环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第11期
2023年11月15日

# 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 (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 $PM_1$ 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 …… 王志垚, 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, 王橦橦 (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, 武锟鹏, 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, 郭逍宇, 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, 王恩瑞, 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, 徐鏊雪, 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)
铁改进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接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地块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)
典型硫铁矿区农田土壤-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, 睢康鑫, 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, 刘娣, 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, 耿春女, 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, 刘晶茹, 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)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第44卷第11期 2023年11月
Vol.44, No.11 Nov., 2023

# 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
(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

**摘要**: 基于济南市 2020 年大气污染源排放清单,选取化工、工业涂装、印刷和家具制造作为 VOCs 排放典型行业,对 VOCs 排放现状及存在问题进行调查分析,并依据企业规模及末端治理技术现状,设计出 2 种减排情景,估算减排潜力. 结果表明,典型行业 VOCs 排放量从大到小依次为化工(7 947.92 t)、工业涂装(2 383.29 t)、印刷(792.87 t)和家具制造(143.79 t),其中,化工和工业涂装以大型企业为主,VOCs 排放量占比分别为 46.45% 和 50.89%,印刷和家具制造以中型企业为主,VOCs 排放量占比分别为 51.76% 和 42.37%; 末端治理以单一低效治理技术为主,燃烧技术和组合技术等高效治理技术的使用率仅为 7.46%; 企业现场调研发现部分企业存在未完成源头替代、无组织排放管理不到位和末端治理设施适配性差等问题,具有一定的减排潜力. 在设计的 2 种减排情景下,化工行业减排潜力最大,减排率为 69.58%~84.99%,工业涂装、印刷和家具制造行业的减排率分别为 26.98%~34.74%、36.96%~59.74% 和 8.55%~40.45%. 各行业的大、中型企业减排潜力较大,平均减排率分别为 70.00% 和 44.23%,在较高目标减排情景下,小、微型企业的平均减排率大幅提升,分别能达到 87.49% 和 79.65%. 研究结果可为行业和企业 VOCs 治理工作的开展提供科学依据.

**关键词**: VOCs 排放; 企业规模; 末端治理技术; 减排潜力; 减排对策
**中图分类号**: X511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)11-5924-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202212035

# Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China

WU Wen-lu, SHAN Chun-yan*, ZHAO Jing-lin, CUI Yu-nong
(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract**: Based on the air pollutant emission inventory of Jinan in 2020, the VOCs emission status and existing problems of typical industries including the chemical industry, industrial coating, printing, and furniture manufacturing were investigated and analyzed, and two emission reduction scenarios were designed to estimate the emission reduction potential according to the enterprise scales and the end-of-pipe treatment techniques. The results showed that the VOCs emissions of the typical industries from large to small were the chemical industry(7 947.92 t), industrial coating(2 383.29 t), printing(792.87 t), and furniture manufacturing(143.79 t). The chemical industry and industrial painting were dominated by large enterprises, accounting for 46.45% and 50.89% of VOCs emissions, whereas printing and furniture manufacturing were dominated by medium-sized enterprises, accounting for 51.76% and 42.37% of VOCs emissions, respectively. The end-of-pipe treatment was dominated by a single inefficient treatment technique, and the utilization rate of efficient treatment techniques such as combustion techniques and combination techniques was only 7.46%. The on-site investigation reported some problems in some enterprises, including incomplete source substitution, inadequate management of fugitive emissions, and unsuitable end-of-pipe treatment facilities. Therefore, VOCs emissions of typical industries had a certain reduction potential. Under the two designed emission reduction scenarios, the chemical industry had the greatest emission reduction potential, with emission reduction rates of 69.58%-84.99%, and the emission reduction rates of industrial coating, printing, and furniture manufacturing industries were 26.98%-34.74%, 36.96%-59.74%, and 8.55%-40.45%, respectively. Among the four industries, large and medium-sized enterprises had greater emission reduction potential, with average emission reduction rates of 70.00% and 44.23%, respectively. Under the scenario of a higher emission reduction target, the average emission reduction rates of small and micro enterprises were greatly increased, reaching 87.49% and 79.65%, respectively. The results of this study could provide scientific basis for developing VOCs governance in typical industries and enterprises.

**Key words**: VOCs emissions; enterprise size; end-of-pipe treatment techniques; emission reduction potential; emission reduction measures

$PM_{2.5}$和 $O_3$ 污染是我国面临的重要环境挑战之一,挥发性有机物(VOCs)作为形成 $PM_{2.5}$和 $O_3$ 的前体物之一[1],是影响污染物浓度的直接因素[2,3]. 由于 VOCs 种类繁多、来源广泛和成分复杂[4],导致治理难度大、管理基础薄弱,已成为大气环境管理短板. 有研究表明,我国 VOCs 人为源排放与自然源排放总量相当[5,6],但时空分布差异大,人为源排放主要集中在经济发达且工业化集中的区域,如山东省排放量约占全国总排放量的 10%[7,8]. 从行业层面来看,排放 VOCs 较多的行业有石油化工、有机化工、焦化、农药、医药、工业涂装和包装印刷等[9~13],典型工业来源的 VOCs 排放量约占中国总排放量的 50%[14]. 从产生环节来看,VOCs 主要来源于生产过程、含 VOCs 原辅材料的储存、转运等过程的散逸以及生产装置非正常生产工况的排放[15],不同行业 VOCs 的具体排放环节有显著差异. VOCs 的源头-过程-末端全过程管控依托于政策约束和技术升级[16],大部分研究从调整能源结构、

**收稿日期**: 2022-12-05; **修订日期**: 2023-01-06
**基金项目**: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG202118)
**作者简介**: 吴文璐(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染防治,E-mail: 2846856580@qq.com
* 通信作者,E-mail: shanchy@nankai.edu.cn

提升治理技术和评估成本效益的角度来设计减排情景[17,18]，但忽略了企业经济规模和治理能力等状况，缺少针对不同规模企业进行减排策略分析.

济南市作为山东省的省会城市，经济发展迅速，工业实力雄厚，同时作为京津冀及周边地区大气污染传输通道城市，$O_3$ 污染形势突出[19]. 有研究表明，济南市 $O_3$ 污染属于 VOCs 控制区域[20]，因此为有效降低 $O_3$ 浓度，近几年济南市 VOCs 治理工作积极开展. 本研究对济南市典型行业 VOCs 排放特征及存在问题进行调查分析，并以企业规模和末端治理技术现状为切入点，设计减排情景以估算 VOCs 的减排潜力，以期为典型行业和不同规模企业制定减排对策提供参考.

## 1　材料与方法

### 1.1　研究对象及数据来源

选取化工、工业涂装、印刷和家具制造行业作为济南市 VOCs 排放典型行业，进行排放特征和减排潜力研究. 企业工业总产值、末端治理技术和 VOCs 排放量等数据来源于北京工商大学和山东省济南生态环境监测中心编制的济南市 2020 年大气污染源排放清单，本研究依据《国民经济行业分类》(GB/T 4754-2017)[21]将企业进行行业分类(表 1)，并按照《统计上大中小微型企业划分办法(2017)》[22]依据工业总产值($Y$)将企业分为大型($Y \geqslant 40\,000$ 万元)、中型(2 000 万元 $\leqslant Y <$ 40 000 万元)、小型(300 万元 $\leqslant Y <$ 2 000 万元)和微型($Y <$ 300 万元)4 种规模. 在山东省环境保护科学研究设计院有限公司、中国环境科学研究院和南开大学 2021 年对 40 家企业现场调研的问题清单基础上，对各行业的问题进行梳理和分析，每个行业的 10 家代表性企业由当地环保局推荐选取.

### 1.2　减排情景设计

VOCs 治理的主要环节包括源头替代、过程控制和末端治理. 源头替代是指用无/低 VOCs 含量的原辅材料代替高 VOCs 含量的原辅材料或采用清洁生产工艺. 过程控制主要针对 VOCs 无组织排放，对 VOCs 产生环节采用设备废气排放口直连、车间或密闭间操作. 末端治理是指结合 VOCs 组分特征、生产工况、排放标准等合理选择治理技术，对现有的低效治理设施进行改进或替换.

表 1　济南市 VOCs 排放典型行业分类

Table 1　Classification of VOCs emissions of typical industries in Jinan

| 典型行业 | 第一类 | 第二类 |
|---|---|---|
| 化工行业 | 石油、煤炭及其他燃料加工业 | 精炼石油产品制造；煤炭加工；核燃料加工；生物质燃料加工 |
| | 化学原料和化学制品制造业 | 基础化学原料制造；肥料制造；农药制造；涂料、油墨、颜料及类似产品制造；合成材料制造；专用化学产品制造；炸药、火工及焰火产品制造；日用化学产品制造 |
| | 橡胶和塑料制品业 | 橡胶制品业；塑料制品业 |
| | 医药制造业 | 化学药品原料药制造；化学药品制剂制造；中药饮片加工；中成药生产；兽用药品制造；生物药品制品制造；卫生材料及医药用品制造；药用辅料及包装材料 |
| | 化学纤维制造业 | 纤维素纤维原料及纤维制造；合成纤维制造；生物基材料制造 |
| 工业涂装 | 工业涂装 | 金属制品表面涂装；塑料制品表面涂装 |
| 印刷行业 | 印刷 | 出版印刷；本册印刷；包装印刷；其他印刷 |
| 家具制造 | 家具制造 | 木质家具制造；竹、藤家具制造；金属家具制造；塑料家具制造；其他家具制造 |

VOCs 末端治理技术主要分为回收技术和销毁技术两大类[23]，其中回收技术包括冷凝、吸附、吸收和膜分离等，销毁技术包括燃烧、生物降解、等离子体和光催化等. 对治理难度大、单一治理技术难以达标的，可以将多种技术组合使用. 目前国内外常见的 VOCs 末端治理技术[24~29]如表 2 所示. 单一治理技术中的燃烧技术和吸附技术较为成熟且应用范围广泛，等离子体技术、光催化技术和生物技术适用于恶臭异味治理，对 VOCs 的去除效率在 50% 以上. 活性炭吸附技术投资成本较低，但去除效率不稳定，这是因为活性炭需要定期更换，如果更换不及时可能发生 VOCs 脱附，使去除效率为负[30]，相比而言，燃烧技术的平均去除效率在 90% 以上且去除效率稳定，多适用于难回收的高浓度 VOCs 废气. 组合技术具有成本低、安全性强、去除效率高和二次污染少等优势，去除效率能达到 90% 以上，其对单一治理技术的替代是发展趋势.

VOCs 的减排潜力取决于各个环节的减排措施，但由于目前缺乏各行业源头替代和无组织排放的具体数据，本研究只针对末端治理环节的减排潜力进行定量评估. 以济南市 2020 年大气污染源排放清单中各行业排放量为基准，根据企业不同规模采取不同的末端治理技术，来设计减排情景. 主要考虑以下两点因素：一是企业的生产能力和经济效益，大、中型企业采用去除效率高且成本较高的治理技术的可行性较高，小、微型企业更倾向于选择费用低且能满足排放要求的治理技术. 二是末端治理技

表 2 常见 VOCs 末端治理技术去除效率及成本分析[1)]

Table 2 Removal efficiency and cost of end-of-pipe treatment techniques for VOCs

| VOCs 末端治理技术 | 去除效率/% | 投资成本 | 运行费用 | 适用浓度/mg·m$^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|
| 吸收技术 | 60 ~ 70 | 低 | 高 | 500 ~ 10 000 |
| 吸附技术 | 50 ~ 80 | 中 | 高 | 3 000 ~ 10 000 |
| 冷凝技术 | 70 ~ 85 | 高 | 高 | > 10 000 |
| 直接燃烧技术 | 90 ~ 98 | 高 | 高 | 3 000 ~ 1/4LEL |
| 催化燃烧技术 | 95 ~ 99 | 高 | 高 | 1 000 ~ 1/4LEL |
| 等离子体技术 | 50 ~ 90 | 高 | 中 | < 500 |
| 生物技术 | 70 ~ 95 | 低 | 低 | 500 ~ 2 000 |
| 光催化技术 | 50 ~ 95 | 中 | 高 | < 1 000 |
| 吸附浓缩 + 催化燃烧 | ≥95 | 中 | 中 | 300 ~ 1 000 |
| 冷凝 + 催化燃烧 | ≥95 | 高 | 高 | 5 000 ~ 8 000 |
| 吸附 + 冷凝 | ≥97 | 高 | 高 | 500 ~ 8 000 |
| 低温等离子体 + 光催化氧化 | 80 ~ 99 | 低 | 低 | 20 ~ 1 000 |

1) LEL 表示 VOCs 的爆炸下限

术的去除效率,不同治理技术的去除效率差别较大,同一治理技术在不同条件下的去除效率在一定范围内波动. 因此,设计 2 种减排情景:情景 1 即低目标情景,设定为大、中企业采用燃烧技术或组合技术等高效治理技术,小、微型企业中无治理措施的企业采用低成本治理技术; 情景 2 为在更高环境目标的要求下,大、中、小、微型企业全部采用高效治理技术.

## 2 结果与讨论

### 2.1 典型行业 VOCs 排放特征与问题分析

#### 2.1.1 行业排放特征

2020 年济南市工业 VOCs 排放量为 14 792.35 t,其中,化工行业排放量为7 947.92 t,占 53.73%; 工业涂装排放量为2 383.29 t,占 16.11%; 印刷行业排放量为792.87 t,占 5.36%; 家具制造排放量为 143.79 t,占 0.97%. 化工行业中,各分支行业 VOCs 排放量占比从大到小依次为:石油、煤炭及其他燃料加工业、化学原料和化学制品制造业、橡胶和塑料制品业、医药制造业、化学纤维制造业,这与刘建军等[31]的研究结果相近. 济南市某炼油厂是石油、煤炭及其他燃料加工业 VOCs 排放的主要污染源之一,排放量占比 85%,生产装置、储罐、运输管道和废物区是主要排放源[32]. 典型行业 VOCs 排放情况如图 1 所示.

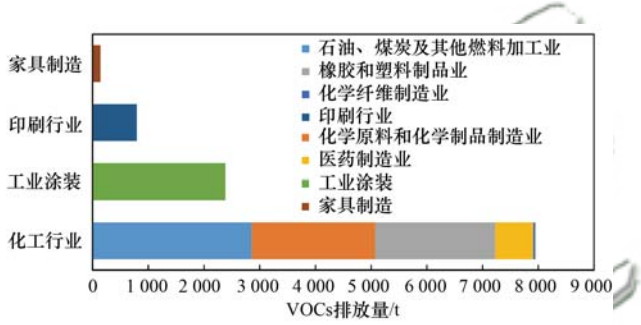


图 1 2020 年济南市典型行业 VOCs 排放量

Fig. 1 VOCs emissions from typical industries in Ji'nan in 2020

#### 2.1.2 企业分规模排放特征

4 个典型行业共有1 514家企业,其中化工、工业涂装、印刷和家具制造行业的企业数量分别为 643、448、278 和 145 个. 从企业规模来看,典型行业中大、中、小、微型企业数量之比为 4∶28∶41∶27,VOCs 排放量之比为 45∶31∶18∶6,这表明数量占比 32% 的大、中型企业贡献 76% 的 VOCs 排放量,而数量占比为 68% 的小、微型企业,其 VOCs 排放量占比为 24%. 不同行业中,各规模企业 VOCs 排放量占比有很大差异(图 2). 化工行业的企业规模以小、微型为主,数量占比为 69.67%,而 VOCs 主要来自大型企业,排放量占比 46.45%. 其中,石油、煤炭及其他燃料加工业以大型企业为主要排放源,企业数量占比为 17.65%,VOCs 排放量占比为 95.98%; 化学原料及化学制品制造、医药制造业和化学纤维制造业的 VOCs 排放以中型企业为主,排放量占比分别为 48.77%、94.51% 和 51.63%; 橡胶和塑料制品业则以小型企业为主,排放量占比 70.32%. 工业涂装中大型企业 VOCs 排放量占比为 50.89%,企业数量仅占比 6.92%; 印刷行业和家具制造 VOCs 排放主要来自中型企业,排放量占比分别为 51.76% 和 42.37%,企业数量占比分别为 21.22% 和 11.03%.

#### 2.1.3 末端治理技术现状

末端治理技术适配性差可能是企业 VOCs 排放量偏高的主要因素[33]. 济南市典型行业末端治理技术现状如图 3 所示. 综合来看,单一固定床活性炭吸附和紫外光催化/氧化技术的使用率为 73.12%,而以燃烧技术和组合技术为代表的高效治理技术的使用率仅为 7.46%,大、中型企业中燃烧技术和组合

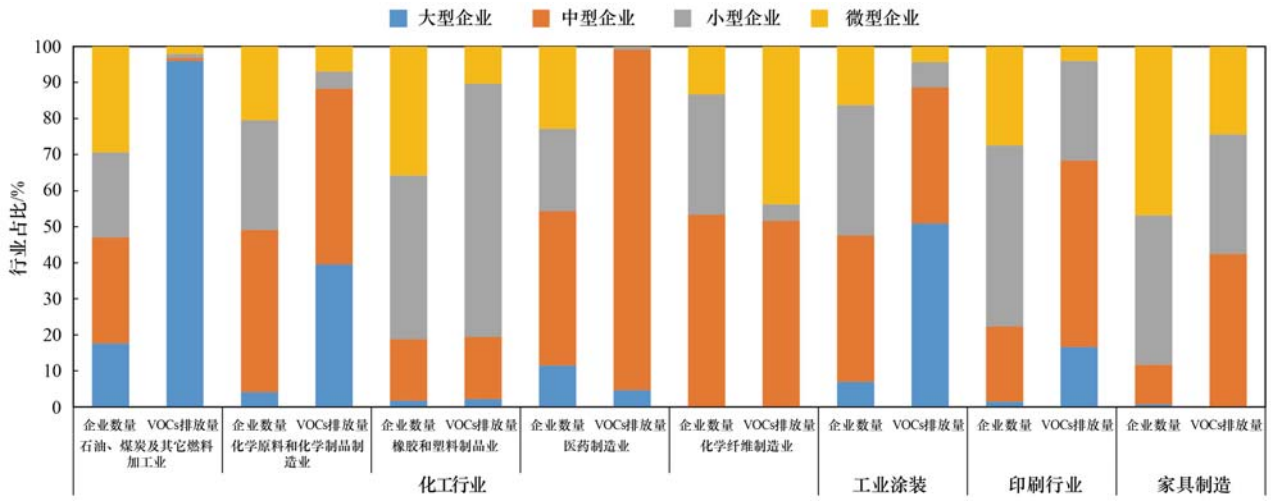


**图 2　济南市典型行业不同规模企业占比及 VOCs 排放量占比**

Fig. 2　Proportion of enterprises of different sizes and VOCs emissions in typical industries in Ji'nan

技术使用率分别为 36.84% 和 14.15%，小、微型企业中低效治理技术使用率分别为 85.18% 和 74.51%，无治理措施的企业占比 12.36%. 化工行业中，冷凝、吸附、吸收等回收技术使用率为 55.83%；膜分离技术适用于油气回收，但在济南市石油化工行业中并未得到广泛应用；低效治理技术在中、小型企业中应用广泛，使用率分别为 73.00% 和 76.70%，在橡胶和塑料制品业中，使用率达 89.86% 和 89.13%. 工业涂装中，使用低效治理技术和无治理措施的企业占比 86.16%，其中，中、小型企业分别占比 39.12% 和 39.90%. 印刷行业的中、小型企业固定活性炭吸附和光催化/氧化技术的使用率分别为 68.97% 和 88.49%，活性炭[34]和光催化剂[35]的性质决定了它们在处理较低浓度 VOCs 时更具优势，但在处理高浓度废气时，需要与其他工艺组合使用. 家具制造行业仍以低效治理技术为主，使用率为 80.69%，其中无治理措施的小、微型企业占比 14.48%，在进行末端治理技术替代时有较大的减排潜力.

### 2.1.4　企业问题分析

经过对 40 家企业现场调研，发现在 VOCs 管控中存在以下问题：①印刷、工业涂装和家具制造行业的部分企业未完成源头替代，异丙醇等有机溶剂仍在使用；②存在 VOCs 无组织排放，如喷气室和电泳车间密闭性差，喷漆房门窗密闭不严，色漆桶未密闭；未设集气罩或设计不合理，不满足无组织废

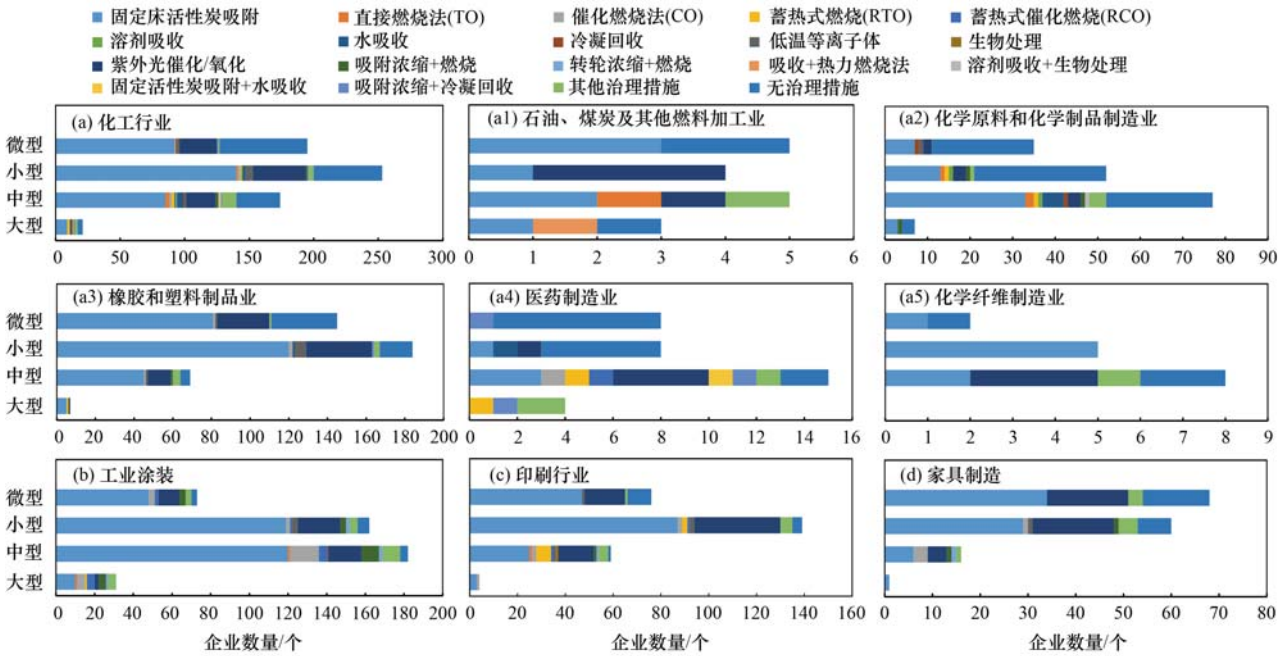


**图 3　济南市典型行业末端治理技术现状**

Fig. 3　Current situation of end-of-pipe treatment techniques in typical industries in Ji'nan

气收集风速大于 0.3 m·s$^{-1}$要求,车间未处于负压环境;危险废物暂存间未设置废气收集系统,废过滤棉布随地存放;③无末端治理设施或设备适配性差,如 RTO 治理设施的前处理单元为单独的活性炭吸附设施,设备规模与污染源源强不匹配,对后续 RTO 去除效率产生影响;废气处理装置末端无检测口,无法判断是否达标;缺少例行检测报告. 这说明在源头替代、过程控制和末端治理环节都存在一定改善和提升空间.

### 2.2 典型行业减排潜力分析

#### 2.2.1 减排潜力综合分析

根据济南市典型行业的 VOCs 排放现状,减排潜力存在于源头控制、过程控制和末端治理这 3 个环节. 首先是源头替代,在与涂料和溶剂使用相关的行业中,低 VOCs 材料的替代是关键,用水性涂料替代溶剂型涂料可以使 VOCs 总排放量减少 20%~70%[36],泄漏检测与修复(LDAR)是化工行业源头减排的有效手段[37]. 目前济南市处于源头替代转型中,截至 2020 年 7 月 31 日,超过 20% 的企业已完成低 VOCs 含量源头替代(http://jinan.iqilu.com/jnms/2020/0806/4612917.shtml). 其次,加强过程控制,根据经验测定法,将集气罩改成密闭间操作,VOCs 收集效率将提升 20%~30% 左右,然而受投资和运营成本限制,通过改变集气方式来减少 VOCs 无组织排放,实施难度较大[38]. 再次,结合企业实际,选取高效适用的末端治理技术. 现有研究表明,针对每个污染源推广先进的末端治理技术,应是国家或城市区域范围内改善空气质量的关键措施[39~40].

化工行业 VOCs 排放环节众多,主要治理措施包括开展无组织废气收集处理,以及末端治理升级改造[41]. 无组织废气排放可以通过 LDAR 作业来控制,定期开展 LDAR 检测对 VOCs 控制效率可达 95% 以上[42].

对于工业涂装行业,涂装前的清洗脱脂、稀释剂的调配、涂装后设备的清洁、换色清洗等步骤都涉及 VOCs 排放,2018 年我国工业源 VOCs 排放清单表明,工业涂装行业含 VOCs 产品的使用环节占该环节 VOCs 总量的 46.78%[43]. 因此,用水性涂料、粉末涂料和高固体分涂料等低 VOCs 材料进行替代,并提升喷漆、喷塑等车间的密闭性,将有效减少 VOCs 排放.

印刷行业的污染物来源包括油墨、稀释剂、清洗剂、复合剂、光油和涂料等,济南市 2020 年大气污染源排放清单结果显示,58.89% 的 VOCs 排放量来自溶剂型原辅材料的使用. 仅考虑用水性、UV 型等低 VOCs 材料进行替代,假设 VOCs 含量降低 40% 以上,替代率为 100%,则减排率可达 23.55%.

家具制造行业中,喷胶、调漆、涂装及干燥过程存在 VOCs 排放,涉 VOCs 原辅材料有底漆、面漆、稀释剂和固化剂等. 用粉末涂料、水性涂料、高固体分(无溶剂)涂料及辐射固化涂料对高 VOCs 含量的涂料进行替代,可以从源头上减少 VOCs 排放.

#### 2.2.2 减排情景设计

典型行业末端治理技术替代的减排情景设计如表 3 所示.

化工行业中,由于大部分有机溶剂具有回收价值,末端治理技术仅考虑回收技术. 常见单一回收技术去除效率低且稳定性差,而以吸附 + 冷凝为代表的组合回收技术去除效率能达到 97% 以上,但该技术投资成本和运行费用高. 因此,情景 1 为较低目标下,对无治理措施的小、微型企业采用单一回收技术,情景 2 则为所有企业都采用吸附 + 冷凝技术对低效治理技术进行替代.

工业涂装各企业受涂料类型、喷涂工艺等因素影响,VOCs 浓度存在较大差异. VOCs 治理技术去除效率实测研究结果表明[44,45],低温等离子体法有较高的去除效率和稳定性,且运行费用适中,对小、微型企业比较适用,据此设计情景 1. 蓄热式燃烧(RTO)技术在处理较高浓度废气时效果比较好,活性炭吸附脱附 + 催化燃烧装置在处理低浓度废气时效果更佳,据此设计情景 2.

印刷行业 VOCs 治理常用技术是吸附法和燃烧法,燃烧法具有去除效率高的优势,但费用高且忽略了废气回收价值,适用于高目标减排情景. 对于小、微型企业,可考虑活性炭吸附等次优技术.

家具制造行业 VOCs 的主要组分是芳香烃和含氧挥发性有机物(OVOCs),由于 OVOCs 吸附性较高,可采用活性炭吸附 + 燃烧技术,去除效率可达 95%~99%[46]. 低目标情境下,无治理措施的小、微型企业仍以低成本治理技术为主.

#### 2.2.3 减排潜力计算

基于以上 2 种减排情景,结合各行业不同规模企业末端治理技术现状(图 3),对典型行业及各规模企业的减排潜力进行估算,结果见表 4. 化工行业在情景 1 中,121 家无治理措施的小、微型企业采用低成本治理技术,去除效率由 0% 提高至 50%,减排量为 678.23 t;大、中型企业中分别有 16 家和 161 家企业的低效治理技术或无治理措施被替换为高效治理技术,去除效率提升至 97%,减排量分别为 3 428.60 t 和1 422.99 t. 化工行业在情景 2 中,小、微型企业减排量增加,其中 440 家企业的低效治理技术或无治理措施被替换为高效治理技术,与情景

**表 3　典型行业末端治理技术替代的减排情景**

Table 3　Emission reduction scenario for end-of-pipe treatment technique replacement in typical industries

| 行业名称 | 情景 1 | 情景 2 |
|---|---|---|
| 化工行业 | 大、中型企业中采用燃烧技术或组合技术的企业不做变动，其他企业采用吸附 + 冷凝技术替代现有技术，去除效率设为 97%；小、微型企业中无治理措施的企业采用低成本治理技术，去除效率设为 50% | 大、中、小、微型企业中采用燃烧技术或组合技术的企业不做变动，其他企业全部采用吸附 + 冷凝技术替代现有技术，去除效率设为 97% |
| 工业涂装 | 大、中型企业中采用燃烧技术或组合技术的企业不做变动，其他企业用燃烧技术等高效治理技术替代现有技术，去除效率设为 90%；小、微型企业中无治理措施的企业采用低温等离子体技术等低成本治理技术，去除效率设为 50% | 大、中、小、微型企业中采用燃烧技术或组合技术的企业不做变动，其他企业用 RTO 或活性炭吸附脱附 + 催化燃烧等高效治理技术替代现有技术，去除效率设为 90% |
| 印刷行业 | 大、中型企业中采用燃烧技术或组合技术的企业不做变动，其他企业采用燃烧法等高效治理技术替代现有技术，去除效率设为 90%；小、微型企业中无治理措施的企业采用低成本治理技术，去除效率设为 50% | 大、中、小、微型企业中采用燃烧技术或组合技术的企业不做变动，其他企业全部采用燃烧法等高效治理技术替代现有治理技术，去除效率设为 90% |
| 家具制造 | 大、中型企业中采用燃烧技术或组合技术的企业不做变动，其他企业采用活性炭吸附 + 催化燃烧技术替代现有技术，去除效率设为 95%，小、微型企业中无治理措施的企业采用低成本治理技术，去除效率设为 50% | 大、中、小、微型企业中采用燃烧技术或组合技术的企业不做变动，其他企业用活性炭吸附 + 催化燃烧技术替代现有技术，去除效率为 95% |

1 相比，减排量增加1 225. 10 t. 工业涂装行业在情景 1 中，9 家无治理措施的小、微型企业采用低成本治理技术，减排量为 2. 61 t；大、中型企业中分别有 16 家和 151 家企业的低效治理技术或无治理措施被替换为高效治理技术，去除效率提升至 90%，减排量分别为 207. 82 t 和 432. 68 t. 工业涂装行业在情景 2 中，大、中型企业的减排量与情景 1 相同，219 家小、微型企业的低效治理技术或无治理措施被替换为高效治理技术，减排量增加 184. 72 t. 印刷行业在情景 1 中，14 家无治理措施的小、微型企业采用低成本治理技术，减排量为 12. 14 t；大、中型企业中分别有 3 家和 47 家企业的低效治理技术或无治理措施被替换为高效治理技术，去除效率提升至 90%，减排量分别为 105. 38 t 和 175. 53 t. 印刷行业在情景 2 中，所有企业的低效治理技术或无治理措施被替换为高效治理技术，与情景 1 相比，大、中型企业减排量不变，210 家小、微型企业减排量增加 180. 59 t. 家具制造行业在情景 1 中，21 家无治理措施的小、微型企业采用低成本治理技术，减排量为 0. 40 t；大、中型企业中分别有 1 家和 12 家企业的低效治理技术或无治理措施被替换为高效治理技术，去除效率提升至95%，减排量分别为0. 13 t和

**表 4　典型行业及各规模企业在不同减排情景下的减排潜力**

Table 4　Emission reduction potential of typical industries and enterprises of different sizes under two scenarios

| 行业名称 | 企业规模 | 企业数量/个 | 基准情景 | 情景 1 | | 情景 2 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | VOCs 排放量/t | VOCs 排放量/t | 减排率/% | VOCs 排放量/t | 减排率/% |
| 化工行业 | 大型 | 21 | 3 692. 12 | 263. 52 | 92. 86 | 263. 52 | 92. 86 |
| | 中型 | 174 | 2 140. 27 | 717. 28 | 66. 49 | 717. 28 | 66. 49 |
| | 小型 | 253 | 1 661. 89 | 1 100. 57 | 33. 78 | 192. 00 | 88. 45 |
| | 微型 | 195 | 453. 64 | 336. 73 | 25. 77 | 20. 20 | 95. 55 |
| | 合计 | 643 | 7 947. 92 | 2 418. 10 | 69. 58 | 1 193. 00 | 84. 99 |
| 工业涂装 | 大型 | 31 | 1 212. 98 | 1 005. 16 | 17. 13 | 1 005. 16 | 17. 13 |
| | 中型 | 182 | 900. 35 | 467. 67 | 48. 06 | 467. 67 | 48. 06 |
| | 小型 | 162 | 166. 43 | 164. 32 | 1. 27 | 20. 80 | 87. 50 |
| | 微型 | 73 | 103. 53 | 103. 03 | 0. 48 | 61. 83 | 40. 28 |
| | 合计 | 448 | 2 383. 29 | 1 740. 18 | 26. 98 | 1 555. 46 | 34. 74 |
| 印刷行业 | 大型 | 4 | 131. 73 | 26. 35 | 80. 00 | 26. 35 | 80. 00 |
| | 中型 | 59 | 410. 38 | 234. 85 | 42. 77 | 234. 85 | 42. 77 |
| | 小型 | 139 | 218. 83 | 216. 20 | 1. 20 | 43. 28 | 80. 22 |
| | 微型 | 76 | 31. 93 | 22. 42 | 29. 78 | 14. 75 | 53. 81 |
| | 合计 | 278 | 792. 87 | 499. 82 | 36. 96 | 319. 23 | 59. 74 |
| 家具制造 | 大型 | 1 | 0. 14 | 0. 014 | 90. 00 | 0. 014 | 90. 00 |
| | 中型 | 16 | 61. 26 | 49. 49 | 19. 21 | 49. 49 | 19. 21 |
| | 小型 | 60 | 47. 21 | 46. 92 | 0. 61 | 5. 86 | 87. 59 |
| | 微型 | 68 | 35. 18 | 35. 07 | 0. 31 | 30. 26 | 14. 00 |
| | 合计 | 145 | 143. 79 | 131. 49 | 8. 55 | 85. 62 | 40. 45 |

11.77 t. 家具制造行业在情景 2 中,126 家小、微型企业的低效治理技术或无治理措施被替换为高效治理技术,与情景 1 相比,减排量增加 45.87 t.

4 个典型行业的 VOCs 排放量总体大幅下降,总减排率为 57.49%~72.01%. 其中,化工行业 VOCs 排放量大,且减排潜力最大,减排率为 69.58%~84.99%,应作为济南市行业管控的重点; 其次是印刷行业和工业涂装,减排率分别为 36.96%~59.74% 和 26.98%~34.74%; 家具制造行业在 2 种情景下减排率差异较大,分别为 8.55% 和 40.45%,这是因为采用低效治理技术的小、微型企业数量多,且排放量大,因此在低目标情景下,低成本治理技术的减排力度明显偏低.

从各行业的企业规模来看,情景 1 对典型行业中的大、中型企业影响较大,平均减排率分别为 70.00% 和 44.23%,对于小、微型企业,则减排率较低,因此在该情景下对小、微型企业加强监管、减少无组织排放尤为重要; 情景 2 对典型行业中的小、微型企业影响增大,平均减排率分别为 87.49% 和 79.65%,尤其是小型企业,其单一低效治理技术和无治理措施的使用率达 96.58%. 工业涂装的大型企业在设计情景下的减排率为 17.13%,明显低于同行业的其他规模企业和同情景下其他典型行业的大型企业,这是因为企业原有末端治理技术去除效率高,减排空间小,减排重点可以放到源头替代、过程控制环节.

### 2.2.4 不确定性分析

VOCs 减排情景设计存在一些不确定性因素,归结于以下 3 个方面: ①经济政策不确定性. 有研究表明,经济政策不确定性会影响企业商业环境、财务绩效和投资决策,进而对排放绩效产生影响[47]. 当负面影响较大时,企业可能更倾向于采取低费用治理措施; ②产量规模的不确定性[48]. 工艺结构升级或市场扩大等因素导致产量规模增加,各废弃物排放量也发生变化; ③技术进步不确定性. 末端治理能力的提升离不开技术的进步,单一技术的升级改造和组合创新正在进行中,可能会有投资成本低、去除效率高的最优技术出现.

VOCs 减排潜力计算的不确定性因素来自以下两个方面[49]:一是数据来源,包括清单结果的不确定性和末端治理设施去除效率的不确定性. 二是进行数学运算过程中不确定度的传递.

## 3 结论

(1)2020 年济南市 4 个典型行业的 VOCs 排放量从大到小依次为:化工行业7 947.92 t,工业涂装 2 383.29 t,印刷行业 792.87 t,家具制造 143.79 t. 总体来看,大、中、小、微型企业的数量之比为 4∶28∶41∶27,而排放量之比为 45∶31∶18∶6,大、中型企业的排放量远大于小、微型企业. 化工行业和工业涂装的 VOCs 排放主要来自大型企业,排放量占比分别为 46.45% 和 50.89%; 印刷行业和家具制造的 VOCs 排放主要来自中型企业,排放量占比分别为 51.76% 和 42.37%. 现场调研发现部分企业存在未完成源头替代,车间密闭性差、集气罩设置不合理等导致 VOCs 无组织排放以及末端治理设施与源强不匹配等问题.

(2)依据末端治理技术的替代设计 2 种 VOCs 减排情景,估算得出化工、工业涂装、印刷和家具制造行业的减排率分别为 69.58%~84.99%、26.98%~34.74%、36.96%~59.74% 和 8.55%~40.45%. 设计情景下,大、中型企业的减排效果明显,平均减排率分别为 70.00% 和 44.23%; 而小、微型企业在情景 1 中减排效果不显著,在情景 2 中减排率大幅提升,分别为 87.49% 和 79.65%.

**参考文献:**


[1] 李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 $PM_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制策略研究[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1763-1778.
Li H, Peng L, Bi F, *et al*. Strategy of coordinated control of $PM_{2.5}$ and ozone in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(10): 1763-1778.

[2] Ding D, Xing J, Wang S X, *et al*. Optimization of a $NO_x$ and VOC cooperative control strategy based on clean air benefits[J]. Environmental Science & Technology, 2022, **56**(2): 739-749.

[3] 刘鑫, 史旭荣, 雷宇, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 与 $O_3$ 协同控制路径[J]. 科学通报, 2022, **67**(18): 2089-2099.
Liu X, Shi X R, Lei Y, *et al*. Path of coordinated control of $PM_{2.5}$ and ozone in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, **67**(18): 2089-2099.

[4] 曹小聪, 吴晓晨, 徐文帅, 等. 三亚市大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源解析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(8): 1812-1824.
Cao X C, Wu X C, Xu W S, *et al*. Pollution characterization, ozone formation potential and source apportionment of ambient VOCs in Sanya, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(8): 1812-1824.

[5] Li M, Zhang Q, Zheng B, *et al*. Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound(NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(13): 8897-8913.

[6] Wu K, Yang X Y, Chen D A, *et al*. Estimation of biogenic VOC emissions and their corresponding impact on ozone and secondary organic aerosol formation in China[J]. Atmospheric Research, 2020, **231**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104656.

[7] 张涵, 姜华, 高健, 等. 我国大气 $O_3$ 污染成因及影响因素综述[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(12): 2657-2665.
Zhang H, Jiang H, Gao J, *et al*. Review on causes and influencing factors of $O_3$ pollution in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(12): 2657-2665.

[8] 刘锐源，钟美芳，赵晓雅，等. 2011～2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征[J]. 环境科学，2021，**42**(11)：5169-5179.
Liu R Y，Zhong M F，Zhao X Y，*et al*. Characteristics of industrial volatile organic compounds(VOCs) emission in China from 2011 to 2019[J]. Environmental Science，2021，**42**(11)：5169-5179.

[9] 冯云霞. 石化工业区 VOCs 排放特征及其对二次污染形成的贡献[J]. 石油炼制与化工，2022，**53**(6)：120-127.
Feng Y X. Characteristics of VOCs emission from a petrochemical industry area and associated contributions to secondary pollution [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals，2022，**53**(6)：120-127.

[10] 钱益斌，钟昌琴，杨安富，等. 海南某化工园区大气 VOCs 组成、来源及健康风险[J]. 环境科学与技术，2020，**43**(5)：115-123.
Qian Y B，Zhong C Q，Yang A F，*et al*. Characteristics，source apportionment and health risk assessment of volatile organic compounds in the atmosphere of a chemical industrial park in Hainan[J]. Environmental Science & Technology，2020，**43**(5)：115-123.

[11] 陆建海，董事壁，李文娟，等. 浙江省工业涂装 VOCs 治理现状[J]. 环境保护科学，2018，**44**(1)：113-117，121.
Lu J H，Dong S B，Li W J，*et al*. Present situation of VOCs control technologies for the industrial coating process in Zhejiang province[J]. Environmental Protection Science，2018，**44**(1)：113-117，121.

[12] 王家德，吕建璋，李文娟，等. 浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数[J]. 环境科学，2018，**39**(8)：3552-3556.
Wang J D，Lü J Z，Li W J，*et al*. Pollution characteristics and emission coefficients of volatile organic compounds from the packaging and printing industry in Zhejiang Province[J]. Environmental Science，2018，**39**(8)：3552-3556.

[13] 秦华，谢建辉，杜天君，等. 济南市典型家具企业 VOCs 排放特征及 $O_3$ 生成贡献分析[J]. 环境保护科学，2021，**47**(3)：138-145.
Qin H，Xie J H，Du T J，*et al*. Analysis on VOCs emission characteristics and ozone generation contribution of typical furniture enterprises in Jinan[J]. Environmental Protection Science，2021，**47**(3)：138-145.

[14] Zhang S H，You J P，Kennes C，*et al*. Current advances of VOCs degradation by bioelectrochemical systems：a review[J]. Chemical Engineering Journal，2018，**334**：2625-2637.

[15] 成国庆. 河北省重点行业 VOCs 排放现状及减排潜力研究[D]. 石家庄：河北科技大学，2016.
Cheng G Q. Study on VOCs emissions research present situation and the emission reduction potential of key industries in Hebei province[D]. Shijiazhuang：Hebei University of Science & Technology，2016.

[16] 孙园园，白璐，张玥，等. 工业行业源头-过程-末端全过程减排潜力评估研究[J]. 环境科学研究，2021，**34**(12)：2867-2875.
Sun Y Y，Bai L，Zhang Y，*et al*. Evaluation of emission reduction potentials of the source-process-end processes of industrial industry[J]. Research of Environmental Sciences，2021，**34**(12)：2867-2875.

[17] Sun Y Y，Zhang Y，Zhao H H，*et al*. Synergistic reduction potentials for VOCs in solvent-using industrial sectors：a case study of the packaging and printing industry in China[J]. Resources，Conservation and Recycling，2022，**187**，doi：10.1016/j.resconrec.2022.106638.

[18] Sun Y Y，Bai L，Qiao Q，*et al*. Exploring the emission reduction potential of industries：a source-processing-end coordinated model and its application[J]. Journal of Cleaner Production，2022，**380**，doi：10.1016/j.jclepro.2022.134885.

[19] 李慧，王淑兰，张文杰，等. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量特征及其影响因素[J]. 环境科学研究，2021，**34**(1)：172-184.
Li H，Wang S L，Zhang W J，*et al*. Characteristics and influencing factors of urban air quality in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas(‘2+26’ cities)[J]. Research of Environmental Sciences，2021，**34**(1)：172-184.

[20] 滕丕凯. 济南市大气 VOC 污染特征及其对臭氧生成贡献的研究[D]. 济南：齐鲁工业大学，2020.
Teng P K. Study on characteristics of atmospheric VOC pollution and its contribution to ozone formation in Jinan[D]. Ji'nan：Qilu University of Technology，2020.

[21] GB/T 4754-2017，国民经济行业分类[S].

[22] 国家统计局. 关于印发《统计上大中小微型企业划分办法(2017)》的通知[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjgz/tzgb/201801/t20180103_1569254.html，2018-01-03.

[23] Khan F I，Ghoshal A K. Removal of volatile organic compounds from polluted air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2000，**13**(6)：527-545.

[24] 张永明，邓娟，梁健. 工业源 VOCs 末端治理技术浅析及减排展望[J]. 环境影响评价，2018，**40**(2)：46-50.
Zhang Y M，Deng J，Liang J. The analysis and prospect of industrial VOCs terminal treatment techniques[J]. Environmental Impact Assessment，2018，**40**(2)：46-50.

[25] 席劲瑛，武俊良，胡洪营，等. 工业 VOCs 气体处理技术应用状况调查分析[J]. 中国环境科学，2012，**32**(11)：1955-1960.
Xi J Y，Wu J L，Hu H Y，*et al*. Application status of industrial VOCs gas treatment techniques[J]. China Environmental Science，2012，**32**(11)：1955-1960.

[26] 田静. 新乡市典型工业 VOCs 控制技术综合评估分析[D]. 郑州：郑州大学，2019.
Tian J. Comprehensive evaluation and analysis of typical industrial VOCs control technology in Xinxiang city[D]. Zhengzhou：Zhengzhou University，2019.

[27] 栾志强，郝郑平，王喜芹. 工业固定源 VOCs 治理技术分析评估[J]. 环境科学，2011，**32**(12)：3476-3486.
Luan Z Q，Hao Z P，Wang X Q. Evaluation of treatment technology of volatile organic compounds for fixed industrial resources[J]. Environmental Science，2011，**32**(12)：3476-3486.

[28] 帅启凡，董小平，陆建刚，等. 蓄热燃烧法处理工业 VOCs 废气的研究进展[J]. 环境科学与技术，2021，**44**(1)：134-140.
Shuai Q F，Dong X P，Lu J G，*et al*. Research progress in regenerative oxidation technology of industrial VOCs exhaust treatment[J]. Environmental Science & Technology，2021，**44**(1)：134-140.

[29] 田静，史兆臣，万亚萌，等. 挥发性有机物组合末端治理技术的研究进展[J]. 应用化工，2019，**48**(6)：1433-1439.
Tian J，Shi Z C，Wan Y M，*et al*. Research progress on integrated terminal control technology of volatile organic compounds[J]. Applied Chemical Industry，2019，**48**(6)：1433-1439.

[30] 李晓丹. VOCs 治理技术特性分析及典型行业 VOCs 治理技术选择建议[J]. 节能与环保，2019，(3)：52-55.

Li X D. Characteristics of VOCs governance technology and suggestions for selection of VOCs governance technology in typical industries[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2019,(3): 52-55.

[31] 刘建军, 刘杨, 代雪静, 等. 工业企业有组织 VOCs 排放特征及治理技术探讨——以济南为例[J]. 能源环境保护, 2021, **35**(5): 81-87.
Liu J J, Liu Y, Dai X J, *et al*. Discussion on emission characteristics and treatment technologies of organized VOCs in industrial enterprises: taking Jinan as an example[J]. Energy Environmental Protection, 2021, **35**(5): 81-87.

[32] Gariazzo C, Pelliccioni A, Di Filippo P, *et al*. Monitoring and analysis of volatile organic compounds around an oil refinery[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, **167**(1-4): 17-38.

[33] 苏伟健, 徐绮坤, 黎碧霞, 等. 工业源重点行业 VOCs 治理技术处理效果的研究[J]. 环境工程, 2016, **34**(S1): 518-522, 451.
Su W J, Xu Q K, Li B X, *et al*. Research on effects of key industrial VOCs treatment methods [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(S1): 518-522, 451.

[34] 杨晓娜, 任晓玲, 严孝清, 等. 活性炭对 VOCs 的吸附研究进展[J]. 材料导报, 2021, **35**(17): 17111-17124.
Yang X N, Ren X L, Yan X Q, *et al*. A review on VOCs adsorption by activated carbon[J]. Materials Reports, 2021, **35**(17): 17111-17124.

[35] 杨福, 刘梦婷, 马淑兰, 等. 挥发性有机化合物催化消除前沿技术及研究进展[J]. 化工进展, 2022, **41**(9): 4801-4812.
Yang F, Liu M T, Ma S L, *et al*. Advanced in catalytic elimination of volatile organic compounds[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, **41**(9): 4801-4812.

[36] 叶代启, 刘锐源, 田俊泰. 我国挥发性有机物排放量变化趋势及政策研究[J]. 环境保护, 2020, **48**(15): 23-26.
Ye D Q, Liu R Y, Tian J T. Trends of volatile organic compounds emissions and research on policy in China[J]. Environmental Protection, 2020, **48**(15): 23-26.

[37] Wang H, Sun S, Nie L, *et al*. A review of whole-process control of industrial volatile organic compounds in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, **123**: 127-139.

[38] 柯云婷. 溶剂使用行业挥发性有机物排放特征及控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
Ke Y T. Characteristics and control technology of volatile organic compounds emission from solvent use sources[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[39] Gao G Y, Wang S S, Xue R Y, *et al*. Uncovering the characteristics of air pollutants emission in industrial parks and analyzing emission reduction potential: case studies in Henan, China[J]. Scientific Reports, 2021, **11**(1), doi: 10.1038/s41598-021-03193-z.

[40] Tong D, Geng G N, Jiang K J, *et al*. Energy and emission pathways towards $PM_{2.5}$ air quality attainment in the Beijing-Tianjin-Hebei region by 2030 [J]. Science of the Total Environment, 2019, **692**: 361-370.

[41] 栾婧. 江苏省某地级城市 VOCs 工业来源解析与控制对策[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
Luan J. Analysis and control strategies for industrial VOCs: a case study in a city in Jiangsu province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.

[42] 郝宇杭. 工业园区天然气精细化工行业大气污染全过程防控研究——以长寿经开区为例[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2021.
Hao Y H. Research on the whole process prevention and control of air pollution in natural gas fine chemical industry of industrial park — Taking Changshou economic development zone as an example[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2021.

[43] 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 等. 中国工业源挥发性有机物排放清单[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4767-4775.
Liang X M, Sun X B, Xu J T, *et al*. Industrial volatile organic compounds (VOCs) emission inventory in China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4767-4775.

[44] 高宗江. 典型工业涂装行业 VOCs 排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
Gao Z J. Source characteristics of VOC emissions from typical industrial painting sources [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

[45] 吴应. 上海市重点工业涂装行业 VOCs 排放特征与控制标准体系研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.
Wu Y. Emission characteristics and control standard system of volatile organic compounds(VOCs) from main industrial coating industries in Shanghai[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.

[46] 王瑞鹏, 王晓琦, 程水源, 等. 末端治理对工业涂装行业 VOCs 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(2): 593-600.
Wang R P, Wang X Q, Cheng S Y, *et al*. Influence of end-of-pipe treatment on VOCs emission in industrial coating industries [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(2): 593-600.

[47] 李群, 刘基伟, 刘涛. 经济政策不确定性对碳中和发展的影响[J]. 中国流通经济, 2022, **36**(6): 61-71.
Li Q, Liu J W, Liu T. Analysis of the impact of economic policy uncertainty on carbon neutrality development [J]. China Business and Market, 2022, **36**(6): 61-71.

[48] 曹馨, 张怀荣, 陈庆华, 等. 产业共生推进节能减排协同管理的不确定性分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2020, **36**(2): 1-11, 37.
Cao X, Zhang H R, Chen Q H, *et al*. Uncertainty analysis on energy conservation and emission reduction co-management through industrial symbiosis [J]. Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition), 2020, **36**(2): 1-11, 37.

[49] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 305-312.
Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 305-312.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 11

Nov. 15, 2023


## 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, *et al.* (5879)

Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China ····· LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, *et al.* (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, *et al.* (5899)

Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China ····· LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, *et al.* (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, *et al.* (5924)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing ····· RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, *et al.* (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, *et al.* (5946)

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China ····· TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (6007)

Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City ····· HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, *et al.* (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, *et al.* (6025)

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area ····· LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, *et al.* (6038)

Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin ····· JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, *et al.* (6050)

Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake ····· CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (6106)

Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ··· CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (6137)

Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province ····· LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, *et al.* (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, *et al.* (6159)

Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment ····· ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (6194)

Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies ····· REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (6226)

Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in *Eucalyptus* Plantations After Five Years in Northern Guangxi ····· CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, *et al.* (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, *et al.* (6248)

Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil ····· LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, *et al.* (6257)

Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism ····· LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (6309)

Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems ····· KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (6354)

Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere ····· XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, *et al.* (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, *et al.* (6377)

Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of *Codonopsis pilosula* ····· YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, *et al.* (6387)

Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil ····· LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, *et al.* (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, *et al.* (6421)