

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响 付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)

不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响 龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)

冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估 侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)

中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力 梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)

济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析 吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)

南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析 阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)

我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜力分析 张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)

中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征 涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)

中国 PM₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年) 袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)

长株潭城市群 PM_{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制 马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)

周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析 马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)

兰州市 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析 马可婧, 孙丽娟 (5997)

北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构 王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)

典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析 韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)

珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素 陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)

淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素 刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)

巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)

滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别 陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)

典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析 潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)

铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价 廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)

开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价 丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)

霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)

基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析 陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)

基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)

南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子 韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)

广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价 罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)

紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制 王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)

共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险 张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)

铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制 韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)

基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例 李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)

农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征 任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)

气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响 单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)

氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响 曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)

稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应 毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)

保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响 刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)

土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展 刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)

南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估 王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)

北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险 安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)

锌冶炼废渣重金属在土壤中的垂向迁移特征及归趋 杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)

典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)

不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征 寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)

开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征 王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)

黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态 王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)

典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响 郑丹凤, 刘娟, 苏超, 张红 (6354)

增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)

紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)

连作对党参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)

粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响 罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)

基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系 陈四瑜, 刘晶晶, 孙光明 (6412)

近 5 年我国部分城市群生活垃圾特性 王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)

《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)

我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析

张听雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星*, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266520)

摘要: 生活垃圾处置单元是重要的温室气体(GHG)排放源,明确其排放变化趋势及特征,是制定生活垃圾单元 GHG 减排的前提. 采用 IPCC 清单模型,对中国 2010~2020 年城市生活垃圾(MSW)处置单元的 GHG 排放进行了估算. 结果表明, GHG 排放量(以 CO₂-eq 计,下同)从 2010 年的 42.5 Mt 增长至 2019 年的 75.3 Mt, 2020 年降低到 72.1 Mt; 生活垃圾填埋场是 GHG 排放的主要来源,随着生活垃圾焚烧比例的增加,焚烧 GHG 排放占比从 2010 年的 16.5% 快速增加到 2020 年的 60.1%; 在区域分布上,华东和华南地区是排放量最高的区域,广东、山东、江苏和浙江是最主要的排放省. 实行垃圾分类,转变生活垃圾处置方式(垃圾填埋向焚烧的转变),提高填埋场填埋气体(LFG)收集效率,利用生物覆盖功能材料强化覆盖层甲烷(CH₄)氧化效率,是实现固废处置单元 GHG 减排的主要措施.

关键词: 温室气体(GHG); 排放; 城市生活垃圾(MSW); 焚烧; 填埋; 减排潜能

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-5946-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202211184

Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation

ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, JIANG Xu-tong, CHEN Ji-hong, GAO Chen-qi, BIAN Rong-xing*, SUN Ying-jie, LI Wei-hua, WANG Ya-nan, WANG Hua-wei

(College of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: The waste sector is a significant source of greenhouse gas(GHG) emissions and clarifying its emission trends and characteristics is the premise for formulating GHG emission reduction strategies. Using the IPCC inventory model, the GHG emissions from the municipal solid waste(MSW) sector in China during 2010 to 2020 were estimated. The results showed that GHG emissions increased from 42.5 Mt in 2010 to 75.3 Mt in 2019, then decreased to 72.1 Mt in 2020. MSW landfills were the main source of GHG emissions. Further, with the increase in the proportion of waste incineration, the proportion of GHG incineration increased rapidly from 16.5% in 2010 to 60.1% in 2020. In terms of regional distribution, East and South China were the regions with the highest emissions, and Guangdong, Shandong, Jiangsu, and Zhejiang were the provinces with the largest GHG emissions. Implementing MSW classification, changing the MSW disposal modes from landfilling to incineration, improving the LFG collection efficiency of landfills, and using biological functional materials as the cover soil to strengthen the methane oxidation efficiency are the main measures to achieve GHG emission reduction in waste sectors.

Key words: greenhouse gas(GHG); emissions; municipal solid waste(MSW); incineration; landfill; emission reduction potential

控制全球变暖已成为世界各国共识,IPCC 第六次评估报告^[1]显示 2010~2019 年全球温室气体(greenhouse gas, GHG)的年均排放量处于人类历史的最高水平, GHG 净排放量(以 CO₂-eq 计,下同)于 2019 年达到 59Gt, 较 2010 年跃升了 12%, 年均增长 1.3%. 同时, 报告明确指出应对气候变化的紧迫性和对于全球 1.5℃ 和 2℃ 温升控制前景的严峻性.

中国作为最大的发展中国家及最大的温室气体排放国,面临着非常严峻的温室气体减排压力^[1]. 国家“十四五”和 2035 年远景目标纲要提出“加快推动绿色低碳发展,降低碳排放强度,支持有条件的地方率先达到碳排放峰值”;《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》明确提出“加强甲烷等非二氧化碳温室气体排放管控”;生态环境部《黄河流域生态环境保护规划》明确提出“加强污

水处理厂和垃圾填埋场 CH₄ 排放控制和回收利用”. 这些政策的推出表明了我国温室气体减排的决心. 废物处理处置单元是重要的 GHG 排放源,如填埋场作为仅次于湿地和稻田的第三大人为 CH₄ 释放源,全球填埋场 CH₄ 年排放量达 6.1 × 10⁷ t^[2], 约占全球 CH₄ 总排放量的 13%^[3]. 我国 2013 年垃圾处置单元温室气体排放量高达 72.4 Mt^[4]. 因此,垃圾处理处置单元成为我国 GHG 减排不容忽视的一个方面.

准确评估我国垃圾处置过程 GHG 排放特征是

收稿日期: 2022-11-16; 修订日期: 2023-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52000112)

作者简介: 张听雪(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为固体废物处理处置过程温室气体产生及控制, E-mail: ZhangTX09@126.com

* 通信作者, E-mail: bianrongxing@126.com

(2) 焚烧 N_2O 排放量 根据 IPCC^[8] 的建议,生活垃圾焚烧 N_2O 排放量(以 N_2O/MSW 计)设定为 $50 g \cdot t^{-1}$.

1.2.3 堆肥处理 CH_4 与 N_2O 排放量

堆肥过程产生的温室气体主要是 CH_4 和 N_2O , 根据 IPCC 推荐值,生活垃圾堆肥处理 CH_4 和 N_2O 释放因子分别为 $4 g \cdot kg^{-1}$ (以 CH_4/MSW 计) 和 $0.3 g \cdot kg^{-1}$ (以 N_2O/MSW 计)^[8].

1.3 城市固体废物处理单元的 GHG 总排放量

废物处理单元的 GHG 总排放量是生活垃圾填埋、焚烧和生化处理的 GHG 排放总和(标准化为 CO_2 当量). CH_4 和 N_2O 的全球增温潜能(global warming potential, GWP)分别是 CO_2 的 27 倍和 273 倍^[1].

2 结果与讨论

2.1 我国生活垃圾产生及处置变化趋势

2020 年中国城市生活垃圾无害化处理厂共计 1 287 座,其中运行垃圾填埋厂 644 座,焚烧厂 463

座,生化及其他处理厂 180 座. 近 10 年,生活垃圾处置方式产生了显著性变化. 如图 1(a) 所示,我国生活垃圾清运量和无害化处理量自 2010 ~ 2019 年一直保持上升的趋势,但于 2020 年有所下降,清运量从 2010 年的 158 Mt 上升到 2019 年 242 Mt,年均增长 4.4%,这与日益增长的人口数量和城镇化有关. 同时垃圾无害化率也在不断提升,从 2010 年的 77.9% 上升到 2020 年的 99.7%.

填埋、焚烧和生化处理处置是我国生活垃圾无害化处理的主要方式,其中填埋由于占地面积大,产生渗滤液和恶臭污染等原因,所占比例逐年降低[图 1(b)],占无害化处置的比例已从 2010 年的 77.9% 降低到 2020 年的 33.1%. 相反焚烧占比逐渐提升,已从 2010 年的 18.8% 上升到 2020 年的 62.3%. 生化处置所占比例较低,不足 5%. 随着我国无废城市的建设和“双碳”规划的实施,可以预见我国垃圾填埋的比例将会进一步降低,而生活垃圾焚烧和生化处置所占的比例将会进一步提升.

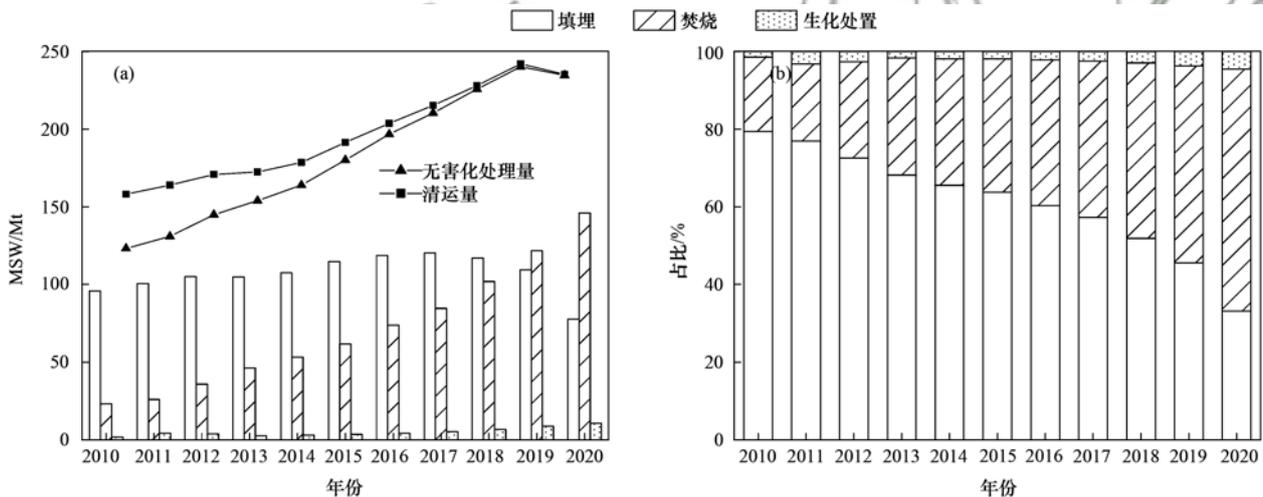


图 1 2010 ~ 2020 我国城市生活垃圾填埋、焚烧、生化无害化处理量和占比变化

Fig. 1 Changes in the quantity and ratio of MSW landfill, incineration and biochemical disposal from 2010 to 2020 in China

2.2 全国生活垃圾处理 GHG 排放趋势

2010 ~ 2020 年中国城市生活垃圾单元的温室气体排放量如图 2(a) 所示. 全国生活垃圾处置单元 GHG 排放量从 2010 年的 42.5 Mt 增长到 2019 年的 76.3 Mt, 年均增长率约为 6.7%, 随后在 2020 年下降到 72.1 Mt. 生活垃圾处置单元 GHG 排放已在 2019 年达到峰值, 2020 年 GHG 排放量下降, 这是由于随着垃圾分类的实施, 生活垃圾清运量有了明显下降. 有研究表明, 单位垃圾焚烧 CO_2 排放量要显著低于生活垃圾填埋^[12], 因此近些年生活垃圾处置方式从填埋为主向焚烧为主转变, 也降低了生活垃圾处置过程中 GHG 的排放.

CH_4 、 CO_2 和 N_2O 是生活垃圾处置单元排放的主要温室气体, 其中由于 CH_4 的强增温潜能和低吸

集效率, 其在 2019 年以前一直是我国生活垃圾处置单元排放量(当量)最多的温室气体, 但由于垃圾焚烧所占比例逐年增加(图 1), 垃圾焚烧过程产生的 CO_2 量逐年增加[图 2(b)], 且在 2020 年首次超过填埋场 CH_4 的排放量, 占比 57.3%, 成为我国垃圾处置单元排放的主要温室气体. 焚烧和生化处置产生的 N_2O 对生活垃圾处置单元总 GHG 排放贡献率较小, 低于 5%.

2.3 我国生活垃圾处置单元 GHG 排放时空变化趋势

对比分析了我国七大区域 2010、2015 和 2020 年垃圾处置单元温室气体的排放情况. 如图 3 和图 4(a) 所示, 2010 年 GHG 排放量大小依次为: 华东 > 华南 > 华北 > 华中 > 西南 > 东北 > 西北, 而 2020 年排放量大小顺序则依次为: 华东 > 华南 > 西南 > 华

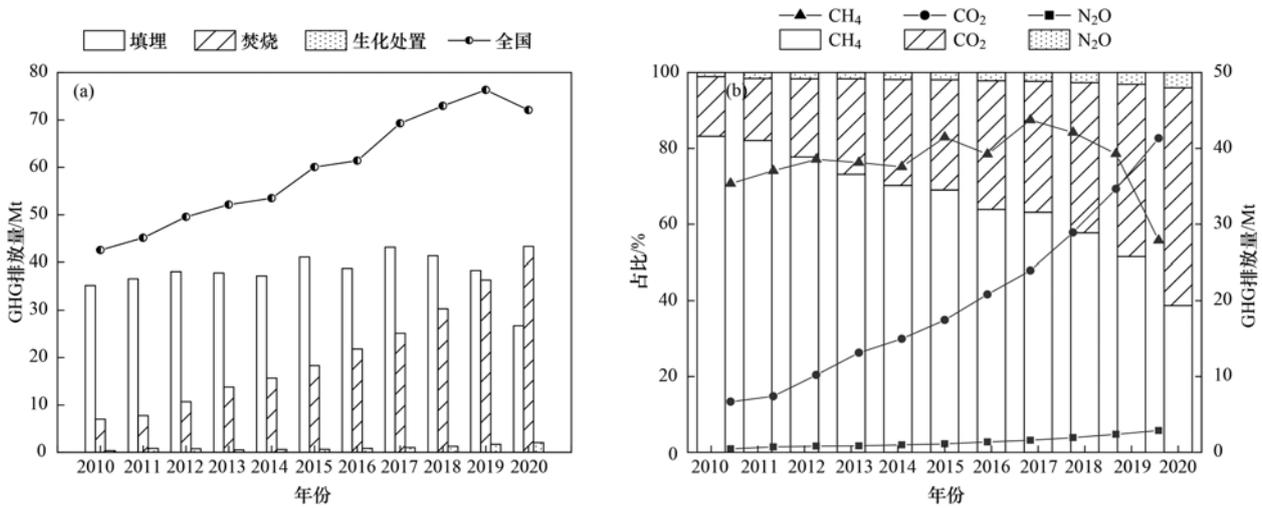


图 2 2010 ~ 2020 我国城市生活垃圾处置单元 GHG 排放趋势和 3 种 GHG 排放变化趋势

Fig. 2 Changes in GHG emissions from MSW landfiling, incineration and compost, and proportions of different GHG emissions from MSW disposal units in China from 2010 to 2020

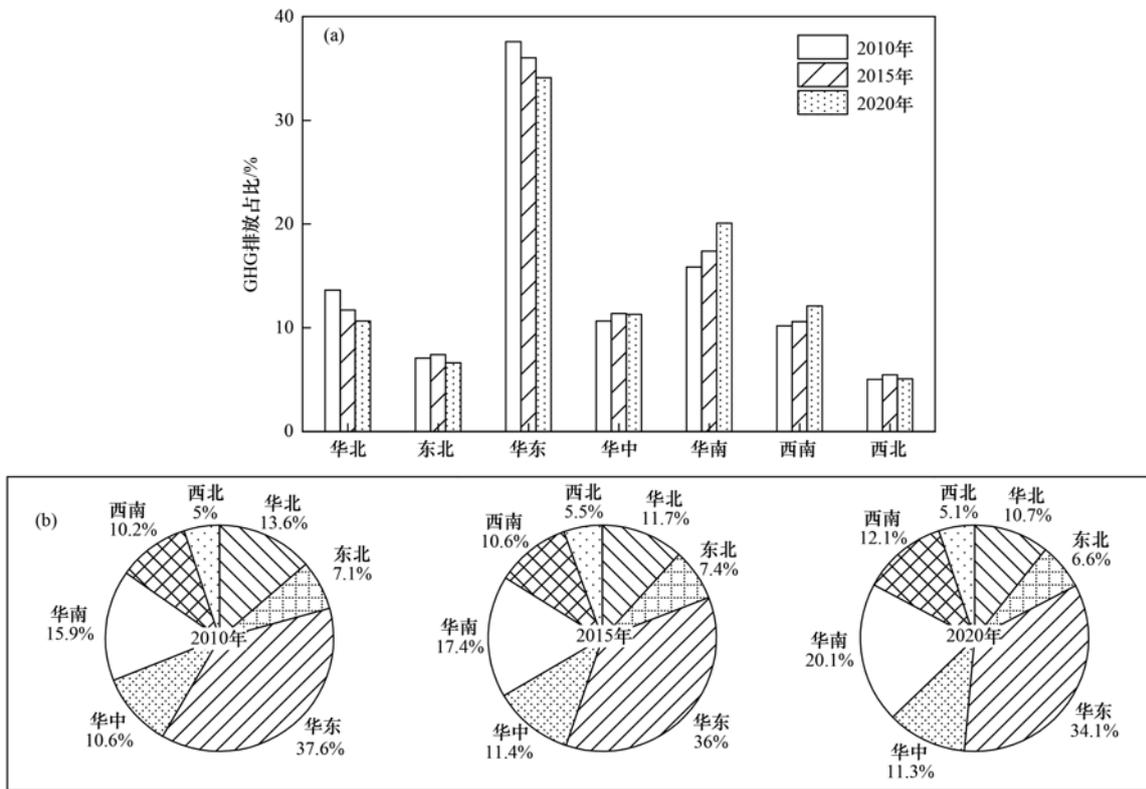


图 3 2010、2015 和 2020 年中国不同区域垃圾处置单元 GHG 排放量占比

Fig. 3 Proportion of GHG emissions in seven regions of China's waste sectors in 2010, 2015, and 2020

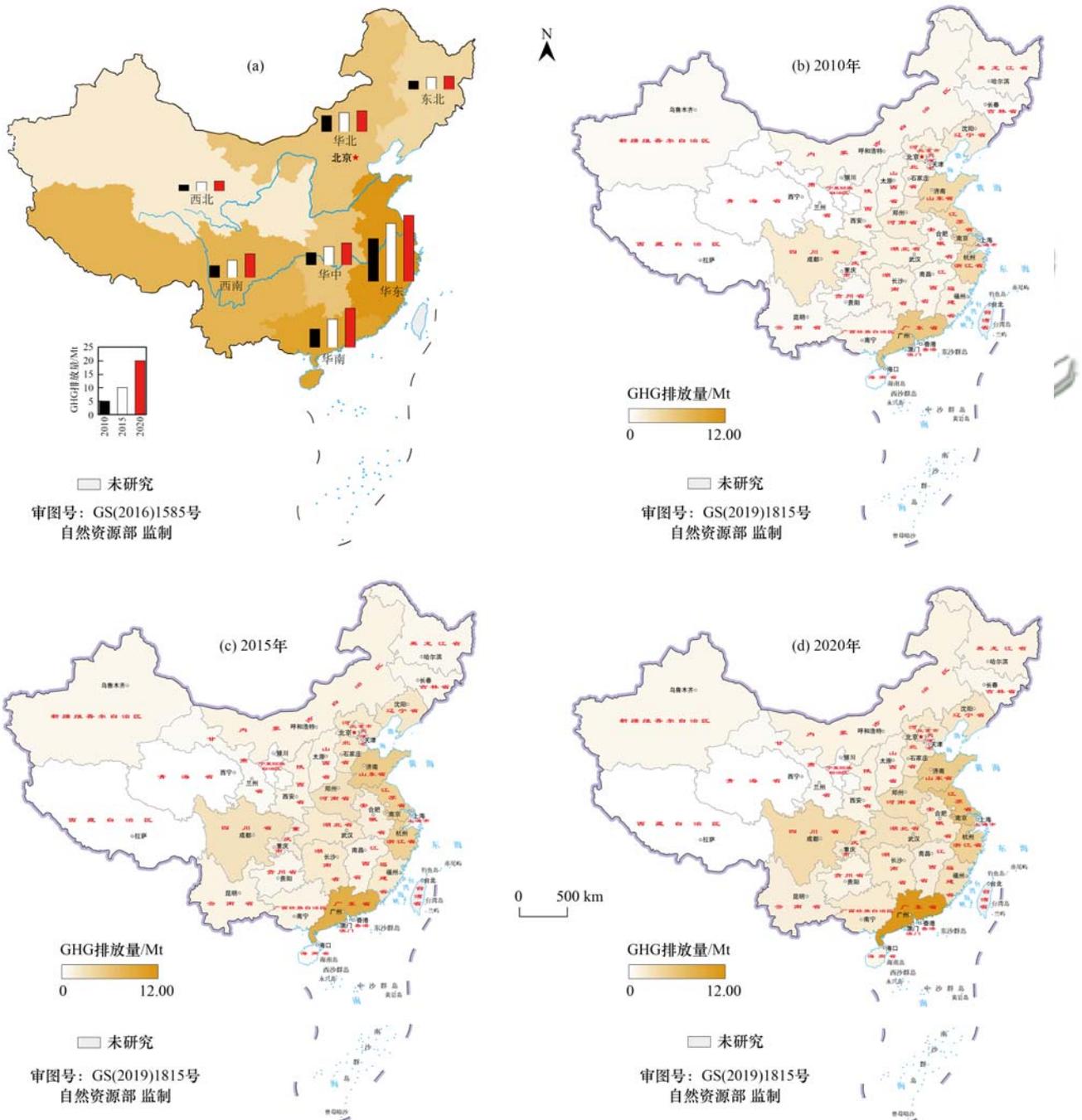
中 > 华北 > 东北 > 西北. 经济发达, 城镇化率高的华东、华南地区是我国生活垃圾处置单元 GHG 排放量最多的地区, 而城镇化率低, 人口较少的东北、西北地区 GHG 排放量较低. 10a 内, 西南地区垃圾处置单元 GHG 排放量显著增加, 这与该地区不断增加的城镇人口数量、垃圾产生量和垃圾处置方式密切相关. 七大区域垃圾处置单元 GHG 排放量总体呈增加趋势(2020 年小幅下降), 相较于 2010 年, 2020 年华南、西南地区 GHG 增长超过 100%, 华南地区

增长最快, 为 114.7%; 华北地区增长率最低, 为 32.4%, 其余地区增长在 50% ~ 80% 之间. 华东地区排放量稳居第一, 这与沿海地区城市发展水平和庞大的人口数量相关, 但其增长率低于华南、西南地区. 这主要是由于生活垃圾处置方式的差异导致的, 华东地区 2020 年生活垃圾处置主要以焚烧为主(达到 80.8%, 占全国焚烧量 43.8%), 华南、西南地区焚烧占比仅为 65.3% 和 62.1%, 而单位垃圾焚烧产生的 GHG 要显著低于垃圾填埋^[12].

另外,如图 3(b)所示,各区域在这 10a 的 GHG 排放占比(占总排放量的比例)发生了变化,华北和华东地区占比逐年下降,东北、西北和华中地区先增大后减少,其中华东地区占比从 2010 年的 37.6% 下降到 2020 年的 34.1%,这与沿海地区垃圾处置方式变化有关;华南和西南地区占比逐年上升,其中华南地区占比上升最大,从 2010 年的 15.9% 上升到 2020 年的 20.1%.

从省级规模上看,人口数量多,城市化水平高、

经济发达的山东、浙江、江苏和广东等东部沿海省份垃圾处置过程 GHG 排放量大,而城镇化水平低、经济欠发达的新疆、西藏、青海和甘肃等地区 GHG 排放量小(图 4). 广东是生活垃圾处置单元 GHG 排放量最多的省份,其占比从 2010 年的 13.2% 上升到 2020 年的 16.0%,这与城镇化人口的快速增加密切相关,相关性分析也表明各省 GHG 排放量与各省人口和 GDP 呈现显著正相关性(图 5). 生活垃圾处置单元 GHG 排放与生活垃圾处置方式密切相关,以焚



中国香港、澳门和台湾数据暂缺

图 4 中国不同区域和各省(市、自治区)在 2010、2015 和 2020 年垃圾处置单元的 GHG 排放空间分布

Fig. 4 GHG emissions of seven regions and provinces of China's waste sectors in 2010, 2015, and 2020

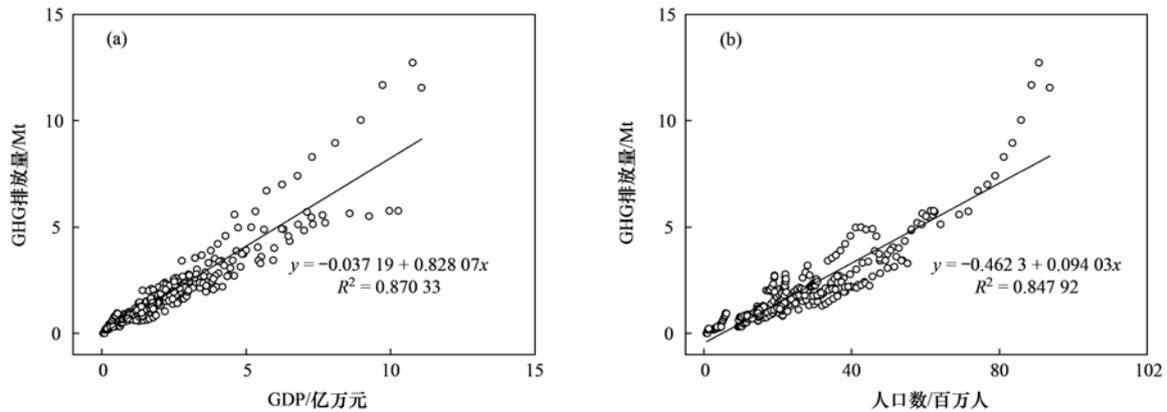


图 5 2010 ~ 2020 年中国固废处置单元 GHG 排放量与各省(市、自治区)GDP 和城镇人口的回归曲线

Fig. 5 Regression curves for GHGs emissions by waste sector, population, and GDP in China from 2010 to 2020

烧为主的东部沿海省份如上海、江苏、浙江和山东所占比例降低,而填埋占比较高的广西、海南、重庆、云南和四川等的 GHG 排放则呈增加趋势。

2.4 GHG 排放空间峰值变化

不同地区生活垃圾处置单元排放峰值所属年是

制定地区碳减排的重要参考,各地区和省(市、自治区)的生活垃圾处置单元碳排放峰值年如表 4 所示。东北、华东、华北和华南地区碳达峰年份与国家垃圾处置单元碳达峰一致,均在 2019 年,而西北地区则在 2018 年实现了垃圾处置单元碳达峰。

表 4 各区域/省(市、自治区)GHG 排放达峰年份

Table 4 Peak years of GHG emissions in different regions/provinces

达峰年份	区域	省(市、自治区)
2016	— ¹⁾	吉林
2017	—	天津、浙江和安徽
2018	西北	北京、上海、湖南、陕西、甘肃和新疆
2019	华北、东北、华东、华中和华南	河北、山西、内蒙古、辽宁、黑龙江、福建、江西、山东、河南、湖北、广东、广西、海南、四川、贵州、西藏和宁夏
2020 年及以后	西南	江苏 ²⁾ 、重庆、云南和青海

1) “—”表示没有区域在该年份 GHG 排放量达峰; 2) 江苏在 2019 年和 2020 年 GHG 排放量相近

地区人口增长率和垃圾处置方式是影响地区生活垃圾处置单元碳达峰的关键因素。在省级水平上,吉林 2016 年生活垃圾处置单元碳达峰,是最先实现垃圾处置单元碳达峰的省份,这是与该地区人口外流,垃圾焚烧处置为主密不可分。2017 年天津、浙江和安徽等也在该领域实现了碳达峰。而地广人稀相对欠发达的云南和青海等地区在 2020 年尚未实现碳达峰。

2.5 不确定性分析

如图 6 所示,本研究所估算的我国生活垃圾处理单元温室气体排放值低于已发表研究^[4,9,13,14],经对比发现,差距主要发生在填埋 CH₄ 排放的估算上。尽管多数研究都使用 IPCC 推荐的 FOD 模型,CH₄ 排放量的差异主要有以下 3 种原因:①固体废物成分存在差异,尤其是厨余垃圾的成分含量,本研究所采用的七大区域的厨余垃圾占比(2010 ~ 2017 年)^[6]普遍低于其他研究^[6,15];②参数选择的不一致导致 CH₄ 排放量的不同(表 5),尤其是在收集效率 R 的选择上,一部分研究是根据填埋场类型来选

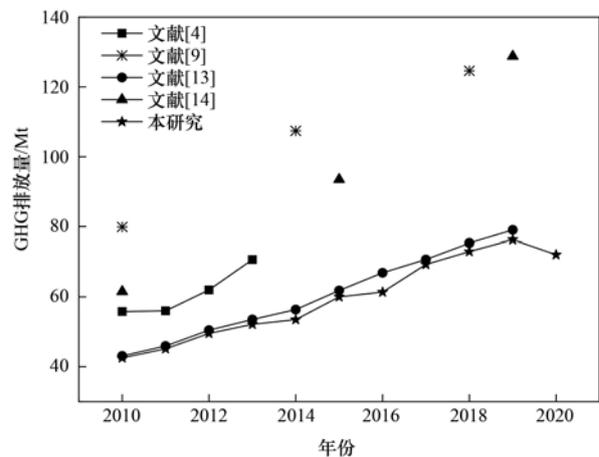


图 6 2010 ~ 2020 年全国城市固废处置单元 GHG 排放量的不同数据对比

Fig. 6 Comparison of different research data on GHG emissions from MSW disposal sectors in China from 2010 to 2020

择 MCF 与 R 值^[4,15-17],另一部分研究认为中国填埋场 CH₄ 收集缺失,取 R 值为 0 来计算^[16-18],而本研究所采用的 30%^[10,11]高于绝大多数研究;③本研究采用 CH₄ 的 GWP 是最新 IPCC^[11]提供的 27 倍,而

表 5 已有研究主要参数对比

Table 5 Comparison of main parameters from previous studies

参数 ¹⁾	文献[4]	文献[7,15]	文献[9]	文献[14]	文献[16]	文献[17]	文献[18]	本研究
MCF	— ²⁾	0.61~1.00	0.96	0.92	0.4~1.0	—	—	0.97
k	缺省值	缺省值	缺省值	缺省值	0.3	0.3	缺省值	缺省值
DOC _f	0.2	0.5	0	0.5	0.6	0.5	0	0.5
DOC _{厨余}	—	0.11	0.11	0.11	0.065	0.065	0.15	0.15
DOC _纸	—	0.24	0.24	0.24	0.065	0.065	0.4	0.4
DOC _{纺织品}	—	0.27	0.27	0.27	0.065	0.065	0.24	0.24
DOC _{木头}	—	0.33	0.33	0.33	0.065	0.065	0.43	0.43
F	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$R/\%$	5~20	5~40	24	5~40	0	0	0	30
OX	0~0.2	0~0.3	0.1	0~0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
GWP _{CO₂}	25	25	25	28	—	28	28	27

1) DOC_{厨余}、DOC_纸、DOC_{纺织品}和 DOC_{木头} 分别表示厨余垃圾、纸、纺织品和木头的可降解有机碳分数; 2) “—”表示文献中没有明确给出参数值

与本研究差距较大的数据结果采用的是 28 倍^[14,17,18].

2.6 我国垃圾处置单元温室气体减排策略

填埋气收集效率是影响填埋场 CH₄ 释放的重要因素,我国生活垃圾填埋场 CH₄ 收集效率普遍低于国外,如丹麦(50%)、瑞典(58%)、英国(64%)和美国(63%)等^[19~21],而报导的我国生活垃圾填埋场填埋气收集效率仅有 25%~40%^[10]. 因此,提高我国生活垃圾填埋场 CH₄ 收集效率是降低我国生活垃圾处置单元 GHG 排放的重要途径. 此外,在技术和经济可行的条件下,填埋气收集火炬燃烧和发电也是降低填埋场 CH₄ 排放的重要措施.

填埋场覆盖层 CH₄ 氧化是降低 CH₄ 无序释放的最后的屏障,传统的生活垃圾覆盖土 CH₄ 氧化效率低,近年来以矿化垃圾、堆肥、生物炭添加的新型生物强化功能覆盖材料其覆盖层 CH₄ 氧化效率显著提高^[22~25]. 因此,采用新型生物覆盖材料也是降低填埋场 CH₄ 排放的一个重要途径.

转变生活垃圾处置方式也是生活垃圾处置单元温室气体减排的重要措施. 在生活垃圾分类和无废城市建设大背景下,提高垃圾分类效率,提高可回收垃圾的资源化利用效率,实现原生垃圾零填埋等措施可有助于我国垃圾处置过程温室气体减排. 另外由于单位垃圾焚烧 GHG 排放量显著低于生活垃圾填埋^[12],提高垃圾焚烧比例也有助于温室气体减排.

当然不同的减排措施要和当地的经济、环境承受力相适应. 例如经济发展较为落后的西北和西南地区,比较可行的减排措施是采用生物功能覆盖材料强化覆盖层 CH₄ 氧化效率或者填埋气收集后火炬燃烧. 而对于东部较发达的省份,提高填埋气收集利用效率,加大垃圾焚烧处置比例是合理的温室气

体减排措施.

3 结论

(1) 中国城市生活垃圾 GHG 排放量从 2010 年的 42.5 Mt 增加到 2019 年的 75.3 Mt,而后于 2020 年减少到 72.1 Mt.

(2) 2019 年生活垃圾填埋场排放的 CH₄ 是生活垃圾处置单元排放当量最多的温室气体,焚烧排放的温室气体占比逐年增加,在 2020 年首次超过填埋,达 60.1%.

(3) 从空间分布上,固废处置单元 GHG 排放量在 2020 年依次为:华东 > 华南 > 西南 > 华中 > 华北 > 东北 > 西北; 华东地区是固废处置单元 GHG 排放量最高的区域,但其排放量占比在逐年下降,从 2010 年的 37.6% 下降到 2020 年的 34.1%; 华南和西南地区的排放占比逐年上升,其中华南地区排放比例从 2010 年的 15.9% 上升到 2020 年的 20.1%. 在省级水平上,东部沿海广东、江苏、山东和浙江等省份的城市生活垃圾处置 GHG 排放量最大,而重庆、天津、青海和西藏等地区排放量较低.

(4) 提高生活垃圾填埋场填埋气收集效率,采用生物功能覆盖材料提高覆盖层 CH₄ 氧化效率,实现垃圾分类,转变垃圾处置方式等是可行的生活垃圾处置单元温室气体减排措施.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition (UNEP). Global methane assessment: benefits and

- costs of mitigating methane emissions [M]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021.
- [4] Lou Z Y, Cai B F, Zhu N W, *et al.* Greenhouse gas emission inventories from waste sector in China during 1949-2013 and its mitigation potential [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **157**: 118-124.
- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [6] Zhu Y L, Zhang Y X, Luo D X, *et al.* A review of municipal solid waste in China: characteristics, compositions, influential factors and treatment technologies [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, **23** (5): 6603-6622.
- [7] Cai B F, Lou Z Y, Wang J N, *et al.* CH₄ mitigation potentials from China landfills and related environmental co-benefits [J]. *Science Advances*, 2018, **4** (7), doi: 10.1126/sciadv.aar8400.
- [8] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [9] Bian R X, Zhang T X, Zhao F B, *et al.* Greenhouse gas emissions from waste sectors in China during 2006- 2019: implications for carbon mitigation [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, **161**: 488-497.
- [10] Qiang X, Lei L. Study on optimization model of energy collection efficiency and its power generation benefit evaluation of landfill gas[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, **5** (5), doi: 10.1063/1.4826191.
- [11] 吕浩, 肖燕, 李军. 南通某垃圾填埋场产气量及发电效益估算[J]. *可再生能源*, 2015, **33**(12): 1892-1898.
Lv H, Xiao Y, Li J. Estimation of gas production and power generation benefit of landfill gasin Nantong landfill sites [J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, **33**(12): 1892-1898.
- [12] 陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 等. 垃圾分类对碳减排的影响分析: 以青岛市为例[J]. *环境科学*, 2023, **44** (5): 2995-3002.
Chen J H, Bian R X, Zhang T X, *et al.* Influence of the classification of municipal solid wastes on the reduction of greenhouse gas emissions: a case study of Qingdao City, China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2995-3002.
- [13] Zhang C Y, Dong H J, Geng Y, *et al.* Carbon neutrality prediction of municipal solid waste treatment sector under the shared socioeconomic pathways[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, **186**, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106528.
- [14] Kang Y T, Yang Q, Wang L, *et al.* China's changing city-level greenhouse gas emissions from municipal solid waste treatment and driving factors[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, **180**, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106168.
- [15] Cai B F, Liu J G, Gao Q X, *et al.* Estimation of methane emissions from municipal solid waste landfills in China based on point emission sources [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, **5**(2): 81-91.
- [16] Peng S S, Piao S L, Bousquet P, *et al.* Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(22): 14545-14562.
- [17] Du M X, Peng C H, Wang X G, *et al.* Quantification of methane emissions from municipal solid waste landfills in China during the past decade [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, **78**: 272-279.
- [18] Li Y, Zhang S M, Liu C. Research on greenhouse gas emission characteristics and emission mitigation potential of municipal solid waste treatment in Beijing[J]. *Sustainability*, 2022, **14**(14), doi: 10.3390/su14148398.
- [19] Duan Z H, Kjeldsen P, Scheutz C. Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations [J]. *Waste Management*, 2022, **139**: 269-278.
- [20] Gasbarra D, Toscano P, Famulari D, *et al.* Locating and quantifying multiple landfills methane emissions using aircraft data[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112987.
- [21] Barlaz M A, Chanton J P, Green R B. Controls on landfill gas collection efficiency: instantaneous and lifetime performance [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, **59** (12): 1399-1404.
- [22] 刘景龙, 张毅, 张后虎, 等. 矿化垃圾生物覆盖层减少垃圾填埋场 CH₄、N₂O 和 CO₂ 释放的效应研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2014, **30**(1): 15-20.
Liu J L, Zhang Y, Zhang H H, *et al.* Effect of aged refuse bio-cover mitigating emission of greenhouse gases (CH₄, N₂O and CO₂) from MSW landfills [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(1): 15-20.
- [23] 秦永丽, 孙晓杰, 王春莲, 等. 生物炭填埋场土壤覆盖层的甲烷减排性能和生物特征 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41** (1): 254-262.
Qin Y L, Sun X J, Wang C L, *et al.* Methane emission reduction and biological characteristics induced by the landfill cover soil amended with biochar [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 254-262.
- [24] 何若, 姜晨竞, 王静, 等. 甲烷胁迫下不同填埋场覆盖土的氧化活性及其菌群结构 [J]. *环境科学*, 2008, **29** (12): 3574-3579.
He R, Jiang C J, Wang J, *et al.* Effects of methane stress on oxidation rates and microbial community structures in different landfill cover soils [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3574-3579.
- [25] 杜梦菲. 畜禽粪便堆肥甲烷生成-氧化特征及其影响因素研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models: A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jun-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)