

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3  
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM<sub>2.5</sub> 分布格局演变及其影响因素 ..... 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 ..... 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及来源分析 ..... 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 ..... 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 ..... 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 ..... 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 ..... 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 ..... 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 ..... 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 ..... 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 ..... 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 ..... 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 ..... 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 ..... 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 ..... 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 ..... 张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 ..... 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 ..... 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 ..... 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹翔, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 ..... 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 ..... 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 ..... 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 ..... 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) ..... 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 ..... 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 ..... 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 ..... 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 ..... 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 ..... 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 ..... 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 ..... 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 ..... 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 ..... 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 ..... 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 ..... 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 ..... 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 ..... 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 ..... 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 ..... 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 ..... 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 ..... 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 ..... 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 ..... 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 ..... 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 ..... 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 ..... 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 ..... 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 ..... 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 ..... 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As<sup>5+</sup> 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 ..... 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

## 淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征

王雨燕<sup>1</sup>, 王秀艳<sup>1\*</sup>, 杜淼<sup>1</sup>, 白瑾丰<sup>1</sup>, 杨文<sup>2</sup>

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 为研究淄博市重点工业行业的 VOCs 排放特征, 筛选出 9 个重点行业, 选择各行业代表性企业进行实地调研和采样, 分析了不同行业的 VOCs 排放特征, 通过实测法计算了各企业的 VOCs 排放量, 并在此基础上得到本地化排放因子。结果表明, 不同行业的 VOCs 排放特征存在一定差异, 多数行业以烷烃、卤代烃为主; 乙烷、乙炔、氯乙烷类(包括 1,1-二氯乙烷、1,1,1-三氯乙烷)以及氟利昂类(氟利昂 12 或氟利昂 114)为大多数行业均含有的主要特征物种; 分环节排放量计算结果显示, 设备动静密封点泄漏、有机液体装卸挥发损失、有机液体储存与调和挥发损失以及工艺有组织排放为不同类型石化行业的 VOCs 主要排放环节, 排放量占比均达到 40% 以上; 合成橡胶与炼钢行业的 VOCs 本地化排放因子与已有规范中的推荐值相近, 其余行业则存在较大差距。

**关键词:** 工业行业; 挥发性有机物(VOCs); 排放清单; 排放特征; 排放因子

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1078-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.201906068

## Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo

WANG Yu-yan<sup>1</sup>, WANG Xiu-yan<sup>1\*</sup>, DU Miao<sup>1</sup>, BAI Jin-feng<sup>1</sup>, YANG Wen<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** To study the emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in Zibo, nine key industries and their representative enterprises were selected to conduct a field investigation and measurement. The emitted VOC characteristics in different industries were analyzed. Based on measurement data, the emissions of VOCs from all monitored enterprises were calculated to obtain the localization emission factors. The results showed that different industries exhibited some differences in VOCs components, and the major VOCs components were alkane and halo hydrocarbon. Ethane, acetylene, chloromethane (conclude 1,1-dichloroethane, 1,1,1-trichloroethane), and Freon (Freon 12 or Freon 114) were the characteristic species in most industries. The results indicated that the major VOCs emission links in different types of petrochemical industries were equipment leakage, loading volatilization, storage volatilization losses, and organized discharge, which accounted for more than 40% of emissions. Local emission factors of VOCs calculated in the synthetic rubber and steel manufacturing industries were close to the recommended values in the guide, whereas there were large gaps in other industries.

**Key words:** industries; volatile organic compounds(VOCs); emission inventory; emission characteristic; emission factor

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)作为城市大气中一种重要的大气污染物,因其具有较高的化学反应活性,是臭氧产生的重要前体物质<sup>[1,2]</sup>,甚至参与雾-霾的形成<sup>[3]</sup>,而越来越受到人们的关注。目前已有研究表明,工业源是我国 VOCs 的重要排放源<sup>[4]</sup>,因此,加强工业污染控制,是当下全国大气治理的重要工作内容<sup>[5]</sup>。

近年来,随着我国对 VOCs 排放研究的逐渐加强,已有不少学者对区域性<sup>[6-8]</sup>、地方性<sup>[9-11]</sup>乃至全国性<sup>[12,13]</sup>的 VOCs 排放清单与特征进行了研究。大多数排放清单的编制多采用排放因子法<sup>[14-18]</sup>,而本地化排放因子的缺失使得清单具有较大的不确定性<sup>[9]</sup>;另一方面,研究 VOCs 的组成特征,建立能够表征不同行业的 VOCs 排放特征成分谱<sup>[19]</sup>,特别是考虑到石油化工业工艺过程复杂、VOCs 排放量大且排放环节分散<sup>[20]</sup>,研究其分环节排放量并识别主

要排放环节,对于制定具体可行的污染控制政策具有重要意义。

山东省淄博市作为《大气重污染成因与治理攻关项目》“2+26”城市中重点城市之一,是我国传统的重要工业城市,工业经济基础雄厚并且发展迅速,但同时也造成了严重的空气污染,带来了巨大的环境问题。本文以淄博市重点工业行业为研究对象,通过对代表性企业的实地调研与现场采样,分析了不同行业的排放特征,估算了各企业的 VOCs 排放量,识别各类型石油化工业的主要排放环节,并获得能够反映淄博市实际状况的重点行业本地化排放因子。本研究结果可优化排放清

收稿日期: 2019-06-10; 修订日期: 2019-10-10

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0107-20)

作者简介: 王雨燕(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: 15364519618@163.com

\* 通信作者, E-mail: wangsy@nankai.edu.cn

单的编制工作,并作为淄博市本地污染源成分谱构建的依据,以期为淄博市环境空气污染的精准治理与管控提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究范围与采样分析

#### 1.1.1 监测企业筛选

淄博市位于山东省中部,以工业为主要的经济支柱,是一个典型的重化工业城市,石油化工、陶瓷、医药和建材等门类成为山东省乃至全国的重要生产基地。基于淄博市 2017 年工业源挥发性有机物

排放清单数据及排放源调查情况,依据各行业 VOCs 排放比例、产品类型,参考文献[21]中的污染源划分,筛选出合成橡胶、化学原料药、基础化学品制造、合成树脂、精炼石油、炼钢、炼焦、陶瓷制品以及平板玻璃这 9 个重点工业行业。其中,基础化学品制造选取了以丁二烯生产为代表的重点企业,该企业的产品用作合成橡胶的原料,两家企业形成重要产业链,合成树脂行业选取了淄博市具有特色的 PVC 手套生产企业。本研究工作于 2018 年 8 月开展,对代表性的企业进行了详细地实地调研及现场 VOCs 排放采样测试,监测企业及采样数量见表 1。

表 1 淄博市监测企业及采样数量

Table 1 Quantities of monitoring enterprises and samples in Zibo

重点行业	监测企业数量	样品采集数量		
		有组织样品	无组织样品	
石油化工业	合成橡胶	1	4	7
	化学原料药	1	8	9
	合成树脂	2	6	10
	基础化学品制造(丁二烯)	1	2	10
	精炼石油	1	8	5
其他工艺过程	炼钢	2	8	8
	炼焦	1	2	2
	陶瓷制品	2	6	5
	平板玻璃	2	6	10
合计	13	50	66	

#### 1.1.2 采样方法

目前,对于 VOCs 样品的离线采集方法主要有罐采样法与气袋法,考虑到本次采集的样品数量较多且浓度较高,故选择容积为 5 L 的聚四氟乙烯(PVF)薄膜气袋进行采样,采样仪器为崂应 3036 型废气 VOCs 采样仪。采样前,根据各企业的采样方案与现场情况,合理设置采样点位,连接好 Teflon 连接管与采样泵,检查仪器气密性及运行状态是否正常。样品采集过程中,还需使用手持式微气象仪,测量并记录风速、风向、温度和相对湿度等实时气象信息。

以我国《固定源废气监测技术规范》(HJ/T 397-2007)<sup>[22]</sup>、《大气污染物无组织排放监测技术导则》(HJ/T 55-2000)<sup>[23]</sup>和《固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法》(HJ 732-2014)<sup>[24]</sup>为标准分别对企业的有组织和无组织排放环节进行采样。烟囱采样位置优先选在垂直管道,避开涡流区、选取靠近烟道中心的一点作为采样点,同时测量废气排放口的流速流量;对于无组织排放环节,采样点设在污染区域下风向 2~10 m 处,进样口标高在地面以上 1.5 m,实行 1 h 内等时间间隔采集 3 个样品计平均值。采样期间,保证各企业均处于正常生产工况。

#### 1.1.3 分析方法

分析仪器使用 Synspec GC-955 型(615/815 系

列)气相色谱仪,检测器为光离子化检测器(PID)和火焰离子化检测器(FID)双检测器。PID 对大多数有机物都可发生响应,对苯类、含羰基类化合物等选择性较好;FID 对含碳有机物具有较高的灵敏度,稳定性好、响应迅速。样品气体经预浓缩仪后在 -150℃ 低温下被富集,然后迅速热脱附,分离柱被载气反吹,通过分离柱的样气经分析柱分离直到检测器。其中 615 用于检测高沸点 VOCs(C6~C12),815 用于检测低沸点 VOCs(C2~C5),检测时间分辨率为 0.5 h,每个样品进行 3 次进样分析,取稳定值作为分析数据。本研究共检测出 76 种 VOCs 物质,其中烷烃类 29 种,烯烃类 10 种,炔烃类为乙炔,芳香烃类 16 种,卤代烃类 19 种以及腈类一种。

#### 1.1.4 质量控制与保证

使用全新的真空采样袋,正式采集样品前先用目标气体润洗气袋 2~3 次,目的是使气袋内表面钝化,以减小对气体样品的吸附损失,样品采集后保存在阴凉干燥避光条件下尽快运送至实验室,并尽量于 8 h 内完成分析测试。样品分析前,进行空白试验,未发现明显污染。使用的分析标准物为 PAMs(56 种)和 TO15(64 种)标准气体以及丙烯腈,保证每一种物质的标准工作曲线相关性系数均大于 0.99,即代表峰的积分面积与相应浓度之间具有良

好的线性关系<sup>[25]</sup>,仪器每月使用标准气体进行校准,确保运行稳定.分析结束后,依据标准谱图的各种物质保留时间,对所得谱图的峰窗漂移情况进行检查和修正,保证数据的准确性.

## 1.2 VOCs 排放量计算

### 1.2.1 有组织排放量计算

通过实测获得工艺有组织废气排放口的 VOCs 浓度、排气流量和实际运行时间,从而对 VOCs 排放量进行计算,公式如下:

$$E_{\text{有组织}} = \sum (Q_i \times c_i \times T_i \times 10^{-9})$$

式中, $E_{\text{有组织}}$ 表示工艺有组织排放口的 VOCs 排放量, $t \cdot a^{-1}$ ;  $Q_i$ 表示第  $i$  个有组织排放口的废气流量, $m^3 \cdot h^{-1}$ ;  $c_i$ 表示第  $i$  个有组织排放口排放的 VOCs 浓度, $mg \cdot m^{-3}$ ;  $T_i$ 表示第  $i$  个有组织排放口运行时间, $h \cdot a^{-1}$ .

### 1.2.2 无组织排放量计算

石油化工业工艺过程复杂多样、VOCs 排放环节较多,对其无组织各环节排放量的计算主要依据文献[26]中的计算方法,以全过程追踪原则,分别对各环节的 VOCs 排放量展开计算.计算过程中所需相关参数均为现场测量或企业提供,较高程度体现了企业的真实排放情况.

其他工艺过程行业的 VOCs 无组织排放环节较为简单,主要产生于各生产车间,VOCs 排放量的计算公式为:

$$E_{\text{无组织}} = \sum (c_i \times V_i \times N_i \times T_i \times 10^{-9})$$

式中, $E_{\text{无组织}}$ 表示车间无组织 VOCs 排放量, $t \cdot a^{-1}$ ;  $c_i$ 表示第  $i$  个车间口测得的 VOCs 浓度, $mg \cdot m^{-3}$ ;  $V_i$ 表示第  $i$  个车间的体积, $m^3$ ;  $N_i$ 表示第  $i$  个车间的每小时换气次数;  $T_i$ 表示第  $i$  个车间的运行时间, $h \cdot a^{-1}$ .

除车间排放外,其他工艺过程行业若存在与石油化工业类似排放环节,则同样参考文献[26]中的方法进行计算.

### 1.2.3 总排放量计算

经上述方法分别计算出各企业 VOCs 有组织、无组织环节的排放量,加和得到全过程总排放量,即  $E_{\text{总}} = E_{\text{有组织}} + E_{\text{无组织}}$

## 1.3 VOCs 排放因子的建立

通过对重点行业典型企业的现场调研和采样分析,了解了各行业的 VOCs 排放水平,以产品产量计,得到相应地本地化排放因子,计算公式如下:

$$EF = E_{\text{总}} / A \times 10^3$$

式中,EF 表示 VOCs 排放因子, $g \cdot kg^{-1}$ ;  $E_{\text{总}}$ 表示企业全过程总 VOCs 排放量,计算方法详见 1.2 节,

$t \cdot a^{-1}$ ; A 表示企业年产品产量, $t \cdot a^{-1}$ .

## 2 结果与讨论

每个样品检测出的所有 VOCs 组分的浓度值之和即为 VOCs 的总排放浓度,以各点位所有样品的平均值代表各采样点的 VOCs 排放情况.

### 2.1 重点行业 VOCs 排放特征

#### 2.1.1 重点行业 VOCs 组分特征

各行业排放 VOCs 组分的质量分数见图 1,可以看出,不同行业的 VOCs 组分特征存在一定的差异.合成橡胶与化学原料药行业的 VOCs 组成均以卤代烃和烷烃类物质为主,所占质量分数分别为 46.80%、37.73% 和 52.82%、31.77%; 合成树脂业 VOCs 排放以烷烃和芳香烃为主,质量分数分别为 43.45% 和 27.97%,分析认为是由于 PVC 手套在浸渍槽中粘附乳液的过程中,大量芳香烃类物质作为溶剂使用; 基础化学品制造业烷烃类排放量最高,占比 50.98%,其次为乙炔 25.63%; 精炼石油行业和炼焦行业所产生的 VOCs 均以卤代烃类为主要的排放组分,其次是烷烃,这与韩博等<sup>[27]</sup>和 Shi 等<sup>[28]</sup>的研究结果一致; 炼钢行业的 VOCs 组成中炔烃、卤代烃和烷烃这 3 类组分含量相近,为 26.22%、26.20% 和 21.72%; 陶瓷制品业以卤代烃和烷烃排放为主,分别为 44.61% 和 25.61%; 平板玻璃制造业以烯烃和烷烃类为主,分别占比 34.83% 和 32.13%.

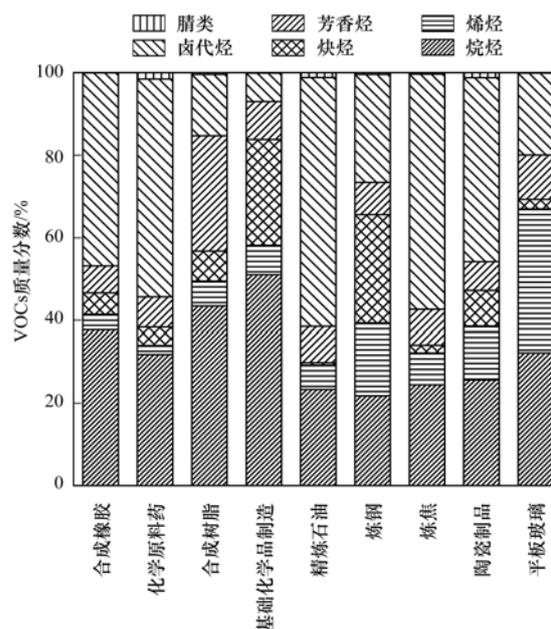


图 1 重点行业各类 VOCs 组分质量分数

Fig. 1 Mass fraction of VOCs components from the key industries

#### 2.1.2 重点行业 VOCs 主要特征物种

VOCs 物质的种类繁多,不同行业因其工艺过程、排放环节与产品特点的差异而产生不同的优势

物种. 分析可知, 各行业质量分数  $\omega(\text{VOCs})$  排行前 10 物质的质量分数之和均达到总 VOCs 质量的一半以上, 依此确定为各行业主要特征组分, 并建立了重点行业的 VOCs 主要特征物种谱图, 如图 2 所示.

图 2 显示, 炼焦行业以 1, 1, 1-三氯乙烷 (27.92%)、2-甲基庚烷(20.05%)、乙烯(7.22%) 和苯(5.83%) 等排放为主, 前 10 特征物种的质量分数之和最高为 87.13%; 化学原料药、合成树脂、

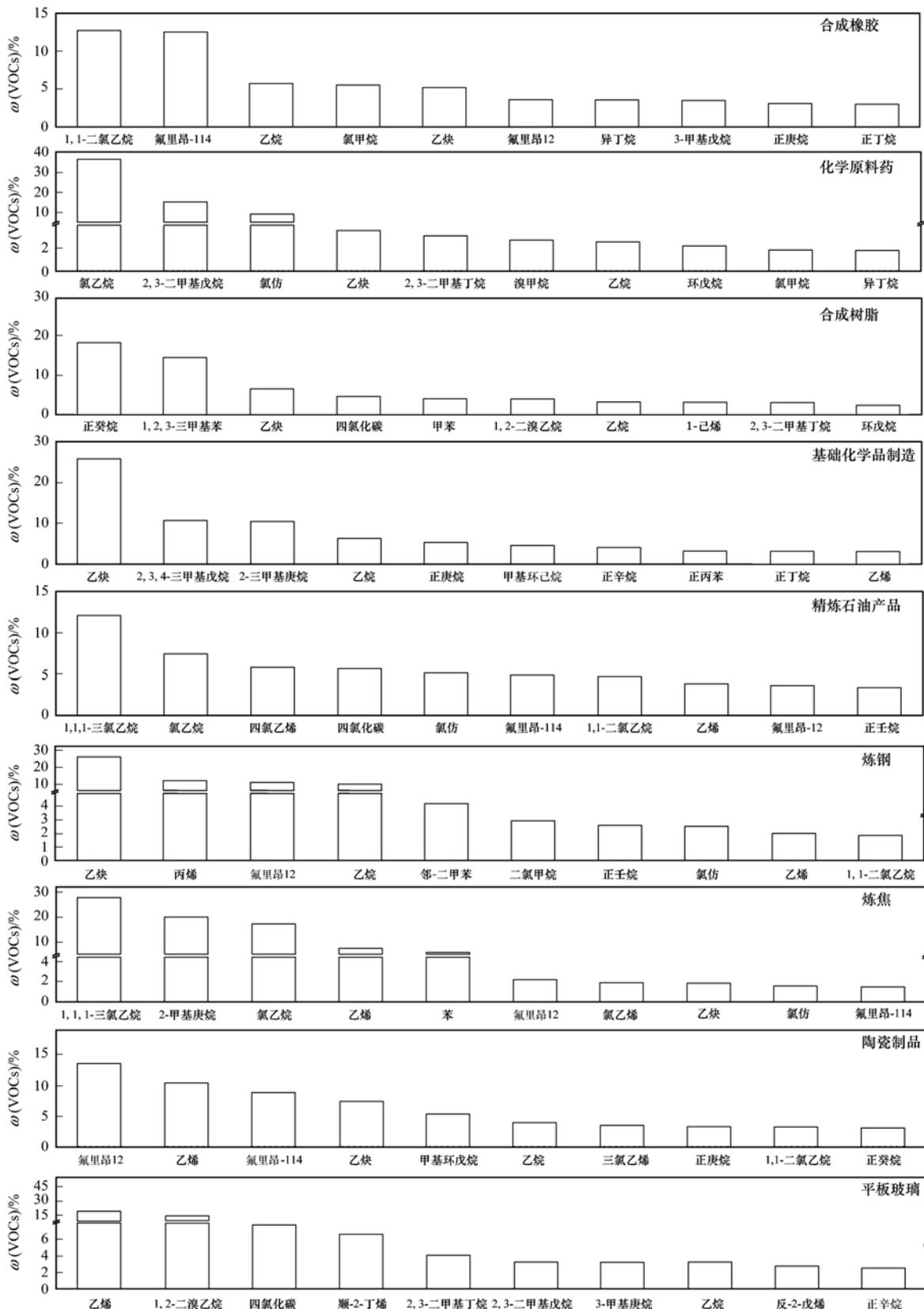


图 2 重点行业 VOCs 主要特征物种谱图

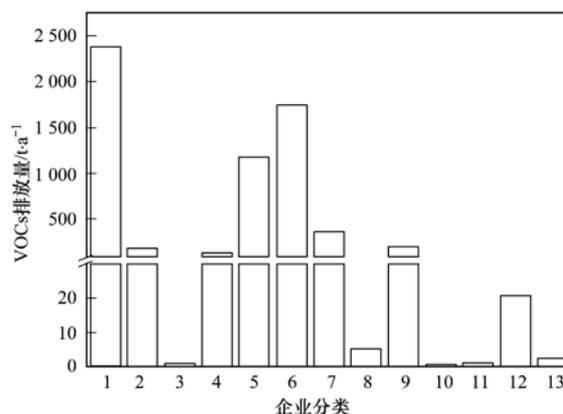
Fig. 2 Spectrum of main characteristic species of VOCs in key industries

基础化学品制造、炼钢、陶瓷制品与平板玻璃这 6 个行业的主要特征物种总质量分数占 60%~80%。化学原料药制造工业 VOCs 排放主要源于有机溶剂对药品进行提取合成过程产生的废气,常以多组分和混合物形式排放,VOCs 组成中含有较高浓度的氯乙烷(36.56%)、氯仿(9.13%)等;合成树脂以正葵烷(18.19%)、乙炔(6.56%)以及蘸料过程使用的 1,2,3-三甲基苯(14.51%)和甲苯(3.94%)等物质为主;基础化学品制造和炼钢行业均以乙炔物种的排放量最高,分别占比 25.63%和 26.22%,其次,前者的特征物种多为 2,3,4-三甲基戊烷、2-甲基庚烷、正庚烷等高碳 VOCs,后者为丙烯(12.50%)和氟利昂 12(11.07%)等;陶瓷制品业排放的 VOCs 中含较高浓度的氟利昂和乙烯;平板玻璃主要含有乙烯(19.09%)、1,2-二溴乙烷(14.44%)及四氯化碳(7.83%)等;合成橡胶与精炼石油产品前 10 物种的总质量分数仅为 58.54%和 56.28%,分析原因是由于生产项目多样,工艺过程复杂,导致产生排放的 VOCs 种类较多。可以看出,大多数企业的特征物种中均含有氟利昂(氟利昂 12 或氟利昂 114),氟利昂主要用于制冷剂,在各项工艺生产过程中,会使用氟利昂对运行的设备进行冷却,保证设备长时间连续稳定运行,因此在生产过程中会被大量释放<sup>[29]</sup>。

## 2.2 监测企业 VOCs 排放量

依据 1.2 节计算得到各行业代表性监测企业的 VOCs 排放量如图 3 所示。

图 3 中,合成橡胶、化学原料药、合成树脂与精



企业分类:1.合成橡胶;2.化学原料药;3,4.合成树脂;  
5.基础化学品制造(丁二烯);6.精炼石油;7,8.炼钢;  
9.炼焦;10,11.陶瓷制品;12,13.平板玻璃

图 3 监测企业 VOCs 排放量

Fig. 3 VOCs emission inventory of the monitored enterprises

炼石油行业选取的代表性企业均为大型企业,VOCs 年排放量分别为 2 378.26、178.69、135.22 和 1 748.56  $t \cdot a^{-1}$ ;基础化学品制造与炼焦行业的代表性企业为中型企业,VOCs 年排放量为 1 177.51  $t \cdot a^{-1}$ 和 193.29  $t \cdot a^{-1}$ ;炼钢、陶瓷制品与平板玻璃行业对一大一小企业进行监测,其中,炼钢行业大、小代表企业 VOCs 年排放量分别为 362.84  $t \cdot a^{-1}$ 和 5.17  $t \cdot a^{-1}$ ;陶瓷制品与平板玻璃由于工艺过程相对简单,故监测企业的 VOCs 排放量较低。

针对石油化工业高污染、工艺复杂、排放环节多等特点,计算了 5 类石油化工业基于不同环节的 VOCs 排放水平,如表 2 所示,并分析得出主要环节。

表 2 石油化工业 VOCs 分环节排放量<sup>1)</sup>

Table 2 VOCs emission inventory in different parts of petrochemical industries

行业	排放量/ $t \cdot a^{-1}$						
	工艺有组织	储存挥发损失	设备密封泄漏	装卸过程	废水逸散	冷却塔系统	全过程
合成橡胶	5.11	159.74	850.31	1 221.76	9.04	132.30	2 378.26
化学原料药	21.48	0.86	145.57	4.50	2.92	3.36	178.69
合成树脂	109.21	—	9.33	—	—	16.68	135.22
基础化学品制造	12.86	184.83	483.89	338.57	99.84	57.52	1 177.51
精炼石油	52.24	1 025.52	531.26	136.21	3.10	0.23	1 748.56

1)“—”表示未得到企业相关信息或企业未涉及的排放环节

由表 2 可知,合成橡胶行业以有机液体装卸过程中挥发损失的 VOCs 排放为主,占全过程的 51.37%;化学原料药和基础化学品制造行业由于产品多样,各类生产装置区较多,使得动静密封点泄漏成为主要的 VOCs 产生环节,分别占比 81.47%和 41.09%;合成树脂行业以工艺有组织过程排放的 VOCs 最高,质量分数达 80.76%;精炼石油行业的 VOCs 排放主要来自储罐区各类油品的储存与调和挥发损失,该环节 VOCs 的排放量占比 58.65%。不

同类型的石油化工业由于工艺流程不同而使得主要排放环节呈现出差异性。

## 2.3 重点行业 VOCs 排放因子本地化研究

依据 1.3 节计算得到各行业 VOCs 排放因子,计算结果如表 3 所示,并与文献[21]中提供的推荐值及其他文献的研究结果进行比较。

通过表 3 可以看出,合成橡胶与炼钢行业的实测 VOCs 排放因子与文献[21]中推荐值误差在 25%以内,结果较为相近。合成树脂行业实测因子为

表 3 实测排放因子与其他研究比较/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 

Table 3 Comparison of the measured emission factors

重点行业	with other studies/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	实测排放因子	文献[21]排放因子	其他研究排放因子
合成橡胶	8.65	7.17	12.5 <sup>[17]</sup>
化学原料药	5.66	430	114.14 <sup>[12]</sup>
合成树脂	2.76	0.744 8	5.4 <sup>[17]</sup>
基础化学品制造	7.85	139.74	5 <sup>[17]</sup>
精炼石油	0.42	1.82	1 <sup>[30]</sup>
炼钢	0.23	0.3	0.12 <sup>[31]</sup>
炼焦	0.24	2.96	0.3 <sup>[32]</sup>
陶瓷制品	0.07	29.22	0.06 <sup>[33]</sup>
平板玻璃	0.22	4.4	0.008 <sup>[9]</sup>

2.76  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与文献[21]中的值相比较,依据表2识别到有组织排放为其主要排放环节,故合成树脂业应加强对有组织排放的治理;化学原料药制造业的主要排放环节为设备动静密封点泄漏,实地调研得到该企业开展了LDAR检测工作对VOCs排放进行监管,故测得的排放因子为5.66  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,低于推荐值76倍;基础化学品制造业的本地化因子为7.85  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,企业在装置区采取屏蔽泵等措施以减少VOCs的泄漏;精炼石油行业排放因子实测值为0.42  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与推荐值及长江三角洲<sup>[30]</sup>相比较,主要是由于企业对生产过程各排放环节均配置了治理设施以控制VOCs的排放;炼焦行业实测排放因子为0.24  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,低于推荐值12.3倍,与何秋生<sup>[32]</sup>的研究结果相近;陶瓷制品业实测排放因子为0.07  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,低于推荐值400多倍,实地调研得到企业将各工艺车间产生的废气经集气管路收集并处理后统一以有组织形式排放,大大减少了排放过程及无组织的逸散,林启才<sup>[33]</sup>得到陕西关中地区该行业的VOCs本地化因子为0.06  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与本研究成果相近;平板玻璃行业同样采用联合车间生产的形式,排放因子为0.22  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,低于推荐值20倍,高于青岛市<sup>[9]</sup>的本地化因子。

综上所述,VOCs排放因子的确定受原辅材料、废气收集和治理效率等多种因素的综合影响,不同地区的工艺过程不同使排放因子产生差异,这也体现了构建本地化VOCs排放因子的重要性。

### 3 结论

(1)源样品中共检测出76种VOCs物质,其中烷烃类29种,烯烃类10种,芳香烃类16种,卤代烃类19种,炔烃及腈类各一种.对VOCs的组成进行分析,结果表明,合成橡胶、化学原料药、精炼石油、炼焦以及陶瓷制品行业的VOCs组分均以卤代烃、烷烃为主;合成树脂与基础化学品制造行业以

烷烃类排放为主;炼钢行业以炔烃排放为主;平板玻璃制造行业以烯烃类物质占主导.合成橡胶与化学原料药以及精炼石油与炼焦的VOCs组分特征分别呈现出一定的相似性。

(2)各行业质量分数 $\omega$ (VOCs)排行前10物质的质量分数之和均达到总VOCs质量的一半以上,依次确定并建立了重点行业的VOCs主要特征物种谱图.不同行业因其原辅材料、工艺过程等因素的差异而使得主要特征物种表现各异,总体来看,乙烷、乙炔、氯乙烷类(包括1,1-二氯乙烷、1,1,1-三氯乙烷)以及氟利昂类(氟利昂12或氟利昂114)为大多数行业均含有的主要特征物种。

(3)通过实测核算了9个重点行业代表性企业的排放量.分环节排放的研究表明,设备动静密封点泄漏、有机液体装卸挥发损失、有机液体储存与调和挥发损失以及工艺有组织排放为不同类型石化行业的VOCs主要排放环节,排放量占比均达到40%以上。

(4)合成橡胶与炼钢行业的VOCs本地化排放因子实测值与已有规范中的推荐值误差小于25%,结果较为相近,其余行业则差距较大.经实地调研并对比其它文献的研究可以看出,不同地区由于工艺特点以及控污技术不同,使得排放因子存在一定的差异,应逐步完善淄博市VOCs本地化排放因子的构建,从而提高VOCs排放清单编制的准确性与可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ling Z H, Guo H. Contribution of VOC sources to photochemical ozone formation and its control policy implication in Hong Kong [J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, **38**: 180-191.
- [3] Durkee B. Chemistry of Atmospheric reactions of VOCs leading to smog [A]. In: Durkee J B (Ed.). *Cleaning with Solvents: Science and Technology* [M]. Amsterdam: William Andrew, 2014. 547-556.
- [4] 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.
- [5] Zheng C H, Shen J L, Zhang Y X, *et al.* Quantitative assessment of industrial VOC emissions in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and projection [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **150**: 116-125.
- [6] 黄成,安静宇,鲁君.长三角区域非道路移动机械排放清单及预测[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 3965-3975.  
Huang C, An J Y, Jun L. Emission inventory and prediction of non-road machineries in the Yangtze River Delta Region, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 3965-3975.

- [7] Ou J M, Zheng J Y, Li R R, *et al.* Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 393-402.
- [8] 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.
- [9] 吕建华, 李瑞芃, 付飞, 等. 青岛市挥发性有机物排放清单及重点行业排放特征研究[J]. *中国环境管理*, 2019, **11**(1): 60-66.  
Lv J H, Li R P, Fu F, *et al.* Emission inventory of volatile organic compounds and pollution characteristics of the key VOC-related industries in Qingdao [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2019, **11**(1): 60-66.
- [10] 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.
- [11] 虎啸宇, 刘航, 王乃玉, 等. 秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 543-550.  
Hu X Y, Liu H, Wang N Y, *et al.* Industrial VOCs emission in Qinhuangdao [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 543-550.
- [12] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(1): 48-55.  
Chen Y, Ye D Q, Liu X Z, *et al.* Source tracing and characteristics of industrial VOCs emissions in China [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(1): 48-55.
- [13] Wu R R, B Yu, Li J, *et al.* Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008-2012 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **127**: 244-254.
- [14] Zhou Z H, Tan Q W, Deng Y, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutant sources and characteristics of VOCs species in Sichuan Province, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2019, **76**(1): 21-58.
- [15] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* The study of emission inventory on anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2011, **11**(1): 951-983.
- [16] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(20): 4976-4988.
- [17] 陈宗耀, 伦小秀, 唐贵刚, 等. 中国人为源 VOCs 排放因子库研究[J]. *环境工程*, 2018, **36**(9): 68-73.  
Chen Z Y, Lun X X, Tang G G, *et al.* Research on VOCs anthropogenic source analysis and emission factor database in China [J]. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(9): 68-73.
- [18] 闫雨龙, 彭林. 山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4086-4093.  
Yan Y L, Peng L. Emission inventory of anthropogenic VOCs and its contribution to ozone formation in Shanxi province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4086-4093.
- [19] 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.
- [20] Zhang Z J, Yan X Y, Gao F L, *et al.* Emission and health risk assessment of volatile organic compounds in various processes of a petroleum refinery in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 452-461.
- [21] 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)[Z]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2014.
- [22] HJ/T 397-2007, 固定源废气监测技术规范[S].
- [23] HJ/T 55-2000, 大气污染物无组织排放监测技术导则[S].
- [24] HJ 732-2014, 固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法[S].
- [25] Wei W, Cheng S X, Li G H, *et al.* Characteristics of ozone and ozone precursors (VOCs and NO<sub>x</sub>) around a petroleum refinery in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(2): 332-342.
- [26] 石化行业 VOCs 污染源排查工作指南(征求意见稿)[Z]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015.
- [27] 韩博, 吴建会, 王凤伟, 等. 天津滨海新区工业源 VOCs 及恶臭物质排放特征[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(11): 1776-1781.  
Han B, Wu J H, Wang F W, *et al.* Characterization of VOCs and odorous compounds from industrial sources in Binhai New Area, Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(11): 1776-1781.
- [28] Shi J W, Deng H, Bai Z P, *et al.* Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **515-516**: 101-108.
- [29] 吴丽萍, 欧盛菊, 殷宝辉, 等. 新疆维吾尔自治区石化企业典型工艺无组织 VOCs 排放特征及光化学反应活性[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(12): 2103-2111.  
Wu L P, Ou S J, Yin B H, *et al.* Emission characteristics and photochemical reaction activity of VOCs in the non-organized emission of typical processes of the petrochemical enterprise in Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(12): 2103-2111.
- [30] 鲁君. 典型石化企业挥发性有机物排放测算及本地化排放系数研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, **39**(6): 604-609.  
Lu J. A study on VOCs emission inventory of typical petrochemical plant and its local emission factor [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, **39**(6): 604-609.
- [31] Wu X C, Zhao L J, Zhang Y X, *et al.* Primary air pollutant emissions and future prediction of iron and steel industry in China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(4): 1422-1432.
- [32] 何秋生. 我国炼焦生产过程排放的颗粒物和挥发有机物的组成特征、排放因子及排放量初步估计[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2006.
- [33] 林启才. 关中地区陶瓷行业 VOCs 排放系数测试与校正研究[J]. *环境科学与管理*, 2018, **43**(9): 53-56.  
Lin Q C. Research on VOCs pollutant discharge coefficient of ceramic industry in Guanzhong region [J]. *Environmental Science and Management*, 2018, **43**(9): 53-56.

## CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer .....	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Yangquan City .....	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> from Taian City During the Summer .....	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan .....	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration .....	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo .....	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City .....	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province .....	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process .....	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning .....	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park .....	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017 .....	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China .....	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China .....	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles .....	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta .....	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring .....	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions .....	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin .....	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province .....	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau .....	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir .....	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature .....	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu .....	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China .....	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System .....	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies .....	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials .....	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics .....	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers .....	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX .....	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR) .....	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor .....	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure .....	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance .....	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge .....	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City .....	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil .....	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta .....	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria .....	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China .....	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain .....	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors .....	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite .....	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils .....	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As <sup>5+</sup> Stress .....	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)