

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

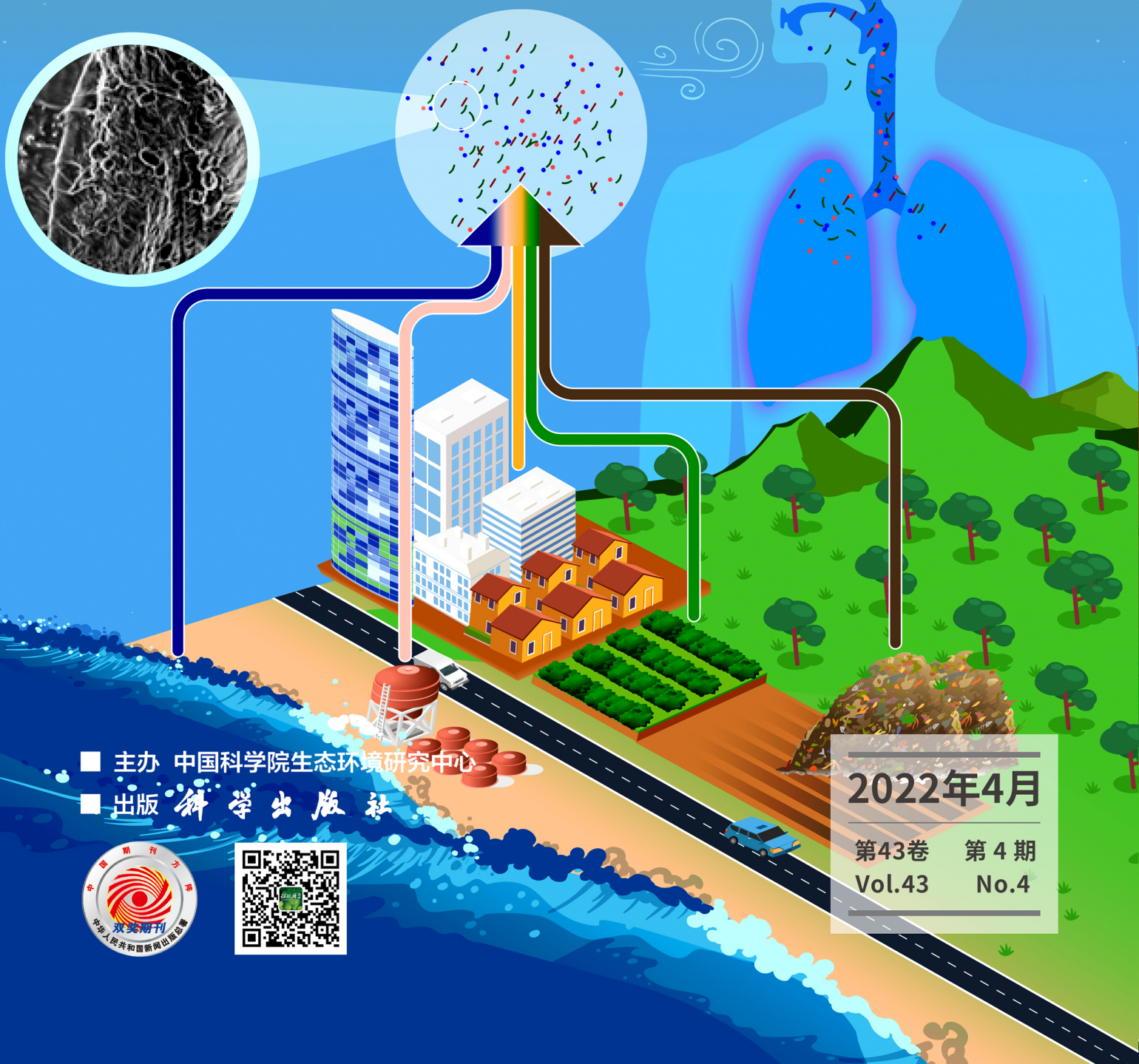
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

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

基于 SOA 和 O₃ 生成潜势的杭州市 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制

林旭, 严仁嫦*, 金嘉佳, 许凯儿

(浙江省杭州生态环境监测中心, 杭州 310007)

摘要: 2019 年 3 月 1 日 ~ 2019 年 5 月 31 日期间采用 Syntech Spectras GC955 在线气相色谱仪对杭州市大气环境中挥发性有机物 (VOCs) 进行了在线连续监测, 分析了 VOCs 体积分数的组成特征、PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制的优控 VOCs 物种和 VOCs 特征污染物比值。结果表明, 烷烃是 VOCs 体积分数中最重要的组分, 贡献了 62.40%。C₂ ~ C₆ 的烷烃、苯系物、乙烯和乙炔是 VOCs 关键物种。烯烃和芳香烃是 OFP 的主要贡献组分, 贡献率分别为 41.35% 和 37.50%。芳香烃是 SOA 的主要贡献者, 贡献率超过 90%。低碳的烷烃、低碳烯烃和苯系物是 OFP 的关键贡献物种, 控制好甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯这 3 种苯系物, 是 O₃ 和 PM_{2.5} 协同控制的关键。采样点大气中 VOCs 除了受机动车尾气的影响外, 溶剂使用等工业排放的影响也较为显著。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 生成潜势; 协同控制; 优控 VOCs 物种; 特征污染物比值

中图分类号: X513; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1799-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202108082

Coordinated Control of PM_{2.5} and O₃ in Hangzhou Based on SOA and O₃ Formation Potential

LIN Xu, YAN Ren-chang*, JIN Jia-jia, XU Kai-er

(Hangzhou Ecological and Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: A continuous observation campaign was carried out with the Syntech Spectras GC955 volatile organics online monitoring system from March 1, 2019 to May 31, 2019 in Hangzhou. The constituent features of VOCs, the preferred VOCs species, and VOCs characteristic pollutant ratios were analyzed. The results showed that alkanes were the most important component in the volume fraction of VOCs, accounting for 62.40%. C₂-C₆ alkanes, benzene series, ethylene, and acetylene were the key species of VOCs. Olefins and aromatics were the main contribution components of OFP, with contribution rates of 41.35% and 37.50%, respectively. Aromatics were the main contributors to SOA, with a contribution rate of more than 90%. Low carbon alkanes, low carbon olefins, and benzene series were the key contributing species of OFP. Controlling toluene, m/p-xylene, and o-xylene is the key to the coordinated control of O₃ and PM_{2.5}. VOCs in the atmosphere of the sampling point were not only affected by motor vehicle exhaust but were also significantly affected by industrial emissions, such as solvents.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); formation potential; coordinated control; preferred VOCs species; characteristic pollutant ratios

挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 是空气中的一类痕量气体, 种类繁多, 活性较强, 在对流层臭氧 (ozone, O₃) 和二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA) 的形成过程中均扮演着重要角色^[1]。VOCs 的来源主要有天然源和人为源两大类, 天然源主要有植被排放、火山喷发和森林火灾等, 人为源主要有汽车尾气、燃料燃烧、油气挥发和溶剂使用等^[2,3]。近年来, 随着城市化进程的加快, 中国的大气污染问题日益突出, 主要城市群空气质量二次污染频繁发生, 主要体现在 O₃ 浓度和 PM_{2.5} 中 SOA 组分比例的逐年增加^[4,5], 二次污染已经成为限制环境空气质量进一步改善的重要原因。VOCs 是 O₃ 和 SOA 的重要前体物^[6], 减少 VOCs 的排放对协同控制 O₃ 和 PM_{2.5} 污染至关重要^[7,8]。

关于 VOCs 的 O₃ 生成潜势方面, 国内已经开展了大量的相关研究。Ou 等^[9]的研究表明在珠三角地区芳香烃和烯烃是活性最高的 VOCs 组分, 其对 O₃ 生成潜势的贡献分别为 59.4% 和 25.8%; 叶露等^[10]对上海市汽车工业园区的 VOCs 臭氧生成潜势研究表明, 园区边界大气 VOCs 总 OFP 为 73.2 ×

10⁻⁹, 其中烷烃贡献率为 14.7%、烯烃贡献率为 35.9%、芳香烃贡献率为 45.2%、卤代烃贡献率为 1.8% 和炔烃贡献率为 2.3%。张博韬等^[11]对北京大气 VOCs 的反应活性进行了研究, 表明乙烯、丙烯、乙醛、间/对-二甲苯和甲苯是对臭氧生成潜势贡献最高的 5 种物质, 烯烃和芳香烃对 OFP 贡献较大, 尤其是低碳烯烃、二甲苯和甲苯对 OFP 的贡献最大。烷烃中除正丁烷以外对 OFP 的贡献整体较低。姚青等^[12]对天津市郊区 VOCs 的臭氧生成潜势进行了研究, 结果显示观测期间烯烃对 OFP 的贡献最大为 55.80%, 芳香烃和炔烃的贡献相当, 乙烯、异戊二烯和甲苯是对 OFP 贡献最高的 3 个物种。VOCs 是 SOA 的重要前体物, 有研究表明, SOA 平均占 PM_{2.5} 有机组分的 20% ~ 50%^[13]。王扶潘等^[14]、邹宇等^[15]、王倩等^[16]和徐虹等^[17]分别对深圳、广州、上海和天津市的 VOCs 对 SOA 的生成潜势进行了研究, 结果均表明芳

收稿日期: 2021-08-09; 修订日期: 2021-09-14

基金项目: 2019 年杭州市科技计划引导项目 (20191231Y059); 杭州市农业与社会发展科研项目 (20201203B126)

作者简介: 林旭 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气颗粒物和臭氧污染防治, E-mail: 1057674326@qq.com

* 通信作者, E-mail: 331028669@qq.com

香烃类物种对 SOA 的贡献最为显著.

虽然对于 VOCs 的臭氧生成潜势和 SOA 生成潜势已有研究报道,但对 O₃ 和 PM_{2.5} 的协同控制研究却鲜见,本研究利用 Syntech Spectras GC955 在线气相色谱仪对杭州市 2019 年 3 月 1 日~5 月 31 日环境空气中 VOCs 进行了连续在线监测,基于 SOA 和 O₃ 生成潜势算法,对杭州市 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制进行深入研究,以期相关部门的环境管理决策提供一定的技术支持.

1 材料与方法

1.1 观测点位与采样时间

观测地点位于杭州市下沙浙江理工大学站点(30°18'N, 120°20'E). 该站点位于城区东面一高教园区内,周边分布有高架路和绕城高速,观测点北面有造纸企业,西面有加油站,西南方向分布着香精香料、橡胶和纺织印染等工业企业. 采样时间为 2019 年 3 月 1 日~5 月 31 日,时间分辨率为 1 h.

1.2 仪器与分析方法

本研究采用荷兰 SYNSPEC 公司生产的 SyntechSpectras GC955 在线气相色谱仪对杭州大气环境中的 VOCs 进行在线连续监测. 仪器时间分辨率为 1 h,共检测出 54 种 VOCs,包含 29 种烷烃、14 种芳香烃、10 种烯烃和 1 种炔烃. 仪器主要由自动采样系统、进样系统、校准系统、FID(火焰离子化检测器)/PID(光离子化检测器)和工作站等组成,色谱仪分为低碳分析仪(C2~C5)和高碳分析仪(C6~C12)2 台,C2~C5 的低沸点物种采用低碳分析仪监测,内置低温富集管,检测器为 PID 和 FID 双检测器.C6~C12 的高沸点物种采用高碳分析仪监测,内置常温富集管,检测器为 PID. 为保证数据的可靠性和有效性,观测期间每周进行一次校准,标气由美国林德公司(THE LINDE GROUP.)提供,含有 57 种 VOCs 组分,标气体积分数为 1×10⁻⁶,经 CMK5 稀释至 2×10⁻⁹~8×10⁻⁹用于仪器校准,N₂ 为平衡气. 采样期间,数据采集有效率均在 90% 以上.

1.3 大气 VOCs 的 O₃ 和 SOA 生成潜势研究方法

1.3.1 OFP 的计算

目前研究有机物的 O₃ 反应活性主要有 3 种方法:一是等效丙烯浓度;二是·OH 消耗速率($L^{\cdot OH}$);三是结合最大增量反应活性(max incremental reactivities, MIR)系数分析臭氧生成潜势(OFP). 前两种方法只考虑 VOCs 与·OH 的反应速率,没有涉及后续复杂反应;第三种方法体现了机制反应性,研究 O₃ 生成较为客观^[18]. 因此本研究采用 OFP 来表征环境大气中 VOCs 的化学反应活性(VOCs

reactivity). OFP 的计算公式为:

$$\text{OFP} = [\text{VOC}]_i \times \text{MIR} \quad (1)$$

式中,OFP 为某 VOC 物种 i 的臭氧生成潜势($\times 10^{-9}$), $[\text{VOC}]_i$ 为实际观测到的某种 VOC 体积分数($\times 10^{-9}$),MIR 为某 VOC 物种的最大增量反应活性,各物种 MIR 值取自文献[19],详见表 1.

表 1 本研究采用的 MIR、FAC 和 F_{VOCr} 系数

Table 1 MIR, FAC, and F_{VOCr} coefficients used in this study				
类别	物种名称	FAC/%	$F_{\text{VOCr}}/\%$	MIR
烷烃	乙烷	—	—	0.25
	丙烷	—	—	0.48
	异丁烷	—	—	1.21
	正丁烷	—	—	1.02
	环戊烷	—	—	2.40
	异戊烷	—	—	1.38
	正戊烷	—	—	1.04
	甲基环戊烷	0.17	10	2.80
	2,3-二甲基丁烷	—	—	1.07
	2-甲基戊烷	—	—	1.50
	2,2-二甲基丁烷	—	—	0.82
	3-甲基戊烷	—	—	1.50
	正己烷	—	—	0.98
	环己烷	0.17	14	1.28
	2-甲基己烷	—	—	1.08
	3-甲基己烷	—	—	1.40
	2,3-二甲基戊烷	—	—	1.31
	2,2,4-三甲基戊烷	—	—	0.93
	正庚烷	0.06	14	0.81
	甲基环己烷	2.70	20	1.80
	2,3,4-三甲基戊烷	—	—	1.60
	2-甲基庚烷	0.50	10	0.96
	3-甲基庚烷	0.50	10	0.99
烯烃	正辛烷	0.06	17	0.60
	正癸烷	2.00	22	0.46
	十一烷	2.50	25	0.42
	十二烷	3.00	26	0.38
	乙烯	—	—	7.40
	丙烯	—	—	9.40
	反-2-丁烯	—	—	10.0
	1-丁烯	—	—	8.90
	顺-2-丁烯	—	—	10.0
	反-2-戊烯	—	—	8.80
芳香烃	1-戊烯	—	—	6.20
	顺-2-戊烯	—	—	8.80
	异戊二烯	—	—	9.10
	1-己烯	—	—	4.40
	苯	2.00	10	0.42
	甲苯	5.40	12	2.70
	乙基苯	5.40	15	2.70
	间/对-二甲苯	4.70	34	7.40
	苯乙烯	—	—	2.20
	邻-二甲苯	5.00	26	6.50
炔烃	异丙苯	4.00	13	2.20
	正丙苯	1.60	12	2.10
	间/对-乙基甲苯	4.40	26	—
	1,3,5-三甲基苯	2.90	74	10.1
	邻-乙基甲苯	5.60	23	—
	1,2,4-三甲基苯	2.00	58	8.80
	1,2,3-三甲基苯	3.60	51	8.90
	间/对-二乙基甲苯	—	—	—
	乙炔	—	—	0.50

1.3.2 SOA 的计算

由于 VOCs 向 SOA 的转化过程十分复杂,因此国内外多使用参数法计算 SOA 生成量,该方法基于烟雾箱实验,不考虑具体反应过程,建立实测 VOCs 体积分数与 SOA 生成量之间的关系,该方法计算简单,能从 VOCs 的排放清单或实测的环境体积分数直接估算出 SOA 的量,并可以反映各 SOA 前体物的贡献.因此本研究采用 Grosjean 提出的气溶胶生成系数(FAC)估算 VOCs 的 SOA 生成潜势,公式为:

$$\text{SOA}_p = \text{VOCs}_i \times \text{FAC} / (1 - F_{\text{VOCr}}) \quad (2)$$

式中, SOA_p 为某 VOC 物种的 SOA 生成潜势 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), VOCs_i 为某 VOC 物种的实际观测浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), FAC 为 SOA 的生成系数, F_{VOCr} 为某 VOC 物种参与反应的质量分数(%), FAC 和 F_{VOCr} 取自文献[16],详见表 1.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 组成及时间序列特征

图 1 给出了观测期间 54 种 VOCs 体积分数组成及关键物种. 观测期间 φ (总 VOCs) 为 30.89×10^{-9} , 其中 φ (烷烃) 为 19.28×10^{-9} , 贡献了

62.40%, φ (芳香烃) 为 6.49×10^{-9} , 贡献了 21.01%, φ (烯烃) 为 3.82×10^{-9} , 贡献了 12.35%, φ (炔烃) 为 1.31×10^{-9} , 贡献了 4.24%; VOCs 体积分数排名前 10 的物种依次为: 乙烷(4.68×10^{-9})、丙烷(3.81×10^{-9})、正丁烷(2.84×10^{-9})、甲苯(2.78×10^{-9})、乙烯(2.40×10^{-9})、2,3-二甲基丁烷(1.92×10^{-9})、间/对-二甲苯(1.40×10^{-9})、乙炔(1.34×10^{-9})、异丁烷(1.16×10^{-9})和异戊烷(0.94×10^{-9}), 累计占比 75.33%. 可见, 烷烃是 VOCs 体积分数中最重要的组分, C2~C6 的烷烃、苯系物、乙烯和乙炔是关键物种.

图 2 给出了总 VOCs、O₃ 和 PM_{2.5} 的时间序列. 观测期间 O₃ 共出现了 6 次污染过程(O₃ 日最大 8 h 浓度大于 $160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$): 过程 1(4 月 8 日)、过程 2(4 月 18~19 日)、过程 3(5 月 4~5 日)、过程 4(5 月 9~12 日)、过程 5(5 月 20~24 日)和过程 6(5 月 31 日), 且在这 6 次 O₃ 污染过程中都伴随 PM_{2.5} 的小时污染现象. 在 O₃ 和 PM_{2.5} 出现污染期间, VOCs 体积分数也出现了不同程度的升高, 过程 1、过程 2、过程 5 和过程 6 期间 φ (总 VOCs) 分别为: 37.67×10^{-9} 、 40.25×10^{-9} 、 34.42×10^{-9} 和 33.12

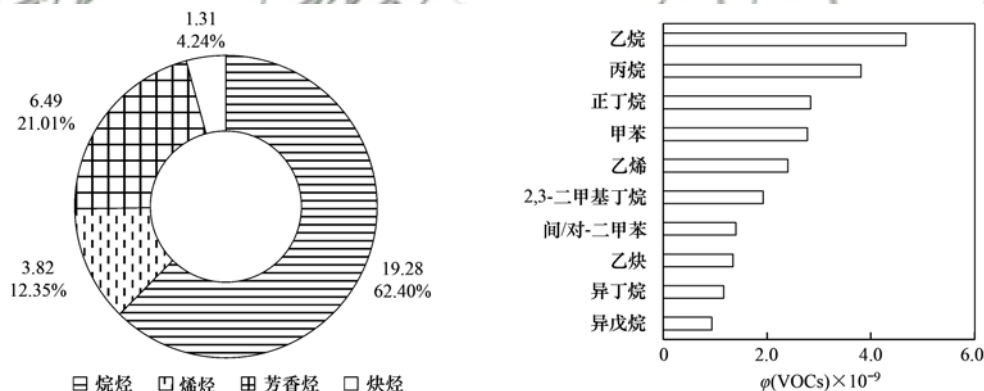


图 1 VOCs 体积分数组成及排名前 10 物种

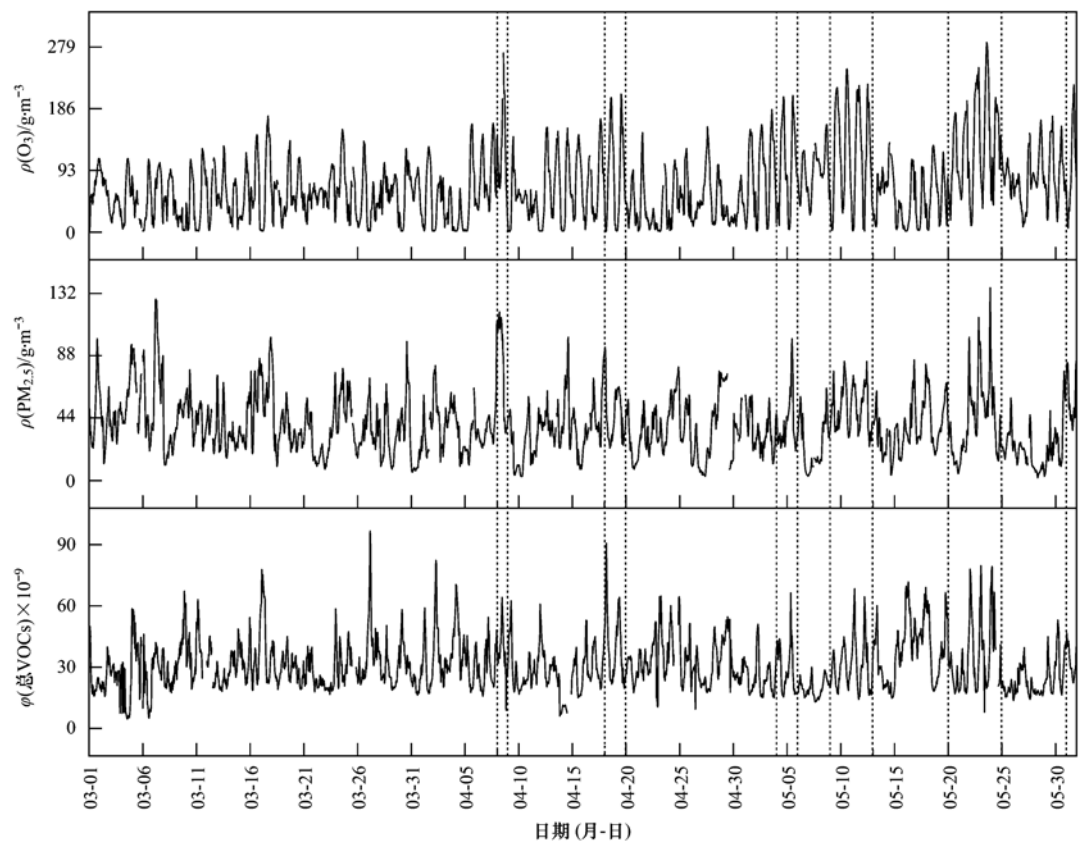
Fig. 1 VOCs volume fraction composition and the top ten species

$\times 10^{-9}$, 分别比整个观测期 φ (总 VOCs) 高 21.95%、30.30%、11.43% 和 7.22%. 过程 3 和过程 4 φ (总 VOCs) 分别为 29.09×10^{-9} 和 30.87×10^{-9} , 略低于观测期间平均总 VOCs 体积分数, 但是这 2 个过程中均出现了总 VOCs 的小时体积分数高值[5 月 5 日 08:00 的 φ (总 VOCs) 为 66.39×10^{-9} , 5 月 11 日 07:00 的 φ (总 VOCs) 为 68.40×10^{-9}]. 较高的 VOCs 体积分数可能是导致 PM_{2.5} 和 O₃ 双污染的原因之一.

2.2 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制的优控 VOCs 物种

观测期间总 OFP 为 79.57×10^{-9} , 其中烷烃 OFP 为 15.55×10^{-9} , 贡献了 19.54%; 烯烃 OFP 为 32.90, 贡献了 41.35%; 芳香烃 OFP 为 $29.84 \times$

10^{-9} , 贡献了 37.50%, 炔烃 OFP 为 1.28×10^{-9} , 贡献了 1.60%. φ (烯烃) 对 φ (总 VOCs) 的贡献率仅为 12.35%, 其对 OFP 贡献最高, 达 41.35% (图 3). φ (芳香烃) 对 φ (总 VOCs) 贡献率仅为 21.01%, 其对 OFP 贡献率却高达 37.50%, 仅次于烯烃. 可见烯烃和芳香烃是 OFP 的主要贡献组分. 观测期间对 SOA 有贡献的 VOCs 组分共有 23 种, 其中烷烃 11 种, 芳香烃 12 种. 总的 SOA 生成量为 $1.40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中烷烃 SOA 生成量为 $0.08 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 贡献率为 5.47%; 芳香烃 SOA 生成量为 $1.32 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 贡献率高达 94.53% (图 3). 对 φ (总 VOCs) 贡献率仅为 21.01% 的芳香烃对 SOA 的贡献率却超过 90%, 可见芳香烃是 SOA 的主要贡献者, 烷烃对 SOA 的贡



竖虚线框定的6个时间段分别对应6个污染过程

图2 VOCs、O₃和PM_{2.5}的时间序列

Fig. 2 Time series of VOCs, O₃, and PM_{2.5}

献非常小.

表2给出了OFP和SOA排名前10的物种.对OFP贡献最大的10种物质中有4种烯烃、3种烷烃和3种芳香烃,分别为:乙烯(21.33×10^{-9})、间/对-二甲苯(10.93×10^{-9})、甲苯(10.92×10^{-9})、反-2-丁烯(3.76×10^{-9})、正丁烷(3.07×10^{-9})、顺-2-丁烯(2.96×10^{-9})、邻-二甲苯(2.38×10^{-9})、1-丁烯(1.89×10^{-9})、丙烷(1.75×10^{-9})和2,3-二甲基丁烷(1.73×10^{-9}),累计贡献率为76.04%.可

见低碳的烷烃、低碳烯烃和苯系物是OFP的关键贡献物种.对SOA贡献最大的10种物质中有2种烷烃和8种芳香烃,分别为:甲苯($0.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、间/对-二甲苯($0.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、乙苯($0.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、邻-二甲苯($0.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、苯($0.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、正葵烷($0.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、十二烷($0.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、1,3,5-三甲苯($0.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、1,2,3-三甲苯($0.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和邻-乙基甲苯($0.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),累计贡献率为95.30%.可见芳香烃类物质是SOA的关键贡

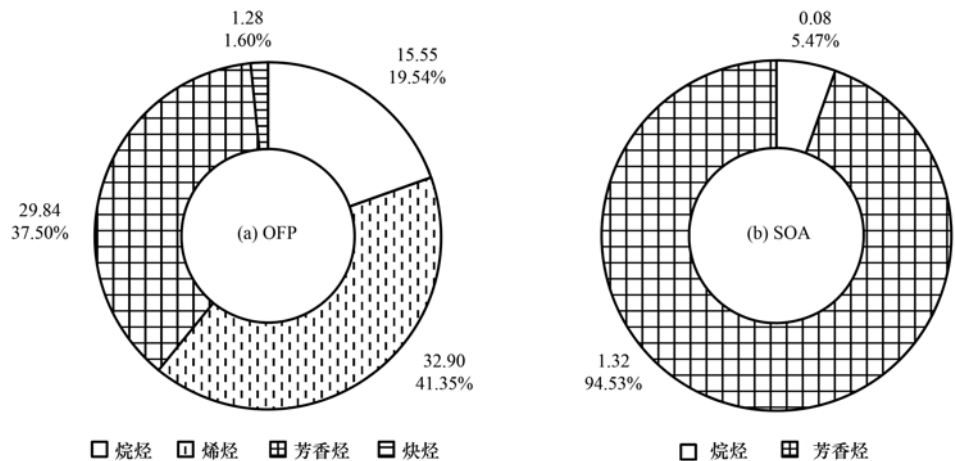


图3 各VOCs组分对OFP和SOA的贡献

Fig. 3 Contribution of VOCs component to OFP and SOA

献物种. 其中值得注意的是甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯这 3 种物质对 OFP 和 SOA 的贡献均较大,三者对 OFP 的累积贡献率为 30.34%、对 SOA 的累积贡献率高达 74.71%. 因此,控制好甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯这 3 种苯系物,是 O₃ 和 PM_{2.5} 协同控制的关键.

表 2 OFP 和 SOA 排名前 10 的 VOCs 物种

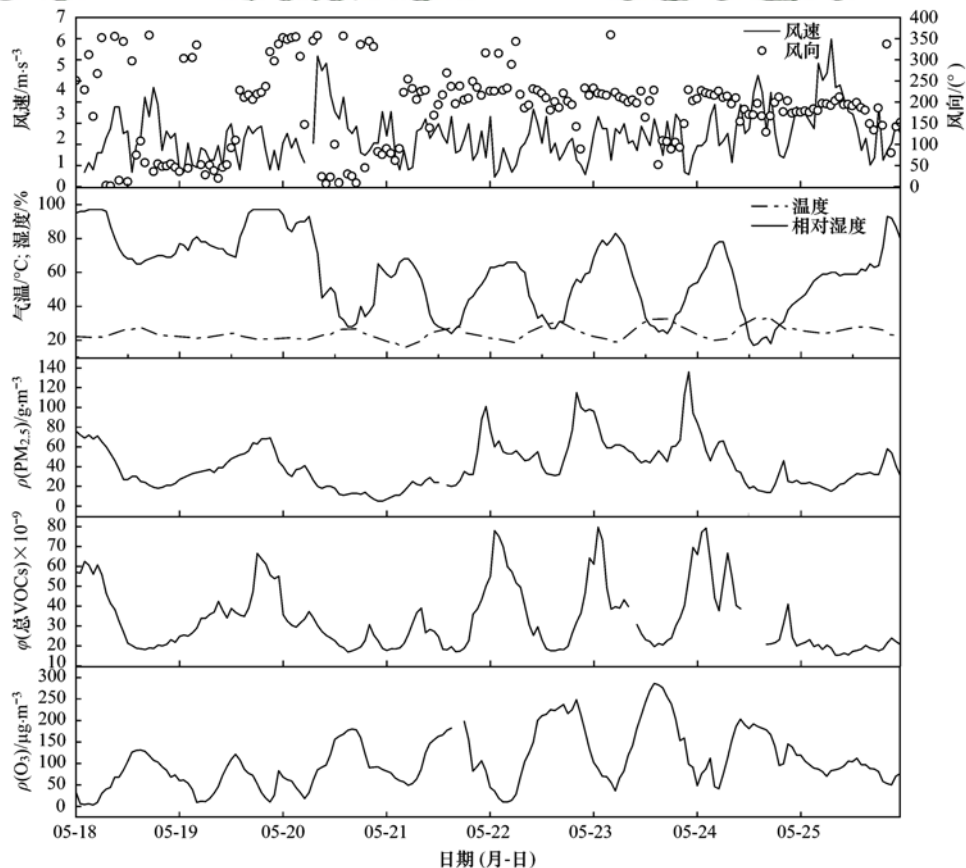
Table 2 Species of VOCs with top ten contribution to OFP and SOA						
排序	OFP			SOA		
	组分	体积分数 × 10 ⁻⁹	贡献率/%	组分	浓度/μg·m ⁻³	贡献率/%
1	乙烯	21.33	26.71	甲苯	0.70	41.18
2	间/对-二甲苯	10.93	13.69	间/对-二甲苯	0.47	27.65
3	甲苯	10.92	13.67	乙苯	0.16	9.41
4	反-2-丁烯	3.76	4.71	邻-二甲苯	0.10	5.88
5	正丁烷	3.07	3.84	苯	0.07	4.12
6	顺-2-丁烯	2.96	3.71	正葵烷	0.03	1.76
7	邻-二甲苯	2.38	2.98	十二烷	0.03	1.76
8	1-丁烯	1.89	2.37	1,3,5-三甲苯	0.02	1.18
9	丙烷	1.75	2.19	1,2,3-三甲苯	0.02	1.18
10	2,3-二甲基丁烷	1.73	2.17	邻-乙基甲苯	0.02	1.18
前 10 物质累计值		60.72	76.04		1.62	95.3
总 VOCs		79.86	100		1.70	100

2.3 典型污染过程中优控 VOCs 物种

本节对过程 5 深入分析,其持续时间较长,并且出现了 O₃ 和 PM_{2.5} 的双污染过程,且总 VOCs 体积分数也高于整个观测期的平均水平(图 4).

5 月 20~24 日监测点位 O₃ 日最大 8 h 平均值分别为 163、174、227、258 和 187 μg·m⁻³,其中 5

月的 20、21 和 24 日为轻度污染,5 月 22~23 日为中度污染. 5 月 20~24 日 PM_{2.5} 日平均值分别为 20、29、60、65 和 38 μg·m⁻³,日均值虽然没有超标(大于 75 μg·m⁻³为超标),但出现了多个时段的小时超标现象;5 月的 21 日 22:00~22 日 00:00、22 日 19:00~23 日 01:00 和 23 日 21:00~24 日



数据的不连续为仪器维护所致

图 4 污染期间 O₃、总 VOCs、PM_{2.5} 和气象要素时间序列

Fig. 4 Time series during pollution of O₃, total VOCs, PM_{2.5}, and meteorological elements

00:00. 5月20~24日 φ (总VOCs)分别为 26.10×10^{-9} 、 26.48×10^{-9} 、 40.06×10^{-9} 、 37.97×10^{-9} 和 43.38×10^{-9} ,可见5月22~24日 O_3 、 $PM_{2.5}$ 和VOCs三者出现了同步的升高. 5月22~24日间气温相对较高,日最高气温均超过 $30^\circ C$,相对湿度较低,高温低湿有利于 O_3 的光化学生成和VOCs向SOA的转化,且期间风速较小,水平扩散条件较差,不利于污染物的扩散稀释,不利的气象条件可能是本次污染过程的成因之一.

为进一步分析污染期间VOCs的关键组分和优势物种,特选取5月22~24日作为污染时段,5月25日为清洁时段进行对比分析.表3给出了污染时段和清洁时段OFP和SOA排名前10的VOCs物种.就OFP而言,其中乙烯、间/对-二甲苯、甲苯、

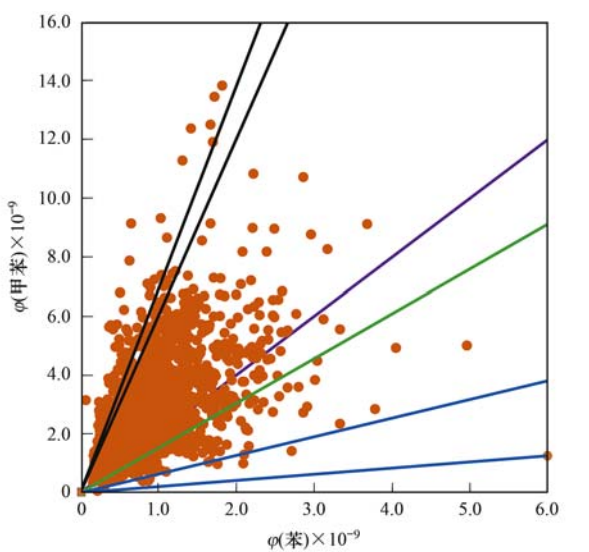
2,3-二甲基丁烷和邻-二甲苯这5种物质在污染时段和清洁时段均位列前10之内,且污染时段的体积分数均远高于清洁时段,表明这5种物质是 O_3 污染时段内主要的VOCs前体物种.此外污染时段期间异丁烷、异戊烷和正丁烷的体积分数也较高,排进了前10,而清洁时段前10物质则没有这3种,表明异丁烷、异戊烷和正丁烷也是 O_3 污染时段内重要的VOCs前体物种.就SOA而言,不管是污染期还是清洁期,其主要贡献物种均是苯系物,污染时段苯系物的SOA高于清洁时段.综合来看,无论是 O_3 还是 $PM_{2.5}$ 污染,苯系物都是关键的VOCs前体物种.因此控制好苯系物的排放,能有效地协同控制二者的复合污染,有研究表明,苯系物主要来自溶剂涂料行业^[16],因此,对该行业加强管理十分关键.

表3 污染时段和清洁时段OFP和SOA排名前10物种
Table 3 Species of VOCs with top ten contribution to OFP and SOA during pollution periods and cleaning periods

排序	污染时段(5月22~24日)				清洁时段(5月25日)			
	物种	OFP $\times 10^{-9}$	物种	SOA $/\mu g \cdot m^{-3}$	物种	OFP $\times 10^{-9}$	物种	SOA $/\mu g \cdot m^{-3}$
1	乙烯	43.75	甲苯	0.45	乙烯	15.91	甲苯	0.42
2	间/对-二甲苯	13.34	间/对-二甲苯	0.25	甲苯	7.73	间/对-二甲苯	0.23
3	甲苯	11.74	乙苯	0.09	间/对-二甲苯	6.34	乙苯	0.06
4	反-2-丁烯	3.75	苯	0.05	反-2-丁烯	3.75	邻-二甲苯	0.03
5	2,3-二甲基丁烷	3.15	十二烷	0.04	顺-2-丁烯	2.96	1,2,3-三甲苯	0.03
6	顺-2-丁烯	2.96	邻-二甲苯	0.04	1-丁烯	1.87	1,3,5-三甲苯	0.02
7	邻-二甲苯	2.65	1,3,5-三甲苯	0.02	异戊二烯	1.79	苯	0.02
8	异丁烷	2.12	1,2,3-三甲苯	0.02	2,3-二甲基丁烷	1.51	邻-乙基甲苯	0.02
9	异戊烷	2.12	邻-乙基甲苯	0.02	间/对-二乙基苯	1.06	十二烷	0.01
10	正丁烷	2.08	正癸烷	0.01	邻-二甲苯	1.01	1,2,4-三甲苯	0.01

2.4 VOCs中特征污染物比值

甲苯与苯的比值(T/B比值)通常可用来判断VOCs污染来源特征^[20,21].有研究表明苯在城市大气中的主要来源是燃烧过程,如机动车尾气、燃煤和生物质燃烧等,而甲苯除了来自机动车尾气外,溶剂涂料是另一大重要来源^[22].有研究表明,汽车尾气中T/B比值为2,工业区大气中T/B比值为6.0~6.9^[23,24],隧道实验中T/B比值为1.52^[25],生物质燃烧的T/B比值为0.21~0.635^[26].图5显示整个观测期间T/B比值覆盖区域较大,其中主要散点大多集中于机动车尾气和工业排放之间,采样期间T/B比值的平均值为3.54,表明采样点大气中VOCs除了受机动车尾气的影响外,溶剂使用等工业排放的影响也较为显著.表4给出了国内主要城市的T/B比值.本研究T/B比值与上海青浦淀山湖^[26]比较接近,远高于南京、北京和上海大部分监测点位,仅比上海金山^[26]低.沈建东等^[27]的研究表明杭州春季T/B均值为1.70,显著低于本研究的结果,主要原因是一方面文献^[27]的研究采



黑线表示工业排放(T/B为6.0~6.9)、紫线表示机动车尾气(T/B为2.0)、绿线表示隧道实验(T/B为1.52)和蓝线表示其他燃烧源(T/B为0.21~0.625),下同
图5 整个观测期T/B比值散点图

用的是苏玛罐人工采样,采样的频次和VOCs分析

仪器和本研究存在差异；另一方面是因为文献[27]的采样地点是位于城区住宅内的朝晖站点，而本研究的采样点下沙则位于城东，周边有大量的工业企业。

为了进一步判别污染源特征，针对 5 月 22 ~ 24 日（污染时段）和 5 月 25 日（清洁时段）的 T/B 比值进行分析（图 6）。5 月 22 ~ 24 日 T/B 散点主要

集中于隧道实验与工业排放之间，期间 T/B 平均值为 3.44，略低于整个采样期的平均值，表明污染期间受机动车排放的影响相对增加。5 月 25 日 T/B 值基本均大于 2.0 且大多数散点集中于工业排放特征值附近（黑线），表明该清洁天汽车尾气的影响较小，主要本底的污染来自于工业排放，这与下沙周边有大量工业企业的环境有关。

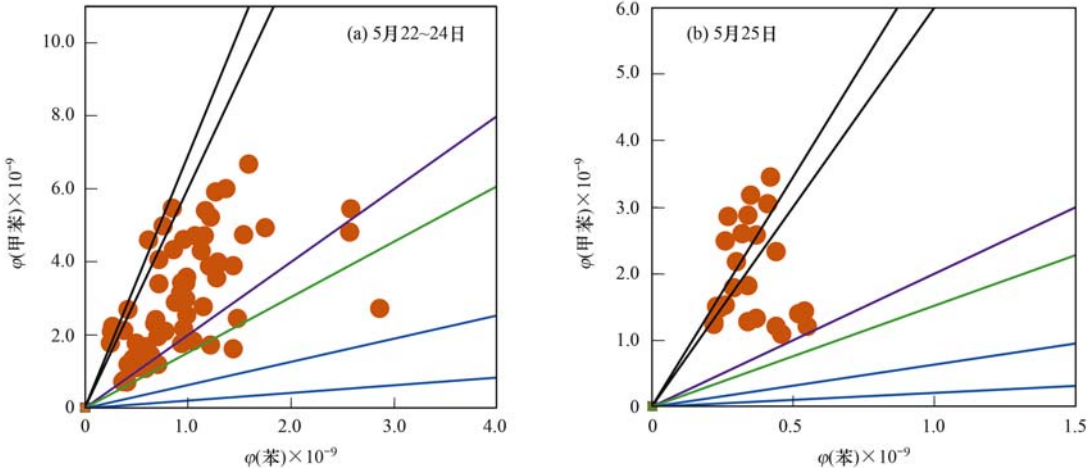


图 6 5 月 22 ~ 24 日（污染时段）和 5 月 25 日（清洁时段）T/B 比值散点图
Fig. 6 Scatter plot on T/B ratio of May 22-24 (pollution period) and May 25 (cleaning period)

表 4 国内典型城市 T/B 比值

采样点	T/B	文献
下沙理工大学	3.54	本研究
上海嘉定方泰	3.14	[28]
上海青浦淀山湖	3.45	[26]
上海浦东监测站	2.62	[26]
上海静安	2.83	[26]
上海浦东书院	2.24	[26]
上海崇明	2.35	[26]
上海奉贤	2.05	[29]
上海徐汇	2.04	[30]
上海金山	4.78	[26]
南京江北	1.23	[31]
北京市区东四	1.21	[11]
北京东南郊区永乐店	1.04	[11]
北京定陵背景站	0.64	[11]

大气 VOCs 中的某些特征物种可用来识别污染源，如有研究表明乙炔是燃烧源的示踪物^[32]，丙烷、正丁烷和异丁烷等是液化石油气（LPG）的主要成分，因此这 3 种烃类物质与乙炔的比值常用来判断这些物质来自 LPG 泄漏的贡献强度^[33]。整个观测期间丙烷/乙炔、正丁烷/乙炔和异丁烷/乙炔的比值分别为：5.57、4.74 和 1.74，污染过程中（5 月 20 ~ 24 日）丙烷/乙炔、正丁烷/乙炔和异丁烷/乙炔的比值分别为：6.26、3.92 和 2.42，安俊琳等^[33]的研究结果表明南京北郊三者比值分别为：1.27、0.66 和 0.56；Zhang 等^[34]的研究表明广州郊区

HEMC 站点三者的比值分别为：1.24、0.60 和 0.61，广州城区三者的比值分别为：11.49、1.84 和 2.61。本研究三者的比值要远高于南京北郊和广州郊区，整体与广州城区的结果较为相似（丙烷/乙炔低于广州城区、正丁烷/乙炔高于广州城区和异丁烷/乙炔与广州城区相当），表明城市 LPG 车辆排放和居民烹调 LPG 排放对本采样点大气 VOCs 影响显著。苯在城市地区主要来自于机动车尾气排放，而甲苯则主要来自于油漆、涂料、印刷和清洁过程中的溶剂使用^[28]。整个观测期间苯/乙炔和甲苯/乙炔的比值分别为 1.27 和 4.18，污染过程中（5 月 20 ~ 24 日）苯/乙炔和甲苯/乙炔的比值分别为 1.50 和 4.61，南京北郊二者的比值分别为 1.09 和 0.74，本研究中二者比值均高于南京北郊的研究结果，尤其甲苯/乙炔比值远高于南京北郊结果和广州城区结果，表明采样点大气受周边溶剂使用等工业排放的影响显著。

2.5 不确定性分析

有研究表明含氧 VOCs 对 OFP 的贡献较大，沈建东等^[27]对杭州市大气中的 VOCs 活性进行了研究，显示杭州市 VOCs 的 OFP 为 135.18 × 10⁻⁹，其中 OVOC 对 OFP 的贡献最大，贡献率达 45%；段玉森等^[26]对上海市不同点位的 VOCs 光化学活性进行了研究，显示醛酮类 VOCs 对 OFP 的贡献较大，不同站点醛酮类对 OFP 贡献为 31.5% ~ 55.2% 之间。

本研究只能测得 54 种 VOCs, 不包含含氧 VOCs, 因此估算的 OFP 比实际偏低。

根据 Grosjean 的假设, SOA 的生成只在白天 (08:00 ~ 17:00) 发生, 且 VOCs 只与 $\cdot\text{OH}$ 发生反应, 但实际 VOCs 生成 SOA 的途径还包括了与 $\text{NO}_3\cdot$ 和 O_3 的反应^[16]; 此外本研究测得的 SOA 前体物偏少, 仅包括 54 个 VOCs 物种, 实际上 SOA 的前体物不仅包含 VOCs, 还包括半挥发性有机物 (SVOC) 和中等挥发性有机物 (IVOC), 尤其是 SVOC、IVOC 和植物排放的挥发性有机物 (BVOC), 它们在 SOA 生成过程中扮演着十分重要的角色^[16]. 因此根据 FAC 值估算 SOA 的结果将低于实际值, 根据国内外的研究结果, 计算值与实测值的比值波动较大, 约为 0.5% ~ 50%^[14].

3 结论

(1) 观测期间 φ (总 VOCs) 为 30.89×10^{-9} , 其中 φ (烷烃) 为 19.28×10^{-9} , 贡献了 62.40%, φ (芳香烃) 为 6.49×10^{-9} , 贡献了 21.01%, φ (烯烃) 为 3.82×10^{-9} , 贡献了 12.35%, φ (炔烃) 为 1.31×10^{-9} , 贡献了 4.24%; 烷烃是 VOCs 体积分数中最重要的组分, C2 ~ C6 的烷烃、苯系物、乙烯和乙炔是关键物种。

(2) 观测期间总 OFP 为 79.57×10^{-9} , φ (烯烃) 对 φ (总 VOCs) 贡献率仅为 12.35%, 其对 OFP 贡献率最高, 为 41.35%。 φ (芳香烃) 对 φ (总 VOCs) 贡献率仅为 21.01%, 其对 OFP 贡献率高达 37.50%, 仅次于烯烃。总的 SOA 生成量为 $1.40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中烷烃 SOA 生成量为 $0.08 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 贡献率为 5.47%; 芳香烃 SOA 生成量为 $1.32 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 贡献率高达 94.53%。低碳的烷烃、低碳烯烃和苯系物是 OFP 的关键贡献物种, 芳香烃类物质是 SOA 的关键贡献物种, 控制好甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯这 3 种苯系物, 是 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 协同控制的关键。

(3) 采样期间 T/B 比值的平均值为 3.54, 表明采样点大气中 VOCs 除了受机动车尾气的影响外, 溶剂使用等工业排放的影响也较为显著。整个观测期间苯/乙炔和甲苯/乙炔的比值分别为 1.27 和 4.18, 污染过程中 (5 月 20 ~ 24 日) 苯/乙炔和甲苯/乙炔的比值分别为 1.50 和 4.61, 二者比值均高于南京北郊的研究结果, 尤其甲苯/乙炔比值远高于南京北郊结果和广州城区结果, 表明采样点大气受周边溶剂使用等工业排放的影响显著。

参考文献:

[1] Li B W, Ho S S H, Gong S L, *et al.* Characterization of VOCs

and their related atmospheric processes in a central Chinese city during severe ozone pollution periods[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(1): 617-638.

[2] Zheng H, Kong S F, Xing X L, *et al.* Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in northwest China for 1 year [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4567-4595.

[3] Baudic A, Gros V, Sauvage S, *et al.* Seasonal variability and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the Paris megacity (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(18): 11961-11989.

[4] Lu X, Hong J Y, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in China: a global perspective [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(8): 487-494.

[5] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.

[6] Von Schneidmesser E, Monks P S, Allan J D, *et al.* Chemistry and the linkages between air quality and climate change [J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 3856-3897.

[7] Song M D, Li X, Yang S D, *et al.* Spatiotemporal variation, sources, and secondary transformation potential of volatile organic compounds in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(6): 4939-4958.

[8] Jin X M, Holloway T. Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the ozone monitoring instrument [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(14): 7229-7246.

[9] 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.

[10] 叶露, 邵菁菁, 俞华明. 汽车工业区大气挥发性有机物 (VOCs) 变化特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 624-633.

Ye L, Tai J J, Yu H M. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the automobile industrial park of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 624-633.

[11] 张博韬, 安欣欣, 王琴, 等. 2015 年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4400-4407.

Zhang B T, An X X, Wang Q, *et al.* Temporal variation, spatial distribution, and reactivity characteristics of air VOCs in Beijing 2015 [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4400-4407.

[12] 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 等. 天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1573-1581.

Yao Q, Han S Q, Zhang Y F, *et al.* Effects of VOCs on ozone formation in the Tianjin suburbs in summer [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1573-1581.

[13] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3527-3544.

[14] 王扶潘, 朱乔, 冯凝, 等. 深圳大气中 VOCs 的二次有机气溶胶生成潜势 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(10): 2449-2457.

Wang F P, Zhu Q, Feng N, *et al.* The generation potential of secondary organic aerosol of atmospheric VOCs in Shenzhen [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(10): 2449-2457.

[15] 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 等. 广州番禺大气成分站复合污染过程 VOCs 对 O_3 与 SOA 的生成潜势 [J]. *环境科学*, 2017, **38**

- (6): 2246-2255.
- Zou Y, Deng X J, Li F, *et al.* Effect of VOCs on O₃ and SOA formation potential during the combined pollution process in Guangzhou Panyu atmospheric composition station [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2246-2255.
- [16] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 424-433.
- Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and source apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 424-433.
- [17] 徐虹, 唐邈, 肖致美, 等. 天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3492-3499.
- Xu H, Tang M, Xiao Z M, *et al.* Characteristics of secondary organic particles and the potential formation of SOA from VOCs during wintertime Heavy pollution episodes in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3492-3499.
- [18] 李用宇, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2933-2942.
- Li Y Y, Zhu B, An J L, *et al.* Characteristics of VOCs and their photochemical reactivity in autumn in Nanjing northern suburb [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 2933-2942.
- [19] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [20] Lee S C, Chiu M Y, Ho K F, *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) in urban atmosphere of Hong Kong[J]. *Chemosphere*, 2002, **48**(3): 375-382.
- [21] Tang J H, Chan L Y, Chan C Y, *et al.* Characteristics and diurnal variations of NMHCs at urban, suburban, and rural sites in the Pearl River Delta and a remote site in South China[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(38): 8620-8632.
- [22] 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 等. 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- Mo Z W, Niu H, Lu S H, *et al.* Process-based emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from paint industry in the Yangtze River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- [23] 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 等. 我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4393-4399.
- Wang M, Chen W T, Lu S H, *et al.* Ratios of volatile organic compounds in ambient air of various cities of China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4393-4399.
- [24] Chan L Y, Chu K W, Zou S C, *et al.* Characteristics of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in industrial, industrial-urban, and industrial-suburban atmospheres of the Pearl River Delta (PRD) region of south China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**(D11), doi: 10.1029/2005JD006481.
- [25] 付琳琳, 邵敏, 刘源, 等. 机动车 VOCs 排放特征和排放因子的隧道测试研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(7): 879-885.
- Fu L L, Shao M, Liu Y, *et al.* Tunnel experimental study on the emission factors of volatile organic compounds (VOCs) from vehicles[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(7): 879-885.
- [26] 段玉森. 基于 SOA 和 O₃ 生成潜势的上海市 VOCs 优控物种研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(2): 138-147.
- Duan Y S. Study on the priority species of VOCs based on SOA and O₃ formation potential [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(2): 138-147.
- [27] 沈建东, 叶旭红, 朱英俊, 等. 杭州市大气 VOCs 浓度特征及其化学活性研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(5): 80-87.
- Shen J D, Ye X H, Zhu Y J, *et al.* Study on the concentration characteristics and chemical reactivity of ambient VOCs in Hangzhou[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(5): 80-87.
- [28] 叶露. 上海北郊大气挥发性有机物 (VOCs) 变化特征及来源解析[J]. *装备环境工程*, 2020, **17**(6): 107-116.
- Ye L. Change characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the northern suburb of Shanghai [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, **17**(6): 107-116.
- [29] 闫磊, 黄银芝, 高松, 等. 杭州湾北岸 36 种挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(3): 536-546.
- Yan L, Huang Y Z, Gao S, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of 36 volatile organic compounds on the north coast of Hangzhou bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(3): 536-546.
- [30] 罗达通, 高健, 王淑兰, 等. 上海秋季大气挥发性有机物特征及污染物来源分析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 987-994.
- Luo D T, Gao J, Wang S L, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and relative pollutants observed in autumn Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 987-994.
- [31] 安俊琳, 朱彬, 李用宇. 南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4504-4512.
- An J L, Zhu B, Li Y Y. Variation characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Nanjing northern suburb, China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4504-4512.
- [32] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [33] 安俊琳, 朱彬, 王红磊, 等. 南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the northern suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- [34] Zhang Y L, Wang X M, Barletta B, *et al.* Source attributions of hazardous aromatic hydrocarbons in urban, suburban and rural areas in the Pearl River Delta (PRD) region [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **250-251**: 403-411.

CONTENTS

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