

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序 郝郑平(477)

我国机动车排放VOCs及其大气环境影响 陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)

基于PMF量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)

南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估 张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)

某工业园区VOCs臭氧生成潜势及优控物种 武蕾丹,王秀艳,杨文,郭凤艳,刘锦(511)

某石油化工园区秋季VOCs污染特征及来源解析 胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)

某典型石油化工园区冬季大气中VOCs污染特征 毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)

杭州市工业源VOCs排放清单及排放特征 卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)

秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征 虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)

浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数 杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)

汽车制造企业恶臭来源及影响分析 石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)

典型酿造业厂界无组织排放VOCs污染特征与风险评价 高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)

成都市大气环境VOCs污染特征及其健康风险评价 李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)

上海地区住宅儿童卧室室内甲醛和苯系物浓度的现场检测分析 蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)

江苏省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献 夏思佳,刘倩,赵秋月(592)

江门市人为源挥发性有机物排放清单 陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)

长江三角洲2014年天然源BVOCs排放、组成及时空分布 刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)

北京城市副中心(通州区)加油站VOCs排放清单 黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)

公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及VOCs成分谱 胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)

生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究 褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)

低温等离子体-生物耦合系统对复合CVOCs的降解 郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)

水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价 陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)

城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征 许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)

不同通勤模式暴露于VOCs的健康风险评价 佟瑞鹏,张磊(663)

家具制造过程中VOCs的来源分析及环境健康风险评价 佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)

研究报告

北京市PM_{2.5}时空分布特征及其与PM₁₀关系的时空变异特征 杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)

小型池塘水-气界面CH₄冒泡通量的观测 张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)

中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)

铁岭市河流氮素时空分布及源解析 杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)

基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体CDOM特征 刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)

宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价 徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)

巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价 吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)

广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性 蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)

内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制 郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周徽(758)

河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程 徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)

降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析 刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)

城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系 梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)

三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征 张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)

基于污染评价的地下水中优控污染物筛选 赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)

硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响 陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)

活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和Cu(II)的去除性能 孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)

三维网状HZO@SGH对水中氟离子的吸附作用和机制 马福臻,周少奇,刘泽璐,支亮亮,周璇(828)

MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制 许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)

污水厂二级出水中难降解有机物的臭氧化特性 侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)

染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测 孟晓荣,王隽,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)

污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试 李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(859)

间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响 刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)

好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响 李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)

处理垃圾渗滤液的SBR中微生物种群与污泥比阻 蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)

基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价 姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁垠涛,于晓华(889)

西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价 刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)

开封城市土壤磷素组成特征及流失风险 白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)

电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价 尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)

上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价 孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)

四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征 迟菘琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)

硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤As-Cd生物有效性及稻米累积阻控 李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)

电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例 严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799, 908, 934)

某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种

武蕾丹¹, 王秀艳^{1*}, 杨文², 郭凤艳², 刘锦¹

(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: 臭氧(O₃)污染日趋严重, 控制光化学反应前体物之一的挥发性有机污染物(volatile organic compounds, VOCs)对减少臭氧生成有重要意义. 为研究天津某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势, 采集了园区 6 个代表企业厂界气体样品, 使用质子转移反应飞行时间质谱仪(PTR-TOF-MS)对 VOCs 进行了定量分析, 估算了各企业臭氧生成潜势, 运用 VOCs/NO_x 研究了臭氧生成控制敏感性因素, 并在熵值法基础上筛选出了减少臭氧生成优先控制 VOCs 物种. 结果表明, 通过 PEC 法估算臭氧生成 F 企业最高为 0.423 3 mg·m⁻³, MIR 法估算结果 C 企业最高为 1.573 3 mg·m⁻³; PEC 法估算结果与臭氧浓度更接近, 适用于园区对臭氧生成的估算; VOCs 和 NO_x 均为工业园区臭氧生成敏感性因素, 需同时控制; 园区内 VOCs 物种臭氧生成贡献大小为烷烃 > 烯炔烃 > 醇类 > 芳香烃, 优先控制物种为正庚烷及其同分异构体、正壬烷、正辛烷及其同分异构体、正十一烷、戊烷、正癸烷、甲醇.

关键词: VOCs; 臭氧生成潜势; 等效丙烯浓度; 最大增量反应活性; 优控污染物

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0511-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201707106

Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park

WU Lei-dan¹, WANG Xiu-yan^{1*}, YANG Wen², GUO Feng-yan², LIU Jin¹

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

Abstract: Ground-level ozone (O₃) pollution is a serious problem in major cities in China. The control of its precursors, volatile organic compounds (VOCs), is a key to limiting ozone production. The ozone formation potential of VOCs in an industrial park in Tianjin was studied by collecting gas samples at the factory boundaries of six representative enterprises. The PTR-TOF-MS was used to analyze VOCs quantitatively. The VOCs/NO_x ratio was used to determine the control strategies. The priority VOCs were selected based on the entropy method. Our results indicated that, the ozone formation potential concentration of enterprise F was the highest with the concentration of 0.423 3 mg·m⁻³ using the propylene-equivalent concentration (PEC) scale; the highest concentration was obtained at enterprise C with 1.573 3 mg·m⁻³ using maximum incremental reactivity (MIR) scale. The result of PEC scale is closer to the O₃ concentration, which is applicable to the study of ozone generation in this industrial park. Ozone production is sensitive to both VOCs and NO_x in this industrial park, joint control should be considered. Alkanes contributed most to ozone formation, followed by alkenes & alkynes, alcohols, and aromatics. The prior VOC species that need to be controlled include *n*-heptane and its isomers, *n*-nonane, *n*-octane and its isomers, undecane, pentane, *n*-decane, and methanol.

Key words: VOCs; ozone formation potential; propylene-equivalent concentration; maximum incremental reactivity; priority pollutants

臭氧(O₃)是大气中主要的污染物之一. 在我国, 大气臭氧浓度上升, 超标天数增加, 在京津冀、长三角地区成为仅次于 PM_{2.5} 的空气污染物, 在珠三角地区更是成为首要空气污染物^[1], 空气中臭氧浓度过高会严重危害人体健康^[2,3]. 近地面臭氧绝大部分是由 VOCs 和氮氧化物(NO_x)等前体物, 在太阳紫外线照射下发生光化学反应生成的二次污染物^[4]. VOCs 作为重要前体物, 对臭氧生成有很大影响^[5-7]. 通过研究区域环境中 VOCs 的臭氧生成潜势, 筛选出其中对臭氧生成潜势贡献较高的物质, 并进行合理控制, 对解决近地面臭氧污染问题有重要意义.

评价 VOCs 对臭氧生成影响的方法有 3 种, 分别为等效丙烯浓度(PEC)法^[8-11]、OH 消耗速率

法^[12]和最大增量反应活性(MIR)法^[11,13]. PEC 法和 OH 消耗速率法两者的原理相同, 计算方法相似, 都是只考虑 VOCs 和 OH 自由基的反应性^[10], 没有考虑后续反应, 也忽略了大气其他反应过程如光解反应等对臭氧生成潜势的影响^[14]. MIR 法在 Carter^[15]模拟计算得到的 MIR 系数的基础上进行计算, 考虑了 VOCs 与 OH 的反应活性, 以及初始反应之后的后续反应, 但也受到模拟中前体物配置、模式不确定性因素的影响^[11], 并且部分重要的

收稿日期: 2017-07-14; 修订日期: 2017-09-21

基金项目: 环境保护公益行业科研专项(201409019); 南开大学亚洲研究中心项目(AS1417); 国家重大科学仪器研发项目(2013YQ090875)

作者简介: 武蕾丹(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气 VOCs 污染控制, E-mail: leidanwu@163.com

* 通信作者, E-mail: wangsy@nankai.edu.cn

VOCs 污染物系数缺失^[16]。综上,两种估算方法均有不足,都不能单独作为 VOCs 臭氧生成潜势的评估方法^[11],故将两种估算方法进行比对并同时作为筛选优控污染物的指标。

本文以天津某工业园区为例,对该园区中 6 个具有代表性的企业进行了 VOCs 检测与分析,计算了各企业的臭氧生成潜势,分析 VOCs 物种对臭氧生成的影响,并确定臭氧生成控制敏感性因素,同时,结合熵值法^[17]筛选出该工业园区影响臭氧生成的主要 VOCs 物种,以期为工业园区控制臭氧生成提供依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与分析

1.1.1 样品采集

工业园区内企业众多,选取其中有代表性的企业进行采样和分析,按照国民经济行业分类标准,将这些企业归类:有机化学品制造业(C2614, 7 个),选择 A、B、C、D 这 4 个企业;其他合成材料制造(C2659, 2 个),选择 E 企业;其他专用设备制造(C3599, 4 个);其他仓储业(H5990, 3 个),选择 F 企业。

参照《固定源废气监测技术规范》(HJ/T 397-2007)^[18]和《大气污染物无组织排放监测技术导则》(HJ/T 55-2000)^[19],采用气袋采样法采集样品。样品采集装置包括采样袋、真空箱、连接管和采样泵,气袋置于真空箱中并通过连接管与外界相连,采样泵将真空箱中气体抽出,利用压力差使外界空气进入采样袋。采样袋采用聚氟乙烯(PVF)薄膜气袋,连接管为聚四氟乙烯管(Teflon),采样泵型号为 SOC-01 型。采样时间为 2015-07-13 ~ 2015-07-22,天气晴朗,风速均在 $1.0 \sim 3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,具备良好的采样条件^[19]。以企业厂界处 VOCs 样品表示企业排放 VOCs 水平。采样时,厂界上下风向处各在 1 h 内采 3 个平行样,尽量均匀采样,确保样品采集的代表性。同时,在厂界下风向使用臭氧检测仪(Aeroqual S300-OZL)和二氧化氮检测仪(Aeroqual S500-ENW)检测臭氧浓度和二氧化氮浓度,环境中氮氧化物浓度用检测的二氧化氮浓度近似表示。检测仪开机稳定后,连续读取 10 个数据,求均值作为臭氧和氮氧化物的浓度值。

1.1.2 样品分析

气体样品采用 PTR-TOF-MS(BKK-5000,北京凯尔科技发展有限公司)进行定量分析。PTR-TOF-

MS 是进行化学分析的一种强有力工具,由 Blake^[20]首次采用。仪器分为四部分:①离子源,空心阴极放电产生 H_3O^+ ;②漂移管,提供离子与待测物发生质子转移反应的场所;③传输区,聚焦离子进入飞行时间质量分析器;④飞行时间质量分析器对初始离子和产物进行质谱分析。与常规检测 VOCs 的气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)相比,质子转移反应谱(PTR-MS)具有测量快速、灵敏度高,绝对测量不需标定,无需样品前处理等特点,被广泛用于 VOCs 的检测^[21-23]。使用的分析标准物质为美国 EPA-PAMs 标准气体,内含 57 种体积分数为 1×10^{-6} 的挥发性有机物,以及筛选出的 4 种企业特征污染物标准气体,分别是丙烯腈、甲醇、1,3-丁二烯、正丁醇。

1.1.3 质量控制和质量保证

样品采集使用全新的气袋,正式采样前通大气清洗采样袋 2 ~ 3 次,气袋内采样体积达到气袋最大容积的 80% 左右时采样结束。采样管进气口应尽量保持在同一高度,采样管长度尽可能短。采样完成的样品于阴凉干燥处密封保存,并在采样当天送至实验室,于 24 h 内完成检测分析。根据《固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法》附录 A 中 VOCs 气体样品在 PVF 气袋中保存 24 h 后的回收率,本研究涉及的部分物种回收率如下:庚烷为 100%,丙烯为 97.0%,苯为 89.2%,丙烯腈为 82.3%。故 24 h 内样品分析得到的数据仍具有代表性。

所有样品在分析前,进行零空气空白分析,确保没有被测目标物驻留在分析系统。为确保数据准确性,仪器使用 PAMs 标准气体和 4 种特征污染物单一标准气体建立标准曲线,得到线性回归方程,相关系数为 0.998,测量精密度高;得到的标气质谱图与标准质谱库对比,进行峰坐标漂移校准。每个测试样品重复进样 5 次,结果取其平均值。

1.2 臭氧生成潜势计算

本研究中使用的臭氧生成潜势计算方法有 PEC 法和 MIR 法。

PEC 法计算公式如下:

$$c_{\text{PEC}} = c_{\text{VOCs}} \times \frac{K^{\text{OH}}(\text{VOCs})}{K^{\text{OH}}(\text{丙烯})} \quad (1)$$

式中, c_{PEC} 为等效丙烯浓度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), c_{VOCs} 为某一 VOCs 物种浓度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), $K^{\text{OH}}(\text{VOCs})$ 和 $K^{\text{OH}}(\text{丙烯})$ 为某一 VOCs 物种和丙烯与 OH 自由基反应的速率常数。

MIR 法计算公式如下:

$$c_{\text{OFP}} = \text{MIR} \times c_{\text{VOCs}} \quad (2)$$

式中, c_{OFP} 为臭氧生成潜势 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), c_{VOCs} 为某一 VOCs 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), MIR 为最大增量反应活性系数.

本研究涉及的 VOCs 物种的 K^{OH} 系数与 MIR 系数分别采用文献[15, 24]的研究结果.

1.3 熵值法筛选优先控制 VOCs 物种

熵值法是一种根据各指标信息载量的大小来确定指标权重的方法. 通过分析各指标之间的关联度及各项指标所提供的信息来决定指标权重, 在一定程度上避免了主观因素带来的偏差. 基于熵值法的控制臭氧生成 VOCs 优控物种筛选指标权重分析方法^[17]如下.

(1) 指标值无量纲化

各个企业有 n 个待筛选物种, 每个物种有 m 项筛选指标, 由于各指标的属性 and 量纲不同, 且计算过程可能会出现大数吃小数的现象, 需要对各指标数据进行无量纲化处理, 处理公式为:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

式中, i 为待筛选 VOCs 物种, $i \in (1 \sim n)$; j 为 VOCs 的某个指标, $j \in (1 \sim m)$; x_{ij} 为 i 种 VOC 物种的 j 评价指标的原始值, X_{ij} 为其归一化值, $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$ 为 j 指标的最大、最小值.

(2) 信息熵值 $H(X)_j$ 计算

根据 n 个 VOCs 物种的 m 个指标原始值无量纲化的数据, 建立初始评价矩阵: $A = (X_{ij})_{n \times m}$. 对矩阵 A 进行转化, 求出概率变量 p_{ij} , 并根据(5)式计算信息熵 $H(X)_j$:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (4)$$

$$H(X)_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

(3) 指标权重 w_j 与 VOCs 物种权重 w_i 计算

根据上面所得信息熵值, 通过(6)和(7)分别计算指标权重和 VOCs 物种权重.

$$w_j = \frac{1 - H(X)_j}{\sum_{j=1}^m [1 - H(X)_j]} \quad (6)$$

$$w_i = w_1 \times x_{i1} + \dots + w_m \times x_{im} \quad (7)$$

(4) VOCs 物种分级

通过以上计算过程分别计算 6 个企业的 VOCs

物种权重, 以 6 个企业各物种对应权重之和作为整个工业园区的 VOCs 物种权重, 并归一化便于对 VOCs 物种分级. 控制等级如表 1.

表 1 VOCs 控制分级表

等级	标准
一级控制污染物	0.75 ~ 1
二级控制污染物	0.5 ~ 0.75
三级控制污染物	0.25 ~ 0.5
四级控制污染物	0 ~ 0.25

2 结果与讨论

2.1 臭氧生成潜势计算结果分析

六个企业通过 PEC 法计算臭氧生成潜势的结果: 从大到小为 F 企业 > A 企业 > C 企业 > E 企业 > B 企业 > D 企业, 依次为 0.423 3、0.401 8、0.353 1、0.107 6、0.071 0、0.054 0 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 在 F 企业中, 对等效丙烯浓度贡献最大的物质是正辛烷及其同分异构体和正十一烷, 分别为 0.141 6 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 0.102 3 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 占总等效丙烯浓度的 48.84%. A 企业中正壬烷、正癸烷的贡献最大, 占比 44.49%. C 企业中戊烷、正十一烷、正壬烷的贡献较大, 占比 54.70%. B、D 和 E 企业贡献最大的物质均为正庚烷及其同分异构体, 分别占比 54.14%、47.57% 和 71.85%. 各企业 VOCs 组分对等效丙烯浓度贡献占比如图 1 所示, 烷烃类的占比远高于烯炔烃、芳香烃和醇类, 且 6 个企业贡献率最高的物质均为烷烃. 从 PEC 法看, 工业园区需要重视烷烃排放的环境影响.

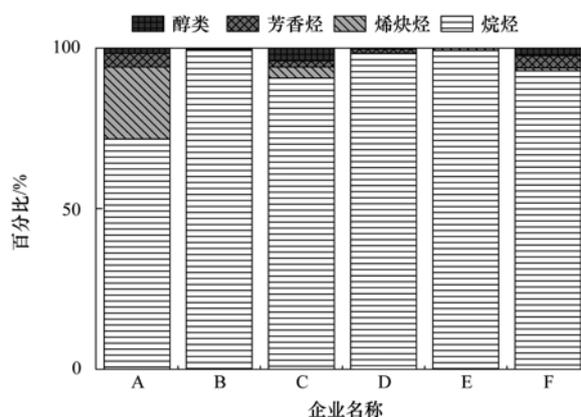


图 1 各企业 VOCs 组分等效丙烯浓度贡献占比

Fig. 1 Percentage of VOCs components with propylene-equivalent concentrations

当用 MIR 法计算时, 各企业从大到小依次为 C 企业 > F 企业 > A 企业 > E 企业 > B 企业 > D 企业, 值分别为 1.573 3、1.274 0、1.084 2、0.429 4、

0.237 8、0.193 2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 在 C 企业中,对臭氧生成贡献最大的是戊烷和甲醇,分别为 0.610 3 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 0.196 7 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,占总臭氧生成潜势的 51.29%. F 企业中正辛烷及其同分异构体、正己烷及其同分异构体、甲醇的贡献最大,占比 61.85%. A 企业中正壬烷、正辛烷及其同分异构体、环己烷及其同分异构体和甲醇的贡献较大,占比 46.25%. B、D 和 E 企业贡献最大的物质均为正庚烷及其同分异构体,分别占总的 78.19%、64.34% 和 87.17%. 各企业 VOCs 组分对臭氧生成潜势贡献占比如图 2 所示,总的来说,烷烃类的占比最高,醇类占比次之,对 A 企业臭氧生成影响较大的烯炔烃也不可忽视. 从 MIR 法看,工业园区除了需要重视烷烃排放,还要考虑烯炔烃和醇类对环境的影响.

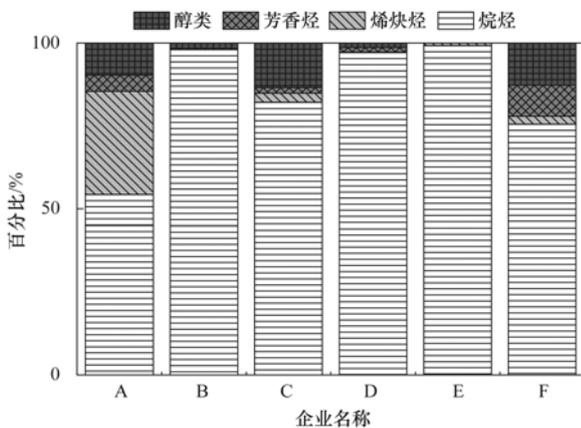


图2 各企业 VOCs 组分臭氧生成潜势贡献占比

Fig. 2 Percentage of VOCs components with ozone formation potentials

PEC 法和 MIR 法的计算结果虽不尽相同,但两种方法的结果都显示烷烃是这 6 个企业中臭氧生成影响最大的 VOCs 物种. 相比 PEC 法, MIR 法中醇类和烯炔烃的影响比重增加,这说明醇类和烯炔类物质对臭氧生成的影响更多体现在 OH 引发反应之后的后续反应.

2.2 计算结果与臭氧浓度比较

各个企业通过 MIR 法和 PEC 法计算得到的结果与实际臭氧浓度之间的对比如图 3.

图 3 可知, MIR 法比 PEC 法计算的 VOCs 的臭氧生成潜势高. 与臭氧浓度的对比结果显示 PEC 法更接近臭氧值, MIR 法则高出许多. PEC 法在一定程度上更接近一般大气环境实际反应结果,因此, PEC 法更适于本研究中对臭氧生成潜势的估算.

2.3 园区臭氧生成控制敏感性

臭氧生成与前体物(VOCs 和 NO_x)呈高度非线性

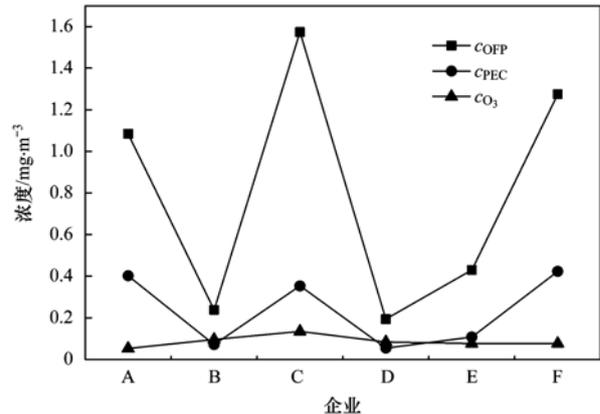


图3 臭氧生成潜势计算值与臭氧浓度对比

Fig. 3 Comparison of ozone concentrations and ozone formation potential

性关系^[25],确定某个地区大气臭氧生成是由 VOCs 控制还是 NO_x 控制对该地区制定污染控制措施十分重要. 有学者对南京、广州、北京、上海这 4 个城市地区进行了臭氧生成敏感性分析^[26-29],吕兆丰等^[30]研究了石化炼油厂工业园污染物排放对区域臭氧污染的影响,得出 VOCs 是部分城市地区和石化炼油工业园区臭氧生成的主控因素.

本研究中,采用 VOCs/ NO_x 比值法判断 VOCs 和 NO_x 对臭氧生成的影响,可定性分析大气臭氧浓度与 VOCs 和 NO_x 关系^[14,31]. VOCs/ NO_x 比值较小时,OH 自由基与 NO_x 的反应占主导地位,臭氧对 VOCs 浓度敏感, VOCs/ NO_x 比值较大时则对 NO_x 比较敏感. 在城市典型大气条件下,界定臭氧生成控制敏感性的比值约为 5.5^[14]. 6 个企业的 VOCs/ NO_x 比值如表 2.

表2 各企业 VOCs/ NO_x 比值

Table 2 VOCs/ NO_x ratios for each enterprise

企业	A	B	C	D	E	F
VOCs/ NO_x	5.37	0.98	8.52	0.89	2.69	11.30

该工业园区中, C、F 企业厂界处 VOCs/ NO_x 大于 5.5,说明这 2 个企业周边臭氧生成对 NO_x 更为敏感,控制 NO_x 浓度可获得较好的效果; A、B、D、E 企业的 VOCs/ NO_x 小于 5.5,说明这 4 个企业周边臭氧生成对 VOCs 更为敏感,控制 VOCs 浓度对减少臭氧生成有更好效果. 可见,该工业园区减少臭氧生成需要对 VOCs 和 NO_x 联防联控.

2.4 优先控制 VOCs 物种

以 PEC 法和 MIR 法作为园区优先控制物种的筛选指标,通过 1.3 节的熵值法计算筛选该工业园区控制臭氧生成时所需要优先控制的 VOCs 物种,

计算结果如图 4. 根据分级标准, 一级控制物种有正庚烷及其同分异构体、正壬烷, 二级控制污染物为正辛烷及其同分异构体, 三级控制污染物为正十

一烷、戊烷、正癸烷、甲醇, 其余物质为四级控制污染物. 前三级控制物种共有 7 种, 占总权重的 73.98%, 故将这些物质作为优先控制 VOCs 物种.

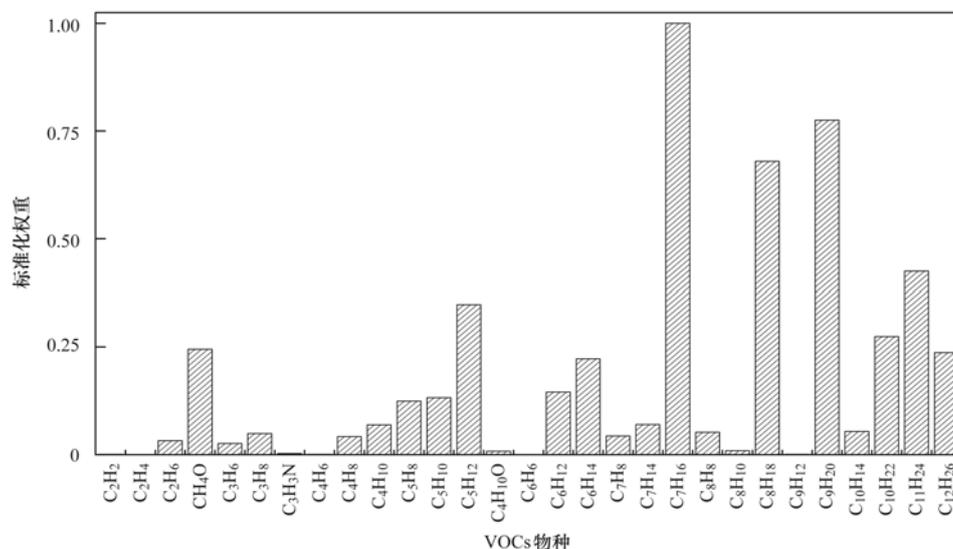


图 4 园区各 VOCs 物种的标准化权重

Fig. 4 Standardized weights of each VOCs in the industrial park

该工业园区臭氧生成贡献烷烃类 (82.56%) > 烯炔烃类 (9.27%) > 醇类 (4.99%) > 芳香烃类 (3.72%) > 其他 (0.04%). 优先控制的 7 种物质有 6 种属于烷烃类, 贡献率可达 69.15%; 作为三级控制污染物的甲醇贡献率为 4.83%. 基于熵值法的优控污染物筛选结果和 PEC 法与 MIR 法分析结果相近, 优控污染物筛选更有助于工业园区整体的 VOCs 控制管理. 因此, 要减少该工业园区臭氧生成, 需重点控制烷烃类排放. 同时, 甲醇也是不可忽略的因素.

3 结论

(1) 通过 PEC 法估算臭氧生成潜势, F 企业最高为 $0.4233 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, D 企业最低为 $0.0540 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 通过 MIR 法估算臭氧生成潜势, C 企业最高为 $1.5733 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, D 企业最低为 $0.1932 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 园区需重视烷烃、烯炔烃和醇类的排放.

(2) 6 个企业通过 PEC 法得到的结果更接近臭氧值, 更适用于本研究对臭氧生成的估算.

(3) 通过 VOCs/NO_x 比值法分析臭氧生成控制敏感性, 结果表明该工业园区控制臭氧生成需同时控制 VOCs 和 NO_x.

(4) 园区内 VOCs 物种臭氧生成贡献烷烃类 > 烯炔烃类 > 醇类 > 芳香烃类. 该工业园区若要减少臭氧生成需要优先控制的 VOCs 物种为: 正庚烷及

其同分异构体、正壬烷、正辛烷及其同分异构体、正十一烷、戊烷、正癸烷、甲醇.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/>, 2017-06-05.
- [2] Bell M L, Goldberg R, Hogrefe C, *et al.* Climate change, ambient ozone, and health in 50 US cities[J]. *Climatic Change*, 2007, **82**(1-2): 61-76.
- [3] Mudway I S, Kelly F J. Ozone and the lung: a sensitive issue [J]. *Molecular Aspects of Medicine*, 2000, **21**(1-2): 1-48.
- [4] 段玉森, 张懿华, 王东方, 等. 我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, **23**(S1): 34-39.
Duan Y S, Zhang Y H, Wang D F, *et al.* Spatial-temporal patterns analysis of ozone pollution in several cities of China[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, **23**(S1): 34-39.
- [5] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 512-518.
- [6] Alvim D S, Gatti L V, Corrêa S M, *et al.* Main ozone-forming VOCs in the city of Sao Paulo: observations, modelling and impacts[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, **10**(4): 421-435.
- [7] 邹宇. 广州大气挥发性有机物对 EKMA 曲线特征影响的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2013.
- [8] Chameides W L, Fehsenfeld F, Rodgers M O, *et al.* Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, **97**(D5): 6037-6055.

- [9] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 10-16.
Wu F K, Wang Y S, An J L, *et al.* Study on concentration, ozone production potential and sources of VOCs in the atmosphere of Beijing during Olympics period[J]. Environmental Science, 2010, **31**(1): 10-16.
- [10] 马永亮, 谭吉华, 贺克斌, 等. 佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3549-3554.
Ma Y L, Tan J H, He K B, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds during haze episode in Foshan city [J]. Environmental Science, 2011, **32**(12): 3549-3554.
- [11] 卢学强, 韩萌, 冉靓, 等. 天津中心城区夏季非甲烷有机化合物组成特征及其臭氧产生潜力分析[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(2): 373-380.
Lu X Q, Han M, Ran L, *et al.* Characteristics of nonmethane organic compounds and their ozone formation potentials in downtown Tianjin in summer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(2): 373-380.
- [12] 贾记红, 黄成, 陈长虹, 等. 炼焦过程挥发性有机物排放特征及其大气化学反应活性[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(5): 905-912.
Jia J H, Huang C, Chen C H, *et al.* Emission characterization and ambient chemical reactivity of volatile organic compounds (VOCs) from coking processes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(5): 905-912.
- [13] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) measured in Shanghai, China[J]. Sensors, 2010, **10**(8): 7843-7862.
- [14] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. Air & Waste, 1994, **44**(7): 881-899.
- [16] 邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 等. 生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1783-1791.
Shao Z Z, Zheng G D, Wang Y G, *et al.* Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs from a municipal solid waste composting Plant [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1783-1791.
- [17] 丁敬磊, 刘光远. 基于熵值法的农户耕地流转影响因素指标权重分析——以山东菏泽为例[J]. 广东农业科学, 2013, **40**(17): 204-207, 223.
Ding J L, Liu G Y. The weighted analysis of farmers cultivated land transfer actors based on entropy—a case study of Heze[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, **40**(17): 204-207, 223.
- [18] HJ/T 397-2007, 固定源废气监测技术规范[S].
- [19] HJ/T 55-2000, 大气污染物无组织排放监测技术导则[S].
- [20] Blake R S, Whyte C, Hughes C O, *et al.* Demonstration of proton-transfer reaction time-of-flight mass spectrometry for real-time analysis of trace volatile organic compounds[J]. Analytical Chemistry, 2004, **76**(13): 3841-3845.
- [21] Filella I, Peñuelas J. Daily, weekly and seasonal relationships among VOCs, NO_x and O₃ in a semi-urban area near Barcelona [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2006, **54**(2): 189-201.
- [22] Forkel R, Klemm O, Graus M, *et al.* Trace gas exchange and gas phase chemistry in a Norway spruce forest: a study with a coupled 1-dimensional canopy atmospheric chemistry emission model[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(S1): 28-42.
- [23] 詹雪芳, 段忆翔. 质子转移反应质谱用于痕量挥发性有机化合物的在线分析[J]. 分析化学, 2011, **39**(10): 1611-1618.
Zhan X F, Duan Y X. Proton transfer reaction-mass spectrometry for on-line analysis of trace volatile organic compounds [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2011, **39**(10): 1611-1618.
- [24] Carter W L P. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism and updated ozone reactivity scales[R]. California: University of California, 2010.
- [25] 邢佳. 大气污染排放与环境效应的非线性响应关系研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [26] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 443-451.
- [27] 王宇骏, 黄新雨, 裴成磊, 等. 广州市近地面臭氧时空变化及其生成对前体物的敏感性初步分析[J]. 安全与环境工程, 2016, **23**(3): 83-88.
Wang Y J, Huang X Y, Pei C L, *et al.* Spatial-temporal variations of ground-level ozone and preliminary analysis on the sensitivity of ozone formation to precursors in Guangzhou city[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, **23**(3): 83-88.
- [28] 安俊琳, 王跃思, 孙扬. 非甲烷挥发性有机物(NMHCs)对北京大气臭氧产生的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1318-1324.
An J L, Wang Y S, Sun Y. Effects of nonmethane hydrocarbons on ozone formation in Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(4): 1318-1324.
- [29] Tie X, Geng F, Guenther A, *et al.* Megacity impacts on regional ozone formation: observations and WRF-Chem modeling for the MIRAGE-Shanghai field campaign [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(11): 5655-5669.
- [30] 吕兆丰, 魏巍, 程水源, 等. 北京石化炼油厂工业区臭氧污染特征及成因分析 [J]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201402-626>, 2014-02-28.
Lv Z F, Wei W, Cheng S Y, *et al.* The characteristics and formation analysis of ozone pollution in a industrial area of Beijing petroleum refinery [EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201402-626>, 2014-02-28.
- [31] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(12): 1821-1845.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing .....	..... HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province .....	..... YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors .....	..... JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing .....	..... YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China .....	..... WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis .....	..... LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China .....	..... LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter .....	..... ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils .....	..... LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)