

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>空间分布特征 .....姚青,丁净,杨旭,蔡子颖,韩素芹 (2487)

基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析 .....周红,王鸣,柴文轩,赵昕 (2497)

基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测 .....杨晓彤,康平,王安怡,臧增亮,刘浪 (2507)

海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估 .....符传博,林建兴,唐家翔,丹利 (2516)

京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估 .....高冉,李琴,车飞,张艳平,祖永刚,刘芬 (2525)

2022年北京市城区PM<sub>2.5</sub>水溶性离子含量及其变化特征 .....陈圆圆,崔迪,赵泽熙,常森,景宽,沈秀娥,刘保献 (2537)

郑州市冬春季PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染特征、来源及健康风险评估 .....陶杰,闫慧姣,徐艺斐,荆海涛 (2548)

淄博市供暖前后PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险 .....孙港立,吴丽萍,徐勃,高玉宗,赵雪艳,姬亚芹,杨文 (2558)

西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析 .....李萌津,张勇,张倩,田杰,李丽,刘卉昆,冉伟康,王启元 (2571)

天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析 .....卢苗苗,韩素芹,刘可欣,唐晓,孔磊,丁净,樊文雁,王自发 (2581)

基于空间尺度效应的山东省PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化及空间分异地理探测 .....徐勇,韦梦新,邹滨,郭振东,李沈鑫 (2596)

我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势 .....武婷,崔焱文,肖成德,翟增秀,韩萌 (2613)

廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析 .....张敬巧,刘铮,丁文文,朱瑶,曹婷,凌德印,王淑兰,王宏亮 (2622)

景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析 .....王玉仓,杜晶晶,张禹,吴昊,胡敏韵,陈丁江 (2631)

白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源 .....孟佳靖,婁红,陈哲,周石磊,底怡玲,武辰彬,王晨光,张家丰,崔建升 (2640)

北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析 .....胡昱欣,周瑞静,宋炜,杨全合,王鑫茹 (2651)

庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价 .....刘海,魏伟,宋阳,徐洁,管政亭,黄健敏,赵国红 (2665)

农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价 .....王蔚青,徐雄,刘权震,林利华,吕婧,王东红 (2678)

黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征 .....韦程宸,魏枫沂,夏慧,黄魁 (2686)

基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析 .....金晓龙,邓学良,戴睿,徐倩倩,吴月,范裕祥 (2694)

再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征 .....贺赞,李雪梅,李宏权,魏琳琳,姜春晖,姜大伟,李魁晚 (2707)

水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响 .....梅渝,黄平,王鹏,朱凯 (2715)

银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系 .....蒙俊杰,刘双羽,邱小琼,周瑞娟 (2727)

热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析 .....张含,张涵,王佳伟,高金华,文洋,李相昆,任征然 (2741)

市政污水中吗啡来源辨析 .....邵雪婷,赵悦彤,蒋冰,裴伟,李彦莹,谭冬芹,王德高 (2748)

溱沔河流域生态环境动态遥感评价 .....李艳翠,袁金国,刘博涵,郭豪 (2757)

黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素 .....王奕洪,洪学莹 (2767)

基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例 .....蔡进,危小建,江平,梁玉琦 (2780)

贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因 .....李月,冯霞,吴路华,罗光杰,罗红芬 (2793)

2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子 .....周怡婷,严俊霞,刘菊,王璞 (2806)

基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量 .....崔霞,董燕,张露尹,王荣耀 (2817)

京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响 .....武爱彬,陈辅国,赵艳霞,秦彦杰,刘欣,郭小平 (2828)

西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响 .....江可,贾亚男,杨琰,陈坚淇,禹朴家 (2840)

不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析 .....黄世威,赵一锴,朱馨雨,刘贺雷,刘姣姣,陈稍,陈佳永,张阿凤 (2848)

基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测 .....胡志瑞,赵万伏,宋根先,王芳,林妍敏 (2859)

不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响 .....孙凯,崔玉涛,李顺晋,魏冰丽,王媛,杨宏博,王孝忠,张伟 (2871)

集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性 .....周连昊,曾全超,梅唐英泽,汪明霞,谭文峰 (2881)

控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响 .....高玮,王学霞,谢建治,陈延华,倪小会,王甲辰,董艳芳,李子双,曹兵 (2891)

生物炭对黄绵土中NO<sub>3</sub>-N运移过程影响及模拟 .....白一茹,刘旭,张钰涵,张睿媛,马艳,王幼奇 (2905)

中国农田土壤重金属污染分析与评价 .....杨雳,白宗旭,薄文浩,林静,杨佩佳,陈涛 (2913)

城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望 .....王晓雨,刘恩峰,杨祥梦,王碧莲,林锦阔,颜梦霞,毕世杰 (2926)

场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展 .....陈玥如,高文艳,陈虹任,薛生国,吴川 (2939)

黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析 .....戴文婷,张晖,吴霞,钟鸣,段桂兰,董霖红,张培培,樊洪明 (2952)

拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价 .....韩双宝,袁磊,张秋霞,郑焰,李甫成 (2962)

银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析 .....于路加,马海军,王翠平 (2971)

基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估 .....陈莲,邹子航,张培珍,王雨菡,王振江,林森,唐翠明,罗国庆,钟建武,李智毅,王圆 (2983)

西南典型碳酸盐岩高地地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型 .....唐瑞玲,徐进力,刘彬,杜雪苗,顾雪,于林松,毕婧 (2995)

贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划 .....韦美溜,周浪,黄燕玲,庞瑞,王佛鹏,宋波 (3005)

柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应 .....刘梦宇,罗绪锋,辜娇峰,易轩韬,周航,曾鹏,廖柏寒 (3016)

改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响 .....肖乃川,王子芳,杨文娜,谢永红,代文才,高明 (3027)

生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响 .....郑晨格,裴欢欢,张亚珊,李嘉欣,刘奋武,乔星星,秦俊梅 (3037)

基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应 .....姜继韶,侯睿,崔慧林,闫广轩,刘栋 (3047)

微塑料对土壤N<sub>2</sub>O排放及氮素转化的影响研究进展 .....刘一戈,杨安琪,陈舒欣,牛奕奕,卢瑛,李博 (3059)

土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响 .....戴柳云,侯磊,王化,符立松,王艳霞,李晓琳,王万宾,梁启斌 (3069)

养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征 .....宋可心,贺金成,李昌文,解思琦,刘宝莹,黄伟,冯志华 (3078)

聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响 .....王志超,李哲,李嘉辰,屈忠义,胡文煊,李卫平 (3088)

鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测 .....俞锦丽,赵俊凯,罗思琦,景文慧,杨启武,刘淑丽 (3098)

粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径 .....徐艺诺,翁大维,王硕,胡喜生,王占永,张园园,张兰怡 (3107)

电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析 .....徐圆圆,龚德鸿,黄正光,杨浪 (3119)

# 我国典型化工行业 VOCs 排放特征及其对臭氧生成潜势

武婷<sup>1</sup>, 崔焕文<sup>1,2</sup>, 肖咸德<sup>1,2</sup>, 翟增秀<sup>1,2</sup>, 韩萌<sup>1</sup>

(1. 天津市生态环境科学研究院, 国家环境保护恶臭污染控制重点实验室, 天津 300191; 2. 天津迪兰奥特环保科技有限公司, 天津 300191)

**摘要:** 选取了我国 5 种典型化工行业 VOCs 排放源进行了源排放特征分析, 通过对 70 个 VOCs 源样品的分析, 结果表明, 烷烃是合成材料制造业、石化行业和涂料产品制造业的主导 VOCs 种类(占比分别为 43%、63% 和 68%), 烯烃是日用化学产品制造业的 VOCs 主要种类(46%), 卤代烃在专用化学品制造业排放中占主导(43%); 利用机器学习方法分析了上述行业的标志组分, 发现癸烷和四氢呋喃是合成材料制造业源的特征标志组分, 正丁醇和甲苯是日用化学产品制造业源的特征标志组分, 1,2,3-三甲苯和 1,3,5-三甲苯是石化行业源的特征标志组分, 丙烯和 3-甲基戊烷是涂料产品制造业的标志组分, 对二甲苯和异丙苯是专用化学品制造业源的特征标志组分; 并采用最大增量反应活性法(MIR)估算了各 VOCs 排放源的臭氧生成潜势(OFP), 结果表明, 在单位浓度总 VOCs 排放条件下, 对臭氧生成潜势的贡献大小依次为日用化学产品制造业、专用化学品制造业、石化行业、合成材料制造业和涂料产品制造业. 建议在今后的臭氧防控中, 更应关注各行业所排放的关键活性物种, 而不仅仅注重 VOCs 排放总量.

**关键词:** 挥发性有机物(VOCs); 机器学习; 臭氧(O<sub>3</sub>); 臭氧生成潜势(OFP); 化工行业

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2613-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304110

## Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China

WU Ting<sup>1</sup>, CUI Huan-wen<sup>1,2</sup>, XIAO Xian-de<sup>1,2</sup>, ZHAI Zeng-xiu<sup>1,2</sup>, HAN Meng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory on Odor Pollution Control, Tianjin Academy of Eco-Environmental Sciences, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Sinodor Environmental Science and Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300191, China)

**Abstract:** This study selected five typical types of chemical industry volatile organic compounds (VOCs) emission characteristics in China for analysis. The results from 70 source samples showed that alkanes were the dominant VOCs category from synthetic material industry sources, petrochemical industry sources, and coating industry sources (accounting for 43%, 63%, and 68%, respectively); olefins were the main VOCs category from the daily supplies chemical industry (46%); and halogenated hydrocarbons were the dominate VOCs category from specialty chemicals industry account source emissions (43%). Additionally, the machine learning method was applied in this study to analyze the marker components of the above industries. The results showed that decane and tetrahydrofuran were the source markers of the synthetic material industry; n-butanol and toluene were the markers of the daily supplies industry source; 1,2,3-trimethylbenzene and 1,3,5-trimethylbenzene were the markers of the petrochemical industry source; propylene and 3-methyl pentane were the source markers of the coating industry; and P-Xylene and cumene were the markers of the specialty chemicals industry source. The maximum incremental reactivity method (MIR) was used to estimate the ozone formation potential (OFP) of different VOCs-sources. The calculation results showed that when considering per unit TVOCs concentration emissions, the contribution to the ozone generation potential was in the order of the daily supplies chemical industry, specialty chemical industry, petrochemical industry, synthetic material industry, and coating industry. Therefore, we suggest that more attention should be paid to the key active species emitted by various industry sources rather than only the total amount of VOCs emissions in future ozone prevention and control efforts.

**Key words:** volatile organic compounds(VOCs); machine learning; ozone(O<sub>3</sub>); ozone formation potential (OFP); chemical industry sources

随着我国生态环境保护工作的推进, 我国环境空气质量逐步改善<sup>[1]</sup>, 但臭氧(O<sub>3</sub>)污染问题在部分地区仍然突出<sup>[2-8]</sup>, 大气污染防治工作已从之前以细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)控制为主转变为 PM<sub>2.5</sub>与臭氧(O<sub>3</sub>)协同控制新阶段<sup>[9-12]</sup>. 当前臭氧已成为影响空气质量达标的重要污染物之一<sup>[13-16]</sup>, 也是我国“十四五”时期生态环境保护重点防治的污染物<sup>[17,18]</sup>. 挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是重要的臭氧前体物<sup>[19-25]</sup>, 是控制臭氧污染的关键要素. 大气中 VOCs 来源复杂, 主要有工业源、生活源、机动车源和自然源等<sup>[26-30]</sup>. 不同 VOCs 排放源会排放不同类型

的 VOCs 物种, 进而对臭氧的形成具有不同程度的影响效应<sup>[31-35]</sup>. 因此, 对臭氧前体物 VOCs 进行科学管控, 需要了解其污染源的排放特征. 目前国内 VOCs 的研究主要针对城市环境空气中 VOCs 的观测开展<sup>[36-40]</sup>, 对不同行业 and 不同源类排放 VOCs 特征组分的研究也有一些相关研究<sup>[41-44]</sup>; 但由于我国工业行业众多, 所报道的污染源 VOCs 排放数据对支

收稿日期: 2023-04-13; 修订日期: 2023-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177082)

作者简介: 武婷(1982~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 VOCs 污染与防治, E-mail: nkwtung@126.com

撑 VOCs 溯源研究及环境管理的需求仍显不足。

在众多的排放源中, 化工行业排放是 VOCs 的重要来源之一<sup>[45-48]</sup>, 且由于化工行业类型繁多, 不同化工行业由于其生产工艺、能源结构的不同, 所排放的 VOCs 种类、组分也具有非常明显的差异。周子航等<sup>[49]</sup>对成都市工业挥发性有机物进行了研究, 结果表明石化行业的 VOCs 排放种类以烷烃、烯烃、芳香烃和 OVOCs 等为主; 何梦林等<sup>[50]</sup>对珠三角某化工园区的 VOCs 排放分析表明, 该园区的 VOCs 排放主要以烷烃为主, 其次是苯系物和 OVOCs; 鲁君等<sup>[45]</sup>的研究表明, 我国长三角地区典型化工行业的有害 VOCs 排放量中二氯甲烷和苯的占比较高。尽管关于化工行业 VOCs 已有所研究, 但是关于化工行业 VOCs 排放特征物种报道仍较少。因此, 非常有必要针对我国典型化工行业开展 VOCs 特征组分研究, 并识别其特征组分、构建 VOCs 化学成分谱; 并进一步评估不同行业所排放 VOCs 对臭氧的生成潜势。研究结果可以为我国化工行业的溯源、评估其对臭氧形成的影响效应提供关键的科学信息, 对我国臭氧的防控具有重要的研究和管理意义。

基于此, 本文选取了我国典型化工行业进行研究, 主要包括合成材料制造业、日用化学产品制造业、石化行业、涂料产品制造业和专用化学品制造业等 5 类化工行业; 利用机器学习方法等分析了上述典型化工行业的 VOCs 排放特征, 揭示了不同行业的 VOCs 标志组分; 并进一步量化了不同行业对臭氧的生成潜势; 以期为我国化工行业 VOCs 的溯源以及对臭氧的防控提供关键的科学数据和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

本研究在天津、珠海、石家庄和宿州等城市选择典型化工企业进行样品采集, 所涉及的 VOCs 行业主要包括: 石化行业、合成材料制造业、日用化学产品制造业、涂料产品制造业和专用化学品制造业等 5 个典型 VOCs 化工行业, 共 17 家企业, 具体涵盖的行业子类型和企业数如表 1 所示。

### 1.2 样品采集与分析方法

考虑到样品的代表性, 本研究分别选择了上述 5 个典型化工行业的 17 家化工企业的有组织排放采样点, 在企业内工艺流程中的有组织源排气筒或排气筒下部预留检测口, 设置了 35 个采样点, 按照《固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法》(HJ 732-2014), 样品采集使用气袋采样法, 在每个采样点位进行 1 次采样, 每次每点采集 2 个气体样品, 共采集了 70 个样品, 样品采集清单如表 2 所示。

表 1 化工行业企业类型

Table 1 Types of chemicals industry sources

行业类型	企业数量	企业名称	子行业类型或主要产品
合成材料制造业	3	A	初级形态塑料及合成树脂制造
		B	聚酯纤维和树脂等
		C	初级形态塑料及合成树脂制造
日用化学产品制造业	1	D	肥皂及洗涤剂制造
		E	汽柴油及化学产品
石化行业	4	F	润滑油等
		G	液化石油气及化学产品
		H	基础油和润滑油等
		I	水性涂料制造
涂料产品制造业	2	J	涂料制造
		K	化学试剂和助剂制造
专用化学品制造业	7	L	其他专用化学产品制造
		M	化学试剂和助剂制造
		N	化学试剂和助剂制造
		O	化学试剂和助剂制造
		P	专项化学用品制造
		Q	专项化学用品制造

样品分析采用三级冷阱预浓缩-气相色谱质谱法。样品预处理采用三级冷阱预浓缩系统 Entech 7100(美国 Entech 公司)<sup>[51]</sup>。一级、二级和三级捕集阱温度分别设置为 -150、-20 和 -180℃; 烘烤温度分别设置为 130、150 和 150℃; 烘烤时间分别设置为 5、35 和 2 min。一级捕集阱预热和分析温度设置为 20℃, 三级捕集阱进样时间设置为 3 min。

本样品分析仪使用的型号为 Agilent 7890A-5975C 的 GC/MS。色谱柱: DB-5MS(60 m × 0.32 mm × 1.0 μm); 高纯氦气载气, 载气流速 1.5 mL·min<sup>-1</sup>;

表 2 污染源样品采集清单

Table 2 Description of the sampling sources

序号	企业名称	采样点位
1	A	车间工艺排口和废水站
2	B	车间工艺排口、焚烧炉废气排口和废水站
3	C	车间工艺排口和废水站
4	D	车间工艺排口
5	E	锅炉排口和废水站
6	F	车间排口和废水站
7	G	加热炉废气排口
8	H	导热炉废气排口
9	I	前端排口和后端排口
10	J	车间工艺排口和焚烧炉排口
11	K	装置区排口
12	L	车间工艺排口
13	M	车间工艺排口和回收车间排口
14	N	废水站
15	O	车间工艺排口
16	P	车间工艺排口和锅炉废气排口
17	Q	车间工艺排口

升温程序: 初始温度 35°C, 保持 5min, 以 5°C·min<sup>-1</sup> 的速率升温至 150°C, 再以 15°C·min<sup>-1</sup> 的速率升温至 220°C, 保持 7 min; 进样口、离子源和四极杆的温度分别为 100、230 和 280°C; 扫描范围 15~300 u; 扫描周期为 0.2 s; 检测方式: SCAN 与 SIM 结合. 通过保留时间和谱库中标准质谱图检索来进行样品定性, 使用内标法来进行样品定量, 无法定量的污染物按甲苯校正因子计算浓度.

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, 本研究使用的采样袋在使用前均用高纯氮气清洗 3 次, 每次采样前用样品气体将采样袋清洗, 以减少本底的干扰. 在样品分析前, 进行仪器空白试验, 空白试验的质量浓度均低于方法测定下限<sup>[52,53]</sup>, 确保分析系统无污染; 样品均在 24 h 内分析完毕. 为保证定性和定量数据的准确性, 在分析样品前对仪器运行状态进行检查, 符合分析要求时才进行测样.

### 1.3 各类行业化学组分计算方法

不同采样点位化学组分结合为各类行业综合化学组分的具体计算方法见公式(1):

$$\rho_{ij} = \frac{\sum \rho_{ik}}{n} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{ij}$  表示第  $j$  个行业的第  $i$  个 VOCs 化学组分浓度;  $\rho_{ik}$  表示第  $k$  个源第  $i$  个 VOCs 组分的浓度, 单位为  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $n$  表示第  $j$  个行业的源的数量.

### 1.4 随机森林模型

为揭示不同化工企业 VOCs 的特征组分, 本研究利用机器学习等方法进行分析, 采用了随机森林模型. 随机森林是常用的机器学习模型, 由 Breiman<sup>[54]</sup> 在 2001 年提出. 随机森林利用多棵决策树对样本进行训练并进行测试. 首先基于自助重采样方法, 每次由放回地从训练数据集中取出一定量的数据组成新的数据集, 其次构建一棵决策树, 最后经过多次取样后, 形成多棵决策树(随机森林). 考虑到样品量有限, 为了防止模型过拟合, 采用交叉验证的方式训练模型, 通过对随机森林中每棵决策树剪枝, 调整决策树的深度和特征数量, 优化模型的结构, 得到最优结果. 本研究按照 5 种 VOCs 行业类型进行分类, 计算不同行业中, 各 VOCs 物种对其重要性, 进而揭示不同行业的重要 VOCs 特征标志物种.

### 1.5 臭氧形成潜势(OFP)

为了探究不同化工行业排放 VOCs 对臭氧形成的影响效应, 本研究采取臭氧形成潜势(ozone formation potential, OFP)的方法计算各行业排放 VOCs 对臭氧的总生成潜势. OFP 为某 VOCs 化合物

环境浓度与该 VOCs 的最大反应增量系数(maximum incremental reactivity, MIR)的乘积, 计算公式为:

$$\text{OFP}_{ij} = \text{MIR}_i \times [\text{VOCs}]_{ij} \quad (2)$$

式中,  $\text{OFP}_{ij}$  表示计算得到的第  $j$  个源排放的第  $i$  个 VOCs 组分的臭氧生成潜势;  $[\text{VOCs}]_{ij}$  表示第  $j$  个行业排放的第  $i$  个 VOCs 物种的质量浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\text{MIR}_i$  表示该 VOCs 在  $\text{O}_3$  最大增量反应中的  $\text{O}_3$  形成系数(无量纲), 本研究采用 Carter 等<sup>[55-57]</sup> 研究的 MIR 系数. 而各行业对臭氧的总生成潜势如下:

$$\text{OFP}_j = \sum \text{OFP}_{ij} \quad (3)$$

式中  $\text{OFP}_j$  表示最终计算得到的第  $j$  种行业所排放 VOCs 的总生成潜势.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同行业 VOCs 种类排放特征

本研究测量了我国典型合成材料制造行业、日用化学产品制造业、石化行业、涂料产品制造业和专用化学品制造行业等 5 个行业样品中 VOCs 排放特征. 对于每一个样品, 本研究共分析了 203 种 VOCs 物种(本研究将 203 种 VOCs 之和称为总 VOCs), 其种类主要包括烷烃、烯烃、卤代烃、芳香烃和挥发性含氧有机物(OVOCs)等, 如图 1 所示. 总体而言, 在所分析的行业中, VOCs 的丰量组分为卤代烃, 其在所有行业占总 VOCs 的 29.9%; 其他依次分别为: 含氮化合物(24.5%)、烷烃(20.1%)、OVOCs(10.6%)、芳香烃(9.2%)和含硫化合物(3.4%); 而烯烃的含量则相对较低, 为 2.2%.

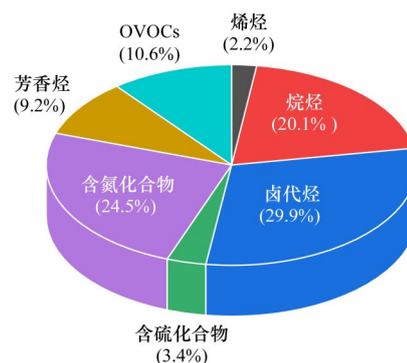


图 1 不同种类 VOCs 组分占比

Fig. 1 Percentage of VOCs categories

本研究进一步分析了各行业 VOCs 种类的排放特征, 如图 2 所示. 对于合成材料制造业, 烷烃的含量占总 VOCs 最高, 为 43%, 其次为 OVOCs(31%)和芳香烃(21%), 烯烃、卤代烃和含硫化合物含量较少; 日用化学产品制造业的 VOCs 排放中主要组分为烯烃, 含量为 46%, 其次为芳香烃(23%)和 OVOCs(23%), 另外还有少量的卤代烃、烷烃、含

硫化物；对于石化行业而言，烷烃的含量最高，为63%；其次为含硫化物(21%)和芳香烃(11%)，其余为OVOCs、烯烃和卤代烃；而涂料产品制造业的VOCs排放中，烷烃的含量最高，达到68%；其次为芳香烃，含量为28%，卤代烃、OVOCs、含硫化物和烯烃含量较少；专用化学品制造业的VOCs丰量组分为卤代烃，含量为43%，其次为含氮化合物(35%)，其余为OVOCs、芳香烃、烷烃、烯烃和含硫化物。

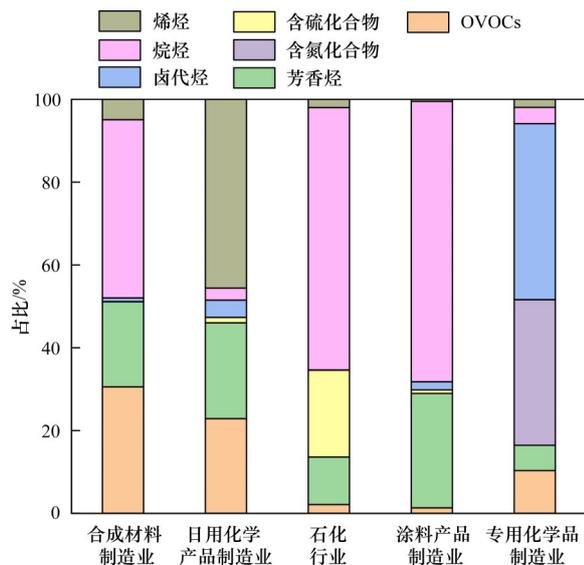


图2 不同行业排放VOCs种类含量

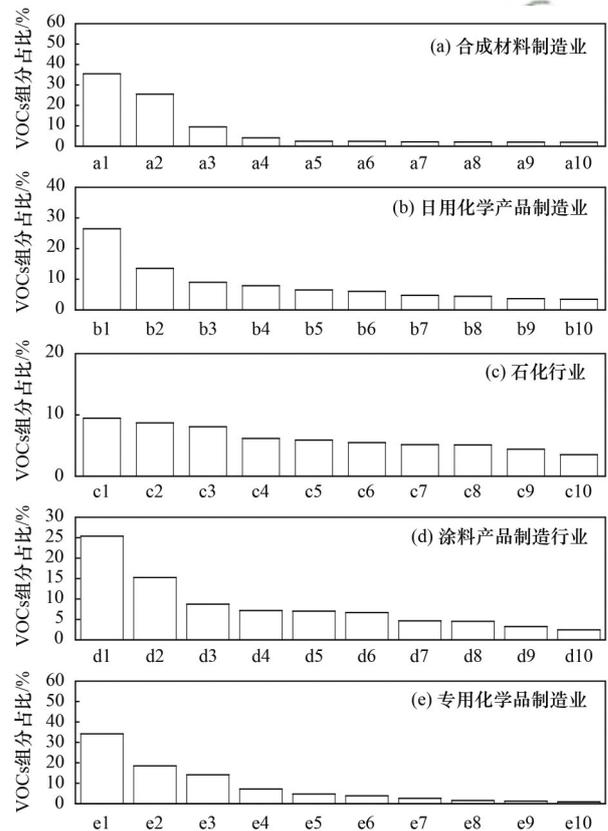
Fig. 2 Percentage of VOCs categories for different industry sources

## 2.2 不同行业VOCs特征组分分析

上述结果表明，不同化工行业排放的VOCs种类各异，因此，本研究进一步揭示不同行业VOCs物种及特征组分。图3总结了本研究采集的不同行业主要的VOCs组分占比，结果表明，对于合成材料制造业，癸烷、四氢呋喃是其丰量组分，占比分别达到35%和25%。癸烷可作为有机溶剂，用于有机合成，这也与张雪驰等<sup>[58]</sup>在珠三角某石化园区的研究结果相似；四氢呋喃作为有机合成中间体，可用于合成纤维、树脂和橡胶等，而通过对采样企业的调查发现企业A成品车间工艺副产物为四氢呋喃。对于日用化学产品制造业，本研究发现柠檬烯和 $\alpha$ -蒎烯是其丰量组分，在总VOCs中占比可达到26%和14%。柠檬烯可作为香气释放有效物质，应用于洗衣留香剂等日化用品<sup>[59]</sup>，而 $\alpha$ -蒎烯是合成香料的重要原料，可用于日化品以及其他工业品的加香<sup>[60]</sup>。对于石化行业，2-甲基丁烷和甲硫醇的占比较高(9.5%，8.7%)。异戊烷一般由石油裂解产物分离获得，是石化行业的产品之一，这与Shen等<sup>[61]</sup>针对武汉某石化企业的研究结果一致；本研究采样点位包

括了污水站排口，石化行业废水生物处理设施有较多的甲硫醇等生物降解产物<sup>[62,63]</sup>。对于涂料产品制造业，其排放的三甲基戊烷和苯占总VOCs的含量最高，为25%和15%。有研究显示<sup>[64]</sup>，在工业生产中，三甲基戊烷通常用于有机溶剂，苯系物在溶剂使用(如油漆、涂料)过程中排放比例较大，因此本研究中这两种组分的含量较高是合理的。而对于专用化学品制造业，三甲胺和氯仿含量较高，分别占总VOCs排放的34%和19%。本研究中三甲胺和氯仿的主要贡献来源于企业Q，该企业的主要原料为氨气和氯乙酸，因此推断三甲胺和氯仿应为工艺反应产生。

除计算了各行业的丰量组分外，本研究基于随机森林分类模型，进一步探究了不同行业VOCs物种的特征。通过随机森林分析，图4分别展示了不同

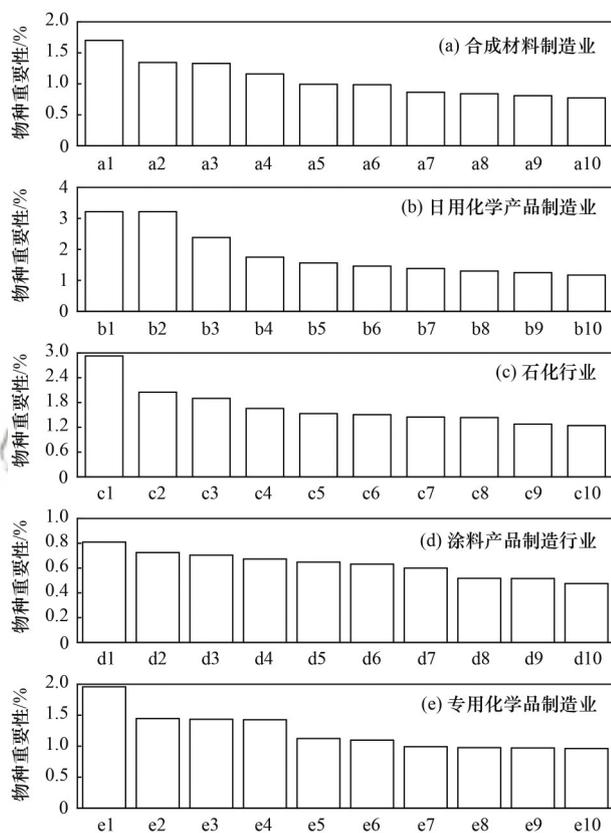


a1. 癸烷, a2. 四氢呋喃, a3. 苯乙烯, a4. 苯, a5. 邻-二甲苯, a6. 十二烷, a7. 甲苯, a8. 1,3-丁二烯, a9. 丙烯, a10. 丙酮; b1. 柠檬烯, b2.  $\alpha$ -蒎烯, b3. 对-二甲苯, b4. 乙酸乙酯, b5. 乙酸甲酯, b6. 甲苯, b7.  $\beta$ -蒎烯, b8. 四氢呋喃, b9. 邻-二甲苯, b10. 乙苯; c1. 2-甲基丁烷, c2. 甲硫醇, c3. 3-甲基己烷, c4. 乙硫醇, c5. 甲基环己烷, c6. 3-甲基戊烷, c7. 2,3-二甲基戊烷, c8. 壬烷, c9. 乙硫醚, c10. 甲苯; d1. 3-甲基戊烷, d2. 苯, d3. 2-甲基戊烷, d4. 甲基环戊烷, d5. 2-甲基己烷, d6. 3-甲基己烷, d7. 正己烷, d8. 2,3-二甲基戊烷, d9. 2,2-二甲基丁烷, d10. 甲基环己烷; e1. 三甲胺, e2. 氯仿, e3. 四氯化碳, e4. 2-氯丙烷, e5. 乙醇, e6. 甲苯, e7. 甲醇, e8. 丙烯, e9. 异丙醇, e10. 苯乙烯

图3 不同行业主要的VOCs组分占比

Fig. 3 Percentage of VOCs species for different industry sources

行业前 10 位重要的 VOCs 物种的重要性值. 对一个 VOCs 行业来说, 机器学习计算得到的重要性强的 VOCs 物种, 是区分该行业与其他 4 类 VOCs 行业的重要特征组分; 因此, 重要性排名较高的 VOCs 物种可以表示为该行业的 VOCs 特征标志物种. 对于合成材料制造业, 癸烷和四氢呋喃是较为重要的物种, 重要性分别为 1.7% 和 1.3%. 在日用化学产品制造业中, 正丁醇和甲苯等物种的重要性较高, 分别为 3.2% 和 3.2%. 对于石化行业, 1,2,3-三甲苯和 1,3,5-三甲苯是较为重要的 VOCs 物种, 重要性分别为 2.9% 和 2.1%. 对于涂料产品制造业, 丙烯和 3-甲基戊烷是重要性相对高的物种, 分别为 0.81% 和 0.73%. 而对于专用化学品制造业, 对-二甲苯和异丙苯是较为重要的物种, 重要性分别为 2.0% 和 1.5%.



a1. 癸烷, a2. 四氢呋喃, a3. 1,2,3-三甲苯, a4. 2-丙烯醛, a5. 甲苯, a6. 丙烯, a7. 异丙醇, a8. 氯仿, a9. 反-2-丁烯, a10. 苯乙烯; b1. 正丁醇, b2. 甲苯, b3. 柠檬烯, b4. 戊醛, b5. 2-丁烯, b6. 对-二甲苯, b7. 2,3,4-三甲基戊烷, b8.  $\alpha$ -蒎烯, b9. 丙酮, b10. 间-二甲苯; c1. 1,2,3-三甲苯, c2. 1,3,5-三甲苯, c3. 异丙苯, c4. 正丁醇, c5. 1,2,4-三甲苯, c6. 对-二甲苯, c7. 辛烷, c8. 丙酮, c9. 三氯乙烯, c10. 苯乙烯; d1. 丙烯, d2. 3-甲基戊烷, d3. 氯仿, d4. 三氯氟甲烷, d5. 苯, d6. 1,2,3-三甲苯, d7. 苯乙烯, d8. 正丁醇, d9. 1,2-二氯苯, d10; 辛烷 e1. 对-二甲苯, e2. 异丙苯, e3. 氯仿, e4. 丙烷, e5. 丙酮, e6. 甲苯, e7. 1,2-二氯乙烷, e8. 2-甲基戊烷, e9. 顺-2-丁烯, e10. 正己烷

图 4 基于随机森林模型计算的不同行业 VOCs 物种重要性

Fig. 4 Feature importance of VOCs species for different industry sources by random forest

机器学习计算的结果与丰量组分计算的结果有部分相似, 但也存在个别差异. 这是由于上述丰量组分的计算是基于各企业平均含量计算得到, 仅表明这种物质在该行业的平均含量较高; 而同时存在某种组分(如三甲胺和氯仿等)在同一行业中某个企业含量很高, 但其他企业较低的情况, 并不一定能够代表该物质在行业内普遍含量较高. 而机器学习计算方法能够挑选出每个行业的各企业中含量普遍较高的组分, 作为该行业的特征组分.

上述研究结果表明, 各行业排放的 VOCs 特征组分具有较大的差异; 而同一行业在不同研究中的报道也具有较明显的差异, 这是由于化工行业 VOCs 的排放与不同地域的化工工艺、处理技术和活动水平有关.

### 2.3 不同行业排放 VOCs 对 $O_3$ 潜在生成的贡献

上述结果表明, 不同化工行排放 VOCs 物种有较大差异, 而不同 VOCs 物种化学活性各异, 生成臭氧的潜能也不尽相同<sup>[56-58]</sup>, 因此, 各行业对臭氧的潜在影响效应不一致. 基于此, 本研究先分析了不同化工行业的活性 VOCs 物种, 再进一步分析各行业所排放的总 VOCs 对臭氧形成的影响效应.

本研究基于公式(2)和公式(3)计算了每种化工行业排放的 VOCs 对臭氧的最大生成潜势和不同 VOCs 种类对该行业的臭氧生成潜势贡献率. 结果表明, 对合成材料制造业臭氧生成潜势贡献率最大的 VOCs 种类为芳香烃和烯烃, 该行业排放的丙烯和 1,3-丁二烯等活性物种浓度较高, 每排放单位浓度 ( $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 的总 VOCs 产生的 OFP 为  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 对日用化学产品制造业臭氧生成潜势贡献率最大的为芳香烃和烯烃, 该行业的活性物种为对-二甲苯、 $\alpha$ -蒎烯等组分, 排放单位浓度总 VOCs 对臭氧总生成潜势为  $4.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 对石化行业臭氧生成潜势贡献最大的 VOCs 种类为烷烃和芳香烃, 该行业排放的活性 VOCs 物种中甲苯和丙烯的占比较高, 每排放单位浓度的总 VOCs, 石化行业的臭氧总生成潜势为  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 对涂料产品制造业臭氧生成潜势贡献最大的 VOCs 种类为烷烃和烯烃, 该行业排放的 3-甲基戊烷、甲基环戊烷等活性物种较多, 每排放单位浓度的总 VOCs 对臭氧的总生成潜势达  $1.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 对专用化学品制造业臭氧生成潜势贡献最大的 VOCs 种类为芳香烃和烯烃, 该行业排放的丙烯、甲苯等活性物种占比较高, 在排放单位浓度总 VOCs 的条件下, 臭氧总生成潜势为  $2.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 综上所述, 同样排放单位浓度的总 VOCs, 日用化学产品制造业产生的臭氧生成潜势最高, 达到  $4.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 这是由于这个行业所排放的对-二甲苯和  $\alpha$ -蒎烯等活性

物种的光化学活性较强,其MIR值为8.2和3.3,远高于其他活性物种的MIR值.而上述5类化工行业在排放单位浓度总VOCs条件下,对臭氧生成潜势的贡献大小依次为:日用化学产品制造业、专用化学产品制造业、石化行业、合成材料制造业和涂料产品制造业.具体如图5和图6所示.

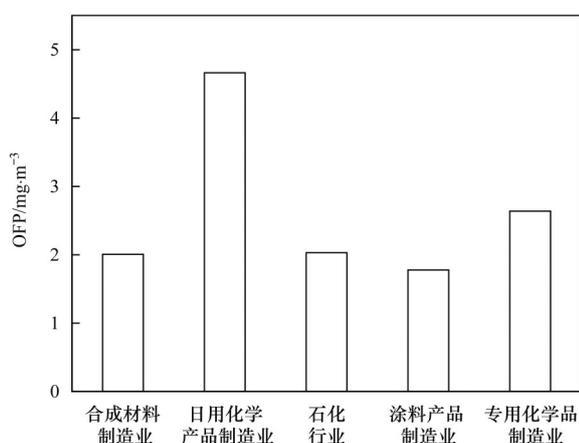


图5 不同行业VOCs对O<sub>3</sub>的臭氧生成潜势

Fig. 5 OFP for different industry sources

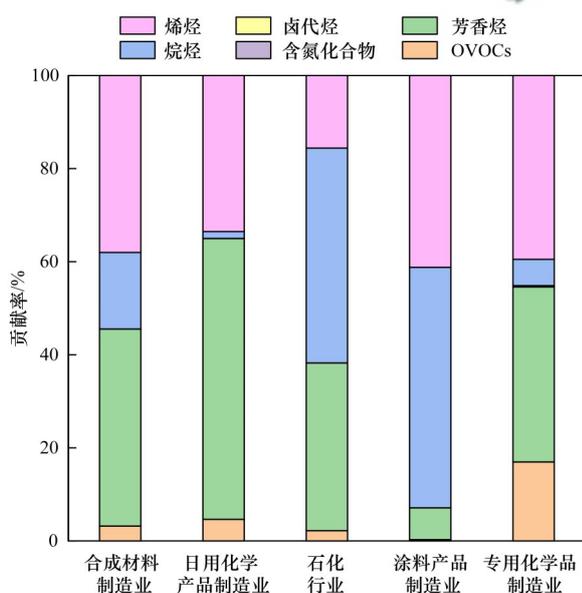


图6 各行业不同种类VOCs的臭氧生成潜势贡献率

Fig. 6 OFP contributions of different VOCs categories from different industry sources

值得注意的是,上述结果表明,尽管合成材料制造业排放的总VOCs中,癸烷和四氢呋喃等特征组分的占比(35%和25%)远高于丙烯和1,3-丁二烯等活性物种的占比(2.0%和2.0%);但是由于癸烷和苯乙烯的MIR值(0.54、1.66)远低于丙烯和1,3-丁二烯的MIR值(11.57、10.9),因此该两种组分的臭氧生成潜势贡献率较丙烯、1,3-丁二烯为低.因此,本研究的结果进一步表明,尽管特征组分能够用于标志污染源类;但是从臭氧管控的角度出发,对于

各行业排放VOCs的防治不能仅仅关注其排放的丰量特征组分,更要关注其关键活性物种.

### 3 结论

(1)本研究分析了我国典型5种化工行业VOCs的排放特征,其中卤代烃的占比较高,占总VOCs的30%;烷烃是合成材料制造业、石化行业和涂料产品制造业的VOCs主导种类;烯烃和卤代烃分别是日用化学产品制造业和专用化学产品制造业的主导VOCs种类.

(2)各行业排放的VOCs特征组分具有较大的差异,这是由于化工行业VOCs的排放与不同地域的化工工艺、处理技术和活动水平有关.机器学习计算的分类结果表明,甲苯和1,2,5-三甲苯是合成材料制造业源的标志组分;乙酸乙酯和 $\beta$ -蒎烯是日用化学产品制造业源的标志组分;1,3,5-三甲苯和1,2,5-三甲苯是石化行业源的标志组分;间-乙基甲苯和甲基异丁酮是涂料产品制造业的标志组分;环甲基己烷和甲苯是专用化学产品制造业源的标志组分.

(3)本研究计算了各行业所排放VOCs对臭氧的生成潜势,结果表明,在排放单位浓度总VOCs条件下,对臭氧生成潜势的贡献大小依次为:日用化学产品制造业、专用化学产品制造业、石化行业、合成材料制造业、涂料产品制造业.

(4)综上所述,从臭氧防控角度而言,更应关注各行业所排放的关键活性物种,而不是仅仅注重VOCs排放总量.本研究发现丙烯、1,3-丁二烯是合成材料制造业关键活性物种;对-二甲苯和 $\alpha$ -蒎烯是日用化学产品制造业关键活性物种,甲苯和丙烯是石化行业关键活性物种,反-2-丁烯和3-甲基戊烷是涂料产品制造业关键活性物种,丙烯和甲苯是专用化学产品制造业关键活性物种.本研究的发现为今后VOCs的精细化溯源和防控提供了关键数据和信息.

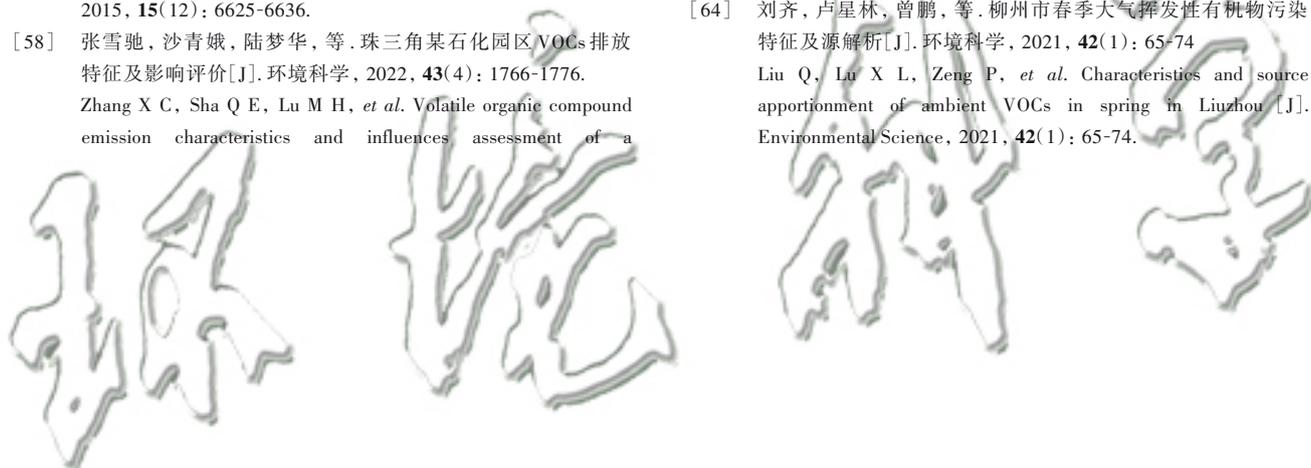
#### 参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 2013-2016中国环境状况公报, 2017-2021中国生态环境状况公报[EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/>, 2023-06-24.
- [2] 赵江伟, 裴赛赛, 于玉洁, 等. 河北南部城市臭氧和VOCs的污染特征及传输贡献[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 4775-4784. Zhao J W, Nie S S, Yu Y J, et al. Pollution characteristics and transport contributions of ambient ozone and volatile organic compounds in southern Hebei cities[J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 4775-4784.
- [3] 肖致美, 李鹏, 孔君, 等. 天津市持续高温强光照射天气下臭氧污染差异性分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(7): 3322-3330. Xiao Z M, Li P, Kong J, et al. Difference of ozone pollution under the continuous high temperature and strong sunlight weather in Tianjin[J]. China Environmental Science, 2023, 43(7): 3322-

- 3330.
- [4] Lü X P, Wang N, Guo H, *et al.* Causes of a continuous summertime O<sub>3</sub> pollution event in Jinan, a central city in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19** (5): 3025-3042.
- [5] Qu Y W, Wang T J, Cai Y F, *et al.* Influence of atmospheric particulate matter on ozone in Nanjing, China: observational study and mechanistic analysis [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, **35**(11): 1381-1395.
- [6] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al.* Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: A case study from radical chemistry to O<sub>3</sub>-VOC-NO<sub>x</sub> sensitivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 775-786.
- [7] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.
- Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (1): 106-114.
- [8] 陈木兰, 李振亮, 彭超, 等. 2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析[J]. *环境科学*, 2024, **45**(1): 61-70.
- Chen M L, Li Z L, Peng C, *et al.* Analysis of influencing factors of ozone pollution difference between Chengdu and Chongqing in August 2022 [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(1): 61-70.
- [9] 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 等. 2015—2021年京津冀及周边地区 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧复合污染时空特征分析[J]. *环境科学*, 2023, **44** (4): 1841-1851.
- Song X H, Yan L, Liu W, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics of co-pollution of PM<sub>2.5</sub> and ozone over BTH with surrounding area from 2015 to 2021 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1841-1851.
- [10] 鲁玺, 张少君, 邢佳, 等. 我国大气污染治理的进展与生态文明时代的机遇和挑战[J]. *工程(英文)*, 2020, **6**(12): 198-216.
- Lu X, Zhang S J, Xing J, *et al.* Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era [J]. *Engineering*, 2020, **6**(12): 198-216.
- [11] 姜华, 高健, 李红, 等. 我国大气污染协同防控理论框架初探 [J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 601-610.
- Jiang H, Gao J, Li H, *et al.* Preliminary research on theoretical framework of cooperative control of air pollution in China [J]. *Research of Environmental Science*, 2022, **35**(3): 601-610.
- [12] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 97-105.
- Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta Region during 2006-2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [13] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013~2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [14] 孟晓艳, 李婧妍, 解淑艳, 等. 2017-2019年中国337个城市及重点区域臭氧污染状况分析[J]. *中国环境监测*, 2021, **37** (3): 9-17.
- Meng X Y, Li J Y, Xie S Y, *et al.* Analysis of ozone pollution in 337 cities and key regions of China in 2017-2019 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(3): 9-17.
- [15] Yang L F, Xie D P, Yuan Z B, *et al.* Quantification of regional ozone pollution characteristics and its temporal evolution: insights from identification of the impacts of meteorological conditions and emissions [J]. *Atmosphere*, 2021, **12** (2), doi: 10.3390/atmos12020279.
- [16] 严刚, 薛文博, 雷宇, 等. 我国臭氧污染形势分析及防控对策建议[J]. *环境保护*, 2020, **48**(15): 15-19.
- Yan G, Xue W B, Lei Y, *et al.* Situation and control measures of ozone pollution in China [J]. *Environmental Protection*, 2020, **48** (15): 15-19.
- [17] 中共中央、国务院. (两会授权发布)中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [http://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c\\_1127205564.htm](http://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c_1127205564.htm), 2023-07-08.
- [18] 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 等. 2020年和2021年南京城区臭氧生成敏感性和VOCs来源变化分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1943-1953.
- Lu X B, Wang M, Ding F, *et al.* Changes of O<sub>3</sub>-VOCs-NO<sub>x</sub> sensitivity and VOCs sources at an urban site of Nanjing between 2020 and 2021 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1943-1953.
- [19] 曹娟, 毋振海, 鲍捷萌, 等. 美国人为源VOCs管控经验及其对我国的启示[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 633-649.
- Cao J, Wu Z H, Bao J M, *et al.* Processes and experience of anthropogenic VOCs management and control in the USA and enlightenment to China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 633-649.
- [20] 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 等. 海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5407-5420.
- Xie W J, Xing Q, Xie D H, *et al.* Pollution characteristics of ozone and its precursors in background region of Hainan Province [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5407-5420.
- [21] Ahamad F, Latif M T, Tang R, *et al.* Variation of surface ozone exceedance around Klang Valley, Malaysia [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **139**: 116-127.
- [22] Assareh N, Prabamroong T, Manomaphiboon K, *et al.* Analysis of observed surface ozone in the dry season over Eastern Thailand during 1997-2012 [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **178-179**: 17-30.
- [23] 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 等. 2019年7月石家庄市O<sub>3</sub>生成敏感性及其控制策略解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3473-3482.
- Zhu J X, Wang X Q, Ou S J, *et al.* Ozone sensitivity analysis and control strategy in Shijiazhuang City in July 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3473-3482.
- [24] Fu J S, Dong X Y, Gao Y, *et al.* Sensitivity and linearity analysis of ozone in East Asia: the effects of domestic emission and intercontinental transport [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, **62**(9): 1102-1114.
- [25] Lin W L, Xu X B, Zheng X D, *et al.* Two-year measurements of surface ozone at Dangxiong, a remote highland site in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **31**: 133-145.
- [26] 王韵杰, 张少君, 郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1755-1762.
- Wang Y J, Zhang S J, Hao J M. Air pollution control in China: progress, challenges and future pathways [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1755-1762.
- [27] 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 等. 长江经济带湖北省人为源VOCs排放清单及变化特征[J]. *环境科学*, 2021, **42** (3): 1039-1052.
- Dai L W, Meng J, Li Q Q, *et al.* VOCs emission inventory and variation characteristics of artificial sources in Hubei province in the Yangtze river economic belt [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1039-1052.

- [28] Qin J J, Wang X B, Yang Y R, *et al.* Source apportionment of VOCs in a typical medium-sized city in North China Plain and implications on control policy [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **107**: 26-37.
- [29] Liu B S, Liang D N, Yang J M, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 757-769.
- [30] Zhang G Q, Wang N, Jiang X J, *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds (VOCs) in the area adjacent to a petroleum refinery in Jinan, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(4): 944-950.
- [31] 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 等. 兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5442-5452.
- Yang Y P, Chen Q, Meng X H, *et al.* Summer pollution characteristics and sources of volatile organic compounds in Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5442-5452.
- [32] 王红丽. 上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1603-1611.
- Wang H L. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and the impact on ozone formation during the photochemical smog episode in Shanghai, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1603-1611.
- [33] 金丹. 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 132-139.
- Jin D. Role of atmospheric VOCs in ozone formation in Summer in Shanghai suburb [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 132-139.
- [34] Wang H L, Chen C H, Wang Q, *et al.* Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the source analysis through a two-year continuous measurement [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 488-498.
- [35] 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 等. 连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 630-637.
- Qiao Y Z, Chen F, Li H P, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient volatile organic compounds (VOCs) in summer and autumn in different functional zones of Lianyungang, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 630-637.
- [36] 易霄霄, 李姜豪, 李光华, 等. 铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O<sub>3</sub> 和 SOA 形成潜势分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 140-149.
- Yi X X, Li J H, Li G H, *et al.* Characteristics of VOCs and formation potentials of O<sub>3</sub> and SOA in autumn and winter in Tongchuan, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 140-149.
- [37] Liu Y F, Kong L W, Liu X G, *et al.* Characteristics, secondary transformation, and health risk assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(3): 33-46.
- [38] 王文美, 高璟贇, 肖致美, 等. 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- Wang W M, Gao J Y, Xiao Z M, *et al.* Characteristics and sources of VOCs at different ozone concentration levels in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- [39] Fan M Y, Zhang Y L, Lin Y C, *et al.* Source apportionments of atmospheric volatile organic compounds in Nanjing, China during high ozone pollution season [J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128025.
- [40] Mozaffar A, Zhang Y L, Fan M Y, *et al.* Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O<sub>3</sub> and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104923.
- [41] 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 等. 典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5193-5200.
- Wang H L, Xin G X, Zhu L M, *et al.* Emission characteristics and environment impacts of VOCs from typical rubber manufacture [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5193-5200.
- [42] 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 等. 2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5169-5179.
- Liu R Y, Zhong M F, Zhao X Y, *et al.* Characteristics of industrial volatile organic compounds (VOCs) emission in China from 2011 to 2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5169-5179.
- [43] 崔阳阳, 周震, 闫静, 等. 北京市电子工业 VOCs 排放特征及行业排放强度对比[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(6): 1287-1294.
- Cui Y Y, Zhou Z, Yan J, *et al.* VOCs emission characteristics of electronics industry in Beijing and emission intensity comparison with industries [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(6): 1287-1294.
- [44] 冯畅, 刘锐源, 刘雷璐, 等. 广州典型印刷企业 VOCs 排放特征及环境影响和健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3791-3800.
- Feng Y, Liu R Y, Liu L L, *et al.* VOCs emission characteristics, environmental impact and health risk assessment of typical printing enterprises in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3791-3800.
- [45] 鲁君, 黄奕玮, 黄成. 典型化工行业有害 VOCs 排放清单及长三角地区应用[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4856-4861.
- Lu J, Huang Y W, Huang C. Hazardous volatile organic compound emission inventory study and its application in a typical chemical industry in the Yangtze River delta [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4856-4861.
- [46] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [47] 赵锐, 黄络萍, 程军, 等. 成都市工业源重点 VOC 排放行业排放清单及空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1358-1367.
- Zhao R, Huang L P, Cheng J, *et al.* VOC emissions inventory from the key industries in Chengdu City and its associated spatial distribution characteristics [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1358-1367.
- [48] 李璇, 王雪松, 刘中, 等. 宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2497-2502.
- Li X, Wang X S, Liu Z, *et al.* Anthropogenic VOC emission inventory and contribution from industrial sources in Ningbo [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2497-2502.
- [49] 周子航, 邓也, 周小玲, 等. 成都市工业挥发性有机物排源成分谱[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- Zhou Z H, Deng Y, Zhou X L, *et al.* Source profiles of industrial emission-based VOCs in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- [50] 何梦林, 肖海麟, 陈小方, 等. 化工园区基于排放环节的 VOCs 排放特征研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(1): 38-48.

- He M L, Xiao H L, Chen X F, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds in chemical industry park based on emission links [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 38-48.
- [51] 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 等. 工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3962-3972.
- Meng J, Zhai Z X, Jing B Y, *et al.* Characterization and health risk assessment of exposure to odorous pollutants emitted from industrial odor sources [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3962-3972.
- [52] 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].
- [53] HJ 1078-2019, 固定污染源废气 甲硫醇等 8 种含硫有机化合物的测定 气袋采样-预浓缩/气相色谱-质谱法[S].
- [54] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32.
- [55] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [56] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5324-5335.
- [57] Zou Y, Deng X J, Zhu D, *et al.* Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> at a suburban site in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(12): 6625-6636.
- [58] 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 等. 珠三角某石化园区 VOCs 排放特征及影响评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1766-1776.
- Zhang X C, Sha Q E, Lu M H, *et al.* Volatile organic compound emission characteristics and influences assessment of a petrochemical industrial park in the Pearl River Delta Region [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1766-1776.
- [59] 薛伟, 武江红, 赵慧贤, 等. 洗衣留香剂标准化现状及展望 [J]. *中国洗涤用品工业*, 2023, (2): 7-11.
- Xue W, Wu J H, Zhao H X, *et al.* Current situation and prospect for standardization of scent booster for laundry [J]. *China Cleaning Industry*, 2023, (2): 7-11.
- [60] 胡建华, 韩嘉, 李倩茹, 等.  $\alpha$ -萜烯衍生物的合成及其综合利用[J]. *山东化工*, 2014, **43**(6): 64-68.
- [61] 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.
- [62] 王鑫, 池皓, 张鑫倩, 等. 炼化企业污水处理厂恶臭治理设施排放特征及污染控制策略[J]. *环境工程学报*, 2021, **15**(7): 2333-2343.
- Wang X, Chi H, Zhang X Q, *et al.* Emission characteristics and control strategy of odor treatment processes in refinery wastewater treatment plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, **15**(7): 2333-2343.
- [63] Font X, Artola A, Sánchez A. Detection, composition and treatment of volatile organic compounds from waste treatment plants [J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4043-4059.
- [64] 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 等. 柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 65-74.
- Liu Q, Lu X L, Zeng P, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Liuzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 65-74.



## CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i> (2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i> (2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i> (2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i> (2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM <sub>2.5</sub> and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i> (2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i> (2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i> (2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i> (2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i> (2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i> (2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i> (2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i> (2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i> (2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i> (2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i> (2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i> (2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i> (2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i> (2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying (2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i> (2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i> (2793)
Spatial-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i> (2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i> (2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i> (2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i> (2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i> (2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-ru, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i> (2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i> (2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> (2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i> (2891)
Effect of Biochar on NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i> (2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i> (2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i> (2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i> (2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i> (2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i> (2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping (2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i> (2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i> (3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i> (3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i> (3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N <sub>2</sub> O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i> (3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i> (3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-hua, <i>et al.</i> (3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i> (3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i> (3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i> (3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i> (3119)