

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勖之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘伟丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 虎发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响

姚维杰^{1,2}, 王大玮¹, 谢付莹¹, 朱宏伟³, 孟祥宇³, 田雨^{1,2}, 刘航^{1,2}, 刘晓咏^{1,2,4}, 张宇婷^{1,2}, 雷山东^{1,2}, 孙业乐^{1,2,4}, 吴林¹, 潘小乐^{1*}, 王自发^{1,2,4}

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 4. 中国科学院城市环境研究所区域大气环境研究卓越创新中心, 厦门 361021)

摘要: 2020年8月22~29日期间利用便携式声表面波气相色谱仪(GC-SAW)对日照市区的主要企业源、居民源和道路开展了在线采样分析, 获得了大气中多种挥发性有机物(VOCs)的空间分布特征, 并对主要组分的化学反应活性进行研究。结果表明, 日照市碳原子大于5的VOCs($\text{VOC}_{C>5}$)主要以甲苯、正丙苯和正辛烷为主, 且空间分布差异显著, 港口区、商业区和工业区 $\rho(\text{TVOC}_{C>5})$ 分别为80.5、115.3和118.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 道路交通和工业生产排放的影响共同导致了日照市区主要道路 $\rho(\text{TVOC}_{C>5})$ 最大值出现在位于市中心的迎宾路附近, 均值为164.37 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 胶粘剂加工、喷漆和玻璃企业厂区内 $\rho(\text{苯系物})$ 分别达到432.34、1010.84和1989.85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 对 $\text{VOC}_{C>5}$ 中主要组分的化学反应活性分析表明苯系物和正辛烷是日照市区臭氧生成的重要活性组分。

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 空间分布; 苯系物(BTEX); 臭氧生成潜势(OFP); 工业排放

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0714-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202103173

Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer

YAO Wei-jie^{1,2}, WANG Da-wei¹, XIE Fu-ying¹, ZHU Hong-wei³, MENG Xiang-yu³, TIAN Yu^{1,2}, LIU Hang^{1,2}, LIU Xiao-yong^{1,2,4}, ZHANG Yu-ting^{1,2}, LEI Shan-dong^{1,2}, SUN Ye-le^{1,2,4}, WU Lin¹, PAN Xiao-le^{1*}, WANG Zi-fa^{1,2,4}

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Center of Excellence and Innovation for Regional Atmospheric Environment Research, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: GC-SAW was used to carry out online sampling analysis of the main business sources, residential sources, and roads in Rizhao City from August 22 to 29 in 2020. The spatial distribution characteristics of various volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere were obtained, and the chemical reactivity of the main components was studied. The results showed that the VOCs with carbon atoms greater than 5 ($\text{VOC}_{C>5}$) were mainly toluene propylbenzene and n-octane, and the spatial distribution was significant; the average $\rho(\text{TVOC}_{C>5})$ in the port area, downtown area, and industrial area were 80.5, 115.3, and 118.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. Combined with road traffic impact and industrial production emissions, the maximum $\rho(\text{TVOC}_{C>5})$ on the main roads in Rizhao City appeared near the Yingbin Road; the concentration value was 164.37 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; the $\rho(\text{BTEX})$ in adhesive processing, painting, and glass factories reached 432.34, 1010.84, and 1989.85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The chemical reactivity analysis of the main components of $\text{VOC}_{C>5}$ showed that BTEX and n-octane were the important active components of ozone formation in Rizhao City.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); spatial distribution; benzene toluene ethylbenzene and xylene (BTEX); ozone formation potential (OFP); industrial emissions

我国在“十三五”期间细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)防控取得明显进展, 然而臭氧污染问题日渐突出, 大气污染格局正发生深刻变化, 以细颗粒物与臭氧为主的大气复合污染是“十四五”大气污染防治的重要任务^[1,2]。2019年, 全国337个地级以上城市臭氧浓度同比上升6.5%, 以臭氧为首要污染物的超标天数占总超标天数的41.8%, 大气污染防治又开辟了新的战场^[3]。

臭氧化学生成机制复杂, 与前体物挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)和 NO_x 的关系

呈非线性。研究表明, 城市核心地区 NO_x 浓度高, 属于很强的VOCs控制区, 基于VOCs的控制策略是控制臭氧污染的有效途径^[4]。任义君等^[5]利用在线气相色谱仪对郑州市城区VOCs组分特征进行研究, 共检测到VOCs物种56种, 对臭氧生成贡献较大的物种有顺-2-丁烯(13.01%)、异戊二烯

收稿日期: 2021-03-19; 修订日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877314)

作者简介: 姚维杰(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境与大气化学, E-mail: yaoweijie@mail.iap.ac.cn

* 通信作者, E-mail: panxiaole@mail.iap.ac.cn

(10.50%)、间/对-二甲苯(10.05%)和甲苯(6.90%)。VOCs 来源复杂、种类繁多且活性差异大,精准控制难度大。准确定量城市尺度的 VOCs 分布及来源,可以有效减少挥发性有机物排放,对于区域复合型污染的防治乃至我国空气质量的全面改善具有重要意义。

VOCs 常见的测定方法包括气相色谱法(GC)、高效液相色谱法(HPLC)和气质联用法(GC-MS)等^[6]。气质联用法集合了气相色谱的高效分离能力与质谱对于纯化合物的准确鉴定能力,是目前检测大气中痕量物质的最常用手段,但是其体积较大且价格昂贵,不适用于现场分析^[7]。声表面波气相色谱仪(GC-SAW)是一种基于声表面波传感器与气相色谱分离联用的有机气体分析仪,具有灵敏度高、色谱柱升温速度快和体积小等优势,可以实现痕量气体的广谱(沸点在 60 ~ 350℃ 之间)、快速(< 1 min)和高灵敏度(10^{-12} ~ 10^{-9} 级)的在线分析^[8,9]。

大气中碳原子数大于 5 的 VOCs 物种主要以多环芳烃和苯系物为主,这类有机物容易吸附在颗粒物上进而危害人体健康,因此越来越受到人们的重视^[10]。周子航等^[11]利用 GC-MS 对成都市不同行业典型企业的 VOCs 排放特征进行研究,结果表明不同行业的排放物中差别很大,家具制造业占比最大为苯系物(50%),石油化工业在不同的作业区分别以烯烃、C3 ~ C5 烷烃、C6 ~ C8 烷烃为主。Huang 等^[12]对中国台湾地区的 VOCs 分布特征进行研究,表明甲苯的浓度最高且对臭氧生成的贡献最大,对 VOCs 来源贡献最大的是溶剂使用和石油化工等工业排放,在不同区域贡献率为 37% ~ 52%。

本文拟通过在线 GC-SAW,对该仪器可测 VOCs 物种在日照市区夏季的空间分布规律以及臭氧生成关键组分进行研究,得到街区尺度下的 VOCs 浓度贡献以及全市 VOCs 空间分布状况,以期为日照市空气质量持续改善及 PM_{2.5} 与臭氧协同控制提供重要科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

日照市位于山东半岛东南部,东经 118°25' ~ 119°39',北纬 35°04' ~ 36°04' 之间,东临黄海。全市大气污染防治也进入了深度治理的新阶段,城区中存在着部分粮油和化工等 VOCs 重点企业,位于市区上海路东段的日照粮油工业园是我国四大粮油进口加工基地之一,此外市内还有多个使用喷涂工艺的玻璃和化工企业等。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 采样时间及采样点布设

采样时间段选取 2020 年 8 月 22 ~ 29 日天气晴好的白天,每个采样点均进行两次平行采样,单次采样时间为 10 min。以位于日照市区山东路、北京路、山海路、迎宾路和大连路等主要路段及 4 类重点企业作为采样点进行 VOCs 在线检测,采样范围见图 1。企业名单来自日照市生态环境局提供的当地涉 VOCs 重点排污单位名录,采样点位于企业内部和厂区边界。道路采样点选取道路两侧相对僻静处、非路口路段、错过交通高峰期以避免过往机动车的直接影响,保证样品的代表性。采样时采样器距离地面高度 1.5 m,最终选取采样点位 63 个。

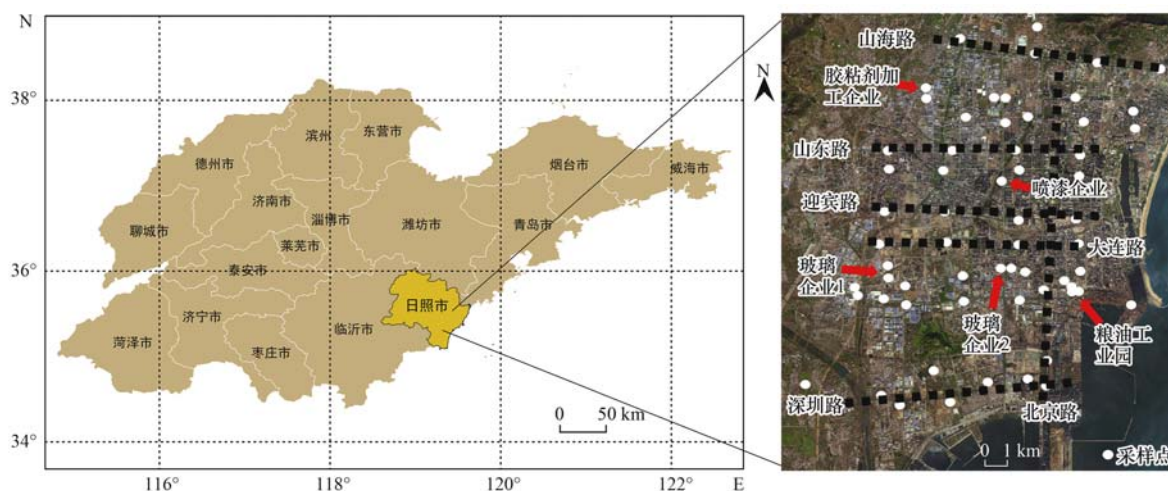


图 1 采样区域位置示意

Fig. 1 Location of sampling area

1.2.2 仪器与试剂

声表面波气相色谱仪(GC-SAW):型号 ZNose Model 4200,美国 Electronic Sensor Technology 公司,

同时配有正构烷烃 C6 ~ C14 标准溶液。该仪器可对沸点在 60 ~ 350℃ 的有机物进行检测,其采样基本原理见图 2。可检测的具体 VOCs 物种为:对于烷烃

为 5 个 C (戊烷) 以上; 对于其它有机物则包括一些含碳数更少的物种, 例如丁醇、乙酸和乙酸乙酯等; 对于苯系物, 沸点最低的物质苯 (80.1℃) 检测限浓度较高, 本研究没有获得有效的苯浓度, 因此本文所提苯系物不包括物质苯. 为简化描述, 本文将该仪器可检测到的有机物统一命名为 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$, $\text{TVOC}_{\text{C}>5}$ 表

示检测到的挥发性有机物总量. 其它用到的试剂有载气氮气 (99.999%), 北京兆格气体科技有限公司; 甲醇 (色谱纯), 美国 Fisher 公司; TNT 标准溶液 ($1.01 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$), 国家标准物质研究中心; TNT 固体样品 (纯度未知), 由北京 103 研究所提供.

GC-SAW 的测试条件如下: 色谱柱, DB-5 ($1 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$), 初始温度 45°C , $6^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 程序升温至 180°C , 柱流量 $3 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 进样口温度 200°C ; 六通阀温度 160°C ; 检测器 25°C ; 检测器烘烤温度 150°C ; 载气氮气; 泵吸时间 40 s ; 分析时间 35 s . 样品测试前, 使用 C6 ~ C18 正构烷烃标准溶液对保留指数 (RI) 进行校准.

1.2.3 仪器标定与数据质控

仪器标定时, 配制不同浓度的 VOCs 标准物质, 以液体进样的方式测试各 VOCs 标准品, 记录保留指数和响应值, 根据保留指数测试结果, 确定各 VOCs 保留指数定性范围, 以响应值对浓度绘制标准曲线, 外标法进行定量. 同时, 由于环境中各 VOCs 浓度偏低, 因此检测到响应较低的浓度值时, 直接以单点校正法对检出物质进行定量. 主要 VOCs 组分的标定结果见表 1.

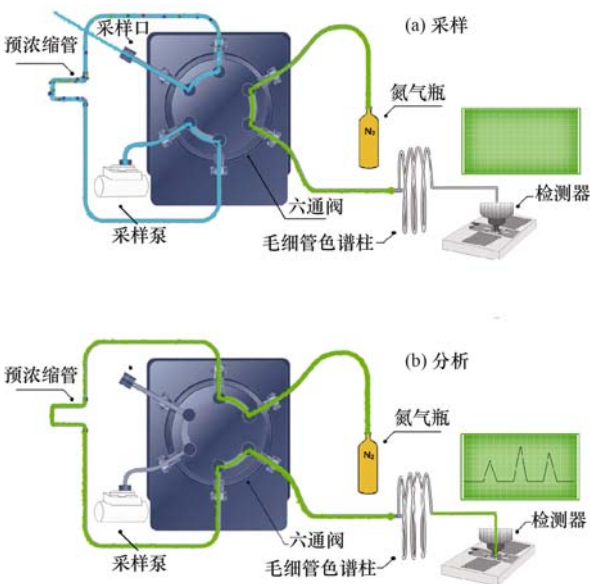


图 2 声表面波气相色谱仪原理
Fig. 2 Schematic diagram of GC-SAW

表 1 各 VOCs 定量测试结果
Table 1 Quantitative test results of VOCs

序号	物质名称	保留指数	检出限 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	响应范围 /Hz	线性范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	线性方程	R^2
1	正辛烷	792 ± 10	26.90	<436 >436	$0 \sim 390.8$ $390.8 \sim 3\,908$	$y = 7.8x$ $y = 5.2x + 170.9$	1.0 0.999 6
2	甲苯	771 ± 8	57.30	<755 >755	$0 \sim 1.433 \times 10^3$ $1.43 \times 10^3 \sim 1.43 \times 10^4$	$y = 35.6x$ $y = 21.0x + 551.8$	1.0 0.989 4
3	异丙苯 (正丙苯)	929 ± 5	6.54	<273 >273	$0 \sim 59.7$ $59.7 \sim 597$	$y = 32.0x$ $y = 27.7x + 44.5$	1.0 0.999 9
4	正壬烷	896 ± 10	7.59	$<2\,273.5$ $>2\,273.5$	$0 \sim 1.66 \times 10^3$ $1.66 \times 10^3 \sim 1.66 \times 10^4$	$y = 95.6x$ $y = 78.6x + 396.2$	1.0 1.0
5	癸烷	995 ± 10	4.72	<979 >979	$0 \sim 77.4$ $7.4 \sim 774$	$y = 88.5x$ $y = 49.4x + 389.5$	1.0 0.999 7
6	对-二乙基苯	$1\,052 \pm 13$	2.37	<655 >655	$0 \sim 32.7$ $32.7 \sim 327$	$y = 140.0x$ $y = 66.6x + 357.2$	1.0 0.999 9

1.2.4 臭氧生成潜势计算方法

挥发和半挥发性有机物是臭氧形成的重要前体物, 采用 Carter 提出的最大增量反应活性衡量 VOCs 对 O_3 生成的贡献, 通过文献 [13] 提出的臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 可对 VOCs 对臭氧生成的影响进行定量分析 [14,15]. 其公式为:

$$\text{OFP}(\text{VOCs}_i) = \text{VOCs}_i \times \text{MIR}(\text{VOCs}_i) \quad (1)$$

式中, $\text{OFP}(\text{VOCs}_i)$ 为组分 i 的臭氧生成潜势量, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; VOCs_i 为组分 i 的浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; MIR

(VOCs_i) 为组分 i 的最大增量反应活性, 数据来源文献 [13].

1.2.5 $\cdot\text{OH}$ 反应速率计算方法

对流层中 VOCs 的光氧化反应常以与 $\cdot\text{OH}$ 的反应开始, 以 VOCs 物种的这种初始反应能力即消耗 $\cdot\text{OH}$ 的速率可以反映其对光氧化反应的相对贡献. 其计算公式为:

$$L_i^{\cdot\text{OH}} = M_i \times K_i^{\cdot\text{OH}} \quad (2)$$

式中, $L_i^{\cdot\text{OH}}$ 为 VOCs 物种 i 的 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率, s^{-1} ;

M_i 为物种 i 的量浓度, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$; K_i^{OH} 为 VOCs 物种 i 的反应速率常数, $\text{m}^3\cdot(\text{mol}\cdot\text{s})^{-1}$, 数据来源文献 [16].

1.2.6 高斯扩散模型的建立

本研究使用应用较为广泛的高斯扩散模型对工业区中污染物的扩散进行模拟, 其公式如下:

$$c(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (3)$$

式中, c 为点 (x,y,z) 处的污染物浓度, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; x 为计算点距排放源下风向的距离, m ; y 为计算点距排放源横向距离, m ; z 为计算点距地面高度, m ; H 为排放源高度, m ; Q 为排放源源强, $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$; u 为平均风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; σ_y 为水平方向扩散参数; σ_z 为垂直方向扩散参数, 扩散参数的取值参考文献 [17]. 本文通过 Igor pro8 进行数值模拟和绘图.

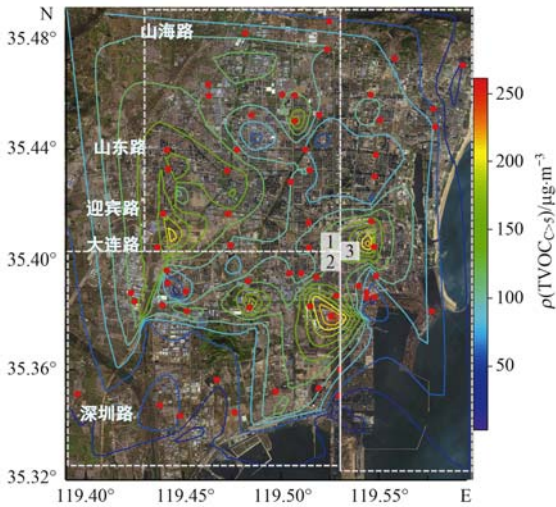
2 结果与讨论

2.1 城区 VOC_{C>5} 总体空间分布

图 3 为对所有采样点的 VOC_{C>5} 总浓度分布情况, 表 2 为所检测到的主要 VOC_{C>5} 物种浓度情况. 日照全市的 $\rho(\text{TVOC}_{\text{C>5}})$ 主要集中在 $50\sim150\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 主要污染物种为苯系物、正辛烷和其它长链烷烃 (表 2). VOC_{C>5} 分布状况受排放源影响明显, 位于城区上风向且未受工业排放影响的城区最南端海岸线附近 VOC_{C>5} 总浓度明显低于其他区域. 而在市区, 工业活动和居民活动使 VOC_{C>5} 的分布出现了峰值, 受港口运输车辆、粮油工业企业和居民活动的多重影响, VOC_{C>5} 总浓度最大值出现在城区东南部, $\rho(\text{TVOC}_{\text{C>5}})$ 达到 $260.12\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2 城市功能分区 VOC_{C>5} 分布规律

以主导功能的不同, 将日照市主要区域划分为商业区、港口区和工业区这 3 个区域, 表 3 为对 3 个区域主要 VOC_{C>5} 物种浓度状况的统计结果. 结果显示港口区、商业区与工业区区域平均 $\rho(\text{TVOC}_{\text{C>5}})$ 分别为 80.5 、 115.3 和 $118.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 商业区与工业区的 VOC_{C>5} 总浓度明显高于港口区



1. 商业区, 2. 工业区, 3. 港口区;
红点表示采样点位; 不同颜色线条为等浓度线

图 3 城区 VOC_{C>5} 总体空间分布

Fig. 3 Overall spatial distribution of VOC_{C>5} in urban area

表 2 主要 VOC_{C>5} 物种道路浓度状况及检测限/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Road concentrations and detection limits of major VOC_{C>5} species/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

编号	物种	最大值	平均值	方法检测限
1	2-甲基庚烷	41.2	1.28	5.73×10^{-2}
2	甲苯	192.26	25.07	5.73×10^{-2}
3	正辛烷	116.78	31.37	2.69×10^{-2}
4	氯苯	11.64	0.33	2.19×10^{-2}
5	苯乙烯	26.53	2.45	7.59×10^{-3}
6	壬烷	37.21	4.99	7.59×10^{-3}
7	异丙苯	19.40	1.49	6.54×10^{-3}
8	正丙苯	21.55	4.24	6.54×10^{-3}
9	均-三甲苯	16.20	3.46	4.72×10^{-3}
10	癸烷	20.68	3.95	4.72×10^{-3}
11	1,2,3-三甲苯	14.50	4.36	4.72×10^{-3}
12	丁基苯	7.68	0.59	2.37×10^{-3}
13	对-二乙基苯	38.89	1.72	2.37×10^{-3}
14	正十一烷	4.24	1.25	9.22×10^{-4}
15	正壬醛	1.88	0.31	4.30×10^{-4}
16	正十二烷及以上	22.82	8.65	3.94×10^{-4}
17	间/对/邻-二甲苯	53.54	2.58	2.19×10^{-2}
18	正丁醇	4.39	0.08	1.23×10^{-2}
19	乙酸丁酯	73.82	1.30	2.69×10^{-2}

域, 证明工业与居民活动影响了局地的挥发性有机物浓度分布.

对比 3 个区域的 $\rho(\text{烷烃})$, 商业区 ($77.98\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 工业区 ($54.96\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 港口区

表 3 功能分区下主要 VOC_{C>5} 污染物种平均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Average concentration of main VOC_{C>5} pollution species in functional areas/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

功能分区	$\rho(\text{烷烃})$				$\rho(\text{苯系物})$				ρ (总烷烃)	ρ (总苯系物)	ρ (TVOC _{C>5})
	壬烷	癸烷	正十一烷	正辛烷	异丙苯	正丙苯	甲苯	1,2,3-三甲苯			
港口区	3.91	3.82	1.09	27.57	0.67	5.27	13.73	4.08	49.84	30.45	80.49
工业区	7.03	3.46	1.46	34.32	0.44	3.70	44.93	4.36	54.96	60.02	115.32
商业区	9.97	6.62	1.47	50.93	1.57	6.54	19.62	5.55	77.98	39.63	118.06

($49.84\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), C5 以上烷烃的主要来源是汽车尾气、工业排放和燃油挥发^[18,19]. 正辛烷是烷烃中浓度最高的种类,正构烷烃的天然本底值很小,可以有效反映大气污染状况^[20~22]. 商业区的正辛烷浓度显著高于其他两个区域,可见居民活动和工业过程对日照市区的 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 组成产生了明显影响.

苯系物具有较高的光化学反应活性,同时对人体健康危害较大,具有致癌作用,大气中苯系物的主要来源有化工行业、汽车尾气和装修行业等^[23~25]. 主要检测到的苯系物物种有甲苯、正丙苯和 1,2,3-三甲苯等. 工业区的苯系物浓度显著高于港口区和商业区,其来源可能是区域中化工企业的无组织排放与机动车排放. 其中浓度最高的物质甲苯主要来源于汽油和有机溶剂.

表 4 为在日照市测得的 VOCs 浓度状况与近年国内其他城市的比较结果,考虑到 GC-SAW 对苯系物总量测定较为准确,而对 TVOCs 存在一定低估,

总体来看日照市 TVOC 浓度状况在合理范围内. 日照市工业区的苯系物污染程度相对较高,在各城市中排在第二位,仅低于杭州市的 $62.78\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,工业区受到化工企业和机动车等含苯排放源影响明显. 各城市中居民区测得的 TVOCs 浓度水平偏高,在日照也获得了相同结论,居民活动影响最大的商业区是功能分区下 VOCs 浓度水平最高的区域,可见居民生活源是城市中 VOCs 的重要来源.

2.3 道路 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 浓度分布规律

表 5 为对部分路段采样数据进行分析得到的日照市道路 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 浓度分布的规律,由南至北选择了深圳路、大连路、迎宾路、山东路和山海路这 5 条道路. 日照市工业企业主要分布在大连路与深圳路之间,而 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 总浓度最大值出现在了迎宾路上. 图 4 为采样期间市区位于迎宾路与山东路之间的监测站站点的风速风向数据,可见 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 浓度变化规律与主导风向南风一致.

表 4 日照与国内其他城市 VOCs 浓度对比¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 4 Comparison of VOCs concentration between Rizhao and other cities at home and abroad/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$						
城市	仪器	采样区域	ρ (总烷烃)	ρ (总苯系物)	ρ (TVOCs)	文献
北京	GC-MS/FID	居民生活区	55.58	57.27	168.43	[7]
成都	GC-MSD/FID	主要道路旁	65.07	47.09	132.61	[26]
济南	GC-MS	居民区	59.67	18.41	158.71	[27]
合肥	GC-MS	全市不同街区	29.05	54.17	95.36	[28]
杭州	GC-MS	主要道路旁	85.06	62.78	202.53	[29]
武汉	GC-MSD/FID	居民区	115.05	16.84	249.70	[15]
台北	GC-MS	靠近工业区的城市地区	40.90	17.10	76.00	[12]
日照*	GC-SAW	工业区	54.96	60.02	115.32	本研究
日照*	GC-SAW	商业区	77.98	39.63	118.06	本研究

1) * 表示由于仪器测试方法限定,VOCs 浓度测定存在一定低估

表 5 不同道路 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 浓度均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 5 Mean $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ concentration of different roads/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$												
道路 (由南至北)	ρ (烷烃)				ρ (苯系物)				ρ (总烷烃)	ρ (总苯系物)	ρ (TVOC _{C>5})	
	正辛烷	壬烷	癸烷	甲苯	对-二乙基苯	1,2,3-三甲苯	正丙苯	异丙苯				
深圳路	44.38	4.38	5.35	3.52	0.80	4.23	3.07	2.83	62.94	14.84	77.88	
大连路	71.50	14.95	6.73	2.18	1.73	5.97	8.85	0.50	104.40	19.23	124.03	
迎宾路	30.84	19.15	7.16	86.77	0.75	4.55	4.29	1.20	65.74	98.46	164.37	
山东路	45.50	4.38	2.63	1.61	0.91	4.59	5.98	0.27	57.54	14.48	73.16	
山海路	7.17	0.00	0.79	42.18	0.68	2.70	3.70	0.31	14.98	53.70	68.88	

利用高斯模型对不同高度排放源扩散过程进行模拟. 排放源源强设定为 $10\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均风速取采样期间日照平均风速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 计算点高度 z 选择 GC-SAW 的采样高度 1.5 m , 排放源高度 H 取 $10\sim 50\text{ m}$ 的不同高度, 当排放源高度 H 为 40 m 时仍会对下风向 $1\sim 2\text{ km}$ 范围污染物浓度产生影响(图 5), 而无组织排放($H=2\text{ m}$)的影响范围远小于这个距离, 可知对下风向道路峰值的出现产生影响的主要是高架点源. $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 浓度较高的大连路和迎宾路与上海

路沿线的工业企业距离分别为 1.8 km 和 2.6 km 左右, 同时大连路与上海路之间存在大量居民区, 建筑物的扰动会对扩散过程产生影响; 并且迎宾路是连接日照市区与机场、火车站等交通枢纽的快速通道, 机动车 VOCs 排放量大. 上述原因共同导致了迎宾路 $\rho(\text{TVOC}_{\text{C}>5})$ 均值达到 $164.37\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[30,31]. 而在工业区以南的深圳路与北侧工业和居民活动相对较少的山海路, $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 浓度则明显低于其他路段, 说明企业源与居民源对日照市区 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 的分布产

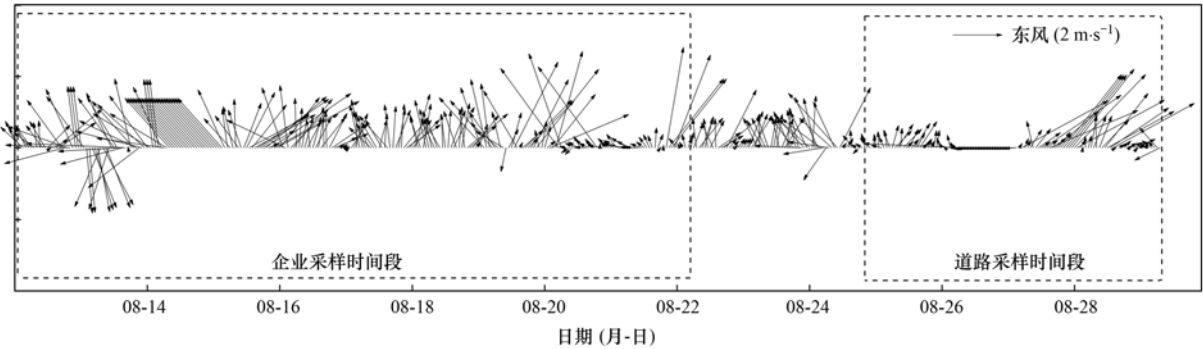


图 4 采样期间风速和风向时间序列

Fig. 4 Time series of wind speed and direction during sampling

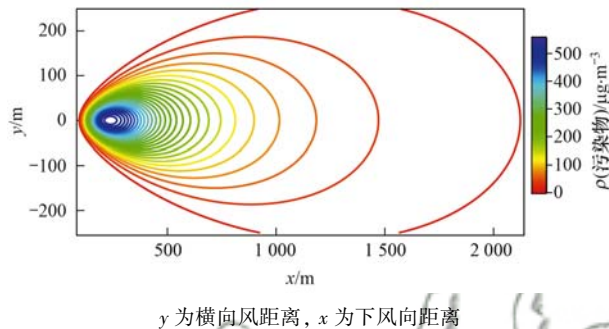


图 5 高斯扩散模型下污染物浓度分布

Fig. 5 Distribution of pollutant concentration in Gaussian diffusion model

生了显著影响.

2.4 不同企业类型 VOC_{C>5} 污染特征

为了对全市挥发性有机物污染进行溯源,以市区中胶粘剂加工、喷漆、玻璃和粮油共计 5 家企业为代表,对不同类型的污染特征进行研究,见表 6,其中浓度值为企业厂区内部选点测得的浓度均值,主要来源为厂区内的无组织排放.

2.4.1 胶粘剂加工企业污染特征

所研究胶粘剂加工企业位于市区西北,主要生产丙烯酸酯类粘合剂,生产过程中大量使用丁苯等含苯原料,厂区内甲苯、对-二乙基苯和异丙苯等苯系物浓度均高于其他企业.

2.4.2 喷漆企业污染特征

此喷漆企业为一摩托车组装公司,生产过程大量使用喷漆工艺,位于市区中心.油漆是一种较为复杂的混合体系,通常使用甲苯类物质作为溶剂,油漆喷涂车间缺少密封和 VOCs 吸附装置,使得所测甲苯、正辛烷、二甲苯和三甲苯浓度均较高^[32,33],其 ρ (总苯系物)达到 $1\,010.84\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. ρ (甲苯) ($286.42\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 ρ (二甲苯) ($534.86\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 也显著高于其他点位.高浓度的正辛烷可能来源于醇类溶剂^[34].

2.4.3 玻璃企业污染特征

玻璃在烧制过程和瓶盖在烤花过程中会挥发大量有机物,主要排放的 VOC_{C>5} 物种有甲基环己烷、正辛烷和苯乙烯等.表 6 中玻璃 1 为一玻璃瓶生产园区,包括两家制瓶企业和一家瓶盖生产企业,此公司周边工业企业数量较少,受居民活动影响也较小,其 ρ (TVOC_{C>5}) 较低 ($228.21\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);玻璃 2 为一家玻璃瓶生产企业,此企业环保措施不到位,喷涂和制瓶生产车间密闭较差,无组织排放大量 VOCs,此企业测得 ρ (TVOC_{C>5}) 达到 $3\,019.39\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是本次采样中测得的 VOC_{C>5} 总浓度最高值,主要污染物种为甲苯、二甲苯、苯乙烯和正辛烷.

表 6 重点企业主要 VOC_{C>5} 物种浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 6 Peak concentrations of VOC_{C>5} species in key enterprises/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

企业类型	ρ (烷烃)		ρ (苯系物)							ρ (总烷烃)	ρ (总 苯系物)	ρ (TVOC _{C>5})
	正十二烷 及以上	正辛烷	甲苯	正丙苯	异丙苯	二甲苯	1,2,3-三 甲苯	对-二乙 基苯	苯乙烯			
胶粘剂	35.68	58.28	315.85	3.30	21.37	5.06	17.08	16.25	5.31	98.96	432.34	536.83
喷漆	17.00	277.86	286.42	42.63	6.93	534.86	16.95	9.02	40.58	294.86	1 010.84	1 306.98
玻璃 1	6.32	116.78	56.89	13.21	2.07	12.77	2.65	2.12	7.32	132.18	96.03	228.21
玻璃 2	58.49	621.92	276.61	27.47	4.80	1231.58	7.69	4.54	368.00	709.20	1 989.85	3 019.39
粮油	7.17	24.63	73.05	8.17	5.06	10.26	3.32	2.45	2.99	35.60	105.30	150.35

2.4.4 粮油企业污染特征

粮油企业分析了位于市区东南的粮油工业园,

多家大型油脂企业位于此处,这些企业以生产大豆油为主.厂区内 ρ (TVOC_{C>5}) 均值为 150.35

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 没有检测到高浓度的 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$, 说明园区内企业在生产过程中对无组织排放进行了有效控制, 废气治理效果良好^[35,36].

2.5 日照市 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 化学反应活性分析

2.5.1 环境空气 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 化学反应活性分析

对城市功能分区不同组分的 OFP 贡献率和 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率贡献率进行研究, 结果见图 6. 在 OFP 贡献率中, 不同区域中苯系物均是 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 中贡献率较大的部分, 港口区、工业区和商业区的苯系物贡献率分别为 84.3%、88.8% 和 80.2%, 烷烃虽然在质量分数中占有一定比例, 但其 OFP 值较小, 3 个区域均小于 20%. 而在 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率的贡献率中, 由于在道路检测中正辛烷和癸烷的浓度较高, 这类高碳烷烃 $\cdot\text{OH}$ 消耗反应速率常数较大, 港口区、工业区和商业区中烷烃对 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率的贡献率分别达到 53.3%、44.2% 和 60.5%.

对单个 VOCs 物种的 OFP 贡献率和 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率贡献率进行分析(图 7), 甲苯(34.97%)、均三甲苯(16.51%)和 1,2,3-三甲苯(22.97%)这 3 种物质合计 OFP 贡献率达到 74.45%. 在 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率的贡献率中, 正辛烷和上述 3 种苯系物合计贡献率达到 69.1%, 上述苯类物质都是常用的有机化工原料^[37,38]. 综上所述居民与工业活动是观测期间日照市区臭氧生成的重要来源.

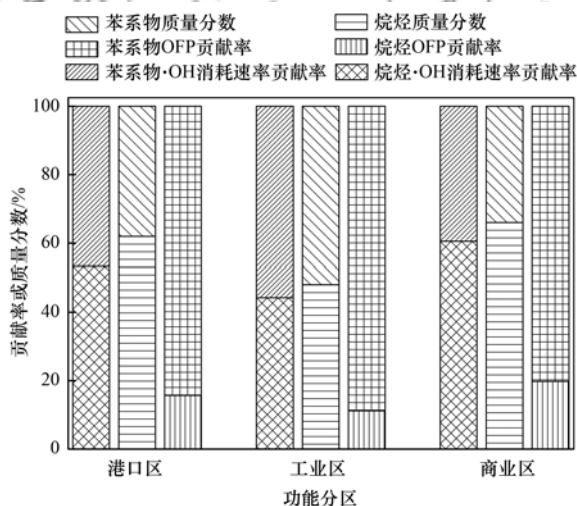


图6 功能分区下主要 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 组分的化学反应活性

Fig. 6 Contribution of $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ components to OFP under functional zoning

2.5.2 重点企业 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 化学反应活性分析

对上文所研究的典型行业主要 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 组分进行 OFP 贡献率和 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率贡献率的分析(图 8), 苯系物仍是导致臭氧生成的主要组分, 可见企业排放对全市挥发性有机物浓度分布乃至臭氧的生成都有着明显影响. 对比不同类型企业的 OFP 贡献

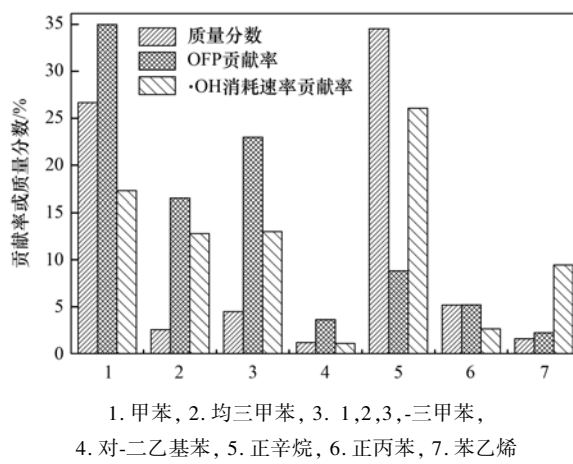


图7 全市主要 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 组分的化学反应活性

Fig. 7 Contribution of $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ components to OFP in Rizhao City

率, VOCs 污染最为严重的胶粘剂加工、喷漆和玻璃 2 企业中苯系物贡献率均很高, 分别达到 96.8%、97.2% 和 95.9%, 其 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率贡献率也分别达到了 81.4%、85.1% 和 88.9%, 可见对上述物种的源排放进行控制可以有效降低当地的臭氧浓度, 而工业生产中的溶剂挥发与排放是臭氧治理的重点管控对象.

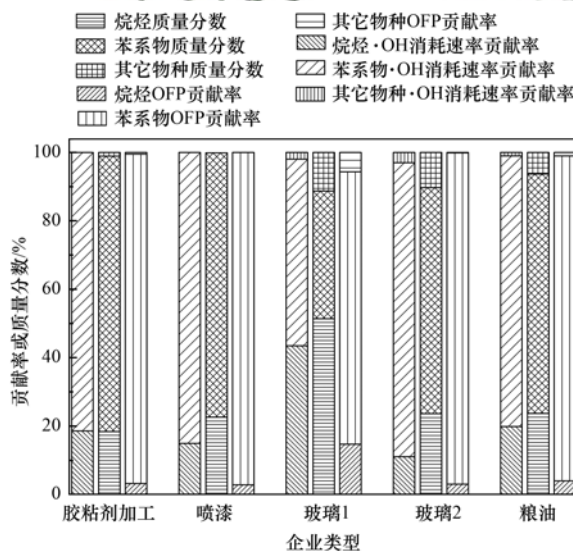


图8 不同类型企业主要 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 组分的化学反应活性对比

Fig. 8 Contribution of $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ components to OFP in different types of enterprises

3 结论

(1) 日照全市 $\rho(\text{TVOC}_{\text{C}>5})$ 主要集中在 $50 \sim 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 主要污染物种为甲苯、正丙苯、正辛烷和壬烷等. 港口区、商业区和工业区区域 $\rho(\text{TVOC}_{\text{C}>5})$ 分别为 80.5、115.3 和 $118.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 工业和居民活动影响了局地的挥发性有机物浓度分布. 受工业排放污染物扩散和机动车排放的共同影响, 日照市主要道路的 $\text{VOC}_{\text{C}>5}$ 总浓度最大值出现在

位于市中心的迎宾路附近, $\rho(\text{TVOC}_{\text{C}_{>5}})$ 达到了 $164.37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(2) 在市区内不同类型的代表企业中, 胶粘剂加工、喷漆和玻璃企业厂区内均检测到了较高浓度的苯系物, $\rho(\text{总苯系物})$ 分别达到 432.34、1 010.84 和 1 989.85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 主要排放物种包括甲苯、二甲苯和苯乙烯等。

(3) 对 $\text{VOC}_{\text{C}_{>5}}$ 化学反应活性的分析表明, 苯系物特别是甲苯、均三甲苯和 1,2,3-三甲苯 3 种物质与正辛烷是日照市区臭氧生成的重要活性组分, 对市区内重点行业的 VOCs 排放管控可以为全市臭氧的协同治理提供帮助。

参考文献:

- [1] 王韵杰, 张少君, 郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1755-1762.
Wang Y J, Zhang S J, Hao J M. Air pollution control in China: progress, challenges and future pathways [J]. Research of Environmental Science, 2019, **32**(10): 1755-1762.
- [2] 关攀博, 周颖, 程水源, 等. 典型重工业城市空气重污染过程特征与来源解析[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(1): 31-40.
Guan P B, Zhou Y, Cheng S Y, et al. Characteristics of heavy pollution process and source appointment in typical heavy industry cities [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(1): 31-40.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>, 2020-06-02.
- [4] Yuan B, Shao M, Lu S H, et al. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(15): 1919-1926.
- [5] 任义君, 马双良, 王思维, 等. 郑州市春季大气污染过程 VOCs 特征、臭氧生成潜势及源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2577-2585.
Ren Y J, Ma S L, Wang S W, et al. Ambient VOCs characteristics, ozone formation potential, and source apportionment of air pollution in spring in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2577-2585.
- [6] 王黎明, 周瑶, 赵婕, 等. 空气中 VOC 检测方法的现状及研究方向[J]. 上海工程技术大学学报, 2011, **25**(2): 104-107, 138.
Wang L M, Zhou Y, Zhao J, et al. Status and development direction of detection method for VOC in air [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, **25**(2): 104-107, 138.
- [7] Li J, Hao Y F, Simayi M, et al. Verification of anthropogenic VOC emission inventory through ambient measurements and satellite retrievals [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(9): 5905-5921.
- [8] 何世堂, 刘久玲, 刘明华, 等. 声表面波气相色谱仪及其应用[J]. 应用声学, 2018, **37**(1): 1-7.
He S T, Liu J L, Liu M H, et al. Surface acoustic wave gas chromatography and its application [J]. Applied Acoustics, 2018, **37**(1): 1-7.
- [9] 何世堂, 王文, 刘久玲, 等. 声表面波气体传感器研究进展[J]. 应用声学, 2013, **32**(4): 252-262.
He S T, Wang W, Liu J L, et al. Research progress of surface acoustic wave based gas sensors [J]. Applied Acoustics, 2013, **32**(4): 252-262.
- [10] 马丽, 胡本涛. 气相色谱法测定工业废气中甲基环己烷[J]. 能源与环境, 2016, **136**(3): 92, 102.
- [11] 周子航, 邓也, 周小玲, 等. 成都市工业挥发性有机物排放成分谱[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3042-3055.
Zhou Z H, Deng Y, Zhou X L, et al. Source profiles of industrial emission-based VOCs in Chengdu [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- [12] Huang Y S, Hsieh C C. VOC characteristics and sources at nine photochemical assessment monitoring stations in western Taiwan [J]. Atmospheric Environment, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117741.
- [13] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Air & Waste, 1994, **44**(7): 881-899.
- [14] 王红丽. 上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3159-3167.
Wang H L. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the formation of ozone in Shanghai [J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- [15] 沈龙娇, 梁胜文, 吴玉婷, 等. 武汉市居民区大气 VOCs 的污染特征和来源解析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, **10**(5): 527-535.
Shen L J, Liang S W, Wu Y T, et al. Pollution characteristics and source apportionment of VOCs in ambient air of a residential area in Wuhan [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, **10**(5): 527-535.
- [16] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. Chemical Reviews, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [17] GB/T 3840-1991, 制定地方大气污染物排放标准的技术方法[S].
- [18] 李友平, 唐娅, 范忠雨, 等. 成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 576-584.
Li Y P, Tang Y, Fan Z Y, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in Chengdu [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 576-584.
- [19] 高素莲, 闫学军, 刘光辉, 等. 济南市夏季臭氧重污染时段 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(9): 1839-1846.
Gao S L, Yan X J, Liu G H, et al. Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in serious ozone pollution period of summer in Jinan [J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, **29**(9): 1839-1846.
- [20] Wang X, Liu G J, Hu R Y, et al. Distribution, sources, and health risk assessment of volatile organic compounds in Hefei city [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, **78**(3): 392-400.
- [21] 应方, 包贞, 杨成军, 等. 杭州市道路空气中挥发性有机物及其大气化学反应活性研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 3056-3064.
Ying F, Bao Z, Yang C J, et al. Analysis of volatile organic compounds (VOCs) and their atmospheric chemical reactivity in ambient air around urban traffic roads in Hangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(12): 3056-3064.
- [22] Saito S, Nagao I, Kanzawa H. Characteristics of ambient $\text{C}_2\text{-C}_{11}$ non-methane hydrocarbons in metropolitan Nagoya, Japan [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(29): 4384-4395.
- [23] Xu J, Zhang X L, Xu X F, et al. Measurement of surface ozone and its precursors in urban and rural sites in Beijing [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2011, **2**: 255-261.

- [24] Wang M, Shao M, Chen W, *et al.* A temporally and spatially resolved validation of emission inventories by measurements of ambient volatile organic compounds in Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14** (12): 5871-5891.
- [25] 齐安安, 周小平, 马鑫, 等. 兰州市低碳数正构烷烃组分特征及大气化学反应活性分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33** (2): 296-304.
Qi A A, Zhou X P, Ma X, *et al.* Characteristics and atmospheric chemical reaction activity of low carbon number normal alkanes in Lanzhou city[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33** (2): 296-304.
- [26] 侯雪超. 南昌市大气气溶胶中正构烷烃的分布特征及来源分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
Hou X C. Distribution characteristic and source apportionment of N-alkanes in the atmospheric aerosols of Nanchang [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.
- [27] Brito J, Wurm F, Yáñez-Serrano A M, *et al.* Vehicular emission ratios of VOCs in a megacity impacted by extensive ethanol use: results of ambient measurements in São Paulo, Brazil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (19): 11381-11387.
- [28] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势[D]. 北京: 清华大学, 2009.
Wei W. Study on current and future anthropogenic emissions of volatile organic compounds in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [29] 苗垒. 机动车燃油蒸发排放特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Miao L. Study on fuel evaporative emission Property of motor vehicles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [30] 王宇, 齐飞, 伦小秀, 等. 北京市道路空气中挥发性有机物时空分布规律[J]. *环境科学研究*, 2010, **23** (5): 596-600.
Wang Y, Qi F, Lun X X, *et al.* Temporal and spatial distribution rule of volatile organic compounds in ambient air around urban traffic roads in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23** (5): 596-600.
- [31] Dominutti P, Nogueira T, Fornaro A, *et al.* One decade of VOCs measurements in São Paulo megacity: composition, variability, and emission evaluation in a biofuel usage context[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139790.
- [32] Liang Q, Bao X, Sun Q, *et al.* Imaging VOC distribution in cities and tracing VOC emission sources with a novel mobile proton transfer reaction mass spectrometer [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114628.
- [33] 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.
- [34] 王鹏, 尚刚, 刘启东, 等. 浅析大豆油脂浸出系统废气污染源分析及防治[J]. *粮食与食品工业*, 2018, **25** (4): 11-13.
Wang P, Shang G, Liu Q D, *et al.* Analysis and prevention of exhaust gas pollution from soybean oil extraction system [J]. *Cereal and Food Industry*, 2018, **25** (4): 11-13.
- [35] 徐新, 王跃思, 刘广仁, 等. 北京大气中 BTEX 的观测分析与研究[J]. *环境科学*, 2004, **25** (3): 14-18.
Xu X, Wang Y S, Liu G R, *et al.* Measurement and study on the atmospheric trace BTEX in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, **25** (3): 14-18.
- [36] Keita S, Lioussé C, Yoboué V, *et al.* Particle and VOC emission factor measurements for anthropogenic sources in West Africa [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18** (10): 7691-7708.
- [37] Milazzo M J, Gohlke J M, Gallagher D L, *et al.* Potential for city parks to reduce exposure to BTEX in air [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2019, **21** (1): 40-50.
- [38] Sairat T, Homwuttiwong S, Homwuttiwong K, *et al.* Investigation of gasoline distributions within petrol stations: spatial and seasonal concentrations, sources, mitigation measures, and occupationally exposed symptoms [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22** (18): 13870-13880.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)