

评论

## 关于“各国纸浆和造纸业的净零战略”的评论

李健<sup>1,2,\*</sup>, 张云飞<sup>1</sup>, 沈俊<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 机械与车辆学院, 北京理工大学, 北京市 100081, 中国

<sup>2</sup> 新型电力系统运行与控制全国重点实验室, 清华大学, 北京市 100084, 中国

\* 通讯作者: 李健, [lijian2022@bit.edu.cn](mailto:lijian2022@bit.edu.cn)

### 引用格式

李健, 张云飞, 沈俊. 关于“各国纸浆和造纸业的净零战略”的评论. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(2): 193.  
<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i2.193>  
Li J, Zhang Y, Shen J. Commentary on “Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry” (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(2): 193.  
<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i2.193>

### 文章信息

收稿日期: 2024-04-01  
录用日期: 2024-06-18  
发表日期: 2024-06-30

### 版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/155>

**摘要:** 纸浆和造纸业是能源最密集的行业之一。该行业实现净零排放对于减缓全球变暖和减少环境污染至关重要。《自然》杂志发表的题为“各国纸浆和造纸业的净零战略”的文章探讨了这一问题。通过深入分析30个主要国家纸浆和造纸工业的历史排放数据, 提出了一系列针对具体国家的净零排放战略。本评论回顾了该文章的主要内容和观点, 讨论了其方法的严谨性和适用性, 并进一步考虑了经济权衡、资源禀赋和技术进步对各国纸浆造纸行业净零排放战略的潜在影响。

**关键词:** 纸浆和造纸行业; 净零排放; 国家战略

## 1. 引言

在全球变暖的背景下, 各行各业都在积极寻求实现净零排放的解决方案, 以实现《巴黎协定》限制全球气温上升的目标。纸浆和造纸行业作为能源最密集的行业之一, 占 2022 年工业总排放量的 2% [1]。鉴于其在全球温室气体 (greenhouse gas, GHG) 排放中的重要作用, 减少该行业的排放对于推动全球气候行动具有重要意义。最近, Dai 等 [2] 在《自然》杂志上发表了一篇题为“各国纸浆和造纸业的净零战略”的文章。通过深入分析 30 个主要国家纸浆和造纸行业的历史排放数据, 提出了一系列针对特定国家的净零排放战略。

## 2. 纸浆和造纸工业温室气体排放分析

该研究自下而上全面评估了 1961 年至 2019 年纸浆和造纸行业净温室气体排放量, 并探究了 30 个主要国家的排放趋势和结构。通过系统地梳理和比较不同国家的排放量, 不仅提供了宝贵的历史数据和深刻的行业洞察, 也为全球减排努力提供了重要参考。

图 1 显示了全球纸浆和造纸行业温室气体排放量的年度变化和各阶段的贡献。它揭示了该行业的碳排放随时间的变化以及不同生产阶段的环境影响。这与政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在其报告中提到的对工业部门排放的分析相呼应, 该报告也强调了工业生产过程各个阶段的碳排放问题 [3]。研究结果强调了系统视角在识别减排机会方面的重要性。该研究考虑了 S1 (原料收集)、S2 (制浆)、S3 (造纸和印刷) 和 S4 (使用和废物管理) 四个阶段及其 18 个过程。数据显示, S3 对累积温室气体排放的贡献最大, 占总排放量的 41%。主要原因是这个阶段与能源消耗和化学品使用密切相关。这对于指导行业优化能源使用和减少化学品排

放具有重要意义。除了 S3，其他阶段在分析减排路径时也起着至关重要的作用。森林砍伐引起的森林碳排放和纸浆木材采伐导致的森林退化占 S1 排放量的 64%（即 6.9 Gt CO<sub>2</sub>-eq），而 S4 中的垃圾填埋场和非能源回收可以作为碳汇，导致负排放。该研究中提到的纸浆和造纸行业在不同阶段的排放特征与生命周期评估方法相吻合 [4]。该研究对纸浆和造纸行业整个生命周期的排放进行了全面分析，包括原材料收集、生产、使用和废物管理。它为行业决策者提供了宝贵的见解，使他们能够确定关键节点并探索减少碳排放的机会。

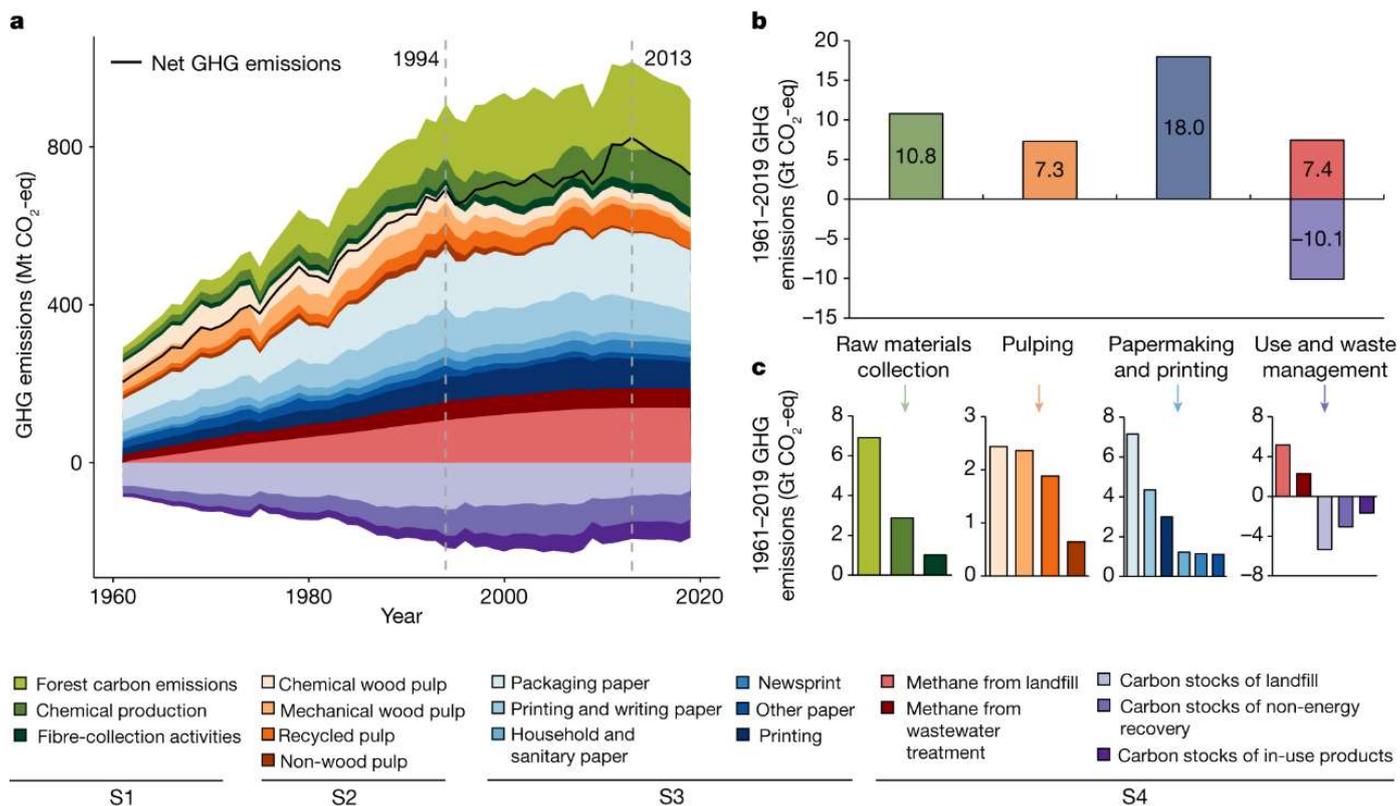


图 1. 1961 年至 2019 年全球纸浆和造纸行业温室气体排放量 [2]。

Figure 1. Global GHG emissions of paper-related sectors between 1961–2019 [2].

### 3. 温室气体排放的地理转移和差异

虽然研究对纸浆和造纸行业各阶段的碳排放进行了分析，但其结果未能反映出国家和地区的排放特征。因此，全球温室气体排放热点的地理转移被进一步探讨。地理转移凸显了全球减排努力需要考虑区域差异和发展阶段以实现公平有效的气候治理的特点。此外，该研究还呈现了各国温室气体的排放趋势和结构差异，为比较不同情景下的减排挑战和机遇提供了框架。

1961 年至 2019 年，全球温室气体排放热点从北美和欧洲向亚洲和拉丁美洲转移，反映了全球纸浆和造纸行业生产重心的转移。这种转移与全球经济格局的变化和各国工业化速度有关，例如亚洲和拉丁美洲国家排放量的增长与这些地区经济快速发展和消费模式变化密切相关。此外，从国家角度来看，S2 和 S3 是大多数国家的主要碳源，但在森林资源丰富的热带地区，S1 的森林碳排放量很大，在一些国家占温室气体排放总量的一半以上，这主要是由于种植园

扩张、不可持续的选择性砍伐和不可持续的皆伐造成的。该研究的数据还揭示了一些国家在减少纸浆和造纸行业温室气体排放方面的成功，例如北欧国家通过使用生物质作为燃料和提高能源利用效率显著减少了温室气体排放。这些成功案例为其他国家提供了借鉴，同时也指出一些国家仍需加强森林管理和废物处理。

通过研究各国的排放趋势，该研究揭示了不同国家和地区纸浆和造纸行业排放的差异。这些差异符合全球环境治理中“共同但有区别的责任”原则。该原则主张，鉴于各国历史排放和经济发展水平的差异，各国在应对气候变化方面应承担不同的责任和义务 [5]。该研究的结果从实证上支持了这一原则，并为制定针对具体国家的减排战略提供了数据驱动的基础。

#### 4. 未来减排情景分析

该研究根据纸浆和造纸行业在不同阶段和不同地区的特点，勾勒出未来碳排放情景，构建了温室气体排放前瞻性分析框架，探索了未来排放的潜在轨迹，不仅为行业提供了预测前景，也为制定减排战略提供了一系列候选方案。

**图 2** 显示了各国 2050 年的温室气体排放量以及在不同减缓措施下实现净零排放的可能性。结果揭示了不同措施对减少温室气体排放的潜在影响，也凸显了实现净零排放目标的复杂性和挑战性。**图 2a** 显示了单一措施与一切照旧情景下各国温室气体排放的变化率。这些数据证实，能源结构和效率改进是最有效的措施，可以显著减少排放。然而，其他措施的有效性在各国之间存在很大差异，这表明减排战略需要根据各国的具体情况量身定制。

**图 2b** 则展示了 2050 年各国温室气体排放量以及 2160 种情景下实现净零排放的可能性。例如，一些国家在实施所有最佳措施后即可实现显著的碳汇增长，而其他国家则需要多个领域同时采取行动才能实现净零排放。此外，各国实现净零排放的可能性也存在很大差异，取决于所采取的措施组合和措施实施的力度。这些分析结果与其他全球气候变化研究的发现一致，例如 IPCC 也在报告中强调了实现净零排放的多种途径，以及这些途径对不同国家和地区的影响 [3]。该研究的结果进一步证实了 IPCC 的观点，并为各国采取行动提供了具体的指导。

研究结果强调，虽然情景分析呈现出乐观的前景，但要实现这些目标，需要全球统一的倡议和坚决的行动。《联合国气候变化框架公约》 [6] 也指出，尽管这些努力取得了进展，但仍不足以减轻气候变化的最严重后果。情景分析融合了多种经济、社会和环境因素，体现了一种整体分析方法。该范式认为实现净零排放需克服包括经济重组、社会进步和环境管理在内的技术挑战。因此，实现纸浆和造纸行业的净零排放取决于政府、企业和社会利益相关者的共同努力，以克服障碍并实现可持续发展目标。

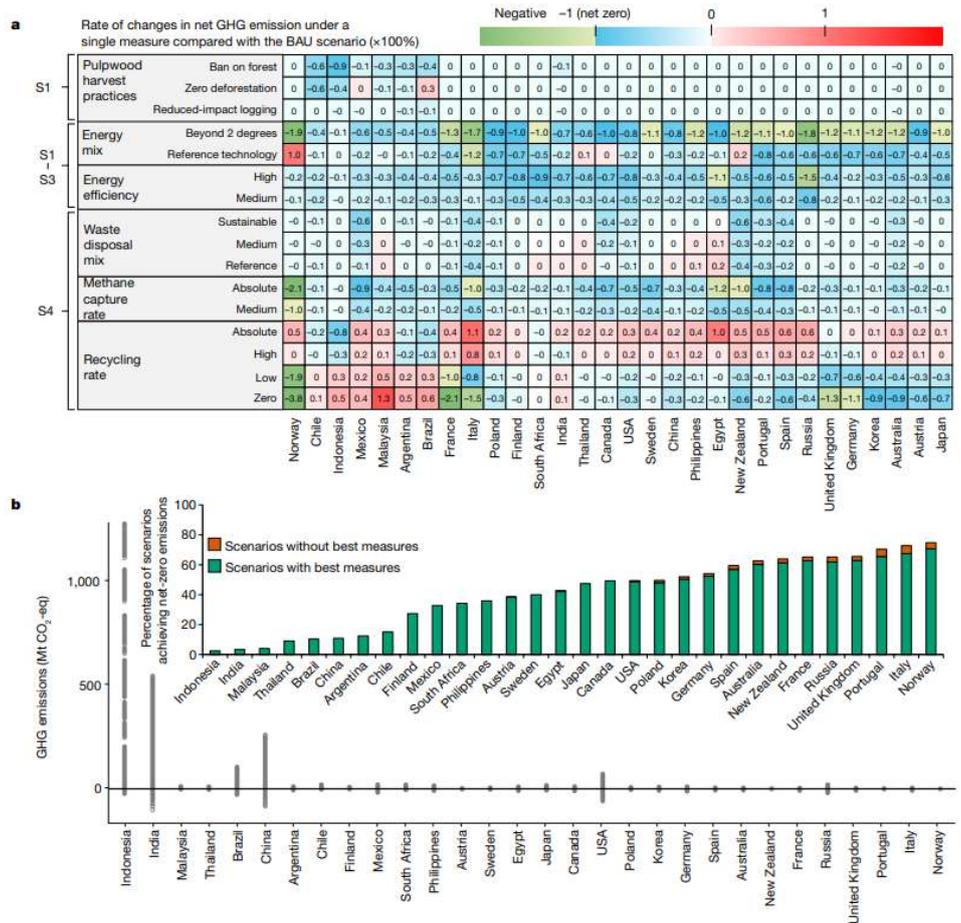


图 2. 30 个国家单项措施和所有情景的影响 [2]。

Figure 2. Effects of single measures and all scenarios in 30 countries [2].

### 5. 定制国家战略探讨

在前文结论的支持下，该研究提出了一套纸浆和造纸行业实现 2050 年净零排放目标的国家战略，该部分研究展示了对减排挑战的深刻理解，并为各国提供了实现减排目标的具体行动计划。

根据各国减排努力的分类，将各国实现净零排放的难度分为“困难”、“中等”、“容易”和“非常容易”四个等级。这一分类基于各国的经济发展水平、技术能力、森林资源状况以及现有的能源结构和废物管理实践。研究发现，纸浆和造纸行业可以通过国家特定的战略在 2050 年前实现净零排放。这些战略包括提高能源效率、优化能源结构、改善森林管理、提高甲烷捕获和回收率等。

“困难”组主要由发展中国家组成，其在 2050 年前实现净零排放面临巨大挑战。“困难”组中只有 2%–49% 的情景可以实现净零排放，并且没有单一措施情景或中等措施情景。在这些国家实现净零排放需要至少一项最佳措施和一项或多项中等措施。提高甲烷捕获率、能源结构和能源效率对“困难”国家至关重要。“中等”组的国家需要在一些关键领域做出改进，但总体而言，实现净零排放比“困难”组的国家更容易。例如，瑞典、菲律宾、南非、日本、

西班牙和新西兰只需优化能源结构即可实现净零排放。“容易”和“非常容易”组的国家可能已经具备实现净零排放的良好基础，只需对现有基础进行一些小调整或持续改进即可实现这一目标。

该研究强调了实现净零排放的多样性和复杂性，各国需要根据自身情况制定和实施减排战略。此外，该研究的战略还考虑了技术创新、政策变化、市场需求等因素对减排路径的影响。总体而言，该研究为纸浆造纸行业净零排放提供了全面、系统、具有国别特色的战略框架。通过深入分析历史排放数据，结合各国国情，提出了切实可行的减排措施，为全球气候行动做出了重要贡献。

## 6. 关于未来的设想

该研究对未来排放情景和实现净零排放的策略进行了详细的模拟和分析，对其他轻工业也有很强的指导意义。在未来情景分析中，详细分析了不同国家不同减排措施的影响。在策略研究方面，针对每个国家提出了不同的策略组合。然而，以发展的视角考虑经济、资源和技术因素仍有进一步的研究空间：

- 1) 实现纸浆和造纸行业净零排放是一项复杂而艰巨的任务，不仅需要技术创新和政策支持，还需要大量的经济投入。在这个过程中，经济投入与减排措施之间的权衡尤为关键。经济投入包括直接的资本投入，也涉及人力资源的配置、市场的调整、消费者行为的改变等。为保证减排策略的经济性和有效性，在未来的研究中可以对每一项减排措施进行详细的成本效益分析，包括对减排措施的初始投资、运营成本、维护成本以及预期减排量的评估。同时，还需要考虑政策支持对减排措施经济性的影响，如税收优惠和补贴政策。例如，根据国际能源署的数据，虽然可再生能源的成本在下降，但在某些地区和行业，其部署仍然面临较高的初始投资和政策障碍 [7]。深入分析每项措施的成本效益，可以确保减排策略既经济又有效。
- 2) 除了该研究考虑的森林资源外，各国的其他资源禀赋，如水资源、矿产资源和可再生能源，也会对纸浆和造纸行业的净零排放路径产生影响。例如，水资源的可用性和管理将直接影响纸浆生产的效率和环境影响。缺水地区的造纸厂可能需要投资水循环和节水技术。还需要考虑采矿和矿产资源（如造纸中使用的碳酸钙）使用对环境和可持续性的影响 [8]。此外，太阳能、风能和生物质能等可再生能源为纸浆和造纸行业提供了清洁能源选择。通过在造纸厂内安装太阳能光伏板或风力发电机，生产过程可以直接利用现场的可再生能源并减少对化石燃料的依赖。因此，全面考虑国家资源禀赋的多样性和可用性对于实现纸浆和造纸行业的净零排放具有决定性作用。
- 3) 在分析未来情景时，应更加关注技术进步的潜在影响。数字孪生和生物精炼综合体等先进技术可能会显著改变纸浆和造纸行业的能源消耗和排放特征。数字孪生技术通过创建物理系统的高精度数字模型，允许在虚拟环境中模拟和分析生产过程。该技术可以帮助企业优化工艺流程、预测设备故障并调整生产策略，而不会影响实际生产。通过实时监控和分析生产数据，数字孪生可以指导企业实施更精确、更有效的能源管理措施，从而减

少能源浪费并降低温室气体排放 [9]。生物精炼综合体是一种集传统纸浆生产和生物能源生产于一体的新型工业模式。通过这种模式，纸浆生产过程中的副产品和废弃物可以转化为有价值的生物能源，如生物柴油、生物乙醇和热能 [10]。它可以提高资源利用效率，降低废物处理的成本和环境影响。在未来的减排战略研究中，应更加关注这些创新技术的潜力及其对减排战略的影响。

## 7. 结论

总体而言，本文总结并讨论了 Dai 等 [2] 研究的主要贡献和方法，其成果为各国纸浆和造纸行业实现净零排放提供了宝贵的路线图。此外，本文还在此基础上探讨了未来研究方向的思路，未来的研究可以进一步综合探讨经济、资源和技术因素如何影响净零排放路径。这种综合分析有助于更好地理解纸浆和造纸行业实现净零排放所面临的复杂挑战，从而促进其成功实施。

**基金项目：**该研究得到了国家自然科学基金（No. 52106017）、北京市自然科学基金（No. 3222031）、新型电力系统运行与控制全国重点实验室开放基金（No. SKLD23KZ09）、北京理工大学青年教师学术启动计划的资助。

**利益冲突：**作者声明没有潜在的利益冲突。

## 参考文献

1. International Energy Agency. Pulp and Paper; 2023. Available online: <https://www.iea.org/reports/pulp-and-paper> (accessed on 18 June 2024).
2. Dai M, Sun M, Chen B, et al. Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry. *Nature*. 2023; 626(7998): 327-334. doi: 10.1038/s41586-023-06962-0
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2022—Impacts, Adaptation and Vulnerability. Published online June 22, 2023. doi: 10.1017/9781009325844
4. Li Y, Luo X, Huang X, et al. Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: A case study in Suzhou, China. *Journal of Cleaner Production*. 2013; 57: 221-227. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.05.035
5. Leimona B, Mithöfer D, Wibawa G, et al. Sustainability certification: Multiple values of nature coexist in value chain transformations toward a common but differentiated responsibility. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2024; 66: 101393. doi: 10.1016/j.cosust.2023.101393
6. United Nations Framework Convention on Climate Change. Synthesis report by the co-facilitators on the technical dialogue; 2023. Available online: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sb2023\\_09\\_adv.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sb2023_09_adv.pdf) (accessed on 18 June 2024).
7. International Energy Agency. World Energy Investment 2021. Available online: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2021> (accessed on 18 June 2024).
8. Alliance for Water Stewardship. Water Stewardship in the Pulp and Paper Industry; 2022. Available online: <https://www.aiche.org/ifs/conferences/water-sustainability-pulp-and-paper-industry-workshop/2011/proceeding/session/summary> (accessed on 18 June 2024).
9. San O. The digital twin revolution. *Nature Computational Science*. 2021; 1(5): 307-308. doi: 10.1038/s43588-021-00077-0
10. IEA Bioenergy. Global biorefinery status report; 2022. Available online: <https://task42.ieabioenergy.com/publications/global-biorefinery-status-report-2022/> (accessed on 18 June 2024).

Commentary

## Commentary on “Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry”

Jian Li<sup>1,2,\*</sup>, Yunfei Zhang<sup>1</sup>, Jun Shen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China

\* Corresponding author: Jian Li, lijian2022@bit.edu.cn

---

**Abstract:** The pulp and paper industry is one of the most energy-intensive industries. Achieving net-zero emissions in this industry is crucial for mitigating global warming and reducing environmental pollution. The article entitled “Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry,” published in *Nature*, addressed this issue. Through an in-depth analysis of the historical emission data of the pulp and paper industry in 30 major countries, a series of country-specific net-zero strategies were proposed. This commentary reviewed the main content and views of that article, and the rigor and applicability of its methods are discussed. Then, the potential impacts of economic trade-offs, resource endowments, and technological advancements on the net-zero strategies of the pulp and paper industry in various countries are further considered.

**Keywords:** pulp and paper industry; net-zero emissions; national strategies