

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期

Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)

植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)

基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)

不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)

北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)

武汉冬季大气 PM_{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)

运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)

中国东部冷锋推进中的 PM_{2.5} 三维结构变化特征 牟南南, 朱彬, 卢文 (85)

粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)

西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)

拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)

杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)

上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 金丹 (132)

铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O₃ 和 SOA 形成势分析 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)

电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)

不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)

淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)

昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)

城市路面积尘微塑料污染特征 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)

塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)

赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)

无定河流域地表地下水的水化学特征及控制因素 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)

白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 (230)

九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)

北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)

城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)

苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)

苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)

信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)

三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)

李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)

岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)

宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)

快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)

长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)

洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)

基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)

三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 通量支干流对比及影响机制初探 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)

功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb²⁺ 的吸附行为 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 (387)

铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)

沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)

温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)

填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)

基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)

浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)

农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)

基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)

调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)

设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)

电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)

雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)

重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)

长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)

土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)

化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)

秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)

全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 闫文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)

秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用

金丹

(上海市环境监测中心, 上海 200235)

摘要: 为研究上海市夏季臭氧高发季节大气 VOCs 在臭氧生成中作用, 选取 2018 年 5~8 月大气臭氧较高的时段, 在淀山湖科学观测研究站对 103 种挥发性有机物、臭氧和氮氧化物等环境污染物进行观测. 结果表明, 上海臭氧高发季节大气平均 φ (VOCs) 为 32.7×10^{-9} , 羰基化合物是 VOCs 的主要组分, 所占质量分数达 35.0%. 羰基化合物中甲醛体积分数最高, 其次是丙酮, 占 12 种测量羰基化合物总量的 82.8%. 5 月环境空气的化学反应活性最强, 总的臭氧生成潜势 (OFP) 为 $337.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 甲醛贡献率最大. 烷烃、烯烃和芳香烃的日变化呈现夜高昼低规律, 在早晨出现小峰值, 与交通排放影响有关; 而醛酮类日变化呈现昼高夜低规律, 与光化学反应的二次生成过程有关. OBM 模拟结果显示, 5~6 月属于臭氧生成的 VOCs 控制区, 7~8 月属于过渡区.

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 大气; 臭氧 (O_3); 光化学反应活性; 臭氧生成潜势 (OFP)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0132-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202104012

Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb

JIN Dan

(Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235, China)

Abstract: In order to study the role of VOCs in the formation of ozone during the high ozone season in summer in Shanghai, 103 volatile organic compounds, ozone, and nitrogen oxides were measured at state ecology and environment scientific observation and research station for the Yangtze River Delta at Dianeshan Lake from May to August 2018. The average volume fraction of VOCs was 32.7×10^{-9} during the high ozone season in Shanghai. Carbonyl compounds were the main components of VOCs, accounting for 35.0%. Among the carbonyl compounds, the volume fraction of formaldehyde was the highest, followed by acetone, accounting for 82.8% of the total carbonyl compounds. The chemical reaction activity of ambient air was the strongest in May, and the total ozone formation potential (OFP) was $337.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Formaldehyde had the highest contribution. The examination of the diurnal variations in alkanes, alkenes, and aromatics revealed higher average concentrations at nighttime than at daytime, with a small peak in the morning, which was related to the impact of traffic emissions. Aldehydes and ketones varied diurnally by having higher average concentrations during the daytime than those at nighttime, which was related to the secondary formation process of photochemical reactions. The observation-based model (OBM) showed that O_3 formation was in a VOC-limited regime from May to June and in a transition regime from July to August.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); atmosphere; ozone (O_3); photochemical reactivity; ozone formation potential (OFP)

随着我国城市化、工业化进程的加快和能源消耗量的持续增加, 以臭氧 (ozone, O_3) 和细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 为代表的二次污染已成为我国很多地区日益严峻的大气环境问题^[1~3]. 挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 作为大气光化学反应的“燃料”, 在 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 二次生成过程中起着关键作用^[4,5]. 环境大气中 VOCs 的化学组成十分复杂, 主要包括非甲烷烃类 (NMHCs)、含氧有机物 (OVOCs)、卤代烃、含氮有机物和含硫有机物等. 羰基化合物包括醛类和酮类, 对活性自由基循环和二次污染物生成具有重要影响^[6~8].

近年来, 我国城市及区域性 O_3 超标污染现象加剧, 自然排放、人为源以及大气化学生成的 NMHCs 和氮氧化物 (NO_x) 等对地面 O_3 污染有显著影响. VOCs 作为大气 O_3 重要前体物, 在经济发达区域开展了一些前体物在 O_3 生成中的影响研究, 为城市及区域性 O_3 防控提供思路. 如 Zhang 等^[9] 和刘奇琛等^[10] 对北京的大气挥发性有机物进行了研究, 发现将北京地区 O_3 作为空气质量目标时, 需要加快活性

VOCs 的减少, 同时要与 NO_x 协同防控. 王雨等^[11] 分析了邯郸市 56 种 VOCs 质量浓度水平、时间变化特征和化学反应活性, 发现烯烃和芳烃对 O_3 的产生占主导地位. 乔月珍等^[12] 和杨笑笑等^[13] 对南京市 VOCs 组成特征和反应活性的研究表明, 夏季 O_3 生成对 VOCs 敏感, 城区大气 VOCs 主要受机动车排放影响, 丙烯、乙烯和二甲苯等苯系物是活性最高的 VOCs 物种. 林旭等^[14] 的研究表明, 不同功能区中周边工业区总 VOCs 浓度整体高于周边居民区, 夜间更为显著. 陈长虹等^[15] 的研究对上海市城区 56 种 VOCs 的年变化特征进行了分析, 发现 VOCs 的关键活性组分是二甲苯、甲苯、乙苯、乙烯、丙烯、反-2-丁烯和异戊二烯. 林燕芬等^[16] 的研究基于 VOCs 手工监测数据, 探讨了上海典型臭氧污染过程特征, 并对污染过程的成因进行了分析. 也有多名

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-06-01

基金项目: 上海市科委项目 (19ZD1205000, 20DZ1204000)

作者简介: 金丹 (1983~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气环境挥发性有机物, E-mail: jindan@sheemc.cn

学者对珠三角地区的大气光化学活性做了系统研究^[17~20],发现以广州市、珠海市为代表的珠江三角洲大气 VOCs 呈区域性污染特征,各大气功能区 VOCs 的浓度水平和组成特征差别明显。

本研究利用淀山湖站点 103 种大气 VOCs、O₃、NO_x 和 CO 等自动监测资料,基于 OBM 观测模型,开展 2018 年夏季臭氧高发季节大气 VOCs 污染特征、日变化趋势及臭氧敏感性分析,这对于理解该地区臭氧污染特征及其形成机制具有重要意义,以期为制定区域臭氧污染控制对策提供技术支撑。

1 材料与方法

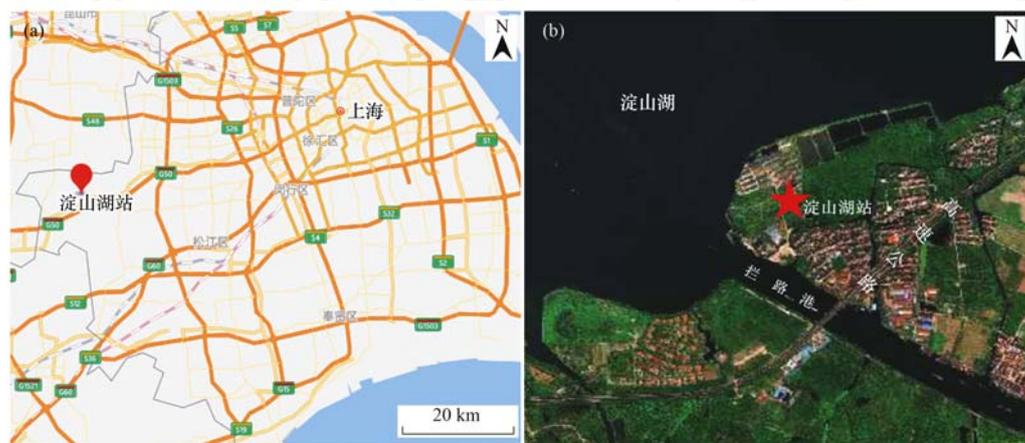
1.1 观测站点

淀山湖站设置在上海淀山湖科学观测研究站楼顶(如图 1),采样口距离地面的高度约为 20 m。淀山湖站位于上海西部,地处苏浙沪交界处,跨省传输影响显著^[21];同时淀山湖站处于上海夏季主导风向的下风向,受上海市区污染物和二次生成的影响,因此本观测站点可以代表区域大气复合污染特点。

观测期为 2018 年臭氧高发季的 5~8 月。

1.2 仪器与分析方法

VOCs 观测采用武汉天虹公司生产的 TH-300B 大气挥发性有机物快速在线监测系统,环境空气样品采用双路捕集双路分离检测系统,时间分辨率为 1 h。环境空气在进样口分成两路,一路样品气体在 -50℃ 下冷凝除水后,通过 CO₂ 吸附管除去二氧化碳,在 -150℃ 下用 PLOT 毛细管柱捕集 C2~C5 碳氢化合物;另外一路样品气体在 -20℃ 下冷凝除水后,在 -150℃ 下用钝化空毛细管柱捕集 C5~C12 碳氢化合物、卤代烃和含氧化合物。采样结束后,捕集管快速升温至 120℃,热脱附 VOCs,然后由氦气分别将热脱附的 VOCs 带入两个色谱柱进行分离,C2~C5 碳氢化合物由 FID 检测器进行定性定量分析,C5~C12 碳氢化合物、卤代烃和含氧化合物由 MS 进行定性定量分析^[22]。GC-MS/FID 可检测出 102 种 VOCs 物种,包含烷烃 29 种,烯烃和炔烃共 13 种,芳香烃 16 种,羰基化合物 11 种,卤代烃 31 种和其他 2 种。



(a) 地理位置; (b) 周边环境

图 1 观测站点的地理位置及周边环境

Fig. 1 Location of observation site and the surrounding environment

甲醛观测采用由德国 Aero-Laser 公司生产的 AL4021 甲醛分析仪,检测原理是基于甲醛与乙酰丙酮(2,4-戊二酮)和氨水的液相反应。该反应生成 3,5-二乙酰基-1,4-二氢吡啶(DDL),使用 410 nm LED 紫外光激发 DDL 获得荧光信号,用光电倍增管检测 DDL 在 510 nm 处释放出的强荧光。

为了保证观测数据的有效性和可靠性,观测期间 VOCs 分析仪每日 00:00 进行日校准检查,通入体积分数为 4×10^{-9} 的 PAMS 标准气体,确保通标结果与理论值偏差在 $\pm 20\%$ 以内;5 月和 7 月各进行一次 5 点工作曲线校准,校准气体为美国环保署认可的 TO15(Linde)和 PAMS 混合气体,校准时相关系数均在 0.995 以上;每月至少完成一次多点标

定和空白试验。甲醛分析仪通过 5 个不同浓度的标准溶液进行半自动校准,校准时相关系数在 0.999 以上;每次更换反应溶液进行零点、跨度校准以及多点校验。

1.3 OBM 模型

相对增量反应性(relative incremental reactivity, RIR)是评价臭氧前体物削减对臭氧生成效果的影响的一个指标,通过 OBM 模型模拟^[23,24]。OBM 模型是一个简单的盒子模型。OBM 模型的第一步就是假设盒子模型内污染物充分混合,在部分物种(如 O₃、CO、NO_x 和 VOCs)实测逐时浓度数据的约束下,模拟大气污染过程,计算未观测物种(如自由基)的浓度随时间的变化,反推 NO_x 和 VOCs 的源效应;第

第二步,假设源效应的削减,重新计算物种浓度随时间的变化,看臭氧生成潜势结果有何差异,计算不同臭氧前体物的相对增量反应活性(RIR),如式(1)所示,在给定气团下,加入或去除单位特定前体物(VOCs或NO_x)所产生的臭氧生成速率或者浓度的变化与基准状况下的比值。

$$\text{RIR}(X) = \frac{P_{\text{O}_3\text{-NO}} \cdot (X) - P_{\text{O}_3\text{-NO}} \cdot (X - \Delta X)}{P_{\text{O}_3\text{-NO}} \cdot (X)} \cdot \frac{\Delta S(X)/S(X)}{\Delta S(X)/S(X)} \quad (1)$$

式中, $P_{\text{O}_3\text{-NO}}$ 为臭氧生成潜势,是利用 OBM 模型计算出白天(07:00-19:00)12 h 内的臭氧生成量, X 为特定前体物组分, ΔX 为由于假设的源效应变化造成物种 X 浓度的变化量, $S(X)$ 为在 12 h 内物种的排放总量, $\Delta S(X)$ 为假设的源效应变化造成排放总量的变化。

1.4 VOCs 化学活性

不同 VOCs 物种具有不同的大气反应机制和反应速率,因此显示出不同的反应活性。VOCs 的 ·OH 反应活性和增量反应性是常用来衡量 VOCs 反应活性的方法。

通常用大气 ·OH 的消耗速率来估算各 VOCs 物种的化学活性。现在的研究中多采用最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)衡量 VOCs 的反应活性和它们对臭氧生成的贡献能力。臭氧生成潜势(ozone formation potentials, OFPs)便是基于 MIR 来量化 VOCs 对臭氧生成贡献的指标,定义为多种痕量组分的大气浓度与其 MIR 的乘积的加和:

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

式中, $[\text{VOC}]_i$ 为观测到的 VOC 物种 i 的浓度; MIR_i 是该 VOCs 在臭氧最大增量反应中的臭氧系数^[25]; OFPs 说明该地区大气 VOCs 具有的臭氧生成的最大能力,实际对臭氧生成的贡献量还受当地 NO_x 浓度水平、·OH 浓度和其他污染气象条件等制约。根据不同痕量组分对 OFPs 的贡献率的大小识别关键活性组分作为控制近地面臭氧浓度的优先考虑物种。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 体积分数水平及化学组成

观测期间淀山湖站 103 种平均 $\varphi(\text{VOCs})$ 为 32.7×10^{-9} , 日均 $\varphi(\text{VOCs})$ 在 $12.4 \times 10^{-9} \sim 76.4 \times 10^{-9}$ 之间, 小时 $\varphi(\text{VOCs})$ 最高达 113.5×10^{-9} 。观测期间, 羰基化合物是淀山湖站 VOCs 主要组分, 质量分数 35.0%; $\omega(\text{烷烃})$ 、 $\omega(\text{卤代烃})$ 、 $\omega(\text{芳香烃})$ 、

$\omega(\text{烯烃})$ 、 $\omega(\text{乙炔})$ 和 $\omega(\text{其他组分})$ 为 24.0%、18.1%、9.7%、9.4%、2.2% 和 1.4%。平均 $\varphi(\text{甲醛})$ 、 $\varphi(\text{丙酮})$ 、 $\varphi(\text{氯甲烷})$ 、 $\varphi(\text{甲苯})$ 、 $\varphi(\text{乙烷})$ 分别为 5.4×10^{-9} 、 4.2×10^{-9} 、 1.8×10^{-9} 、 1.6×10^{-9} 和 1.5×10^{-9} , 体积分排名前 5 名的物种占总平均 $\varphi(\text{VOCs})$ 的 44.2%, 是观测期间环境空气中含量最为丰富的 VOCs。

淀山湖站臭氧高发季节 VOCs 体积分及化学组分逐月的变化情况如图 2 所示, 2018 年 5~8 月平均 $\varphi(\text{VOCs})$ 逐月下降, 5 月的月均 $\varphi(\text{VOCs})$ 最高, 达 45.2×10^{-9} 。从各组分的质量分数来看, 每个月各化学组成的质量分数情况变化不大。 $\omega(\text{烷烃})$ 约为 21.3%~26.7%, 8 月其质量分数最高, 其次是 5 月; $\omega(\text{烯烃})$ 约为 7.8%~11.7%, 7 月其质量分数最高, 其次是 5 月; $\omega(\text{乙炔})$ 约为 1.9%~2.7%; $\omega(\text{芳香烃})$ 约为 8.8%~10.8%; $\omega(\text{卤代烃})$ 为 13.7%~19.4%, 5~6 月其质量分数最高; $\omega(\text{羰基化合物})$ 约为 30.3%~39.5%, 6 月其质量分数最高, 5 月最低。

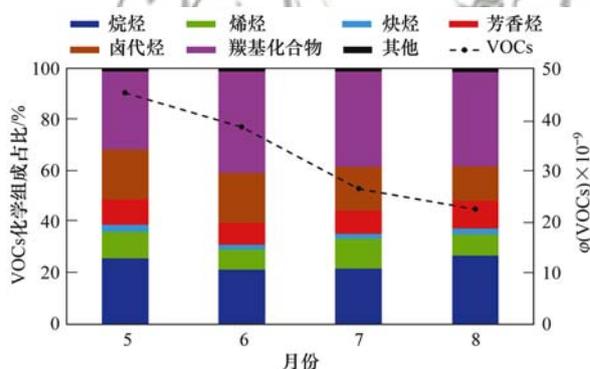


图 2 淀山湖站臭氧高发季节 $\varphi(\text{VOCs})$ 及化学组成月度变化
Fig. 2 Monthly variation in $\varphi(\text{VOCs})$ and chemical composition during the high ozone season at Dianshan Lake Station

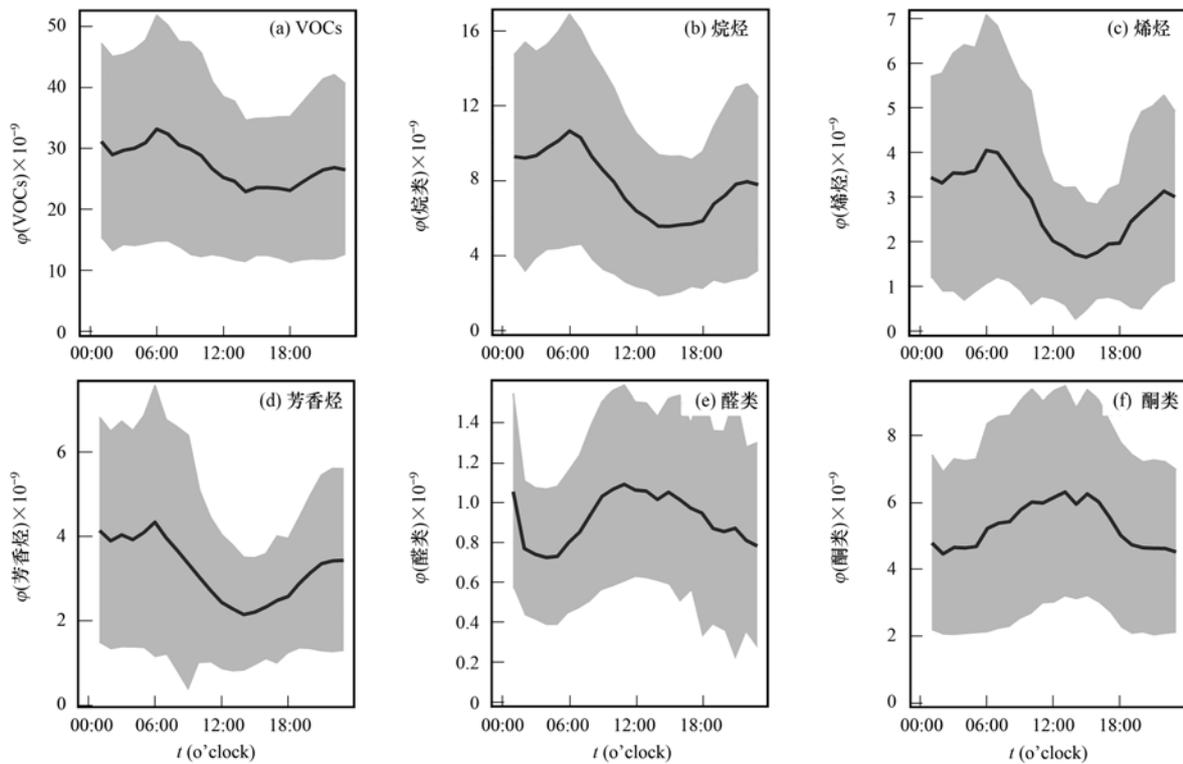
2.2 VOCs 的日变化特征

图 3 给出了淀山湖站 2018 年 5~8 月期间主要 VOCs 组分的日变化情况。从各组分的日变化情况来看, 烷烃、烯烃和芳香烃的日变化与 VOCs 的日变化一致, 呈现夜间高白天低的变化趋势; 而醛类与酮类的日变化则相反, 呈现白天高夜间低的特征。从 VOCs 的日变化来看, 其体积分变化呈现夜间高白天低(10:00~16:00)的变化趋势, 极小值出现在下午 14:00~15:00。夜间 $\varphi(\text{VOCs})$ 显著高于白天, 但在早晨 07:00 左右出现一个小峰值, 与交通高峰时间基本一致, 体现了交通排放对淀山湖站 VOCs 的影响。

VOCs 夜高昼低的日变化规律以及醛酮类昼高夜低的日变化规律主要是因为早晨交通、工业等人类活动频繁, 由于一次排放使得 VOCs 迅速增加。随

着紫外辐射和湍流加强,大气光化学反应程度加剧, $\varphi(\text{VOCs})$ 逐渐下降,而醛酮类由于光化学反应的二次生成过程,导致其体积分数不断积累;傍晚光化学反应逐步停止,并伴随交通晚高峰的到来, $\varphi(\text{VOCs})$ 开始回升,而醛酮类的二次生成停止,醛

酮类体积分数开始逐步下降;入夜后,较低的大气边界层容易形成逆温层,有利于 VOCs 的累积,使其体积分数维持在较高值范围之内.由醛类和酮类的日变化情况初步判断淀山湖站的醛酮类主要来自于二次生成过程.



实线表示组分体积分数均值,阴影表示每小时组分体积分数的标准偏差

图3 淀山湖站臭氧高发季 VOCs 组分的日变化

Fig. 3 Diurnal variation in VOCs during the high ozone season at Dianshan Lake Station

图4给出了主要 VOCs 物种的日变化情况,包括异戊烷、甲醛、丙酮、异戊二烯、甲基乙烯基酮(MVK)和甲基丙烯醛(MACR).从日变化曲线来看,异戊烷的日变化整体呈现白天低夜间高的趋势;甲醛、丙酮、异戊二烯、MVK和MACR呈现白天高夜间低的趋势,但各个物种之间也有所不同.

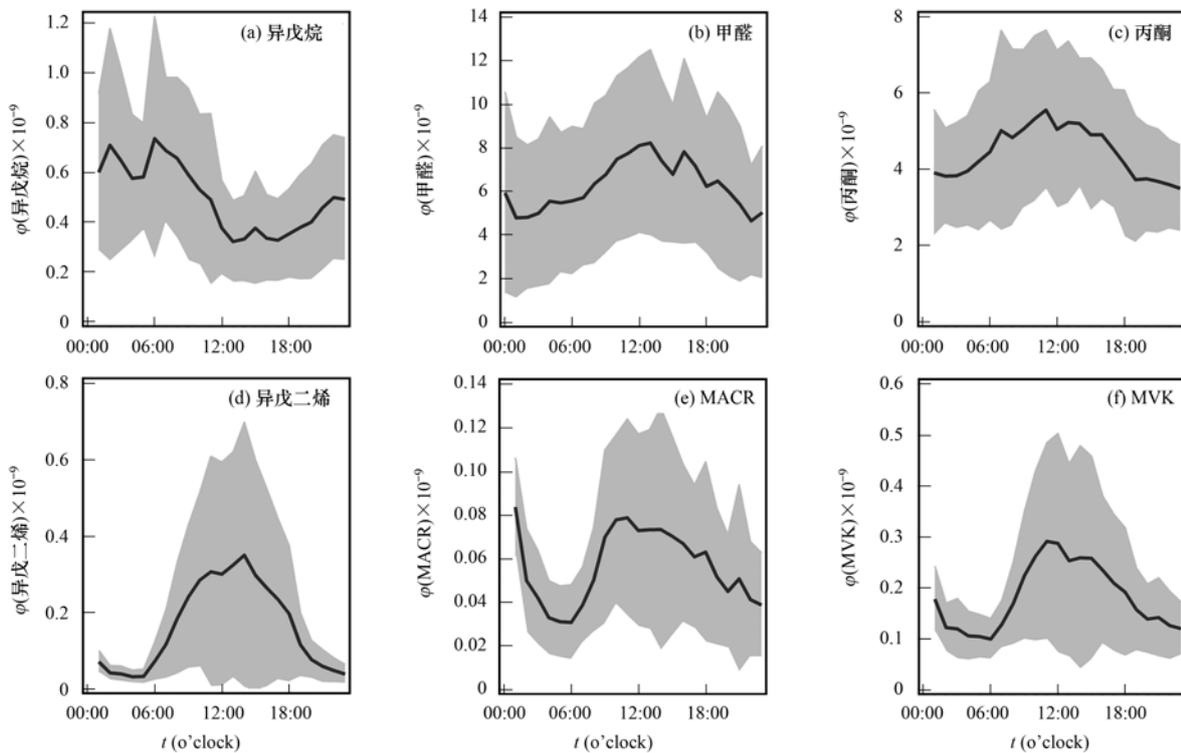
异戊烷的日变化显示其高值主要出现在 07:00 左右及凌晨 02:00 左右. 07:00 正值早高峰,此时段受机动车尾气排放的影响显著; 22:00 至次日凌晨 03:00 左右的高值可能受到工业排放如石油化工业等的影响.

甲醛和丙酮是两种最重要的物种,占 12 种测量羰基化合物体积分数的 82.8%. 观测期间,甲醛的日变化曲线与丙酮相近,呈现夜间低、白天高的日变化特征. 甲醛的日变化特征与干沉降、扩散及与 $\text{NO}_3\cdot$ 反应的去除过程有关,在中午 13:00 前后达到体积分数峰值,说明二次来源对其有重要的贡献;丙酮在夜间的体积分数变化不大,由于随后新鲜排放的贡献和二次生成作用增强,丙酮体积分数迅速

上升,在中午 11:00 左右达到一天内的最高值,由于午后前体物体积分数的降低和丙酮去除速率的加快,丙酮的体积分数开始逐步下降.

异戊二烯日变化高峰持续时间较长^[26],主要分布在 09:00 ~ 18:00. 异戊二烯在 09:00 ~ 15:00 有逐步上升的趋势,这是由于随着进入正午,光照逐渐增强,促进了植被对异戊二烯的排放,自 15:00 后异戊二烯体积分数有下降趋势,表明异戊二烯主要来源于植被排放.

MVK 和 MACR 是异戊二烯的两个氧化产物^[27,28],由于 MVK 和 MACR 也与 $\cdot\text{OH}$ 快速地反应,因此, MVK 和 MACR 的体积分数变化与异戊二烯的氧化生成和 $\cdot\text{OH}$ 的氧化消耗的差值有关. 在夜间, MACR 和 MVK 的体积分数不断下降,在早晨 06:00 左右达到 1 d 内的最低值;随后,在早晨至正午,异戊二烯体积分数较高,异戊二烯的氧化生成速率高于 MVK 和 MACR 与 $\cdot\text{OH}$ 的消耗速率,因此 MVK 和 MACR 体积分数不断上升. 正午后,异戊二烯体积分数逐渐下降. 当异戊二烯的体积分数下降



实线表示各物种体积分数均值,阴影部分表示每小时物种体积分数的标准偏差

图 4 淀山湖站臭氧高发季主要 VOCs 物种的日变化

Fig. 4 Diurnal variation in major VOCs species during the high ozone season at Dianshan Lake Station

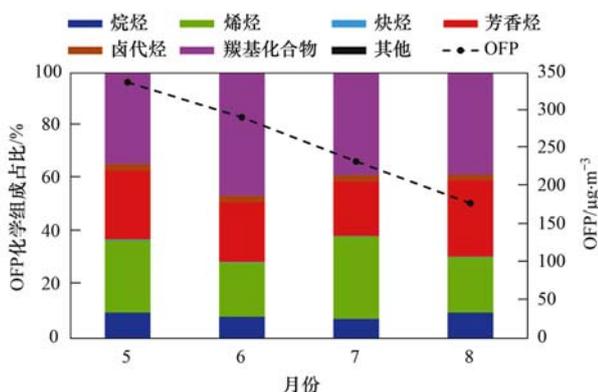
至某一水平,使异戊二烯对 MVK 和 MACR 的二次生成与两个物种的氧化消耗相等时, MVK 和 MACR 体积分数达到最高,其后开始下降。

2.3 VOCs 化学反应活性

淀山湖站臭氧高发季 VOCs 各化学组分对臭氧生成潜势值 (OFP) 分析表明,对臭氧生成起关键作用的组分是碳基化合物、烯烃和芳香烃, 3 种组分 OFP 之和占 OFP 总和的 88.6%; 其次是烷烃。

观测期间不同月份淀山湖站大气 VOCs 各化学组分臭氧生成潜势及贡献率变化情况如图 5 所示,

从各个化学组分的总 OFP 值来看, 5~8 月呈现逐步降低的特点, 5 月总 OFP 值最高, 为 $337.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 8 月 OFP 值为整个观测期间最低, 为 $177.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 观测期间 OFP 的变化趋势与 VOCs 体积分数变化趋势一致。从各化学组分对 OFP 的贡献来看, 碳基化合物、芳香烃和烯烃在每个月份都是对 OFP 贡献大的组分, 其他在每个月份对 OFP 贡献不足 0.2%。6 月碳基化合物的 OFP 贡献相对较高, 为 46.3%; 烯烃在 5 月和 7 月的 OFP 贡献相对较高, 分别为 27.3% 和 31.2%。



“其他”中包含甲基叔丁基醚和乙腈, OFP 贡献率不足 0.2%

图 5 2018 年 5~8 月 VOCs 各化学组分 OFP 值及贡献率

Fig. 5 OFP values and contribution rates of chemical components of VOCs from May to August, 2018

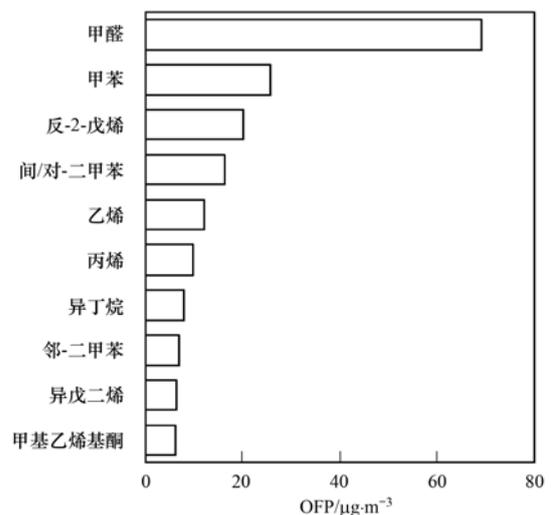


图 6 OFP 排名前十的 VOCs 物种

Fig. 6 Top ten VOCs species in OFP

从物种来看, OFP 最高的是甲醛(图 6), 并且甲醛的 OFP 明显高于其他物种, 甲醛对羰基化合物 OFP 的贡献又尤为显著, 在羰基化合物 OFP 中占比达到了约 70%; 其次是甲苯、反-2-戊烯、间/对-二甲苯、乙烯和丙烯; 异丁烷、邻-二甲苯、异戊二烯和甲基乙烯基酮的 OFP 相当。

2.4 臭氧敏感性分析

通过 OBM 模型对各类前体物的源效应进行 10% 的削减, 计算了对臭氧生成有重要贡献的前体物包括人为源 VOCs (AHC)、天然源 VOCs (NHC)、 NO_x 以及 CO 的 RIR, 结果如图 7 所示. 2018 年 5 月和 6 月, NO_x 的 RIR 分别约为 -0.6 和 -0.2, 表明将 NO_x 的源效应削减 10% 后, 臭氧生成潜势反而会分别升高 6% 和 2%, 说明淀山湖站 2018 年 5~6 月属于臭氧生成的“VOCs 控制区”, 即控制 VOCs 会使 O_3 有效下降; 而 2018 年 7 月和 8 月, NO_x 的 RIR 分别约为 0.06 和 0.03, 表明将 NO_x 的源效应削减 10% 后, 臭氧生成潜势会降低 0.6% 和 0.3%, 结合 VOCs 的 RIR 计算结果, 初步判断淀山湖站 2018 年 7~8 月属于臭氧生成的“协同控制区”, 即控制 NO_x 和 VOCs 都会使 O_3 逐步下降。

从 2018 年 5~8 月的整体计算结果来看, AHC 的 RIR 计算结果最大, 分别为 0.87、0.61、0.24 和 0.31, 表明削减人为源 VOCs 是淀山湖地区降低臭氧生成最高效的方式, 将 AHC 的源效应削减 10% 后, 臭氧生成潜势分别会降低 8.7%、6.1%、2.4% 和 3.1%。除人为源 VOCs 之外, 天然源 VOCs (NHC) 也是淀山湖地区臭氧光化学生成过程中不可忽略的因素. 5~8 月, 天然源 VOCs 的 RIR 逐渐变大, 主要是由于气温逐渐升高, 辐射变强, 由植被

排放产生的异戊二烯体积分数升高所导致的. 此外, 削减 CO 的排放也会导致淀山湖地区臭氧生成能力有所降低。

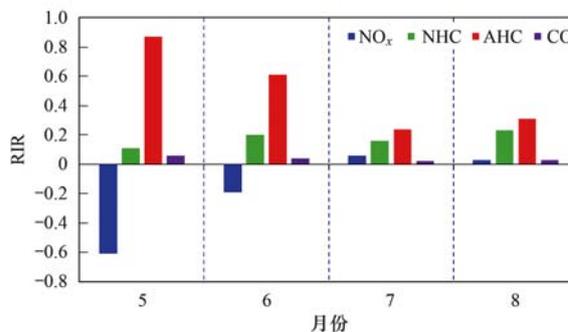


图 7 2018 年 5~8 月前体物源效应削减 10% 后平均 RIR

Fig. 7 Average RIR after a 10% reduction in precursor source effect from May to August 2018

为探究人为源 VOCs 组分对 O_3 生成的贡献, 根据碳键机制 (CB-IV) 各种 VOCs 的成键类型不同, 将 AHC 拆分为烷烃类 (PARP)、烯烃类 (OLEP)、乙烯 (ETHP)、甲苯类 (TOL)、二甲苯类 (XYL)、甲醛 (FORP) 和高碳醛类 (ALDP), 其中乙烯 (ETHP) 单独表示是因为乙烯在碳氢化合物的排放中占很大比例, 而反应速率却比其他烯烃慢, 并且其反应能产生大量的甲醛. 将各类人为源 VOCs 组分的源效应削减 10% 后, 分别计算了各组分的相对增量反应活性 RIR, 其计算结果如图 8, 可看出醛类 (FORP 和 ALDP) 和二甲苯类 (XYL) 在各类 AHC 中 RIR 的计算结果最大, 表明其对淀山湖站臭氧光化学生成的贡献最大, 活性最强; 特别是 5 月和 6 月, 削减醛类和二甲苯类 VOCs 对 O_3 体积分数的降低尤为有效。

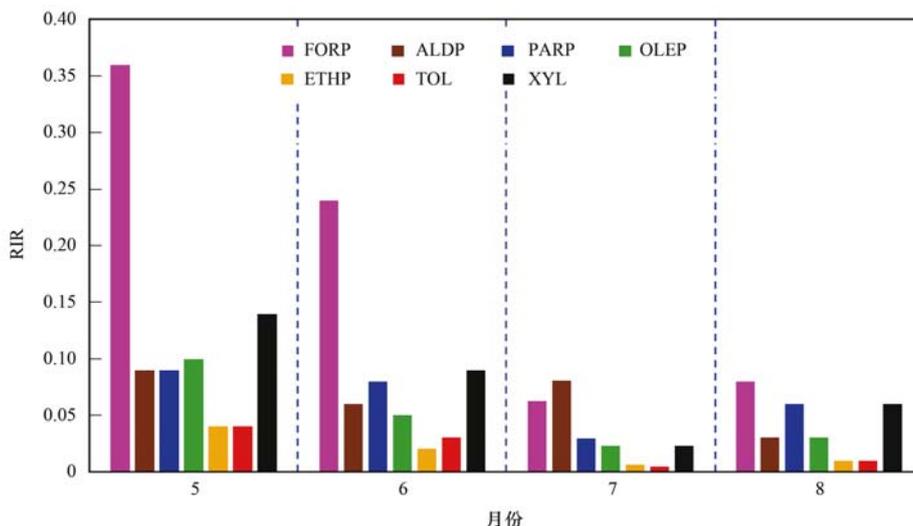


图 8 2018 年 5~8 月人为源 VOCs 组分源效应削减 10% 后平均 RIR

Fig. 8 Average RIR after a 10% reduction in AHC components source effect from May to August 2018

3 结论

(1) 上海臭氧高发季淀山湖站大气平均 $\varphi(\text{VOCs})$ 为 32.7×10^{-9} , 羰基化合物是该地区 VOCs 的主要组分. 甲醛、丙酮、氯甲烷、甲苯和乙烷是观测期间环境空气中含量最为丰富的 VOCs.

(2) 烷烃、烯烃和芳香烃的日变化与 VOCs 一致, 呈现夜间高白天低的变化趋势; 醛酮类呈现白天高夜间低的特征. 从 VOCs 关键物种的日变化看, 异戊烷受局地机动车尾气、工业源排放影响, 呈白天低夜间高的趋势; 甲醛、丙酮、异戊二烯、MVK 和 MACR 呈白天高夜间低的趋势.

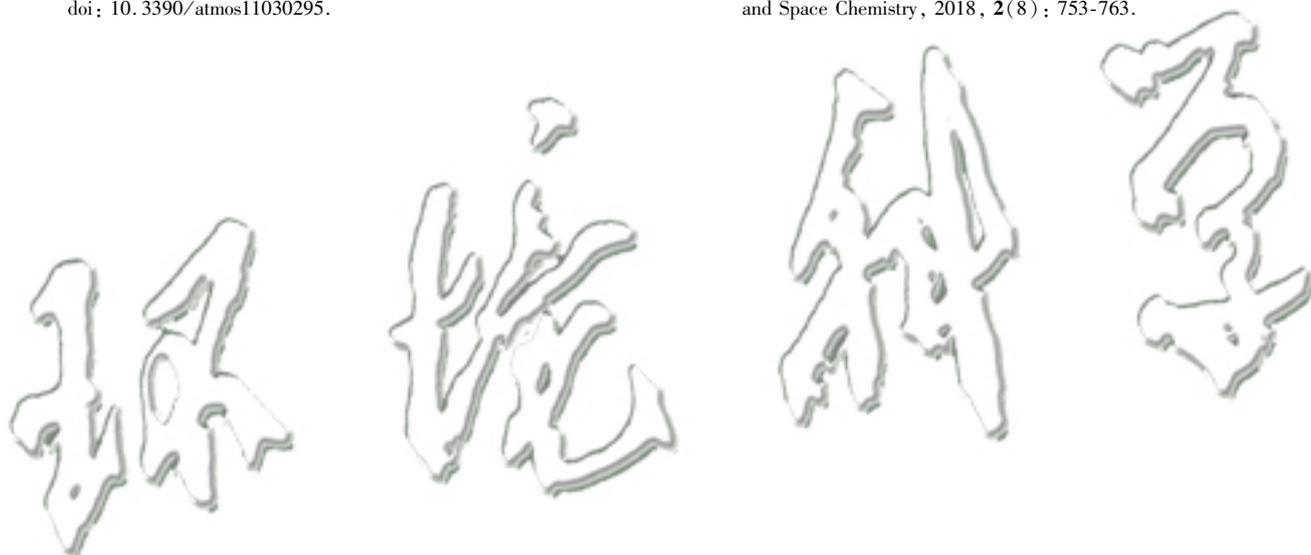
(3) 淀山湖站环境空气中化学反应活性最强的月份为 5 月, 活性最强的组分为羰基化合物、芳香烃和烯烃. 从物种来看, OFP 最高的是甲醛.

(4) 人为源 VOCs 是夏季臭氧高发季的主要贡献前体物, 其中削减醛类和二甲苯类人为源 VOCs 对 O_3 体积分数的降低尤为有效. OBM 模拟结果显示, 2018 年 5~6 月, 淀山湖地区属于臭氧生成的 VOCs 控制区, 而 2018 年 7~8 月属于过渡区.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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, 1992.
- [3] 贾海鹰, 尹婷, 翟霞, 等. 2015 年北京及周边地区臭氧浓度特征及来源模拟[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1231-1238.
Jia H Y, Yin T, Qu X, et al. Characteristics and source simulation of ozone in Beijing and its surrounding areas in 2015 [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1231-1238.
- [4] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [5] 黄美元, 徐华英, 王庚辰. 大气环境学[M]. 北京: 气象出版社, 2005. 214-263.
- [6] 黄娟, 冯艳丽, 熊斌, 等. 上海市大气羰基化合物水平研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2701-2706.
Huang J, Feng Y L, Xiong B, et al. Ambient levels of carbonyl compounds in Shanghai, China [J]. Environmental Science, 2009, **30**(9): 2701-2706.
- [7] 耿春梅, 杜莎莎, 殷宝辉, 等. 异戊二烯与 OH 自由基光化学反应的二次有机气溶胶的生成[J]. 中国科学: 化学, 2011, **41**(7): 1206-1214.
- [8] Carlier P, Hannachi H, Mouvrier G. The chemistry of carbonyl compounds in the atmosphere—a review [J]. Atmospheric Environment (1967), 1986, **20**(11): 2079-2099.
- [9] Zhang Q, Yuan B, Shao M, et al. Variations of ground-level O_3 and its precursors in Beijing in summertime between 2005 and 2011[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(12): 6089-6101.
- [10] 刘奇琛, 黄娟, 郭新彪. 北京市大气挥发性有机物(VOCs)的污染特征及来源[J]. 生态毒理学报, 2017, **12**(3): 49-61.
Liu Q C, Huang J, Guo X B. Pollution characteristics and sources of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Beijing [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, **12**(3): 49-61.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O_3 生成潜势的相关性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, et al. Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 443-451.
- [14] 林旭, 陈超, 叶辉, 等. 杭州秋季大气 VOCs 变化特征及化学反应活性研究[J]. 中国环境监测, 2020, **36**(2): 196-204.
Lin X, Chen C, Ye H, et al. Variation characteristics and chemical reactivity of VOCs in different functional zones of Hangzhou in autumn [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, **36**(2): 196-204.
- [15] 陈长虹, 苏雷燕, 王红雨, 等. 上海市城区 VOCs 的年变化特征及其关键活性组分[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 367-376.
Chen C H, Su L Y, Wang H L, et al. Variation and key reactive species of ambient VOCs in the urban area of Shanghai, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(2): 367-376.
- [16] 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.
- [17] 宋锴, 俞颖, 陆思华, 等. 珠海市秋季大气挥发性有机物变化趋势和大气化学反应活性[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(7): 2323-2332.
Song K, Yu Y, Lu S H, et al. Variation and reactivity of ambient volatile organic compounds (VOCs) in autumn of Zhuhai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(7): 2323-2332.
- [18] 王伯光, 张远航, 邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(S1): 7-15.
Wang B G, Zhang Y H, Shao M. Special and temporal distribution character of VOCs in the ambient air of Pearl River Delta region [J]. Environmental Science, 2004, **25**(S1): 7-15.
- [19] 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 O_3 and SOA formation potential during the combined pollution process in Guangzhou Panyu atmospheric composition station [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2246-2255.
- [20] Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, et al. Sources of C_2 - C_4

- alkenes, the most important ozone nonmethane hydrocarbon precursors in the Pearl River Delta region [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 236-245.
- [21] 陈杨欢, 王杨君, 张苗云, 等. 上海市大气 PM_{2.5} 时空分布特征 [J]. *环境工程学报*, 2017, **11** (6): 3671-3677.
Chen Y H, Wang Y J, Zhang M Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} in Shanghai based on clustering analysis [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11** (6): 3671-3677.
- [22] 陆思华, 邵敏, 王鸣. 城市大气挥发性有机化合物 (VOCs) 测量技术 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [23] Cardelino C A, Chameides W L. An observation-based model for analyzing ozone precursor relationships in the urban atmosphere [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45** (3): 161-180.
- [24] Lin H T, Wang M, Duan Y S, *et al.* O₃ sensitivity and contributions of different NMHC sources in O₃ formation at urban and suburban sites in Shanghai [J]. *Atmosphere*, 2020, **11** (3), doi: 10.3390/atmos11030295.
- [25] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism and updated ozone reactivity scales [M]. Riverside, California: Center for Environmental Research and Technology, 2010. 178-205.
- [26] 张诗炆, 龚道程, 王好, 等. 南岭国家大气背景站异戊二烯的在线观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37** (7): 2504-2512.
Zhang S Y, Gong D C, Wang H, *et al.* Online measurement of isoprene at a national air background monitoring station in the Nanling Mountains, South China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37** (7): 2504-2512.
- [27] Tani A, Muramatsu K, Mochizuki T. Emission of methyl ethyl ketone and 2-butanol converted from methyl vinyl ketone in plant leaves [J]. *Atmosphere*, 2020, **11** (8), doi: 10.3390/atmos11080793.
- [28] So S, Wille U, Da Silva G. Photoisomerization of methyl vinyl ketone and methacrolein in the troposphere: a theoretical investigation of ground-state reaction pathways [J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2018, **2** (8): 753-763.



CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i>	(1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i>	(11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i>	(26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i>	(37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i>	(46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i>	(74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen	(85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i>	(93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i>	(102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i>	(113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	(132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i>	(140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i>	(150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i>	(160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i>	(170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i>	(180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	(189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i>	(199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i>	(210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i>	(220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i>	(230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i>	(239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i>	(247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i>	(256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i>	(267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i>	(277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i>	(285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i>	(295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i>	(306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan	(329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i>	(349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i>	(363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i>	(369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i>	(377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i>	(387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i>	(416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i>	(424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i>	(432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i>	(442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i>	(454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i>	(463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i>	(472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i>	(481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i>	(490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i>	(510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i>	(521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i>	(530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i>	(550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i>	(560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i>	(569)