

长江经济带沿江省市典型固废处理处置模式与碳排放分析

文明烜¹, 梁 莎^{1, 2}, 丁韵畅¹, 段华波^{1, 2}, 李 森¹, 杨家宽^{1, 2, 3, *}

(1. 长江流域多介质污染协同控制湖北省重点实验室, 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉, 430074; 2. 固废处理处置与资源化技术湖北省工程实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 长江经济带固废污染治理是长江生态环境保护修复攻坚战中的重要工作内容。为深入了解沿江省市固废的综合治理与碳排放情况, 运用数据统计分析和模型预测等方法, 对生活垃圾和市政污泥等典型固废的产生量特性、处理处置特征及其综合环境影响(以碳排放计)进行了定量分析。结果表明, 2022 年全年, 沿江省市生活垃圾和市政污泥的产生总量分别约为 1.046 亿 t 和 508.320 万 t, 预计到 2025 年将分别达到 1.218 亿 t 和 645.540 万 t。其中, 江苏省产生总量最大, 分别约为 2 585.250 万 t 和 173.740 万 t。下游地区的缺口最大, 分别约为 1 319.750 万 t 和 163.030 万 t。焚烧是生活垃圾和市政污泥的主要处理方式, 平均占比分别约为 76.06% 和 77.81%。生活垃圾和市政污泥的碳排放总量分别达到 2 288.560 万 t 和 9 021.450 万 t, 单位排放强度分别约为 0.240 0 (± 0.004 4) $\text{CO}_{2-\text{eq}}$ t/t 和 2.210 (± 0.002) $\text{CO}_{2-\text{eq}}$ t/t。结合长江经济带各省市生活垃圾及污泥的产生特性和碳排放强度情况, 提出了优化管理建议, 为推动长江经济带固废低碳处理处置提供了参考。

关键词: 长江经济带; 固废处理处置; 生活垃圾; 市政污泥; 碳排放

中图分类号: X705

文献标识码: A

Analysis of typical solid waste treatment and disposal modes and carbon emissions in provinces (municipality) along the Yangtze River Economic Belt

WEN Mingxuan¹, LIANG Sha^{1, 2}, DING Yunchang¹, DUAN Huabo^{1, 2}, LI Sen¹,
YANG Jiakuan^{1, 2, 3, *}

(1. Hubei Key Laboratory of Multi-media Pollution Cooperative Control in Yangtze Basin, School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology (HUST), Wunhan 430074, China; 2. Hubei Provincial Engineering Laboratory for Disposal and Recycling Technology of Solid Waste, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Coal Combustion, Wuhan 430074, China)

Abstract: The management of solid waste pollution in the Yangtze River Economic Belt is crucial for the ecological environment protection and restoration campaign. In order to gain a deep understanding of solid waste management and carbon emissions along the river, this study conducts quantitative analyses on the generation characteristics, treatment and disposal features, and comprehensive environmental impacts (in terms of carbon emissions) of typical solid wastes such as domestic waste and municipal sludge. The analyses are based on data from statistical analysis and model prediction methods. The results indicate that in 2022, the total generation of domestic waste and municipal sludge in the provinces

收稿日期: 2024-05-13

修回日期: 2024-06-24

DOI: 10.20078/j.eep.20240708

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助 (2023YFC3902803)

作者简介: 文明烜 (1999—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为固废处理与资源化。E-mail: wenmingxuan@hust.edu.cn

通讯作者: 杨家宽 (1973—), 男, 湖北鄂州人, 教授, 主要研究方向为固废处理与资源化。E-mail: jkyang@hust.edu.cn

and cities along the Yangtze River was approximately 104.6 million tons and 5.083 2 million tons, respectively. It is projected to reach approximately 121.8 million tons and 6.455 4 million tons by 2025, with Jiangsu Province having the largest total generation (approximately 25.852 5 million tons and 1.737 4 million tons for domestic waste and municipal sludge, respectively). The downstream areas showed the largest gaps (approximately 13.197 5 million tons and 1.630 3 million tons). Incineration is the primary disposal method for both domestic waste and municipal sludge, accounting for around 76.06% and 77.81% on average, respectively. The total carbon emissions from domestic waste and municipal sludge are estimated to reach 22.885 6 million tons and 90.214 5 million tons, respectively, with unit emission intensities of approximately 0.240 0 (± 0.004 4) $\text{CO}_{2-\text{eq}}$ t/t and 2.210(± 0.002) $\text{CO}_{2-\text{eq}}$ t/t. Based on the generation characteristics and carbon emission intensities of domestic waste and municipal sludge in various provinces and cities along the Yangtze River Economic Belt, this paper proposes optimization management recommendations to promote low-carbon treatment and disposal of solid waste in the Yangtze River Economic Belt.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; Solid waste treatment and disposal; Domestic waste; Municipal sludge; Carbon emission

0 引 言

推动长江经济带发展是党中央作出的重大决策,是关系国家发展全局的重大战略^[1]。2018 年 4 月,习近平总书记将“长江保护修复”列为标志性的污染防治攻坚战战役之一。其中,长江经济带固废污染治理是长江生态环境保护修复工作的重要一环^[2]。我国固体废弃物(固废)产生总量巨大,2022 年全国生活垃圾、一般工业固废和危险废物等产量接近 50 亿 t^[3]。近年来,我国城市固废的增长速度已达到 15%^[4],生活垃圾和市政污泥是城市固废的重要组成部分。固废处理处置不当会引发环境污染问题,故推进固废“三化”处置,对解决经济发展与环境保护的矛盾有重大意义^[5]。2020 年 9 月中国明确提出 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”的“双碳”目标,明确减污降碳协同增效的全面绿色转型总抓手定位。虽然固废行业碳排放总量占比不高,但固废既是污染源,又是污染汇,其治理兼具减污和降碳协同效应^[6],是打好污染防治攻坚战,实现“双碳”目标的重要组成部分。

根据《2022 年中国城市建设统计年鉴》^[7]和《2022 年中国生态环境统计年报》^[8]等提供的相关数据:截至 2022 年底,我国内地城市生活垃圾清运量约 2.444 亿 t,无害化处理量为 2.442 亿 t,无害化处理率达 99.90%,处置方式以焚烧为主,约占 79.87%,卫生填埋和其他方式(堆肥等)分别约占 12.46%和 7.67%;内地城市干污泥产量约

1 369.9 万 t,处置量约为 1 361.6 万 t,处置率达 99.40%,处置方式以焚烧和土地利用为主,分别约占 67.24%和 23.27%,资源化利用、热解和填埋等方式分别约占 4.71%、3.25%和 1.53%。生活垃圾和市政污泥高效低碳的处理处置是推进“无废城市”建设的重要举措。然而,目前长江经济带固废处理处置还存在整体规划不系统、处理处置模式发展不均衡等现象^[2],与其他区域相比存在差异。

长江经济带是我国城镇和人口分布最密集的地区之一,覆盖沿江 11 省市,横跨我国东中西三大板块,总面积约占全国的 21.40%,总人口占全国的 43.10%,经济产出占全国的 46.36%,是我国社会经济发展综合实力最强、具有重大战略支撑作用的区域,在推动我国经济高质量发展中发挥着重要的作用^[9]。尽管对于长江流域整体而言,单位 GDP 的能耗和 CO_2 排放强度呈逐年下降的趋势^[10],但长江经济带低碳发展不平衡不充分问题依然突出^[11]。在稳步实现“双碳”目标的背景下,固废污染防治与管理工作是当前长江经济带生态环境保护的重要任务^[12],协同推进整个流域的减污降碳工作,打造低碳发展的环境,是实现长江经济带高质量发展的重中之重^[13]。因此,对长江经济带沿江省市典型固废的处理处置模式开展调查研究,同时对不同模式的碳排放进行核算并提出低碳路径与优化策略,能更好地推动长江经济带高质量发展,助力国家“双碳”目标如期实现。本研究主要以生活垃圾和市政污泥为代表,对长江经济带沿江省市固废的处理处置模式及碳排放情

况进行了总结分析。

1 研究方法

1.1 产量现状分析

通过信息检索,根据《2022 年中国城市建设统计年鉴》^[7]、《2022 年中国生态环境统计年鉴》^[8]以及《中国统计年鉴-2022》^[14],长江经济带各省市《生态环境统计公报》《固废污染环境防治信息》等提供的数据进行分析。

1.2 长江经济带区域划分方法

参照长江水利委员会关于长江流域上、中、下游划分方案,长江经济带中湖北省宜昌市以上为上游,宜昌市至江西省九江市湖口县为中游,湖口县以下为下游^[15]。

1.3 产量预测及缺口分析

基于国务院印发《关于调整城市规模划分标准的通知》^[16]中新城市规模划分标准对沿江省市生活垃圾和市政污泥处理处置缺口进行预测分析。

1.3.1 生活垃圾

本研究采用人均指标法,基于《生活垃圾产生量计算及预测方法》(CJ/T 106—2016)^[17]和2011—2020 年《中国城市建设统计年鉴》提供的数据,通过基准年人均生活垃圾日产量和人口数量作为预测基数,生活垃圾预测年产量按式(1)计算:

$$Y=R_0(1+r_1)^t\times S_0(1+r_2)^t\times 365 \tag{1}$$

式中, Y ——生活垃圾预测年产量,kg;

R_0 ——基准年人均生活垃圾日产生量,kg·(人·d)⁻¹;

r_1 ——人均生活垃圾日产生量的年平均增长率,%;

S_0 ——基准年常住人口数量,人;

r_2 ——人口数量的年平均增长率,%;

t ——预测年限,预测年份与基准年份的差值,年。

1.3.2 市政污泥

根据2011—2020 年《城市建设统计年鉴》《中国环境统计年鉴》提供的数据,并基于未来人口预测,以人均日产污泥50 克(干基)为基准计算。

1.4 碳排放分析方法

采用《IPCC2006》的经验模型对碳排放情况进行计算,如式(2)(3):

$$C_i=\sum_{n=1}^3CO_2^n+25CH_4^n \tag{2}$$

$$C_{total,t}=\sum_{i=1}^{11}C_i \tag{3}$$

式中, C_i ——不同省份的生活垃圾/市政污泥碳排放总量, $n=1$ 代表填埋, $n=2$ 代表焚烧, $n=3$ 代表堆肥/土地利用, $n=4$ 代表资源化利用;

$C_{total,t}$ ——地级及以上城市的城市生活垃圾/市政污泥年度碳排放, t 为年份。

1.4.1 生活垃圾

根据我国历年生活垃圾的填埋、焚烧和堆肥等处理量的变化情况以及成分的平均系数进行分析计算^[18]。

1.4.2 市政污泥

根据 IPCC 提供的排放因子和文献中的排放因子等数据进行分析计算,其关键是通过活动水平数据和各类排放因子乘积得到相应的碳排放量^[19-20]。

2 长江经济带沿江省市固废处理处置现状分析

2.1 固废产生量及分布

长江经济带沿线11 个省(直辖市)的城市人口、GDP 情况以及生活垃圾和市政污泥产量、2025 预测产量见表1。可以看出,2022 年长江经济带11 省(市)城市人口和 GDP 分别占全国的41.78%和46.25%;生活垃圾产生总量约为1.05 亿 t,占全国的42.79%;市政污泥产生总量约为508.32 万 t,占全国的37.11%。

表 1 2022 年长江经济带 11 省市城市人口、GDP、生活垃圾和市政污泥产量及 2025 年预测产量情况

Table 1 City population, GDP, domestic waste and municipal sludge production of 11 provinces in the Yangtze River Economic Belt in 2022 and the predicted domestic waste and municipal sludge production in 2025

区域	城市人口/ 万人	GDP/ 亿元	生活垃圾产量/ 万 t	占比/%	2025 生活垃圾 预测产量/万 t	市政污泥 产量/万 t	占比/%	2025 市政污泥 预测产量/万 t
上海	2 475.89	44 652.80	890.13	3.64	999.21	40.84	2.98	67.33
江苏	5 911.53	122 875.60	1 958.71	8.01	2 585.25	127.25	9.29	173.74
浙江	3 990.74	77 715.00	1 553.53	6.36	1 765.48	98.07	7.16	134.99
安徽	2 889.21	45 045.00	745.42	3.05	814.07	35.07	2.56	39.36

续表

区域	城市人口/ 万人	GDP/ 亿元	生活垃圾产量/ 万 t	占比/%	2025 生活垃圾 预测产量/万 t	市政污泥 产量/万 t	占比/%	2025 市政污泥 预测产量/万 t
江西	2 212.03	32 074.70	527.70	2.16	637.07	16.31	1.19	13.77
湖北	4 258.47	53 734.90	1 032.62	4.22	1 133.00	45.31	3.31	37.50
湖南	3 199.32	48 670.40	860.79	3.52	1 006.84	35.84	2.62	72.15
重庆	2 625.28	29 129.00	678.77	2.78	792.37	25.34	1.85	27.59
四川	4 360.78	56 749.80	1 259.20	5.15	1 464.90	54.32	3.97	48.98
贵州	1 676.87	20 164.60	415.85	1.70	417.56	12.99	0.95	13.29
云南	1 834.46	28 954.20	538.12	2.20	565.92	17.00	1.24	16.84
长江经济带	35 434.58	559 766.00	10 460.84	42.79	12 181.67	508.32	37.11	645.54
全国	84 820.22	1 210 207.00	24 444.72	100.00	—	1 369.86	100.00	—

注：“占比”分别为各区域生活垃圾和市政污泥产量占全国总产量的比例

整理分析《2022 中国城市建设统计年鉴》^[7]提供的数据,绘制了 2022 年长江经济带上、中、下游各省市的生活垃圾和市政污泥产生情况,如图 1 和 2 所示。

(1)生活垃圾产生情况

由图 1 可以看出,长江下游四省生活垃圾产量高,占长江经济带总产量的近一半,其中江苏省的产量最高(1 958.71 万 t),而上游各省除四川外生活垃圾产量均较低,尤其是贵州(415.85 万 t),中游的江西省产量也偏低(527.70 万 t)。由此可知,长江经济带生活垃圾的产量与该地区的人口和经济情况关系密切,基本呈正相关。

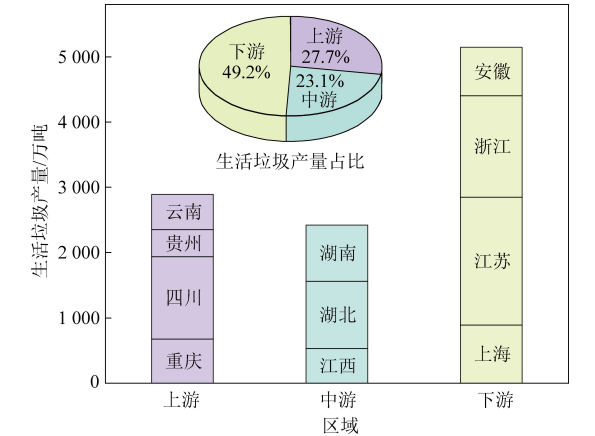


图 1 2022 年长江经济带上、中、下游各省市生活垃圾产生情况

Fig. 1 Output of domestic waste in the upper, middle and lower reaches of the Yangtze River Economic Belt in 2022

(2)市政污泥产生情况

由图 2 可以看出,长江经济带各省市市政污泥产生情况与生活垃圾产生情况类似,且市政污泥产量与该地区的经济情况表现出更加明显的正相关关系。

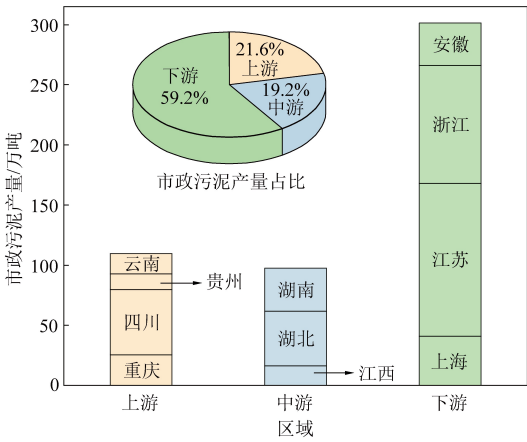


图 2 2022 年长江经济带上、中、下游各省市市政污泥产生情况

Fig. 2 Output of municipal sludge in the upper, middle and lower reaches of the Yangtze River Economic Belt in 2022

2.2 固废处理处置技术概况

当前我国对于固废处理处置方式主要是以传统的“末端处置”开展的,其中对于生活垃圾和市政污泥主要采用焚烧、堆肥、填埋、综合处置、资源化利用等。我国几种常见的生活垃圾及市政污泥处理处置的技术模式总结见表 2 和表 3。

2.3 典型固废处理处置现状及缺口分析

2.3.1 处理处置现状

(1)生活垃圾的处理处置

根据《2022 年中国城市建设统计年鉴》^[7]和《二〇二二年上海市固体废物污染环境防治信息公告》^[23]中提供的相关数据,对长江经济带生活垃圾的处理处置模式及无害化处置情况进行了分析,其结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,长江经济带生活垃圾处理处置模式以焚烧为主,约占 76.06%(高于全国平均水平),卫生填埋次之,占 16.62%,其他方法(如堆肥)仅占 9.32%。从各省市情况来看,均以焚烧

表 2 生活垃圾处理处置模式概况^[21]

Table 2 Summary of treatment and disposal modes of domestic waste^[21]

处理对象	特点	技术模式	优点	缺点	发展趋势
生活垃圾	厨余垃圾含量高,可资源化利用成分多,金属占比低	卫生填埋	处理量大、方便、处理费用低	占用大量土地,渗出液处理难度大、处理成本高,无法利用可燃物	逐渐得到限制
		焚烧发电	技术集成度及自动化程度高、方便管理,垃圾减重 80%,减容 90%以上,具有资源化效益	烟气中可能含有二噁英等毒性有机物,工程投资及运行成本高	无害化特性优势明显,目前正在大力发展
		堆肥	产物有价值,操作简单、成本低,废物资源再利用,碳排放低	无法有效保障堆肥质量和长期稳定运行,产品销售有困难	处于停滞甚至萎缩阶段
		综合处理	效率高,回收利用效果好,有效避免或减少单一处理工艺的缺点和不足	工艺相对复杂,技术层面要求高	未来发展方向之一

表 3 市政污泥处理处置模式概况^[22]

Table 3 Summary of treatment and disposal modes of municipal sludge^[22]

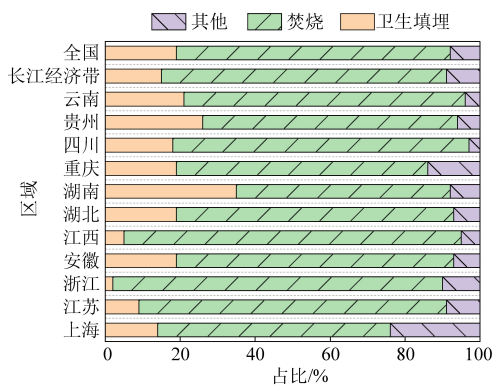
处理对象	特点	技术模式	优点	缺点	发展趋势
市政污泥	产量大、含水率高、易腐败恶臭,含有重金属、毒性有机物、致病微生物等污染物	卫生填埋	卫生指标要求不高、操作简便且成本低	填埋产生的渗滤液对周边土地和水体产生污染;占地面积大,浪费土地资源	逐渐被淘汰
		土地利用	过程简单、产物可作农肥和土壤改良剂	肥效较低,污泥中污染物可能污染土地;减量效果差、周期长且易产生臭气	缺乏工程应用技术规范指南、风险评估和管理体系以及政策支持
		建材利用/资源化	可以制成烧结砖、轻质陶粒、水泥等建材;兼具环境和经济效益	符合建材生产要求的污泥少,成本高、使用范围小、市场流通不足	缺乏污泥建材规范生产和检测相关标准
		焚烧	彻底实现减量化、无害化,最大限度减少容积;占地面积小、处理效率高	热值较低,需预处理;焚烧成本高,且污泥中所含部分重金属在高温作用下迁移至空气中,焚烧过程会产生二噁英等污染物	有潜力的处理处置方式,需进一步优化
		热解	污染物排放量少,产物大都可回收利用	要求严苛,工艺控制难度大,产品质量不稳定	具有前景

为主,尤其是江苏、浙江和江西三省的焚烧比例较高,此外湖南的卫生填埋模式、上海的其他模式占比较高。就生活垃圾无害化处理率而言,长江经济带平均水平高于全国平均水平,而云南和贵州两省与全国平均水平存在差距,有待提升。

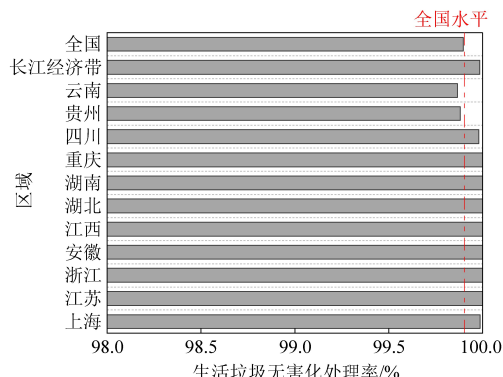
(2) 市政污泥的处理处置

根据《2022 年中国城市建设统计年鉴》^[7]提供的相关数据,结合柴宝华等^[22]的研究,对长江经济带市政污泥的处理处置模式及处理情况进行了分析,其结果如图 4 所示。可以看出,长江经济

带市政污泥处理处置模式以焚烧为主,约占 77.81%(高于全国平均水平),土地利用次之,占 12.66%,其他方法占比较小依次为资源化利用 6.65%、热解 1.68%、填埋 1.20%。从各省市情况来看,长江下游省市上海、江苏、安徽、浙江以及上游的四川以焚烧为主,此外,中上游省市土地利用占比相对较高,特别是云南、贵州和湖北三省。就市政污泥处理率而言,长江经济带平均水平高于全国平均水平,仅重庆市处理率低于全国水平,有待提高。



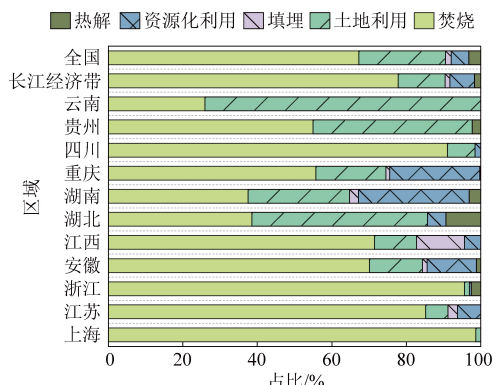
(a) 各省市生活垃圾不同处置模式占比



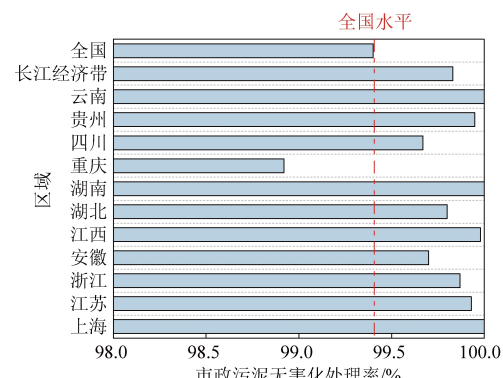
(b) 各省市生活垃圾无害化处理率

图3 长江经济带2022年各省市生活垃圾不同处置模式占比及无害化处理率

Fig. 3 Proportion of different disposal modes and harmless treatment ratio of domestic waste in each province in the Yangtze River Economic Belt in 2022



(a) 各省市市政污泥不同处置模式占比



(b) 各省市市政污泥无害化处理率

图4 长江经济带2022年各省市市政污泥不同处置模式占比及无害化处理率

Fig. 4 Proportion of different disposal modes and harmless treatment ratio of municipal sludge in each province in the Yangtze River Economic Belt in 2022

2.3.2 缺口分析

(1) 生活垃圾预测处理缺口

本研究以2020年为基准年,由式(1)计算得2025年长江沿线城市生活垃圾预计产量,结合2020年长江经济带沿线城市生活垃圾处理能力和预测产量,对各沿江省市生活垃圾2025年处理处置缺口进行了预测分析,结果如图5所示。

可以看出,2025年长江经济带生活垃圾处理缺口分别为上游640.94万t,中游464.83万t,下游1319.75万t,未来长江经济带生活垃圾的处理处置下游城市缺口较大,尤其表现在浙江和江苏两省。

(2) 市政污泥预测处理缺口

由1.3.2中的方法计算出2025年长江沿线城市污泥预计产生量情况,结合2020年长江经济带沿线城市市政污泥处理能力,得出长江经济带11个省市2025年市政污泥治理缺口情况,结果如图6所示。

可以看出,2025年长江经济带市政污泥处理

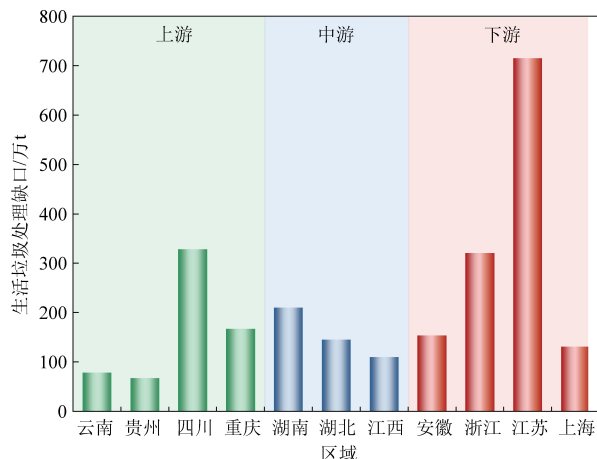


图5 长江经济带2025年生活垃圾处理缺口预测

Fig. 5 Prediction of domestic waste treatment gap in the Yangtze River Economic Belt in 2025

缺口分别为上游15.66万t,中游17.51万t,下游163.03万t,在未来长江经济带市政污泥的处理处置中仍是下游城市缺口较大,同样表现在浙江和

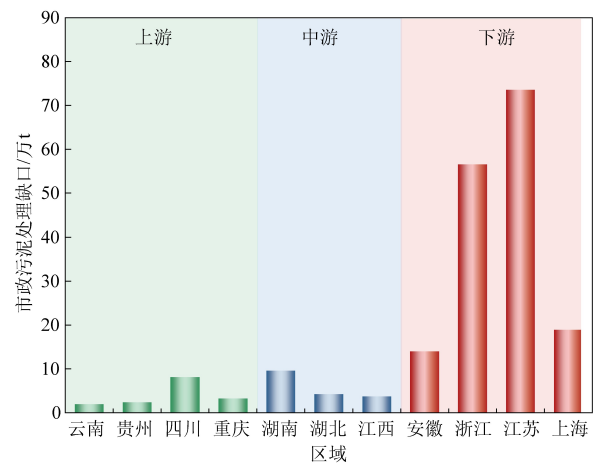


图6 长江经济带2025年市政污泥处理缺口预测

Fig. 6 Prediction of municipal sludge treatment gap in the Yangtze River Economic Belt in 2025

江苏两省。

3 长江经济带沿江省市典型固废处理处置模式的碳排放强度分析

3.1 长江经济带碳排放概况

长江经济带是我国碳排放的重要区域,2020年,该区域实现二氧化碳排放量35.17亿t,约占全国碳排放总量的32.10%。固废领域碳排放当量约为16.30亿t,约占碳排放总量的3.20%,其中废水处理占比1.30%,垃圾填埋处置占比1.90%^[24]。研究人员^[25]对长江经济带碳排放强度进行分析,结果显示,长江经济带的碳排放强度沿长江自上而下呈现递增趋势,该情况与该区域城市典型固废-生活垃圾和市政污泥的产量分布类似,与该地区的人口、经济实力整体呈正相关的关系。

3.2 不同固废处理处置模式碳排放分析

3.2.1 生活垃圾处理处置模式的碳排放情况

对我国主要的几种生活垃圾处理处置模式,即卫生填埋、焚烧和堆肥的碳排放情况进行了分析,并归纳总结,结果见表4^[18]。

可以看出,在我国常用的3种生活垃圾处理处置模式中,单位碳排放量从大到小依次为卫生填埋>焚烧>堆肥,单位碳规避量从大到小依次为焚烧>卫生填埋>堆肥,其中焚烧可以减少约44.86%的碳排放量,而卫生填埋仅减少约2.56%,堆肥不能达到碳规避的效果,可见焚烧模式的碳减排效果要明显优于其他两种模式,我国生活垃圾的综合单位碳排放量为0.2356 CO_{2-eq} t/t。长江经济带生活垃圾不同处置模式碳排放情况如图7

表4 中国生活垃圾不同处理处置模式碳排放情况 (CO_{2-eq}) 分析

Table 4 Analysis of carbon emissions (CO_{2-eq}) from different treatment and disposal modes of domestic waste in China

模式	未规避排放量/ (t·a ⁻¹)	规避后排放量/ (t·a ⁻¹)	单位 规避量/ (t·t ⁻¹)	单位碳 排放量/ (t·t ⁻¹)	碳规避 方式
卫生 填埋	2.73×10 ⁷	2.66×10 ⁷	0.010	0.352	产气 焚烧 发电
焚烧	5.93×10 ⁷	3.27×10 ⁷	0.182	0.224	焚烧 发电
堆肥	6.29×10 ⁵	6.29×10 ⁵	0.000	0.059	无

所示,其碳排放主要来源于焚烧模式(85.39%),这归因于该模式在长江经济带中的占比大(76.06%),工艺的单位排放量也相对较高(0.224 CO_{2-eq} t/t),卫生填埋和堆肥分别占12.17%和2.44%。

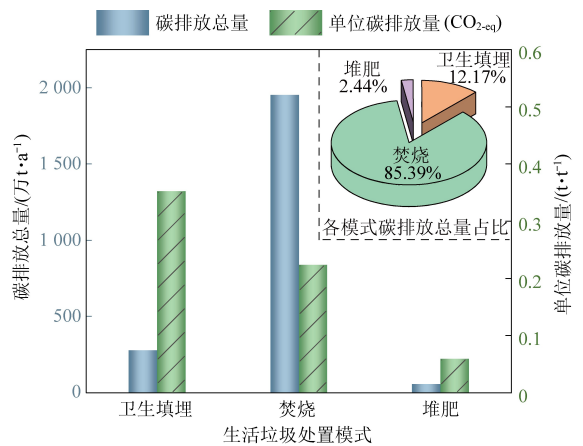


图7 长江经济带生活垃圾不同处置模式碳排放

Fig. 7 Carbon emission of different disposal modes of domestic waste in the Yangtze River Economic Belt

3.2.2 市政污泥处理处置模式的碳排放情况

对我国主要的几种市政污泥处理处置模式,即土地利用、卫生填埋、焚烧、资源化利用和热解的碳排放情况进行分析,并归纳总结,结果见表5^[19-20]。

可以看出,我国市政污泥的主要处理处置模式中,单位碳排放量从大到小依次为焚烧>卫生填埋>资源化利用>土地利用>热解,其中焚烧的高单位碳排放量主要归因于污泥干燥成本高、热值低、烟气净化费用高,从而综合碳排放量高。我国市政污泥的综合单位碳排放量为2.208 CO_{2-eq} t/t。

长江经济带市政污泥不同处理处置模式碳排

表 5 中国市政污泥不同处理处置模式碳排放情况
(CO_{2-eq}) 分析
Table 5 Analysis of carbon emissions from (CO_{2-eq})
different treatment and disposal modes of municipal
sludge in China

模式	规避后排放量/ (t·a ⁻¹)	单位碳排放量/ (t·t ⁻¹)	碳规避 方式
土地利用	2.53×10 ⁶	0.846	替代化肥
卫生填埋	4.52×10 ⁵	1.587	填埋气
焚烧	7.64×10 ⁷	2.341	难以规避
资源化利用	1.95×10 ⁶	1.239	产品价值
热解	5.84×10 ⁴	0.147	能源回收

放情况如图 8 所示,其中焚烧模式的碳排放总量占比最高,达到 89.62%,这归因于该模式在长江经济带中的占比大(77.81%),工艺的单位排放量高(2.341 CO_{2-eq} t/t)。土地和资源化利用分别占 5.27%和 4.05%,其他模式占比较小(<1.00%)。热解技术单位碳排放量少,但工艺的可控性需提升。

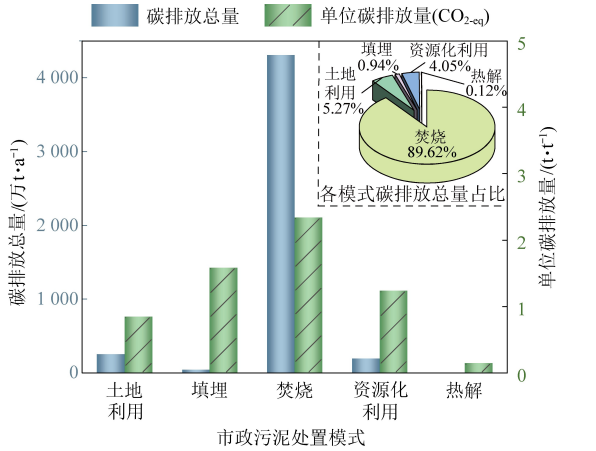


图 8 长江经济带市政污泥不同处置模式碳排放
Fig. 8 Carbon emission of different disposal modes
of domestic waste in the Yangtze River Economic Belt

3.3 长江经济带沿江省市固废处理处置模式的碳排放情况

3.3.1 生活垃圾处理处置碳排放情况

长江经济带不同沿江省市生活垃圾处理处置模式碳排放情况如图 9 所示。

可以看出,就处理处置模式而言,各沿江省市生活垃圾的碳排放主要来源于焚烧处置模式,卫生填埋也占据一定的比例,堆肥所产生的碳排放量较少。就不同沿江省市而言,下游 4 省市生活垃圾处理处置碳排放量远高于其他地区,总量占

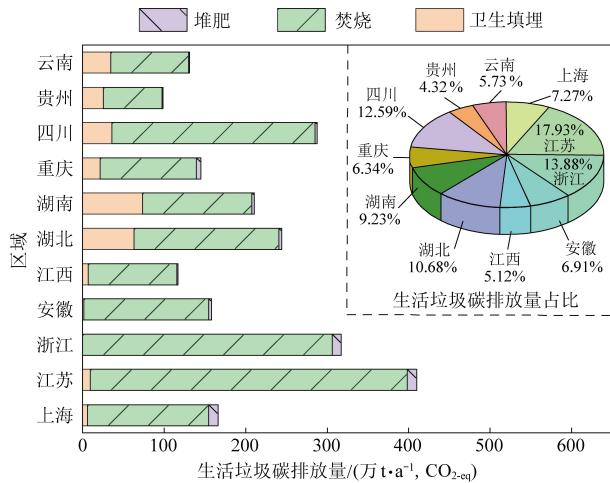


图 9 长江经济带不同省市生活垃圾碳排放情况
Fig. 9 Carbon emission of domestic waste in different
provinces (municipality) in the Yangtze River Economic Belt

长江经济带的 45.99%。上中游省市生活垃圾处理处置的碳排放量相对较少,分别占整个区域的 28.98%和 25.03%。

3.3.2 市政污泥处理处置碳排放情况

根据本研究前述收集的信息,对长江经济带不同沿江省市市政污泥处理处置模式碳排放情况进行了分析,其结果如图 10 所示。

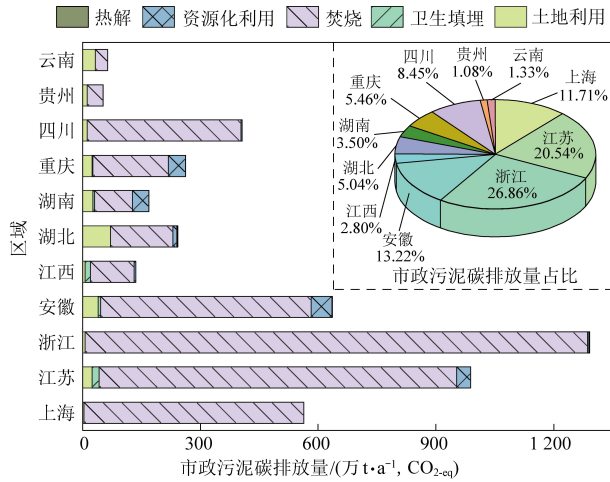


图 10 长江经济带不同省市市政污泥碳排放情况
Fig. 10 Municipal sludge carbon emissions in different
provinces (municipality) of the Yangtze River Economic Belt

可以看出,不同地区市政污泥处理处置碳排放量相差较大,但基本都来源于焚烧处置。长江下游沪、苏、浙、皖 4 省市市政污泥处理处置碳排放量占长江经济带总量的 70%以上,而中上游 7 省却仅占 30%不到。结合图 1~4 可知,长江经济带沿江各省市典型固废碳处理处置的排放情况与其产生量和处理处置模式密切相关。

3.4 碳约束下的沿江省市典型固废处理处置优化模式建议

截至目前,虽部分数据有所更新,但研究内容的整体情况及趋势变化不大。根据研究结果,对长江经济带沿江省市典型固废处理处置模式碳减排建议如下:

(1)注重资源化回收利用,2024 年 2 月国务院办公厅发布《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》,进一步明确废弃物资源利用的重要性,对于生活垃圾、市政污泥等固废的资源化利用应尤为重视。

(2)对于生活垃圾,首先要加强前期分类和资源回收。由于无害化、减量化和碳规避等突出优势,应继续在沿江省市中推进焚烧处置模式,同时注意焚烧后灰渣的资源化利用。进一步对卫生填埋模式进行限制,结合实际情况因地制宜使用堆肥模式。

(3)对于市政污泥,应加大对其脱水干燥的预处理研究以减少全工艺流程中的碳排放。同时注重低碳技术的研究,如热解技术,以及多种技术的综合利用。积极建立土地利用的相关标准和政策,因地制宜开展污泥土地利用模式。

(4)推动建设标准化、规范化的碳排放核算体系,以期为我国包括生活垃圾和市政污泥在内的固废进行低碳化的处理处置模式提供实用性强、可信度高的评估系统。

总的来说,对于长江经济带沿江省市典型固废——生活垃圾和市政污泥处理处置模式的选择应在保障环境效益(减量化、资源化、无害化和低碳排放)的基础上,兼顾经济效益(成本)和社会效益(市民可接受度),选择适合本地区的处理处置模式。

4 结论与展望

截至目前,长江经济带生活垃圾、市政污泥产量以及预测的处理处置缺口沿长江干流自上而下基本呈现递增趋势的情况仍未改变。两种固废的处理处置模式均以焚烧为主,而生活垃圾焚烧的单位碳排放量较小,这主要是因为生活垃圾易焚烧,其碳规避效果好。然而我国市政污泥的含水率高、热值低,故其焚烧的单位碳排放量较大,市政污泥的处理处置模式中土地利用和热解的单位碳排放量相对较小。两种固废的处理处置所产生的碳排放总量在下游地区要明显高于中上游地

区,这与不同区域的固废产量、处理处置模式密切相关。

总体而言,长江经济带各省市生活垃圾及市政污泥处理处置模式较为先进、处理率高,这有利于我国“双碳”目标的实现。为更好地达到减污降碳效果,对于生活垃圾的处理处置还应继续推进焚烧模式,逐步减少卫生填埋,尤其是中上游地区;对于市政污泥而言,应更加关注前期预处理,尽量减少其含水率,从而提高污泥焚烧的效果。同时,经济发达的地区如“江浙沪”应率先开展低碳化处理处置模式的开发与试点,如对污泥热解技术进行改进,提升该模式的处理能力和可控性等;经济较为落后的地区要注重资源化回收和处置技术的综合利用。此外应加强固废的资源化利用,从整体上推动长江经济带固废处理处置模式的发展和碳排放总量的降低。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发《“十四五”推动长江经济带发展城乡建设行动方案》《“十四五”黄河流域生态保护和高质量发展城乡建设行动方案》的通知[EB/OL]. [2024-04-04]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202201/20220124_764232.html, 2022-01-24.

[2] 郑朝晖. 长江经济带固废治理需要综合解决方案[J]. 中国环境管理, 2021, 13(2): 143-144.

[3] 尚勇敏, 海骏娇. 长江经济带生态发展报告(2020—2021)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.

[4] 王春燕. 城市固废处理技术现状及发展趋势分析[J]. 山西化工, 2020, 40(6): 214-215.

WANG Chunyan. Current situation and development trend of municipal solid waste treatment technology[J]. Shanxi Chemical Industry, 2020, 40(6): 214-215.

[5] 杨徐烽. 浅谈固废处置现状及处理技术[J]. 资源节约与环保, 2020(7): 105-106.

[6] 杨浩南, 徐亚, 黄启飞, 等. 长江流域固废治理现状、挑战与对策建议[J/OL]. 环境科学研究: 1-12 [2024-01-31]. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.01.13>.

YANG Haonan, XU Ya, HUANG Qifei, et al. Solid waste management in the Yangtze River Basin: Status, challenges and countermeasures[J/OL]. Research of Environmental Sciences: 1-12 [2024-01-31]. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.01.13>.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2022 年城市建设统计年鉴[EB/OL]. [2024-04-04]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>, 2023-10-13.

[8] 中华人民共和国生态环境部. 2022 年中国生态统计年报[EB/OL]. [2024-04-11]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>, 2023-12-29.

- [9] 杨昕. 长江经济带社会发展报告(2020—2021)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021: 39-72.
- [10] 彭智敏, 吴哈哈. 长江经济带能源消费、生态环境污染与产业转型升级[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(8): 1694-1704.
PENG Zhimin, WU Hanhan. Energy consumption, eco-environmental pollution and industrial restructuring and upgrading in Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(8): 1694-1704.
- [11] 孙克, 张信为, 方凡铭, 等. 产业升级、城市化与碳排放效率——以长江经济带108个城市为例[J]. 科技广场, 2023(5): 75-86.
SUN Ke, ZHANG Xinwei, FANG Fanming, et al. Industrial upgrading, urbanization and carbon emission efficiency: A case study of 108 cities in the Yangtze River Economic Belt[J]. Science Mosaic, 2023(5): 75-86.
- [12] 张成, 张后虎, 申秀芳, 等. 长江经济带固体废物污染防治和管理研究[J]. 环境保护, 2018, 46(16): 22-28.
ZHANG Cheng, ZHANG Houhu, SHEN Xiufang, et al. Solid waste pollution prevention and management in the Yangtze River Economic Belt[J]. Environmental Protection, 2018, 46(16): 22-28.
- [13] 张文洁, 许宁, 洪名勇. 长江经济带碳排放绩效的分布动态与地区差异研究[J]. 经济问题, 2023(11): 105-113.
ZHANG Wenjie, XU Ning, HONG Mingyong. Distribution dynamics and regional differences of carbon emission performance in the Yangtze River Economic Belt[J]. On Economic Problems, 2023(11): 105-113.
- [14] 中国国家统计局. 中国统计年鉴—2022[EB/OL]. (2023-11-16)[2024-04-04]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm>.
- [15] 汪永豪. 长江经济带沿线主要城市水资源绿色效率及节水减排潜力时空演变研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2023: 12.
WANG Yonghao. Spatial-temporal evolution of water resources green efficiency and potential of the water-saving and emission-abating in major cities along the Yangtze River Economic Belt[D]. Yi Chang: China Three Gorges University, 2023: 12.
- [16] 国务院. 国务院关于调整城市规模划分标准的通知[EB/OL]. [2024-04-04]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content_9225.htm.
- [17] 《生活垃圾生产量计算及预测方法》CJ/T 106—2016[S].
- [18] 李秋虹, 孙晓杰, 胡心悦, 等. 中国城市生活垃圾处理的碳排放变化趋势研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(7): 952-958.
LI Qiuhong, SUN Xiaojie, HU Xinyue, et al. Study on the trend of carbon emission of municipal solid waste treatment in China[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(7): 952-958.
- [19] 李乔洋. 基于碳减排分析的我国城镇污泥处置现状及发展趋势研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 48-61+68-69.
LI Qiaoyang. Current situation and development trend of urban sludge disposal in China based on carbon emission reduction analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 48-61+68-69.
- [20] 邹正康, 郭晓, 梁莎, 等. 市政污泥热化学转化技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2023, 37(5): 110-120.
ZOU Zhengkang, GUO Xiao, LIANG Sha, et al. Research progress on thermochemical conversion technology of sewage sludge[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(5): 110-120.
- [21] 刘敬武. 城市固体废物现状及处置技术比较分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(2): 107-109.
LIU Jingwu. Comparative analysis of current status and disposal technologies of municipal solid waste[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(2): 107-109.
- [22] 柴宝华, 李文涛, 亓伟, 等. 我国市政污泥处理处置现状研究[J]. 新能源进展, 2023, 11(1): 38-44.
CHAI Baohua, LI Wentao, QI Wei, et al. Status of municipal sludge treatment and disposal in China[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11(1): 38-44.
- [23] 上海市生态环境局. 二〇二二年上海市固体废物污染环境防治信息公告[EB/OL]. [2024-04-18]. <https://sthj.sh.gov.cn/hbzhwypt1103/hbzhwypt1112/20230619/a42027b46763442197e81392313fb5c0.html>.
- [24] 段华波, 陈瑛, 蔡俊雄, 等. 固体废物利用与处置碳排放研究进展和发展趋势[J]. 环境科学学报, 2023, 43(6): 1-10.
DUAN Huabo, CHEN Ying, CAI Junxiong, et al. Research progress and trend of carbon emissions from solid waste utilization and disposal[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(6): 1-10.
- [25] 李凯军, 周亚, 肖慧娟, 等. Decoupling of economic growth from CO₂ emissions in Yangtze River Economic Belt cities[J]. Science of the Total Environment, 2021, 775: 145927.