

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

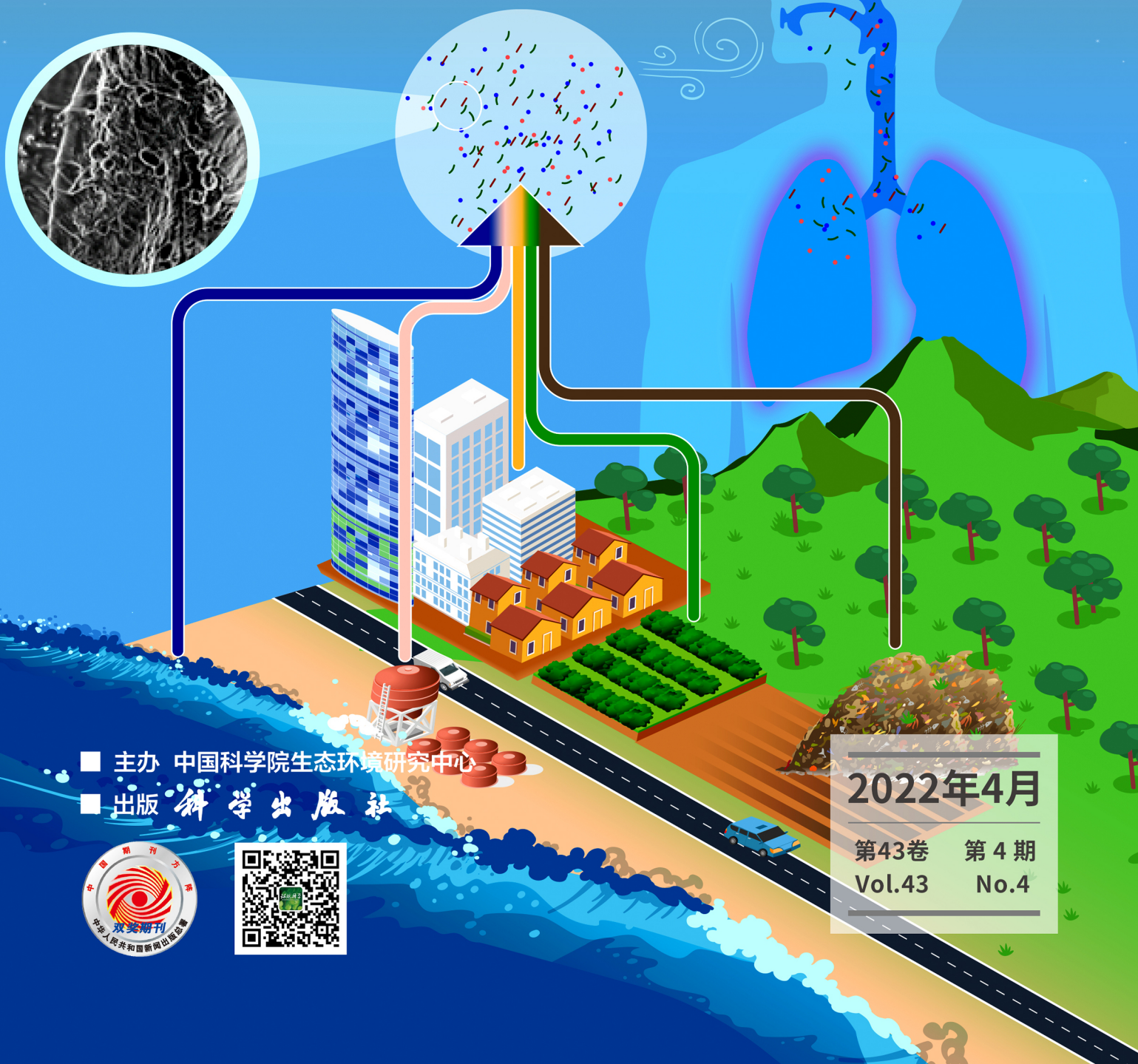
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

珠三角某石化园区 VOCs 排放特征及影响评价

张雪驰¹, 沙青娥^{1*}, 陆梦华², 王毓铮², 饶思杰¹, 明桂英¹, 李勤勤¹, 吴淑珠³, 郑君瑜^{1*}

(1. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 2. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 3. 珠海市生态环境局高栏港分局, 珠海 519050)

摘要: 石化行业是挥发性有机物 (VOCs) 的重要来源之一, 然而, 当前石化行业 VOCs 研究多集中于炼油厂 VOCs 排放特征分析, 针对有机化工和合成材料等子行业的研究较为缺乏。选取珠三角地区某石化园区中石油炼制、合成材料和有机化工 3 个主要行业的 8 家代表性企业和园区周围敏感点为研究对象, 采集分析了包含 22 种含氧 VOCs (OVOCs) 在内的 115 种 VOCs 物种, 识别了 VOCs 浓度及组分特征, 并开展了源反应性 (SR)、恶臭指数、致癌和非致癌健康风险影响评价。结果表明: ① 石化园有组织排放的 VOCs 浓度变化较大, 其范围为 0.2 ~ 46.3 mg·m⁻³, 排放的 VOCs 组分受废气处理设备影响显著, 经燃烧类设备处理后的 VOCs 主要组分为甲醛, 经非燃烧类设备处理后的 VOCs 主要组分为 1,3-丁二烯、丙烯和异丁烷等组分; ② 大多数企业无组织排放点和敏感点 VOCs 主要组分为丙酮、甲醛和乙酸乙酯等 OVOCs, 石油储罐区无组织排放 VOCs 以烷烃为主; ③ SR 主要贡献种类为 OVOCs、芳香烃和烯烃, 其贡献率分别为 43.1%、24.2% 和 21.1%, 大多数企业的 SR 主要贡献组分为甲醛、乙醛、间/对-二甲苯、乙烯和甲苯; ④ 无组织排放点和敏感点均存在恶臭影响, 引起恶臭的主要组分为乙醛、正丁醛、丙醛、己醛和戊醛等 OVOCs; ⑤ 所测行业均未发现致癌风险, 但树脂生产和醛醇生产企业的无组织排放点和敏感点存在非致癌风险, 主要由丙烯醛、乙醛和丙醛等 OVOCs 引起。识别的珠三角地区某石化园区 VOCs 排放特征和影响, 可为制定石化园区基于优控 VOCs 组分的精准管控策略提供科学支撑。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 石化行业; 污染源反应性 (SR); 恶臭污染; 健康风险

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1766-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107184

Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region

ZHANG Xue-chi¹, SHA Qing-e^{1*}, LU Meng-hua², WANG Yu-zheng², RAO Si-jie¹, MING Gui-ying¹, LI Qin-qin¹, WU Shu-zhu³, ZHENG Jun-yu^{1*}

(1. Institute for Environment and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2. College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Gaolangang Branch of Zhuhai Ecological Environment Bureau, Zhuhai 519050, China)

Abstract: The petrochemical industry is one of the major emission sources of volatile organic compounds (VOCs). However, the current studies have mostly focused on the identification of the chemical characteristics of non-methane hydrocarbon (NMHC) VOCs species from the petroleum refining sub-sector. Research on the characteristics of VOCs components in oxygenated VOCs (OVOCs) species and other important sub-sectors is still lacking. Therefore, eight enterprises at a petrochemical industrial park in the Pearl River Delta region were carefully selected to represent three major subsectors, namely petroleum refining, synthetic materials, and organic chemicals, for the petrochemical industry. The VOCs (including 22 OVOCs species) from stack emissions and fugitive emissions, as well as nearby sensitive sites, were sampled, and the source reactivity (SR), the thresholds of malodor, and the carcinogenic and non-carcinogenic risks were assessed. The main results were as follows: ① the VOCs concentrations of the stack emissions from the petrochemical industrial park were between 0.2-46.3 mg·m⁻³. The VOCs species were greatly affected by the type of after-treatment technology. A major VOC species emitted from the combustion-based after treatments was formaldehyde, whereas the species emitted from the non-combustion-based equipment were acetone, 1,3-butadiene, acrylic, and isobutane. ② The fugitive VOCs emissions from the petroleum storage tank area were dominated by alkanes, whereas the other fugitive emission sites and the sensitive sites were dominated by OVOCs such as acetone, formaldehyde, and ethyl acetate. ③ The SRs were mainly contributed by OVOCs, aromatics, and olefins, with average proportions of 43.1%, 24.2%, and 21.1%, respectively, with the major species being formaldehyde, acetaldehyde, *m/p*-xylene, ethylene, and toluene. ④ The malodor appeared both in fugitive emission areas and the sensitive sites. The main odor components were OVOCs such as *n*-butyraldehyde, propionaldehyde, hexanal, and valeraldehyde. ⑤ The non-carcinogenic risks occurred in the fugitive emission areas and the sensitive sites of resin, alcohol, and aldehyde production, which were mainly caused by OVOCs such as free acetaldehyde, acrolein, and propionaldehyde. No carcinogenic risk was found in any of the sampled sites. This research can provide scientific support for the formulation of priority VOCs species-based precise control strategies in petrochemical industrial parks.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); petrochemical industry; source reactivity; odor; health risk assessment

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是一类化合物的统称, 通常是指在常温常压下具有高蒸气压和易挥发的有机化学物质^[1~5], 主要包括烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃和含氧挥发性有机物 (oxygenated VOCs, OVOCs) 等物质^[6~9], 其中的许多物种对环境或人体健康有显著影响^[10~15]。

有研究表明, 石化行业是我国人为活动 VOCs 排放的重要来源之一, 占全国工业源 VOCs 排放总量的

收稿日期: 2021-07-22; 修订日期: 2021-09-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0213904); 广东省重点领域研发计划项目 (2019B110206001)

作者简介: 张雪驰 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染源控制, E-mail: dtraixcc@163.com

* 通信作者, E-mail: shaqing2008@163.com; zheng_junyu@gmail.com

17.9%~39.6%^[16].石化行业排放的 VOCs 臭氧生成潜势仅次于机动车尾气^[17],排放的 VOCs 物种包含大量芳香烃、卤代烃和 OVOCs 等恶臭或有毒有害物种,可使人产生嗅觉和心理障碍^[18~21],也可通过呼吸道进入人体诱发疾病^[22].鉴于这些问题,石化行业已被列为重点整治和监测对象^[23].

识别石化行业 VOCs 组分排放特征,可为科学有效地降低石化行业对环境空气质量、人体健康和恶臭污染等影响提供基础数据^[24,25].然而,当前石化行业仍存在一定局限性,主要体现在:①行业代表性不足.石化行业包含石油炼制、基本化工原料生产、有机化工和合成材料等子行业,当前研究多集中于石油产品加工和基本化工原料生产子行业^[26~33],缺乏有机化工和合成材料等子行业 VOCs 排放特征研究;②关键组分缺失.现有研究多以不锈钢采样罐或 Teflon 采样袋为采样方法,而这些方法采集的 VOCs 组分以非甲烷烃类为主^[34,35],无法准确采集高活性^[36]与毒性^[37]的醛酮类 OVOCs 组分;③影响研究不足.流行病学研究表明生活在石化企业附近的人比远离该地区的人健康风险更大^[38],但当前针对石化园区 VOCs 排放对周边人群的健康效应和恶臭污染的研究较为缺乏.

鉴于此,本文以珠三角地区某石化园和周边人口较为密集敏感点为研究对象,在石化行业的石油炼制、合成材料和有机化工原料 3 类子行业中,选取了 8 家代表性企业和位于石化园区附近的 3 类敏感点(村庄、办公区和街道),开展了

有组织、无组织排放采样和敏感点环境空气采样,识别了包括 OVOCs 组分在内的 VOCs 组分特征,并基于此分析了污染源反应性(source reactivity, SR)、恶臭指数和健康风险.本研究有助于加强对石化园区 VOCs 排放特征和其环境与健康效应的了解,以期构建基于 VOCs 重点组分的管控策略提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 采样点选取

本研究选取珠三角某石化园作为监测对象,监测季节为 2019 年 12 月中旬,共选取有组织、无组织和环境敏感点 3 类采样点,每个采样点采集 1 个样品.敏感点选取和石化园区距离最近且人口密集的居民区、办公区和园区内在线监测浓度异常突出的街道.有组织和无组织采样点通过使用微型环境空气监测系统(AQMS-3000,聚光科技)在该石化园为期两个月在线 TVOC 浓度监测,并结合风速风向和敏感点的距离,选取了合成材料制造、有机化学原料制造和精炼石油产品制造等产品类型差异较大、VOCs 排放浓度较高和距离敏感点较近的 8 家企业.所测企业和敏感点位置如图 1.有组织采样点选取了上述 8 家企业的典型废气排放口进行采样.无组织采样点通过使用便携式 VOCs 检测仪(TD500-SH-VOCs,天地首和)测定 VOCs 浓度,选取了 VOCs 浓度高的树脂生产、助剂和树脂生产、甲醛生产和石油加工企业无组织排放点进行采样.具体采样信息如表 1.

表 1 采样点信息
Table 1 Details of the sampling points

行业	子行业	样点类型	主要产品	主要原辅料	采样点	样本类型	废气治理	采样点编号
合成材料制造	树脂生产	企业 1	丙烯酸树脂、醇酸树脂、不饱和聚酯树脂和氨基树脂	甲醛、苯乙烯和甲醇	废气排口	有组织	焚烧	1
	树脂废液存储				废液储存间	无组织	—	2
	阻燃剂生产	企业 2	阻燃剂	乙烯	废气排口	有组织	氧化喷淋 + 活性炭吸附	3
	聚酯生产	企业 3	多功能聚酯	对-苯二甲酸、丁二醇和己二酸	废气排口	有组织	水喷淋	4
	助剂和树脂生产		增塑剂、不饱和聚酯树脂和苯酐	醇类、酸酐类和邻-二甲苯	废气排口 车间下风向	有组织 无组织	冷凝回收 + RTO —	5 6
有机化学原料制造	羧基丁苯胶乳生产	企业 4	羧基丁苯胶乳	苯乙烯、丁二烯和丙烯酸	废气排口	有组织	生物滴滤 + 活性炭吸附设施 + RCO	7
	胶粘剂生产	企业 5	压敏胶	甲苯和天然橡胶	废气排口	有组织	冷凝 + 活性炭	8
	醇醚生产	企业 6	丙(乙)二醇醚系列产品	甲醇、醋酸和环氧丙烷	废气排口	有组织	冷凝	9
	甲醛生产	企业 7	甲醛溶液	甲醇和丙酮	废气排口	有组织	焚烧	10
	醛醇生产		醛类和醇类		厂界周围	无组织	—	11
精炼后油产品制造	石油加工	企业 8	芳烃	石脑油	废气排口	有组织	焚烧	12
	石油存储				储罐周围	无组织	—	13
	—	敏感点 1			办公区	环境样	—	14
—	—	敏感点 2	—	—	村庄	环境样	—	15
	—	敏感点 3	—	—	园区街道	环境样	—	16

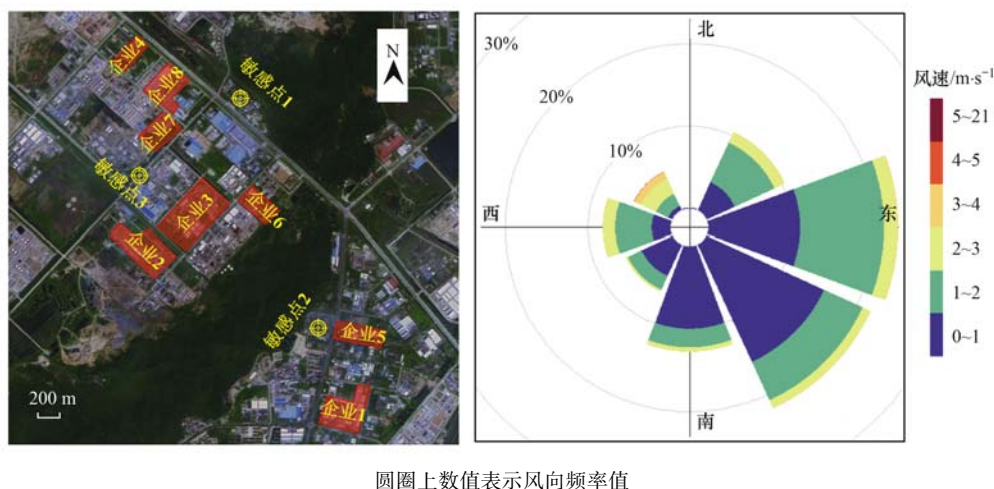


图1 石化企业和敏感点位置与园区风向信息

Fig. 1 Location and wind information of petrochemical enterprises and sensitive points

1.2 采样和分析方法

本研究有组织排放源的监测方法参照《固定源废气监测技术规范》(HJ/T 397-2007)^[39],无组织排放源的监测方法参照《大气污染物无组织排放监测技术导则》(HJ/T 55-2000)^[40],环境采样的监测方法参照文献[41].

本次共采集分析 115 种 VOCs 组分(包括 29 种烷烃、11 种烯烃、1 种炔烃、35 种卤代烃、17 种芳香烃和 22 种 OVOCs). 其中,醛酮类 OVOCs 使用 2,4-二硝基苯肼管(2,4-Dinitrophenylhydrazine, DNPH)采样,使用高效液相色谱仪(LC1260, Agilent, 德国)参照《环境空气醛、酮类化合物的测定高效液相色谱法》(HJ 683-2014)^[42]分析,其它 VOCs 使用 3.2 L 内壁硅烷化的不锈钢采样罐(SUMMA, Entech7100, 美国)采样,使用气相色谱-质谱联用仪(GC-7820A, MS-5977E, Agilent, 美国)参照标准《环境空气挥发性有机物的测定罐采样气相色谱-质谱法》(HJ 759-2015)^[43]分析. 需要说明的是,本研究在进行石油加工企业有组织排放采样过程中,由于焚烧炉温度异常升高导致 DNPH 管样品未能成功采集.

1.3 质量保证和质量控制

样品在采集、运输、储存和实验分析过程均严格遵守质量保证和质量控制措施,本研究使用的 SUMMA 罐在使用前均用高纯氮气清洗 10 次并抽成真空. 清洁后的 SUMMA 罐保存时间一般不超过 10 d,并在样品分析前进行仪器空白实验,空白实验的质量浓度均低于文献[43]方法测定下限,确保分析系统无污染; SUMMA 罐样品均在 10 d 内分析完毕. 为保证 GC-MS 定性和定量数据的准确性,在分析样品前对 GC-MS 系统运行状态进行检查,符合分析要求时才进行测样;采样前对 DNPH 管进行空白

测试,空白样品浓度均满足文献[42]限制要求,采样时,在 DNPH 管前面串联碘化钾除臭氧小柱以消除臭氧等氧化剂对醛酮有机物的干扰,为确保 DNPH 管的收集率,分别将两根 DNPH 管进行串联以减少穿透损失,在采样后包裹锡箔纸并密封低温保存,避免光照导致样品发生化学反应. 本研究所采集到的样品检出限满足文献[42, 43]所规定的浓度.

1.4 VOCs 影响评价方法

1.4.1 VOCs 污染源反应性分析

为了制定臭氧减排措施,在不考虑污染源 VOCs 排放量的情况下, Yuan 等^[44]的研究提供了 VOCs 污染源反应性(SR)的定量评价方法,并将其定义为污染源排放的单位质量臭氧生成潜力. 本研究使用 SR 对臭氧进行定量评估,臭氧生成潜力用最大增量反应性(MIR)表征,计算公式如下:

$$SR_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \times MIR_i \quad (1)$$

式中, SR_i 为污染源 i 排放 1 mg VOCs 所产生的臭氧($\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$, 以 O_3/VOCs 计,下同); f_{ij} 为污染源 i 中的 VOCs 组分 j 的质量分数; MIR_i 为组分 i 的最大反应活性值. 本研究 MIR 值引用自文献[45, 46].

1.4.2 恶臭污染分析

恶臭是由单一或多种化学物质通过嗅觉感官引起的心理上的厌恶感,恶臭气味的存在对工作环境和生活环境都存在较大影响,严重时将会引起身体不适. 本研究采用感官定量评价法,即以恶臭物质浓度与其阈值的比值对恶臭贡献进行分析,计算公式如下:

$$U_i = \text{VOC}_i / O_i \quad (2)$$

式中, U_i 为组分 i 的恶臭指数; VOC_i 为组分 i 的浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); O_i 为组分 i 的嗅觉阈值($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$),

本研究嗅觉阈值引用自文献[47].

1.4.3 VOCs 健康风险评估

健康风险评估是定量描述人体暴露剂量和不良健康反应间关系的一种方式,通过吸入、摄入和皮肤接触暴露于空气污染物是人类的重要暴露情景.吸入通常被认为是石化园区工人和周边地区生活人群接触 VOCs 的主要途径.因此,根据美国 EPA 方法估算了危害指数(hazard index, HI)和终生患癌风

险(lifetime cancer risk, LCR),以评估吸入 VOCs 对人群的非致癌和致癌风险,计算公式如下:

$$HI = \frac{C_i \times ET \times EF \times ED}{365 \times AT_{nea} \times 24} \times \frac{1}{RfC} \tag{3}$$

$$LCR = \frac{C_i \times ET \times EF \times ED}{365 \times AT_{ca} \times 24} \times IUR \tag{4}$$

式中, c_i 为 VOC 的 i 组分浓度($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$),其余各参数含义和设定如表 2 所示.

表 2 健康风险评价中相关参数¹⁾

Table 2 Parameters in the evaluation of heath risks

参数	定义	中文名称	数值	单位
ET	exposure time	暴露时间	8	h
EF	exposure frequency	暴露频率	250	d
ED	exposure duration	暴露时间	20	a
AT_{nea}	average times for noncarcinogenic	非致癌平均时间	25	a
AT_{ca}	average times for carcinogenic effects	致癌平均时间	70	a
$RfC^{2)}$	reference concentration	参考浓度		$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
$IUR^{2)}$	inhalation unit risk	单位吸入致癌风险		$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
HI	hazard index	危害指数		无量纲
LCR	lifetime cancer risk	终身患癌风险		无量纲

1) 参数说明见文献[28]; 2) RfC 和 IUR 值参见文献[48]

2 结果与讨论

2.1 VOCs 有组织排放特征

图 2 和图 3 描述了石油炼制、合成材料和有机化工原料制造等 8 家企业 9 个 VOCs 有组织排放采样点浓度、种类和组分特征.有组织 $\rho(\text{VOCs})$ 范围为 $0.3 \sim 46.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,VOCs 组成差异较大,根据末端治理类型主要分为燃烧处理类和非燃烧处理类.燃烧处理类是指使用销毁类技术的燃烧设备对 VOCs 废气进行处理,常见的如焚烧炉、RCO 和 RTO 等,非燃烧处理类指未使用燃烧技术类的末端处理装置,常见的有活性炭吸附、冷凝回收、UV 光解和生物处理等.燃烧处理类采样点 5(助剂和树脂生产, $46.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)、采样点 10(甲醛生产, $27.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 和采样点 7(羧基丁苯乳胶生产, $19.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 $\rho(\text{VOCs})$ 较高,而非燃烧处理类 $\rho(\text{VOCs})$ 较高的是采样点 4(聚酯生产, $15.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 和采样点 3(阻燃剂生产, $8.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$).可见,并不是所有使用燃烧技术的末端设备处理效果一定比非燃烧处理技术优越,这在景盛翱等^[14]的研究中也有所体现,废气处理需要根据废气特点合理选择,废气流速适中,并定期维护检查才能使处理效果达到最佳.

在排放的 VOCs 种类和组分上,所有燃烧技术类型企业排放的 VOCs 种类以 OVOCs ($32.3\% \sim 92.0\%$) 为主,除未有效采集到 DNPH 样品的采样点 12(石油加工)外,其余 4 个采样点均发现存在较

高浓度的甲醛,这可能与废气燃烧不充分有关,理论上废气完全燃烧后的产物应为二氧化碳,而燃烧不充分时将会导致氧气和碳氢化合物反应生成甲醛等物质.非燃烧处理技术类企业排放的 VOCs 种类较为多样,采样点 3(阻燃剂生产)和采样点 4(聚酯生产)经过水喷淋技术后,废气中的主要组分分别为难溶于水的烷烃(87.9%)和烯烃(72.4%),如癸烷、1,3-丁二烯和丙烯.采样点 9(醇醚生产)排放的 VOCs 以异丁烷、正丁烷和丙烷等烷烃(56.1%)为主且 $\rho(\text{VOCs})$ 最低($0.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$),这是由于末端设备效率较高,醇醚生产过程中从原辅料使用到整个生产环节都会产生大量低沸点的 OVOCs,通过冷凝回收可以达到最大去除效果.VOCs 组分不仅与末端设备类型有关,还与产品类别、原辅料使用和生产工艺也有很大关系.采样点 10(甲醛生产)排放的甲醛质量分数较高(92.0%),除与燃烧设备处理效果不佳外,还与该采样点所在企业生产甲醛也有很大关系;采样点 1(树脂生产)有较高的乙酸乙酯(22.3%)和苯系物(26.2%)排放,这和生产不同类型的树脂有关,在可降解树脂生产的过程中,需经过酯化反应,该过程会产生乙酸乙酯等物质,在丙烯酸树脂生产时需要用到苯乙烯等原辅料,使用过程中将会导致苯系物的排放;采样点 8(胶粘剂生产)甲苯(59.2%)排放突出,这是由于胶粘剂生产过程中需要大量的甲苯作为稀释剂.采样点 12(石油加工)以 $C_3 \sim C_5$ 烷烃(26.7%)和丙酮(18.7%)排放为主,低碳烷烃组分常在石油裂解时生成,丙酮作为重

要有机溶剂常使用于石油化工上。

在可对比的研究中,周子航等^[49]的研究采集了成都市甲醛生产企业焚烧炉排放口 VOCs 组分,主要以丙酮(56.4%)排放为主,而本研究(采样点 10)以甲醛(91.5%)为主,这可能是由于工艺有所差异和周子航等未采集甲醛组分导致;徐晨曦等^[50]和马怡然等^[51]对合成树脂企业有组织废气排放中的 VOCs 进行分析,发现特征组分为甲苯、间/对-二甲苯和苯乙烯等,而本研究(采样点 1)的苯系物特征组分和该研究类似;目前国内研究对石油加工行业排放的废气大多为无组织采样,有组织采样十分缺少,仅张欣等^[52]和 Lv 等^[53]的研究对废气处理前和焚烧炉排放口进行了测试,在测试中均发现了较高的丙酮(28.4%和 8.5%)排放,本研究(采样点 12)中丙酮也较为突出(18.7%)。

2.2 VOCs 无组织排放和敏感点特征

石化园无组织排放可直接或间接影响到附近敏感点,而周围地区的敏感点又可以在一定程度上反映整个石化园的组分特征,图 4 为 4 种不同类型化工企业无组织排放采样点和 3 个敏感点的 $\rho(\text{VOCs})$ 和种类特征。在 $\rho(\text{VOCs})$ 上,无组织 $\rho(\text{VOCs})$ 为 0.3 ~ 2.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,敏感点为 0.4 ~ 4.5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,其中采

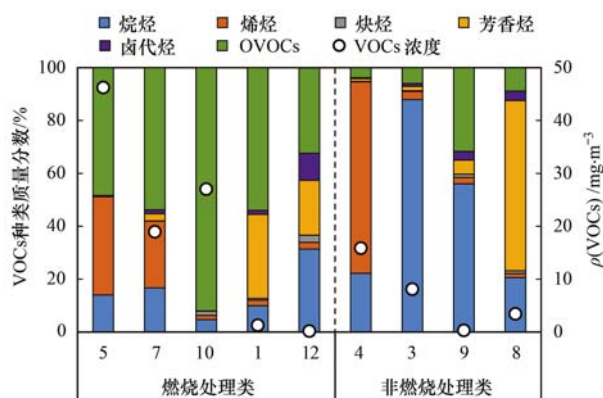
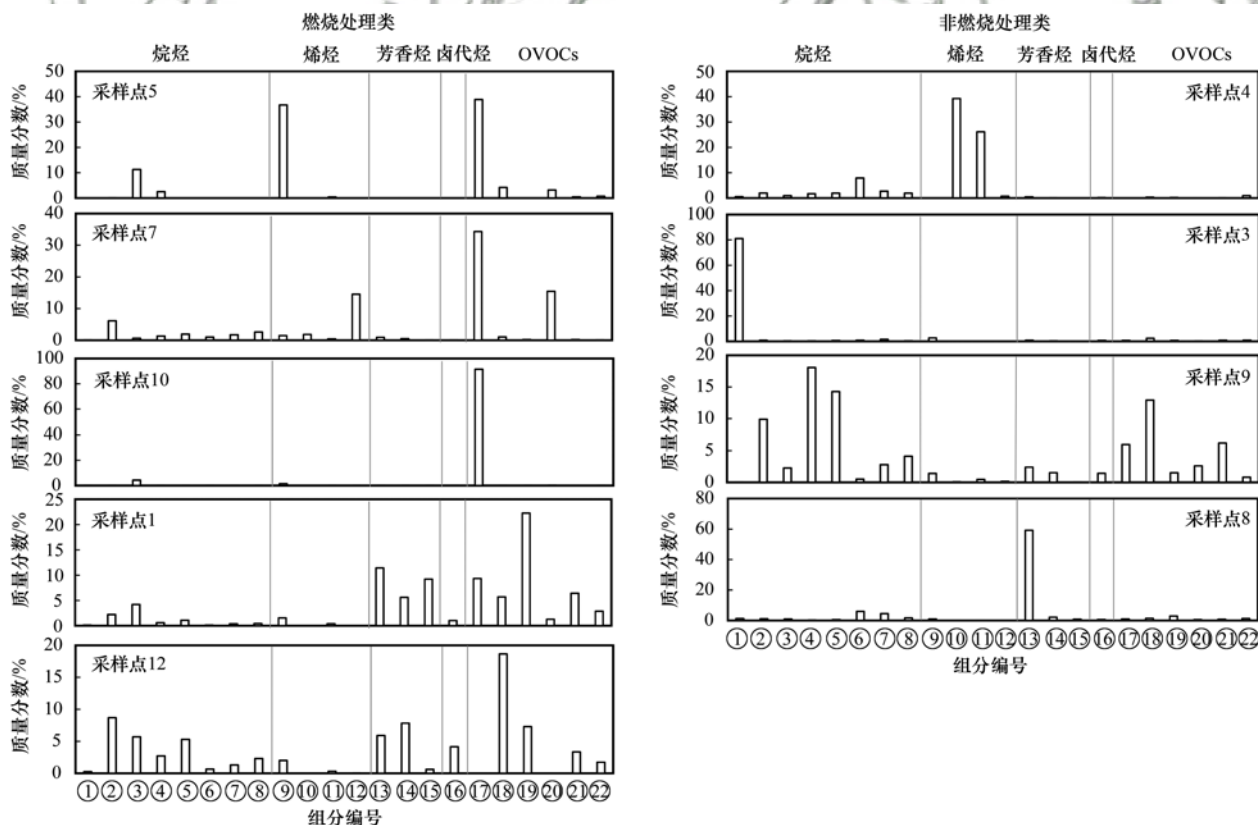


图 2 石化企业 VOCs 有组织排放浓度和种类特征

Fig. 2 Concentrations and characteristics of the VOCs in stack emissions from petrochemical enterprises

样点 16(园区街道)最高,为 4.5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,超过所测企业厂区和车间排放浓度,这可能是因为街道周围存在废气泄漏点,其次 $\rho(\text{VOCs})$ 较高的是采样点 2(树脂废液存储, 2.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)和采样点 13(石油储罐, 0.9 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。在无组织排放中,采样点 11(醛醇生产下风向)和采样点 6(助剂和树脂生产下风向) $\rho(\text{VOCs})$ 相对采样点 2 和采样点 13 较低,这主要是受到大气稀释作用。在 VOCs 种类上,除采样点 13 以烷烃为主外,其余无组织和敏感点均以 OVOCs



①癸烷, ②丙烷, ③乙烷, ④异丁烷, ⑤正丁烷, ⑥ 2-甲基戊烷, ⑦正戊烷, ⑧异戊烷, ⑨乙烯, ⑩ 1,3-丁二烯, ⑪丙烯, ⑫顺-2-丁烯, ⑬甲苯, ⑭间/对-二甲苯, ⑮苯乙烯, ⑯二氯甲烷, ⑰甲醛, ⑱丙酮, ⑲乙酸乙酯, ⑳乙醛, ㉑ 2-丁酮, ㉒异丙醇

图 3 石化企业 VOCs 有组织排放主要组分

Fig. 3 Main components of the VOCs stack emissions from petrochemical enterprises

为主；敏感点 VOCs 种类特征相似。

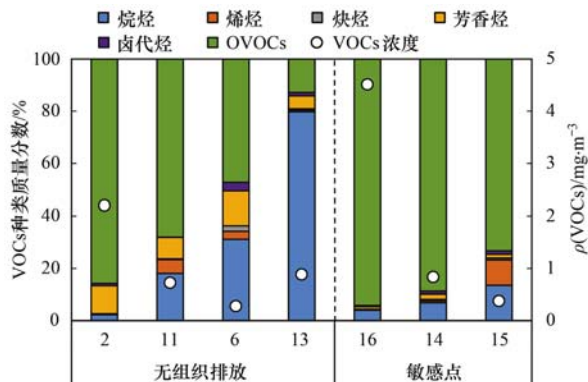


图4 石化企业无组织排放点和敏感点 VOCs 浓度和种类特征
Fig. 4 Concentrations and characteristics of VOCs in fugitive emissions from petrochemical enterprises

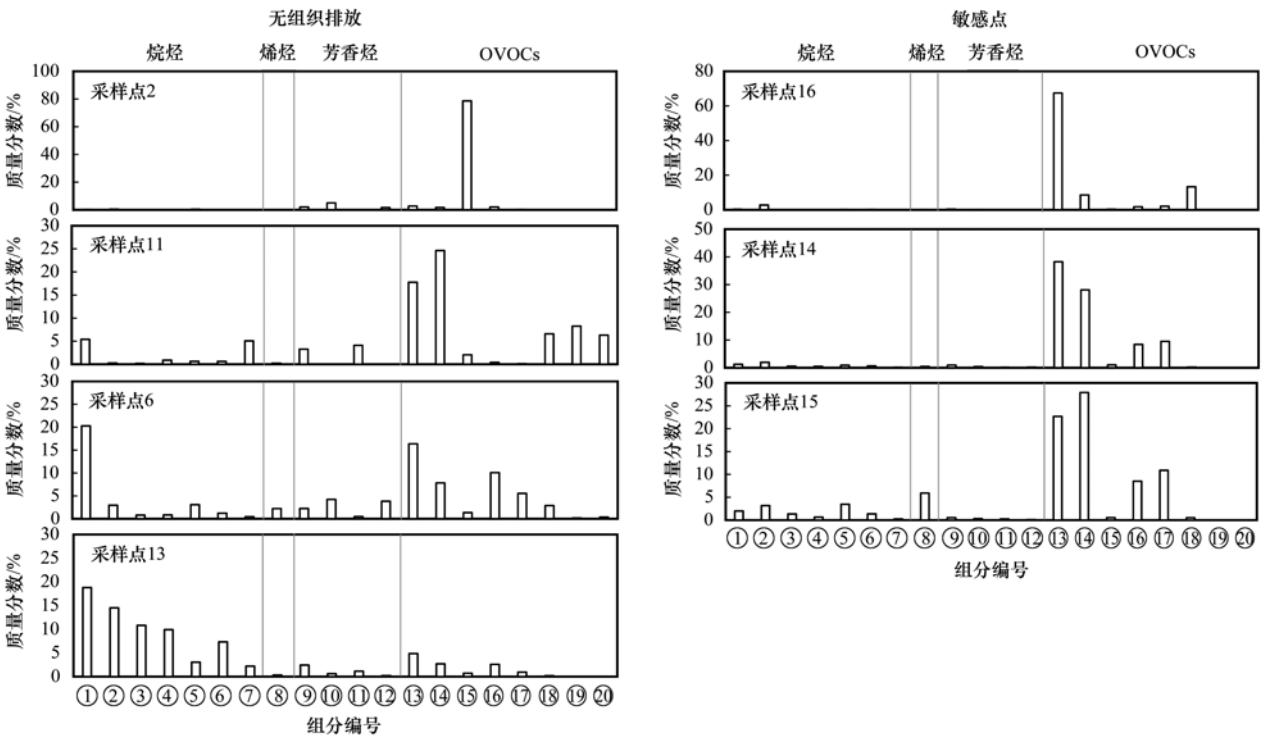
无组织排放点和敏感点的组分特征如图 5 所示,每个采样点 VOCs 组分总质量分数均超过 87%,采样点 2(树脂废液存储)特征组分为乙酸乙酯(78.6%),和有组织排放的主要组分相同,这与生产过程中的酯化反应有关;采样点 11(醇醛生产厂界)特征组分为甲醛(24.6%)和丙酮(17.8%),这是因为甲醛是该采样点企业的主要产品,而丙酮是常用的有机溶剂;采样点 6(助剂和树脂生产下风向)特征组分为正丁烷(20.3%)、丙酮(16.4%)和 2-丁酮(10.1%);采样点 13(石油存储)特征组分为正丁烷(18.8%)、丙烷(14.5%)、异戊烷

(10.8%)和正戊烷(9.9%),这和大多研究的结果类似^[26,54-56].敏感点的主要组分较为一致,为丙酮(22.7%~67.4%)、甲醛(8.6%~28.1%)、乙醛(2.1%~10.9%)和 2-丁酮(1.8%~8.4%).钱益斌等^[56]检测海南某石化园 22 个 VOCs 环境样品浓度并取均值,发现特征组分为丙酮(78.8%),这和本研究的结果较为一致,丙酮是石化行业重要的有机合成原料,常用作提取剂和生产涂料,且丙酮发生光降解速度较慢,易于在区域环境中均匀扩散.经调研了解,石化园中有较多企业使用丙酮作为有机溶剂,采样点 14(办公区)和采样点 15(村庄)处于园区下风向且背靠山地(如图 1),丙酮通过风的混合作用后在此积累,而采样点 16(园区街道)处于企业 7 和企业 3 之间(如图 1),该两家企业有较高的丙酮排放.以上因素导致敏感点丙酮组分质量分数较为突出。

2.3 石化园区 VOCs 影响分析

2.3.1 VOCs 污染源反应性

图 6 表示了各企业 VOCs 污染源反应性(SR).在有组织排放中,采样点 10(甲醛生产)、采样点 7(羧基丁苯乳胶生产)、采样点 5(助剂和树脂生产)和采样点 4(聚酯生产)的 SR 值较高,分别为 6.2、6.2、4.6 和 4.5 mg·mg⁻¹;无组织比有组织 SR 值小,无组织较为突出的采样点 11(醇醛生产厂界)和



①正丁烷, ②丙烷, ③异戊烷, ④正戊烷, ⑤乙烷, ⑥异丁烷, ⑦ 2-甲基戊烷, ⑧乙烯, ⑨甲苯, ⑩间/对-二甲苯, ⑪苯, ⑫邻-二甲苯, ⑬丙酮, ⑭甲醛, ⑮乙酸乙酯, ⑯ 2-丁酮, ⑰乙醛, ⑱异丙醇, ⑲丙醛, ⑳正丁醛

图5 石化企业无组织排放点和敏感点 VOCs 主要排放组分

Fig. 5 Main components of VOCs in fugitive emissions from petrochemical enterprises and sensitive locations

采样点 6 (助剂和树脂生产下风向) 的 SR 为 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $2.1 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$. 从 SR 的 VOCs 贡献较高的种类来看, 主要为 OVOCs、芳香烃和烯烃, 平均贡献率分别为 43.1%、24.2% 和 21.1%. 其中采样点 10 和采样点 11 的 SR 绝大部分由 OVOCs 贡献, 分别为 98.6% 和 77.2%, 这和周子航等^[49]的研究结果相近; 采样点 7 和采样点 5 的 SR 主要种类为 OVOCs (49.6% 和 60.8%) 和 烯烃 (47.3% 和 38.3%); 采样点 4 主要为 烯烃 (92.8%); 采样点 1 (树脂生产) 的 OVOCs 和芳香烃 SR 累积贡献率为 93.6%, 特征组分为 甲醛、间/对-二甲苯、甲苯、甲基丙烯酸甲酯和苯乙烯, 这和马怡然等^[51]的研究类似; 采样点 8 (胶粘剂生产) 和采样点 12 (石油加工) 的 SR 主要为 芳香烃 (77.6% 和 66.3%); 采样点 13 (石油存储) 主要由 烷烃 (55.1%) 贡献, 这与 MO 等^[26]的研究结果接近, 但与 Lv 等^[53]的研究有较大差异, 其以 烯烃贡献为主, 这是因为存储的油品种不同导致. 图 7 显示了采样点 SR 贡献率前 5 组分, 可以发现 甲醛、乙醛、间/对-二甲苯、乙烯和甲苯是大多数企业主要的贡献组分, 石化园应对这些物种加强防控.

2.3.2 恶臭污染分析

图 8 为无组织排放和敏感点的主要 5 种恶臭组分, 当恶臭指数大于 1 时, 认为存在恶臭污染^[47]. 结果显示, 无组织排放点和敏感点均存在恶臭发生, 在无组织排放点中, 采样点 11 (醇醛生产厂界) 恶臭污染最为严重, 主要由 正丁醛、丙醛和己醛导致, 恶臭

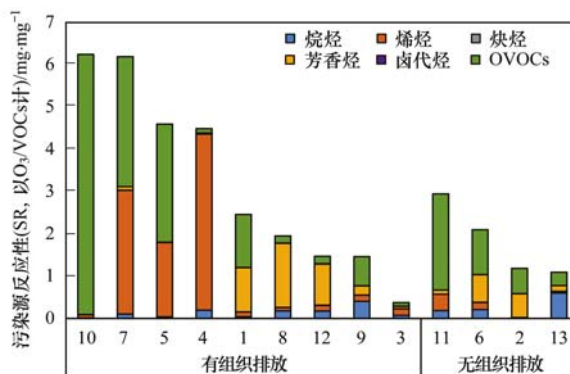


图 6 石化企业 VOCs 污染源反应性 (SR)

Fig. 6 VOCs emission source reactivity from petrochemical enterprises

指数达 29.0、25.4 和 4.3; 其他企业无组织采样点 13 和 6 主要由 乙醛 (2.1 和 3.9) 和 己醛 (2.7 和 2.9) 导致; 采样点 2 (树脂废液存储) 由 乙醛 (1.3) 导致. 在敏感点中, 采样点 14 (办公区) 和采样点 16 (园区街道) 的恶臭组分一致, 分别为 乙醛 (24.4 和 26.8)、己醛 (4.8 和 4.2) 和 戊醛 (1.3 和 3.4), 采样点 15 (村庄) 恶臭组分为 乙醛 (13.5) 和 己醛 (5.4). 值得注意的是, 敏感点的乙醛恶臭指数 (13.5 ~ 26.8) 超过大多企业的无组织排放点 (1.3 ~ 2.1), 采样点 14 和 16 乙醛恶臭污染水平相当, 这可能是由于采样点 14 和采样点 16 距离较近且靠近公路, 所经过装载化工品柴油车较多, 采样点 15 周围有较多餐饮排放源, 柴油车和餐饮源在文献^[57,58]中被证实有较高的乙醛排放. 此外乙醛嗅觉指数较低

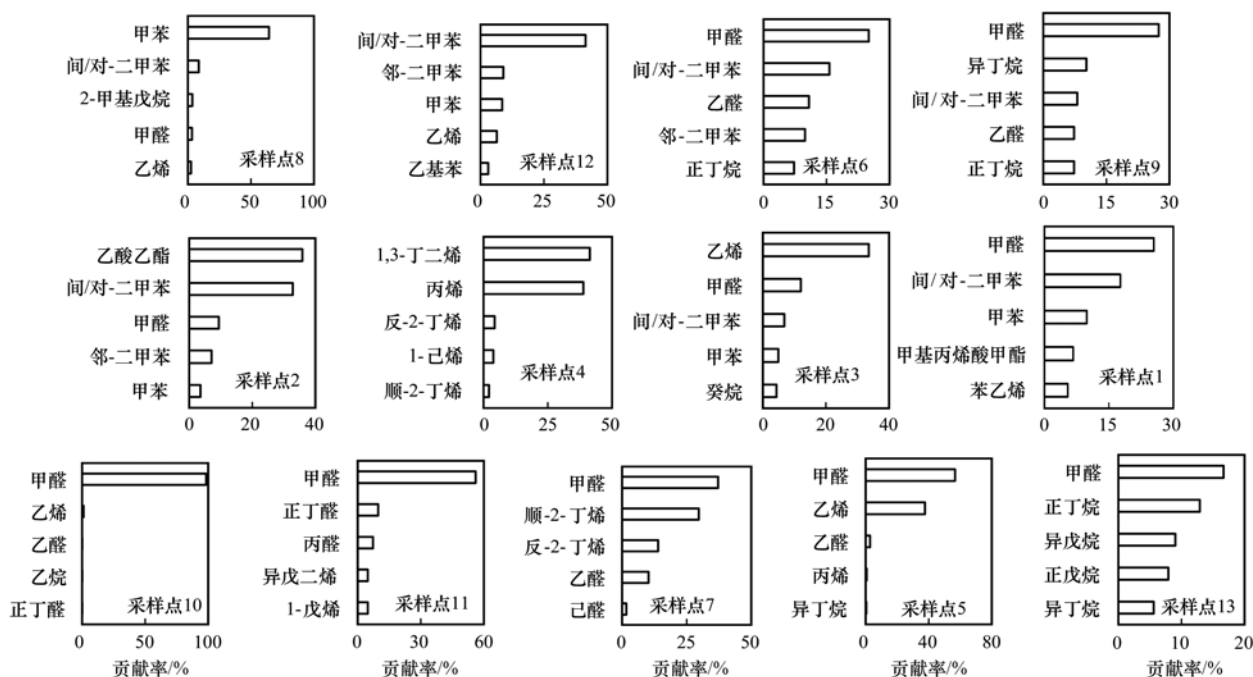


图 7 石化企业 SR 贡献率前 5 组分贡献率

Fig. 7 Top five components of SR contribution from petrochemical enterprises

($0.003 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 当存在较少的乙醛时容易被人所感知。

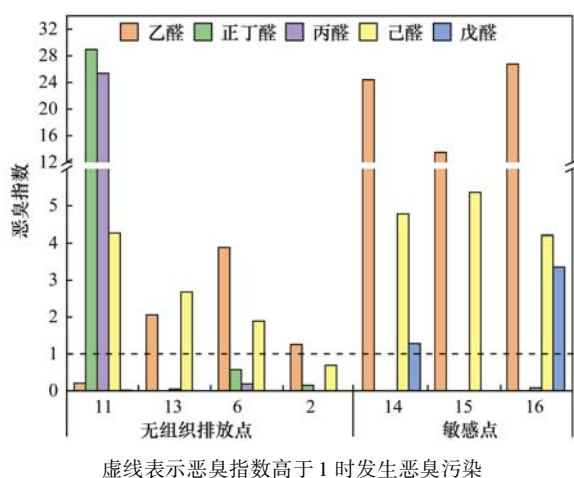


图 8 石化企业无组织排放点和敏感点恶臭指数
Fig. 8 Odor values in fugitive-emission petrochemical enterprises and sensitive locations

2.3.3 VOCs 健康风险评估

目前,常用的健康风险评价方法来源于 1983 年美国国家科学院提出的健康风险评价四步法,即危害鉴定、剂量-反应关系评价、暴露评价和风险特征分析,该方法是目前国际公认的健康风险评价方法,也广泛用于国内工业企业无组织排放和环境背景点研究^[59-61]。而石化园企业工人和周边居民大多时间暴露在厂区、车间和环境空气中,因此采用美国 EPA 健康风险评价模型对无组织排放和敏感点的暴露人群进行健康风险评价。美国 EPA 风险评价中,当危害指数(HI)大于 1 时视为存在非致癌健康风险,并且该值越大所发生风险越大^[48]。本研究测量了 115 种 VOCs,但只有 35 种非致癌 VOCs 和 13 种致癌 VOCs 的参考浓度(RFC)和单位吸入致癌风险(IUR)可用于健康风险评估。图 9 显示了无组织排放和敏感点 HI 较高的前 8 种组分,除采样点 13(石油存储)和采样点 6(助剂和树脂生产下风向)外,其余采样点均有非致癌健康风险,主要受丙烯醛、乙醛和丙醛影响,HI 范围为 1.55~2.83, 1.4~1.5 和 1.35,其中采样点 16(园区街道)非致癌健康风险水平最高。无组织排放还需关注苯、邻-二甲苯和间/对-二甲苯等苯系物的 HI 值,敏感点需关注 1,2-二氯丙烷和三氯乙烯等卤代烃组分,虽然以上组分 HI 值未超过 1,但在不利天气环境下或者工况不佳时将可能导致 HI 值升高。在可对比的研究中,采样点 13 中的丙烯醛为该石油加工企业 HI 最高物质且接近于 1,而同类型的武汉炼油厂^[27]的丙烯醛 HI 高达 22.8,较低浓度的丙烯醛存在都将带来较高的非致癌健康风险,丙烯醛是石油加工行业重要防

控组分。

通过评价无组织排放和敏感点的致癌风险 LCR 值($\text{LCR} > 1 \times 10^{-4}$ 为确定风险, $1 \times 10^{-5} < \text{LCR} < 1 \times 10^{-6}$ 为可能风险, $\text{LCR} < 1 \times 10^{-6}$ 为可忽略风险)^[28],本研究采样点 LCR 范围为 $1.7 \times 10^{-10} \sim 1.5 \times 10^{-17}$,采样点 LCR 风险均低于 1×10^{-6} ,不存在致癌风险。

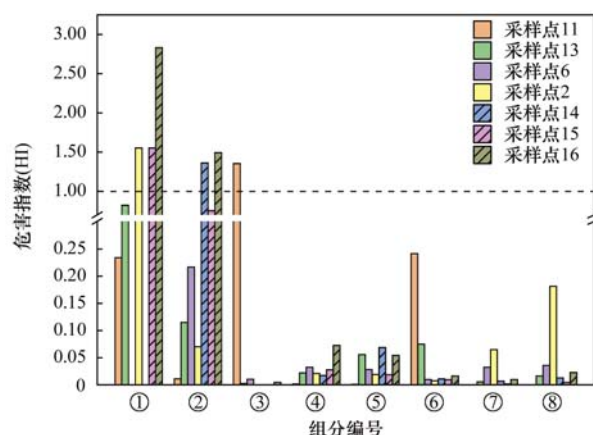


图 9 石化企业无组织排放点和敏感点 HI 值
Fig. 9 HI value of the fugitive-emission petrochemical enterprises and sensitive locations

3 结论

(1) 石化园有组织排放的 $\rho(\text{VOCs})$ 范围为 $0.2 \sim 46.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,排放浓度较高的企业为助剂和树脂生产、甲醛生产、羧基丁苯乳胶生产和聚酯生产企业。排放的 VOCs 组分受废气处理设备影响显著,经燃烧类设备处理后的 VOCs 主要组分为甲醛,经非燃烧类设备处理后的 VOCs 主要组分为 1,3-丁二烯、丙烯和异丁烷等组分。除受末端设备影响外,生产树脂、胶粘剂和石油加工的企业排放组分还受产品类型和原辅料较大影响,主要组分分别为乙酸乙酯、甲苯和丙酮。

(2) 石化园无组织排放和敏感点的 $\rho(\text{VOCs})$ 范围分别为 $0.3 \sim 2.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.4 \sim 4.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,浓度较高的无组织排放点为树脂废液存储和石油储罐挥发,浓度较高的敏感点为园区街道,大多数无组织排放点和敏感点 VOCs 组成以丙酮、甲醛和乙酸乙酯等 OVOCs 为主,石油储罐以烷烃为主。

(3) 石化园 VOCs 的 SR 较高的企业为甲醛生产、羧基丁苯乳胶生产、助剂和树脂生产和聚酯生产,SR 主要贡献种类为 OVOCs、芳香烃和烯烃,其贡献率分别为 43.1%、24.2% 和 21.1%,大多数企业的主要贡献组分为甲醛、乙醛、间/对-二甲苯、

乙烯和甲苯.

(4)石化园无组织排放点和敏感点均存在恶臭污染,其中醛醇生产企业厂界恶臭污染最为严重,主要恶臭组分为乙醛、正丁醛、丙醛、己醛和戊醛等组分.

(5)石化园部分无组织排放点(醇醛生产厂界和树脂废液存储)和周边敏感点存在非致癌风险,引起非致癌风险的 VOCs 组分是丙烯醛、乙醛和丙醛,另外需要警惕苯系物和卤代烃的排放.所测企业和敏感点未发现致癌风险.

参考文献:

- [1] 王海林,张国宁,聂磊,等.我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究[J].环境科学,2011,32(12):3462-3468.
Wang H L, Zhang G N, Nei L, et al. Study on control and management for industrial volatile organic compounds (VOCs) in China[J]. Environmental Science, 2011, 32(12): 3462-3468.
- [2] 邹克华,翟增秀,李伟芳,等.典型生物发酵企业挥发性有机物及恶臭污染物排放特征[J].环境化学,2020,39(12):3574-3580.
Zou K H, Zhai Z X, Li W F, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds and odorous pollutants in typical bio-fermentation industries[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(12): 3574-3580.
- [3] 王帅,崔建升,冯亚平,等.石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J].环境科学,2020,41(12):5325-5335.
Wang S, Cui J S, Feng Y P, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs and O₃ in Shijiazhuang [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5325-5335.
- [4] 梁小明,孙西勃,徐建铁,等.中国工业源挥发性有机物排放清单[J].环境科学,2020,41(11):4767-4775.
Liang X M, Sun X B, Xu J T, et al. Industrial volatile organic compounds (VOCs) emission inventory in China [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4767-4775.
- [5] 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟.南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J].环境科学,2020,41(6):2565-2576.
Cao M Y, Lin Y Q, Zhang Y L, et al. Characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs in the Nanjing industrial area in autumn[J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2565-2576.
- [6] 韩萌,卢学强,冉靓,等.天津市城区夏季 VOCs 来源解析[J].环境科学与技术,2011,34(10):76-80.
Han M, Lu X Q, Ran L, et al. Source apportionment of volatile organic compounds in urban Tianjin in the summer [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(10): 76-80.
- [7] 吴健,高松,陈曦,等.涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响[J].环境科学,2020,41(4):1582-1588.
Wu J, Gao S, Chen X, et al. Source profiles and impact of volatile organic compounds in the coating manufacturing industry [J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1582-1588.
- [8] 张嘉妮,曾春玲,刘锐源,等.家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响[J].环境科学,2019,40(12):5240-5249.
Zhang J N, Zeng C L, Liu R Y, et al. Volatile organic compound emission characteristics of furniture manufacturing enterprises and the influence on the atmospheric environment [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5240-5249.
- [9] 李斌,张鑫,李娜,等.北京市春夏挥发性有机物的污染特征及源解析[J].环境化学,2018,37(11):2410-2418.
Li B, Zhang X, Li N, et al. Pollution characteristics and source analysis of volatile organic compounds in spring and summer in Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(11): 2410-2418.
- [10] 齐一谨,倪经纬,赵东旭,等.郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估[J].环境科学,2020,41(7):3056-3065.
Qi Y J, Ni J W, Zhao D X, et al. Emission characteristics and risk assessment of volatile organic compounds from typical factories in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3056-3065.
- [11] 高占啟,胡冠九,王荟,等.典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价[J].环境科学,2018,39(2):567-575.
Gao Z Q, Hu G J, Wang H, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs fugitively emitted from typical brewers[J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 567-575.
- [12] 佟瑞鹏,张磊,杨校毅,等.家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价[J].环境科学,2018,39(2):672-683.
Tong R P, Zhang L, Yang X Y, et al. Source analysis and environmental health risk assessment of VOCs in furniture manufacturing[J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 672-683.
- [13] 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价[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.
- [14] 景盛翱,高雅琴,沈建东,等.杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性[J].环境科学,2020,41(12):5306-5315.
Jing S A, Gao Y Q, Shen J D, et al. Characteristics and reactivity of ambient VOCs in urban Hangzhou, China [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5306-5315.
- [15] 牛月圆,刘倬诚,李如梅,等.阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响[J].环境科学,2020,41(7):3066-3075.
Niu Y Y, Liu Z C, Li R M, et al. Characteristics, source apportionment, and environmental impact of volatile organic compounds in summer in Yangquan [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3066-3075.
- [16] Han D M, Gao S, Fu Q Y, et al. Do volatile organic compounds (VOCs) emitted from petrochemical industries affect regional PM_{2.5}? [J]. Atmospheric Research, 2018, 209: 123-130.
- [17] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(5): 2574-2583.
- [18] Zarra T, Galang M G, Ballesteros Jr F, et al. Environmental odour management by artificial neural network-A review [J]. Environment International, 2019, 133, doi: 10.1016/j.envint.2019.105189.
- [19] Conti C, Guarino M, Bacenetti J. Measurements techniques and models to assess odor annoyance: a review [J]. Environment International, 2020, 134, doi: 10.1016/j.envint.2019.105261.
- [20] 王亘,孟洁,商细彬,等.国外恶臭污染管理办法对我国管

- 理体系构建的启示[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(8): 1337-1345.
- Wang G, Meng J, Shang X B, *et al.* The enlightenment of foreign odor management approaches for its establishment in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(8): 1337-1345.
- [21] 吕怡蓉, 于洋, 赵静, 等. 典型石化企业排放有毒有害大气污染物人体健康风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2020, **15**(3): 195-201.
- Lv Y R, Yu Y, Zhao J, *et al.* Human health risk assessment of hazardous air pollutants in typical petrochemical enterprises[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, **15**(3): 195-201.
- [22] Ramírez N, Cuadras A, Rovira E, *et al.* Chronic risk assessment of exposure to volatile organic compounds in the atmosphere near the largest mediterranean industrial site [J]. *Environment International*, 2012, **39**(1): 200-209.
- [23] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《2020 年挥发性有机物治理攻坚方案》的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xgk2018/xgk/xgk03/202006/t20200624_785827.html, 2020-06-24.
- [24] 冯云霞, 贾润中, 肖安山, 等. 石化企业挥发性有机物成分谱构建及溯源解析[J]. *石油炼制与化工*, 2020, **51**(1): 92-96.
- Feng Y X, Jia R Z, Xiao A S, *et al.* Source profiles and tracing of volatile organic compounds in refineries [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2020, **51**(1): 92-96.
- [25] 高爽, 高松, 高宗江, 等. 石化工业区挥发性有机化合物源谱构建与溯源研究进展[J]. *化学世界*, 2016, **57**(12): 798-805.
- Gao S, Gao S, Gao Z J, *et al.* Development of source profiles and source tracing of volatile organic compounds in petrochemical industry park[J]. *Chemical World*, 2016, **57**(12): 798-805.
- [26] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al.* Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **533**: 422-431.
- [27] Zheng H, Kong S F, Yan Y Y, *et al.* Compositions, sources and health risks of ambient volatile organic compounds (VOCs) at a petrochemical industrial park along the Yangtze River [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135505.
- [28] Jia H H, Gao S, Duan Y S, *et al.* Investigation of health risk assessment and odor pollution of volatile organic compounds from industrial activities in the Yangtze River Delta region, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111474.
- [29] Zhang Z J, Wang H, Chen D, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds and their secondary organic aerosol formation potentials from a petroleum refinery in Pearl River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 1162-1174.
- [30] 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.
- [31] 王伯光, 张远航, 邵敏, 等. 广州地区大气中 C2 ~ C9 非甲烷碳氢化合物的人为来源[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(7): 1430-1440.
- Wang B G, Zhang Y H, Shao M, *et al.* Sources apportionment of anthropogenic C2 ~ C9 non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Guangzhou, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(7): 1430-1440.
- [32] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 358-366.
- [33] Shen L J, Xiang P, Liang S W, *et al.* Sources profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in a typical industrial process in Wuhan, Central China [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(8), doi: 10.3390/atmos9080297.
- [34] U. S. Environmental Protection Agency. Compendium method TO-14A, determination of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air using specially prepared canisters with subsequent analysis by gas chromatography [R]. United State: Environmental Protection Agency Cincinnati, January 1999.
- [35] U. S. Environmental Protection Agency. Compendium method Method TO-15, determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in specially-prepared canisters and analyzed by gas chromatography /mass spectrometry (GC/MS) [R]. United State: Environmental Protection Agency Cincinnati, January 1999.
- [36] 彭华. 城市大气环境中醛酮类化合物污染状况及变化规律[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, **23**(1): 39-41, 50.
- Peng H. Research on aldehydes and ketones pollutants in urban air[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, **23**(1): 39-41, 50.
- [37] 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 等. 2014 年北京 APEC 期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 801-806.
- He X L, Tan J H, Guo S J, *et al.* Chemical characteristics and sources of atmospheric carbonyls during the 2014 Beijing APEC [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 801-806.
- [38] Sopian N A, Jalaludin J, Tamrin S B M. Risk of respiratory health impairment among susceptible population living near petrochemical industry- A review article[J]. *Iranian Journal of Public Health*, 2016, **45**(1): 9-16.
- [39] HJ/T 397-2007, 固定源废气监测技术规范[S].
- [40] HJ/T 55-2000, 大气污染物无组织排放监测技术导则[S].
- [41] 生态环境部. 关于印发《2018 年重点地区环境空气挥发性有机物监测方案》的通知[R]. 环办监测函〔2017〕2024 号, 2017.
- [42] HJ/T 683-2014, 环境空气 醛、酮类化合物的测定 高效液相色谱法[S].
- [43] HJ/T 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].
- [44] 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.
- [45] Zhang Y N, Xue L K, Carter W P L, *et al.* Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds in a Chinese megacity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(14): 11053-11068.
- [46] Carter W P L. Development of a condensed SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5336-5345.
- [47] Nagata Y, Takeuchi N. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method [R]. Tokyo: Japan Ministry of the Environment, 2003.
- [48] USEPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (Part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment) [R]. EPA540-R-070-002, Washington, DC: Office of Superfund Remediation and Technology, 2009.

- [49] 周子航, 邓也, 吴柯颖, 等. 成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 3949-3961.
Zhou Z H, Deng Y, Wu K Y, *et al.* Source profiles of VOCs associated with typical industrial processes in Chengdu [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 3949-3961.
- [50] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 四川省典型行业挥发性有机物源成分谱[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3031-3041.
Xu C X, Chen J H, Han L, *et al.* Source composition spectrum of volatile organic compounds in typical industries in Sichuan [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3031-3041.
- [51] 马怡然, 高松, 王巧敏, 等. 合成树脂行业挥发性有机物排放成分谱及影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(8): 3268-3274.
Ma Y R, Gao S, Wang Q M, *et al.* Source profiles and impact of volatile organic compounds in the synthetic resin industry [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(8): 3268-3274.
- [52] 张欣. 天津石化行业挥发性有机物源排放成分谱研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2015.
- [53] Lv D Q, Lu S H, Tan X, *et al.* Source profiles, emission factors and associated contributions to secondary pollution of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a local petroleum refinery in Shandong[J]. Environmental Pollution, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116589.
- [54] 吕大器, 陆思华, 谭鑫, 等. 典型地方炼化企业 VOCs 排放特征及其对二次污染生成的贡献[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(1): 103-113.
Lü D Q, Lu S H, Tan X, *et al.* Emission characteristics of VOCs from typical local refineries and associated contributions to secondary pollution [J]. Research of Environmental Science, 2021, **34**(1): 103-113.
- [55] Wang Q L, Li S J, Dong M L, *et al.* VOCs emission characteristics and priority control analysis based on VOCs emission inventories and ozone formation potentials in Zhoushan [J]. Atmospheric Environment, 2018, **182**: 234-241.
- [56] 钱益斌, 钟昌琴, 杨安富, 等. 海南某化工园区大气 VOCs 组成、来源及健康风险[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(5): 115-123.
Qian Y B, Zhong C Q, Yang A F, *et al.* Characteristics, source apportionment and health risk assessment of volatile organic compounds in the atmosphere of a chemical industrial park in Hainan [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(5): 115-123.
- [57] Ho S S H, Yu J Z, Chu K W, *et al.* Carbonyl emissions from commercial cooking sources in Hong Kong[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, **56**(8): 1091-1098.
- [58] Yao Z L, Shen X B, Ye Y, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **103**: 87-93.
- [59] 练川, 周江, 陈思琳, 等. 贵阳市某工业园区环境空气中 VOCs 的污染特征与健康风险评价[J]. 环境工程, 2018, **36**(7): 161-164, 154.
Lian C, Zhou J, Chen S L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs in an industrial park of Guiyang [J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(7): 161-164, 154.
- [60] 盛涛, 陈筱佳, 高松, 等. 上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4901-4908.
Sheng T, Chen X J, Gao S, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs in areas surrounding a petrochemical park in Shanghai [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4901-4908.
- [61] 杨婷, 李丹丹, 单玄龙, 等. 北京市典型城区环境空气中苯系物的污染特征、来源分析与健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2017, **12**(5): 79-97.
Yang T, Li D D, Shan X L, *et al.* Pollution characterization, source apportionment and health risk assessment of benzene homologues in the ambient air of a typical urban area in Beijing, China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, **12**(5): 79-97.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, Ji Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)