

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM_{2.5} 浓度估算 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH₄ 和 N₂O 排放特征及影响因素 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性 王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例

任何^{1,2}, 卢轩^{1,2}, 刘洋², 尹沙沙^{3*}, 胡鹤霄^{4*}

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001; 3. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001; 4. 河南省固体废物和化学品技术管理中心, 郑州 450003)

摘要: 基于本地污染源调查,同时对重点工业行业进行实地采样测试,建立了郑州市高新区工业 VOCs 排放清单及组分清单,并评估了 VOCs 各组分的臭氧生成潜势(OFP)和二次有机气溶胶生成潜势(SOAp). 结果表明,2017年郑州市高新区工业源 VOCs 排放总量为4 566.0 t,橡胶和塑料制品业、设备制造业和有色金属业是排放量最大的3个行业,排放量分别为1 924.2、1 396.3和813.4 t;各 VOCs 组分中,烷烃占比最大(40.9%),其次是含氧 VOCs(32.2%)和芳香烃(20.3%);异丙醇、正十二烷、甲苯、甲基环己烷和丙酮是排放量最大的5种物质;OFP 总量为8 753.8 t,最大贡献源和 VOCs 种类分别为设备制造业和芳香烃;SOAp 总量为643.0 t,贡献较大的排放源为设备制造业和铝箔制造业,烷烃和芳香烃是两种主要贡献组分.

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 源成分谱; 组分清单; 臭氧生成潜势(OFP); 二次有机气溶胶生成潜势(SOAp)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5687-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103271

Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone

REN He^{1,2}, LU Xuan^{1,2}, LIU Yang², YIN Sha-sha^{3*}, HU He-xiao^{4*}

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Environmental Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. College of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Henan Solid Waste and Chemicals Management Center, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In this study, based on the data of industrial sources obtained from a field survey and conducting field sampling tests on the key industrial industries in Zhengzhou High-tech Zone, an industrial emission inventory of volatile organic compounds (VOCs) and a VOC speciation emission inventory were established. We also evaluated the ozone formation potential (OFP) and secondary organic aerosol formation potential (SOAp) of each component of the VOCs. The results showed that the total industrial VOC emissions of Zhengzhou High-tech Zone in 2017 was 4 566.0 t, and the rubber and plastic products industry, non-ferrous metal industry, and equipment manufacturing industry were the top three industries, with emissions of 1 924.2, 1 396.3, and 813.4 t, respectively. Among the VOC components, alkanes accounted for the largest proportion (40.9%), followed by oxygenated VOCs (32.2%), and aromatic hydrocarbons (20.3%). The five substances with the largest emissions were isopropanol, n-dodecane, toluene, methylcyclohexane, and acetone. The total amount of OFP was 8 753.8 t, and the largest contributing source was the equipment manufacturing industry; the largest VOC species present was aromatic hydrocarbons. The total amount of SOAp was 643.0 t. Additionally, the largest emission sources were the equipment manufacturing industry and aluminum foil manufacturing industry; the alkanes and aromatic hydrocarbons were the two main contributing components.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); source profile; speciation emission inventory; ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosols potential (SOAp)

VOCs (volatile organic compounds) 是挥发性有机化合物的总称,涵盖数百种有机物. 大气环境中 VOCs 可以与 NO_x 等发生光化学反应,是对流层臭氧生成的重要前体物,同时也是二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA) 生成的重要前体物^[1-3]. VOCs 来源复杂,分为天然源和人为源,天然源主要是植被排放,人为源包括工业源、农业源和交通源等^[4]. 已有研究显示,在 VOCs 众多人为排放源中,工业源为最大排放源,排放占比高达 50% 左右^[5].

考虑到工业源对 VOCs 排放的影响,我国研究学者陆续对工业 VOCs 的排放特征进行了探讨. 从研究方法来看,Liang 等^[6]的研究建立了中国工业源 VOCs 排放清单,确定了关键 VOCs 组分并探讨了

VOCs 对 OFP (ozone formation potential, OFP) 的影响. 针对工业 VOCs 研究,一些学者集中在通过实地采样测试得到典型排放源 VOCs 化学组成成分谱^[7-9]. 从研究尺度来看,国内对工业 VOCs 的排放研究多聚焦于区域尺度,如文献^[10,11]分别研究了长三角和珠三角地区制鞋业和涂料行业 VOCs 排放特征;近几年也有研究开始关注城市尺度^[12-14]. 然而,城市的工业企业往往集中在某个区县,不同区县污染物的主要贡献源截然不同. 因此,有针对性地

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-05-21

基金项目: 郑州市 PM_{2.5} 与 O₃ 污染协同控制研究项目(20200321A); 河南省第二次全国污染源普查入户调查及数据汇总阶段技术服务项目(豫财磋商采购-2018-471)

作者简介: 任何(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染防治, E-mail: 272939251@qq.com

* 通信作者, E-mail: shashayin@zzu.edu.cn; 295762728@qq.com

对重点区县进行研究^[15,16],建立区县级别的工业 VOCs 排放清单,厘清重点工业行业的 VOCs 污染特征就显得尤为重要。

郑州市高新区作为国务院批准的第一批国家级高新区,经济发展迅速,涉及 VOCs 排放的工业企业数量共计 466 家,涵盖设备制造、化学原料和化学制品制造、有色金属冶炼和压延加工等 14 个行业大类。同时,基于环境空气质量监测数据分析显示,2019 年全年郑州市高新区供水公司国控点位 O₃ 最大 8 h 第 90 百分位数为 217 μg·m⁻³,高于城区内平均水平 193 μg·m⁻³,超过国家二级标准的 36%。全年 O₃ 超标天数为 108 d,高于城区平均水平 90 d,O₃ 污染不容乐观。非常有必要对郑州市高新区工业源 VOCs 的排放进行研究。

本文以郑州市高新区为研究区域,对高新区重点工业企业进行实地采样测试,分析其 VOCs 排放特征并建立本地化源成分谱,编制工业源 VOCs 排放及组分清单,探讨工业 VOCs 的排放状况及对 O₃ 和 SOA 污染影响,以期为工业 VOCs 的减排和管控提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 VOCs 采样及分析

根据实际调研,筛选出郑州市高新区 6 个重点 VOCs 排放行业,包括有色金属业、橡胶和塑料制品业、设备制造业、电气机械和器材制造业、印刷业和医药制造业。本研究选取其中 12 家企业进行采样分析,企业位置见图 1。

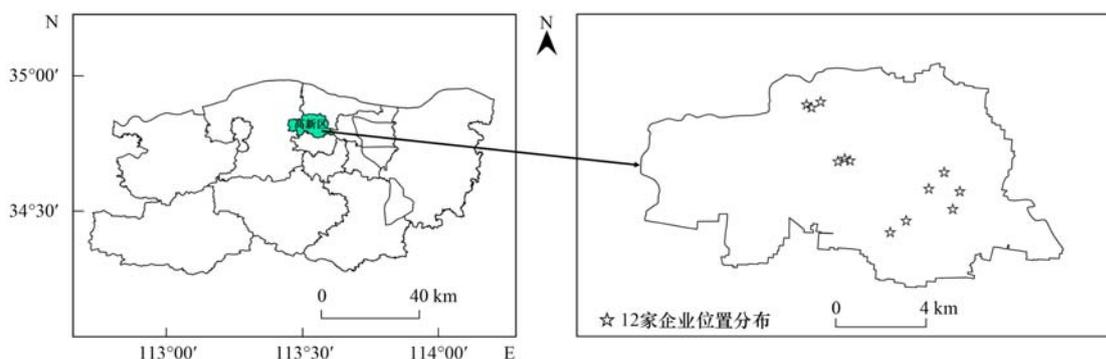


图 1 研究区域及采样点位置示意

Fig. 1 Map of the study area and sampling locations

其中,关于采样点的布置,在各企业末端处理设施的进气口与排气口设置采样点,监测 VOCs 有组织排放;在工厂厂区、车间等开放式作业场所设置采样点,对无组织排放 VOCs 进行监测。企业信息、采样信息和末端处理设施见表 1。

VOCs 采样方法参考文献^[17,18],用高纯度氮气清洗并抽真空的特氟龙袋进行采样。在收集烟气样品和逃逸性样品之前,分别用烟气和环境空气冲洗袋子 3 次。

VOCs 分析检测参考文献^[19]和美国环保署 (EPA) TO15 的方法,利用低温预浓缩技术对样品中的 VOCs 除杂、富集和加热解析,再使用 GC-MS 进行化学组分的分析测试。为保证样品测试结果的准确性,每 24 h 测定一个标准样,每分析 10 个样品进行一次平行样检测,保证 RSD 小于 10%。本文分析了包括 57 种 PAMS、47 种 TO15、13 种醛酮类以及非甲烷总烃共计 116 种物质,包括烷烃、烯烃、炔烃、卤代烃、芳香烃、硫化物和 OVOC 等 7 种 VOCs。最后,将得到的平行样品浓度取平均值,进一步标准化为质量分数。

1.2 排放清单建立

以 2017 年为基准年,参考文献^[20~23]并结合实地调研结果,将工业源分为:电厂、工业燃烧、工艺过程和工业溶剂源,详细的次级分类见表 2。

采用排放因子法估算 VOCs 的排放量,见公式 (1):

$$E_i = \sum_{i,k} [A_k \times EF_k \times (1 - \eta)] \quad (1)$$

式中, E 为排放量, i 为污染源, k 为排放源 i 下的次级排放源, A 为活动水平数据, EF 为排放因子, η 为相应控制措施的去效率。

活动水平数据来自实地调研得到的工业企业数据,包括燃料消耗量、产品产量和末端处理的设施及效率。排放因子的选取参考中国生态环境部发布的指南和已发表的相关文献。活动水平类型及排放因子的选取见表 2。

1.3 组分清单建立及 OFP、SOAp 分析

基于 VOCs 排放总量和各排放源对应 VOCs 化学成分谱,可建立 VOCs 组分清单,公式见式 (2):

$$E_m = \sum_{m,n} (E_n \times P_{m,n}) \quad (2)$$

表 1 采样相关信息

Table 1 Information of the samples

企业编号	所属行业	有组织排放采样点位置(个数)	废气处理设施
1	印刷	处理设施进出口(2)	水喷淋和光氧催化
2	印刷	处理设施进出口(2)	活性炭吸附和催化燃烧
3	印刷	处理设施进出口(2)	光氧催化和活性炭吸附
4	医药制造	处理设施进出口(2)	光氧催化和活性炭吸附
5	橡胶和塑料制品	处理设施出口(1)	光氧催化和活性炭吸附
6	橡胶和塑料制品	处理设施进出口(2)	光氧催化和活性炭吸附
7	有色金属业	冷轧车间进口、熔炼车间进口和总出口(3)	全油回收
8	设备制造	喷粉工序进口、印刷工序进口和总出口(3)	RTO
9	电气机械和器材制造	处理设施进出口(2)	催化燃烧、UV 光解和活性炭吸附
10	电气机械和器材制造	处理设施出口(2)	活性炭吸附
11	电气机械和器材制造	处理设施出口(3)	喷淋塔、除雾器、低温等离子、活性炭吸附和催化燃烧
12	电气机械和器材制造	处理设施出口(8)	过滤棉、分子击断、烘干处冷凝除油、过滤、静电除油、分子击断和三相浊液

企业编号	所属行业	无组织排放采样点位置(个数)	产污环节
1	印刷	原料库、危废间和印刷间旁(3)	油墨使用
2	印刷	印刷间旁、油墨间和车间外(5)	油墨使用
3	印刷	印刷间旁、原料库、危废间和车间外(6)	油墨使用
4	医药制造	危废间、生化池、离心机和车间外(9)	药物合成
5	橡胶和塑料制品	成型间、成品区和车间外(5)	发泡成型
6	橡胶和塑料制品	注塑间旁、供料间和车间外(5)	注塑、原料加热
7	有色金属业	冷轧车间外、熔炼车间外和厂区内(5)	冷轧
8	设备制造	焊接工序、烘干设备旁、打印及丝印工序和车间外(7)	喷粉、丝印和打印
9	电气机械和器材制造	浸漆间、注塑间和厂区内(5)	浸漆
10	电气机械和器材制造	涂装间、注塑间和车间外(5)	静电喷涂、注塑
11	电气机械和器材制造	装置车间、电泳漆车间和厂区内(6)	浸漆、钎化
12	电气机械和器材制造	涂装车间、焊装车间和遥显车间(6)	涂胶、焊接

式中, E_m 为化学组分 m 的排放量, E_n 为污染源 n 的 VOCs 排放量, $P_{m,n}$ 表示有机物组分 n 占 VOCs 排放量的比例系数。

其中, 有色金属业、橡胶和塑料制品业、设备制造业以及电气机械和器材制造业、印刷业和医药行业源成分谱的选取采用本研究实测数据(见表 3), 其余行业的源成分谱选取参考文献[29,30]。

OFP 是 VOCs 各组分在最佳反应条件下所能生成 O_3 的最大值, 反映各组分生成 O_3 的潜力, 由各组分浓度与其对应的最大增量反应活性(MIR)相乘得到, 公式见式(3):

$$OFP_m = MIR_m \times E_m \quad (3)$$

式中, OFP_m 为组分 m 的臭氧生成潜势, E_m 为组分 m 的排放量, MIR_m 为组分 m 的最大增量反应活性。MIR 值的选取参考文献[31]。

同时, VOCs 也是 SOA 的重要前体物, 参考文献[32]利用气溶胶生成系数法(FAC)对各 VOCs 组分的 SOAp 进行计算, 公式见式(4):

$$SOAp = E_m \times FAC \quad (4)$$

式中, SOAp 为二次有机气溶胶生成潜势, E_m 为组分 m 的排放浓度, FAC 为气溶胶转化系数。

2 结果与讨论

2.1 基于测试的 VOCs 排放特征

2.1.1 重点行业 VOCs 浓度水平

图 2 和图 3 分别为各工业企业隶属行业 VOCs 的有组织和无组织排放浓度。

对于有组织排放, 各行业 $\rho(\text{VOCs})$ 由大到小依次为电气机械和器材制造业、医药制造业、印刷业、橡胶和塑料制品业、有色金属业和设备制造业。由于

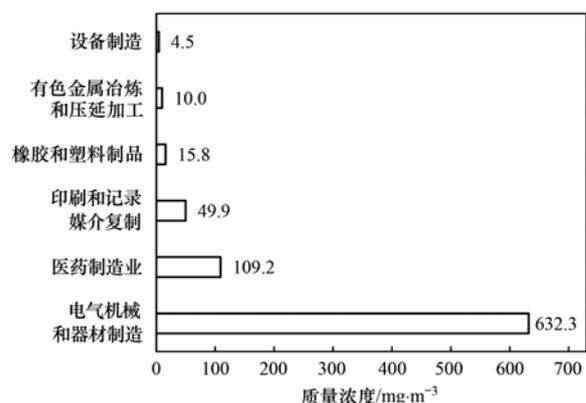
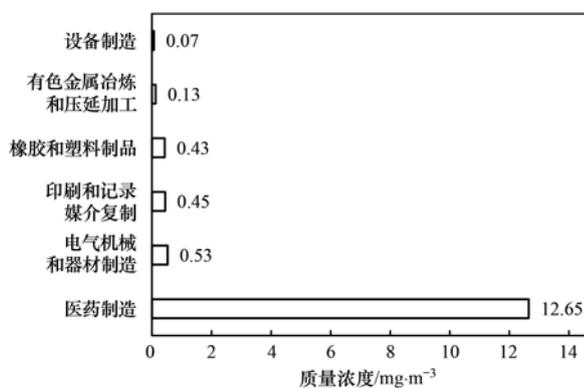
图 2 重点行业有组织排放 $\rho(\text{VOCs})$ Fig. 2 Organized emissions of $\rho(\text{VOCs})$ by key industries

表 2 排放源分类、活动水平和排放因子

Table 2 Emission source classification, activity level, and emission factor

排放源	次级排放源	活动水平	排放因子	单位	
电厂	煤炭	燃料使用量	0.04 ^[24]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	燃料油	燃料使用量	2.88 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	生物质	燃料使用量	5.30 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	垃圾	燃料使用量	0.74 ^[25]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	柴油	燃料使用量	0.13 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	天然气	燃料使用量	0.02 ^[24]	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	高炉煤气	燃料使用量	0.05 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
工业燃烧	煤炭	燃料使用量	0.39 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	液化石油气	燃料使用量	33 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	液化天然气	燃料使用量	33 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	燃料油	燃料使用量	0.35 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	焦炭	燃料使用量	0.04 ^[24]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	柴油	燃料使用量	0.12 ^[26]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	天然气	燃料使用量	0.18 ^[27]	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
工业溶剂	印刷	溶剂使用量	320 ^[28]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	印染布	溶剂使用量	10 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	设备制造	溶剂使用量	0.4 ^[23]	$\text{kg}\cdot\text{件}^{-1}$	
	机动车喷涂改装汽车	溶剂使用量	21.2 ^[23]	$\text{kg}\cdot\text{辆}^{-1}$	
工艺过程	非金属制品	玻璃	产品产量	3.15 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		耐火材料	产品产量	0.18 ^[28]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		水泥	产品产量	0.18 ^[28]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		烧结砖	产品产量	0.18 ^[28]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		石墨	产品产量	0.18 ^[28]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		陶瓷	产品产量	0.22 ^[29]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
	化学原料制造	颜料	产品产量	81.4 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		涂料	产品产量	15 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
	食品制造	花生油	产品产量	10.3 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		大豆油	产品产量	2.45 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		菜籽油	产品产量	8.75 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		其他油类	产品产量	9.3 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
	化学纤维	产品产量	14.5 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	橡胶塑料	产品产量	2.2 ^[26]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
有色金属冶炼及压延铝箔	产品产量	54.5 ^[23]	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		

图 3 重点行业无组织排放 $\rho(\text{VOCs})$ Fig. 3 Unorganized emissions of $\rho(\text{VOCs})$ by key industries

各行业的工艺、使用原料以及治理技术不同,导致其排放 $\rho(\text{VOCs})$ 存在较大差异.

电气机械和器材制造业 $\rho(\text{VOCs})$ 最大($632.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$),远高于其他行业的原因一方面是该行业

在生产过程中原料多为铜管油、翅片油、绝缘漆等油性有机溶剂,高用量和油性溶剂使得VOCs产生量较大;另一方面,该行业VOCs处理设施多为活性炭吸附和过滤棉加分子击断,长期不更换活性炭及过滤棉导致VOCs吸附达到饱和状态,吸附的VOCs会脱附使处理效率为负值.而有色金属业和设备制造业的浓度水平均不高于 $10.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,处于较低水平,与处理设施去除率较高有关.有色金属业的生产原料主要为重油等油性溶剂,全油回收的处理设施可大大减少VOCs的排放,设备制造业采用蓄热式催化燃烧(RTO)技术处理VOCs,处理效率高达85%.

对于无组织排放,医药制造业的 $\rho(\text{VOCs})$ 为 $12.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,远高于其他行业,同时也高于文献[33]中规定的厂区内无组织排放限值($10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$).其他5个行业VOCs无组织排放质量浓

表 3 本研究 6 个行业实测各组分占比/%

Table 3 Proportion of each component measured from the six industries in this study/%

成分	有色金属	橡胶和塑料制品	设备制造	电气机械和器材制造	印刷	医药制造
乙烯	0.5	0.1	0.8	0.4	0.2	0.0
乙炔	0.6	0.0	0.9	0.1	0.0	0.0
乙烷	1.4	0.7	0.4	1.1	0.5	0.8
丙烷	0.3	0.9	0.8	0.4	0.2	0.1
正丁烷	0.2	1.2	0.5	0.3	0.1	0.0
异戊烷	1.0	1.9	0.6	1.2	0.2	5.1
正戊烷	0.2	9.9	0.2	2.0	0.1	0.0
2-甲基戊烷	0.5	4.2	0.4	2.3	0.1	0.1
3-甲基戊烷	0.3	2.1	0.1	0.5	0.1	0.0
正己烷	0.3	1.4	0.4	1.6	0.4	0.2
甲基环戊烷	0.1	0.5	0.1	0.0	2.7	0.0
环己烷	0.0	1.1	0.1	5.4	1.8	0.6
2,3-二甲基戊烷	0.1	0.1	0.0	0.0	0.6	0.0
甲基环己烷	0.0	0.0	0.0	17.4	0.1	0.0
甲苯	0.8	9.5	0.7	35.1	0.3	0.3
正辛烷	0.1	0.0	0.1	0.1	0.5	0.0
乙苯	1.0	0.9	2.3	3.1	0.1	0.1
间-二甲苯	3.1	2.0	2.4	4.1	0.4	0.3
正壬烷	0.6	0.1	0.4	0.3	0.3	0.1
苯乙烯	0.1	0.4	0.6	0.2	0.1	0.2
邻-二甲苯	0.9	1.3	1.5	1.4	0.2	0.2
1-乙基-2-甲基苯	0.2	0.2	0.6	0.0	0.3	0.2
1-乙基-3-甲基苯	0.5	0.3	1.1	0.1	0.5	0.2
1,3,5-三甲苯	0.2	0.2	0.5	0.1	0.3	0.3
对-乙基甲苯	0.3	0.3	0.6	0.1	0.4	0.3
癸烷	3.6	0.2	1.0	0.9	0.5	0.5
1,2,4-三甲苯	0.6	0.7	1.3	0.1	0.6	0.3
对-二甲苯	0.1	0.2	0.1	0.0	0.3	0.5
十一烷	13.6	0.6	1.5	2.8	0.6	1.3
十二烷	64.2	1.1	10.8	6.0	1.6	2.3
一氯甲烷	0.0	0.2	0.9	0.0	0.0	0.0
二氯甲烷	0.1	2.1	0.6	2.0	6.5	0.6
异丙醇	0.2	0.4	10.2	2.3	29.8	0.1
甲基叔丁基醚	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0
反-1,2-二氯乙烯	0.0	1.1	0.6	1.5	2.0	0.0
乙酸乙酯	0.0	4.4	2.7	0.4	8.6	0.1
三氯甲烷	1.1	0.5	5.4	0.3	0.2	25.5
1,2-二氯乙烷	0.0	0.2	27.5	0.1	0.1	0.0
1,2-二氯丙烷	0.0	1.3	3.9	0.0	0.0	0.0
甲基丙烯酸甲酯	0.0	13.8	0.1	0.1	1.2	0.0
顺式-1,3-二氯-1-丙烯	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0
2-己酮	0.0	7.6	8.4	0.0	6.7	0.0
四氯乙烯	0.2	1.1	0.6	1.5	1.0	1.3
氯代甲苯	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5
1,1,2,3,4,4-六氯-1,3-丁二烯	0.0	0.5	0.0	0.2	0.1	0.2
甲醛	0.1	5.3	1.0	0.1	0.0	0.0
乙醛	0.2	0.6	0.7	0.3	0.5	0.0
丙烯醛	0.0	0.1	0.4	0.1	0.0	3.0
丙酮	0.0	5.8	0.5	0.1	4.2	3.5
2-丁酮	0.0	0.1	0.0	1.2	0.2	0.0
乙醇	0.0	1.8	0.0	0.0	21.3	48.7
4-甲基-1,3-戊二烯	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0
其他	2.6	9.0	3.4	3.1	3.5	2.0
总计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

度较低,符合环境标准^[33]. 通过调研,医药制造业

VOCs 无组织浓度较高是因为在企业生产过程中使

用大量的有机溶剂及含 VOCs 原材料,并且反应釜并未完全封闭,使得车间内的 VOCs 浓度高于环境标准.

2.1.2 重点行业 VOCs 化学组成

图 4 为各行业有组织和无组织排放的 VOCs 化学组成,6 个行业的源成分谱数据详见表 3. 可以看

出,电器行业与有色金属业,无论是有组织排放还是无组织排放,VOCs 化学组成均以烷烃为主. 而有色金属业,有组织排放的 VOCs 中烷烃占比高达 87.9%. 电器行业有组织排放以烷烃和芳香烃为主要组成成分,合计占比达 87.7%,而无组织排放的 VOCs 中,除烷烃外其他组分差异不大.

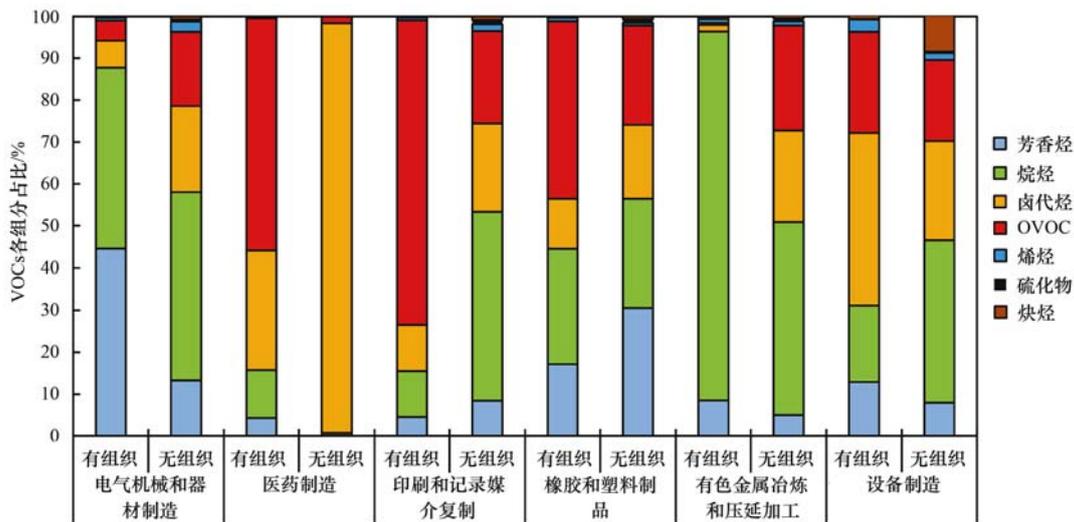


图 4 重点行业 VOCs 化学组成

Fig. 4 Chemical composition of VOCs in key industries

医药制造业、印刷业和橡胶塑料制品业有组织排放与无组织排放的 VOCs 化学组成差异巨大,有组织排放的 VOCs 均以 OVOC 为主要的化学组成成分,分别占 VOCs 总量的 55.5%、72.6% 和 42.3%。但医药制造业无组织排放的 VOCs 以卤代烃为主,占比高达 97.6%,是本次采样中唯一卤代烃占比最高的行业. 印刷业无组织排放占比最高的组分是烷烃,橡胶塑料制品业各组分差异不大,芳香烃、烷烃、卤代烃和 OVOC 合计占比 97.8%。造成这种现象的原因可能是相关行业治理技术对 VOCs 去除的选择性不同. 如医药制造业有组织排放的 VOCs 中,卤代烃仅占 28.4%,而无组织排放的 VOCs 几乎都是卤代烃,表明其治理措施对卤代烃的去除效果较好,而对其他组分的去除效果相对较差.

设备制造业有组织和无组织排放 VOCs 化学组成比例虽不同,但没有明显的单一化组成,烷烃、芳香烃和 OVOC 等组分占比接近,呈现了较好的平行性.

2.2 郑州市高新区 2017 年工业 VOCs 排放清单

2017 年高新区工业源 VOCs 排放清单结果见表 4. VOCs 排放总量为 4 566.0 t,排放量最高的源为工艺过程源(2 813.1 t),占排放总量的 61.6%,其次是工业溶剂源(1 686.0 t),占比 36.9%。电厂与工业燃烧源的贡献率较低,合计占比 1.5%,主要原因是高新区电厂及燃煤工业企业数量较少,如郑州市 37 家电力公司中,高新区仅有两家且规模较小的电厂;

郑州市 6 200 家燃煤工业企业中,高新区仅占有 274 家,规模多为小型和微型企业.

分析次级排放源,工艺过程源中橡胶塑料为最大贡献源,VOCs 排放量达 1 924.2 t,占比 42.1%。其次是工业溶剂源中的设备制造业,共排放 1396.3 t VOCs,占比 30.6%,仅次于橡胶塑料. 另外有色金属业也有较大的贡献率,排放了 813.3 t VOCs.

表 4 郑州市高新区工业源 VOCs 排放量/t

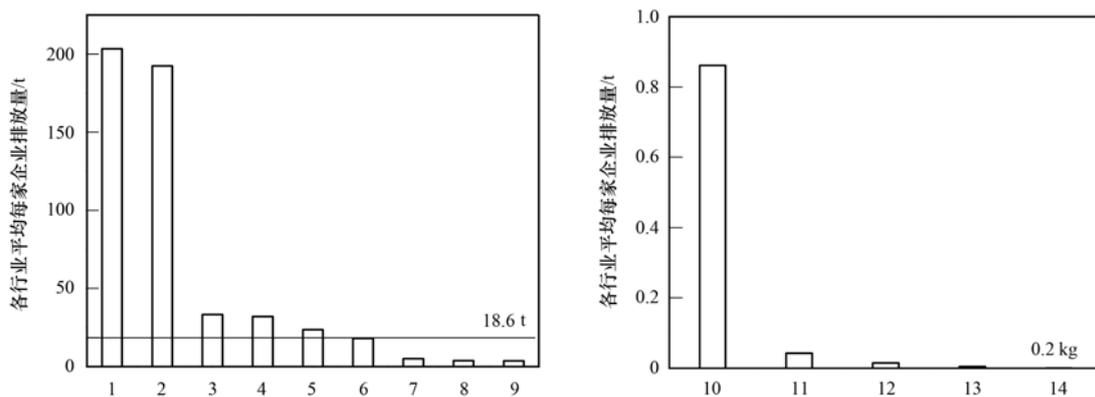
Table 4 VOCs emissions from industrial sources in Zhengzhou High-tech Zone/t

排放源	次级排放源	排放量/t	排放占比/%
电厂		36.1	0.8
工业燃烧		30.8	0.7
工业溶剂	印染布	160.4	3.5
	设备制造	1 396.3	30.6
	印刷	129.4	2.8
	改装汽车表面涂层	0.8	< 0.1
	合计	1 686	36.9
工艺过程	非金属制品	0.4	< 0.1
	有色金属业	813.3	17.8
	化学原料制造业	41.5	0.9
	化学纤维	33.4	0.7
	橡胶塑料	1 924.2	42.1
	食品制造	0.3	< 0.1
	合计	2 813.1	61.6

将 VOCs 排放总量除以高新区各行业工业企业数得到平均每家企业 VOCs 排放量(18.6 t),超过平均值的行业有 5 个,结果见图 5. 其中,有色金属业

以及橡胶和塑料制品业排放量较大, 并且远高于其他行业. 前者高 VOCs 排放主要来源于铝箔生产, 高新区铝箔产量约占郑州市总产量的 40%, 生产过程使用重油作为润滑油和冷却油, 在冷轧工艺过程中, 重油挥发产生大量 VOCs. 后者也属于企业数量较少、排放量较高的大规模集中式排放企业, 其生产涉

及 VOCs 排放的工艺是发泡和成型环节, 需要聚苯乙烯颗粒作为原料, 较大地使用量带来较高 VOCs 排放. 总排放量较高的设备制造业, 由于企业数量高达 59 家, 其平均排放量较低, 仅为 23.7 t. 说明高新区设备制造业以中小企业为主, 排放特征呈现多、小、散, 对其 VOCs 的减排治理带来很大障碍.



1. 有色金属冶炼和压延加工, 2. 橡胶和塑料制品, 3. 化学纤维制造, 4. 纺织, 5. 设备制造, 6. 电力、热力生产和供应, 7. 食品制造, 8. 印刷和记录媒介复制, 9. 化学原料和化学制品制造, 10. 造纸, 11. 农副食品加工, 12. 非金属矿物制品, 13. 医药制造, 14. 电气机械和器材制造

图 5 各行业 VOCs 平均每家企业排放量

Fig. 5 Average VOCs emissions of each company in each industry

排放清单的编制会存在一定的不确定性, 源于活动水平数据的准确性和排放因子的获取. 本文采用蒙特卡罗模拟对清单进行定量不确定性分析, 暂不考虑活动水平的影响. 活动水平数据主要来自工业企业实地调研获取, 但企业人员在填写调查报告时会存在单位转换错误和信息填报不完整的情况, 本文在数据处理过程进行了二次核对与修正, 降低了数据的不准确性. 如表 5 所示, 高新区工业源 VOCs 排放清单 95% 置信区间的不确定度为 (-73.7%, 77.2%), 其中工艺过程源不确定度最高, 为 (-91.8%, 91.3%), 主要体现在铝箔制造业、化学纤维制造业和设备制造业, 由于国内对这 3 个行业研究较少, 行业本身存在较大不确定性. 同时, 在定量评估过程中选取的不同来源排放因子, 同一排放源不同研究测试结果差异性较大, 也是不确定度较高的原因之一.

表 5 工业源排放因子不确定性定量分析结果

Table 5 Uncertainty quantitative analysis results of industrial source emission factors

排放源	95% 置信区间平均值不确定范围/%
电厂	(-56.3, 54.4)
工业燃烧	(-60.7, 59.4)
工艺过程源	(-91.8, 91.3)
溶剂使用源	(-63.9, 59.2)
合计	(-73.7, 77.2)

2.3 VOCs 组分排放清单及 OFP 和 SOAp 分析

2.3.1 VOCs 组分清单

图 6 为 2017 年高新区工业源 VOCs 各组分排

放量、占比及贡献来源. 烷烃为排放量最大的物种 (1869.7 t), 占排放总量的 40.9%, 其次是含氧 VOCs (1472.0 t) 和芳香烃 (928.1 t), 占排放总量的 32.2% 和 20.3%.

从排放源来看, 烷烃排放主要来自铝箔生产 (39.8%) 和设备制造业 (36.3%), 二者所选用的源成分谱均来自于本地实测, 较高的 VOCs 排放量 (813.3 t、1396.3 t) 和源成分谱中烷烃较大的占比 (91.6%、48.6%) 是二者烷烃排放量较大的主要原因. 含氧 VOCs 主要来源为橡胶和塑料制品行业 (84.5%), 除了与高新区橡胶塑料行业本身高排放有关外, 也与橡胶塑料原料成分有关. 芳香烃主要贡献源为印刷、印染布和设备制造等有机溶剂使用行业, 原因是在各类溶剂中芳香烃含量较高.

从具体 VOCs 物种来看, 异丙醇、正十二烷、甲苯、甲基环己烷、丙酮、正十一烷、环己烷、乙苯、甲基环戊烷和正癸烷是高新区 VOCs 排放量最高的 10 种组分, 排放总量为 3413.4 t, 占排放总量的 74.7%.

2.3.2 OFP 及 SOAp

由组分清单结果计算得到郑州市高新区工业源 VOCs 的 OFP 为 8753.8 t, 结果见图 7. 其中, 芳香烃贡献最大 (4681.2 t), 占高新区工业源 OFP 总量的 53.5%, 其次是烷烃和含氧 VOCs, 二者 OFP 合计占比达 37.1%. 芳香烃和含氧 VOCs 的高贡献率主要与其来自于设备制造业与橡胶和塑料制品业排放有

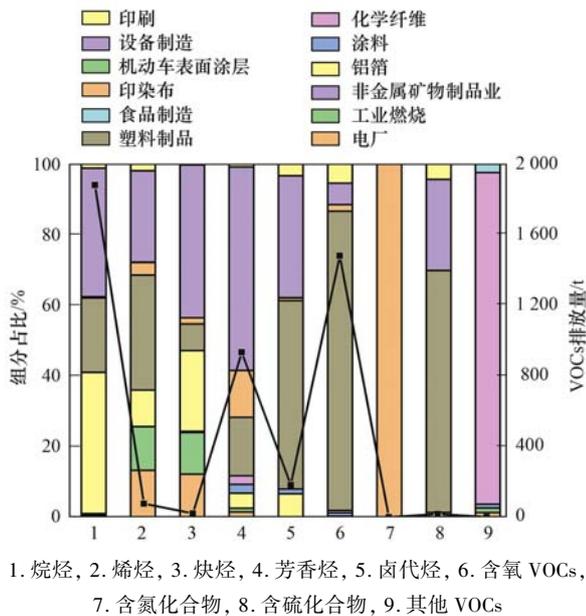


图 6 工业源各 VOCs 组分占比及贡献来源

Fig. 6 Proportion and contribution source of each VOCs component of industrial sources

关,一方面这两个排放源贡献了高新区工业源 71.7% 的 OFP,另一方面设备制造业中芳香烃的 OFP 为 2 403.1 t,占高新区工业源的 27.5%,而橡胶塑料制品的芳香烃和含氧 VOCs 分别为 956.0 t 和 877.3 t,合计占高新区工业源 OFP 总量的 21.0%。烷烃 OFP 占比较大的原因是铝箔的生产,铝箔贡献了高新区工业源 11.6% 的 OFP,烷烃在铝箔生产中则占据了 60.3%。

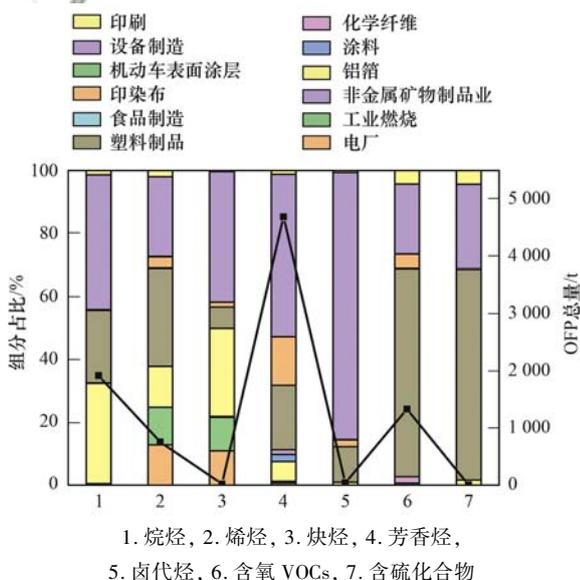


图 7 工业源 OFP 各组分占比及贡献来源

Fig. 7 Proportion of each component of OFP of different industrial sources and source contributions

图 8 展示了对 OFP 贡献最大的 10 种组分及其对应 VOCs 组分的贡献率和 MIR 值。对 OFP 贡献最高的 10 种组分分别为:甲苯、异丙醇、正十二烷、

1,2,4-三甲苯、间-二甲苯、邻-二甲苯、甲基环己烷、乙烯、1,3,5-三甲苯和乙苯,这 10 种组分合计占总 OFP 的 67.7%。甲苯是 OFP 的最大贡献物种 (23.1%),但从排放角度来看,异丙醇是最大贡献组分,占比约为甲苯的两倍。这是因为甲苯的 MIR 值(3.9)是异丙醇(0.6)的 6.5 倍,因此结合排放量及反应性甲苯的 OFP 高于异丙醇,成为最大贡献组分。

VOCs 排放量最高的 10 种组分与 OFP 贡献最高的 10 种组分有 5 种不同,分别是丙酮、正十一烷、环己烷、甲基环戊烷和正癸烷,它们的 MIR 值均很低。其中,丙酮是 VOCs 排放贡献第五的组分,但其 MIR 值仅为 0.35,导致其 OFP 贡献率为 0.8%,远低于对 VOCs 排放量的贡献(4.6%)。反之,其他 5 种排放量较低但反应性较高的组分则排在 OFP 贡献率前十,分别为 1,2,4-三甲苯、间-二甲苯、邻-二甲苯、乙烯和 1,3,5-三甲苯, MIR 值均大于 7。这也致使 1,2,4-三甲苯作为排放量第 13 大贡献物种, OFP 贡献率却为第四。由于 OFP 是物种排放量和反应活性的综合,因此排放量高的组分与 OFP 贡献高的组分有明显差异。

从贡献来源角度看,甲苯、间-二甲苯、邻-二甲苯、甲基环己烷和乙烯主要来自于印染布和设备制造业等有机溶剂使用源的排放,异丙醇、正十二烷、1,2,4-三甲苯、1,3,5-三甲苯和乙苯来自铝箔制造和橡胶塑料制品业等工艺过程源的排放。

对于 SOAp(如图 9),郑州市高新区工业源总量为 643.0 t。从组分角度来看,SOAp 基本来自烷烃和芳香烃,二者合计占比高达 99.5%;从排放源角度分析,设备制造业和铝箔制造业是造成烷烃和芳香烃高 SOAp 的原因,二者共贡献了 559.4 t 的 SOAp,合计占比 87.0%。分析重点物种,正十二烷、甲苯和正十一烷是需要重点关注的 3 个物种,三者合计贡献了 548.6 t 的 SOAp,占高新区工业源的 85.3%,与排放源相对应,正十一烷和正十二烷等烷烃主要来自于铝箔制造业的排放,甲苯等芳香烃来自于设备制造业。

2.4 减排与管控建议

根据本研究结果,无论是 VOCs 的排放量还是各 VOCs 组分的 OFP 和 SOAp,郑州市高新区工业源高排放行业均为橡胶和塑料制品业、设备制造业和铝箔制造业,需要对这 3 个行业进行减排与管控。

橡胶和塑料制品业的原料主要为聚苯乙烯颗粒和改性聚丙烯等有机物,其 VOCs 产生环节主要是原料的注塑加热和发泡成型。对于该行业的减排:①要注重生产前原料的封存,如将 VOCs 原料存储

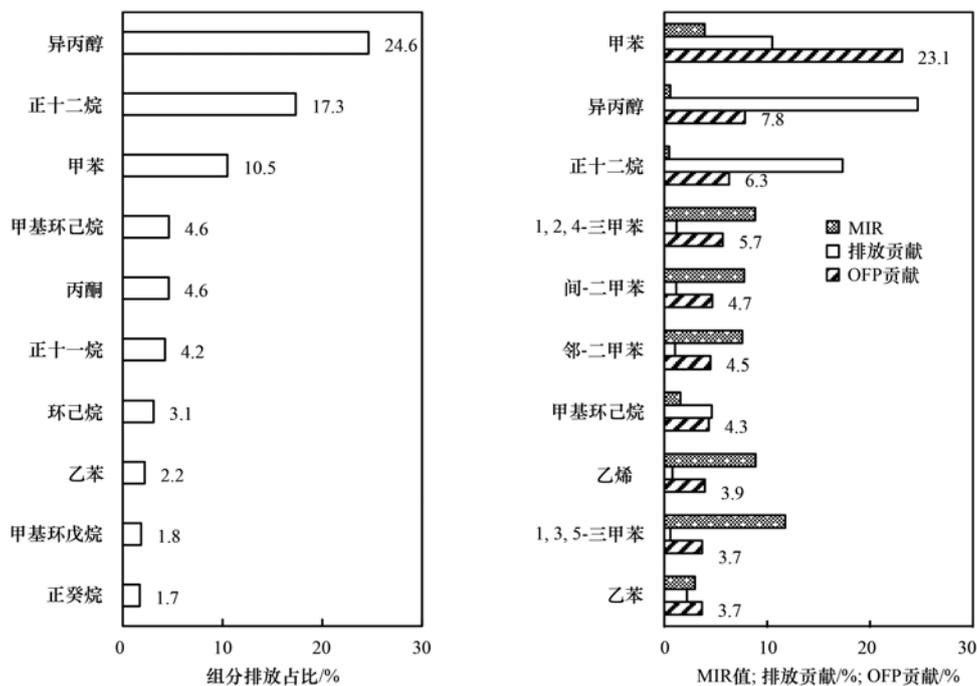


图 8 对 VOCs 排放贡献的前 10 物种及对 OFP 贡献前的 10 物种对比

Fig. 8 Comparison of the top ten species in VOCs emission and the top ten species in OFP

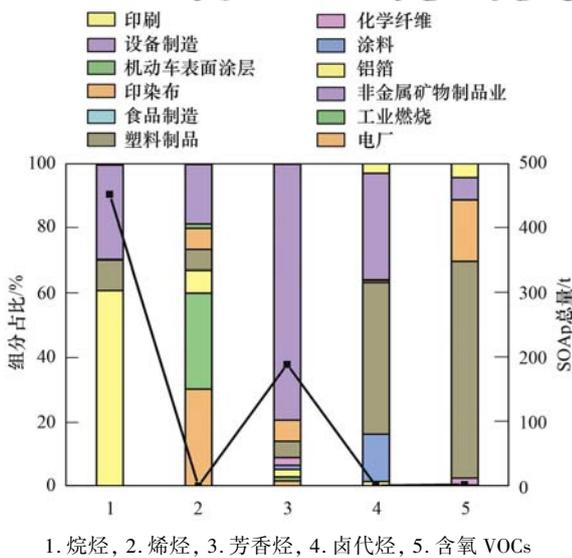


图 9 工业源 SOAp 各组分占比及贡献来源

Fig. 9 Proportion of SOAp of each component in different industrial sources and the source contribution

于密封的容器中,并将容器加盖和封口存放于室内;②要严格控制工业炉窑生产过程及物料储存和输送等环节的无组织排放,采取密闭和封闭等措施,有效提高废气收集率;③应升级 VOCs 处理设施,应将废气收集后采用喷淋、吸附和低温等离子等二级及以上组合工艺处理或采用燃烧工艺处理^[34]。

设备制造业的排放集中在工业涂装环节。从原料替代角度看,可以逐步减少溶剂型涂料的使用,更换为水性涂料和粉末涂料等 VOCs 含量较低的涂料。从处理设施升级角度看,当使用溶剂型涂料时,

调漆、喷漆、烘干和清洗等工序含产生的 VOCs 废气采用吸附浓缩加燃烧的处理技术;当使用水性溶剂时,若车间 NMHC 初始排放速率 $\geq 5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$,应建立末端治污设施^[34]。

对于铝箔制造业,除 2.2 节所述可选用多级油雾回收治理技术提高 VOCs 的去除率,对于封闭式熔炼炉烟气也要单独处理。同时也需要对该行业末端处理设施进行提标改造,虽然相关企业安装有 VOCs 治理工艺,但处理效率较低,若按国家要求将 VOCs 排放速率 $\geq 2 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 的排气筒进行升级^[34],VOCs 处理效率将会达到 80% 以上。在原料储存方面,涉 VOCs 的物料和废料应储存在密闭容器并放置在密闭储存室内;在物料的转移和输送方面,应采用密闭管道或密闭容器。

3 结论

(1) 电气机械和器材制造业和医药制造业为郑州市高新区有组织排放浓度最大的两个行业,医药制造业是无组织排放浓度最大行业;电气机械和器材制造业与有色金属业 VOCs 中烷烃为主要组分,医药制造业、橡胶塑料制品业和印刷业中 OVOCs 含量最大,设备制造业 VOCs 中各组分占比相近。

(2) 2017 郑州市高新区工业源 VOCs 排放量为 4 566.0 t,橡胶和塑料制品业、设备制造业和有色金属业分别贡献 42.1%、30.6% 和 17.8%。

(3) 工业源 VOCs 排放最高的组分为烷烃,占 VOCs 总量的 40.9%,主要物种为异丙醇、正十二烷、

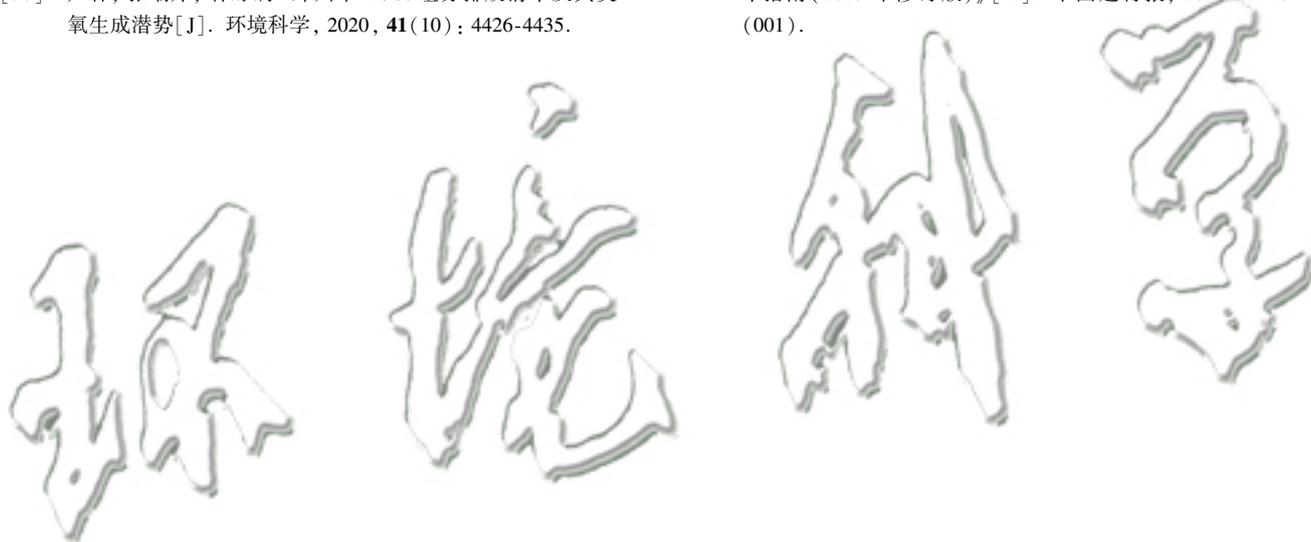
甲苯、甲基环己烷和丙酮; OFP 总量为8 753.8 t, 设备制造业和芳香烃是贡献最大的排放源和 VOCs 种类; SOAp 总量为 643.0 t, 烷烃和芳香烃是两种主要贡献组分, 设备制造业和铝箔制造业为两个主要贡献源。

(4) 铝箔制造业、橡胶和塑料制品业以及设备制造业是郑州市高新区需要重点管控的行业, 可通过源头替代和处理设施的提标改造等进行 VOCs 管控和减排。

参考文献:

- [1] Geng F H, Tie X X, Xu J M, *et al.* Characterizations of ozone, NO_x , and VOCs measured in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(29): 6873-6883.
- [2] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 512-518.
- [3] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al.* VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(17): 8815-8832.
- [4] Mukund R, Kelly T J, Spicer C W. Source attribution of ambient air toxic and other VOCs in Columbus, Ohio[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(20): 3457-3470.
- [5] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 845-854.
Liang X M, Zhang J N, Chen X F, *et al.* Reactivity-based anthropogenic VOCs emission inventory in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 845-854.
- [6] Liang X M, Chen X F, Zhang J N, *et al.* Reactivity-based industrial volatile organic compounds emission inventory and its implications for ozone control strategies in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **162**: 115-126.
- [7] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, *et al.* Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 127-136.
- [8] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: part I [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [9] Wang H L, Nie L, Li J, *et al.* Characterization and assessment of volatile organic compounds (VOCs) emissions from typical industries [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(7): 724-730.
- [10] Zhong Z M, Sha Q E, Zheng J Y, *et al.* Sector-based VOCs emission factors and source profiles for the surface coating industry in the Pearl River Delta region of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **583**: 19-28.
- [11] 吴洪杰, 刘玲英, 蔡慧华, 等. 珠江三角洲制鞋行业挥发性有机化合物排放系数研究 [J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(4): 74-78.
Wu H J, Liu L Y, Cai H H, *et al.* Study on the emission coefficient of VOCs from shoe-making industry in the Pearl River Delta region [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(4): 74-78.
- [12] 赵锐, 黄络萍, 张建强, 等. 成都市典型溶剂源使用行业 VOCs 排放成分特征 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1147-1154.
Zhao R, Huang L P, Zhang J Q, *et al.* Emissions characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical industries of solvent use in Chengdu City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1147-1154.
- [13] 方莉, 刘文文, 陈丹妮, 等. 北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4395-4403.
Fang L, Liu W W, Chen D N, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent-based industries in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4395-4403.
- [14] 于广河, 朱乔, 夏士勇, 等. 深圳市典型工业行业 VOCs 排放谱特征研究 [J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(S1): 232-236.
Yu G H, Zhu Q, Xia S Y, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) source profile from typical industries in Shenzhen [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(S1): 232-236.
- [15] 谈佳妮, 余琦, 马蔚纯, 等. 小尺度精细化大气污染源排放清单的建立——以上海宝山区为例 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(5): 1099-1108.
Tan J N, Yu Q, Ma W C, *et al.* Development of refined emission inventory of air pollutants: a case study of Shanghai Baoshan district [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(5): 1099-1108.
- [16] 张骥, 徐媛, 刘茂辉, 等. 天津津南区大气污染物小尺度精细化源清单 [J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(8): 210-215.
Zhang J, Xu Y, Liu M H, *et al.* Development of refined emission inventory of air pollutants for Jinnan District of Tianjin [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(8): 210-215.
- [17] GB/T 16157-1996, 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法 [S].
- [18] HJ 759-2015, 环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法 [S].
- [19] Zhang Y S, Li C, Yan Q S, *et al.* Typical industrial sector-based volatile organic compounds source profiles and ozone formation potentials in Zhengzhou, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11**(5): 841-850.
- [20] EPA. Air emissions inventories; 2014 National Emissions Inventory (NEI) data [DB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2014-national-emissions-inventory-nei-data>, 2019-12-10.
- [21] European Environment Agency (EEA). EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook-2006 [R]. Copenhagen; European Environment Agency, 2006.
- [22] 卢滨, 黄成, 卢清, 等. 杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 533-542.
Lu B, Huang C, Lu Q, *et al.* Emission inventory and pollution characteristics of industrial VOCs in Hangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 533-542.
- [23] 中华人民共和国生态环境部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2020-05-28.
- [24] Liu H J, Wu B B, Liu S H, *et al.* A regional high-resolution emission inventory of primary air pollutants in 2012 for Beijing and the surrounding five provinces of North China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **181**: 20-33.
- [25] 杜维鲁. 城市生活垃圾焚烧电厂主要大气污染物产排污系数研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [26] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放

- 清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [27] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [28] Bo Y, Cai H, Xie S D, Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, **8**(23): 7297-7316.
- [29] EPA (United States Environment Protection Agency). AP-42: compilation of air emissions factors [DB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>, 2019-12-11.
- [30] 卢轩, 张瑞芹, 韩蹊钢. 郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4426-4435.
- Lu X, Zhang R Q, Han L K, et al. Emission inventory of VOCs components in Zhengzhou and their ozone formation potential[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4426-4435.
- [31] Carter W P. L. Reactivity estimates for selected consumer product compounds[R]. Sacramento: Center for Environmental Research and Technology, College of Engineering, University of California, 2008.
- [32] 刘毅, 俞颖, 宋锴, 等. 德州市冬季大气挥发性有机物污染特征及其对臭氧和二次有机气溶胶生成的贡献[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, **12**(6): 665-675.
- Liu Y, Yu Y, Song K, et al. Winter VOCs and their contribution to ozone formation potential and secondary organic aerosol yields in Dezhou [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, **12**(6): 665-675.
- [33] 沐霖. GB37822-2019《挥发性有机物无组织排放控制标准》2019年7月1日起实施[J]. 中国人造板, 2019, **26**(7): 41.
- [34] 张娇娇. 生态环境部印发《重污染天气重点行业应急减排技术指南(2020年修订版)》[N]. 中国建材报, 2020-07-13(001).



CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China; Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sizozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)