

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

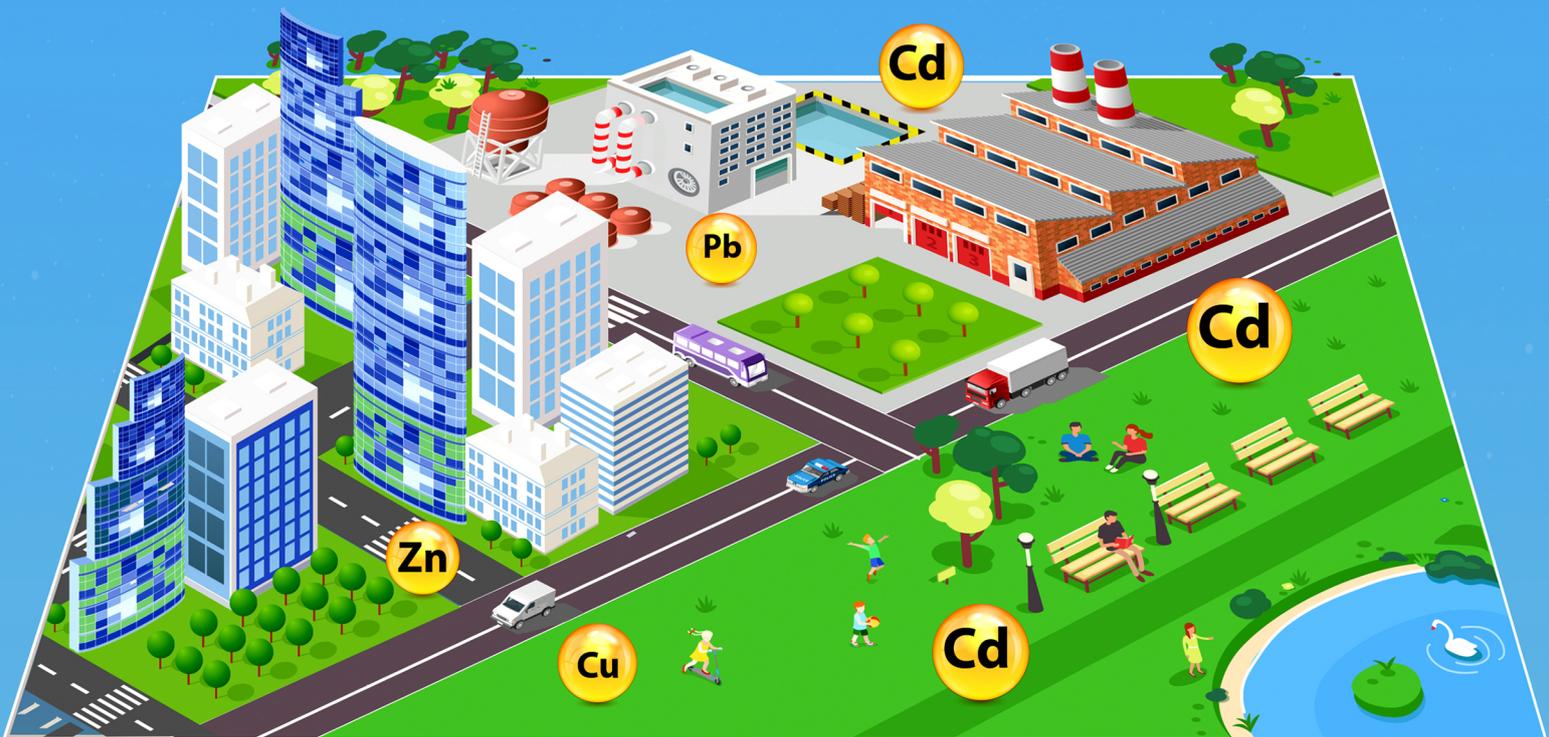
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期

Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 ..... 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 ( 1 )

植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 ..... 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 ( 11 )

基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 ..... 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 ( 26 )

不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 ..... 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 ( 37 )

北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 ..... 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 ( 46 )

武汉冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 ..... 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 ( 61 )

运城市 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征和潜在源区季节分析 ..... 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 ( 74 )

中国东部冷锋推进中的 PM<sub>2.5</sub> 三维结构变化特征 ..... 牟南南, 朱彬, 卢文 ( 85 )

粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 ( 93 )

西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 ..... 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 ( 102 )

拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 ..... 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 ( 113 )

杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 ..... 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 ( 123 )

上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 ..... 金丹 ( 132 )

铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O<sub>3</sub> 和 SOA 形成潜势分析 ..... 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 ( 140 )

电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 ..... 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 ( 150 )

不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 ..... 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 ( 160 )

淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 ..... 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 ( 170 )

昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 ..... 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 ( 180 )

城市路面积尘微塑料污染特征 ..... 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 ( 189 )

塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 ..... 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 ( 199 )

赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 ..... 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 ( 210 )

无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 ..... 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 ( 220 )

白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 ..... 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 ( 230 )

九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 ..... 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 ( 239 )

北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 ..... 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 ( 247 )

城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 ..... 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 ( 256 )

苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 ..... 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 ( 267 )

苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 ..... 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 ( 277 )

信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 ..... 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 ( 285 )

三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 ..... 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 ( 295 )

李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 ..... 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 ( 306 )

岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 ..... 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 ( 314 )

宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 ..... 王晓东, 田伟, 张雪艳 ( 329 )

快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素:以珠江三角洲为例 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 ( 339 )

长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 ..... 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 ( 349 )

洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 ..... 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 ( 363 )

基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 ..... 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 ( 369 )

三峡库区万州段河流水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量支干流对比及影响机制初探 ..... 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 ( 377 )

功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb<sup>2+</sup> 的吸附行为 ..... 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 ( 387 )

铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 ..... 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 ( 398 )

沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 ..... 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 ( 409 )

温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 ..... 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 ( 416 )

填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 ..... 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 ( 424 )

基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 ..... 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 ( 432 )

浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 ..... 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 ( 442 )

农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 ..... 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 ( 454 )

基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 ..... 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 ( 463 )

调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 ..... 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 ( 472 )

设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 ..... 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 ( 481 )

电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 ..... 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 ( 490 )

雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 ..... 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 ( 500 )

重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 ..... 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 ( 510 )

长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 ..... 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 ( 521 )

土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 ..... 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 ( 530 )

化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 ..... 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 ( 540 )

秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 ..... 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 ( 550 )

全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 ..... 闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 ( 560 )

秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 ..... 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 ( 569 )

# 电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子

谢丹平, 黄忠辉\*, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕

(生态环境部华南环境科学研究所, 广东省水与大气污染防治重点实验室, 广州 510655)

**摘要:** 电子垃圾拆解回收过程中的高温处理往往产生大量挥发性有机物(VOCs),对周边环境及人体健康产生不可忽视的影响.本研究选取某电子垃圾集中拆解回收场,对场区加热烤板车间、塑料制粒车间、湿法提取车间和火法冶炼车间废气处理设施排放口的VOCs浓度和组分进行监测,分析了不同生产工艺VOCs排放特征及其总VOCs排放因子.结果表明,不同生产工艺有组织排放的 $\rho$ (总VOCs)差异较大,其排序为:加热烤板-加热滚板炉工艺 $[(2\,096.1 \pm 732.4)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 塑料制粒工艺 $[(1\,639.1 \pm 538.5)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 加热烤板-电热炉工艺 $[(625.3 \pm 535.5)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 火法冶炼工艺 $[(436.8 \pm 305.2)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 湿法提取工艺 $[(271.3 \pm 73.1)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ .不同生产工艺有组织排放的VOCs组成差异也较大,但总体以含氧化合物和芳香烃为主,具体组分特征为加热烤板(包括加热滚板炉工艺和电热炉工艺)排放的VOCs主要成分为含氧化合物和芳香烃,两类物质总和和质量分数为74.1%~79.7%;塑料制粒工艺有组织排放的VOCs主要成分是芳香烃和含氧化合物,两类物质总和和质量分数为71.8%;含氧化合物和芳香烃是湿法提取工艺有组织排放的VOCs主要成分,两类物质贡献率接近,且总和和质量分数达到84.2%;卤代烃是火法冶炼工艺有组织排放的VOCs中最主要的成分,质量分数高达92.1%.不同生产工艺总VOCs排放因子差异也很显著,其均值排序为:加热烤板-电热炉工艺 $(297.0\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}) >$ 塑料制粒工艺 $(29.5\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}) >$ 湿法提取工艺 $(25.4\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}) >$ 加热烤板-加热滚板炉工艺 $(25.2\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}) >$ 火法冶炼工艺 $(1.9\text{ g}\cdot\text{t}^{-1})$ .因此,电子垃圾拆解回收行业主要排放VOCs的工艺是加热烤板工艺和塑料制粒工艺.

**关键词:** 电子垃圾拆解回收;挥发性有机物(VOCs);排放特征;排放因子;有组织排放

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0150-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202104137

## Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes

XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui\*, LIU Wang, NIE Peng, HUANG Zhong-kun, HE Hui, CHEN Xiao-yan

(Guangdong Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China)

**Abstract:** A large number of volatile organic compounds (VOCs) are emitted from the high temperature treatment process in the dismantling and recycling procedure of e-wastes, which has a significant impact on the surrounding environment and human health. In this study, an e-waste dismantling and recycling yard was selected to measure the VOCs concentrations and compositions in the exhaust of treatment facilities of heating baking board, plastic granulation, wet extraction, and pyrometallurgical workshops, and the emission characteristics of VOCs and emission factors for total VOCs from different production processes were investigated. The results showed that there were significant differences in total VOCs emission concentrations among different production processes. The concentrations of total VOCs produced in different workshops followed the descending order of the heating baking board (heating rotary plate furnace) process  $[(2\,096.1 \pm 732.4)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$  plastic granulation process  $[(1\,639.1 \pm 538.5)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$  heating baking board (electric heater) process  $[(625.3 \pm 535.5)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$  pyrometallurgical process  $[(436.8 \pm 305.2)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$  wet extraction process  $[(271.3 \pm 73.1)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ . The compositions of VOCs emitted from different production processes were also clearly different; however, the major components of VOCs were generally oxygenated compounds and aromatic hydrocarbons. The specific component characteristics were as follows: the dominant groups of VOCs emitted from the heating baking board process (including heating rotary plate furnaces and electric heaters) were oxygenated compounds and aromatic hydrocarbons, accounting for 74.1%-79.7% of the total. The main components of VOCs emitted from the pelletizing process were aromatic hydrocarbons and oxygenated compounds, accounting for 71.8% of the total. Oxygenated compounds and aromatic hydrocarbons, which contributed equally, were also the main groups of VOCs discharged by the wet extraction process, and the sum proportion of the two groups was 84.2%. Halogenated hydrocarbon was the dominant group of VOCs from the pyrometallurgical process, accounting for 92.1% of the sum of VOCs. There was a substantial divergence in the total VOCs emission factors of different production processes. The ranking of the mean values of emission factors of total VOCs was as follows: the heating baking board (electric heater) process  $(297.0\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}) >$  plastic granulation process  $(29.5\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}) >$  wet extraction process  $(25.4\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}) >$  heating baking board (heating rotary plate furnace) process  $(25.2\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}) >$  pyrometallurgical process  $(1.9\text{ g}\cdot\text{t}^{-1})$ . Therefore, the main VOCs emission processes of the e-waste centralized dismantling and recycling industry were the heating baking board process and plastic granulation process.

**Key words:** E-waste dismantling and recycling; volatile organic compounds (VOCs); emission characteristics; emission factors; organized emission

电子垃圾是目前全球增长最快的固体废物,每年约增长4%<sup>[1~3]</sup>.电子垃圾中关键零件和印刷电路板组件含有大量的贵金属,因具有很高的回收再利用价值,经常被用于拆解回收<sup>[4~7]</sup>.然而,在拆解回收过程中,电子垃圾的高温处理会释放大量的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs),对

收稿日期: 2021-04-15; 修订日期: 2021-06-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1803904, 2018YFC1801602); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-202011-317, PM-zx703-202004-148); 湖南省重点研发计划项目(2018SK2039)

作者简介: 谢丹平(1980~),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为有机污染物环境行为, E-mail: xiedanping@scies.org

\* 通信作者, E-mail: huangzhonghui@scies.org

周边环境和人体健康产生危害<sup>[8~10]</sup>,同时对区域大气臭氧和 PM<sub>2.5</sub> 污染也具有重要贡献<sup>[11~14]</sup>.

目前,电子垃圾拆解回收行业的污染问题研究主要集中在空气、水和土壤中的重金属、半挥发性有机物(SVOCs)和持久性有机污染物(POPs)<sup>[15~27]</sup>,而关于 VOCs 的污染排放特征研究匮乏,仅有少量无组织废气 VOCs 污染特征的研究,均是采集小作坊室内或室外空气<sup>[18,28~30]</sup>.近年随着电子垃圾拆解导致的环境污染问题受到政府和公众高度关注,产业园区集中式有组织废气排放逐渐取代家庭小作坊分散式无组织废气排放,但至今未有研究报道电子垃圾拆解回收行业有组织废气中 VOCs 排放特征.因此,为补充电子垃圾拆解回收行业 VOCs 排放源谱的缺失,制定科学合理的 VOCs 排放削减政策,亟需针对电子垃圾拆解回收行业开展 VOCs 有组织排放特征研究.

本研究选取某典型电子垃圾集中拆解回收场,在该场的加热烤板车间、塑料制粒车间、湿法提取车间和火法冶炼车间废气处理设施排放口采集 VOCs 样品,分析不同工艺排放的 VOCs 组分和浓度,并计算总 VOCs 排放因子,有助于健全我国电子垃圾拆解回收行业 VOCs 排放源成分谱和排放清单,以期制定相关控制措施和大气环境管理决策提供参考.

表 1 不同电子垃圾拆解回收工艺有组织排放废气 VOCs 样品采集信息

Table 1 Collection information of VOCs samples emitted from different e-waste dismantling and recycling processes

车间工艺类型	电子垃圾类型	采集的废气排放口数量	采样时间/h	采样频次/次·d <sup>-1</sup>	样品数量
加热烤板-电热炉	废旧线路板和元器件	17	1	3	51
加热烤板-加热滚板炉	废旧线路板和元器件	2	1	3	6
塑料制粒	废旧塑料	3	1	3	9
湿法提取	废旧线路板和元器件	1	1	3	3
火法冶炼	废旧线路板和元器件	1	1	3	3

## 1.2 样品分析

样品经过 Entech 7100 低温预浓缩仪后,采用气相色谱-质谱联用分析技术(7890A GC-5975C MS, 安捷伦,美国)分析 67 种 VOCs 化合物,包含脂肪烃、芳香烃、卤代烃、含氧挥发性物质和含硫挥发性物质等. VOCs 组分通过 DB-624 色谱柱(60 m × 0.25 mm × 1.8 μm, 安捷伦,美国)进行分离后进入 MS 进行检测. GC-MS 系统的升温程序如下:GC 柱箱初始温度为 30℃,保持 7 min,然后以 5℃·min<sup>-1</sup> 升温至 120℃,保持 5 min,再以 6℃·min<sup>-1</sup> 升温至 180℃并保持 8 min. MS 以单扫模式工作,离子化方式为电子轰击(electron impacting, EI, 70 eV),载气为高纯氮气(纯度 >99.999%). 依照 VOCs 源成分

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

本研究选取某电子垃圾集中拆解回收场,在涉及排放 VOCs 的加热烤板、塑料制粒、湿法提取和火法冶炼等 4 个车间工艺废气处理设施排放口使用 3 L 苏玛罐采集源排放样品. 电子垃圾拆解回收工艺整体流程如图 1 所示,详细的采样信息如表 1 所示.

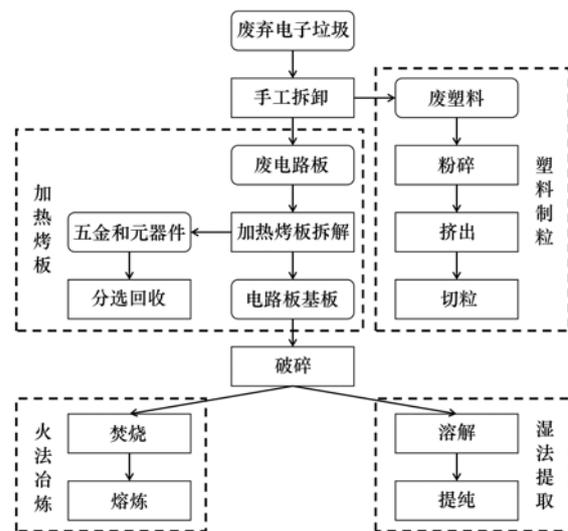


图 1 电子垃圾拆解回收工艺整体流程示意

Fig. 1 Schematic of e-waste dismantling and recycling processes

谱构建的需求,所有 VOCs 物种的浓度均换算成  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 1.3 质量控制

采样罐内表面均经过特殊的 Silonite 钝化处理,保证目标化合物在采样罐内不会产生吸附和改变其化学性质. 采样前,所有采样罐均被高纯氮气清洗至少 5 次,随机抽取 20% 采样罐,充入高纯氮气进行空白实验,空白样品目标物均低于方法检出限. 目标化合物基于保留时间和质谱图定性,基于内标法定量. 校准标气和内标分别来自美国 Spectra Gases 公司生产的 Photochemical Assessment Monitoring Stations (PAMS) 标气(体积分数为  $100 \times 10^{-9}$ )、TO-15 标气(体积分数为  $100 \times 10^{-9}$ )和

4 种内标化合物气体(溴氯甲烷、1,4-二氟苯、氘代氯苯和 1-溴-4-氟苯,体积分数为  $100 \times 10^{-9}$ ),校准曲线由零气和稀释后的 5 个梯度标气(体积分数分别为 0、1、5、10、20 和  $30 \times 10^{-9}$ )绘制而成,内标体积分数为  $10 \times 10^{-9}$ .标准曲线相关系数  $R^2$  在 0.992~0.999 之间,目标化合物的方法检出限在  $8 \times 10^{-12}$ ~ $67 \times 10^{-12}$ .每 24 h 分析一个实验室空白样品和一个中间浓度标准样品( $5 \times 10^{-9}$ ),空白样品中目标化合物浓度应低于方法检出限,中间点标样浓度测定值与实际值相对偏差应  $\leq 10\%$ ,否则重新建立标准曲线.

#### 1.4 排放因子计算

为完善电子垃圾拆解回收行业 VOCs 排放清单,对加热烤板工艺、塑料制粒工艺、湿法提取工艺和火法冶炼工艺的总 VOCs 排放因子(emission factor, EF)进行计算:

$$EF = K \times c / (m \times 10^6)$$

式中,EF 为总 VOCs 排放因子( $g \cdot t^{-1}$ ), $K$  为标况(273.15 K、101.325 kPa)下烟气排放流量( $m^3 \cdot h^{-1}$ ), $c$  为排放的 VOCs 总浓度( $\mu g \cdot m^{-3}$ ), $m$  为原材料消耗量( $t \cdot h^{-1}$ ).不同生产工艺总 VOCs 排放因子计算的相关变量参数见表 2.

表 2 不同生产工艺总 VOCs 排放因子计算的相关变量参数

Table 2 Parameters of the variables for the calculation of total VOCs emission factors from different e-waste dismantling and recycling processes

生产工艺	废气排放口编号	废气处理工艺	标况下烟气流量 $/m^3 \cdot h^{-1}$	原材料消耗量 $\times 10^{-3}/t \cdot h^{-1}$
加热烤板-电热炉	1	静电油烟净化器 + 紫外线光解氧化器	36 686	22
	2	电除尘 + 光催化氧化净化器	33 234	36
	3	喷淋洗涤塔 + 机械过滤器 + 静电烟雾净化器 + 光触媒废气净化器	32 418	44
	4	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	33 116	44
	5	喷淋洗涤塔 + 机械过滤器 + 静电烟雾净化器 + 光触媒废气净化器	44 466	25
	6	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	7 848	1 167
	7	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	117 230	2 333
	8	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	102 145	2 100
	9	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	13 411	2 333
	10	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	58 530	2 333
	11	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	21 484	2 333
	12	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	10 844	583
	13	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	22 582	1 167
	14	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	19 239	1 167
	15	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	17 300	1 167
	16	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	17 300	1 167
	17	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	75 421	2 333
加热烤板-加热滚板炉	1	喷淋洗涤塔 + 机械过滤器 + 静电烟雾净化器 + 光触媒废气净化器	19 503	2 222
	2	喷淋洗涤塔 + 机械过滤器 + 静电烟雾净化器 + 光触媒废气净化器	32 332	2 222
塑料制粒	1	喷淋洗涤塔 + 干式过滤 + 活性炭吸附	10 055	889
	2	喷淋洗涤塔 + 干式过滤 + 活性炭吸附	10 979	667
	3	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	10 528	778
湿法提取	1	旋风除尘 + 布袋除尘 + 活性炭吸附	117 230	100
火法冶炼	1	布袋除尘 + 二级碱液喷淋 + 活性炭吸附	9 461	2 222

## 2 结果与讨论

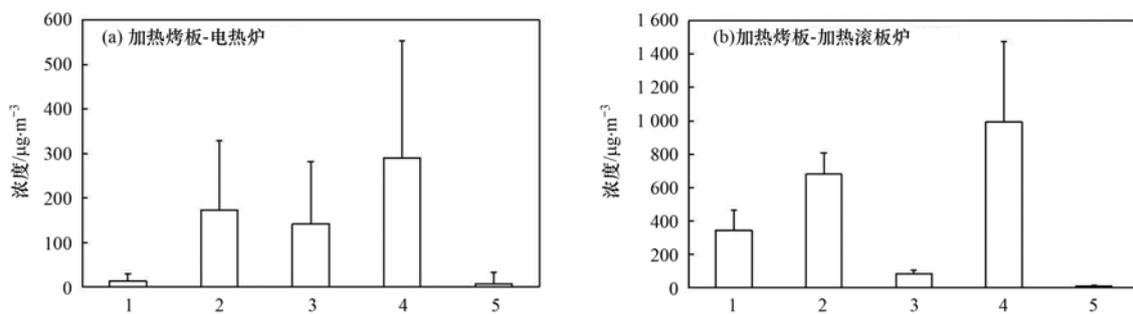
### 2.1 加热烤板工艺 VOCs 排放特征

加热烤板工艺使用两种加热炉,可细分为两种工艺:加热烤板-电热炉工艺和加热烤板-加热滚板炉工艺.加热烤板-电热炉工艺和加热烤板-加热滚板炉工艺有组织排放的  $\rho$ (总 VOCs) 分别是  $(625.3 \pm 535.5) \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(2096.1 \pm 732.4) \mu g \cdot m^{-3}$ ,加热滚板炉排放的 VOCs 总浓度平均值是电热炉的 3.35 倍.这可能由于加热滚板炉的操作温度高于电热炉,导致加热滚板炉中废旧线路板热解排放出更多的 VOCs.

为了便于分析,将排放的 VOCs 分为脂肪烃、芳香烃、卤代烃、含氧挥发性物质和含硫挥发性物质等 5 类.如图 2 所示,加热烤板工艺中电热炉排放的上述 5 类物质平均浓度分别是 13.2、173.3、142.1、289.8 和  $6.9 \mu g \cdot m^{-3}$ ,加热滚板炉排放的上述 5 类物质平均浓度分别是 341.4、678.8、81.9、992.1 和  $1.8 \mu g \cdot m^{-3}$ .此外,加热烤板-电热炉工艺排放的废气有 4 种处理工艺,但排放的 VOCs 组分比例差异较小,5 类物质质量分数范围分别是 1.5%~3.4%、24.0%~31.3%、16.6%~32.1%、36.1%~50.7% 和 0.0%~1.5%.总体来看,含氧化合物是电热炉和加热滚板炉排放的 VOCs 中最主要

的成分,质量分数均接近总浓度 1/2,分别达到 46.3% 和 47.3%; 芳香烃排放浓度在两类加热烤板工艺中质量分数均排名第二,分别为 27.7% 和 32.4%; 电热炉排放的卤代烃排名第三,质量分数为 22.7%, 脂肪烃和含硫化合物质量分数较小,分别为 2.1% 和 1.1%; 而加热滚板炉排放的脂肪烃排名第三,质量分数达到 16.3%, 卤代烃和含硫化合物的质量分数较小,分别为 3.9% 和 0.1%。因此,加热烤板-电热炉工艺和加热烤板-加热滚板炉工艺有组织排放的 VOCs 主要成分是含氧化合物

和芳香烃,两类物质总和和质量分数在 74.1% ~ 79.7%。该组分特征可能是因为废旧线路板原材料高温热解产生大量芳香烃,其中部分芳香烃进一步发生不完全氧化反应与电线外皮聚氯乙烯(PVC)和尼龙(PA)高温热解产生含氧化合物<sup>[11,17,18,28,31]</sup>。An 等<sup>[18]</sup>的研究结果表明,加热烤板工艺产生的 VOCs 主要组分是芳香烃和卤代烃(质量分数总和超过 90%),这是由于该研究的电子垃圾的原材料与本研究不同,除了废旧线路板,还包括电视和供电器的塑料外壳。



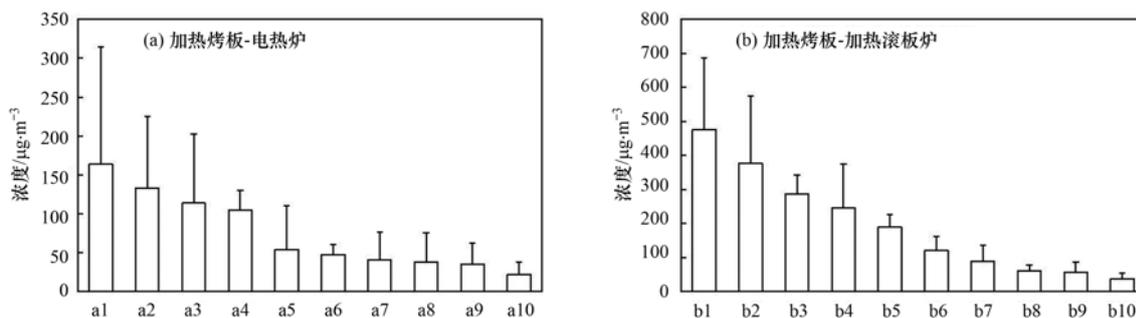
1. 脂肪烃, 2. 芳香烃, 3. 卤代烃, 4. 含氧化合物, 5. 含硫化合物; 误差线为标准偏差, 下同

图 2 两种加热烤板工艺有组织排放的 VOCs 组分浓度

Fig. 2 Concentrations of five groups of VOCs emitted from the two heating baking board processes

如图 3 所示,加热烤板-电热炉工艺有组织排放的前 10 种 VOCs 物质分别是:丙烯醛、甲苯、丙酮、甲硫醚、1,2-二氯丙烷、溴甲烷、氯甲烷、氯乙烷、苯乙烯和氯仿,合计质量分数为 74.5%。加热烤板-

加热滚板炉工艺有组织排放的前 10 种 VOCs 物质分别是:丙烯醛、丙酮、苯、丙烯、苯乙烯、甲苯、1,3-丁二烯、氯甲烷、异丙醇和 1,2,4-三甲苯,合计质量分数为 89.9%。



a1. 丙烯醛, a2. 甲苯, a3. 丙酮, a4. 甲硫醚, a5. 1,2-二氯丙烷, a6. 溴甲烷, a7. 氯甲烷, a8. 氯乙烷, a9. 苯乙烯, a10. 氯仿; b1. 丙烯醛,

b2. 丙酮, b3. 苯, b4. 丙烯, b5. 苯乙烯, b6. 甲苯, b7. 1,3-丁二烯, b8. 氯甲烷, b9. 异丙醇, b10. 1,2,4-三甲苯

图 3 两种加热烤板工艺有组织排放的前 10 种 VOCs 化合物浓度

Fig. 3 Concentrations for the top ten compounds emitted from the two heating baking board processes

如表 3 所示,在加热烤板-电热炉工艺有组织排放的 VOCs 中,丙烯[(14.2 ± 12.5) μg·m<sup>-3</sup>]和正庚烷[(6.1 ± 5.0) μg·m<sup>-3</sup>]是脂肪烃的主要成分,质量分数分别为 49% 和 21%; 甲苯[(132.8 ± 91.9) μg·m<sup>-3</sup>]和苯乙烯[(34.8 ± 27.5) μg·m<sup>-3</sup>]是芳香烃的主要成分,质量分数分别为 58% 和 15%; 卤代烃各物种质量浓度差异较小,1,2-二氯丙烷[(53.6 ± 36.6) μg·m<sup>-3</sup>]和溴甲烷[(47.4 ± 13.1)

μg·m<sup>-3</sup>]是卤代烃的主要成分,质量分数分别为 18% 和 16%; 丙烯醛[(163.6 ± 151.2) μg·m<sup>-3</sup>]和丙酮[(113.5 ± 88.5) μg·m<sup>-3</sup>]是含氧化合物的主要成分,质量分数分别为 49% 和 34%; 甲硫醚[(104.4 ± 25.1) μg·m<sup>-3</sup>]是含硫化合物的主要成分,质量分数为 88%。

如表 4 所示,在加热烤板-加热滚板炉工艺有组织排放中,丙烯[(245.9 ± 129.5) μg·m<sup>-3</sup>]是脂肪

表 3 加热烤板-电热炉工艺有组织排放的 5 类 VOCs 物种的质量分数

Table 3 Percentages of different compounds in five groups of VOCs emitted from the heating baking board (electric heater) process

VOCs 类别	物种	质量分数/%
脂肪烃	丙烯	49
	1,3-丁二烯	11
	正己烷	19
	正庚烷	21
芳香烃	苯	8
	甲苯	58
	乙苯	5
	邻/间-二甲苯	4
	对-二甲苯	4
	苯乙烯	15
	4-乙基甲苯	1
	1,2,4-三甲苯	4
	氯甲苯	1
	卤代烃	氯甲烷
溴甲烷		16
氯乙烷		13
溴乙烷		6
1,2,2-三氟-1,1,2-三氯乙烷		1
顺-1,3-二氯丙烯		5
二氯甲烷		6
顺-1,2-二氯乙烷		5
氯仿		7
1,1,1-三氯乙烷		1
四氯化碳		6
三氯乙烯		1
1,2-二氯丙烷		18
反-1,3-二氯-1-丙烯		1
含氧化合物	丙酮	34
	异丙醇	4
	2-甲氧基-甲基丙烷	2
	2-丁酮	4
	乙酸乙酯	1
	四氢呋喃	2
	甲基丙烯酸甲酯	1
	1,4-二恶烷	1
	4-甲基-2-戊酮	1
	2-己酮	1
含硫化化合物	丙烯醛	49
	二硫化碳	9
	甲硫醚	88
	二甲二硫醚	3

烃的主要成分,质量分数为 71%; 苯 $[(286.3 \pm 55.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 和苯乙烯 $[(188.8 \pm 37.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 是芳香烃的主要成分,质量分数分别为 42% 和 28%; 氯甲烷 $[(59.7 \pm 17.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 和二氯甲烷 $[(18.2 \pm 13.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 是卤代烃的主要成分,质量分数分别为 50% 和 15%; 丙烯醛 $[(475.8 \pm 211.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 和丙酮 $[(377.0 \pm 196.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 是含氧化合物的主要成分,质量分数分别为 48% 和 38%; 二硫化碳 $[(10.8 \pm 0.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 是唯一检出

表 4 加热烤板-加热滚板炉工艺有组织排放的 5 类 VOCs 物种质量分数

Table 4 Percentages of different compounds in five groups of VOCs emitted from the heating baking board (heating rotary plate furnace) process

VOCs 类别	物种	质量分数/%	
脂肪烃	丙烯	71	
	1,3-丁二烯	25	
	正己烷	1	
	正庚烷	3	
芳香烃	苯	42	
	甲苯	18	
	氯苯	1	
	乙苯	3	
	邻/间-二甲苯	1	
	对-二甲苯	1	
	苯乙烯	28	
	1,2,4-三甲苯	5	
	氯甲苯	1	
	卤代烃	氯甲烷	50
氯乙烷		3	
氯乙烷		5	
溴乙烷		4	
1,2,2-三氟-1,1,2-三氯乙烷		2	
顺-1,3-二氯丙烯		1	
二氯甲烷		15	
1,1,1-三氯乙烷		4	
反-1,2-二氯乙烷		9	
三氯乙烯		4	
1,2-二氯丙烷		1	
1,1,2,2-四氯乙烷		2	
含氧化合物		丙酮	38
		异丙醇	6
	2-甲氧基-甲基丙烷	1	
	2-丁酮	3	
	乙酸乙酯	1	
	四氢呋喃	3	
含硫化化合物	丙烯醛	48	
	二硫化碳	100	

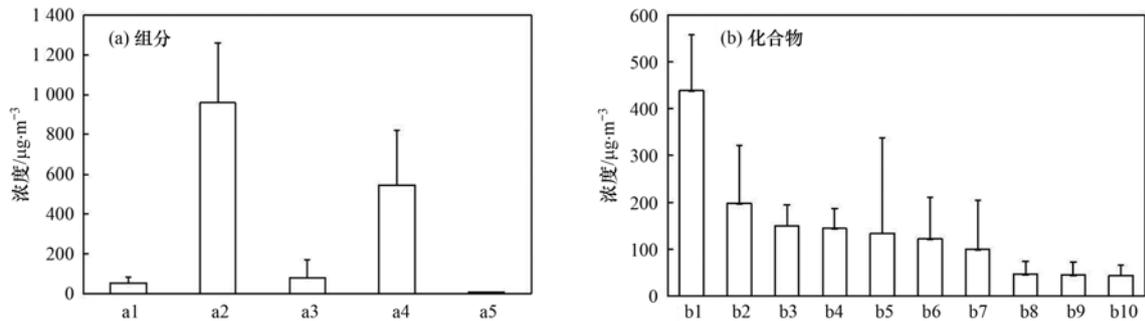
的含硫化化合物。

对比表 3 和表 4 可知,两种加热烤板工艺排放的 VOCs 中,丙烯是脂肪烃的主要成分,苯、甲苯和苯乙烯是芳香烃的主要成分,氯甲烷是卤代烃的主要成分,含氧化合物的主要成分相同、组分比例相近,均为丙烯醛和丙酮,而含硫化化合物的成分差异较大。

## 2.2 塑料制粒工艺 VOCs 排放特征

塑料制粒工艺有组织排放的  $\rho$  (总 VOCs) 为  $(1639.1 \pm 538.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 排放浓度仅次于加热烤板-加热滚板炉工艺。如图 4 所示,塑料制粒工艺排放的平均  $\rho$  (脂肪烃)、 $\rho$  (芳香烃)、 $\rho$  (卤代烃)、 $\rho$  (含氧挥发性物质) 和  $\rho$  (含硫挥发性物质) 分别是 53.6、958.9、80.2、546.3 和  $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。此外,塑料制粒工艺排放的废气有 2 种处理工艺,但排放的

VOCs 组分比例差异较小, 5 类物质的质量分数范围分别是 2.5%~3.5%、57.9%~59.2%、3.2%~12.6%、25.7%~35.4% 和 0.0%。总体来看, 芳香烃是塑料制粒工艺排放的 VOCs 中最主要的成分, 质量分数达到 45.7%; 其次为含氧化合物, 质量分数为 26.1%; 卤代烃、脂肪烃和含硫化化合物的质量分数较小, 分别为 3.8%、2.6% 和 0.0%。该组分特征



a1. 脂肪烃, a2. 芳香烃, a3. 卤代烃, a4. 含氧挥发性物质, a5. 含硫挥发性物质; b1. 苯乙烯, b2. 甲基丙烯酸甲酯, b3. 甲苯, b4. 乙苯, b5. 四氢呋喃, b6. 丙酮, b7. 氯苯, b8. 对-二甲苯, b9. 一氟三氯甲烷, b10. 邻/间-二甲苯

图 4 塑料制粒工艺有组织排放的 VOCs 组分和排名前 10 化合物的浓度

Fig. 4 Concentrations for five groups of VOCs and the top ten compounds emitted from the plastic granulation process

如表 5 所示, 在塑料制粒工艺有组织排放中, 正庚烷  $[(35.4 \pm 26.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  是脂肪烃的主要成分, 质量分数为 64%; 苯乙烯  $[(439.1 \pm 120.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 、甲苯  $[(150.5 \pm 44.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  和乙苯  $[(144.6 \pm 41.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  是芳香烃的主要成分, 质量分数分别为 44%、15% 和 15%, 该结果与 He 等<sup>[28]</sup> 的研究结果一致, 苯乙烯、甲苯和乙苯是 ABS 和 PS 塑料热解产生芳香烃的主要成分。一氟三氯甲烷  $[(45.1 \pm 27.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  和氯仿  $[(41.5 \pm 23.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  是卤代烃的主要成分, 质量分数分别为 31% 和 29%; 甲基丙烯酸甲酯  $[(198.4 \pm 123.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 、四氢呋喃  $[(134.6 \pm 103.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  和丙酮  $[(122.6 \pm 88.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  是含氧化合物的主要成分, 质量分数分别为 35%、24% 和 22%; 二硫化碳  $[(1.0 \pm 0.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  是唯一检出的含硫化化合物。

### 2.3 湿法提取工艺 VOCs 排放特征

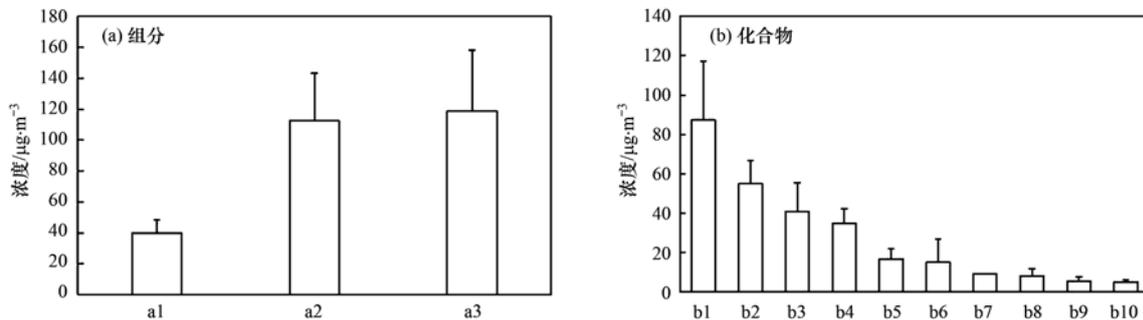
湿法提取工艺是使用酸液在常温下溶解回收废旧电路板中贵金属, 因此该工艺产生的 VOCs 较少, 有组织排放的  $\rho$  (总 VOCs) 为  $(271.3 \pm 73.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 是本研究中排放 VOCs 浓度最低的生产工艺。如图 5 所示, 湿法提取工艺排放的平均  $\rho$  (脂肪烃)、 $\rho$  (芳香烃) 和  $\rho$  (含氧挥发性物质) 分别是 40.0、112.5 和  $118.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 卤代烃和含硫挥发性物质未检出。由此可知, 含氧化合物是湿法提取工艺排放的 VOCs 中最主要的成分, 质量分数达到 43.8%; 芳香烃排放浓度排名第二, 但占比与含氧

可能是因为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 和聚苯乙烯 (PS) 塑料高温热解产生大量芳香烃, 聚氯乙烯 (PVC) 和尼龙 (PA) 塑料高温热解产生较多含氧化合物<sup>[17,18,28,31]</sup>。塑料制粒工艺有组织排放的前 10 种 VOCs 物质分别是苯乙烯、甲基丙烯酸甲酯、甲苯、乙苯、四氢呋喃、丙酮、氯苯、对-二甲苯、一氟三氯甲烷和邻/间-二甲苯, 合计质量分数为 81.0%。

表 5 塑料制粒工艺有组织排放的 5 类 VOCs 物种质量分数

Table 5 Percentages of different compounds in five groups of VOCs emitted from the plastic granulation process

VOCs 类别	物种	质量分数/%	
脂肪烃	丙烯	8	
	1,3-丁二烯	15	
	正己烷	4	
	环己烷	9	
	正庚烷	64	
芳香烃	苯	1	
	甲苯	15	
	氯苯	10	
	乙苯	15	
	邻/间-二甲苯	5	
	对-二甲苯	5	
	苯乙烯	44	
	4-乙基甲苯	2	
	1,2,4-三甲苯	3	
	卤代烃	氯甲烷	5
溴甲烷		2	
氯乙烷		1	
一氟三氯甲烷		31	
二氯甲烷		11	
氯仿		29	
反-1,2-二氯乙烯		14	
1,2-二氯丙烷		2	
1,2-二溴乙烷		1	
三溴甲烷		2	
1,1,2,2-四氯乙烷		2	
含氧化合物		丙酮	22
		异丙醇	1
	2-甲氧基-甲基丙烷	1	
	2-丁酮	6	
	乙酸乙酯	3	
	四氢呋喃	24	
	甲基丙烯酸甲酯	35	
	1,4-二恶烷	1	
	4-甲基-2-戊酮	2	
	丙烯醛	5	
含硫化化合物	二硫化碳	100	



a1. 脂肪烃, a2. 芳香烃, a3. 含氧挥发性物质; b1. 苯, b2. 丙酮, b3. 丙烯醛, b4. 丙烯, b5. 甲苯, b6. 异丙醇, b7. 2-丁酮, b8. 苯乙烯, b9. 1,3-丁二烯, b10. 4-甲基-2-戊酮

图5 湿法提取工艺有组织排放的 VOCs 组分和排名前 10 的化合物的浓度

Fig. 5 Concentrations for five groups of VOCs and the top ten compounds emitted from the wet extraction process

化合物接近,质量分数达到 41.4%; 脂肪烃排名第三,质量分数为 14.7%. 因此,湿法提取工艺有组织排放的 VOCs 主要成分是含氧化合物和芳香烃,两类物质总和质量分数为 84.2%. 该组分特征可能是因为酸液溶解电路板上贵金属的同时,也在分解废旧线路板上的塑料聚合物,产生较多含氧化合物和芳香烃. 湿法提取工艺有组织排放的前 10 种 VOCs 物质分别是苯、丙酮、丙烯醛、丙烯、甲苯、异丙醇、2-丁酮、苯乙烯、1,3-丁二烯和 4-甲基-2-戊酮,合计质量分数为 98.2%.

如表 6 所示,丙烯 [ $(34.7 \pm 7.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] 是脂肪烃的主要成分,质量分数为 87%; 苯 [ $(87.3 \pm 29.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] 是芳香烃的主要成分,质量分数为 77%; 丙酮 [ $(54.8 \pm 12.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] 和丙烯醛 [ $(40.7 \pm 14.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] 是含氧化合物的主要成分,质量分数分别为 43% 和 32%.

2.4 火法冶炼工艺 VOCs 排放特征

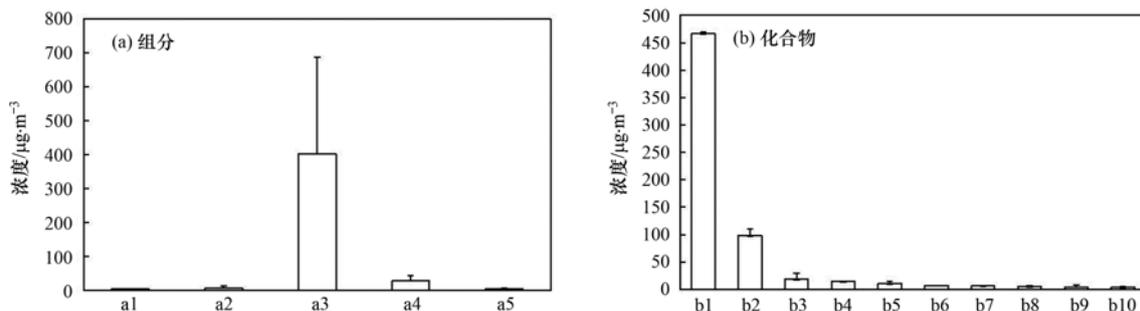
火法冶炼工艺是使用流态化焚烧炉处理废旧印刷电路板,可完全焚烧碳化电子垃圾,同时焚烧烟气经由“布袋除尘 + 二级碱液喷淋 + 活性炭吸附”高效处理,因此该工艺产生的 VOCs 也较少,有组织排放的  $\rho$ (总 VOCs) 为  $(436.8 \pm 305.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,排放

表 6 湿法提取工艺有组织排放的 3 类 VOCs 物种质量分数

Table 6 Percentages of different compounds in three groups of VOCs emitted from the wet extraction process

VOCs 类别	物种	质量分数/%
脂肪烃	丙烯	87
	1,3-丁二烯	13
芳香烃	苯	77
	甲苯	15
	对-二甲苯	1
	苯乙烯	7
含氧化合物	丙酮	43
	异丙醇	11
	2-丁酮	7
	四氢呋喃	1
	甲基丙烯酸甲酯	2
	4-甲基-2-戊酮	4
	丙烯醛	32

浓度仅高于湿法提取工艺. 如图 6 所示,火法冶炼工艺排放的平均  $\rho$ (脂肪烃)、 $\rho$ (芳香烃)、 $\rho$ (卤代烃)、 $\rho$ (含氧挥发性物质) 和  $\rho$ (含硫挥发性物) 分别是 0.2、5.9、402.4、27.0 和 1.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 由此可知,卤代烃是火法冶炼工艺排放的 VOCs 中最主要的成分,质量分数高达到 92.1%; 含氧化合物、芳香烃、含硫化合物和脂肪烃的质量分数较低,分



a1. 脂肪烃, a2. 芳香烃, a3. 卤代烃, a4. 含氧挥发性物质, a5. 含硫挥发性物质; b1. 三溴甲烷, b2. 二溴一氯甲烷, b3. 丙酮, b4. 四氯乙烯, b5. 溴甲烷, b6. 乙酸乙酯, b7. 苯乙烯, b8. 一溴二氯甲烷, b9. 氯仿, b10. 1,2,4-三甲苯

图 6 火法冶炼工艺有组织排放的 VOCs 组分和排名前 10 的化合物的浓度

Fig. 6 Concentrations for five groups of VOCs and the top ten compounds emitted from the pyrometallurgical process

别为 6.2%、1.4%、0.3% 和 0.04%。因此,火法冶炼工艺有组织排放的 VOCs 主要成分是卤代烃,可能的原因是高温焚烧会分解破坏卤代阻燃剂结构,导致生成小分子量的卤代烃;此外高温会促进烃类的氢原子被卤素原子取代<sup>[18]</sup>。由于 An 等<sup>[18]</sup>报道的旋转焚烧炉工艺原材料,除了常规的废旧线路板,还包括电视塑料外壳、微型电动机电线和环氧树脂印刷线路板,因此该研究的组分特征与本研究结果存在差异。火法冶炼工艺有组织排放的前 10 种 VOCs 物质分别是三溴甲烷、二溴一氯甲烷、丙酮、四氯乙烯、溴甲烷、乙酸乙酯、苯乙烯、一溴二氯甲烷、氯仿和 1,2,4-三甲苯,合计质量分数为 96.2%。

如表 7 所示,在火法冶炼工艺有组织排放中,正己烷 $[(0.5 \pm 0.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 是脂肪烃的唯一检出的成分,质量分数为 100%;苯乙烯 $[(6.3 \pm 0.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 是芳香烃的主要成分,质量分数为 46%;三溴甲烷 $[(466.5 \pm 3.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 是卤代烃的主要成分,质量分数为 77%;丙酮 $[(18.8 \pm 10.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 是含氧化合物的主要成分,质量分数为 50%;二硫化碳 $[(2.0 \pm 1.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 是唯一检出的含硫化合物。

表 8 不同生产工艺的总 VOCs 排放因子 (EFs) 均值

Table 3 Averages of total VOCs emission factors from different e-waste dismantling and recycling processes

生产工艺	废气处理工艺	EF 均值/ $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$
加热烤板-电热炉	静电油烟净化器 + 紫外线光解氧化器	1 694.8
	电除尘 + 光催化氧化净化器	1 048.3
	喷淋洗涤塔 + 机械过滤器 + 静电烟雾净化器 + 光触媒废气净化器	862.4
	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	123.8
加热烤板-加热滚板炉	喷淋洗涤塔 + 机械过滤器 + 静电烟雾净化器 + 光触媒废气净化器	25.2
塑料制粒	喷淋洗涤塔 + 干式过滤 + 活性炭吸附	29.5
	流化塔 + 布袋除尘 + 活性炭吸附塔	—
湿法提取	旋风除尘 + 布袋除尘 + 活性炭吸附	25.4
火法冶炼	布袋除尘 + 二级碱液喷淋 + 活性炭吸附	1.9

如表 8 所示,加热烤板-电热炉工艺的总 VOCs 的 EF 均值最大 $(297.0 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1})$ ,比其他 4 个生产工艺的 EF 均值高 1~2 个数量级,但 EF 变化范围较大,可能的原因是不同车间的原材料消耗量和烟气排放流量差异较大,并受不同废气处理工艺技术及其去除效率差异较大影响。本研究通过实测废气处理设施前后口废气样品,发现光催化或光解处理技术的处理效率 $(29.0\% \sim 75.3\%)$ 比活性炭吸附处理技术 $(88.8\% \sim 95.3\%)$ 低,前期研究也展示了相同的特征,如陈江耀等<sup>[32]</sup>采用光催化技术处理苯系物的中试研究中,稳定阶段的处理效率为 67.6%,而 Zeng 等<sup>[33]</sup>采用活性炭吸附技术处理电子拆解车间废气,处理效率可达 95%,因此,采用光催化或光解

表 7 火法冶炼工艺有组织排放的 5 类 VOCs 物种质量分数

Table 7 Percentages of different compounds in five groups of VOCs emitted from the pyrometallurgical process

VOCs 类别	物种	质量分数/%
脂肪烃	正己烷	100
	甲苯	26
芳香烃	苯乙烯	46
	1,2,4-三甲苯	28
卤代烃	溴甲烷	2
	二氯甲烷	1
	氯仿	1
	一溴二氯甲烷	1
	四氯乙烯	2
	二溴一氯甲烷	16
	三溴甲烷	77
	丙酮	50
含氧化合物	异丙醇	4
	2-丁酮	8
	乙酸乙酯	19
	四氢呋喃	8
	1,4-二恶烷	9
含硫化合物	丙烯醛	2
	二硫化碳	100

## 2.5 不同生产工艺总 VOCs 排放因子

根据 1.4 节排放因子公式和表 2 相关变量参数计算获得不同电子垃圾拆解回收工艺的总 VOCs 排放因子,具体的排放因子均值和范围如表 8 所示。

处理技术的加热烤板车间的总 VOCs EF 比采用活性炭吸附处理技术的其他 3 类车间的总 VOCs EF 高。加热烤板-加热滚板炉工艺 $(25.2 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1})$ 、塑料制粒工艺 $(29.5 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1})$ 和湿法提取工艺 $(25.4 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1})$ 的总 VOCs 的 EF 均值比较接近,EF 变化范围较小,可能的原因是不同车间的原材料消耗量和烟气排放流量差异较小。火法冶炼工艺的总 VOCs 的 EF 均值最小 $(1.9 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1})$ ,这可能由于 VOCs 经高温焚烧和高效的废气处理工艺被大量转化和吸附。加热烤板工艺、塑料制粒工艺和火法冶炼工艺的总 VOCs 的 EF 均值差异较大,除了上述因素外,还与操作温度有一定关系。加热烤板工艺和塑料制粒工艺的操作温度相对较低 $(100 \sim 300^\circ\text{C})$ ,随着操作温

度的上升, VOCs 的挥发产生量越多<sup>[18, 34, 35]</sup>; 火法冶炼工艺焚烧过程操作温度相对较高 ( $> 500^{\circ}\text{C}$ ), 随着操作温度的上升, VOCs 发生转化分解, 导致 VOCs 产生量减小。

### 3 结论

(1) 电子垃圾不同拆解回收工艺有组织排放的 VOCs 质量浓度差异较大, 排放的  $\rho$  (总 VOCs) 排序 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ): 加热烤板-加热滚板炉工艺 ( $2\,096.1 \pm 732.4$ )  $>$  塑料制粒工艺 ( $1\,639.1 \pm 538.5$ )  $>$  加热烤板-电热炉工艺 ( $625.3 \pm 535.5$ )  $>$  火法冶炼工艺 ( $436.8 \pm 305.2$ )  $>$  湿法提取工艺 ( $271.3 \pm 73.1$ )。

(2) 不同生产工艺有组织排放的 VOCs 组成差异也较大, 但总体以含氧化合物和芳香烃为主。具体组分特征为加热烤板-加热滚板炉工艺和加热烤板-电热炉工艺排放的 VOCs 质量浓度差异虽然较大, 但两种工艺排放的 VOCs 主要成分相同, 均是含氧化合物和芳香烃, 两类物质总和和质量分数在 74.1% ~ 79.7%; 塑料制粒工艺有组织排放的 VOCs 主要成分是芳香烃和含氧化合物, 两类物质总和和质量分数为 71.8%; 含氧化合物和芳香烃是湿法提取工艺有组织排放的 VOCs 主要成分, 两类物质贡献率接近, 且总和和质量分数达到 84.2%; 卤代烃是火法冶炼工艺有组织排放的 VOCs 中最主要的成分, 质量分数高达 92.1%。

(3) 不同生产工艺有组织排放的总 VOCs 排放因子差异也很显著, 总 VOCs 排放因子均值排序: 加热烤板-电热炉工艺 ( $297.0 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ )  $>$  塑料制粒工艺 ( $29.5 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ )  $>$  湿法提取工艺 ( $25.4 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ )  $>$  加热烤板-加热滚板炉工艺 ( $25.2 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ )  $>$  火法冶炼工艺 ( $1.9 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ )。因此, 电子垃圾拆解回收行业主要排放 VOCs 的工艺是加热烤板工艺和塑料制粒工艺。

#### 参考文献:

- [1] Andersson M, Wedel M K, Forsgren C, *et al.* Microwave assisted pyrolysis of residual fractions of waste electrical and electronics equipment [J]. *Minerals Engineering*, 2012, **29**: 105-111.
- [2] International Labor Organization (ILO). The global impact of e-waste: addressing the challenge [R]. Geneva: International Labor Office, 2012.
- [3] Forti V, Balde C P, Kuehr R, *et al.* The global e-waste monitor 2020: quantities, flows, and the circular economy potential [EB/OL]. [http://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/12/GEM\\_2020\\_def\\_dec\\_2020-1.pdf](http://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/12/GEM_2020_def_dec_2020-1.pdf), 2021-04-12.
- [4] Duan H B, Hou K, Li J H, *et al.* Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, **92**(3): 392-399.
- [5] Zhang B, Zhang T, Duan Y S, *et al.* Human exposure to phthalate esters associated with e-waste dismantling: Exposure levels, sources, and risk assessment [J]. *Environment International*, 2019, **124**: 1-9.
- [6] Zhao K L, Fu W J, Qiu Q Z, *et al.* Spatial patterns of potentially hazardous metals in paddy soils in a typical electrical waste dismantling area and their pollution characteristics [J]. *Geoderma*, 2019, **337**: 453-462.
- [7] 陈盼, 施晓清. 京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1976-1986.  
Chen P, Shi X Q. Predicting the recycling potential and evaluating the environmental benefits of waste electrical and electronic equipment in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1976-1986.
- [8] Ran J J, Kioumourtzoglou M A, Sun S Z, *et al.* Source-specific volatile organic compounds and emergency hospital admissions for cardiorespiratory diseases [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(17), doi: 10.3390/ijerph17176210.
- [9] Amor-Carro Ó, White K M, Fraga-Iriso R, *et al.* Airway hyperresponsiveness, inflammation, and pulmonary emphysema in rodent models designed to mimic exposure to fuel oil-derived volatile organic compounds encountered during an experimental oil spill [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2020, **128**(2), doi: 10.1289/ehp4178.
- [10] Chen D J, Liu R R, Lin Q H, *et al.* Volatile organic compounds in an e-waste dismantling region: from spatial-seasonal variation to human health impact [J]. *Chemosphere*, 2021, **275**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130022.
- [11] Alston S M, Clark A D, Arnold J C, *et al.* Environmental impact of pyrolysis of mixed WEEE plastics part 1: experimental pyrolysis data [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(21): 9380-9385.
- [12] Quan C, Li A M, Gao N B, *et al.* Characterization of products recycling from PCB waste pyrolysis [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2010, **89**(1): 102-106.
- [13] Ji Y M, Shi Q J, Li Y X, *et al.* Carbenium ion-mediated oligomerization of methylglyoxal for secondary organic aerosol formation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(24): 13294-13299.
- [14] Lu K D, Fuchs H, Hofzumahaus A, *et al.* Fast photochemistry in wintertime haze: consequences for pollution mitigation strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(18): 10676-10684.
- [15] Alston S M, Arnold J C. Environmental impact of pyrolysis of mixed WEEE plastics part 2: life cycle assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(21): 9386-9392.
- [16] Man M, Naidu R, Wong M H. Persistent toxic substances released from uncontrolled e-waste recycling and actions for the future [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **463-464**: 1133-1137.
- [17] Sun J, Wang W L, Liu Z, *et al.* Recycling of waste printed circuit boards by microwave-induced pyrolysis and featured mechanical processing [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, **50**(20): 11763-11769.
- [18] An T C, Huang Y, Li G Y, *et al.* Pollution profiles and health risk assessment of VOCs emitted during e-waste dismantling processes associated with different dismantling methods [J]. *Environment International*, 2014, **73**: 186-194.
- [19] Hadi P, Barford J, McKay G. Toxic heavy metal capture using a novel electronic waste-based material-mechanism, modeling and comparison [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**

- (15): 8248-8255.
- [20] Huang H J, Cai C Y, Yu S Y, *et al.* Emission behaviors of nitro- and oxy-polycyclic aromatic hydrocarbons during pyrolytic disposal of electronic wastes [J]. *Chemosphere*, 2019, **222**: 267-274.
- [21] Li J, Li W Z, Gao X M, *et al.* Occurrence of multiple classes of emerging photoinitiators in indoor dust from e-waste recycling facilities and adjacent communities in south china and implications for human exposure [J]. *Environment International*, 2020, **136**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105462.
- [22] 魏抱楷, 柳晨, 王英, 等. 浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4740-4748.
- Wei B K, Liu C, Wang Y, *et al.* Polybrominated diphenyl ether in e-waste dismantling sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, distribution, and migration trend [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4740-4748.
- [23] 曹红梅, 赵留元, 穆熙, 等. 西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1101-1110.
- Cao H M, Zhao L Y, Mu X, *et al.* Pollution characteristics and occupational exposure risk of heavy metals in indoor and outdoor ambient particles at a scaled electronic waste dismantling plant, Northwest China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1101-1110.
- [24] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 916-926.
- Yin Y M, Zhao W T, Huang T, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an e-waste dismantling area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 916-926.
- [25] 严骁, 李淑圆, 王美欢, 等. 电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析: 以清远市龙塘镇为例 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 953-960.
- Yan X, Li S Y, Wang M H, *et al.* Liver and kidney function of e-waste dismantling workers and potential influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 953-960.
- [26] 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军. 电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评估 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4432-4440.
- Zhang L Y, Zhao K L, Fu W J. Spatial distribution characteristics and risk assessment of cadmium pollution for soil-crops system in e-waste dismantling area [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4432-4440.
- [27] 朱帅, 刘世东. 电子垃圾拆解区土壤中典型手性 PCBs 分布及对映体特征 [J]. *环境化学*, 2021, **40**(3): 671-677.
- Zhu S, Liu S D. Distribution and enantioselective characteristics of typical polychlorinated biphenyls in soils at an e-waste site [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(3): 671-677.
- [28] He Z G, Li G Y, Chen J Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops [J]. *Environment International*, 2015, **77**: 85-94.
- [29] Huang D Y, Zhou S G, Hong W, *et al.* Pollution characteristics of volatile organic compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters emitted from plastic wastes recycling granulation plants in Xingtian Town, South China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 327-334.
- [30] Guo J, Luo X M, Tan S F, *et al.* Thermal degradation and pollutant emission from waste printed circuit boards mounted with electronic components [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **382**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121038.
- [31] Moltó J, Egea S, Conesa J A, *et al.* Thermal decomposition of electronic wastes: mobile phone case and other parts [J]. *Waste Management*, 2011, **31**(12): 2546-2552.
- [32] 陈江耀, 张德林, 李建军, 等. 光催化与生物技术联用工艺处理油漆废气中试研究 [J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(6): 1389-1393.
- Chen J Y, Zhang D L, Li J J, *et al.* Pilot-scale study of removal of paint waste gas by combined technique of photocatalysis with biotechnology [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(6): 1389-1393.
- [33] Zeng H M, Deng G Y, Chen D S, *et al.* Treatment of waste gas from electronic dismantling workshop [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, **781**, doi: 10.1088/1755-1315/781/5/052013.
- [34] Tan S F, Chen Z Y, Wang R, *et al.* Emission characteristics of polybrominated diphenyl ethers from the thermal disassembly of waste printed circuit boards [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **226**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117402.
- [35] Cabanes A, Valdés F J, Fullana A. A review on VOCs from recycled plastics [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, **25**, doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00179.

## CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China .....	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 1 )
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review .....	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> ( 11 )
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge .....	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> ( 26 )
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China .....	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> ( 37 )
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China .....	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> ( 46 )
Real-time Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan .....	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> ( 61 )
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM <sub>2.5</sub> in Yuncheng City .....	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> ( 74 )
Three-dimensional Structure Variation of PM <sub>2.5</sub> During Cold Front Advance in Eastern China .....	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen ( 85 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> ( 93 )
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China .....	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> ( 102 )
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa .....	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> ( 113 )
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period .....	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> ( 123 )
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb .....	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> ( 132 )
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O <sub>3</sub> and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China .....	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> ( 140 )
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes .....	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> ( 150 )
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels .....	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> ( 160 )
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo .....	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> ( 170 )
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City .....	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> ( 180 )
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust .....	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> ( 189 )
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources .....	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> ( 199 )
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China .....	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> ( 210 )
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin .....	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> ( 220 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake .....	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> ( 230 )
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals .....	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> ( 239 )
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing .....	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> ( 247 )
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water .....	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> ( 256 )
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course .....	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> ( 267 )
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City .....	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> ( 277 )
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules .....	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> ( 285 )
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries .....	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> ( 295 )
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification .....	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> ( 306 )
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir .....	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> ( 314 )
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China .....	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan ( 329 )
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta .....	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> ( 339 )
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area .....	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> ( 349 )
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers .....	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> ( 363 )
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration .....	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> ( 369 )
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO <sub>2</sub> Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area .....	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> ( 377 )
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red .....	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> ( 387 )
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter .....	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> ( 398 )
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment .....	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 409 )
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community .....	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> ( 416 )
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics .....	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> ( 424 )
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model .....	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> ( 432 )
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China .....	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> ( 442 )
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products .....	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> ( 454 )
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique .....	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> ( 463 )
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice .....	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> ( 472 )
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse .....	DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> ( 481 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable .....	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> ( 490 )
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula .....	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> ( 500 )
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil .....	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> ( 510 )
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau .....	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> ( 521 )
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion .....	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> ( 530 )
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community .....	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> ( 540 )
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China .....	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> ( 550 )
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation .....	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> ( 560 )
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain .....	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> ( 569 )