

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

汽车工业区大气挥发性有机物 (VOCs) 变化特征及来源解析

叶露, 邵菁菁, 俞华明

(上海市嘉定区环境监测站, 上海 201822)

摘要: 挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 作为臭氧和细颗粒物的重要前体物已日益受到关注。鲜有针对汽车工业区大气 VOCs 长期观测的报道。2019-01-01 ~ 2019-12-31 期间在上海某汽车工业园区边界, 采用在线气相色谱仪对 79 种 VOCs 组分定量检测, 分析大气 VOCs 组成和变化特征, 并利用最大增量反应活性 (MIR) 和 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率法 (L_{OH}) 估算大气化学反应活性, 应用 VOCs 特征物比值法和主因子分析法对 VOCs 进行来源解析。园区大气总 VOCs 体积分数为 26.5×10^{-9} , 其中烷烃占比 50.2%, 烯烃为 9.8%, 芳香烃为 22.4%, 卤代烃为 10.8%, 炔烃占 6.8%, 呈现冬季高, 夏季低的变化特征。园区大气 VOCs 总 OFP 为 73.2×10^{-9} , 烷烃、烯烃和芳香烃的贡献率分别为 14.7%、35.9% 和 45.2%, 总 L_{OH} 为 165.3 s^{-1} , 其中烯烃和芳香烃的贡献率为 30.4% 和 48.9%。化学反应活性贡献率较高的组分有间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、甲苯和邻-二甲苯。甲苯/苯 (T/B) 比值和乙烷/乙炔 (E/E) 比值表明观测点气团新鲜, 靠近污染源。园区大气 VOCs 主要来源为汽油尾气源 (19.4%)、溶剂使用源 (30.8%)、燃烧源 (11.0%)、柴油使用源 (8.9%) 和燃气使用源 (4.5%)。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 化学反应活性; 臭氧生成潜势 (OFP); $\cdot\text{OH}$ 消耗速率 (L_{OH}); 来源解析; 汽车工业区

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0624-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005207

Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai

YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming

(Jiading District Environmental Monitoring Station, Shanghai 201822, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) are important precursors of ozone and fine particulate matter, and have attracted more and more research attention. There are few long-term observational studies of VOCs in automobile industry parks. From January 1 to December 31, 2019, 79 kinds of VOCs were quantitatively detected by on-line gas chromatograph in an automobile industrial park in Shanghai. The composition, seasonal variation, and daily variation of VOCs were analyzed. The chemical reactivity of the atmosphere was estimated using the maximum incremental reactivity (MIR) and $\cdot\text{OH}$ radical loss rate. The sources of VOCs were analyzed using specific pollutant ratios and factor analysis. The results showed that the total VOCs concentration was 26.53×10^{-9} , with alkanes, alkenes, aromatics, halo hydrocarbon, and alkynes accounting for 50.2%, 9.8%, 22.4%, 10.8%, and 6.8%, respectively. There was an obviously seasonal variation in VOCs concentrations, with the maximum occurring in winter and the minimum in summer. Ozone formation potential (OFP) was 73.2×10^{-9} , of which alkanes accounted for 14.7%, alkenes 35.9%, and aromatics 45.2%. The $\cdot\text{OH}$ radical loss rate was 165.3 s^{-1} , of which alkenes accounted for 30.4% and aromatics 48.9%. The components with the highest contributions to chemical reaction activity were *m/p*-xylene, ethylene, propylene, toluene, and *o*-xylene. By estimating toluene/benzene ratios (T/B) and ethane/acetylene ratios (E/E), the air mass at the observation site was fresh, site was close to the pollution source. The main sources of VOCs were gasoline exhaust emissions (19.4%), solvent use (30.8%), combustion processes (11.0%), diesel use (8.9%), and liquefied petroleum gas use (4.5%).

Key words: volatile organic compounds (VOCs); chemical reactivity; ozone formation potential (OFP); $\cdot\text{OH}$ radical loss rate (L_{OH}); source apportionment; automobile industrial park

近年来,我国大气污染格局发生了深刻变化,细颗粒物与臭氧成为影响我国空气质量的主要空气污染物。挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是细颗粒物二次组分之一^[1]。对流层臭氧污染主要来自大气光化学反应过程和平流层的输入^[2], 与其前体物氮氧化物和 VOCs 存在复杂的非线性关系^[3]。可见, VOCs 是我国大气中关键污染物臭氧和细颗粒物的重要前体物, 减少 VOCs 排放有利于控制臭氧和细颗粒物污染。

大气 VOCs 变化特征受到日益关注, 有大量针

对 VOCs 浓度、化学组分及其来源的研究。VOCs 来源分为天然源和人为源。天然源主要有植物和海洋排放, 人为源有: 燃烧过程源、溶剂及燃料挥发源和工业生产过程源^[4,5]等。不同排放源 VOCs 特征物不同, 如: 异戊二烯和单萜烯是天然源最主要排放物^[4]。燃烧排放的重要特征为乙炔、苯、乙烯和丙烯等所占的比例很大^[6]。汽油挥发源中含有甲烷、乙

收稿日期: 2020-05-20; 修订日期: 2020-08-11

作者简介: 叶露 (1982 ~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境监测, E-mail: 57204253@qq.com

烷、丙烷和丁烷,汽车尾气随空燃比不同而不同^[4]. 甲烷和乙烷则是天然气(NG)的主要成分,丙烷、异丁烷和正丁烷是液化石油气(LPG)排放的重要指标^[7,8];在溶剂挥发源中甲苯和二甲苯等苯系物含量高^[9].

大气 VOCs 变化特征受到大气化学反应、局地排放源和气象气候条件的共同影响. 通常,城市大气 VOCs 中烷烃占比最高^[2,10~12],烯烃和芳香烃则对化学反应活性贡献更大^[2,12,13]. 上海市大气总 VOCs [即 φ (TVOC), 为单位时间内所有检出 VOC 组分体积分数之和] 在 $16.9 \times 10^{-9} \sim 63.9 \times 10^{-9}$ 之间^[13~18]. 中心城区大气烷烃约 40%, 占比最高, 且明显高于其它化学组成^[14~16], 说明上海中心城区受交通源影响明显. 城郊观测点的 VOCs 差异较大, 青浦区烷烃占比最高, 芳香烃、烯炔烃和 OVOC 占比居中, 卤代烃最低^[16]; 浦东书院占比排序为烷烃、OVOC、卤代烃、芳香烃和烯炔烃^[14]. 金山亭林、崇明森林公园和青浦淀山湖 OVOC 占比最高^[14]. 城郊观测点差异与局地污染源有关, 如奉贤区烯炔占比最高, 显示周边石化工业源的影响^[19]. 气象气候因素也会影响大气 VOCs 特征, 徐汇区 2012 年夏季 TVOC 为 32.1×10^{-9} ^[16], 秋季为 63.6×10^{-9} ^[15], 存在明显季节差异. 因此, 要掌握区域污染状况, 说清区域 VOCs 主要来源, 推进区域大气污染源精细化管理, 实地观测十分必要.

目前鲜见针对汽车工业区大气 VOCs 长期观测的报道. 本文以连续 1 a 观测资料为基础, 研究受汽车工业影响下大气 VOCs 变化特征, 结合大气化学反应活性, 找出影响区域大气活性的关键组分, 并应用特征物比值法和因子分析法对 VOCs 来源解析, 以期控制区域大气污染, 改善区域空气质量, 提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 站点概况及观测时间

观测点位于上海市嘉定区安亭镇, 其北面和东南面 1.5 km 范围内, 分布有汽车制造车间. 汽车整车制造业产生 VOCs 工序为涂装车间的涂装过程^[20], 涂装过程使用的原料(油漆和密封胶)和辅料(油漆稀释剂和清洗剂)含有大量 VOCs. VOC 废气包括: 第一, 漆喷涂工序中油漆稀释剂和清洗剂挥发, 油漆烘干环节. 第二, 总装工序整车质量检验时产生的汽车尾气, 以及加注汽油时汽油挥发. 第三, 厂区内无组织排放, 如含 VOCs 物料在储存和调配时挥发废气, 喷漆废水、废弃涂料、废弃容器等输送和储存过程的溶剂逸散. 观测时间为 2019-01-01

~2019-12-31.

1.2 仪器与方法

观测设备为科马特泰克公司(Chromatotec® Group)的 Airmo VOC C₂-C₆-A11000 和 Airmo VOC C₆-C₁₂-A21022 气相色谱分析仪, 分别测量低沸点 VOCs 物种(C₂ ~ C₆)和高沸点 VOCs 物种(C₆ ~ C₁₂). 低沸点分析仪在 1 ~ 3℃ 吸附 10 min, 270℃ 进行脱附, 脱附时间 4 min, 通过色谱柱分离, 色谱柱为 plot 柱(Al₂O₃/Na₂SO₄)(0.53 mm × 10 μm × 25 m). 高沸点分析仪在室温条件下吸附, 230℃ 进行脱附, 脱附时间 0.5 min, 色谱柱为 MXT30 CE(0.28 mm × 1 μm × 30 m). 氢火焰离子检测器. 可定量 79 种 VOCs 组分, 包括 29 种烷烃、11 种烯烃、17 种芳香烃、1 种炔烃和 21 种卤代烃. 方法检出限为 $0.01 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-9}$, 其中 71 种组分的方法检出限小于 0.6×10^{-9} . 79 种组分的准确度满足相对误差 ≤ ±15%. 乙烷(19.5%)、乙烯(16.9%)和顺-1-3-二氯丙烯(17.8%)除外, 76 种组分精密度满足相对标准偏差 ≤ ±15%. 质量控制: 用 Lind 牌 PAMS(photochemical assessment monitoring station)标气和 TO₁₄标气每半年做一次多点线性校准, 每月做一次单点校准, 多点校准曲线结果满足 95% 组分线性相关系数 $r \geq 0.995$, 单点校准结果满足 95% 组分相对误差 ≤ ±15%.

1.3 大气 VOCs 化学反应活性

使用·OH消耗速率(L_{OH})和 VOCs 增量反应性(incremental reactivity, IR)两种方法估算园区大气 VOCs 的化学反应活性. 通常用·OH消耗速率来估算初始过氧自由基(RO₂)的生成速率, 该反应是污染大气中臭氧形成过程的决速步骤, 用·OH反应速率常数反映 VOCs 组分日间光化学反应贡献. 臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)是指增加或去除单位某 VOCs 组分所产生的臭氧浓度变化^[4]. 通常 VOCs 组分反应越快 IR 越大, 改变 VOCs/NO_x 比使 IR 最大, 此情况下 IR 即为最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR). L_{OH} 考虑了 VOCs 链式反应中的一步, OFP 综合考虑了光解反应、终止反应等其他后续反应, 可用来估算 VOCs 对臭氧生成的贡献^[4]. OFP 以 Carter 研究给出的 MIR 修正值计算, 详见文献[21]. ·OH反应速率常数参见文献[4].

VOCs 组分 i 的臭氧生成潜势(OFP_i , 10^{-9})是其大气体积分数 [φ (VOCs) _{i} , 10^{-9}] 与该组分在臭氧最大增量反应中的臭氧生成系数(MIR_i , O₃/VOCs)的乘积, 计算公式为:

$$OFP_i = MIR_i \times \varphi(VOCs)_i$$

VOCs 组分 i 的 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率 ($L_{\cdot\text{OH}i}$, s^{-1}) 是其大气体积分数 [$\varphi(\text{VOCs})_i$, 10^{-9}] 与 $\cdot\text{OH}$ 反应速率常数 [$K_i^{\cdot\text{OH}}$, $\text{cm}^3 \cdot (\text{molecule} \cdot \text{s})^{-1}$] 的乘积, 计算公式为:

$$L_{\cdot\text{OH}i} = K_i^{\cdot\text{OH}} \times \varphi(\text{VOCs})_i$$

2 结果与讨论

2.1 总 VOCs 变化特征

观测期间, 上海北部某汽车工业园区边界大

气 $\varphi(\text{TVOC})$ 年平均值 26.5×10^{-9} , 表 1 列出了所有组分的体积分数及臭氧生成潜势和 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率的统计结果, 各类组分体积分数之和为: 烷烃 13.3×10^{-9} 、烯烃 2.60×10^{-9} 、芳香烃 5.95×10^{-9} 、卤代烃 2.87×10^{-9} 和炔烃 1.79×10^{-9} , 它们占比分别为 50.2%、9.8%、22.4%、10.8% 和 6.8%。排前 10 位 VOCs 组分为: 丙烷、乙烷、间/对-二甲苯、乙炔、乙烯、甲苯、正丁烷、异丁烷、异戊烷和 1,2-二氯乙烷。

表 1 大气 VOCs 各组分体积分数及其臭氧生成潜势和 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率¹⁾

Table 1 Concentrations, OFP, and $L_{\cdot\text{OH}i}$ of VOCs									
组分名称	平均值 $\times 10^{-9}$	标准偏差 $\times 10^{-9}$	OFP $\times 10^{-9}$	$L_{\cdot\text{OH}i}$ $/\text{s}^{-1}$	组分名称	平均值 $\times 10^{-9}$	标准偏差 $\times 10^{-9}$	OFP $\times 10^{-9}$	$L_{\cdot\text{OH}i}$ $/\text{s}^{-1}$
芳香烃类合计	5.95	9.18	33.1	80.8	烷烃类合计	13.3	18.3	10.8	34.3
间/对-二甲苯	1.92	4.18	14.9	35.9	丙烷	4.28	8.61	2.10	4.67
甲苯	1.49	1.78	5.95	8.38	乙烷	2.55	1.77	0.71	0.63
乙苯	0.759	1.81	2.31	5.31	正丁烷	1.37	1.56	1.57	3.23
邻-二甲苯	0.617	1.48	4.71	8.39	异丁烷	1.04	7.90	1.27	2.20
苯	0.464	0.39	0.33	0.57	异戊烷	0.974	1.06	1.41	3.51
1,2,4-三甲苯	0.169	0.50	1.50	5.48	正戊烷	0.455	0.45	0.60	1.73
苯乙烯	0.123	0.37	0.21	7.12	正辛烷	0.360	0.50	0.32	2.92
对-乙基甲苯	0.114	0.48	0.51	1.34	2-甲基戊烷 + 2,3-二甲基丁烷	0.310	0.43	0.37	1.70
1,2,3-三甲苯	0.098	0.16	1.17	3.20	正己烷	0.289	0.39	0.36	1.50
1,3,5-三甲苯	0.069	0.45	0.81	3.92	环己烷	0.287	0.42	0.36	2.00
邻-乙基甲苯	0.038	0.09	0.21	0.45	正十二烷	0.242	0.29	0.13	3.19
间-乙基甲苯	0.030	0.09	0.23	0.57	3-甲基戊烷	0.143	0.25	0.26	0.74
对-二乙苯	0.024	0.04	0.11	—	正十一烷	0.135	0.23	0.08	1.66
正丙苯	0.014	0.04	0.03	0.08	正癸烷	0.134	0.21	0.09	1.48
异丙苯	0.013	0.03	0.03	0.08	正庚烷	0.126	0.17	0.13	0.85
间-二乙苯	0.009	0.04	0.07	—	2,3-二甲基戊烷 + 2-甲基己烷	0.119	0.20	0.16	—
卤代烃类合计	2.87	4.49	1.33	—	甲基环戊烷	0.083	0.15	0.18	—
1,2-二氯乙烷	0.873	1.43	0.18	—	正壬烷	0.073	0.14	0.06	0.71
1,1,1-三氯乙烷	0.335	3.13	—	—	环戊烷	0.073	0.15	0.18	0.36
溴甲烷	0.313	1.36	0.01	—	2,4-二甲基戊烷	0.065	0.39	0.10	0.31
1,1-二氯乙烷	0.2	0.75	0.01	—	甲基环己烷	0.059	0.10	0.10	0.56
1,2-二氯丙烷	0.162	0.50	0.05	—	3-甲基己烷	0.057	0.11	0.09	—
1,2-二溴乙烷	0.158	0.21	0.02	—	2,2,4-三甲基戊烷	0.028	0.10	0.04	0.09
1,2,4-三氯苯	0.139	0.31	—	—	2,3,4-三甲基戊烷	0.027	0.08	0.03	0.18
反-1,3-二氯丙烯	0.123	0.37	0.62	—	2,2-二甲基丁烷	0.018	0.12	0.02	0.04
1,1-二氯乙烯	0.097	0.29	0.17	—	2-甲基庚烷	0.016	0.13	0.02	—
二氯二氟甲烷	0.094	0.25	—	—	3-甲基庚烷	0.010	0.02	0.01	—
氯乙烯	0.073	0.36	0.21	—	烯烃类合计	2.60	2.47	26.3	50.2
1,2-二氯苯	0.059	0.40	0.01	—	乙烯	1.57	1.49	14.2	13.4
1,3-二氯苯	0.042	0.29	—	—	丙烯	0.563	0.69	6.57	14.8
顺-1,2-二氯乙烯	0.038	0.28	—	—	反-2-丁烯	0.118	0.20	1.78	7.53
氯苯	0.034	0.09	0.01	—	1-丁烯	0.083	0.23	0.81	2.60
1,4-二氯苯	0.033	0.12	0.01	—	1,3-丁二烯	0.073	0.21	0.92	—
四氯乙烯	0.013	0.22	—	—	顺-2-丁烯	0.059	0.34	0.83	3.30
二氯甲烷	0.012	0.09	—	—	异戊二烯	0.040	0.25	0.42	3.96
三氯乙烯	0.008	0.05	0.01	—	反-2-戊烯	0.030	0.18	0.32	1.97
顺-1,3-二氯丙烯	0.007	0.05	0.03	—	1-己烯	0.026	0.16	0.14	0.95
1,1,2-三氯乙烷	0.005	0.05	—	—	1-戊烯	0.023	0.09	0.17	0.73
炔烃类合计	1.79	1.25	1.70	—	顺-2-戊烯	0.014	0.09	0.15	0.96
乙炔	1.79	1.25	1.70	—	TVOC	26.5	21.6	73.2	165.3

1) 2-甲基戊烷与 2,3-二甲基丁烷, 2,3-二甲基戊烷与 2-甲基己烷, 间-二甲苯与对-二甲苯在色谱图上无法分离; 谱图没有峰面积的组分统计时按照 0 值计算

图 1 显示了各类 VOCs 组分及 $\varphi(\text{TVOC})$ 的月均值变化。12 月 $\varphi(\text{TVOC})$ 月均值 (33.0×10^{-9}) 最高, 6 月 (17.1×10^{-9}) 最低, 冬季 (28.1×10^{-9}) 最高, 夏季 (23.2×10^{-9}) 最低, 与闫磊^[19] 观测到季节变化规律一致。烷烃和芳香烃对 $\varphi(\text{TVOC})$ 贡献最大, 二者最高月均值出现在冬季 (烷烃 1 月 18.8×10^{-9} , 芳香烃 12 月 9.33×10^{-9})。推测冬季大气边界层高度较低, 且易发生逆温现象, 环境容量被

显著压缩, 致使污染程度加剧。 $\varphi(\text{TVOC})$ 6 月均值为全年最低, 其中烯烃均值下降最显著, 推测与大气光化学反应强度大, 臭氧高有关。芳香烃 2 月均值降到全年最低, 尤其以二甲苯、甲苯、乙苯和 1,2,4-三甲苯月均值下降最明显。芳香烃主要来自溶剂使用过程, 与工业活动关系密切, 因此推测 $\varphi(\text{TVOC})$ 2 月月均值低与春节假期, 工业源排放量减少有关。

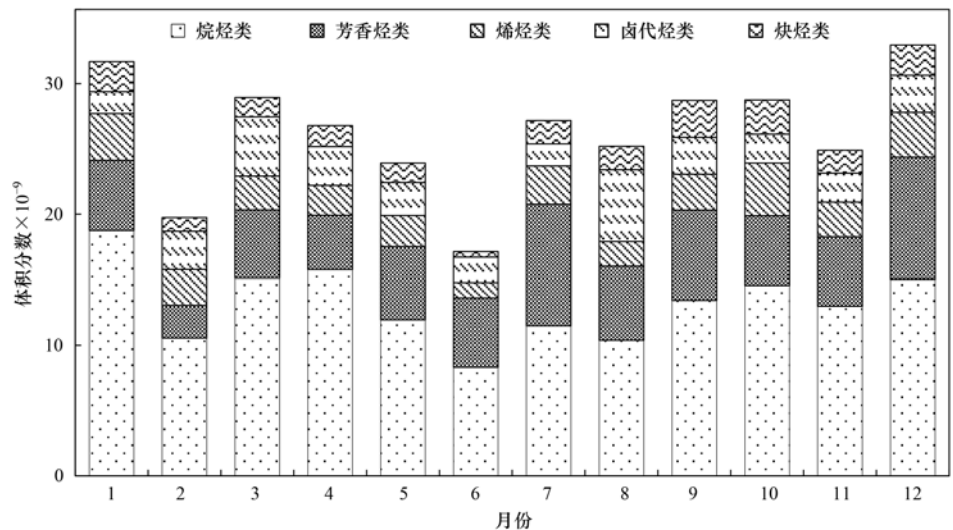


图 1 TVOC 及各类 VOCs 组分月均值
Fig. 1 Monthly average for volume concentration of TVOC and VOCs composition

图 2 为各类 VOCs 组分及 $\varphi(\text{TVOC})$ 全年日均值变化趋势。观测点大气 $\varphi(\text{TVOC})$ 日变化呈“U”型曲线, 晚间随着边界层降低和光化学反应停滞, TVOC 积累并维持较高的浓度, 白天随光照加强 TVOC 浓度下降, 说明观测点受光化学反应影响。14:00 ~ 15:00 TVOC 逐步上升, 此时源排放强度逐步超过光化学消耗速度。观测点受大气光化学反应和工厂排放共同影响。

为 73.15×10^{-9} , 其中烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃和炔烃的贡献率分别为 14.7%、35.9%、45.2%、1.8% 和 2.3%; 总 L_{OH} 年均值为 165.3 s^{-1} , 烷烃、烯烃和芳香烃的贡献率分别为 20.7%、30.4% 和 48.9%。烷烃对体积分数贡献率超过 50%, 但对 OFP 和 L_{OH} 的贡献率只有 14.7% 和 20.7%。烯烃和芳香烃对 OFP 和 L_{OH} 的贡献率分别达 35.9% ~ 45.2% 和 30.4% ~ 48.9%, 这是因为二者对 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率大, 化学反应活性较高。大气反应活性较高的组分有间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、甲苯、邻-二甲苯和乙苯。因此, 在制定本地臭氧污染控制政策时, 应重点关注芳香烃和烯烃, 其中二甲苯和甲苯体积分数高, 化学反应活性高, 可作为本区域优先控制排放物种。

2.3 VOCs 特征物变化特征

因 VOCs 组分种类繁多, 为便于比较, 仅统计 56 种 PAMS 组分。图 3 为每种组分在 56 种 VOCs 质量浓度之和中的占比情况, 其依次代表本研究、上海嘉定方泰^[22]、某汽车厂无组织排放^[9]、汽车喷涂原料^[23]、汽车厂喷涂废气催化燃烧处理^[24]及汽车厂喷涂废气活性炭吸附处理^[24]。

上海嘉定区的方泰站^[22] 代表一般大气环境状况, 与本研究站点距离很近, 通过比较两站 VOCs 组

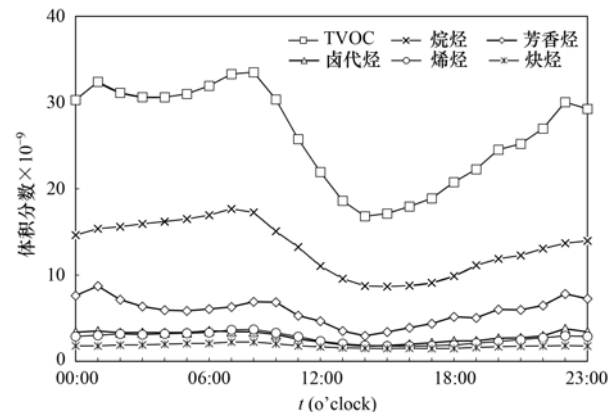


图 2 TVOC 及各类 VOCs 组分体积分数日变化曲线
Fig. 2 Diurnal variation curve for the concentration of TVOC and VOCs composition

2.2 大气 VOCs 化学反应活性

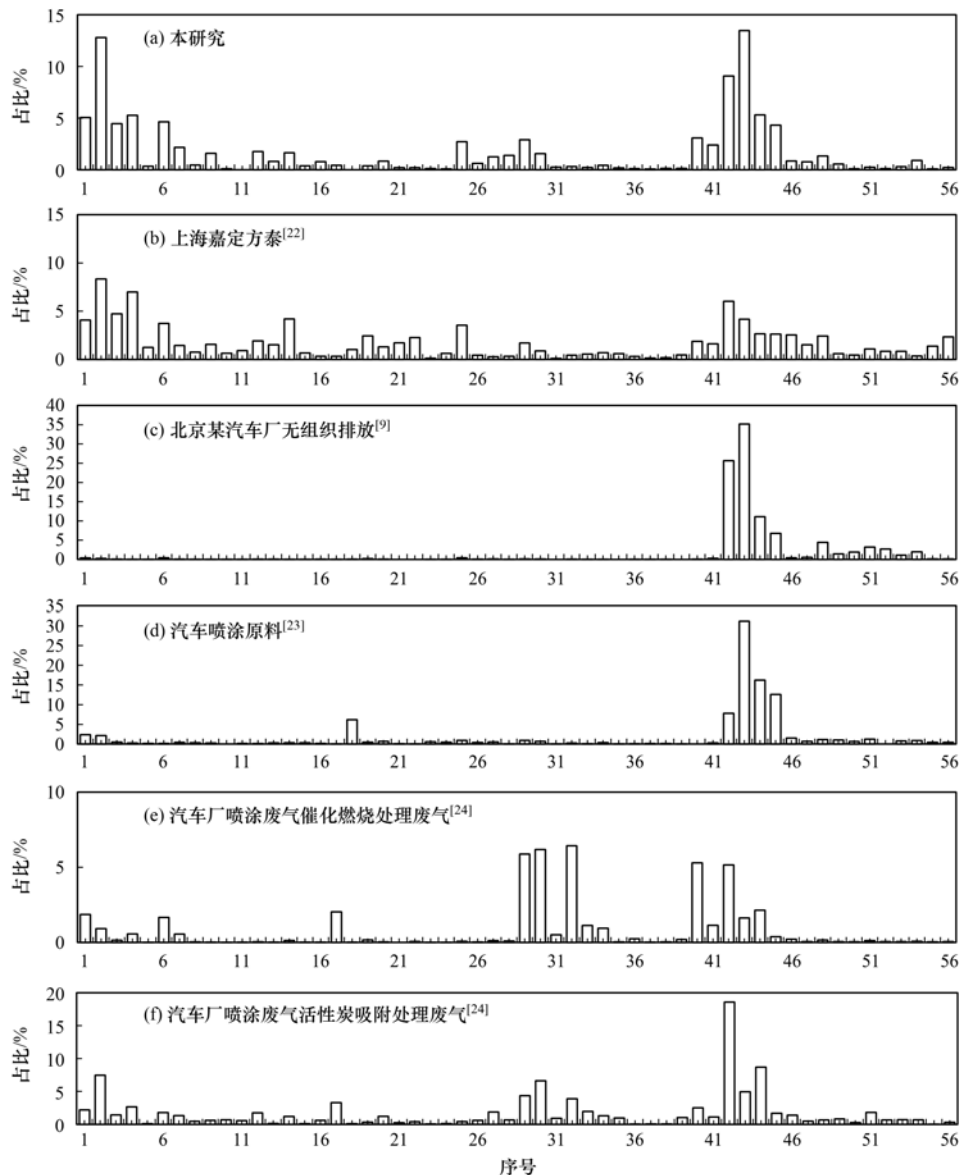
观测期间, 观测点大气 VOCs 的总 OFP 年均值

分差异可反映本研究站点周边污染源特征. 本研究[图 3(a)]与方泰站[图 3(b)]相比,有以下 3 点差异.

(1)两站检出烷烃单组分基本一致,本研究丙烷(2号)比方泰站明显偏高. 本研究在3月18日观测到一次污染事件,主要组分为丙烷(502.5×10^{-9})、异丁烷(547.1×10^{-9})和正丁烷(27.78×10^{-9}). 本研究以小时数据为单位,做皮尔森相关系数检验,发现丙烷与异丁烷有强相关性(皮尔森相

关系数 $r=0.843$, $P=0.00$),说明二者来源一致. 丙烷、异丁烷和正丁烷是液化石油气(LPG)排放的重要指标^[7,8]. 推测丙烷和异丁烷主要来自燃气使用源.

(2)本研究中芳香烃,如甲苯(42号)、二甲苯(43号和45号)和乙苯(44号)比方泰站高. 本研究中间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙苯和甲苯分别是方泰站(间/对-二甲苯 0.764×10^{-9} 、邻-二甲苯 0.480×10^{-9} 、乙苯 0.486×10^{-9} 和甲苯 $1.27 \times$



图中 VOCs 组分序号:1. 乙烷; 2. 丙烷; 3. 异丁烷; 4. 正丁烷; 5. 环戊烷; 6. 异戊烷; 7. 正戊烷; 8. 甲基环戊烷; 9. 环己烷; 10. 2,2-二甲基丁烷; 11. 2,3-二甲基丁烷; 12. 2-甲基戊烷; 13. 3-甲基戊烷; 14. 正己烷; 15. 甲基环己烷; 16. 2,3-二甲基戊烷; 17. 2,4-二甲基戊烷; 18. 2-甲基己烷; 19. 3-甲基己烷; 20. 正庚烷; 21. 2,2,4-三甲基戊烷; 22. 2,3,4-三甲基戊烷; 23. 2-甲基庚烷; 24. 3-甲基庚烷; 25. 正辛烷; 26. 正壬烷; 27. 正癸烷; 28. 正十一烷; 29. 乙烯; 30. 丙烯; 31. 1,3-丁二烯; 32. 1-丁烯; 33. 顺-2-丁烯; 34. 反-2-丁烯; 35. 异戊二烯; 36. 1-戊烯; 37. 顺-2-戊烯; 38. 反-2-戊烯; 39. 1-己烯; 40. 乙炔; 41. 苯; 42. 甲苯; 43. 间/对-二甲苯; 44. 乙苯; 45. 邻-二甲苯; 46. 苯乙烯; 47. 1,2,3-三甲苯; 48. 1,2,4-三甲苯; 49. 1,3,5-三甲苯; 50. 异丙苯; 51. 间-乙基甲苯; 52. 正丙苯; 53. 邻-乙基甲苯; 54. 对-乙基甲苯; 55. 间-二乙苯; 56. 对-二乙苯

图3 本研究和已有研究 VOCs 组成对比

Fig. 3 Comparison of VOCs composition between this study and previous studies

10^{-9})的2.5、1.3、1.6和1.2倍。本研究中间/对-二甲苯与邻二甲苯间($r=0.939, P=0.00$)及乙苯间($r=0.952, P=0.00$)具有强相关性,说明这3种 C_8 芳香烃来源一致。邻-乙基甲苯与对-乙基甲苯($r=0.893, P=0.00$)、正丙苯($r=0.870, P=0.00$)及1,2,4-三甲苯($r=0.926, P=0.00$)具有强相关性,对-乙基甲苯与正丙苯($r=0.759, P=0.00$)具有强相关性。说明这4种 C_9 芳香烃来源一致。以上8种芳香烃组分体积分数合计占总芳香烃的86%。北京某汽车厂无组织废气^[9][图3(c)]中VOCs主要组分有甲苯(42号)、二甲苯(43号和45号)和乙苯(44号),这一特征与本研究芳香烃类组分占比十分相似。油漆溶剂主要是脂肪烃和一定量芳香烃类,广泛用以代替松节油用于油漆中作溶剂。苯乙烯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯及乙苯主要与涂料及有机溶剂使用有关^[25]。乔月珍等^[23]测定了汽车喷涂油漆源谱成分[图3(d)],可以看出喷涂油漆原料主要含二甲苯、乙苯和苯乙烯,及少量三甲苯。由此推测,本研究芳香烃组分与涂装原料和稀释剂密切相关,很可能来自工厂涂装工序。但 C_9 芳香烃与 C_8 芳香烃间相关性不强($r<0.5$),表明 C_9 芳香烃与 C_8 芳香烃来源并不唯一,这些芳香烃组分可能来自不同工艺过程或不同车间。

(3)两站烯烃组分相似,本研究乙烯(29号)、丙烯(30号)和乙炔(40号)略高于方泰站。涂装作业产生废气有物理处理和化学处理两种处理方式。以吸附等物理方式处理的废气成分以原料组分为主。以氧化燃烧等化学方式处理的废气组分发生变化,成分更复杂,其中可能含有原料组分及其热分解物,并且还可能含燃料气的组分。莫梓伟等^[24]测定了汽车厂废气经过催化燃烧[图3(e)]和活性炭吸附处理[图3(f)]后废气成分,发现催化燃烧后废气

中烯烃类组分占比上升,主要污染组分为乙烯和丙烯。推测本研究中丙烯和乙烯,可能与周边工厂废气处理环节有关。

图4显示了3种卤代烃月均值变化情况。1,2-二氯乙烷和1,2-二氯丙烷的月均值变化小,表明组分有稳定排放源。相关性检验表明,1,2-二氯乙烷与正辛烷($r=0.575$)、间/对-二甲苯($r=0.530$)相关性中等,推测1,2-二氯乙烷来自 C_8 芳香烃溶剂使用过程。1,2-二氯丙烷与甲苯($r=0.543$)、正丁烷($r=0.590$)、反-2-丁烯($r=0.543$)和丙烯($r=0.466$)相关性中等,推测与废气处理工序有关。1,1,1-三氯乙烷是常见的金属器皿清洗剂^[26]。1,1,1-三氯乙烷与1,3,4-三甲苯($r=0.793$)、对-乙基甲苯($r=0.813$)及氯苯($r=0.742$)有较强相关性,其来源与 C_9 芳香烃溶剂使用相关。卤代烃种类繁多且用途广泛,因原料来源差异,导致源谱测定卤代烃组分差异较大,石田立^[27]在汽车制造企业无组织废气中测出1,2-二氯丙烷和二氯甲烷,莫梓伟等^[28]对3家汽车企业喷涂废气监测时,1家检出高比例的1,2-二氯丙烷,另外2家则未检出,调研发现该企业使用了1,2-二氯丙烷稀释剂。吴健等^[29]在测定涂料制造企业源谱时发现,二氯甲烷和1,2-二氯丙烷是某企业2号车间的特有排放。可见,对卤代烃类组分来源追溯必须结合原料调查。

2.4 VOCs 特征物比值分析

甲苯与苯的比值(即T/B比值)常用来判别污染源特征^[30,31]。一般认为苯化学性质稳定,具有明显背景值^[32]。在城市大气中,苯的主要来源是燃烧过程,如机动车尾气排放、生物质燃烧、燃煤过程等;甲苯除了来自机动车排放外,涂料和溶剂的使用也是其重要来源^[24]。有研究发现,汽车尾气中T/B比值为2,工业区的大气中测到的T/B比值为6.0

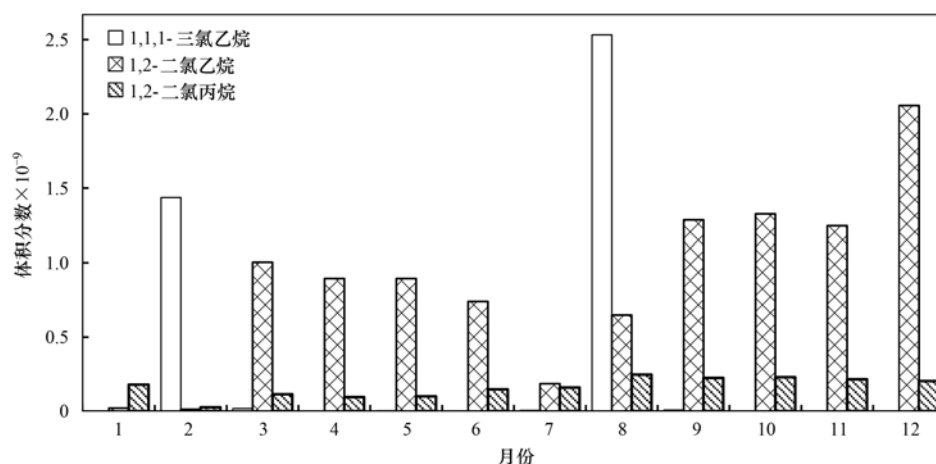
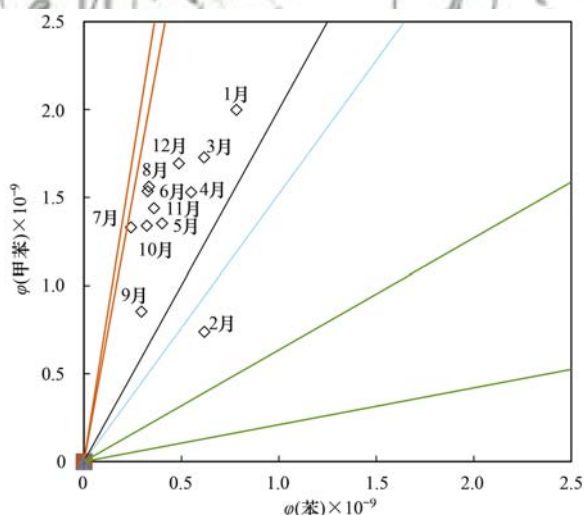


图4 卤代烃月均值变化

Fig. 4 Monthly averages of halogenated hydrocarbons

~6.9^[33,34],在隧道实验中 T/B 比值是 1.52^[35],生物质燃烧 T/B 比值为 0.21 ~ 0.635^[14]. 本研究 2019 年苯和甲苯的月均值,及工业排放、隧道实验及其他燃烧源文献中 T/B 比值见图 5. 本研究 T/B 比值年平均值为 3.75 ± 4.44 ,月均值波动范围为 1.20 ~ 5.52. 本研究年均值略高于方泰^[22],显示受汽车工业区溶剂污染源影响更大. 本研究 T/B 比值季节排序为夏(5.27) > 秋(4.02) > 春(3.48) > 冬(2.24),存在季节差异. 冬春季数据更接近隧道实验,夏秋季数据更接近工业排放. 夏秋季 T/B 比值升高与甲苯升高有关,甲苯为常见工业溶剂,气温升高,溶剂挥发变强,冬季则相反,甲苯挥发减弱,采暖等因素使得苯上升,因而冬春季 T/B 比值相对较低.

综合上海地区已有研究中 T/B 比值,本研究与嘉定方泰^[22] (3.14) 和青浦淀山湖^[14] (3.45) 十分接近,高于上海均值^[35] (2.37),以及浦东监测站^[14] (2.62)、静安^[14] (2.83)、浦东书院^[14] (2.24)、崇明^[14] (2.35)、奉贤^[19] (2.05) 和徐汇^[15] (2.04),仅比金山^[14] (4.78) 低. 2012 年冬和 2014 年春夏秋冬在青浦监测站观测到 T/B 比值 3.35^[36],与 2018 年在青浦淀山湖^[14] (3.45) 观测值差异不大,反映 T/B 比值较稳定,年际变化不大,而地理位置、季节和局地污染源的差异是 T/B 比值间差异较大的原因.



红线之间表示工业排放 (T/B 为 6 ~ 6.9); 黑线表示汽车尾气 (T/B = 2); 蓝线表示隧道实验 (T/B = 1.52); 绿线之间表示其他燃烧源 (T/B 为 0.21 ~ 0.64)

图 5 T/B 比值月均值散点图

Fig. 5 Mean value of T/B ratios during different seasons

不同 VOCs 物种的光化学年龄有差别,如乙烷和乙炔的光化学年龄分别为 2 ~ 3 个月和 12 ~ 17 d^[2],乙烷与乙炔比值 (E/E) 可用来表征大气气团的光化学年龄^[37]. 观测点的 E/E 比值年平均值为 1.42. 嘉定方泰为 1.88^[22],奉贤为 0.51^[19],徐汇为

2.70^[15]. 位于市中心的徐汇观测点周围无工业污染源, E/E 比值较高,气团老化明显. 奉贤观测点的西面和东北面为涉及石油化工、化学原料、溶剂、涂料和制药等产业的工业区,距离污染源近, E/E 比值最低,气团最新鲜,大气光化学年龄最短. 本研究 E/E 比值比方泰站略低,反映其大气光化学年龄短,距离工业污染源更近.

2.5 VOCs 污染源解析

使用统计软件 IBM SPSS Statistics 22,选取年均值较高,皮尔森相关系数大的 38 个组分,以单组分日均值为最小数据单元,进行因子分析. 共 703 组有效数据. 数据 Kaiser-Meyer-Olkin 度检验值为 0.864 (>0.7), Bartlett 球形度检验 $P=0$,数据满足因子分析法要求. 本研究在特征值大于 1 的前提下提取出 7 个因子作为主因子,共提取出 74.6% 的总变量.

从表 2 中可以看出,因子 1 中负载较高的是正戊烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、异戊烷、正丁烷、苯和甲苯等. 这与李文石^[38]检测到汽油车尾气成分特征组分十分相似. 异戊烷是典型的汽油挥发的示踪剂^[39,40]. 正戊烷和异戊烷是汽油车排放的典型示踪剂^[41,42]. 因子 1 为汽油尾气源. 因子 2 中二甲苯、乙苯、正辛烷和环己烷负载最高,乙苯和二甲苯是在工厂生产中的典型排放物^[30,43],结合前文分析,判断此为工厂涂装工艺稀释剂及清洗剂挥发,因子 2 为溶剂使用源 1. 因子 3 中三甲苯、邻-乙基甲苯、对-乙基甲苯及 1,1,1-三氯乙烷负载很高. 1,1,1-三氯乙烷为性能优良的清洗剂,还可作金属切削油的溶剂和含橡胶粘合剂的成分^[44]. 因子 3 定为溶剂使用源 2. 因子 4 中乙烷、苯、乙烯和乙炔负载最高. 燃烧排放区别于其他排放源的重要特征为乙炔、苯、乙烯和丙烯等燃烧产物所占的比例很大,而其他 VOCs 组分占比相对较低^[6]. 在城市大气中,苯主要来源于燃烧过程^[33]. 乙炔主要与不完全燃烧有关^[41,42],因子 4 可认为是燃烧源. 因子 5 中正十二烷、正壬烷和正癸烷负载最高. 长链烷烃 (如正壬烷、正癸烷和正十二烷) 可作为一般柴油车尾气的标志物^[45]. 结合站点周边常有大型货运车通过,因子 5 应为柴油使用源. 因子 6 反-1,3-二氯丙烯、1,1-二氯乙烯和正十一烷负载最高. 1,1-二氯乙烯用于制造合成纤维和粘胶剂等^[46]. 因子 6 为溶剂使用源 3. 因子 7 主要负载组分为异丁烷和丙烷,是 LPG/NG 的主要成分,因子 7 为燃气使用源.

从 VOCs 来源解析情况来看,污染源包括:汽车尾气源、溶剂使用源 (3 个)、燃烧源、柴油使用源

以及燃气使用源,各源占比依次为 19.4%、30.8%、11.0%、8.9% 和 4.5%。

表 2 因子分析结果

项目	因子						
	1	2	3	4	5	6	7
乙烷	0.716	— ¹⁾	—	—	—	—	—
乙烯	0.787	—	—	—	—	—	—
丙烷	0.325	—	—	—	—	0.317	0.827
丙烯	—	—	—	0.856	—	—	—
异丁烷	—	—	—	—	—	—	0.901
正丁烷	0.508	—	—	0.713	—	—	—
乙炔	0.698	—	—	—	—	—	—
反-2-丁烯	—	—	—	0.949	—	—	—
1-丁烯	—	—	—	0.962	—	—	—
异戊烷	0.550	—	—	—	0.483	—	—
正戊烷	0.846	—	—	—	—	—	—
3-甲基戊烷	0.666	0.433	—	—	—	—	—
正己烷	0.445	0.418	—	0.540	0.332	—	—
2-甲基戊烷+2,3-二甲基丁烷	0.748	0.347	—	—	0.318	—	—
苯	0.796	—	—	—	—	—	—
正庚烷	0.711	—	—	—	—	—	—
甲苯	0.660	0.397	—	—	—	0.326	—
正辛烷	0.508	0.567	—	—	0.334	—	—
乙苯	—	0.831	0.367	—	—	—	—
正壬烷	—	—	—	—	0.776	—	—
邻-二甲苯	—	0.827	0.306	—	—	—	—
邻-乙基甲苯	—	—	0.752	—	—	0.306	—
1,3,5-三甲基苯	—	—	0.913	—	—	—	—
1,2,4-三甲基苯	—	0.340	0.880	—	—	—	—
1,2,3-三甲基苯	—	0.353	0.556	—	0.394	—	—
1,2-二氯乙烷	0.412	0.494	—	0.368	0.379	—	—
间/对-二甲苯	—	0.862	0.324	—	—	—	—
正十二烷	—	—	—	—	0.764	—	—
1,1,1-三氯乙烷	—	—	0.789	—	—	—	—
1,2-二氯丙烷	—	—	—	0.576	—	—	—
反-1,3-二氯丙烯	0.363	—	—	—	(0.327)	0.714	—
1,1-二氯乙烯	—	—	—	—	—	0.855	—
环戊烷	0.641	—	—	—	—	—	—
正十一烷	—	—	—	—	0.353	0.732	—
对-乙基甲苯	—	0.330	0.883	—	—	—	—
甲基环戊烷	0.415	0.377	—	—	0.327	—	—
正癸烷	—	—	—	—	0.577	—	—
环己烷	—	0.507	—	—	—	—	—
方差贡献率/%	19.4	12.2	11.7	11.0	8.9	6.9	4.5
累计方差贡献率/%	19.4	31.6	43.3	54.3	63.2	70.1	74.6

1) “—”表示系数绝对值小于 0.3

3 结论

(1) 上海北部某汽车工业园区边界大气总 VOCs 体积分数为 26.53×10^{-9} , 其中烷烃占比为 50.2%、烯烃占比为 9.8%、芳香烃占比为 22.4%、卤代烃占比为 10.8% 和炔烃占比为 6.8%。总 VOCs 体积分数冬季 (28.1×10^{-9}) 最高, 夏季 (23.2×10^{-9}) 最低的。对体积分数贡献最大的前 10 位组分

为: 丙烷、乙烷、间/对-二甲苯、乙炔、乙烯、甲苯、正丁烷、异丁烷、异戊烷和 1,2-二氯乙烷。

(2) 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%。大气 VOCs 总 L_{OH} 为 $165.3 s^{-1}$, 烷烃、烯烃和芳香烃的贡献率分别为 20.7%、30.4% 和 48.9%。化学反应活性贡献率较高的组分有间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、甲苯和邻-二甲苯。

(3) 与环境站点比较, 园区大气 VOCs 中 86% 芳香烃组分来自汽车涂装工序, 主要烷烃和烯烃组分也与园区工业生产排放相关。特征物种比值表明, 观测点气团新鲜, 靠近污染源。大气 VOCs 来源分别是汽车尾气源 (19.4%)、溶剂使用源 (30.8%)、燃烧源 (11.0%)、柴油使用源 (8.9%) 以及燃气使用源 (4.5%)。

参考文献:

[1] 李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 PM_{2.5} 与臭氧污染协同控制策略研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1763-1778.
Li H, Peng L, Bi F, et al. Strategy of coordinated control of PM_{2.5} and ozone in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1763-1778.

[2] 刘芮伶, 翟崇治, 李礼, 等. 重庆主城区夏秋季挥发性有机物(VOCs)浓度特征及来源研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1260-1267.
Liu R L, Zhai C Z, Li L, et al. Concentration characteristics and source analysis of ambient VOCs in summer and autumn in the urban area of Chongqing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(4): 1260-1267.

[3] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, et al. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1582-1596.

[4] 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. 36-267.

[5] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(12-14): 2063-2101.

[6] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物(VOCs)排放源成分谱研究进展[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2179-2189.
Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(9): 2179-2189.

[7] Blake D R, Rowland F S. Urban leakage of liquefied petroleum gas and its impact on Mexico City air quality [J]. Science, 1995, 269(5226): 953-956.

[8] An J L, Zhu B, Wang H L, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, 97: 206-214.

[9] Yuan B, Shao M, Lu S H, et al. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(15): 1919-1926.

[10] 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.
- [11] 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 等. 成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5323-5333.
- Deng Y Y, Li J, Li Y Q, *et al.* Characteristics of ambient VOCs at the Shuangliu site in Chengdu, China, during summer and autumn[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5323-5333.
- [12] 王雨, 王丽涛, 杨光, 等. 邯郸市秋季大气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(7): 1134-1142.
- Wang Y, Wang L T, Yang G, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds in autumn in Handan City, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(7): 1134-1142.
- [13] 林燕芬, 段玉森, 高宗江, 等. 基于 VOCs 加密监测的上海典型臭氧污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 126-133.
- Lin Y F, Duan Y S, Gao Z J, *et al.* Typical ozone pollution process and source identification in Shanghai based on VOCs intense measurement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 126-133.
- [14] 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.
- [15] 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.
- Lou 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.
- [16] 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.
- [17] 王倩. 2019 年 5 月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2555-2564.
- Wang Q. Chemical characteristics and sources of volatile organic compounds in Shanghai during an ozone and particulate pollution episode in May 2019 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2555-2564.
- [18] 黄烯茜, 廖浩祥, 周勇, 等. 上海城郊大气挥发性有机物污染特征、活性组分及风险评估[J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(2): 194-198, 203.
- Huang X Q, Liao H X, Zhou Y, *et al.* Volatile organic compounds in suburban atmosphere in Shanghai: pollution characterization, activity and health risk [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, **42**(2): 194-198, 203.
- [19] 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.
- [20] 上海市生态环境局. 汽车零部件制造业(涂装)挥发性有机物控制技术指南[EB/OL]. <https://sthj.sh.gov.cn/fa/cms/upload/uploadFiles/2020-04-16/file5136.pdf>, 2020-07-20.
- [21] Carter W P L. Peer review of the SAPRC-07 chemical mechanism: response to reviewers' comments. Prepared for California Air Resources Board Contract 07-730 [EB/OL]. <http://www.docin.com/p-549005782.html>, 2019-11-20.
- [22] 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.
- [23] 乔月珍. 上海市机动车和涂料 VOCs 源成分谱及其大气反应活性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- Qiao Y Z. Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds (VOCs) from vehicle exhaust and paints [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [24] 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) [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- [25] Li G H, Wei W, Shao X, *et al.* A comprehensive classification method for VOC emission sources to tackle air pollution based on VOC species reactivity and emission amounts [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **67**: 78-88.
- [26] 郑棚罡. 黄河三角洲大气卤代烃污染特征与来源研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- Zheng P G. Characteristics and sources of halogenated hydrocarbons in the Yellow River Delta region [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [27] 石田立. 某汽车制造企业恶臭污染特征及来源分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- Shi T L. Odor pollution characteristics and source analysis in one automobile making [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [28] 莫梓伟, 陆思华, 李悦, 等. 北京市典型溶剂使用企业 VOCs 排放成分特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 374-380.
- Mo Z W, Lu S H, Li Y, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent use factories in Beijing [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 374-380.
- [29] 吴健, 高松, 陈曦, 等. 涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1582-1588.
- Wu J, Gao S, Chen X, *et al.* Source profiles and impact of volatile organic compounds in the coating manufacturing industry [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1582-1588.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Duan J C, Tan J H, Yang L, *et al.* Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing [J]. Atmospheric Research,

- 2008, **88**(1): 25-35.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 张露露, 蒋卫兵, 张元勋, 等. 上海市青浦区大气挥发性有机化合物的特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3550-3561.
- Zhang L L, Jiang W B, Zhang Y X, *et al.* The characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Qingpu Shanghai, China[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3550-3561.
- [37] 乔月珍, 陈凤, 赵秋月, 等. 2015 年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2062-2068.
- Qiao Y Z, Chen F, Zhao Q Y, *et al.* Composition and atmospheric reactivity of ambient volatile organic compounds (VOCs) in the urban area of Nanjing, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2062-2068.
- [38] 李文石, 沙青娥, 袁自冰, 等. 珠江三角洲轻型汽油车匀速状态挥发性有机物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 243-251.
- Li W S, Sha Q E, Yuan Z B, *et al.* Emission characteristics of VOCs from light-duty gasoline vehicles at constant speed in the Pearl River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 243-251.
- [39] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [40] Geng F H, Zhang Q, Tie X X, *et al.* Aircraft Measurements of O₃, NO_x, CO, VOCs, and SO₂ in the Yangtze River Delta region[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(3): 584-593.
- [41] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2624-2639.
- [42] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(38): 5005-5014.
- [43] 王鸣, 陆思华, 陈文泰, 等. 基于城市大气挥发性有机物特征分析的数据质量评估方法及案例[J]. 中国环境监测, 2019, **35**(2): 13-22.
- Wang M, Lu S H, Chen W T, *et al.* Evaluation of ambient volatile organic compounds measurement data based on internal consistency test[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, **35**(2): 13-22.
- [44] 顾翼东, 夏炎. 化学词典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1989.
- [45] 区家敏, 冯小琼, 刘郁葱, 等. 珠江三角洲机动车挥发性有机物排放化学成分谱研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 826-834.
- Ou J M, Feng X Q, Liu Y C, *et al.* Source characteristics of VOCs emissions from vehicular exhaust in the Pearl River Delta region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(4): 826-834.
- [46] 马世昌. 有机化合物辞典[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1988.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)