万方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

# 环境科学

# ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

## 长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑，刘利萍，刘元元

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年8月
第42卷 第 8 期
Vol.42 No.8

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第42卷 第8期
2021年8月15日

# 目 次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 …… 严茹莎，王红丽，黄成，王倩，安静宇（3577）
天津市夏季不同臭氧浓度级别VOCs特征及来源 …… 王文美，高璟赟，肖致美，李源，毕温凯，李立伟，杨宁，徐虹，孔君（3585）
重庆市主城区$O_3$污染时期大气VOCs污染特征及来源解析 …… 李陵，李振亮，张丹，方维凯，徐芹，段林丰，卢培利，王锋文，张卫东，翟崇治（3595）
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性 …… 陈鹏，张月，张梁，熊凯，邢敏，李珊珊（3604）
2016冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析 …… 毛曳，张恒德，朱彬（3615）
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 …… 党莹，张小玲，饶晓琴，康平，何建军，卢宁生，华明，向卫国（3622）
郑州市$PM_{2.5}$组分、来源及其演变特征 …… 赵孝因，王申博，杨洁茹，马秋红，刘洋，张瑞芹（3633）
上海市$PM_{2.5}$中重金属元素对COVID-19控制的高频响应 …… 程凯，常运华，旷雅琼，邹忠（3644）
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 …… 段家乐，巨天珍，黄蕊蕊，梁卓红，范佳晨（3652）
河南省2016~2019年机动车大气污染物排放清单及特征 …… 高丹丹，尹沙沙，谷幸珂，卢轩，张欢，张瑞芹，王玲玲，齐艳杰（3663）
广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险 …… 刘晓途，彭长凤，陈达，石玉盟，汤书琴，谭弘李，黄维（3676）
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 …… 武倩倩，吴强，宋帅，任加国，杨胜杰，吴颜岐（3682）
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征 …… 杨婷，王阳，徐静怡，吴萍，王为东（3695）
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征 …… 周蕾，周永强，张运林，朱广伟（3709）
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征 …… 俞晓琴，崔扬，陈慧敏，朱俊羽，李宇阳，郭燕妮，周永强，韩龙飞（3719）
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征 …… 周石磊，陈召莹，张甜娜，张紫薇，孙悦，姚波，崔建升，李再兴，罗晓（3730）
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化 …… 宁成武，包妍，黄涛，王杰（3743）
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素 …… 陈业，彭凯，张庆吉，蔡永久，张永志，龚志军，项贤领（3753）
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响 …… 罗芳，鲁伦慧，李哲，韦方强（3763）
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 …… 肖宇婷，姚婧，谌书，樊敏（3773）
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响 …… 周曙仡聃，朱永官，黄福义（3785）
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用 …… 王金鹏，赵阳国，胡钰博（3791）
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果 …… 程羽霄，吴丹，陈铨乐，高方舟，杨永强，刘有胜，应光国（3799）
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价 …… 黄应平，金蕾，朱灿，李锟，谢平，David Johnson，刘慧刚，席颖（3808）
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 …… 李芸邑，刘利萍，刘元元（3820）
淡水系统中4种塑料颗粒的老化过程及DOC产物分析 …… 李婉逸，刘智临，苗令占，侯俊（3829）
DOM对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制 …… 丁翔，李忠武，徐卫华，黄梅，文佳骏，金昌盛，周咪，陈佳（3837）
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性 …… 王雪凝，张炳亮，潘丙才（3847）
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响 …… 王文琪，李冬，高鑫，张杰（3858）
$A^2/O$与倒置$A^2/O$工艺低温条件下的氨氮去除能力解析 …… 李金成，郭雅妮，齐嵘，杨敏（3866）
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及PICRUSt2功能预测分析 …… 闫冰，付嘉琦，夏嵩，易其臻，桂双林，吴九九，熊继海，魏源送（3875）
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析 …… 马切切，袁林江，牛泽栋，赵杰，黄崇（3886）
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析 …… 朱宇恩，文瀚萱，李唐慧娴，李华，吴超，张桂香，阎敬（3894）
基于GIS及APCS-MLR模型的兰州市主城区土壤PAHs来源解析 …… 管贤贤，周小平，雷春妮，彭嫣雯，张松林（3904）
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价 …… 唐世琪，刘秀金，杨柯，郭飞，杨峥，马宏宏，刘飞，彭敏，李括（3913）
大气$CO_2$摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田$N_2O$排放的影响 …… 于海洋，黄琼，王天宇，张广斌，马静，朱春梧，徐华（3924）
椰糠生物炭对热区双季稻田$N_2O$和$CH_4$排放的影响 …… 王紫君，王鸿浩，李金秋，伍延正，符佩娇，孟磊，汤水荣（3931）
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土$N_2O$排放的影响 …… 王鸿浩，谭梦怡，王紫君，符佩娇，李金秋，汤水荣，伍延正，孟磊（3943）
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应 …… 杨胜香，曹建兵，李凤梅，彭禧柱（3953）
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析 …… 秦芙蓉，张仕颖，夏运生，张乃明，吴程龙，何忠俊，岳献荣，田森林（3963）
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应 …… 林春英，李希来，张玉欣，孙华方，李成一，金立群，杨鑫光，刘凯（3971）
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响 …… 靳玉婷，李先藩，蔡影，胡宏祥，刘运峰，付思伟，张博睿（3985）
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响 …… 陈兆进，林立安，李英军，陈彦，张浩，韩辉，吴乃成，Nicola Fohrer，李玉英，任学敏（3997）
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征 …… 周军波，靳振江，肖筱怡，冷蒙，王晓彤，潘复静（4005）
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制 …… 刘凌青，肖细元，郭朝晖，彭驰，姜智超，阳安迪（4015）
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响 …… 王璨，张煜行，何明靖，刘文新，卢俊峰，魏世强（4024）
4种钝化剂对污染水稻土中Cu和Cd的固持机制 …… 丁园，敖师营，陈怡红，肖亮亮（4037）
叶施L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响 …… 张雅荟，王常荣，刘月敏，刘雅萍，刘仲齐，张长波，黄永春（4045）
镉对不同生长期籽粒苋植物螯合肽的影响 …… 刘佳欣，陈文清，杨力，李娜，王宇豪，康愉晨（4053）
中国造纸业物质代谢演化特征 …… 刘欣，杨涛，武慧君，袁增伟（4061）
《环境科学》征订启事(3651)　《环境科学》征稿简则(3718)　信息(3836，3885，3893)

环 境 科 学
Environmental Science
第42卷第8期 2021年8月
Vol.42, No.8 Aug., 2021

# 中国造纸业物质代谢演化特征

刘欣[1], 杨涛[1,2], 武慧君[2], 袁增伟[1*]
(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001)

**摘要**: 造纸业是与国民经济和社会发展关系密切并具有可持续发展特点的重要基础原材料产业. 为了解中国造纸业资源消耗及环境污染变化趋势,基于经济系统造纸业物质流分析(EW-MFA)方法原理,建立了中国造纸业物质代谢分析模型,定量分析2005~2017年中国造纸业物质输入/输出、代谢强度和循环利用率等演化特征. 结果表明, 2005~2017年中国造纸业的物质输入与输出总体呈下降趋势,水的贡献占比高达90%以上. 近年来,随着造纸业原料结构的不断优化,非木材制浆的比例从42%下降至13%,主要被废纸制浆为主,木材制浆为辅的方式所取代,单位纸产品的资源消耗量得以大幅降低. 2017年吨纸及纸板直接物质输入为26 t,较2005年的79 t下降了67%,其中新鲜水消耗量下降了约69%. 水资源循环利用率大幅上升, 2017年水循环率高达77%. 目前,纸及纸板的生产越来越依赖于国内废纸和进口木材的投入,两者占比分别由2005年的21%和9%上升至2017年的60%和31%. 然而,国内废纸回收率仍处于较低水平,需通过加强回收体系建设、提高居民回收意识等措施以缓解限制废纸进口造成的原料供应紧缺.

**关键词**: 造纸业; 经济系统物质流分析(EW-MFA); 物质代谢; 资源循环; 可持续发展
**中图分类号**: X24 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)08-4061-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202012076

# Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry

LIU Xin[1], YANG Tao[1,2], WU Hui-jun[2], YUAN Zeng-wei[1*]
(1. State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract**: The pulp and paper industry is an important industry that is closely related to national socioeconomic development. To understand the historical trends of resource consumption and environmental pollution, we conducted an economy-wide material flow analysis and quantitatively evaluated the dynamic characteristics of input-output balances, material metabolism intensity, and resource recycling rate of China's pulp and paper industry, from 2005 to 2017. The results indicate downward trends in the material inputs and outputs of China's pulp and paper industry from 2005 to 2017, with water contributing over 90% of the totals. In recent years, with the continuous optimization of the raw material structure of the paper industry, the proportion of non-wood pulping has dropped from 42% to 13% and has been replaced by mainly waste paper pulping and wood pulping. Resource consumption can still be greatly reduced. In 2017, the amount of direct material input per ton of paper and paperboard had decreased by 67% from 2005 to 26 t. The consumption of fresh water per ton of paper and paperboard dropped by approximately 69% over the study period, whereas the water recycling rate increased significantly, reaching 77% in 2017. At present, the production of paper and paperboard is increasingly dependent on the input of domestic waste paper and imported wood, the proportions of which have increased from 21% and 9% in 2005 to 60% and 31% in 2017, respectively. However, the rate of domestic waste paper recycling is relatively low, and measures such as strengthening the construction of the recycling system and educating the residents about recycling are needed to alleviate the shortage of raw materials caused by restrictions on waste paper imports.

**Key words**: pulp and paper industry; economy-wide material flow analysis (EW-MFA); material metabolism; resource recycling; sustainable development

造纸业是关系国民经济发展和社会文明进步的重要产业. 随着经济社会的快速发展,中国已成为世界上最大的纸及纸板生产国[1],年产量维持在1.0亿t左右,纸浆消耗总量约0.8亿t[2~4]. 然而,造纸业的资源消耗和环境污染问题也日益凸显. 废纸作为当前造纸业使用最多的纤维原料,长期依赖进口[5],但近年来进口废纸政策持续趋严[6],国内造纸产业链出现较为明显的原料缺口; 而木材和非木材(主要为竹子、稻麦草和蔗渣等)等造纸原料制浆不仅对资源的依赖程度大,造纸废水还存在成分复杂和难处理等特点,环境污染严重[7,8]. 为了推进落实造纸业的可持续发展,有必要从行业层面系统衡量造纸业的资源利用和污染排放情况,从而识别其资源环境"热点"环节及提升空间.

经济系统物质流分析(economy-wide materials flow analysis, EW-MFA)是一种研究物质代谢状况的系统化评估方法,在国家、省级和行业层面均有所应

**收稿日期**: 2020-12-09; **修订日期**: 2021-01-31
**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2018YFF02155); 江苏省高层次创新创业人才引进计划项目
**作者简介**: 刘欣(1989~),女,博士,副研究员,主要研究方向为物质循环及其环境效应,E-mail: xinliu@nju.edu.cn
* 通信作者,E-mail: yuanzw@nju.edu.cn

用[9~11]. 在行业层面,施晓清等[12]定量分析了 2007 年武汉市造纸业的原材料、水和能源等资源代谢情况,发现在中水回用方面离全国平均水平还有一定差距; 朱兵等[13]对中国 2010 年水泥及水泥基材料行业涉及的资源进行了整体分析,并针对关键过程评估了若干降低原料消耗措施的效果; 戴铁军[14]采用 EW-MFA 方法研究了河北省钢铁行业发展的规模、结构和运行效率等特征; 岳强等[15]在研究 1995 ~2011 年中国钢铁工业物质流动格局的基础上,开展了脱钩效应分析. 目前,尚未对中国造纸业的物质代谢演变情况进行系统研究. 近年来,纸相关的物质流分析研究主要集中在废纸回收方面. 例如, Van Ewijk 等[16]绘制了从原料生产到报废处置的全球纸物质流桑基图,但不涵盖其他的物料投入和污染排放. Sevigné-Itoiz 等[17]用物质流分析和生命周期分析相结合的方法量化了西班牙废纸回收过程的温室气体排放量; Pivnenko 等[18]比较了不同废纸回收情景下废纸中 BPA、DEHP 和 MOHs 这 3 种化学物质含量的变化情况; Hong 等[19]量化了韩国各种纸制品加工过程的原材料、成分和产品产量等信息; Liu 等[20]重点关注非规范回收方式对中国废纸回收体系经济效益和环境影响的贡献.

综上所述,本研究通过建立中国造纸业物质流分析框架及主要输入/输出的计算方法,探讨中国造纸业 2005 ~2017 年间的资源消耗及污染排放变化趋势,分析中国造纸业输入/输出、代谢强度和循环利用率等演化特征及其影响因素,以期为我国造纸业未来推进可持续发展提供决策依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 系统框架

造纸可看作是一个加水和脱水的综合过程,造纸业主要包括制浆和造纸两个工段:①通过制浆工段将废纸、木材或非木材等原料碎解成纤维悬浮液,根据不同纸产品需求通过筛选、除渣、脱墨和漂白等工艺过程获得相应的废纸浆、木浆或非木浆; ②生产的纸浆在造纸工段通过各种过滤手段,如过滤、抽吸、压榨和烘干等方法,将纤维悬浮液里的纤维分离出来,并形成组织均匀的纸页.

根据欧盟导则[21]并结合中国实际情况,本研究构建了中国造纸业物质流分析框架(图 1),包括制浆和造纸两个生产过程,并梳理了 2005 ~2017 年各类输入与输出物料的流向. 根据输入/输出物料的来源/去向不同,在输入和输出端区分考虑国际和本地两种情况. 在输入端,进口输入包括废纸、木材和纸浆; 本地输入主要包括废纸、木材和非木材等原料输入,煤炭、天然气和电力等能源输入,以及新鲜水输入. 在输出端,本地输出包括纸及纸板产品,废气、废水和固废排放等; 出口输出包括纸浆和纸及纸板. 纸及纸板产品包括新闻纸、箱板纸、瓦楞原纸、未涂布印刷纸、白纸板、涂布印刷纸、生活用纸、包装用纸、特种纸及纸板和其他纸及纸板. 由于实际生产过程中,各类原料会存在开采但未被利用的部分,该部分被称为隐藏流,或生态包袱,通常采用隐藏流系数来衡量[22,23]. 循环量具体指造纸业的循环水消耗量.

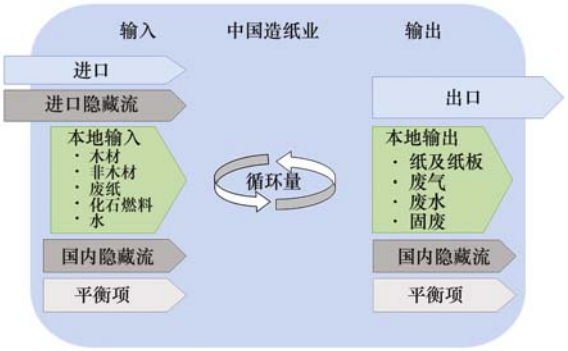


**图 1 中国造纸业物质流分析框架示意**

Fig. 1 Material flow analysis framework of China's pulp and paper industry

### 1.2 计算方法与数据来源

#### 1.2.1 物质输入

(1)纸浆原料 纸浆产量、消耗量和进口量以及废纸进口与本地回收量均来源于文献[24]. 由于木材和非木材消耗量无相关统计数据,因此,采用以下公式估算:

$$M_i = m_j \times R_{ij} \tag{1}$$

式中,$M_i$ 为第 $i$ 种原料消耗量,$m_j$ 为第 $j$ 种纸浆产量,$R_{ij}$为生产 1 t 第 $j$ 种纸浆的第 $i$ 种原料消耗量. 据相关资料,生产 1 t 木浆消耗木材约4.062 5 t,而生产 1 t 非木浆消耗非木材约 3 t[25,26].

造纸业消耗的木材来源于国内开采和国外进口,采用以下公式估算:

$$W_{进口} = M_{木} \times \alpha \tag{2}$$

$$W_{国内} = M_{木} \times \beta \tag{3}$$

式中,$W_{进口}$和 $W_{国内}$分别为进口木材和国产木材消耗量, $M_{木}$为公式(1)中计算得到的木材消耗量,$\alpha$ 和 $\beta$ 分别为造纸业进口木材和国产木材的所占比例,由 2005 ~2017 年的中国统计年鉴中进口木材和国产木材年消费量与总木材消费量的比值估算所得.

造纸工段,不同纸及纸板产品的纸浆消耗量有所差异,需要通过各类纸及纸板产品产量乘以单位产品的纸浆消耗系数来确定(表 1).

**表 1　制浆和造纸工段的原料消耗、能耗、取水量和废水排放系数[1)]**

Table 1　Raw material, energy, fresh water consumption, and wastewater discharge coefficients in pulping and papermaking stages

| 工段 | 类别 | 纸浆消耗系数（以纸计）/$t \cdot t^{-1}$ | 能耗系数 /$tce \cdot t^{-1}$ | 取水系数 /$m^3 \cdot t^{-1}$ | 废水排放系数 /$m^3 \cdot t^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 制浆 | 木浆 | — | 0.24 | 25 | 21 |
| | 非木浆 | — | 0.36 | 62 | 51 |
| | 废纸浆 | — | 0.11 | 8 | 6 |
| 造纸 | 新闻纸 | 1.02 ~ 1.05 | 0.264 | 11 | 9.4 |
| | 箱板纸 | 1.00 ~ 1.05 | 0.264 | 11 | 9.4 |
| | 瓦楞原纸 | 1.05 ~ 1.10 | 0.28 | 11 | 9.4 |
| | 未涂布印刷纸 | 0.96 ~ 1.00 | 0.31 | 17.2 | 17 |
| | 白纸板 | 1.00 ~ 1.05 | 0.28 | 13 | 10.4 |
| | 涂布印刷纸 | 1.00 ~ 1.05 | 0.356 | 17 | 14.4 |
| | 生活用纸 | 1.05 ~ 1.30 | 0.466 | 19.8 | 16.8 |
| | 包装用纸、特种纸及其他 | 0.92 ~ 1.05 | 0.264 | 11 | 9.4 |

1）数据来源于文献[25,27]；tce 表示吨标准煤

（2）化石燃料　根据文献[28,29]，确定造纸业的主要能源消费包括煤炭、原油和天然气这 3 种一次能源以及焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油和电力这 6 种二次能源. 现有行业层面的 EW-MFA 研究在测算能源消耗时采用的方法不尽相同. 例如，有研究直接将一次能源和二次能源消耗量相叠加，作为总的能源消耗量[12,30]；而有研究则为了避免重复计算，只考虑一次能源消耗量[31,32]. 由于造纸业的能源消耗主要为煤炭，而煤炭消费量同时包括用于发电和供热，为避免重复计算，本研究采用终端煤炭消费量（扣除用于加工转换二次能源的消费量和损失量）计算. 同时，为了简化计算，将全部能源物质统一换算成标准煤[33].

基于各类纸浆/纸及纸板产量及其能耗系数（表 1），汇总计算得到制浆和造纸工段的能耗占比，从而将造纸业的总化石能源消耗量根据该能耗占比进一步分配至各个工段.

（3）水　根据文献[28,29]，采用造纸业的工业取水量作为水输入量. 基于各类纸浆/纸及纸板产量及其取水系数（表 1），汇总计算得到制浆和造纸工段的取水量占比，然后将造纸业的总取水量根据该取水量占比进一步分配至各个工段.

### 1.2.2　物质输出

（1）纸浆和纸及纸板产品　纸浆的出口总量和纸及纸板产品的产量及出口量均来源于文献[24].

（2）废水　本研究中造纸业的废水排放总量来源于文献[29]. 制浆和造纸工段，基于各类纸浆产量和产品产量及其相关排放系数，将废水排放总量根据其占比分配至各个工段（表 1）.

（3）废气　排放到大气中的物质主要有 $CO_2$[32]、$SO_2$、烟尘和工业粉尘等. 其中，$SO_2$、烟尘和工业粉尘等废气排放数据来源于文献[29]. 然而，统计数据不包括 $CO_2$ 排放量，因此需要通过各类能源的消耗量与燃料燃烧过程的 $CO_2$ 排放系数（表 2）[34,35]相乘得到二氧化碳排放量. 我国 70% 以上的电力来自于火力发电，所以参照火力发电的煤耗，将电力消耗量转化成煤炭量，即：生产1 kW·h电消耗原煤0.35 kg[14].

**表 2　燃料燃烧 $CO_2$ 和 $H_2O$ 排放系数**

Table 2　$CO_2$ and $H_2O$ emission coefficients from fuel combustion

| 燃料 | $CO_2$ 排放系数（以燃料计）/$t \cdot t^{-1}$ | $H_2O$ 排放系数（以燃料计）/$t \cdot t^{-1}$ |
|---|---|---|
| 煤炭和焦炭 | 2.00 | — |
| 原油和汽油 | 3.04 | 1.32 |
| 煤油 | 3.07 | 1.33 |
| 柴油 | 3.15 | 1.36 |
| 燃料油 | 3.02 | 1.39 |
| 天然气/$t \cdot m^{-3}$ | 2.03 | 1.66 |

制浆工段的废气排放通过各类纸浆产量与相关废气排放系数的乘积所得，排放系数来源于相关研究中的生命周期清单数据（表 3）[36~38]，造纸工段的各类废气排放量是造纸业的总废气排放量与制浆工段排放量的差值.

**表 3　废气和固废的排放系数**

Table 3　Emission coefficients of exhaust gas and solid waste

| 类别 | 木浆 /$kg \cdot t^{-1}$ | 非木浆 /$kg \cdot t^{-1}$ | 废纸浆 /$kg \cdot t^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| $SO_2$ | 2.50 | 2.91 | 0.89 |
| $NO_x$ | 2.42 | 1.83 | 1.51 |
| 烟尘和粉尘 | 0.51 | 0.73 | 0.21 |
| 固废 | 208.62 | 708.76 | 133.64 |

（4）固废　根据文献[29]获得整个造纸业每年的固废排放总量，再通过 2017 年各类纸浆的产量和固废排放系数的乘积得到制浆工段固废排放量，造纸工段固废排放量即为总排放量减去制浆工段排放量.

### 1.2.3　隐藏流

根据隐藏流的定义，采用以下公式估算：

$$E_i = P_i \times Q_i \quad (4)$$

式中,$E_i$ 为第 $i$ 种原料隐藏流,$P_i$ 为第 $i$ 种原料消耗量,$Q_i$ 为第 $i$ 种原料的隐藏流系数. 由于煤炭开采过程中存在未被利用的部分如矸石等,化石能源的隐藏流系数取煤炭工业产排污系数0.714 3; 木材、非木材和废纸在投入生产前需要经过去皮、去叶或除杂和包装等,因此,隐藏流系数分别取 0.175、0.075 和 0.015[39]; 外购纸浆在转运至造纸生产前存在部分损失,隐藏流系数根据相关企业调研得到,约为 0.07.

### 1.2.4 平衡项和循环量

平衡项包括氧气和水蒸气. 氧气在工业系统中主要消耗于能源的使用过程中,没有直接可用的统计数据,用主要氧化产物($CO_2$、$SO_2$ 和水蒸气)的排放量进行汇总估算,即:化石燃料燃烧排放的 $CO_2$ 排放量乘以 32/44, $SO_2$ 排放量乘以 1/2,燃烧产生的水蒸气量乘以 16/18. 水蒸气来源于化石燃料的燃烧释放和造纸业生产过程的蒸发损失. 化石燃料燃烧释放的水蒸气量等于各类燃料消耗量与其对应 $H_2O$ 排放系数乘积的总和(表 2). 不论是整个造纸业还是制浆和造纸两个工段,根据质量守恒定律,生产过程的水蒸气蒸发量为取水量与废水排放量的差值.

循环量主要包括水的循环量,相关数据来源于文献[29].

### 1.3 造纸业物质代谢评价指标

基于以上数据,本研究选用输入、输出、强度和效率这 4 类指标,对中国造纸业的物质代谢情况进行分析(表 4).

**表 4 物质流分析指标**

Table 4 Material flow analysis indexes

| 类别 | 指标 | 计算公式 |
|---|---|---|
| 物质输入指标 | 直接物质输入(DMI) | 本地输入 + 进口 |
| | 物质总输入量(TMI) | 直接物质投入 + 国内隐藏流 |
| | 物质需求总量(TMR) | 物质总输入量 + 进口隐藏流 |
| 物质输出指标 | 生产排放(DPO) | 废气 + 废水 + 固废 |
| | 直接物质输出(DMO) | 加工排放 + 出口 |
| | 物质输出总量(TMO) | 直接物质输出 + 区域内隐藏流 |
| 强度指标 | 物质输入强度 | DMI/纸及纸板总产量 |
| | 物质输出强度 | DPO/纸及纸板总产量 |
| 效率指标 | 循环利用率 | 水循环量/用水总量 |

## 2 结果与讨论

### 2.1 物质代谢趋势

2005 ~ 2017 年,中国造纸业的物质代谢规模变化明显(图 2). DMI 和 TMO 中,水的贡献占比始终高达 90% 以上. 期间,DMI 和 TMO 由 44 亿 t 减至 29 亿 t,降幅 35%,主要因为水的投入及废水排放大幅减少. 在输入端,DMI 和 TMR 年均降幅约为 2.7%,两者的差值(即输入隐藏流)不断增大,由3 032万 t 增加到4 022万 t. 进口隐藏流由 224 万 t 增至 671 万 t,其中,进口木材、废纸和纸浆隐藏流分别由 146 万、26 万和 53 万 t 增至 485 万、39 万和 148 万 t; 国内隐藏流由2 088万 t 增至3 351万 t,其中,本地木材、非木材和化石燃料隐藏流分别由 118 万、284 万和2 406万 t 增至 255 万、134 万和2 962万 t.

随着我国人口不断增加和生活品质逐步提高以及互联网时代网购大众化,纸及纸板消费量不断提高,这带动了造纸业的快速发展. 纸及纸板产量已由 2005 年的5 600万 t 提高到 2017 年的 1.1 亿 t(图 2),其中,生活用纸、箱板纸和瓦楞原纸的产量增长尤为明显. 同时,主要物料消耗量和污染物排放量均有所增加. 废纸、木材和非木材等原料消耗量分别由 2005 年的3 512万、1 507万和3 780万 t 变为 2017 年的7 857万、4 225万和1 791万 t; 化石能源消耗量增长了 23%, 2017 年达4 147万 t 标煤; 固废和废气排放量从 2005 年的1 243万 t 和7 674万 t 分别增加到 2017 年的2 114万 t 和8 268万 t. 值得注意的是,由于节水技术的不断发展,工业循环水量大幅提高,使得纸及纸板产量大幅上升的同时,造纸业的取水量和废水量反而大幅下降,分别由 2005 年的 42 亿 t 和 37 亿 t 降至 2017 年的 26 亿 t 和 21 亿 t. 2017 年,造纸业的循环量约 90 亿 t,较 2005 年的 34 亿 t 增长了 165%,其中,水循环量的贡献最大.

本研究分析制浆和造纸两个工段可知, 2017 年化石燃料和新鲜水消耗主要集中在造纸工段(图 3). 制浆和造纸工段的化石能源消耗分别为1 052万 t 标煤和3 095万 t 标煤,其中,制浆工段的能耗主要发生在废纸碎解、木材或非木材的蒸煮过程,而造纸工段则是烘干过程的能耗较高. 制浆工段的总取水量为 11 亿 t,主要用于木浆和非木浆生产过程的洗浆、筛选、除砂和漂白以及废纸浆生产过程的碎浆、筛选和浓缩等工序,废水排放量约为 9 亿 t; 造纸工段的取水总量为 14 亿 t,主要用于调节纸浆进入网部的浓度和生产蒸气(烘干成型纸页),废水排放量约为 12 亿 t. 在废气排放方面, $SO_2$ 主要来源于锅炉、碱回收炉、石灰窑和臭气焚烧炉等; $NO_x$ 主要来源于锅炉碱、碱回收炉和臭气焚烧炉; 烟尘(粉尘)主要来源于锅炉碱、回收炉、臭气焚烧炉和石灰石破碎. 造纸工段的高物耗投入,也造成了更多的废气排放,其中, $CO_2$、$SO_2$ 和烟尘(粉尘)排放量分别为 6 164万、18 万和 9 万 t; 而制浆工段存在的蒸煮、漂白和脱墨等化学反应过程,使得制浆工段 $NO_x$ 排放

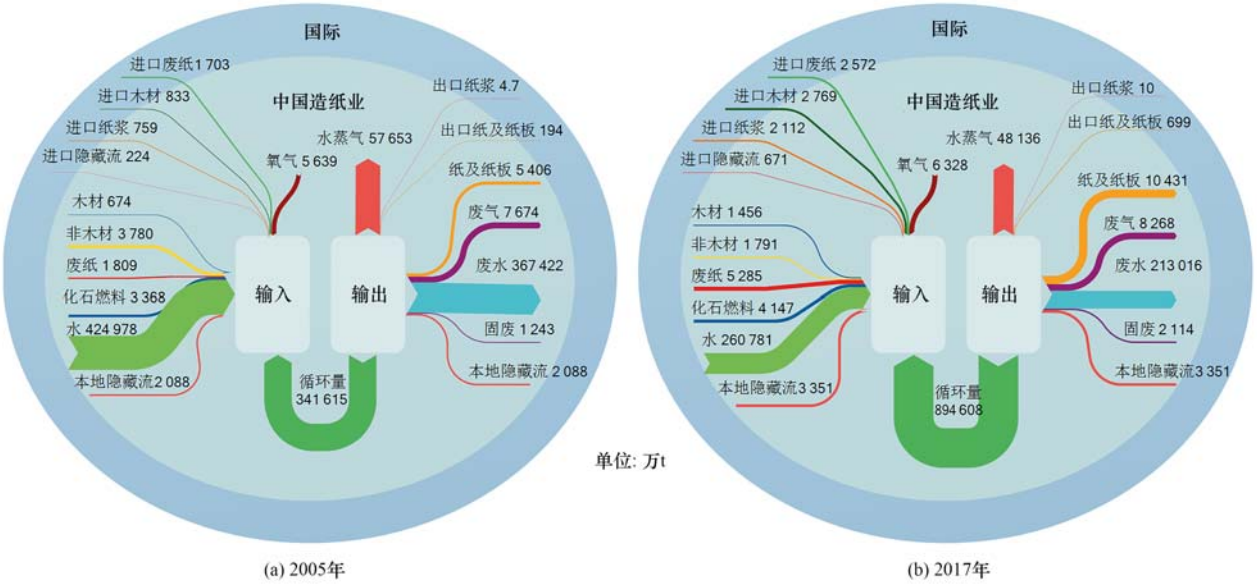


**图 2　2005 年和 2017 年中国造纸业物质流全景**

Fig. 2　Material flows of China's pulp and paper industry in 2005 and 2017

量略高于造纸工段. 制浆和造纸工段的固废排放量分别为1 482万 t 和 630 万 t,造纸业固废主要来源于制浆工段.

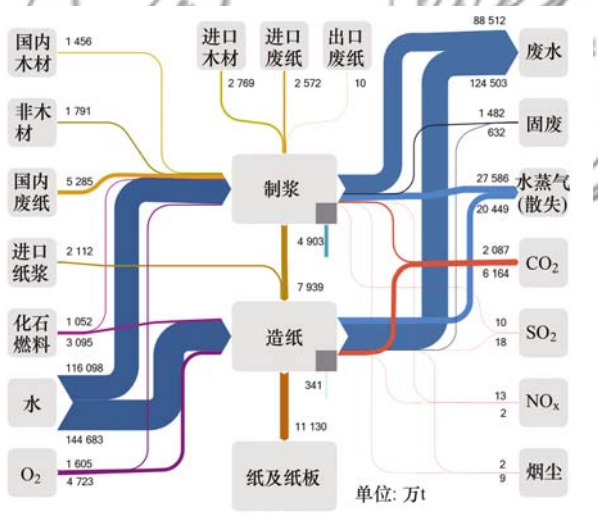


**图 3　2017 年制浆和造纸工段物质流全景**

Fig. 3　Material flows in pulping and papermaking stages in 2017

## 2.2　物质代谢结构

### 2.2.1　输入端

造纸业的制浆原料结构变化较大,正转变为以废纸制浆造纸为主、木材制浆造纸为辅的方式(图 4). 非木材消耗量大幅减少,这主要因为本研究初期,中国以发展生产力为主,非木材纤维原料多是一年生植物,中国有较为足够的非木材纤维资源和丰富的非木材纤维制浆经验. 但随着我国对环境保护力度的不断加大,非木材造纸带来的环境问题不断凸显,使用量逐渐减小. 据统计, 2004 年全国造纸业废水排放量 35.6 亿 t,占全国工业废水总排放量的 16.1%,位居第 2,大量采用非木浆造纸是其主要原因之一[40]. 与木材和非木材相比,废纸的优势愈发明显,原料占比也逐步提高. 作为再生资源,废纸再利用有助于减少原生林木采伐,制浆造纸过程不需要化学蒸煮,没有高浓度废液的产生,其他污染物的产生量较原生植物制浆造纸低约 50% 左右[41,42]. 然而,由于废纸进口政策的不断趋严和国内废纸回收体系的尚不健全,短期内木材制浆的占比仍处于上升状态. 木材是重要的自然资源,木材的过度砍伐会造成环境退化和生物多样性损失,还会加剧气候变化[43]. 因此,从长期来看,造纸业会进一步优化原料结构,加大废纸制浆造纸的占比.

由于中国森林面积有限且地区分布不均,国内木材原料价格不断上涨,而国外进口木材原料价格低廉,因此,造纸业原料投入的外部依赖性逐渐增加. 2005 年,废纸和木材进口量分别为1 703万 t 和 833 万 t,占原料总量的 29%. 由于进口固体废物存在潜在安全隐患,我国从 2009 年起不断限制进口废纸,并于 2021 年 1 月 1 号起禁止以任何方式进口固体废物[6],因此,废纸进口量呈现先增长后下降的趋势,木材进口量则持续呈现上升的趋势(图 4). 面对国内木材供给不足、废纸回收体系不健全和废纸进口逐渐受限等严峻形势,国内造纸企业还不断通过进口针和阔叶树漂白硫酸盐纸浆来弥补造纸原料的短缺,纸浆进口量由 2005 年 759 万 t 增至 2017 年的2 112万 t,增幅 178%,主要来源于巴西、加拿大、印度尼西亚、智利和美国等国家.

随着造纸原料结构的改变和生产技术的改进,造纸业化石能源消耗正在向更低能耗的废纸造纸转

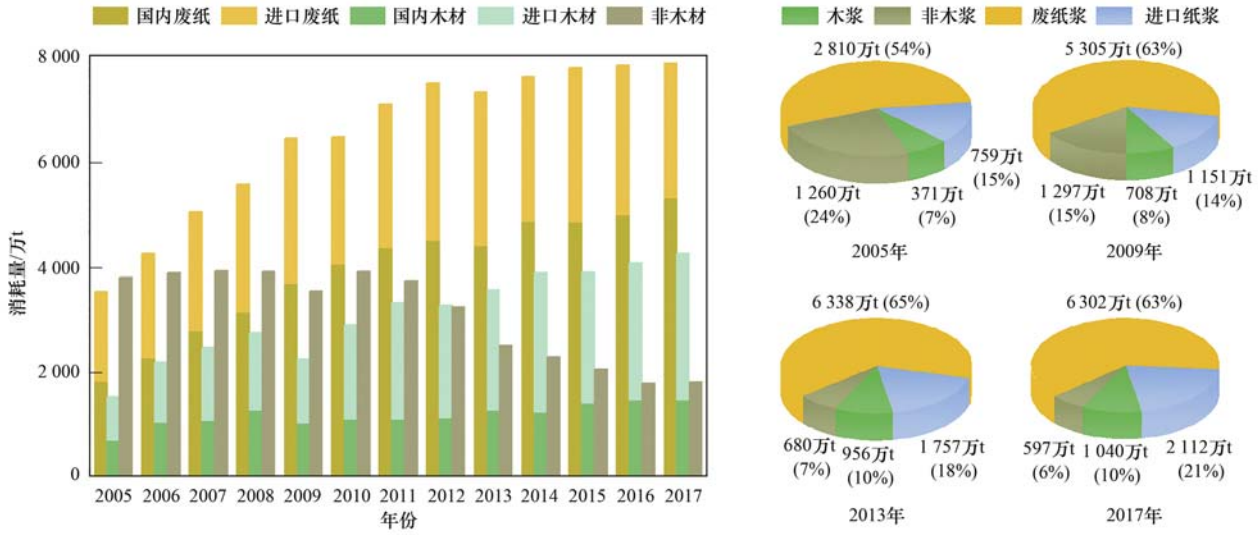


**图 4 2005 ~ 2017 年中国造纸业原料输入**

Fig. 4 Raw material inputs of China's pulp and paper industry from 2005 to 2017

变,造纸业生产总能耗得以控制. 需要关注的是,国内造纸企业在工厂设计初期多采用的是高比例废纸浆生产线,而近年来由于进口废纸政策逐渐缩紧,废纸原料的供给紧缺迫使造纸厂在生产过程中需要搭配使用更高比例的木浆,同时放慢造纸机运行速度,从而增加烘干时间,这也会导致生产线的能耗有所增加. 在新鲜水耗方面,国家对工业取水管理要求越来越严格,明确了造纸产品的取水定额[44],造纸企业积极改造、淘汰能耗高的技术和设备,如逐步淘汰处于清洁生产Ⅱ、Ⅲ级的低速纸机,采用达到Ⅰ级标准的高速纸机; 定期检查管网漏点情况,对腐蚀和老化严重的管道做好定期更换; 不断推进节水技术,在制浆方面采用化学机械浆,提高送浆浓度以减少稀释用水的需求,造纸方面将多盘清滤液再过滤后回用于纸机喷淋,回用纸机白水用于送浆环节等.

此外,造纸原料需求及其结构变化也导致了隐藏流的结构发生变化,主要受到国内化石燃料和进口木材隐藏流的影响. 我国的能源结构长期以煤炭等化石燃料为主,煤炭采选过程产生的煤矸石有制备化工原料、肥料和建筑材料等多种综合利用途径,但目前总体水平并不高[45],未来应受到重视和发展. 木材采伐过程中产生的树皮、树桩、树枝和树梢等伐木损耗收集后打成木屑,可作为生物质燃料使用,提供能量; 亦可用作食用菌栽培原料[46]等. 未来,随着相关产业废弃物资源化技术与装备的进步,造纸业的隐藏流很有可能会得到改善.

### 2.2.2 输出端

2005 ~ 2017 年间,中国造纸业纸及纸板产量大幅提高(图 5),各类产品的产量结构变化较小,除新闻纸外均呈现上升趋势. 瓦楞原纸、箱板纸和白纸板产量增长最多,分别提高了 143%、146% 和 67%,主要用于生产各类包装纸盒/箱等. 互联网时代网购的兴起以及现代物流的发展,使得更为价廉且便利的网络消费吸引着越来越多的消费者,因此包装纸盒/箱的需求仍有可能进一步扩大. 新闻纸造纸原料主要为进口废纸,随着互联网快速发展,纸质传媒不断被电子传媒所取代,因此新闻纸产量大幅下降,由 319 万 t 降至 235 万 t,降幅 26%. 然而,我国课本以及党媒报纸的印刷需求依然存在,且印刷量呈现平稳上升的情况. 2018 年上半年,由于废纸进口不断受限,新闻纸产量曾大幅减少,短时间内供应紧张且价格快速上扬,出版安全面临很大风险.

我国造纸业输出变化较为明显(表 5),主要出

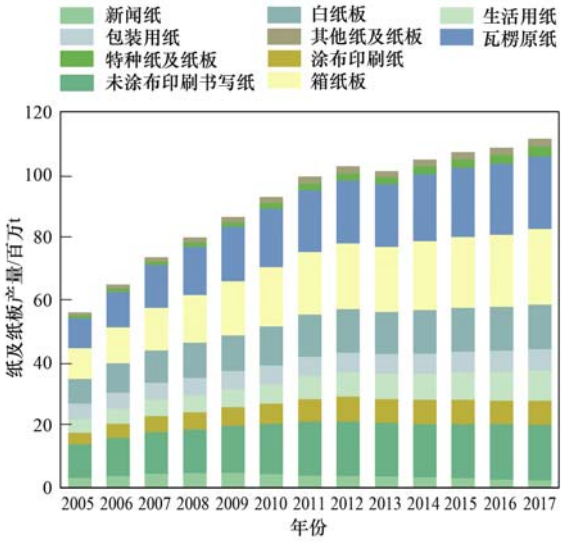


**图 5 2005 ~ 2017 中国造纸业纸及纸板产量**

Fig. 5 Paper and paperboard production of China's pulp and paper industry from 2005 to 2017

口物质为纸浆和纸及纸板，出口量仅占生产量的3%～7%，主要出口国家为印度、越南、土耳其、马来西亚和日本等. 造纸业的三废排放主要以废水为主，占三废排放总量的95%以上. 虽然我国造纸业的三废排放总量在不断下降，但2017年排放总量仍高达22.3亿t. 其中，随着新鲜水投入量的减少，废水排放量不断降低，废水占比略有下降，这表明了在纸浆结构优化和节水措施双重影响下，控制废水排放污染的成效显著. 因此，造纸企业除加大废纸制浆造纸比例外，还可考虑对木材和非木材等生物质原料制浆造纸过程产生的废液进行资源化，如采用生物质精炼等技术提取乙醇、香兰素和木糖等产品[47]，在提高利用效率的同时减少污染物排放. 主要废气污染物的排放量由大到小依次为 $CO_2$、$SO_2$、$NO_x$ 和烟尘，排放量不断增加主要由于产能大幅提高，化石能源消耗量的提高增加了废气的排放量. 目前，造纸企业普遍采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术，但其存在占地面积大、投资费用高和易结垢等缺点，可将造纸白泥作为湿法脱硫工艺中的脱硫剂，通过造纸白泥旋流雾化脱硫除尘一体化技术处理烟气，平均脱硫效率约99.51%，平均除尘效率约94.12%[48]. 燃煤锅炉可采用干法烟气脱硫技术，对现有湿法脱硫和布袋除尘进行改造，有效降低“白烟”现象[49]. 同时，还可安装排放监控设备，实时在线监控废气排放量. 在固体废物产生方面，其主要成分是废塑料、泥沙、铁钉、炉渣和污泥等. 国内废纸回收过程中，废纸品质参差不齐，大多夹杂有废塑料、泥沙和铁钉等，因此，未来仍需加大国内回收行业废纸回收的质量审查，降低废纸含杂率. 造纸污泥经过压滤提高干度后，可与煤掺和作为燃料用于锅炉燃烧[50].

**表5　2005～2017年中国造纸业输出情况**

Table 5　Outputs of China's pulp and paper industry from 2005 to 2017

| 年份 | 本地输出/万t | | | | | 所占比例/% | | | | 纸及纸板出口量/万t |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 纸及纸板 | 废水 | 废气 | 固体废物 | 合计 | 纸及纸板 | 废水 | 废气 | 固体废物 | |
| 2005 | 5 406 | 367 422 | 7 674 | 1 243 | 381 745 | 1.42 | 96.25 | 2.01 | 0.33 | 194 |
| 2006 | 6 159 | 374 407 | 8 101 | 1 596 | 390 263 | 1.61 | 95.94 | 2.08 | 0.41 | 341 |
| 2007 | 6 889 | 424 597 | 8 282 | 1 797 | 441 565 | 1.80 | 96.16 | 1.88 | 0.41 | 461 |
| 2008 | 7 577 | 407 675 | 8 938 | 1 800 | 425 990 | 1.98 | 95.70 | 2.10 | 0.42 | 403 |
| 2009 | 8 235 | 392 604 | 9 650 | 1 939 | 412 428 | 2.16 | 95.19 | 2.34 | 0.47 | 405 |
| 2010 | 8 837 | 393 699 | 10 054 | 2 321 | 414 912 | 2.31 | 94.89 | 2.42 | 0.56 | 433 |
| 2011 | 9 421 | 382 265 | 10 290 | 2 482 | 404 458 | 2.47 | 94.51 | 2.54 | 0.61 | 509 |
| 2012 | 9 737 | 342 717 | 9 546 | 2 168 | 364 168 | 2.55 | 94.11 | 2.62 | 0.60 | 513 |
| 2013 | 9 499 | 285 452 | 9 181 | 2 055 | 306 187 | 2.49 | 93.23 | 3.00 | 0.67 | 611 |
| 2014 | 9 789 | 275 501 | 8 399 | 2 170 | 295 860 | 2.56 | 93.12 | 2.84 | 0.73 | 681 |
| 2015 | 10 065 | 236 684 | 7 989 | 2 248 | 256 986 | 2.64 | 92.10 | 3.11 | 0.87 | 645 |
| 2016 | 10 122 | 224 850 | 7 933 | 2 181 | 245 085 | 2.65 | 91.74 | 3.24 | 0.89 | 733 |
| 2017 | 10 431 | 213 016 | 8 228 | 2 114 | 233 789 | 2.73 | 91.11 | 3.52 | 0.90 | 699 |

## 2.3　物质代谢强度

本研究基于吨纸及纸板的DMI和DPO这两个指标考察2005～2017年中国造纸业的物质代谢强度(图6). 吨纸及纸板DMI和DPO分别由2005年的79 t和67 t降至2017年的26 t和20 t，降幅67%～70%，说明纸浆原料结构的不断优化以及造纸相关技术的不断进步给我国造纸业的发展带来了较为明显的变化，造纸业单位产品的资源消耗量和污染物排放大幅降低. 废纸制浆造纸过程不产生黑液，加大废纸浆比例后，可循环水量提高，新鲜水消耗量进一步降低. 因此，合理优化纸浆原料结构对降低造纸业资源消耗和促进行业良性发展有重要意义，应进一步加大废纸制浆造纸比例，降低木材和非木材的使用. 水资源作为输入和输出端的主要部分，新鲜水消耗量大幅下降，除了得益于纸浆结构调整降低了水资源的消耗量外，造纸业的节水措施也取得了巨大成效. 吨纸及纸板的DPO下降幅度大于DMI下降幅度，表明造纸业污染物排放逐步得到控制，造纸所带来的环境污染逐渐降低，但二者的下降幅度相差较小，说明仍需加大控制造纸业污染物排放，提高各类原材料制浆得率，降低生产过程损失.

虽然，在整体上，造纸业生产单位纸及纸板的物料输入呈下降趋势，但不同物料消耗之间的变化差异较大，其中，降幅较大的是非木材和新鲜水，分别下降了76%和69%. 非木材降幅较大主要因为非木材造纸的环境影响较大，产生的黑液难以处理，该原料逐渐被其他造纸原料所替代. 此外，1 t纸及纸板的生产，越来越依赖于国内废纸和进口木材的投入，两者占比分别由2005年的21%和9%上升至2017年的60%和31%. 居民回收意识仍需要提高[51]，目前国内废纸回收行业仍缺乏规范，一直以非规范回收为主体，通过一些零散的商贩或个人的小型回收中心进行回收. 这类回收方式不仅难以形成体系进行管理，而且回收的废纸品质难以控制，大量可回收

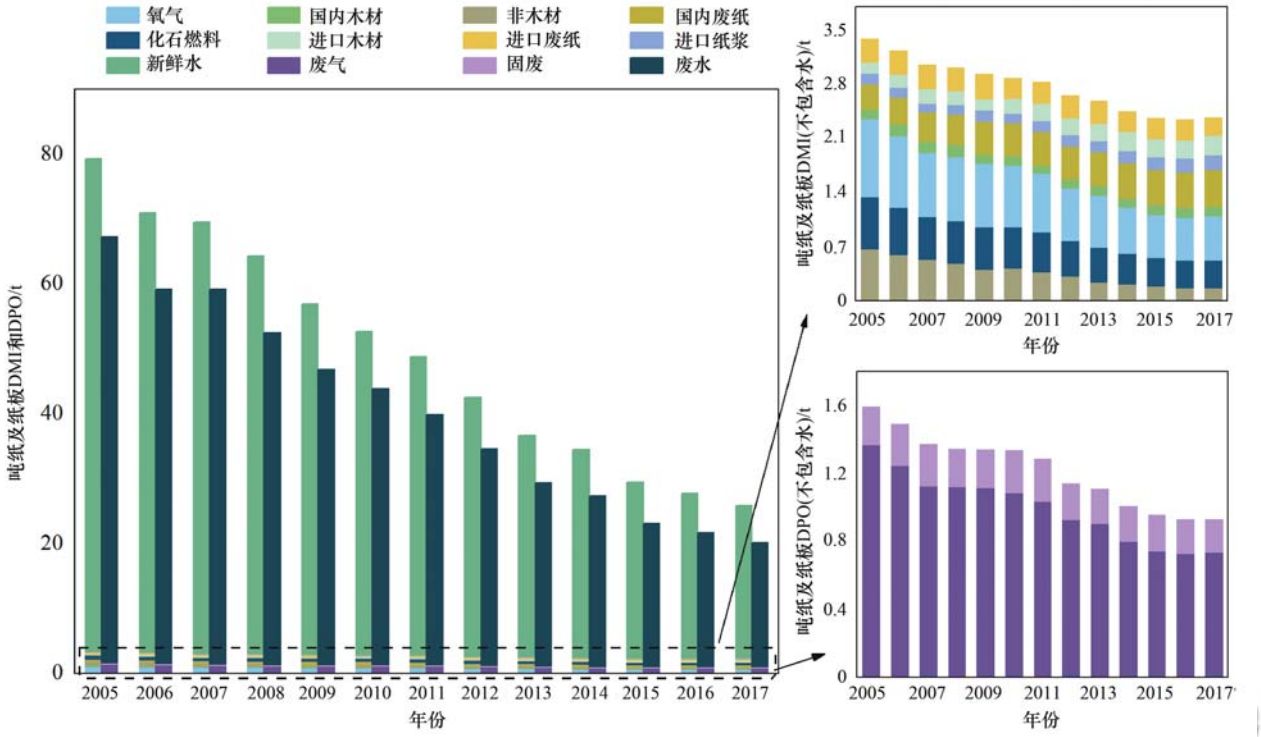


**图 6 2005 ~ 2017 年中国造纸业物质代谢强度**

Fig. 6 Material metabolism intensity of China's pulp and paper industry from 2005 to 2017

废纸资源损失. 因此,各大纸厂需要加强对打包站进厂纸包的质量检测,这对于提高废纸回收质量,健全再生资源循环利用制度具有一定的推动作用. 国家在限制进口废纸的相关政策上,可以考虑根据实际情况,制定更为完善的政策条例. 例如,尽快出台再生纸原料的国家标准,对废纸的品质进行定级; 依托再生纸原料标准,规范再生纸原料的进口管理,从而保障生产原料稳定供应,以缓解国内优质造纸原料紧缺的现状.

## 2.4 循环利用率

资源循环利用率在一定意义上可以说明资源持续发展的情况. 考虑到各类物质的占比及其重要性,本研究主要对水的循环利用进行分析(图 7). 2005 ~2017 年,随着纸及纸板产量的大幅增加,耗水量也在不断增加, 2017 年耗水总量达 116 亿 t,较 2005 年的 77 亿 t 增长了 51%. 然而,生产 1t 纸及纸板的新鲜水消耗量却在不断降低,已由 76 t 降低为 23 t,主要因为循环水占总水耗的比例不断提高. 2005 年,中国造纸业消耗了 42 亿 t 的新鲜水和 34 亿 t 的循环水,水循环率仅为 45%. 近年来,造纸企业逐步采用新型脱水设备、宽区压榨、全封闭式气罩、热泵和热回收技术等,并推动改造、淘汰能耗较高的技术和设备,将自动化控制技术应用于工艺过程及管理中,自备电厂也由原来的开放供水改为闭式循环模式,加大了锅炉、汽机冷却水的回收利用,因此,造纸业节水节能成效显著. 2017 年,国内造纸业的新鲜水消耗为 26 亿 t,而循环水量为 89 亿 t,循环率高达 77%,废水循环利用程度大幅提高.

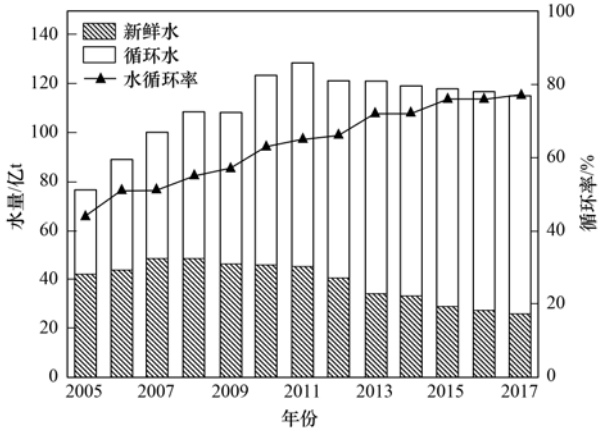


**图 7 2005 ~ 2017 年中国造纸业工业循环利用情况**

Fig. 7 Water recycling in China's pulp and paper industry from 2005 to 2017

## 3 结论

(1)2005 ~ 2017 年,中国造纸业物质输入与输出总体呈下降趋势,其中水的贡献最大. 造纸产量提高近一倍,化石能源消耗量增长 23%,固废和废气排放总量增加 17%. 造纸工段的水耗、能耗较制浆工段更高,但制浆工段固废、$NO_x$ 排放量更高.

(2)造纸业原料结构变化大,非木材投入量大幅降低. 在国内木材资源紧缺和国内废纸回收率低的双重影响下,造纸业原料的进口依赖性不断加大. 长远来看,应进一步完善废纸原料的供给体系,一方

面制定再生纸原料的国家标准并规范进口管理，另一方面加强废纸回收体系建设，提高国内废纸回收水平.

(3)造纸业资源消耗和环境污染强度大幅降低. 2005～2017 年，中国造纸业生产 1 t 纸及纸板 DMI 和 DPO 的降幅高达 67%～70%，这得益于原料结构优化、工艺改进和污染控制力度加强等诸多产业升级举措. 其中，节水措施成效显著，水循环率由 45% 增至 77%. 未来造纸业应继续强化绿色环保理念，推动节能减排进程，保持健康良性的可持续发展态势.

(4)在当前国内废纸回收量不足，进口废纸被禁止的情况下，需从实施更严格的环保标准和加强植物纤维原料的高效利用等方面加强三废污染治理工作，进一步完善排污许可证的相关规定，促进造纸企业形成更加科学、合理的循环经济体系.

**参考文献：**


[1] 李梦丁. 中国纸浆进口贸易研究[D]. 杭州：浙江大学，2010.
Li M D. Research on the pulp import of China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 造纸产业发展政策[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gg/200711/t20071101_961340.html, 2007-10-15.

[3] 国家林业局国家发展改革委工业，信息化部. 造纸工业发展“十二五”规划[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201201/t20120109_964367.html, 2012-01-30.

[4] 中国造纸协会. 中国造纸协会关于造纸工业“十三五”发展的意见[EB/OL]. http://www.chinappi.org/pols/20170628175331240820.html, 2017-06-28.

[5] 扎西德吉，曾现来，赵娜娜，等. 中国固体废物进出口格局演化分析——以废纸为例[J]. 中国环境管理，2019，**11**(2)：31-36.
Zhaxi D J, Zeng X L, Zhao N N, *et al*. Evolution of landscape and policy for importation and exportation of paper waste in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, **11**(2): 31-36.

[6] 生态环境部，商务部，国家发展和改革委员会，等. 关于全面禁止进口固体废物有关事项的公告[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202011/t20201125_809835.html, 2020-11-25.

[7] 王志芳，丁琼，王开祥，等. 我国典型非木浆造纸二噁英排放研究[J]. 环境科学，2012，**33**(2)：574-579.
Wang Z F, Ding Q, Wang K X, *et al*. Study on dioxin emission for typical non-wood pulp making in China[J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 574-579.

[8] 梁淑轩，孙汉文. 中国工业废水污染状况及影响因素分析[J]. 环境科学与技术，2007，**30**(5)：43-47.
Liang S X, Sun H W. Industrial wastewater in China: pollution and affecting factors analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **30**(5): 43-47.

[9] Sendra C, Gabarrell X, Vicent T. Material flow analysis adapted to an industrial area[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, **15**(17): 1706-1715.

[10] Li X, Lin J, Zhang D, *et al*. Material flow analysis of titanium dioxide and sustainable policy suggestion in China[J]. Resources Policy, 2020, **67**, doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101685.

[11] 黄和平，毕军，张炳，等. 物质流分析研究述评[J]. 生态学报，2007，**27**(1)：368-379.
Huang H P, Bi J, Zhang B, *et al*. A critical review of material flow analysis (MFA)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(1): 368-379.

[12] 施晓清，李笑诺，赵吝加，等. 武汉市造纸行业资源代谢分析[J]. 生态学报，2012，**32**(24)：7706-7715.
Shi X Q, Li X N, Zhao L J, *et al*. Resources metabolism analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(24): 7706-7715.

[13] 朱兵，江迪，陈定江，等. 基于物质流分析的中国水泥及水泥基材料行业资源消耗研究[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2014，**54**(7)：839-845.
Zhu B, Jiang D, Chen D J, *et al*. SFA-based resource consumption analysis on China's cement and cement-based materials industry[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, **54**(7): 839-845.

[14] 戴铁军. 基于物质流分析的河北钢铁工业物质代谢研究[D]. 北京：北京工业大学，2011.
Dai T J. Study on material metabolism of Hebei iron and steel industry based on the material flow analysis[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.

[15] 岳强，王鹤鸣，陆钟武. 基于总物流分析的我国钢铁工业生态效率分析[J]. 环境科学研究，2014，**27**(8)：915-921.
Yue Q, Wang H N, Lu Z W. Ecological efficiency of iron and steel industry in China based on bulk material flow analysis[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(8): 915-921.

[16] Van Ewijk S, Stegemann J A, Ekins P. Global life cycle paper flows, recycling metrics, and material efficiency[J]. Journal of Industrial Ecology, 2018, **22**(4): 686-693.

[17] Sevigné-Itoiz E, Gasol C M, Rieradevall J, *et al*. Methodology of supporting decision-making of waste management with material flow analysis (MFA) and consequential life cycle assessment (CLCA): case study of waste paper recycling[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, **105**: 253-262.

[18] Pivnenko K, Laner D, Astrup T F. Material cycles and chemicals: dynamic material flow analysis of contaminants in paper recycling[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(22): 12302-12311.

[19] Hong S J, Choi Y S, Kim K R, *et al*. Material flow analysis of paper in Korea. Part I. Data calculation model from the flow relationships between paper products[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, **55**(12): 1206-1213.

[20] Liu M Z, Tan S, Zhang M Y, *et al*. Waste paper recycling decision system based on material flow analysis and life cycle assessment: a case study of waste paper recycling from China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109859.

[21] Eurostat. Economy-wide material flow accounts and derived indicators: a methodological guide[M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.

[22] Dai T J. A study on material metabolism in Hebei iron and steel industry analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, **95**: 183-192.

[23] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹[M]. 北京：经济科学出版社，2003.

[24] 中国造纸协会. 中国造纸工业年度报告(2005-2017)[R]. 北京：中国造纸协会，2005-2017.

[25] 国家发改委环境保护部工业，信息化部. 制浆造纸行业清洁生产评价指标体系[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gg/201504/W020190905485489648670.pdf, 2015-04-22.

[26] 李忠正. 中国草类纤维制浆的理论与技术研究[J]. 中国造纸, 2007, **26**(12): 71-74.
Li Z Z. Study on the theory and technology of straw pulping in China[J]. China Pulp & Paper, 2007, **26**(12): 71-74.

[27] GB 31825-2015, 制浆造纸单位产品能源消耗限额[S].

[28] 国家统计局. 中国统计年鉴(2004-2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2017.

[29] 中国造纸学会. 中国造纸年鉴(2004-2016)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005-2017.

[30] Fang M, Cao M L, Li Y, *et al*. Material flow analysis on cement industry[J]. Advanced Materials Research, 2012, **512-515**: 3042-3046.

[31] 刘伟, 鞠美庭, 李智, 等. 区域(城市)环境—经济系统能流分析研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, **18**(5): 59-63.
Liu W, Ju M T, Li Z, *et al*. Energy flow analysis in regional (urban) environmental and economic system[J]. China Population, Resources and Environment, 2008, **18**(5): 59-63.

[32] Wang X J, Li Y X, Liu N Y, *et al*. An urban material flow analysis framework and measurement method from the perspective of urban metabolism[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120564.

[33] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.

[34] 郭运功. 特大城市温室气体排放量测算与排放特征分析——以上海为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
Guo Y G. The analysis on calculation and characteristics of greenhouse gas emission in Mega-cities: a case study of Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.

[35] 马广大. 大气污染控制工程[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 2004.

[36] 周婷. 基于生命周期评价的秸秆造纸环境影响研究——以山东泉林纸业为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
Zhou T. Environmental impact research of straw-paper making based on life cycle assessment: a case of Tranlin Paper in Shandong province [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.

[37] 陈莎, 任丽娟, 刘尊文, 等. 新闻纸生命周期评价与Ⅲ型环境声明研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1331-1337.
Chen S, Ren L J, Liu Z W, *et al*. Life cycle assessment and type Ⅲ environmental declarations for newsprint in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(6): 1331-1337.

[38] 任丽娟. 生命周期评价方法及典型纸产品生命周期评价研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
Ren L J. Methodology research and typical paper products of life cycle assessment[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.

[39] GB 16487.4-2017, 进口可用作原料的固体废物环境保护控制标准—废纸或纸板[S].

[40] 林乔元. 中国造纸工业非木材制浆污染防治的评价与展望[J]. 中国造纸, 2006, **25**(5): 47-56.
Lin Q Y. Prevention and solution of the pollution causing by non-wood fiber pulping in China: evaluation and prospect[J]. China Pulp & Paper, 2006, **25**(5): 47-56.

[41] 周伦. 蔗渣碱性过氧化氢法制浆的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
Zhou L. Study on hydrogen peroxide alkaline pulping of bagasse[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[42] 景袁媛, 黄胜炎. 废纸制浆造纸业环境影响评价的清洁生产分析[J]. 环境科学与管理, 2008, **33**(12): 186-190.
Jing Y Y, Huang S Y. Cleaner production analysis of the environmental impact assessment in pulp and paper industry[J]. Environmental Science and Management, 2008, **33**(12): 186-190.

[43] 张丽汝. 武汉城市圈土地生态安全预警研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
Zhang L R. Early waring research of Wuhan urban agglomeration land ecological security[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.

[44] GB/T 18916.5-2012, 取水定额 第5部分: 造纸产品[S].

[45] 郭彦霞, 张圆圆, 程芳琴. 煤矸石综合利用的产业化及其展望[J]. 化工学报, 2014, **65**(7): 2443-2453.
Guo Y X, Zhang Y Y, Cheng F Q. Industrial development and prospect about comprehensive utilization of coal gangue[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(7): 2443-2453.

[46] Amirta R, Herawati E, Suwinarti W, *et al*. Two-steps utilization of shorea wood waste biomass for the production of oyster mushroom and biogas-a zero waste approach[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2016, **9**: 202-208.

[47] 陈丽卿. 生物质精炼技术与制浆造纸的结合[J]. 中国造纸学报, 2019, **34**(3): 77-81.
Chen L Q. The combination of biorefinery with pulp and paper industry[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2019, **34**(3): 77-81.

[48] 陈凡. 造纸白泥作为石灰石—石膏湿法脱硫剂的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
Chen F. Study on white mud as the agents in wet flue gas desulfurization[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[49] 赵旭东, 高继慧, 吴少华, 等. 干法、半干法(钙基)烟气脱硫技术研究进展及趋势[J]. 化学工程, 2003, **31**(4): 64-67.
Zhao X D, Gao J H, Wu S H, *et al*. Development of dry and semi-dry (calcium base) flue gas desulfurization technology[J]. Chemical Engineering (China), 2003, **31**(4): 64-67.

[50] 宁寻安, 张凝, 刘敬勇, 等. 造纸污泥混煤燃烧特性及动力学研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(7): 1486-1492.
Ning X A, Zhang N, Liu J M, *et al*. The co-combustion characteristics of coal and paper mill sludge and its kinetics[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(7): 1486-1492.

[51] Luna-Nemecio J, Tobón S, Juárez-Hernández L G. Sustainability-based on socioformation and complex thought or sustainable social development[J]. Resources, Environment and Sustainability, 2020, **2**, doi: 10.1016/j.resenv.2020.100007.

**HUANJING KEXUE** Vol. 42 No. 8
Environmental Science (monthly) Aug. 15, 2021

# CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai ····· YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, *et al.* (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin ····· WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, *et al.* (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing ····· LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, *et al.* (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry ····· CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, *et al.* (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei ····· MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu ····· DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, *et al.* (3622)
Chemical Components and Sources of $PM_{2.5}$ and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou ····· ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, *et al.* (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in $PM_{2.5}$ in Shanghai ····· CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, *et al.* (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ····· DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, *et al.* (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019 ····· GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, *et al.* (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou ····· LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, *et al.* (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin ····· WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, *et al.* (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks ····· YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, *et al.* (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu ····· ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, *et al.* (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies ····· YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, *et al.* (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake ····· ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, *et al.* (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed ····· NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, *et al.* (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake ····· CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, *et al.* (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir ····· LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, *et al.* (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin ····· XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, *et al.* (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater ····· ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater ····· WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes ····· CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, *et al.* (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area ····· HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, *et al.* (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt ····· LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems ····· LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, *et al.* (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles ····· DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, *et al.* (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent ····· WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System ····· WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, *et al.* (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted $A^2/O$ Sewage Treatment Processes in Winter ····· LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, *et al.* (3866)
Diversity and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX ····· YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, *et al.* (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors ····· MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, *et al.* (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River ····· ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, *et al.* (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model ····· GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, *et al.* (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area ····· TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, *et al.* (3913)
Effect of Elevated $CO_2$ on $N_2O$ Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields ····· YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, *et al.* (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas ····· WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, *et al.* (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on $N_2O$ Emission From Paddy Soils in Northern Hainan ····· WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, *et al.* (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings ····· YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, *et al.* (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings ····· QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, *et al.* (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone ····· LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, *et al.* (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation ····· JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, *et al.* (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of *Miscanthus* Following Cadmium Exposure ····· CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, *et al.* (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields ····· ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, *et al.* (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site ····· LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, *et al.* (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil ····· WANG Can, ZHANG Yu-hang, HE Ming-jing, *et al.* (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil ····· DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, *et al.* (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice ····· ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, *et al.* (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in *Amaranthus hypochondriacus* L. During Different Growth Periods ····· LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, *et al.* (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry ····· LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, *et al.* (4061)