



环境工程学科基础研究领域亮点成果系列专稿

我国学者在造纸行业净零排放研究方面取得重要进展

Chinese scholars make significant advances in research on achieving net-zero emissions in the pulp and paper industry

联合国应对气候变化公约第 28 届缔约方大会 (COP28) 指出了当前实现《巴黎协定》的 1.5 °C 目标的行动窗口正在迅速变小, 强调了各国尽快采取深度减排措施的紧迫性。工业是全球温室气体排放的主要来源之一, 工业部门的脱碳对实现净零排放目标至关重要。与其他领域相比, 工业部门的脱碳更具复杂性与挑战性。造纸行业是全球人为温室气体排放的主要贡献者之一, 其温室气体排放呈现出上下游产业链相互作用、碳源与碳汇双重属性、区域异质性显著等复杂性特征, 推动该行业逐步脱碳并实现净零排放面临系统性挑战。在国家自然科学基金 (批准号: 52022023、52100210、72061147003) 的资助下, 复旦大学王玉涛教授团队领衔与国内外合作者在全球造纸行业净零排放方面取得进展。研究成果以“制浆造纸行业的国家差异化净零排放策略 (Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry)”为题, 于 2023 年 12 月 18 日在线发表于《自然》(Nature) 杂志上 (第一作者: 代敏)。

该研究建立了首个涵盖全球 30 个主要造纸生产与消费国家长时序 (1961—2019 年)、多阶段、多过程、高解析度的造纸行业温室气体排放数据集 (图 1), 揭示了造纸行业温室气体排放特征, 从时间、阶段、工艺流程、空间等多个维度识别了排放热点, 并通过情景分析研究提出了考虑各国本地化特征的 2050 年造纸行业净零排放策略。研究发现, 原料收集阶段和使用及废弃物管理阶段的温室气体排放几乎占据了总排放的一半, 凸显了关注生产阶段以外温室气体减排的重要性。

研究表明, 2050 年 30 个国家造纸行业都有望实现净零排放, 但实现的可能性和难度显著不同。多数发达国家可以通过单一措施实现净零排放, 但需基于特定环节实施极具挑战性的改进措施; 除了能效提升和能源转型之外, 森林资源丰富的热带发展中国家应优先考虑加强可持续森林管理, 而其他发展中国家应更加重视废纸管理相关措施。该研究强调了从系统视角研究造纸行业温室气体排放特征的必要性, 提出了考虑区域异质性的不同国家造纸行业实现净零排放的差异化策略 (图 2)。

该论文是《自然》主刊首篇关于造纸行业净零排放的研究文章, 为推动工业行业逐步脱碳并实现净零排放目标提供了重要的科学参考。

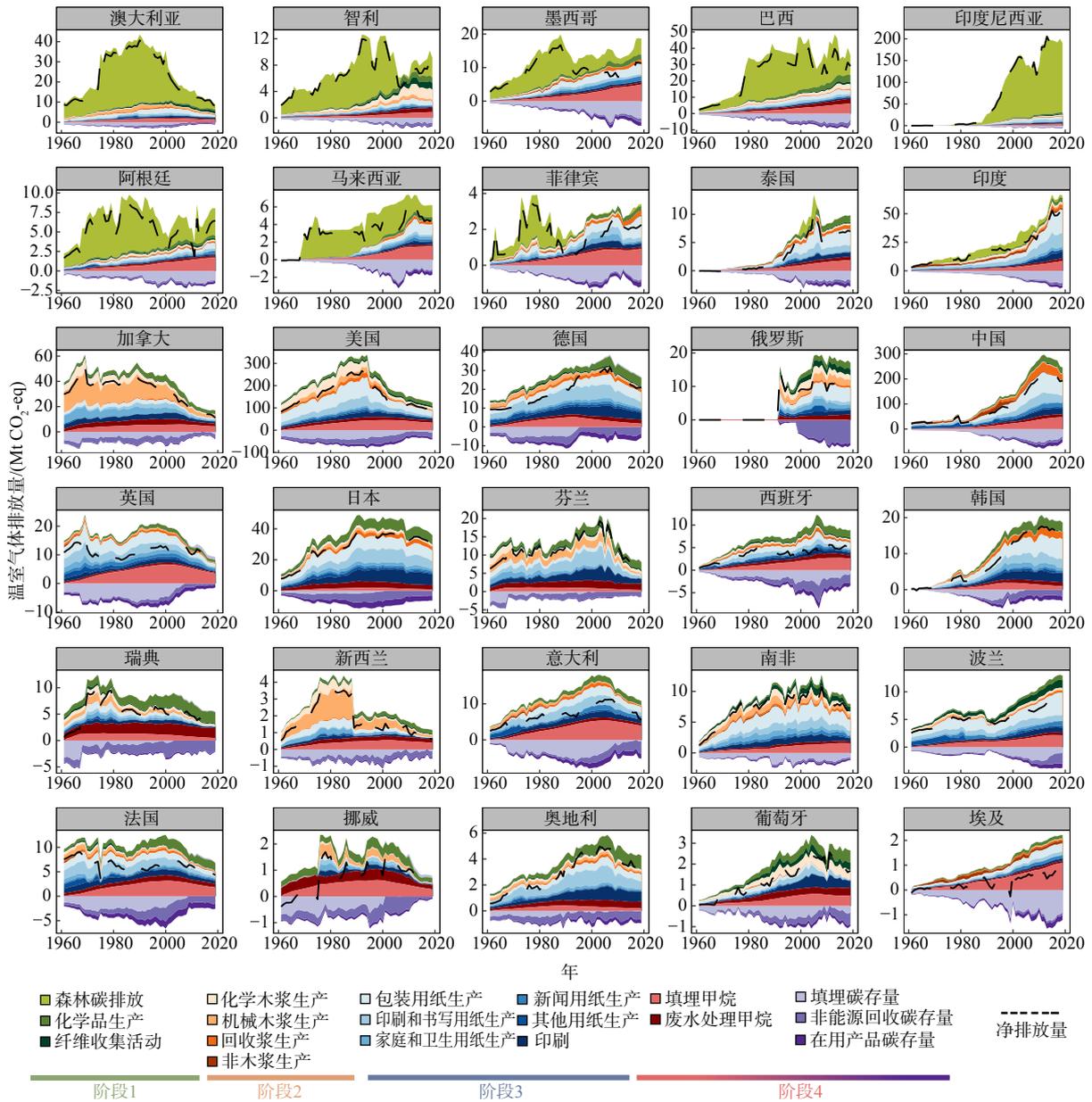


图1 1961—2019年30个国家造纸相关部门的温室气体排放

Fig. 1 GHG emissions of paper-related sectors in 30 countries from 1961 to 2019

地区	净零排放对各关键因素的要求						涉及措施最少的净零排放情景	涉及最少最佳措施的净零排放情景	在净零排放目标下提高回收率的难度
	木材采伐	能源结构	能源效率	废物处置	甲烷捕集率	回收率			
印度尼西亚	+++++	++++	+++++	+	++++	+	3: (3B)×2	3: (3B)×2	****
印度	+++++	++++	+++++	+	++++	+++	3: (3B)×1	2: (2B+3M)×1	*****
马来西亚	+++++	++++	+++	+	++++	+++	3: (2B+1M)×2, (3B)×1	2: (2B+1M)×2	*****
阿根廷	++++	++	+	+	++++	+	3: (2B+1M)×7, (3B)×4	2: (2B+1M)×7	****
巴西	+++++	++++	++	++	++++	++	3: (2B+1M)×2, (3B)×3	1: (1B+4M)×1	***
智利	++++	+++++	++	++	+++	+	3: (1B+2M)×3, (2B+1M)×5, (3B)×2	1: (1B+2M)×3	*****
泰国	+	++++	+++	+	++++	+++	2: (2B)×1	2: (2B)×1	*****
中国	+	++++	+++	+	++++	+++	2: (2B)×1	1: (1B+2M)×1	***
芬兰	+	+++++	++	+	+++	++	2: (1B+1M)×1, (2B)×2	1: (1B+1M)×1	*****
墨西哥	+	+	+	+	++++	+++	2: (1B+1M)×2, (2B)×5	1: (1B+1M)×2	***
加拿大	+	+	+	+	+	+	2: (1B+1M)×6, (2B)×5	1: (1B+1M)×6	*****
瑞典	+	++++	+++	+	++++	+	1: (1B)×1	1: (1B)×1	***
日本	+	+++	++	+	+	+++	1: (1B)×1	1: (1B)×1	*****
菲律宾	+	++++	+++	+	+++	+++	1: (1B)×1	1: (1B)×1	*****
南非	+	++++	++++	+	+++	+	1: (1B)×1	1: (1B)×1	*****
奥地利	+	+++	++	+	+	+++	2: (1B+1M)×2, (2B)×3	0: (5M)×1	*****
美国	+	+	+	+	+	+	2: (1B+1M)×3, (2B)×7	0: (4M)×3	**
波兰	+	++	++	+	+	++	2: (1B+1M)×5, (2B)×5	0: (3M)×2	*****
西班牙	+	+	+	+	+	+	1: (1B)×1	0: (3M)×8	****
新西兰	+	+	+	+	+	+	1: (1B)×2	0: (3M)×7	***
澳大利亚	+	+	+	+	+	+	1: (1B)×1	0: (2M)×1	*****
韩国	+	+++	+	+	+	+++	1: (1B)×1	0: (2M)×1	*****
德国	+	++	+	+	+	+++	1: (1B)×2	0: (2M)×1	*****
英国	+	++	+	+	+	++	1: (1B)×2	0: (2M)×1	****
埃及	+	+	+	+	+	+	1: (1B)×2	0: (2M)×1	*****
俄罗斯	+	++	++	+	+	+	1: (1B)×2	0: (2M)×2	***
葡萄牙	+	+	+	+	+	+	1: (1B)×1	0: (2M)×3	**
法国	+	+	+	+	+	+	1: (1M)×1, (1B)×2	0: (1M)×1	*****
意大利	+	+	+	+	+	+	1: (1M)×1, (1B)×3	0: (1M)×1	***
挪威	+	+	+	+	+	+	1: (1M)×2, (1B)×3	0: (1M)×1	***

图 2 2050 年各国造纸行业净零排放策略分析

Fig. 2 The analysis of strategies towards net-zero emissions in 2050

(责任编辑: 金曙光)

供稿单位: 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程科学三处。



王玉涛, 复旦大学环境科学与工程系教授、博士生导师, 复旦丁铎尔中心副主任, 上海能源与碳中和战略研究院副院长。主要从事产业生态环境系统工程方向的研究, 曾获国家优秀青年科学基金、国家重点研发计划项目等多个重点项目, 发表学术论文 120 余篇, 出版联合国环境规划署技术报告一份。担任中国生态学会产业生态专委会副主任, 曾获国家生态环境保护专业技术青年拔尖人才、中国生态学会青年科技奖、英国牛顿高级学者奖励基金等。



代敏, 复旦大学环境科学与工程系博士。主要从事环境系统工程、产业生态学、行业清洁生产等领域的研究工作。截至目前, 在 Nature、ES&T、RCR、JCLP 等期刊上发表论文 16 篇, 其中 SCI 论文 12 篇。参编专著 2 部, 获得软件著作权 1 项, 申请发明专利 1 项, 参与标准制定 1 项。获得 2023 年度南京大学紫金全兴环境基金优秀学子奖、上海市优秀毕业生、国际学术会议“杰出论文奖”等奖项。