

中国造纸工业碳排放特征与“双碳”目标路径探究



作者简介：程言君先生，研究员；主要研究方向：造纸工业环保政策研究及环境咨询。

程言君 张 亮 贾学桦 王焕松* 董 妍
(北京市科学技术研究院资源环境研究所, 北京, 100089)

摘 要：造纸工业既具有天然绿色属性，也是典型的能源资源密集型产业。推动造纸工业稳步实现碳达峰、碳中和，既是国家“双碳”目标总体要求，也是自身高质量发展的内在需求。本文结合行业能源资源消费结构、碳排放特征、生产工艺水平与节能低碳技术，介绍了造纸工业碳排放主要来源及控制节点和近年来碳排放发展历程，分析了中国造纸工业实现“双碳”目标面临的主要问题，探索了实现“双碳”目标的发展路径，提出了以产业和原料结构转型为引领，以能源结构调整和燃料替代为核心，以加强废弃物利用、降低能源资源消耗为重点，以寻求工艺设备和节能低碳技术突破为关键，以探索研发CCUS技术为补充，以提升碳排放管理水平为保障等多项举措，全面推进节能、减污、降碳协同增效，为造纸工业顺利实现“双碳”目标提供参考。

关键词：碳达峰；碳中和；造纸工业；节能低碳；发展路径

中图分类号：TS7；X324 **文献标识码：**A

Carbon Emission Characteristics and "Double Carbon" Target Path of China's Paper Industry

CHENG Yanjun* ZHANG Liang JIA Xuehua WANG Huansong* DONG Yan

(Institute of Resources and Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing, 100089)

(*E-mail: liepi_cheng@163.com; liepi_wanghs@163.com)

Abstract: Paper industry has eco-natural property, and is also a typical energy and resource intensive industry. To promote paper industry to steadily achieve carbon peaking and carbon neutrality goals is not only the overall requirement of the national "double carbon" goals, but also the internal demand of its own high-quality development. Based on the industry of consumption structure of energy and resources, carbon emission characteristics, production technology level and energy-saving and low-carbon technology, the main sources, control nodes and development process of carbon emission of paper industry in recent years were introduced in this paper. The main problems faced by China's paper industry to achieve the goals of "dual carbon" were analyzed. The development path of "double carbon" target was explored, and the key initiatives were put forward, including the structure transformation of industry and raw materials as the guide, fuel alternative and energy structure adjustment as the core, to focus to strengthen waste recycling and lower the energy and resources consumption, and to seek breakthrough for process, equipment and energy-saving and low-carbon technology as the key, to explore the development of CCUS technology as supplement and to enhance the management level of carbon emissions.

Key words: carbon peaking; carbon neutrality; paper industry; energy-saving and low-carbon; development path

2020年9月22日，在第七十五届联合国大会上，习近平主席正式提出中国碳达峰、碳中和目标愿景，将力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。其中，“碳达峰”是指碳排放总量达到历史最高值；“碳中和”是指人为碳排放量与固碳量相平衡的状态。在“双碳”目标上的庄严承诺和积极作为，体现了我国坚持“气候正义”价值诉求和《巴黎协定》框架下构建人类命运共同体的责任担当，不仅影响我国绿色

经济复苏和高质量发展、引领全球经济技术变革的方向，而且对保护地球生态和应对气候变化的国际合作具有重要意义^[1]。2021年1月5日，生态环境部发布

收稿日期：2022-03-18（修改稿）

基金项目：北京市科学技术研究院创新培育专项（2022G-0014、2022G-0016）。

*通信作者：王焕松，副研究员；主要研究方向：环境管理及环境评估。

《碳排放权交易管理办法（试行）》（生态环境部令第19号），并于2021年2月1日起施行，涵盖101家造纸企业自备电厂在内的全国碳市场第一个履约周期正式启动，已切实面临“碳约束”的新挑战。

造纸工业是关系国计民生的基础原材料工业，存在得天独厚的天然绿色属性，具有原料可再生、产品可循环利用、生产废弃物可转化为生物质能源等特点。同时，造纸工业又是一个典型的能源资源密集型行业，也是计划第一阶段纳入全国碳排放权交易市场的行业之一^[2-3]。对于目前碳排放基数较大、能源供给体系中化石能源占比达80%以上，且消费需求仍在上升的中国造纸工业而言，要如期实现“双碳”目标将面临前所未有的挑战，但也是产业绿色转型和促进高质量发展的重要契机^[4-6]。

1 造纸工业主要碳排放来源及控制节点

造纸工业企业碳排放源类别主要包括：①自备热电站、石灰窑、碱回收炉、纸机干燥等工段运行过程中煤炭、燃气、柴油、重油等化石燃料燃烧直接排放；②备料过程产生的树皮、木屑，硫酸盐制浆过程产生的黑液等生物质能源燃烧直接排放；③制浆过程碱回收工段用石灰石、自备电厂脱硫用外购碳酸盐分解过程产生的二氧化碳排放；④废水厌氧处理过程中产生的甲烷排放；⑤净购入使用电力、热力的间接排放等。

根据《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）》，造纸工业企业在进行碳排放核算与报告时，需要核算的温室气体包括二氧化碳和甲烷，核算范围包括上述碳排放源中的化石燃料燃烧排放、过程排放、购入的电力和热力产生的排放、废水厌氧处理的排放，而生物质燃料产生的碳排放不计入企业的碳排放总量中^[7-8]。相关研究表明，中国造纸工业的碳排放量主要来自于化石燃料燃烧和净购入电力、热力产生的排放，且化石燃料以煤炭为主，生物质能源占全部能源的比例不到20%，而欧盟2019年生物质能源比例已达到全部燃料的60%^[6,9]。对于单个造纸工业企业而言，其碳排放来源及强度，还受能源结构、原料结构、生产工艺、技术装备和碳排放管理水平等诸多因素影响^[8]。

2 中国造纸工业近年来碳排放发展历程

中国造纸工业自2000年以来迅速发展，纸浆、纸及纸板、纸制品生产量不断提高，到2020年已分别达到7378万t、11260万t、6860万t。随着中国造

纸工业的飞速发展，其碳排放量也随之增加。据估算，中国造纸工业2000年的碳排放量约为0.64亿t，2015年上升为1.52亿t，年均复合增长率约为5.93%^[5,10]。其中，2000—2003年，全球经济下滑给中国经济发展带来一定影响，造纸工业发展趋于平稳，碳排放量增速相对缓慢；2003—2006年，主要受中国加入WTO影响，造纸工业发展迅速，碳排放量也急剧增加，年均增长率一度达到了16.36%。2006年开始，为解决能源资源约束和生态环境压力问题，我国加大了促进节能降碳的政策力度和管制措施，随后2008年的世界金融危机给中国经济带来冲击，造纸工业受到波及，碳排放量增速放缓，甚至有所下降。2009年之后，中国经济快速得到恢复，造纸工业也得到蓬勃发展，碳排放量于2013年达到高值，约为1.59亿t。随后，在资源、能源和生态环境的多重约束下，以及受2020年以来新冠肺炎疫情影响，造纸工业碳排放量增速放缓甚至有阶段性下降，但其排放总量依不容小觑，目前仅次于电力、石化、化工、建材、钢铁、有色等高耗能行业，也因而被列为计划首批纳入全国碳排放权交易市场的重点行业之一。

3 中国造纸工业实现“双碳”目标面临的主要问题

3.1 纸和纸板消费需求持续增加

据调查统计，1980年我国GDP总量约4587亿元，纸和纸板消费量约350万t；2000年GDP约100280亿元，纸和纸板消费量约3500万t；2020年GDP约1015986亿元，纸和纸板消费量近11827万t，人均年消费量约为84kg，高于世界平均水平52kg/人，但远低于G7等发达国家平均水平170kg/人^[11]。

我国由于人口众多，到2035年要在全面建成小康社会的基础上基本实现社会主义现代化，达到中等发达国家水平，作为配套产业的造纸工业仍有较大消费需求空间。根据《造纸行业“十四五”及中长期高质量发展纲要》，通过对造纸产业属性、地位、作用等与经济发展关系及全球中等以上发达国家纸张消费能力分析，我国纸张消费趋势依据经济增长积极、正常和消极3种情景来模拟，预计到2035年国内纸及纸板需求量或将分别达到1.9亿t、1.7亿t和1.4亿t。如果兼顾2030年国家碳达峰目标，纸及纸板产能增长可能被迫受到抑制，因此2035年纸及纸板国内生产量应控制在1.7亿t以内，较目前还将增加约5000万t。在消费需求仍将持续提高的情况下，必然要求在产业结构优化、能源消费结构调整、可再生能源替代、节能低碳技术研发等方面取得更多的成果，才能

保障造纸工业保质保量顺利完成“双碳”目标。

3.2 能源资源结构问题突出

中国造纸工业能源长期以外购为主,主要为高碳含量的煤炭,相比发达国家目前主要使用生物质燃料和碳含量较低的石油、天然气等能源,我国以煤炭为主的能源结构使得造纸工业碳排放量居高不下^[6,12]。以煤炭为主的能源结构,同时受原料结构、技术装备、企业规模和产品结构等因素影响,也导致中国造纸工业能源综合利用率长期低于先进国家水平。

2000年以来,造纸原料结构相对改善,造纸工业企业也从国外引进了大量先进技术装备,有效提高了能源利用效率。2010年我国纸及纸板平均综合能耗约为680 kgce/t,2015年降至530 kgce/t,2020年又降至480 kgce/t,《造纸行业“十四五”及中长期高质量发展纲要》提出“十四五”期间还将力争降至450 kgce/t,能源效率水平逐步提高,但能源消费结构问题未能得到根本转变^[13]。同时,造纸工业资源约束问题也较为严峻,主要体现在优质造纸原料短缺,供需矛盾突出,对外依存度高。因而,能源资源结构问题将是造纸工业绿色低碳发展的重要制约因素。

3.3 废纸回收再利用仍需加强

废纸造纸技术流程较短,不仅是节约原材料和保障纤维原料结构的重要途径,也是实现循环经济和低碳发展的重要方式,能够大幅降低磨浆工艺所消耗的热力、电力能源,有效减少二氧化碳的排放^[14]。据《2021中国造纸年鉴》统计,自2011年以来,我国废纸回收总量年均增长率约为2.63%,2020年已达到约5493万t,目前为世界最大废纸生产国和消费国。我国废纸利用率曾一度达到世界较高水平,历史最高值为2009年的74.4%,近年来由于废纸进口受限而呈现逐年下降趋势,到2020年废纸利用率已下降为54.9%。我国废纸回收率2011—2020年平均值为46.78%,最高值为2019年的49%,相比世界发达国家,废纸回收率相对偏低。

随着我国废纸回收体系的不断完善,废纸回收量目前已达到可回收量的90%以上,但受到当前纸产品消费结构等限制,通过继续健全废纸回收系统进一步提升废纸回收率的空间极其有限^[11,15]。随着废纸进口禁令和“限塑令”的实施,国内废纸回收利用的循环速度将会加快,同时在疫情防控和国际环境影响下,以国内大循环为主的内循环经济模式将全面启动,我国废纸循环利用力度将进一步加强。

3.4 理论指引和技术支撑不足

我国作为发展中国家,尚处于新型工业化、信息

化、城镇化加快推进阶段,实现全面绿色转型的基础仍然薄弱,生态环境保护压力尚未得到根本缓解。与发达国家相比,我国实现“双碳”目标,时间更紧、跨度更大、困难更多。在此大背景下,造纸工业要如期实现“双碳”目标,亟需系统的理论指引和变革性技术支撑。我国国情与世界发达国家存在较大差异,中国造纸工业未来的能源替代技术和能源利用需求与发达国家也有所不同。制浆造纸过程需要大量热能,需要对行业替代能源来源和能源利用方式进行研究,探索更加高效的跨行业能源协作模式,更需要系统组织和专项规划,集中人力、物力和财力,才有可能取得行业共性技术的重大突破。

4 中国造纸工业“双碳”目标发展路径探讨

4.1 稳步实现产业和原料结构转型升级

产业结构和原料结构转型升级是引领造纸工业实现“双碳”目标的重要途径。一是优化企业布局 and 规模,提高产业集中度,发展低碳绿色产品,推进新工艺及技术创新,加快行业绿色制造体系建设。二是持续推动“林浆纸一体化”,加大造纸工业林基础建设和林业剩余物资源化利用,形成“以林促纸、以纸养林、林纸结合、协同发展”的产业格局。相比于单一的制浆造纸企业,“林浆纸一体化”企业不仅更易实现制浆造纸过程中的节能降碳,还能通过上游的植树造林改善生态环境,并吸收二氧化碳达到固碳效果,实现碳汇和碳封存,减少二氧化碳的排放。三是通过在沿海地区布局大型纸浆生产企业,利用国内外林业资源,提高国产纸浆的生产规模和生物质能源比例。四是多渠道回收境内废纸和在境外回收利用纸张包装物制浆,维持国内原料供应,实现绿色低碳循环发展。五是加快淘汰能效利用率低、经济效益差的落后和过剩产能,促进造纸工业绿色低碳可持续发展。

4.2 有序推进能源结构调整和燃料替代

造纸工业的碳排放主要源自于能耗,在国民经济增速趋于平缓、环境保护成本不断攀升、能源使用受限的背景下,必然要求造纸工业企业优化和调整能源结构。推动发展高效节能技术和清洁利用技术,提高非碳能源占比,以绿色清洁可再生能源代替化石燃料能源,构建新型能源供应系统,是造纸企业实现绿色低碳发展的核心内容。

造纸工业减污降碳重在减少煤炭的使用,充分依托生物质能源方面的行业优势,尽可能以生物质燃料替代煤炭将是现阶段造纸工业推动能源结构低碳化切实可行的途径之一,企业可在充分利用自产树皮、木

屑、干化污泥等基础上,加大区域内其他可用生物质燃料的收集和使用,提高生物质能源的占比。另外,通过自备热电站煤改气、碱回收炉及石灰窑等的能源清洁化改造,对废水处理过程中厌氧环节产生的沼气进行回收利用,以及提高光伏发电等清洁能源使用等,均可有效减少碳排放。关于燃煤锅炉能源清洁化改造,以国内某废纸制浆造纸企业为例,该企业建有1台吨位为180 t/h的燃煤锅炉,通过将锅炉燃料由煤炭替换为天然气,预计每年可减少二氧化碳排放量约34.16万t。关于石灰窑能源清洁化改造,以制浆年产能为200万t的国内某企业为例,通过将石灰窑燃料由重油替换为天然气或生物质气,每年可减少二氧化碳排放量分别约为6.09万t和22.12万t。关于光伏发电清洁能源使用,以国内某造纸企业为例,光伏装机容量19.9 MW,平均每年可生产2100多万kWh的太阳能绿色电力,预计每年减少二氧化碳排放量2万余t。

4.3 加强废弃物利用,降低能源资源消耗

加强废弃物利用、降低能源资源消耗、提升能源资源利用效率是实现碳减排的重要措施。一是配合“林浆纸一体化”和废纸回收利用,适当增加木材纤维的使用比例。以木材纤维作为原料生产纸产品不仅能保障产品的高质量,而且木材纤维的提取率较高,消耗的制浆化学品和能源较少,碳排放和污染相对较低,回收利用率也远高于非木浆。二是推动完善相关标准体系和使用水性阻隔涂层技术等,加强对废纸的回收利用,减少能源资源、新鲜用水、化学品的消耗,助推节能、减污、降碳协同增效。三是对非木浆进行合理开发与使用。我国可利用的非木材纤维来源广泛,造纸企业可探索研发先进的低碳处理技术和相关设备,进行清洁化生产并提高非木材纤维得率。四是处理造纸废水产生的污泥数量庞大,且成分结构较为复杂,含水量较高,加强污泥资源化、无害化处理将是造纸工业提高能源资源效率的重要突破口之一。

4.4 探索研发节能低碳和CCUS技术

随着节能降碳压力的与日俱增,寻求相关技术突破将是造纸工业转型升级的关键。造纸工业企业越来越重视在连续蒸煮、余热回收、废纸利用、热电联产等生产过程中节能低碳技术的研发,以及在生产中使用生物质能源和纳米材料等新兴材料。其中,蒸汽冷凝水闭式回收、纸机封闭气罩热能回收、高效双盘磨浆机、造纸靴式压榨和透平式真空泵等先进技术已逐步在造纸工业普及应用^[6,9]。从碳中和总体目标来看,通过调整能源结构和实施工艺、设备、技术优化升级改造后,将不得不排放的二氧化碳,需通过生态建

设、工程封存等措施固碳,才能达到碳中和。深入开发CCUS(碳捕集、利用与封存)技术是其中的重要可能途径之一^[16-17],被捕获的二氧化碳还可以作为高附加值产品的原材料或者化学品^[18],如将二氧化碳制成化学品(燃料)微藻的生产、混凝土碳捕集、生物能源的碳捕捉和存储,以及制浆造纸中酸析木质素、生产塔罗油、沉淀碳酸钙和利用二氧化碳作为反溶剂生产木质素纳米颗粒等。其中,沉淀碳酸钙技术目前已较为成熟,以国内某造纸企业为例,通过将循环流化床锅炉烟气中二氧化碳转化为轻质碳酸钙,年产能为20万t,每年可减少二氧化碳排放量约8.8万t。

4.5 全面提升行业企业碳排放管理水平

在“双碳”目标愿景和碳交易市场机制下,提升造纸工业企业的碳排放管理水平将是有效应对碳减排压力的重要保障。造纸工业企业应加强碳排放数据的监测、统计、核算、报告和碳资产的经营管理,协同产污、治污、排污的全过程环境管理要求,从原材料使用到产品的生产和出售,每个环节都要对碳排放加以检测和管控,制订企业减污降碳协同管理战略、构建企业环境管理体系、发展企业绿色低碳文化。

首先,应建立健全碳排放核查核算制度,根据《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)》中的核算边界,针对企业生产过程中的关键环节,做好碳排放核算工作,摸清自身排放水平,挖掘减排潜力,为获得碳配额、参与碳交易和对应进行节能低碳技术改造奠定坚实基础。其次,要将碳配额作为资产进行管理,积极参与碳排放权交易,在通过技术改进减少碳排放的同时,也要充分利用市场手段实现减排目标,两者相互配合,提高履约效率,降低履约成本,获取减排效益。另外,还要加强碳排放管理体系技术支持力量,设置节能降碳管理机构,注重碳管理人才队伍建设,建立贯穿企业碳排放全生命周期的碳管理制度和数据信息系统,明确整体产业链及工序的降碳关键点,通过科技创新及应用不断推进企业减污降碳转型落地。

5 结 语

回顾过去几十年的发展历程,中国造纸工业在资源和环境的双重压力下,实现了快速高效增长。展望未来,面对国际“低碳壁垒”日益加高和国内“双碳”目标的减排压力,以往外延扩张的发展模式将难以为继,中国造纸工业必将面临绿色低碳发展大转型,迎来一场涉及能源结构、产业结构、产业链、供应链、技术装备等方面的大变革。面对这场大转型、

大变革,造纸工业需在能源结构、生产方式、人为固碳等方面一起发力,加大投入、积极研究、谋定后动、系统布局,力争以技术上的先进性获得产业上的主导权。同时,宜尽早设计完成造纸工业碳达峰、碳中和路线图,建立有效的激励与约束机制,推动整个造纸工业的协调共进,并加快建立系统的检测、核算、报告等全过程标准体系,为造纸工业走绿色低碳发展道路提供方向指引、系统指导和标准支撑,全力推动造纸工业顺利实现碳中和目标。

参 考 文 献

- [1] 杨博文. 习近平新发展理念下碳达峰、碳中和目标战略实现的系统思维、经济理路与科学路径[J]. 经济学家, 2021(9): 5-12.
YANG B W. The Systematic Thinking, Economic Logic and Scientific Path for the Realization of Carbon Summit and Carbon Neutral Target Strategy under Xi Jinping's New Development Concept [J]. Economist, 2021(9): 5-12.
- [2] 张 欣, 张 放, 蔡 慧, 等. 典型制浆造纸厂的CO₂排放及碳强度的算法和分析[J]. 中国造纸学报, 2019, 34(1): 36-42.
ZHANG X, ZHANG F, CAI H, et al. Calculation and Analysis of CO₂ Emissions and Carbon Intensity of a Typical Integrated Paper Mill in China [J]. Transaction of China Pulp and Paper, 2019, 34(1): 36-42.
- [3] 谢 勤. 浅谈国内含自备电厂的制浆造纸企业碳排放核算和应对措施[J]. 中国造纸, 2020, 39(12): 69-74.
XIE Q. Discussion on Carbon Emission Accounting and Countermeasures of China's Pulp & Paper Enterprises with Captive Power Plant [J]. China Pulp & Paper, 2020, 39(12): 69-74.
- [4] 陈显越. “双碳”目标下造纸行业面临的挑战及应对策略[J]. 中华纸业, 2021, 42(19): 10-13.
CHEN X Y. The Challenges and Strategies for the Paper Industry under the "Double Carbon" Target [J]. China Pulp & Paper Industry, 2021, 42(19): 10-13.
- [5] 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. Carbon emission factor decomposition and emission reduction potential analysis of China's papermaking and paper products industry [J]. Resource Development and Market, 2018, 34(5): 638-643.
- [6] 张 丽, 孟早明. 碳达峰、碳中和对“十四五”时期造纸行业的影响[J]. 中华纸业, 2021, 42(13): 9-13.
ZHANG L, MENG Z M. Effects of carbon peak and carbon neutralization on paper industry during the 14th Five-Year Plan [J]. China Pulp & Paper Industry, 2021, 42(13): 9-13.
- [7] 国家发展和改革委员会. 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)[EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151111_758275.html, 2015.
National Development and Reform Commission. Greenhouse Gas Emission Accounting Method and Reporting Guide for Paper and paper Products Manufacturing Enterprises (Trial) [EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151111_758275.html, 2015.
- [8] 李永智, 刘晶晶, 孔令波. 造纸企业温室气体排放核算及其应用[J]. 中国造纸, 2017, 36(10): 24-29.
LI Y Z, LIU J J, KONG L B. Assessment of Green-house Gas Emission and Its Application in the Paper Industry [J]. China Pulp & Paper, 2017, 36(10): 24-29.
- [9] 张 杨, 胡永钢. “双碳”目标下我国中小型造纸企业环保管理路径研究[J]. 中国造纸, 2021, 40(12): 121-125.
ZHANG Y, HU Y G. Path Research on Environmental Protection Management of Small-and Medium-Sized Paper Making Enterprises in China under the Goal of "Double Carbon" [J]. China Pulp & Paper, 2021, 40(12): 121-125.
- [10] 吴凌云, 许向阳. 碳交易市场背景下中国造纸企业碳管理战略研究[J]. 林业经济, 2018, 40(4): 46-52.
WU L Y, XU X Y. Research on Carbon Management Strategy of Chinese Papermaking Enterprises under the Background of Carbon Trading Market [J]. Forestry Economics, 2018, 40(4): 46-52.
- [11] 房桂干, 沈葵忠, 李晓亮, 等. 限塑和禁止固废进口政策下中国造纸工业纤维原料的供应策略[J]. 中国造纸, 2021, 40(7): 1-7.
FANG G G, SHEN K Z, LI X L, et al. Supply Strategy of Fiber Sources for China's Paper Industry under Policies of Restriction Usage of Plastic and Banning Solid Wastes Importation [J]. China Pulp & Paper, 2021, 40(7): 1-7.
- [12] 于仲波, 孟早明. 中国造纸行业参与碳交易的现状与建议[J]. 造纸信息, 2019(5): 39-45.
YU Z B, MENG Z M. Status and Suggestion of Carbon Trading in China Paper Industry [J]. China Paper Newsletters, 2019(5): 39-45.
- [13] 吴凌云, 许向阳. 低碳经济背景下中国造纸行业发展现状分析[J]. 中国林业经济, 2020(4): 35-37.
WU L Y, XU X Y. Analysis of the development status of china's paper industry under the background of low carbon economy [J]. China Forestry Economics, 2020(4): 35-37.
- [14] SHANG D, DIAO G, LIU C, et al. The impact of waste paper recycling on the carbon emissions from china's paper industry [J]. Environmental Management, DOI: 10.1007/S00267-020-01417.
- [15] 郭彩云. 2020年我国废纸回收利用及废纸、再生纤维浆贸易概况[J]. 造纸信息, 2021(9): 17-24.
GUO C Y. Overview of Waste paper recycling and trade of waste paper and recycled fiber pulp in China in 2020 [J]. China Paper Newsletters, 2021(9): 17-24.
- [16] 秦积舜, 李永亮, 吴德彬, 等. CCUS全球进展与中国对策建议[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(1): 20-28.
QIN J X, LI Y L, WU D B. CCUS global progress and China's policy suggestions [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 20-28.
- [17] 米剑锋, 马晓芳. 中国CCUS技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2544.
MI J F, MA X F. Development Trend Analysis of Carbon Capture, Utilization and Storage Technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2544.
- [18] Mary S, Traci R, Kanwal M, et al. An overview of the Department of Energy's CarbonSAFE Initiative; Moving CCUS toward commercialization [J]. Aiche Journal, DOI: 10.1002/aic.16855. [CPP]

(责任编辑:刘振华)