

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

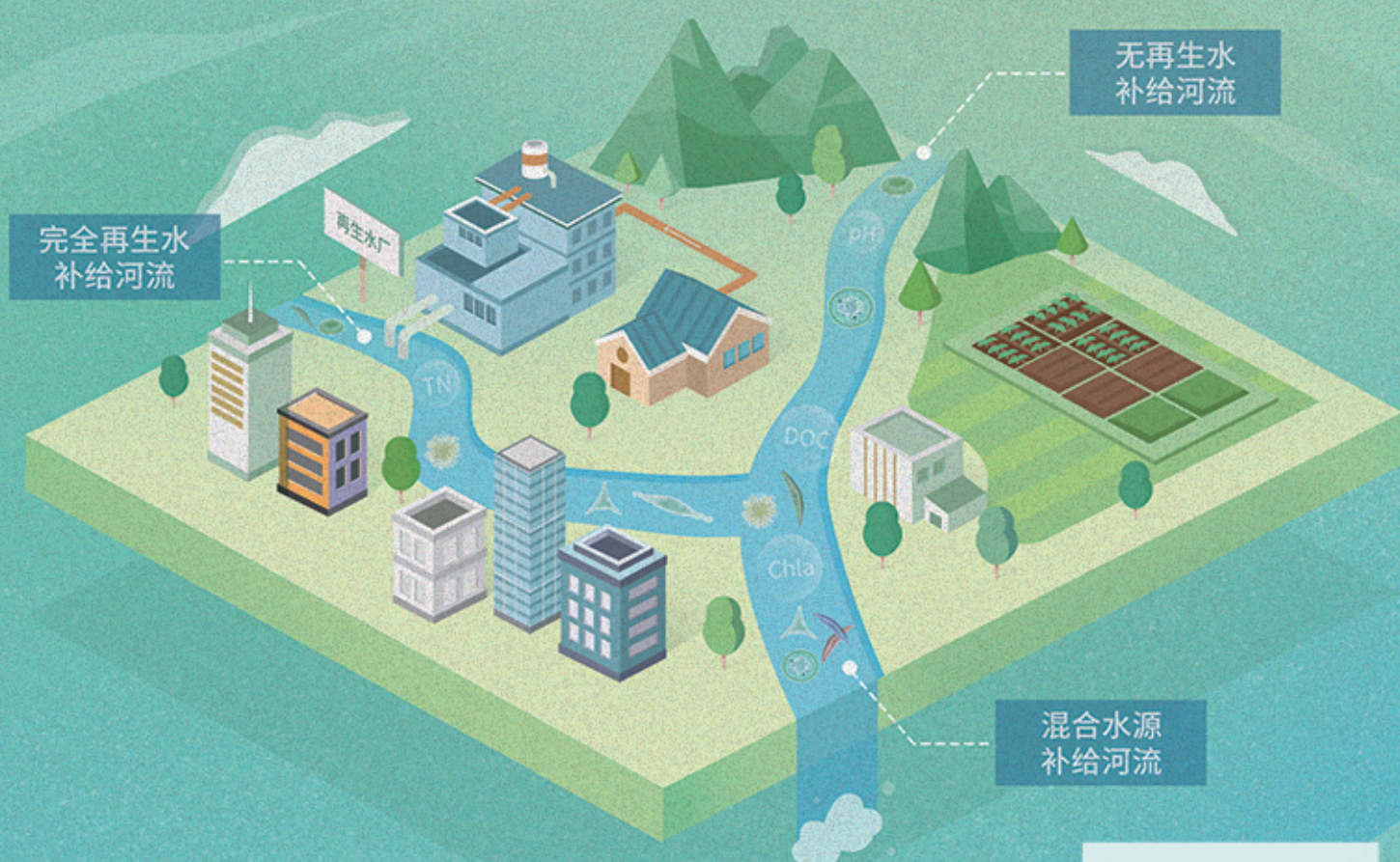
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于 g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析

张涛¹, 郑钧文¹, 孙煜臻¹, 白冬锐², 杨婷¹, 张冰¹, 郭含文^{3,4}, 陈坦^{1,5*}, 王洪涛^{3*}

(1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 京东方环境能源科技有限公司, 北京 100176; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084; 4. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; 5. 中央民族大学北京市食品环境与健康工程技术研究中心, 北京 100081)

摘要: 为系统揭示生活垃圾分类和末端处置匹配对全过程管理环境效益的改善,按照张家港市日均生活垃圾产量 1850 t 计,基于生命周期评价方法和实测垃圾组分数据,通过测算污染物排放的直接总环境影响潜值和电能回收量折算后的总环境影响潜值,分析和预测了垃圾分类典型情况和不同末端处置能力匹配情景下的张家港市生活垃圾处置环境效益。垃圾分类后厨余垃圾的平均厨余组分质量占比(厨余垃圾纯度,95%)较未分类小区(66%)提高了 29 个百分点,其他垃圾中的厨余组分质量占比(41%)则降低了 25 个百分点。末端处置能力现状情景下,厨余垃圾分出量为 150 t·d⁻¹时,直接总环境影响潜值随厨余垃圾纯度提高逐渐降低,较垃圾未分类时(3.41 × 10⁻¹⁰,以 PET₂₀₀₀计,下同)减少约 10%;厨余垃圾分出量大于 150 t·d⁻¹时,厨余垃圾分出量和纯度不断提高,分流厨余垃圾的填埋处置将导致污染排放增多,直接总环境影响潜值逐渐增加。生活垃圾处置环境效益的提升不仅依靠分类效果的改善,也依靠末端处置能力的匹配。末端处置能力规划情景下,生活垃圾分类后直接总环境影响潜值(1.73 × 10⁻¹⁰ ~ 2.40 × 10⁻¹⁰)均低于末端处置能力现状情景。厨余垃圾处置能力充足,相同厨余垃圾纯度下,直接总环境影响潜值随厨余垃圾分出量增加而降低。末端处置能力现状情景下电能回收量折算后的总环境影响潜值为 -0.89 × 10⁻¹⁰ ~ -0.39 × 10⁻¹⁰,高于末端处置能力规划情景(-2.13 × 10⁻¹⁰ ~ -1.82 × 10⁻¹⁰)。结果表明,末端处置能力按规划扩建后,垃圾分类效果持续提升利于提高全过程管理的环境效益。从全过程角度协同提升垃圾分类效果与末端处置能力匹配程度,能有效改善环境效益。

关键词: 生活垃圾; 分类; 张家港市; 全过程管理; 环境影响潜值

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5861-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201296

Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification

ZHANG Tao¹, ZHENG Jun-wen¹, SUN Yu-can¹, BAI Dong-rui², YANG Ting¹, ZHANG Bing¹, GUO Han-wen^{3,4}, CHEN Tan^{1,5*}, WANG Hong-tao^{3*}

(1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 2. BOE Environment & Energy Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China; 5. Beijing Engineering Research Center of Food Environment and Health, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: The aim of this investigation was to reveal the municipal solid waste (MSW) environmental benefit improvement when MSW classification and terminal disposal matched from the perspective of MSW integrated management. According to the average daily MSW production of 1850 t in Zhangjiagang City, by calculating the direct total environmental impact potential converted from the pollutant emission (DTEIP) and the total environmental impact potential after the conversion of power recovery, the environmental benefit of MSW disposal under scenarios in which the typical MSW classification procedure matched with various terminal disposal capabilities were analyzed and predicted based on the life cycle assessment (LCA) method and MSW composition data collected from Zhangjiagang City. The average proportion of food components in food waste (purity of food waste, 95%) increased by 29 percentage points after MSW classification, compared with that of unclassified communities (66%), whereas the average proportion of food components in residual waste (41%) decreased by 25 percentage points. Under the scenarios based on the current situation of terminal disposal, when the food waste separation amount was 150 t·d⁻¹, the DTEIP would gradually decrease with the increase in food waste purity, which decreased by approximately 10% compared with that of the unclassified scenario (3.41 × 10⁻¹⁰ in PET₂₀₀₀; the same applies hereinafter). When the food waste separation amount was above 150 t·d⁻¹, as the separation amount and purity of food waste gradually increased, the disposal of separated food waste by landfill would lead to increasing pollution. The improvement of the environmental benefit of MSW disposal depended not only on the improvement of the MSW classification efficiency but also on the matching degree with the terminal disposal capacity. Under the scenarios based on the terminal disposal plan, the DTEIP (1.73 × 10⁻¹⁰ ~ 2.40 × 10⁻¹⁰) was lower than that of the current terminal disposal scenarios after MSW classification. When the food waste disposal capacity was sufficient, and the purity of food waste remained stable, the DTEIP decreased as the food waste separation amount increased. The total environmental impact potential after the conversion of power recovery in the scenarios based on the current situation of terminal disposal was -0.89 × 10⁻¹⁰ ~ -0.39 × 10⁻¹⁰, which was higher than that in the scenarios based on the current situation of terminal disposal (-2.13 × 10⁻¹⁰ ~ -1.82 × 10⁻¹⁰). The

收稿日期: 2022-01-28; 修订日期: 2022-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1903000); 中央民族大学 2021 年自主科研项目交叉研究专项(2021JCXK01); 中央民族大学自主科研项目 2021 年滚动支持项目(2021GDZC08)

作者简介: 张涛(1997 ~),男,硕士,主要研究方向为固体废物处理与处置, E-mail: zt6260muc@163.com

* 通信作者, E-mail: chentant05@tsinghua.org.cn; htwang@tsinghua.edu.cn

results indicated that the continuous improvement of the MSW classification effect greatly promoted the environmental benefit from MSW integrated management after the terminal disposal capacity expanded according to the plan. Synergistically promoting the matching degree of the MSW classification effect and terminal disposal capability can significantly optimize environmental benefits from the perspective of MSW integrated management.

Key words: municipal solid waste; classification; Zhangjiagang City; integrated management; environmental impact potential

全球城市都在面对生活垃圾处置的严峻挑战^[1,2],正在经历快速城市化和工业化的中国亟需应对生活垃圾管理难题^[3].在填埋用地紧张、短期内难以快速扩大末端处置规模的情况下,生活垃圾全过程管理需要向前端倾斜^[4].生活垃圾分类是垃圾回收再利用过程的起点,也是生活垃圾管理“减量化、资源化、无害化”的前提^[5~7].在生活垃圾中,厨余垃圾产量大、易降解有机质含量高、热值低、处置难度大^[8],所以我国垃圾分类以“干湿分离”——厨余垃圾和其他垃圾分开为核心,分为厨余垃圾、其他垃圾、可回收物和有害垃圾这四类,以利于末端分质处置^[9].

从2019年起,中国陆续在上海和北京等众多城市开始实施垃圾分类,使得厨余垃圾分出量快速增长^[10].2020年初上海市分类试点小区厨余垃圾中厨余组分平均质量占比提升至90%,其他垃圾中厨余组分平均质量占比则降低至40%^[11].此外,垃圾分类也有利于改善末端处置设施的运行效果,例如垃圾分类可减少厨余垃圾中的杂质,提高厌氧发酵产能效率^[12].同时垃圾分类也可明显降低其他垃圾含水率和盐度,提高低位热值^[13,14].在其他垃圾焚烧发电时,尽管入炉垃圾量减少,但由于厨余垃圾的分离使含水率降低、热值升高,不仅不需要额外的辅助燃料,发电量较传统垃圾焚烧发电量仍有增加^[10,11,15],还减少了底渣和飞灰产量^[16,17].由于垃圾分类是连接生活垃圾源头收集和末端处置的枢纽,分类后各类垃圾与末端分质处置的合理衔接成为了全过程高效管理的核心节点,大量研究以生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)从全过程角度评价了垃圾分类对生活垃圾管理的环境影响.杭州自2010年推行垃圾分类后,生活垃圾全过程管理体系的环境影响显著降低,2011年全球变暖、酸化、富营养化和光化学臭氧生成的环境影响较2010年生活垃圾混合收集处理时分别降低了30%、18%、28%和30%,垃圾填埋场造成的环境负荷最大^[18].天津市2009~2018年生活垃圾处理碳排放量估算结果表明,随着焚烧处置的推广,与2009年相比,2018年生活垃圾焚烧处理量增加约61%,填埋量减少约18%,CH₄排放量削减41%,减少原生垃圾填埋等末端处置方式的改善有利于温室气体的减排^[19],与全国多个城市的研究结果一致^[20].2020年6月上海市生活垃圾处理系统碳排放分析结果表明,近

84%的家庭厨余垃圾得到了有效分离,其他垃圾的低位热值较上年提高了96%,垃圾分类和分质处理后碳排放(4230 t·d⁻¹,以碳当量计,下同)较混合收集处置时(5779 t·d⁻¹)降低了27%^[21].垃圾分类的主要目的是将垃圾按质分流,便于末端处置和资源化利用^[22].分类后垃圾分质处置的环境效益优势显现,但随着分类的普及,各类垃圾分出量和组分变化对末端处置的环境影响有待讨论.

垃圾分类后厨余垃圾和可回收物分出量将显著提高,其他垃圾相应减少,生活垃圾全过程管理也在面对末端设施处理处置能力与实际需求如何匹配的问题^[23].垃圾组分的变化会影响末端处置设施的投入和产出,如厨余垃圾分出量增加,扩大了对电能投入和专用处置能力的需求,但通过垃圾分类效果与末端处置能力匹配程度的提升,可回收更多电能并优化环境效益^[19,15].各类垃圾分出量、组分变化和末端处置能力的差异,都会不同程度影响生活垃圾全过程管理的环境效益.之前的研究多侧重评价末端处置设施的污染物排放,鲜见报道从全过程管理角度考虑垃圾前端分类效果与末端处置工艺衔接的环境效益变化.为系统认识垃圾前端分类收集与末端分质处置合理匹配的重要性,本文在生命周期评价的情景和污染物排放强度清单设置时充分考虑了前端各类垃圾分出量和纯度变化,结合张家港市末端处置能力现状和规划,分析各类垃圾分出量和组分变化对环境效益的影响.

1 材料与方法

1.1 张家港市概况和采样方法

张家港市位于长江三角洲腹地的江苏省东南部,是新兴港口工业城市,总面积近987 km²,2019年常住人口126万,全年生活垃圾收运量约16万t^[24].目前张家港市生活垃圾末端处置能力总体可以满足处置需求,厌氧消化-制肥、焚烧和填埋处置能力分别为150、1000和700 t·d⁻¹,可回收物年处置能力为30万t.近年张家港市生活垃圾产量呈持续增长趋势,生活垃圾全过程管理面临着处置能力趋近饱和的迫切问题.根据规划,到2025年将新建成厌氧消化-制肥处置能力350 t·d⁻¹、焚烧处置能力1250 t·d⁻¹和填埋处置能力233 t·d⁻¹的生活垃圾末端处置规模.

本研究依据《生活垃圾采样和物理分析方法》

(CJ/T 313-2009)于2020年9月(秋季)、2021年1月(冬季)、2021年5月(春季)和2021年7月(夏季)采集了8个垃圾分类社区和1个未分类社区的共312个生活垃圾样本,样本总量约3 t,分别测定了厨余垃圾和其他垃圾中厨余组分、纸类、塑料、竹木、金属、玻璃、织物和有毒有害物的鲜重质量.本文中组分占比均指鲜重的占比;定义厨余垃圾中厨余组分的占比为厨余垃圾纯度,其他垃圾中非厨余组分的占比为其他垃圾纯度.

1.2 系统清单和情景设置

通过定量分析各环节的能量投入和污染排放来评估一种产品、工序和生产活动造成的环境负载,进而在全过程中寻求改善方法的生命周期评价,已在环境效益评价领域广泛应用^[18,25].本文基于张家港市末端处置能力现状和规划,从生命周期的视角,

构建垃圾分类典型情况和不同末端处置能力匹配的系列情景,提出适合本文情景的生命周期清单,测算了分类后垃圾分出量和组分占比变化下张家港市生活垃圾管理体系的环境影响.

结合张家港市生活垃圾管理现状和规划,以焚烧、厌氧消化-制肥、填埋和可回收物运输至资源再生厂为范围,处置1 850 t生活垃圾为功能单元开展生命周期评价(图1).以张家港市实测数据为基础,分析随着厨余垃圾和其他垃圾组分不断变化,厨余垃圾、其他垃圾和可回收物分出量变化后的污染物排放强度变化,评估和预测不同垃圾分类效果时生活垃圾管理的环境效益.本文主要考察全球变暖(CO_2 、 CO 、 CH_4 、 N_2O)、酸化(SO_2 、 NO_x)、化学臭氧生成(CO 、 CH_4 、 PM_{10})、富营养化(NO_x)和人体毒性(Cd 、 Hg 、二噁英)等环境影响类型.

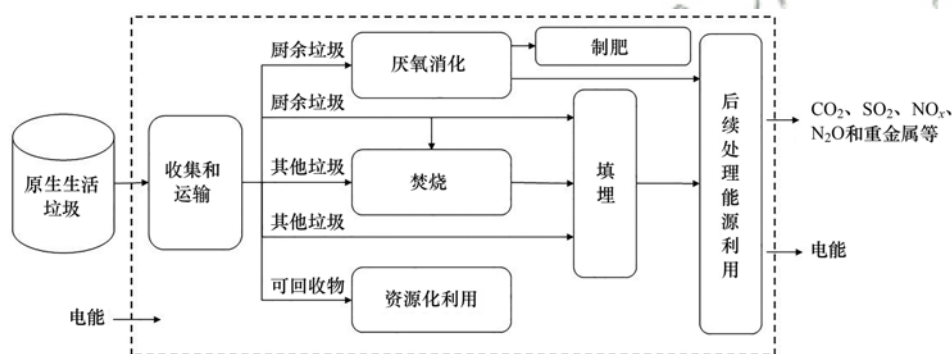


图1 原生生活垃圾处置系统边界

Fig. 1 Boundary diagram of the native MSW disposal system

为适当简化系统复杂度,本文假设如下.

(1)有害垃圾产量极小(占生活垃圾日产量1%以下),本文忽略有害垃圾的单独处置.原生生活垃圾按照厨余垃圾、其他垃圾和可回收物等三类收集和运输.

(2)张家港市近5年生活垃圾总产量变化不大,稳定在1 850 t左右.实地采样分析结果表明张家港市四季的生活垃圾组分特征无显著差异.结合相关文献报道,将生活垃圾组分中厨余组分、可回收物和其他组分占比设置为65%、25%和10%^[13,26,27].

(3)结合张家港市生活垃圾处置设施现状和规划,厌氧消化-制肥和焚烧工艺处置优先,可回收物资源运输至资源再生厂,再利用能力充足.厨余垃圾的处置以厌氧消化-制肥为主,在焚烧处置能力充足的情况下,将剩余厨余垃圾与其他垃圾协同焚烧处置,仍有未处置的厨余垃圾则填埋处置.其他垃圾以焚烧为主,填埋为辅.目前张家港市填埋场设计库容充足,本文将填埋场作为最终处置方式,视作可兜底处置所有的剩余生活垃圾.

(4)厨余垃圾先二次分选,分流为厨余部分垃圾和剩余部分垃圾.厨余部分垃圾的厨余组分占比为100%,进入厌氧消化-制肥处置工艺,超出处置能力部分与其他垃圾混合焚烧(参考表1取值,根据混合后待焚烧垃圾中厨余组分占比插值测算焚烧污染排放强度)或填埋处置;剩余部分垃圾中混有少许厨余组分,设占比为10%,以焚烧或填埋方式处置.厌氧消化-制肥处置工艺中有机肥产品土地利用,后续的污染排放不再计入.

(5)可回收物以收集和运输至资源再生厂为完整处置链条,主要评估其收运过程中的环境影响;收集到的可回收物纯度按100%计.

(6)底渣和飞灰的处置是焚烧工艺的必要组成部分,底渣和飞灰的填埋处置排放包含在填埋处置的系统边界内^[28].本文系统边界图中的填埋不区分常规的卫生填埋和飞灰的安全填埋.

(7)根据IPCC国家温室气体清单指南^[29],各情景中生物成因引起的 CO_2 排放不计入 CO_2 排放总量估算清单中.

表 1 其他垃圾焚烧处置的污染排放强度清单¹⁾

项目		其他垃圾焚烧处置(厨余组分占比)/%											
		55	58	59	60	61	62	63	64	65	66	68	71
能源投入	电能/kW·h	89.10	90.19	90.56	90.92	91.29	91.65	92.02	92.38	92.75	93.11	93.84	94.94
排放	CO ₂ /kg	509.69	479.11	468.91	458.72	448.53	438.33	428.14	417.95	407.76	397.56	377.18	346.60
	CO/kg	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	NO _x /kg	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	CH ₄ /kg	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	PM ₁₀ /kg	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	N ₂ O/kg	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	SO ₂ /kg	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	Cd × 10 ⁻³ /kg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Hg × 10 ⁻³ /kg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	二噁英(以 TEQ 计) × 10 ⁻⁹ /kg	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
能源回收	电能/kW·h	419.96	408.36	404.50	400.63	396.77	392.90	389.04	385.17	381.31	377.44	369.71	358.12

1) 以 1 t 生活垃圾为功能单元

(8) 垃圾处置回收的电能可并入电网使用, 抵消燃煤发电厂的发电量, 降低污染排放^[30]. 直接环境影响潜值通过系统边界内末端处置设施直接排放的污染物总量测算得出; 处置设施回收的电能扣除垃圾处置本身所需电能后折算为燃煤发电对应的污染排放量, 获得电能回收量折算后的环境影响潜值.

分别基于张家港市末端处置能力现状(表 2) 和规划(表 3) 设置了二类情景. 根据垃圾组分实测和文献[13]报道数据, 设定垃圾分类后厨余垃圾纯度变化梯度(70%、80%、90% 和 100%). 设定厨余垃圾分出量变化梯度为 150、300、450 和 600 t·d⁻¹, 可回收物分出量变化梯度相应为 0、50、100 和 150 t·d⁻¹. 情景 A1 和 A1' 均为混合投放-收运情景, 分别代表末端处置现状和规划下垃圾未分类时处置状况. 为分析生活垃圾末端处置精细化管理对环境效益的影响, 设置了对照情景 A0, 该情景未分类, 生活垃圾中厨余组分占比为 65%, 全部填埋处置, 填埋气通过火炬燃烧, 不回收电能, 污染排放强度由表 4 数据依据厨余组分占比插值获得. 目前该市焚烧主要采用机械炉排焚烧炉, 厨余垃圾处理厂使用厌氧消化罐, 充分收集与张家港市地理位置、处置设施规模、垃圾运输距离和工艺技术路线相近的生活垃圾处置设施的运行参数和污染排放数据. 焚烧处置主要参考杭州市(处置能力 1 200 t·d⁻¹, 机械炉排焚烧炉) 和华南某市(机械炉排焚烧炉) 的数据, 厌氧消化处置参考杭州市(处置能力 200 t·d⁻¹) 的数据, 填埋处置参考了 2 个与张家港市相似处置工艺的填埋场运行参数^[28,31~33], 利用本课题组前期研究中生命周期污染排放清单参数的设定方法^[34], 核算得出本文各情景对应处置工艺的生命周期污染排放强度清单(表 1、4 和 5). 燃煤发电过程的污染排放数据

主要参考中国燃煤电厂的研究结果^[35], 燃煤发电厂生产 1 000 kW·h 电能产生的污染物排放强度为: CO₂ 608.02 kg、CO 10.84 kg、CH₄ 0.04 kg、N₂O 1.26 kg、SO₂ 19.22 kg 和 NO_x 2.27 kg. 本文各情景环境影响潜值的计算方法和相关计算参数参考文献[34]. 利用当量因子^[33] 将具有同一种环境影响潜值的污染物特征化并归一化, 再利用标准化系数和权重系数加权测算环境影响潜值. 标准化系数采用荷兰莱顿大学环境科学研究中心开发的 CML-IA 数据库中的 World 2000 参考值^[36], 权重系数采用杨建新等^[37] 的研究结果.

2 结果与讨论

2.1 张家港市生活垃圾组分分析

为认识居民生活垃圾组分特征, 了解社区垃圾分类情况, 采集了张家港市 8 个实施垃圾分类的社区和 1 个未实施垃圾分类的社区的生活垃圾样品. 4 个季节的生活垃圾组分变化特征如图 2 所示. 张家港市未垃圾分类社区 4 个季节的生活垃圾中组分占比最大的是厨余组分(63%~71%), 在全国处于较高水平^[38,39]. 与珠海市和肇庆市等发展程度相似的中小城市(47%~53%)^[40] 相比, 张家港市生活垃圾中厨余组分平均占比也较高, 更趋近于北京、上海和苏州等大型城市(63%~66%)^[27,41~44], 张家港市的生活垃圾组分可代表众多快速发展的中小城市未来生活垃圾的组成趋势. 此外, 塑料、纸张、织物、陶瓷、玻璃、金属和竹木占比分别为 11%~17%、8%~16%、1%~4%、0%~9%、0%~3%、0%~1% 和 0%~1%. 经 Kruskal-Wallis H 检验, 各种组分在 4 个季节间无显著差异($P > 0.05$), 张家港市生活垃圾中厨余组分占比稳定(约 66%), 后文情景

表 2 基于末端处置现状的张家港市各类生活垃圾比例设计情景

Table 2 Proportion design scenarios of various MSW in Zhangjiagang City based on the current situation of terminal disposal														
末端处置能力现状	情景	厨余垃圾		厨余垃圾分流		可回收物分出量/t	其他垃圾		厨余垃圾处置			可回收物处置运输至资源再生厂/t	其他垃圾处置	
		分出量/t	厨余组分占比/%	厨余部分垃圾量/t	剩余部分垃圾量/t		分出量/t	厨余组分占比/%	厌氧消化-制肥/t	厨余部分填埋/t	剩余部分填埋/t		焚烧/t	填埋/t
厌氧消化-制肥: 150 t·d ⁻¹ ; 可回收物运输至资源再生厂: 800 t·d ⁻¹ ; 焚烧: 1 000 t·d ⁻¹ ; 填埋可处置所有剩余生活垃圾	A0	—	—	—	—	—	1 850	65	—	—	—	—	—	1 850
	A1	—	—	—	—	—	1 850	65	—	—	—	—	1 000	850
	B1	150	70	100	50	0	1 700	65	100	0	50	0	1 000	700
	B2	150	80	117	33	0	1 700	64	117	0	33	0	1 000	700
	B3	150	90	133	17	0	1 700	63	133	0	17	0	1 000	700
	B4	150	100	150	0	0	1 700	62	150	0	0	0	1 000	700
	C1	300	70	200	100	50	1 500	66	150	50	100	50	1 000	500
	C2	300	80	233	67	50	1 500	64	150	83	67	50	1 000	500
	C3	300	90	267	33	50	1 500	62	150	117	33	50	1 000	500
	C4	300	100	300	0	50	1 500	60	150	150	0	50	1 000	500
	D1	450	70	300	150	100	1 300	68	150	150	150	100	1 000	300
	D2	450	80	350	100	100	1 300	65	150	200	100	100	1 000	300
	D3	450	90	400	50	100	1 300	61	150	250	50	100	1 000	300
	D4	450	100	450	0	100	1 300	58	150	300	0	100	1 000	300
	E1	600	70	400	200	150	1 100	71	150	250	200	150	1 000	100
	E2	600	80	467	133	150	1 100	66	150	317	133	150	1 000	100
	E3	600	90	533	67	150	1 100	60	150	383	67	150	1 000	100
	E4	600	100	600	0	150	1 100	55	150	450	0	150	1 000	100

表 3 基于末端处置规划的张家港市各类生活垃圾比例设计情景

Table 3 Proportion design scenarios of various MSW in Zhangjiagang City based on the terminal disposal plan														
末端处置能力现状	情景	厨余垃圾		厨余垃圾分流		可回收物分出量/t	其他垃圾		厨余垃圾处置			可回收物处置运输至资源再生厂/t	其他垃圾处置	
		分出量/t	厨余组分占比/%	厨余部分垃圾量/t	剩余部分垃圾量/t		分出量/t	厨余组分占比/%	厌氧消化-制肥/t	厨余部分焚烧/t	剩余部分焚烧/t		焚烧/t	填埋/t
厌氧消化-制肥: 500 t·d ⁻¹ ; 可回收物运输至资源再生厂: 800 t·d ⁻¹ ; 焚烧: 2 250 t·d ⁻¹ ; 填埋可处置所有剩余生活垃圾	A1'	—	—	—	—	—	1 850	65	—	—	—	—	—	1 850
	B1'	150	70	100	50	0	1 700	65	100	0	50	0	1 700	
	B2'	150	80	117	33	0	1 700	64	117	0	33	0	1 700	
	B3'	150	90	133	17	0	1 700	63	133	0	17	0	1 700	
	B4'	150	100	150	0	0	1 700	62	150	0	0	0	1 700	
	C1'	300	70	200	100	50	1 500	66	200	0	100	50	1 500	
	C2'	300	80	233	67	50	1 500	64	233	0	67	50	1 500	
	C3'	300	90	267	33	50	1 500	62	267	0	33	50	1 500	
	C4'	300	100	300	0	50	1 500	60	300	0	0	50	1 500	
	D1'	450	70	300	150	100	1 300	68	300	0	150	100	1 300	
	D2'	450	80	350	100	100	1 300	65	350	0	100	100	1 300	
	D3'	450	90	400	50	100	1 300	61	400	0	50	100	1 300	
	D4'	450	100	450	0	100	1 300	58	450	0	0	100	1 300	
	E1'	600	70	400	200	150	1 100	71	400	0	200	150	1 100	
	E2'	600	80	467	133	150	1 100	66	467	0	133	150	1 100	
	E3'	600	90	533	67	150	1 100	60	500	33	67	150	1 100	
	E4'	600	100	600	0	150	1 100	55	500	100	0	150	1 100	

设置时取为 65%。垃圾分类社区中厨余垃圾纯度平均为 95%，较未分类小区平均厨余组分占比(66%)提高了 29 个百分点，较 2019 年张家港市垃圾分类试点时期(70%)^[13]提高 25 个百分点。垃圾分类社区中其他垃圾的平均厨余组分占比为 41%，较未分类社区降低 25 个百分点。可见，垃圾分类显著提升了厨余垃圾和其他垃圾的纯度。

2.2 能耗分析

两类情景的电能输入和回收情况如图 3 所示。末端处置能力现状情景下，厨余垃圾分出量为 150 t·d⁻¹时，厨余垃圾纯度提高会使分流后厨余部分垃圾的厌氧消化-制肥处置量(150 t·d⁻¹)增加，填埋量减少。厌氧消化-制肥处置需要严格控制温度和氧气等条件，并配套除臭设施，处置 1 t 垃圾的电消

耗量比填埋高,所以电能输入量逐渐增加(如情景 B1、B2、B3 和 B4);厌氧消化-制肥处置的发电效率高于填埋,所以电能回收量逐渐增加.厨余垃圾分出量高于 150 t·d⁻¹时厌氧消化-制肥处置能力饱和,该处置工艺的电能输入量不再增加.厨余垃圾纯度提高时其他垃圾纯度也会相应提高,焚烧入炉垃圾的含水率降低、热值升高,可降低焚烧处置的电能输入量,增加电能回收量,所以厨余垃圾分出量高于 150 t·d⁻¹时电能输入量随厨余垃圾纯度提高而减少,电能回收量则增加(如情景 C1、C2、C3 和 C4).厨余垃圾纯度不变时,由于不可用于发电的可回收物分出量逐渐增加,各情景的电能回收量均随厨余垃圾分出量增加呈减少趋势.

末端处置能力规划情景下,厨余垃圾分出量为 150、300 和 450 t·d⁻¹时电能输入量随厨余垃圾纯度提高而降低,电能回收量则呈增加趋势(情景 B1'

~B4'、C1'~C4'和 D1'~D4'),原因和末端处置能力现状情景下厨余垃圾分出量大于 150 t·d⁻¹时相同;厨余垃圾分出量为 600 t·d⁻¹时,情景 E3'和 E4'中厌氧消化-制肥处置能力不足,分别有 33 t·d⁻¹和 100 t·d⁻¹的厨余部分垃圾需焚烧处置.高纯度的厨余垃圾含水率高、热值低,焚烧处置消耗电能较高,发电效率较低,所以情景 E3'和 E4'的电能输入量增加,电能回收量降低.厨余垃圾纯度不变时,电能输入量和回收量随厨余垃圾分出量增加而减少(如情景 B1'、C1'、D1'和 E1'),原因可能是厌氧消化-制肥和焚烧处置能力扩大后,厨余垃圾分出量每增加 150 t·d⁻¹,其他垃圾焚烧量相应减少 200 t·d⁻¹,而焚烧处置 1 t 生活垃圾输入和回收的电能通常高于厌氧消化-制肥处置,从处置量和发电效率角度分析,电能输入量和回收量随厨余垃圾分出量增加而减小.

表 4 其他垃圾填埋处置的污染排放强度清单¹⁾

Table 4 Life cycle inventory for landfill disposal of residual waste

项目		其他垃圾填埋处置(厨余组分占比)/%										
		55	58	60	61	62	63	64	65	66	68	71
能源投入	电能/kW·h	1.56	1.60	1.62	1.63	1.65	1.66	1.67	1.68	1.70	1.72	1.76
	CO ₂ /kg	89.83	93.86	96.55	97.89	99.24	100.58	101.93	103.27	104.61	107.30	111.33
排放	CO/kg	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	NO _x /kg	0.15	0.10	0.10	0.10	0.15	0.10	0.15	0.15	0.10	0.10	0.10
	CH ₄ /kg	27.17	28.95	30.14	30.74	31.33	31.92	32.52	33.11	33.71	34.90	36.68
	PM ₁₀ /kg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	N ₂ O/kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SO ₂ /kg	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	Cd/kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Hg/kg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	二噁英(以 TEQ 计)/kg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	能源回收	电能/kW·h	218.62	218.95	219.18	219.29	219.40	219.51	219.63	219.74	219.85	220.08
			218.95	219.18	219.29	219.40	219.51	219.63	219.74	219.85	220.08	220.41

1) 以 1 t 生活垃圾为功能单元;“—”表示未查阅到相应的污染物排放强度

表 5 厨余垃圾和可回收物处置的污染排放强度清单¹⁾

Table 5 Life cycle inventory of food waste and recycle waste disposal

项目		厨余垃圾处置(厨余组分占比)/%						可回收物处置 运输至资源 再生厂
		厌氧消化-制肥	填埋					
			10	70	80	90	100	
能源投入	电能/kW·h	50.00	1.01	1.75	1.87	1.99	2.12	1.00
排放	CO ₂ /kg	0.00	29.35	109.99	123.43	136.87	150.31	-185.00
	CO/kg	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	-0.80
	NO _x /kg	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.50
	CH ₄ /kg	1.00	0.43	36.08	42.03	47.97	53.91	-0.02
	PM ₁₀ /kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—
	N ₂ O/kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50 × 10 ⁻³
	SO ₂ /kg	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	-1.85
	Cd/kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—
	Hg/kg	—	—	—	—	—	—	0.50 × 10 ⁻⁴
二噁英(以 TEQ 计)/kg		—	—	—	—	—	—	
能源回收	电能/kW·h	260.00	213.57	220.30	221.42	222.54	223.66	—

1) 以 1 t 生活垃圾为功能单元;“—”表示未查阅到相应的污染物排放强度

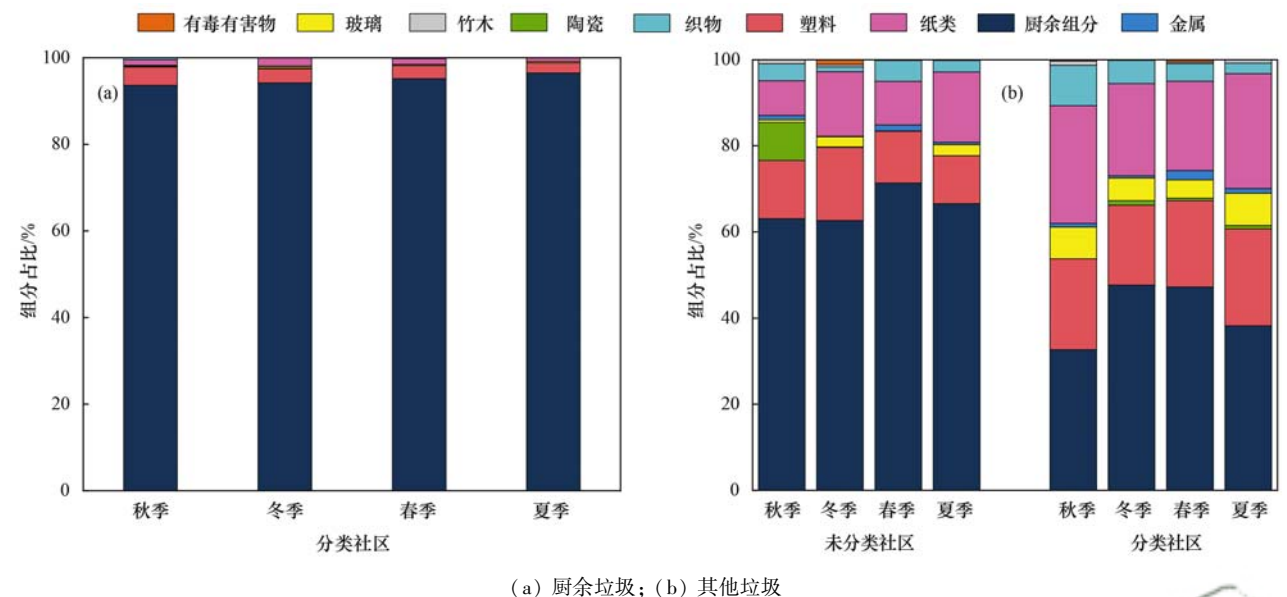


图2 张家港市生活垃圾中各主要组分占比

Fig. 2 Proportion of components in MSW of Zhangjiagang City

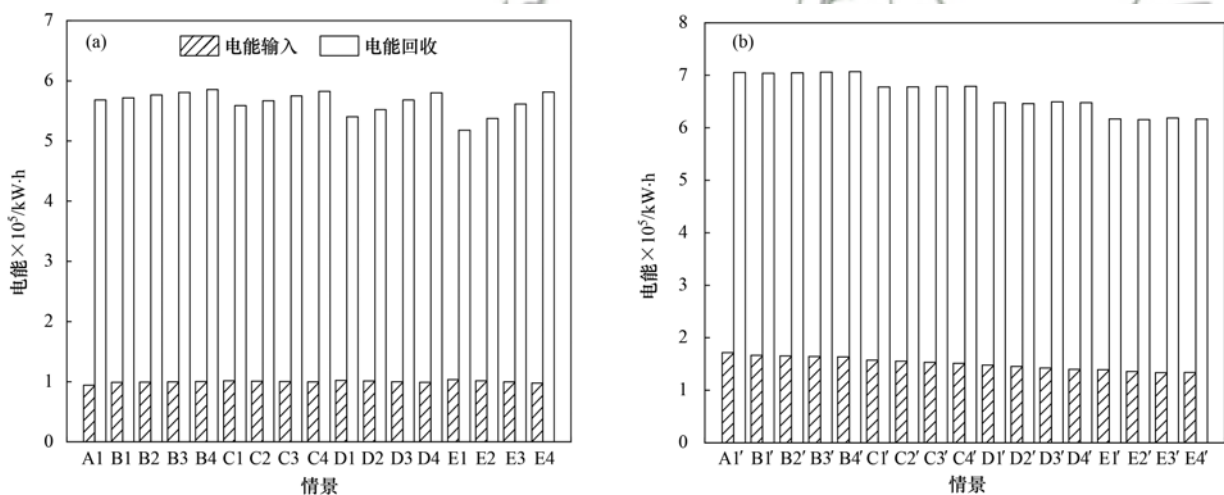


图3 不同情景下张家港市生活垃圾全过程管理的电能输入量和电能回收量

Fig. 3 Power input and recovery in various scenarios of MSW integrated management in Zhangjiagang City

2.3 典型情景环境影响潜值分析

2.3.1 全球变暖

各情景的直接全球变暖潜值在直接总环境影响潜值中贡献最多,测算结果如图4(a)所示.末端处置能力现状情景下,厨余垃圾分出量为 $150\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,厨余垃圾纯度提高使厌氧消化-制肥处置量增加,填埋量减少,降低填埋处置的 CO_2 和 CH_4 等温室气体排放量,所以直接全球变暖潜值随厨余垃圾纯度提高而降低;厨余垃圾分出量大于 $150\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,部分厨余垃圾分流至填埋场处置,厨余垃圾纯度提高会增加填埋堆体中有机质含量,进而增大水蒸气、 CO_2 和 CH_4 等温室气体排放强度,提高直接全球变暖潜值^[45~47].同时,塑料和竹木等组分碳含量高于厨余组分^[18],其他垃圾纯度提高后塑料和竹木

等组分占比增加,使焚烧处置入炉垃圾的整体碳含量逐渐提高,增大 CO_2 排放量,已有研究报道焚烧入炉垃圾含水率降低会增加处置过程的碳排放^[48].因此,厨余垃圾分出量大于 $150\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 时末端处置能力现状情景下的直接全球变暖潜值随厨余垃圾纯度和其他垃圾纯度的提高而增加(如情景C1、C2、C3和C4).厨余垃圾纯度为70%和80%时,厨余垃圾和可回收物分出量均增加,衡算后其他垃圾的纯度会逐渐降低,焚烧处置的温室气体排放强度降低,所以直接全球变暖潜值随厨余垃圾分出量增加而降低;厨余垃圾纯度为90%和100%时,厨余垃圾分出量增加,高纯度厨余垃圾填埋处置过程的 CO_2 和 CH_4 等温室气体排放量增加,同时其他垃圾的纯度会逐渐提高,增加焚烧处置的温室气体排放量,所以

直接全球变暖潜值逐渐增大. 情景 E4 厨余垃圾纯度为 100%, 有 $450 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 厨余垃圾需填埋处置, 所以该情景直接全球变暖潜值最高 (2.46×10^{-10} , 以 PET_{2000} 计, 下同), 高于未分类情景 A1 (2.39×10^{-10}). 应根据前端垃圾分类效果配套末端处置能力, 改善生活垃圾全过程管理的环境效益.

末端处置能力规划情景下, 厌氧消化-制肥和焚烧处置能力扩大, 厨余垃圾纯度不变时, 厨余垃圾厌

氧消化-制肥处置量不断增加, 其他垃圾焚烧处置量减少, 产生的污染排放量减少. 同时可回收物处置量增加也可抵消部分 CO_2 和 CH_4 排放, 所以直接全球变暖潜值随厨余垃圾和可回收物分出量增加而降低 (如情景 B1'、C1'、D1' 和 E1'). 厨余垃圾分出量不变时, 厨余垃圾纯度提高可使厌氧消化-制肥处置量增加, 减少 CO_2 等污染物排放量, 所以直接全球变暖潜值随厨余垃圾纯度提高而降低. 各情景下电能

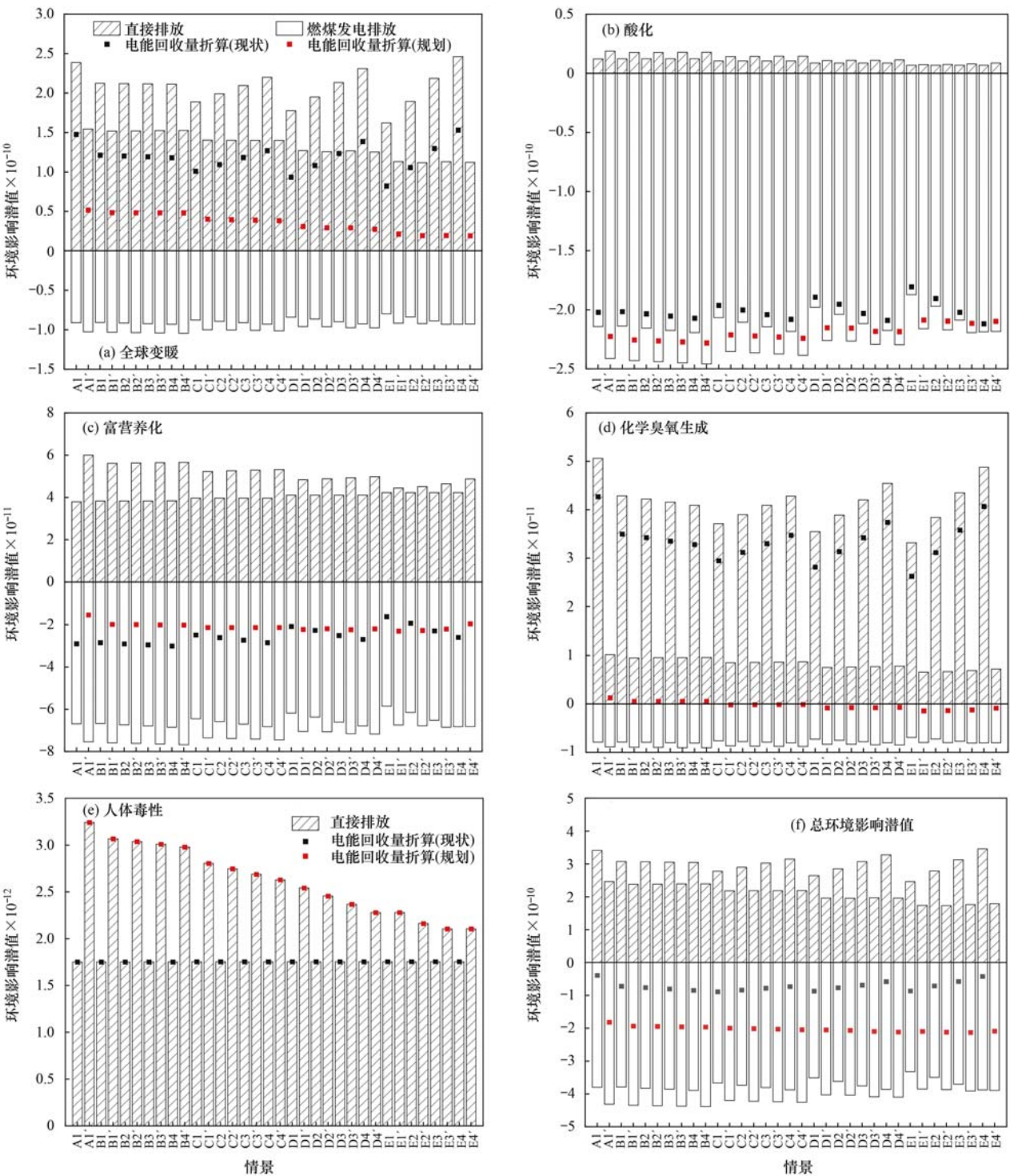


图 4 各情景下张家港市生活垃圾全过程管理的环境影响潜值

Fig. 4 Environmental impact potential in various scenarios of MSW integrated management in Zhangjiagang City

回收量折算后的全球变暖潜值显著低于直接全球变暖潜值,且两者变化趋势相同。

2.3.2 酸化、富营养化、化学臭氧生成和人体毒性

图 4(b)~4(e)分别是各情景下酸化、富营养化、化学臭氧生成和人体毒性潜值的测算结果。可回收物处置可抵消部分酸化影响,所以各情景下直接酸化潜值随可回收物分出量增加而减少(如情景 B1、C1、D1 和 E1)。由 2.2 节可知,垃圾分出量不变时,电能回收量随厨余垃圾纯度提高而增加,抵消污染排放量,所以电能回收量折算的酸化潜值也逐渐降低(如情景 B1、B2、B3 和 B4)。另外,可回收物运输量增加,运输途中车辆等排放的 NO_x 总量增加,会增大直接富营养化潜值^[33],所以末端处置能力现状情景下直接富营养化潜值随可回收物分出量增加而增大(如情景 B1、C1、D1 和 E1)。根据情景设置情况,末端处置能力规划情景下可回收物处置量每增加 $50 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,其他垃圾焚烧处置量降低 $200 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。可回收物处置和焚烧处置 1 t 垃圾时 NO_x 排放强度取值相同,折算后因减少焚烧量避免产生的 NO_x 排放量大于增加可回收物处置量产生的 NO_x 排放量,所以末端处置能力规划情景下焚烧能力扩大,直接富营养化潜值随可回收物处置量增加而减小。直接化学臭氧生成与填埋和焚烧过程中 CO 、 CH_4 和 PM_{10} 等污染物的排放有关^[47,49,50],厌氧消化-制肥处置能力不足时,厨余垃圾纯度提高会大幅增加填埋处置过程 CH_4 排放强度,增大直接化学臭氧生成潜值(如情景 C1、C2、C3 和 C4)。厨余垃圾纯度不变时,厨余垃圾分出量增加,其他垃圾焚烧处置量相应降低使 PM_{10} 和 CO 等污染物排放量减少,又由于可回收物处置量增加可抵消 CO 和 CH_4 排放,所以末端处置能力现状和规划情景下直接化学臭氧生成潜值随厨余垃圾分出量增加而减少(如情景 B1、C1、D1 和 E1)。直接人体毒性潜值主要与焚烧过程的二噁英、重金属和 PM_{10} 等排放有关^[28,31,51],末端处置能力现状情景下焚烧处置量不变($1000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$),其直接人体毒性潜值不变;末端处置能力按规划建设扩大后,厨余垃圾纯度提高或分出量增加可使垃圾焚烧处置量不断减少,减少二噁英、重金属和 PM_{10} 等污染排放量,使直接人体毒性潜值逐渐降低。

2.3.3 总环境影响潜值

末端处置能力现状情景下,各情景的直接总环境影响潜值范围为 $2.46 \times 10^{-10} \sim 3.46 \times 10^{-10}$,能回收量折算后的总环境影响潜值为 $-0.89 \times 10^{-10} \sim -0.39 \times 10^{-10}$;末端处置能力规划情景下,各情景的直接总环境影响潜值范围为 $1.73 \times 10^{-10} \sim$

2.47×10^{-10} ,能回收量折算后的总环境影响潜值为 $-2.13 \times 10^{-10} \sim -1.82 \times 10^{-10}$ (见图 4)。

情景 A0 的直接总环境影响潜值为 4.52×10^{-10} ,其余各情景的总环境影响潜值测算结果如图 4(f) 所示。情景 A1 (3.41×10^{-10}) 的直接总环境影响潜值比情景 A0 低 25%,与传统填埋处置相比,末端处置管理水平的提高可显著提升生活垃圾全过程管理的环境效益。末端处置能力现状情景下,厨余垃圾分出量为 $150 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,厨余垃圾纯度提高可增加厌氧消化-制肥处置量,降低填埋处置量,减少 CO_2 和 CH_4 等温室气体排放量,直接总环境影响潜值逐渐降低。情景 B1~B4 测算了目前张家港市生活垃圾全过程管理的环境效益,情景 B1 (3.07×10^{-10})、B2 (3.06×10^{-10})、B3 (3.06×10^{-10}) 和 B4 (3.05×10^{-10}) 的直接总环境影响潜值较未分类情景 A1 均减少约 10%,与杭州(5%)^[28]和上海(8%)^[34]的相似研究报道结果大体相当,与传统混合收运处置相比(情景 A0 和 A1),垃圾分类收集和分质处置对全过程管理的环境效益有明显改善作用。厨余垃圾分出量大于 $150 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,厌氧消化-制肥处置能力不足,厨余垃圾纯度提高使分流至填埋场处置的垃圾量增加, CO_2 和 CH_4 等温室气体排放量增加,所以直接总环境影响潜值逐渐增加(如情景 C1、C2、C3 和 C4)。厨余垃圾纯度为 70% 和 80% 时,直接全球变暖潜值随厨余垃圾分出量增加而降低(见 2.3.1 节),由于直接全球变暖潜值在直接总环境影响潜值中贡献最大,主导了整体环境影响潜值变化,所以直接总环境影响潜值也随厨余垃圾分出量增加而减少,其中情景 E1(厨余垃圾分出量 $600 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,纯度 70%)直接总环境影响潜值最低,为 2.46×10^{-10} ;厨余垃圾纯度为 90% 和 100% 时,直接总环境影响潜值变化规律和直接全球变暖潜值相同,随厨余垃圾分出量增加而增加。情景 E4 中厨余垃圾填埋量最大($450 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$)且纯度最高(100%),温室气体排放量最大,所以直接总环境影响潜值为所有情景中仅次于情景 A0 的第二高(3.46×10^{-10}),大体相当于未分类情景 A1。可见,前端垃圾分类效果与末端处置能力合理配套才能充分发挥垃圾分类对全过程管理的环境效益优势。末端处置能力规划建成后,分类和分流各相应情景的直接总环境影响潜值均下降(如情景 E3 和 E3'),分类后直接总环境影响潜值($1.73 \times 10^{-10} \sim 2.40 \times 10^{-10}$)均低于末端处置能力现状情景。厨余垃圾纯度不变时,厨余垃圾分出量增加,通过厌氧消化-制肥方式处置产生的污染物排放量相比焚烧处置较小,所以各情景的直接总环境影响潜值逐渐减少(如情景 B1'、C1'、D1' 和 E1'),与

课题组前期研究结果一致^[34]. 结果表明,末端处置能力按规划扩建后,垃圾分类效果持续提升利于提高全过程管理的环境效益.

末端处置能力现状情景下,电能回收量折算后的总环境影响潜值为 $-0.89 \times 10^{-10} \sim -0.39 \times 10^{-10}$,显著低于生活垃圾全部填埋处置且不发电情景 A0(4.52×10^{-10}). 可见,生活垃圾精细管理进一步垃圾资源化对提升生活垃圾全过程管理环境效益的重要性. 末端处置能力规划情景下,厨余垃圾通过厌氧消化-制肥或焚烧方式处置,其他垃圾全部通过焚烧处置,相比末端处置能力现状情景(部分垃圾通过填埋方式处置)电能回收效率和回收量提高,可折算为燃煤发电对应的环境影响潜值较高,所以电能回收量折算后的总环境影响潜值($-2.13 \times 10^{-10} \sim -1.82 \times 10^{-10}$)更低,并随厨余垃圾和其他垃圾纯度提高而降低(如情景 B1'、B2'、B3' 和 B4'),也随厨余垃圾分出量增加而降低(如情景 B1'、C1'、D1' 和 E1'). 垃圾分类持续推进,厨余垃圾分出量和纯度都将增加,通过填埋方式处置厨余垃圾,释放的恶臭气体和温室气体等累积排放会大幅增加^[49,50,52,53],影响生活垃圾全过程管理环境效益的提升. 若要实现环境效益最大化,应减少生活垃圾填埋量,加强资源化利用,协同提升垃圾分类效果与末端处置能力的匹配程度.

3 结论

(1) 张家港市生活垃圾以厨余组分(63%~71%)为主,在全国处于较高水平. 垃圾分类后厨余垃圾的平均厨余组分质量占比(95%)较未分类小区(66%)提高 29 个百分点,而其他垃圾(41%)则降低 25 个百分点.

(2) 生活垃圾处置环境效益的提升不仅依靠分类效果的改善,也依靠末端处置能力的匹配. 末端处置能力现状情景下,厨余垃圾分出量为 $150 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,直接总环境影响潜值随厨余垃圾纯度提高逐渐降低,较垃圾未分类时(3.41×10^{-10})减少约 10%;厨余垃圾分出量大于 $150 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,厨余垃圾分出量和纯度不断提高,分流厨余垃圾的填埋处置将导致污染排放增加,直接总环境影响潜值逐渐增加. 末端处置能力规划情景下,分类后直接总环境影响潜值($1.73 \times 10^{-10} \sim 2.40 \times 10^{-10}$)均低于末端处置能力现状情景. 厨余垃圾处置能力充足,相同厨余垃圾纯度下,直接总环境影响潜值随厨余垃圾分出量增加而减少. 末端处置能力按规划扩建后,垃圾分类效果持续提升利于提高全过程管理的环境效益.

(3) 末端处置能力现状情景下,电能回收量折

算后的总环境影响潜值为 $-0.89 \times 10^{-10} \sim -0.39 \times 10^{-10}$. 末端处置能力规划情景下,电能回收量折算后的总环境影响潜值为 $-2.13 \times 10^{-10} \sim -1.82 \times 10^{-10}$. 生活垃圾的资源化,有利于降低处理处置过程的污染,提高环境效益.

参考文献:

- [1] Meng X Y, Tan X C, Wang Y, *et al.* Investigation on decision-making mechanism of residents' household solid waste classification and recycling behaviors [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, **140**: 224-234.
- [2] Singh A. Managing the uncertainty problems of municipal solid waste disposal [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **240**: 259-265.
- [3] Xiao S J, Dong H J, Geng Y, *et al.* Policy impacts on municipal solid waste management in Shanghai: a system dynamics model analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121366.
- [4] Tai J, Zhang W Q, Che Y, *et al.* Municipal solid waste source-separated collection in China: a comparative analysis[J]. *Waste Management*, 2011, **31**(8): 1673-1682.
- [5] Ye Q, Anwar M A, Zhou R T, *et al.* China's green future and household solid waste: challenges and prospects [J]. *Waste Management*, 2020, **105**: 328-338.
- [6] Zhang B, Lai K H, Wang B, *et al.* From intention to action: how do personal attitudes, facilities accessibility, and government stimulus matter for household waste sorting? [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **233**: 447-458.
- [7] Fan B, Yang W T, Shen X C. A comparison study of 'motivation-intention-behavior' model on household solid waste sorting in China and Singapore [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **211**: 442-454.
- [8] Wei Q Y, Zhang W Q, Guo J B, *et al.* Performance and kinetic evaluation of a semi-continuously fed anaerobic digester treating food waste; effect of trace elements on the digester recovery and stability[J]. *Chemosphere*, 2014, **117**: 477-485.
- [9] Zhou M H, Shen S L, Xu Y S, *et al.* New policy and implementation of municipal solid waste classification in Shanghai, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(17), doi: 10.3390/ijerph16173099.
- [10] Chen S S, Huang J L, Xiao T T, *et al.* Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: case study in pilot communities in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137193.
- [11] 詹咏, 黄嘉良, 罗伟, 等. 上海市试点小区湿垃圾源头减量前后垃圾处理处置全链条碳足迹分析[J]. *环境工程学报*, 2020, **14**(4): 1075-1083.
Zhan Y, Huang J L, Luo W, *et al.* Full chain carbon footprint analysis of garbage disposal process before and after food waste in-situ reduction treatment in Shanghai pilot communities [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(4): 1075-1083.
- [12] Chen Y G, Luo J Y, Yan Y Y, *et al.* Enhanced production of short-chain fatty acid by co-fermentation of waste activated sludge and kitchen waste under alkaline conditions and its application to microbial fuel cells[J]. *Applied Energy*, 2013, **102**: 1197-1204.
- [13] 闫秋鹤, 王洪涛, 刘彦廷. 应用含水率评价厨余垃圾和其他

- 垃圾的分类效果以及垃圾的能源利用效率: 以张家港市为例[J]. 环境工程, 2021, **39**(2): 105-109, 159.
- Yan Q H, Wang H T, Liu Y T. Evaluation of classification effect of kitchen waste and other waste and energy utilization efficiency using moisture content: a case study of Zhangjiagang [J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(2): 105-109, 159.
- [14] Li X D, Ma Y F, Zhang M M, *et al.* Study on the relationship between waste classification, combustion condition and dioxin emission from waste incineration [J]. Waste Disposal & Sustainable Energy, 2019, **1**(2): 91-98.
- [15] 任中山, 陈瑛, 王永明, 等. 生活垃圾分类对垃圾焚烧发电产业发展影响的分析[J]. 环境工程, 2021, **39**(6): 150-153, 206.
- Ren Z S, Chen Y, Wang Y M, *et al.* Analysis of influence of domestic waste classification on development of waste incineration power generation industry in China [J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(6): 150-153, 206.
- [16] Nabavi-Pelesaraei A, Bayat R, Hosseinzadeh-Bandbafha H, *et al.* Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - a case study in Tehran Metropolis of Iran [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **148**: 427-440.
- [17] Li Z L, Wang Q W, Zhang T, *et al.* A novel bulk density-based recognition method for kitchen and dry waste: a case study in Beijing, China[J]. Waste Management, 2020, **114**: 89-95.
- [18] Chi Y, Dong J, Tang Y J, *et al.* Life cycle assessment of municipal solid waste source-separated collection and integrated waste management systems in Hangzhou, China[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2015, **17**(4): 695-706.
- [19] 郭宇杰, 龚亚萍, 邹玉飞, 等. 天津市生活垃圾处理碳排放时间变化特征及影响因素[J]. 环境工程技术学报, 2022, **12**(3): 834-842.
- Guo Y J, Gong Y P, Zou Y F, *et al.* Temporal variation characteristics and influencing factors of carbon emissions from municipal solid waste treatment in Tianjin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, **12**(3): 834-842.
- [20] Wang Z H, Geng L W. Carbon emissions calculation from municipal solid waste and the influencing factors analysis in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, **104**: 177-184.
- [21] Wang Y, Shi Y, Zhou J Z, *et al.* Implementation effect of municipal solid waste mandatory sorting policy in Shanghai[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **298**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113512.
- [22] Nie Y Y, Wu Y J, Zhao J B, *et al.* Is the finer the better for municipal solid waste (MSW) classification in view of recyclable constituents? a comprehensive social, economic and environmental analysis[J]. Waste Management, 2018, **79**: 472-480.
- [23] 奚慧. 上海市生活垃圾全程分类体系建设现状分析及对策建议[J]. 环境卫生工程, 2020, **28**(3): 80-85.
- Xi H. Analysis on the construction status and countermeasures and suggestion of whole-process classification system of MSW in Shanghai[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, **28**(3): 80-85.
- [24] 张家港市人民政府. 2020 年张家港市国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2021.
- [25] 刘意立, 刘建国, 蔡博峰. 生命周期评价方法在生活垃圾填埋中的应用与问题分析[J]. 环境工程, 2016, **34**(2): 19-22.
- Liu Y L, Liu J G, Cai B F. Application and discussion of life cycle assessment method in municipal solid waste landfill [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(2): 19-22.
- [26] 董晓丹, 夏苏湘, 李晓勇. 上海市松江区生活垃圾物理组分特征调查分析[J]. 环境卫生工程, 2015, **23**(5): 26-28.
- Dong X D, Xia S X, Li X Y. Physical component characteristics of domestic waste in Songjiang district, Shanghai [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2015, **23**(5): 26-28.
- [27] 李海丹, 郑丽萍, 周涵, 等. 我国生活垃圾组分的时空分布特征回顾[J]. 环境工程, 2022, **40**(9): 126-134.
- Li H D, Zheng L P, Zhou H, *et al.* Review on spatial-temporal distribution characteristics of municipal solid waste components in China[J]. Environmental Engineering, 2022, **40**(9): 126-134.
- [28] Zhou Z Z, Tang Y J, Dong J, *et al.* Environmental performance evolution of municipal solid waste management by life cycle assessment in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2018, **227**: 23-33.
- [29] ICPP. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories>. 2019-05-12.
- [30] Istrate I R, Galvez-Martos J L, Dufour J. The impact of incineration phase-out on municipal solid waste landfilling and life cycle environmental performance: case study of Madrid, Spain[J]. Science of the Total Environment, 2021, **755**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142537.
- [31] 梁镇江, 袁剑刚, 张伟, 等. 2 种生活垃圾资源化处理技术的环境影响分析——基于生命周期评价法[J]. 环境卫生工程, 2019, **27**(2): 8-14.
- Liang Z J, Yuan J G, Zhang W, *et al.* Environmental impact analysis of two kinds of municipal solid waste disposal technologies: based on life cycle assessment method [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019, **27**(2): 8-14.
- [32] 王希超, 丁世刚, 吕艳菲. 基于全生命周期对垃圾焚烧技术的评价[J]. 能源与环境, 2016, (1): 76-78.
- [33] Kulczycka J, Lelek E, Lewandowska A, *et al.* Life cycle assessment of municipal solid waste management-comparison of results using different lca models [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2015, **24**(1): 125-140.
- [34] 张涛, 白冬锐, 孙煜臻, 等. 全过程管理视角的上海市垃圾分类回顾与展望[J]. 环境工程, 2022, **40**(3): 173-180, 146.
- Zhang T, Bai D R, Sun Y C, *et al.* Review and prospect of municipal solid waste classification in Shanghai from the perspective of integrated management [J]. Environmental Engineering, 2022, **40**(3): 173-180, 146.
- [35] Wang J M, Wang R G, Zhu Y C, *et al.* Life cycle assessment and environmental cost accounting of coal-fired power generation in China[J]. Energy Policy, 2018, **115**: 374-384.
- [36] CML-IE, Leiden University. CML-IA characterisation factors [EB/OL]. <http://cml.leiden.edu/software/date-cmlia.html>, 2018-08-07.
- [37] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(2): 234-237.
- Yang J X, Wang R S, Liu J R. Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, **21**(2): 234-237.
- [38] Gu B X, Jiang S Q, Wang H K, *et al.* Characterization, quantification and management of China's municipal solid waste in spatiotemporal distributions: a review [J]. Waste

- Management, 2017, **61**: 67-77.
- [39] Ding Y, Zhao J, Liu J W, *et al.* A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: management and technologies in treatment and resource utilization [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **293**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126144.
- [40] 马仕君, 周传斌, 杨光, 等. 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5593-5603.
- Ma S J, Zhou C B, Yang G, *et al.* Characteristics and environmental impacts of materials stored in municipal solid waste landfills: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5593-5603.
- [41] Wang H, Wang C M. Municipal solid waste management in Beijing: characteristics and challenges[J]. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 2013, **31**(1): 67-72.
- [42] 董晓丹, 张玉林. 上海市生活垃圾理化特性调查分析[J]. 环境卫生工程, 2016, **24**(6): 18-21.
- Dong X D, Zhang Y L. Investigation and analysis of physicochemical characteristics of municipal solid waste in Shanghai[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2016, **24**(6): 18-21.
- [43] Zhuang Y, Wu S W, Wang Y L, *et al.* Source separation of household waste: A case study in China [J]. Waste Management, 2008, **28**(10): 2022-2030.
- [44] 黄明星, 刘丹. 四川省城市生活垃圾的组成及特性[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(5): 121-123.
- Huang M X, Liu D. Characteristic and composition of municipal solid waste in Sichuan province[J]. Environmental Monitoring in China, 2012, **28**(5): 121-123.
- [45] Wu C D, Liu J M, Liu S H, *et al.* Assessment of the health risks and odor concentration of volatile compounds from a municipal solid waste landfill in China[J]. Chemosphere, 2018, **202**: 1-8.
- [46] 苗鑫梅. 垃圾填埋气中典型组分的吸附特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- Miao X M. Study on adsorption properties of typical components in landfill gas[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [47] Yang N, Zhang H, Shao L M, *et al.* Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: influence of waste characteristics and LFG treatment measures [J]. Journal of Environmental Management, 2013, **129**: 510-521.
- [48] Yao X L, Guo Z, Liu Y, *et al.* Reduction potential of GHG emissions from municipal solid waste incineration for power generation in Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **241**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118283.
- [49] Bogner J, Pipatti R, Hashimoto S, *et al.* Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the intergovernmental panel on climate change (IPCC) fourth assessment report. working group III (mitigation) [J]. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 2008, **26**(1): 11-32.
- [50] 张涛, 王凯楠, 白冬锐, 等. 填埋场好氧稳定化非甲烷有机物排放特征及臭氧生成潜势[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(11): 2740-2747.
- Zhang T, Wang K N, Bai D R, *et al.* Emission characteristics and ozone formation potential of non-methane organic compounds (NMOCs) during enhanced aerobic stabilization in landfill[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(11): 2740-2747.
- [51] 齐丽, 任玥, 刘爱民, 等. 北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1317-1326.
- Qi L, Ren Y, Liu A M, *et al.* Pollution characteristics of PCDD/Fs in ambient air and exposure risk assessment around a municipal solid waste incinerator in Beijing[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1317-1326.
- [52] 马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 等. 生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1333-1342.
- Ma Z Y, Jiang Y C, Ren J X, *et al.* Emission inventory of air pollutants for the harmless treatment of municipal solid waste[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1333-1342.
- [53] Zhou C B, Huang H P, Cao A X, *et al.* Modeling the carbon cycle of the municipal solid waste management system for urban metabolism[J]. Ecological Modelling, 2015, **318**: 150-156.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)