbon costs of global wood harvests[J]. Nature,2023,620:110-115.

[5] Leturcq P. GHG displacement factors of harvested wood products: the myth of substitution[J]. Scientific Reports, 2020,10:20752.

[6] 侯方淼 , 裴润田 , 刘璨 , 等 . 中国林产工业嵌入全球价值链对贸易隐含碳排放的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2022, 42(10):177-188.
Hou F M, Pei R T, Liu C, et al. Influences of China’s forest product industry embedding in the global value chain on the embodied carbon emissions in trade[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2022,42(10):177-188.

[7] Pendrill F, Persson U M, Godar J, et al. Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions[J]. Global Environmental Change,2019,56:1-10.

[8] Pydimalla M, Chirravuri H V, Uttaravalli A N. An overview on non-wood fiber characteristics for paper production: Sustainable management approach[J/OL]. Materials Today: Proceedings, doi: org/10.1016/j.matpr.2023.08.278.

[9] Dai M, Sun M X, Chen B, et al. Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry[J]. Nature,2024,626:327-334.

[10] Manda K B M K, Blok K, Patel M K. Innovations in papermaking: an LCA of printing and writing paper from conventional and high yield pulp[J]. Science of the Total

Environment,2012,439:307-320.

[11] 刘春红 , 贾学桦 , 肖小健 , 等 .“ 双碳 ” 目标下 , 我国造纸工业减碳路径探究 [J]. 中国造纸 ,2023,42(8):26-30,91.
Liu C H, Jia X H, Xiao X J, et al. Under the “dual carbon” target, the carbon reduction path of China’s paper industry[J]. China Pulp & Paper,2023,42(8):26-30,91.

[12] Abd E E S, El-Sakhawy M, El-Sakhawy M A. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry[J]. Nordic Pulp & Paper Research Journal,2020,35(2):215-230.

[13] Hart P W. Wheat straw as an alternative pulp fiber[J]. TAPPI Journal,2020,19(1):41-52.

[14] Jia M H, Sun M X, Li X G, et al. A new era of straw-based pulping? Evidence from a carbon metabolism perspective[J]. Journal of Cleaner Production,2018,193:327-337.

[15] Ma X T, Zhai Y J, Zhang R R, et al. Energy and carbon coupled water footprint analysis for straw pulp paper production[J]. Journal of Cleaner Production,2019,233:23-32.

[16] Sun M X, Wang Y T, Shi L. Environmental performance of straw-based pulp making: a life cycle perspective[J]. Science of the Total Environment,2018,616-617:753-762.

[17] Sun M X, Xu X B, Wang C D, et al. Environmental burdens of the comprehensive utilization of straw: wheat straw utilization from a life-cycle perspective[J]. Journal of Cleaner Production,2020,259:120702.

[18] Gao J, Ti C P, Chen N. Environmental comparison of straw applications based on a life cycle assessment model and energy evaluation[J]. BioResources,2014,10(1):548-565.

[19] Gómez-Sánchez M D, Sánchez R, Espinosa E, et al. Production of cellulosic pulp from reed (*Phragmites australis*) to produce paper and paperboard[J]. Bioprocess Engineering, 2017,1(3):65-68.

[20] Kiatkittipong W, Wongsuchoto P, Pavasant P. Life cycle assessment of bagasse waste management options[J]. Waste Management,2009,29:1628-1633.

[21] González-García S, Hospido A, Feijoo G, et al. Life cycle assessment of raw materials for non-wood pulp mills: hemp and flax[J]. Resources, Conservation and Recycling,2010,54: 923-930.

[22] 申惠莹 , 雷以超 , 陈灵晨 . 大麻韧皮纤维不同制浆方法纸浆性能的研究 [J]. 中国造纸 ,2023,42(7):49-56,93.
Shen H Y, Lei Y C, Chen L C. Study on pulp properties of different pulping methods of hemp bast fiber[J]. China Pulp & Paper,2023,42(7):49-56,93.

[23] Abrantes S, Amaral M E, Costa A P, et al. Evaluation of giant reed as a raw-material for paper production[J]. Appita Journal, 2007,60(5):410-415.

[24] 方智毅 , 崔蕴涵 , 许金钗 , 等 . 绿洲一号和巨菌草制浆的可行性 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版),2021,50(6):839-842.
Fang Z Y, Cui Y H, Xu J C, et al. Pulping performance of *Arundo donax* cv. Lvzhou No.1 and *Pennisetum sinese*[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2021,50(6):839-842.

[25] Qiu Y Y, Lei Y T, Zhao H, et al. Mesophilic anaerobic digestion of *Arundo donax* cv. Lvzhou No. 1 and *Pennisetum giganteum* for biogas production: structure and functional analysis of microbial communities[J]. BioEnergy Research,2023,16:1205-1216.

[26] Cano-Ruiz J, Galea M R, Amorós M C, et al. Assessing *Arundo donax* L. in vitro-tolerance for phytoremediation purposes[J]. Chemosphere,2020,252:126576.

[27] Lino G, Espigul P, Nogués S, et al. *Arundo donax* L. growth potential under different abiotic stress[J]. Heliyon,2023,9: e15521.

[28] Xu W, Becker G. Environmental impact assessment of wood pulp from a Eucalyptus plantation in south China by using life-cycle analysis[J]. Forest Products Journal,2012,62(5):365-372.

[29] Zhang X, Zhang F, Cai H, et al. A representative study of CO_2 emissions and carbon intensity based on a case of a pulp and paper mill in China: calculation and analysis[J]. BioResources, 2017,12(3):6157-6172.

[30] Man Y, Han Y L, Wang Y F, et al. Woods to goods: water consumption analysis for papermaking industry in China[J]. Journal of Cleaner Production,2018,195:1377-1388.

[31] Zhao Q J, Ding S, Wen Z M, et al. Energy flows and carbon footprint in the forestry-pulp and paper industry[J]. Forests,2019, 10:725.

[32] Man Y, Han Y L, Li J G, et al. Review of energy consumption research for papermaking industry based on life cycle analysis[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2019,27:1543-1553.

[33] 高逸翔 , 代敏 , 王菊 , 等 . 基于生命周期评价的中国巴西纸浆环境影响比较 [J]. 环境工程学报 ,2025,19(11):2683-2698.
Gao Y X, Dai M, Wang J, et al. Comparative analysis of environmental impacts of pulp between China and Brazil based on life cycle assessment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2025,19(11):2683-2698.

[34] Gao Y H, Shen J, Li Q. China’s high-yield pulp sector and its carbon dioxide emission: considering the saved standing wood as an increase of carbon storage[J]. BioResources,2015,10(1):10-13.

[35] International Organization for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.

[36] International Organization for Standardization. Environmental

management-life cycle assessment-requirements and guidelines[S]. Geneva, Switzerland:International Organization for Standardization, 2006.

[37] 林立平 , 黄圣游 . 木基材料产品碳足迹的核算与分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2016,36(12):135-139.
Lin L P, Huang S Y. Carbon footprint assessment of wood-based product[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2016,36(12):135-139.

[38] May B, England J R, Raison R J, et al. Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwood plantations and native hardwood forests: embodied energy, water use and other inputs[J]. Forest Ecology and Management,2012,264: 37-50.

[39] Gao T, Liu Q, Wang J P. A comparative study of carbon footprint and assessment standards[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies,2014,9:237-243.

[40] Sun M X, Wang Y T, Shi L, et al. Uncovering energy use, carbon emissions and environmental burdens of pulp and paper industry: a systematic review and meta-analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,92:823-833.

[41] Man Y, Han Y L, Li J G, et al. Life cycle energy consumption analysis and green manufacture evolution for the papermaking industry in China[J]. Green Chemistry,2019,21(5):1011-1020.

[42] Zhao M M, Yang J L, Zhao N, et al. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013[J]. Forest Ecology and Management,2019,448: 528-534.

[43] 胡海波 , 刘佳璇 , 丁冬霞 , 等 . 森林固碳计量方法研究综述 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(11):58-69.
Hu H B, Liu J X, Ding D X, et al. A review of measurement methods of forest carbon sequestration[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(11):58-69.

[44] Li P W, Xu Y P, Yin L, et al. Development of raw materials and technology for pulping: a brief review[J]. Polymers,2023,15:4465.

[45] 林本平 , 朱宏伟 , 刘成良 , 等 . 3 种速生阔叶木的 PRC-APMP 制浆性能比较 [J]. 林产化学与工业 ,2019,39(5):87-94.
Lin B P, Zhu H W, Liu C L, et al. Comparison on PRC-APMP pulping properties of three fast-growing hardwoods[J]. Chemistry and Industry of Forest Products,2019,39(5):87-94.

[46] 郭彩虹 , 杨泽广 , 李树木 . 7 种进口阔叶木硫酸盐法制浆性能评估 [J]. 中国造纸 ,2025,44(8):124-129.
Guo C H, Yang Z G, Li S M. Evaluation of kraft pulping performance for seven types of imported hardwoods[J]. China Pulp & Paper,2025,44(8):124-129.

[47] Keith H, Lindenmayer D, Mackey B, et al. Managing temperate forests for carbon storage: impacts of logging versus forest protection on carbon stocks[J]. Ecosphere,2014,5(6):1-34.

[48] Jiménez L, Rodríguez A, Pérez A, et al. Alternative raw materials and pulping process using clean technologies[J]. Industrial Crops and Products,2008,28:11-16.

[49] Boungou W, N'doua D B. Climate change and wood production[J]. Journal of Forest Economics,2024,39(1):1-38.

[50] Favero A, Thomas V M, Luettgen C. Life cycle and market review of the major alternative fibers for paper production[R]. Atlanta: Georgia Institute of Technology,2017:1-56.

[51] Nikhade C A, Makde K H. Reproductive behavior of *Arundo donax* L.[J]. International Journal of Researches in Biosciences, Agriculture &Technology,2014,2(2):668-677.

[52] 曹晓风 , 孙波 , 陈化榜 , 等 . 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展 [J]. 中国科学院院刊 ,2021,36(3): 336-348.
Cao X F, Sun B, Chen H B, et al. Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2021,36(3):336-348.

[53] 于功霞 , 李迎 , 刘宏元 , 等 . 我国盐碱地改良与利用技术研究进展 [J]. 黑龙江农业科学 ,2025(7):96-103.
Yu G X, Li Y, Liu H Y, et al. Research progress of reclamation and utilization of saline-alkali land in China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences,2025(7):96-103.

[本文编校：戴欧琳]