

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2  
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM<sub>2.5</sub>长期变化影响因素 ..... 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 ..... 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM<sub>2.5</sub>中碳质组分时空分布特征与来源 ..... 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM<sub>2.5</sub>中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 ..... 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM<sub>2.5</sub>中有机物的污染特征及来源解析 ..... 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM<sub>2.5</sub>中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 ..... 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 ..... 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM<sub>2.5</sub>叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 ..... 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 ..... 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 ..... 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM<sub>2.5</sub>中水溶性有机气溶胶 ..... 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 ..... 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 ..... 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 ..... 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 ..... 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 ..... 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 ..... 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 ..... 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 ..... 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 ..... 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 ..... 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 ..... 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 ..... 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 ..... 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 ..... 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 ..... 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B ..... 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 ..... 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 ..... 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 ..... 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 ..... 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 ..... 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 ..... 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 ..... 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 ..... 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N<sub>2</sub>O产生特性 ..... 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 ..... 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 ..... 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 ..... 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 ..... 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 ..... 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 ..... 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 ..... 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 ..... 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 ..... 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 ..... 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 ..... 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 ..... 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 ..... 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 ..... 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 ..... 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 ..... 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 ..... 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 ..... 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

# 连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势

乔月珍<sup>1,2</sup>, 陈凤<sup>1</sup>, 李慧鹏<sup>1</sup>, 赵秋月<sup>1\*</sup>

(1. 江苏省环境科学研究院, 南京 210036; 2. 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210019)

**摘要:** 2018年夏季和秋季对连云港城区不同功能区开展大气VOCs采样, 利用预浓缩系统和气相色谱质谱联用技术分析定量了107种VOCs物种, 并利用最大增量反应活性(MIR)估算了大气VOCs的臭氧生成潜势(OFP)。结果表明, 连云港市城区大气VOCs平均体积分数为 $(22.1 \pm 13.1) \times 10^{-9}$ , C2~C4的烷烃和烯烃、丙酮及乙酸乙酯是主要的VOCs物种, 占TVOCs含量的59.8%~75.8%。不同功能区VOCs浓度排序为工业区 $[(28.4 \pm 13.5) \times 10^{-9}] >$ 风景区 $[(21.7 \pm 4.4) \times 10^{-9}] >$ 交通居民混合区 $[(20.8 \pm 7.2) \times 10^{-9}]$ 。秋季VOCs浓度显著高于夏季, 秋季工业区浓度最高 $(35.4 \times 10^{-9})$ , 夏季风景区VOCs浓度最高 $(21.5 \times 10^{-9})$ 。烷烃、含氧硫化物和卤代烃是最主要的VOCs组分, 分别占TVOCs浓度的35.3%、26.9%和15.6%, 受工业排放影响工业区含氧硫化物含量显著高于风景区和交通居民混合区。通过T/B(甲苯/苯)探讨VOCs的来源发现, 机动车和溶剂使用是城区大气VOCs的主要来源。功能区的OFP排序为工业区 > 交通居民混合区 > 风景区, 烯烃对OFP的贡献最高, 其次为芳香烃。

**关键词:** 连云港; 挥发性有机物(VOCs); 体积分数; 物种组成; 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(2020)02-0630-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908186

## Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China

QIAO Yue-zhen<sup>1,2</sup>, CHEN Feng<sup>1</sup>, LI Hui-peng<sup>1</sup>, ZHAO Qiu-yue<sup>1\*</sup>

(1. Jiangsu Province Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Engineering, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Atmospheric volatile organic compounds (VOCs) were collected from different functional zones of Lianyungang during the summer and autumn of 2018. One-hundred-seven VOCs species were measured by cryogenic pre-concentration and gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS). The ozone generation potential (OFP) of VOCs was estimated by maximum incremental reactivity (MIR). Results showed that the average volume fraction of VOCs was  $(22.1 \pm 13.1) \times 10^{-9}$ . Alkanes and alkenes from C2-C4 as well as acetone and ethyl acetate were the predominant species, accounting for 59.8%-75.8% of TVOCs. The mean volume fraction in the industrial zone was the largest  $[(28.4 \pm 13.5) \times 10^{-9}]$ , followed by the scenic zone  $[(21.7 \pm 4.4) \times 10^{-9}]$  and the traffic and residential mixed zone  $[(20.8 \pm 7.2) \times 10^{-9}]$ . The concentration of VOCs in autumn was significantly higher than that in summer. The industrial zone was the site with the highest volume fraction in autumn  $(35.4 \times 10^{-9})$ , while the scenic zone had the highest volume fraction in summer  $(21.5 \times 10^{-9})$ . Alkane, sulfur, or oxygen containing compounds and halogenated hydrocarbons were the predominant components of VOCs, accounting for 35.3%, 26.9%, and 15.6% of the total amount, respectively. Due to industrial emissions, the content of sulfur or oxygen containing compounds in the industrial zone was significantly higher than that in scenic zone and the traffic and residential mixed zone. The average ratio of T/B (toluene/benzene) indicated that vehicle and solvent use were the main sources of VOCs in the urban area. The highest OFP was found in the industrial zone, followed by the traffic and residential mixed zone and the scenic zone. Alkenes and aromatics were the largest contributors to OFP.

**Key words:** Lianyungang; volatile organic compounds (VOCs); volume fraction; species composition; ozone formation potential (OFP)

近年来,随着大气污染管控工作的深入推进,我国绝大部分城市大气颗粒物浓度持续降低,其中尤以“2+26城市”最为突出。在颗粒物管控取得成效的同时,臭氧(O<sub>3</sub>)污染问题日益突出<sup>[1]</sup>,成为影响夏秋季城市环境空气质量优良率的主要因素。挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是对流层O<sub>3</sub>的关键前体物,是参与光化学污染的重要物质<sup>[2-4]</sup>,部分物种属于有毒有害物种,严重影响人体健康<sup>[5]</sup>,对O<sub>3</sub>前体物VOCs污染特征和污染来源的

研究对于解决当前我国城市面临的环境污染问题有重要意义。

国内针对大气VOCs开展了多方面研究。吴方堃等<sup>[6]</sup>和王思源等<sup>[7]</sup>对北京市大气VOCs进行了分

收稿日期: 2019-08-22; 修订日期: 2019-10-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2016YFC0207607); 国家重点研发计划大气专项(2018YFC0213803); 江苏省环境科学研究院开放基金项目(ZX2016002)

作者简介: 乔月珍(1987~),女,硕士,工程师,主要研究方向为大气化学, E-mail: 13951604625@163.com

\* 通信作者, E-mail: qiuyue.zhao@163.com

析,发现烷烃和芳香烃是浓度最高的 VOCs 物种,芳香烃和烯烃对臭氧的生产贡献较大,机动车、溶剂挥发、液化气泄漏和工业排放是奥运期间北京大气 VOCs 的主要污染源. 大气 VOCs 浓度随着垂直高度的增加而降低,低对流层内大气 VOCs 主要受局地源排放的影响. 卢学强等<sup>[8]</sup>和 Liu 等<sup>[9]</sup>对天津市大气 VOCs 物种组成和主要污染源的研究结果与北京市基本相同. Zou 等<sup>[10]</sup>的研究表明广州城区 O<sub>3</sub> 主要受 VOCs 控制. Shao 等<sup>[11]</sup>发现机动车是广州市 VOCs 的主要排放源,芳香烃的臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)最高,甲苯、二甲苯、乙苯、1,2,4-三甲苯和1,3,5-三甲苯的 OFP 贡献率达 44%. 文献[12~14]对上海市环境大气 VOCs 的研究结果表明,人为排放的二甲苯类和 C<sub>3</sub>~C<sub>4</sub> 烯烃类是活性最高的 VOCs 物种,但 VOCs 的化学反应活性由于活性 VOCs 物种的反应消耗导致观测计算结果显著偏低. 文献[15~18]利用在线观测数据对南京市大气 VOCs 开展了研究分析,结果表明烯烃和芳香烃是对 OH 消耗速率( $L \cdot OH$ )和臭氧生成潜势(OFP)贡献最高的物种. 此外,文献[19~21]对沈阳、福州和重庆大气 VOCs 的物种组成、反应活性和污染源开展了相应地研究工作.

可见当前大气 VOCs 研究多集中在北上广及各地省会城市,鲜有对中小城市大气 VOCs 的研究报道. 本研究于 2018 年夏秋季利用离线采样和在线观测的手段对江苏省连云港市城区不同功能区大气 VOCs 开展观测采样,分析了 VOCs 的浓度水平、物种组成特征和对臭氧的生成贡献,以为连云港市大气 VOCs 管控提供科学支撑.

## 1 采样与分析

### 1.1 观测站点

连云港市位于江苏省东北方向,东濒黄海,西与徐州市、宿迁市相连,南部与淮安市和盐城市毗邻,北至西北与山东省日照市、临沂市相邻,是我国首批沿海开放城市. 本研究选取了连云港城区 3 个不同功能区开展大气 VOCs 观测,观测站点的空间分布如图 1 所示.

工业区站点(34°35′18.79″N, 119°10′33.33″E)位于城区经济技术开发区内,具体点位设在某企业办公楼三楼楼顶,采样高度距地面约 10 m. 站点周边集聚了众多医药制造企业,货运车辆运输繁忙,站点受工业源排放和机动车尾气的影响较大.

风景区站点(34°45′6.71″N, 119°01′38.68″E)位于城区东北方向某海滨疗养院广场空地,采样高度离地面约 3 m. 站点临近黄海,临近海滨公园,周

边分布少量酒店和居民住宅,东侧 5 km 为连岛海滨旅游度假区,无明显局地排放源,主要受不同季节主导风向下污染传输的影响.

交通居民混合区站点(34°35′08.29″N, 119°8′51.85″E)位于城区某设计院内,采样高度离地面约 3 m. 站点以西 600 m 为新海路,以南 1 km 为宁海西路,以北 1 km 为海连西路. 站点周边主要是居民住宅、机关学校和商用写字楼,是典型的城市观测站点.



图 1 连云港市大气 VOCs 观测站点示意

Fig. 1 Location of sampling sites in different functional zones in Lianyungang

### 1.2 仪器与分析方法

工业区站点和风景区站点利用 SUMMA 罐(美国 ENTECH 公司)开展大气 VOCs 离线采样,采样时间为 2018 年 8 月 23~29 日和 10 月 23~30 日,每日采集 6 个 VOCs 样品,采样时间段为 08:00~09:00、10:00~11:00、12:00~13:00、14:00~15:00、16:00~17:00 和 18:00~19:00. VOCs 样品按照 USEPA-TO 14/15 和 PAMs 方法进行分析,每次分析前、分析过程中(每 20 个样品)利用 TO-15 和臭氧前驱物(PAMS)共计含 107 种 VOCs 物种的混合标准气体(Linde Gas North America LLC)对标准曲线进行校准. 样品定性通过保留时间和质谱图比较来进行,定量使用内标法. 分析的具体条件如下.

预浓缩条件:利用 ENTECH7200 三级冷阱预系统进行预浓缩. 一级冷阱:捕集温度: -40℃;捕集流速:60 mL·min<sup>-1</sup>;解析温度:20℃;阀温:100℃;烘烤温度:150℃;烘烤时间:20 min;二级冷阱:捕集温度: -120℃;解析温度:230℃;烘烤温度:220℃;烘烤时间:20 min;三级聚焦:聚焦温度 -185℃;解析时间:1.5 min.

色谱条件,程序升温:0℃(保持 10 min)以 4℃·min<sup>-1</sup>至 140℃(保持 2 min)以 15℃·min<sup>-1</sup>至

230℃ (保持 3 min); 进样口温度: 150℃; 载气流量:  $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 分流比: 20:1; 色谱柱: DB-1,  $60 \text{ m} \times 0.32 \text{ } \mu\text{m} \times 1.0 \text{ } \mu\text{m}$ , HP-PLOT/Q,  $15 \text{ m} \times 0.32 \text{ } \mu\text{m} \times 20.0 \text{ } \mu\text{m}$ .

质谱条件, 接口温度: 230℃; 离子源温度: 230℃; 溶剂延迟时间: 8 min; 扫描方式及范围: EI (全扫描); 8 min 开始, 扫描范围: 35 ~ 280 u.

交通居民混合区站点利用 TH-300B (武汉天虹) 在线 VOCs 监测设备开展观测, 采样时间为 2018 年 8 月 27 日至 9 月 19 日. 该系统采用双通道采样, 两路样品分别在冷冻除水后进入两路捕集柱, 在  $-150^\circ\text{C}$  低温 VOCs 被冷冻捕集; 快速加热捕集柱到  $120^\circ\text{C}$ , 热解吸的 VOCs 进入色谱柱中分离并分别用氢火焰离子化检测器 (FID) 和质谱 (MS) 进行检测, 其中 C2 ~ C5 碳氢化合物用 FID 检测, C5 ~ C12 碳氢化合物用 MS 检测, 共计定量 107 种 VOCs 组分, 样品分析的时间分辨率为 1 h. 观测期间每天零点采用 Linde Gas North America LLC 标准气体开展单点浓度校准, 采样前后分别做一次多点校准, 以此来评

估仪器的准确性和稳定性. 观测期间共计获得 522 组有效数据.

交通居民混合区站点采用在线 VOCs 监测, 虽有别于工业区站点和风景区站点手工离线的 VOCs 采样分析方法, 但两者均按照 USEPA-TO 14/15 和 PAMs 方法开展 VOCs 分析. 前处理阶段, TH-300B 采用电式制冷, 可达到与离线分析液氮相同的制冷效果; 色谱分析阶段, 两者色谱分析条件基本一致, 分析的 VOCs 物种种类和数量完全一致. 因此不同方法导致的误差不会影响站点间的综合比较分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 大气 VOCs 浓度变化特征

观测期间连云港市城区大气 VOCs 小时体积分数为  $(7.2 \sim 111.0) \times 10^{-9}$ , 平均体积分数为  $(22.1 \pm 13.1) \times 10^{-9}$ . 工业区、风景区和交通居民混合区 VOCs 小时平均体积分数分别为  $(28.4 \pm 13.5) \times 10^{-9}$ 、 $(21.7 \pm 4.4) \times 10^{-9}$  和  $(20.8 \pm 7.2) \times 10^{-9}$  (图 2). 受工业排放和机动车尾气的共同影响, 工业

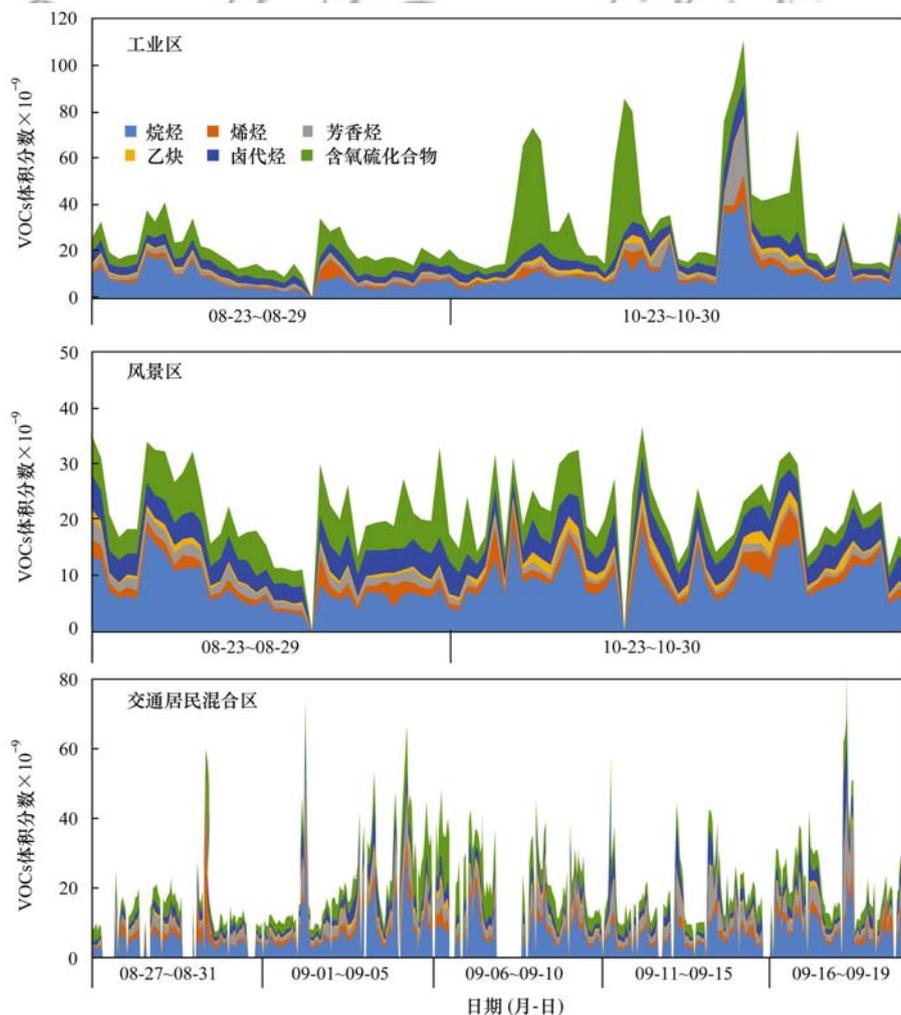


图 2 不同功能区大气 VOCs 时间变化序列

Fig. 2 Time series of ambient VOCs in different functional zones in Lianyungang

区 VOCs 浓度最高, 风景区和交通居民混合区 VOCs 浓度没有显著差异. 需要说明的是, 交通居民混合区站点观测时间与工业区站点和风景区站点不完全一致, 尤其是秋季观测时段. 交通居民混合区站点观测时间为 9 月 1~19 日, 工业区站点和风景区站点为 10 月 23~30 日, 观测时间的差异可能会对 VOCs 的浓度水平有一定影响.

与同为沿海城市厦门城区冬春季大气 VOCs 浓度水平相比<sup>[21,22]</sup>, 连云港大气 VOCs 浓度相对较高, 这与 VOCs 物种分析数量直接相关. 本研究利用 1.2 节中的分析方法对 107 种 VOCs 进行分析定量, 厦门市仅分析了包含烷烃、烯烃和芳香烃在内的 48 种 VOCs 物种.

以 8 月为代表的夏季和以 9、10 月为代表的秋季 VOCs 小时平均体积分数分别为  $(18.9 \pm 6.2) \times 10^{-9}$  和  $(25.4 \pm 9.9) \times 10^{-9}$ , 秋季 VOCs 浓度显著高于夏季. 工业区浓度差异最显著, 夏季和秋季 VOCs 小时平均体积分数分别为  $20.5 \times 10^{-9}$  和  $35.4 \times 10^{-9}$ , 秋季较夏季高 72.8%; 交通居民混合区夏季和秋季 VOCs 小时平均体积分数分别为  $14.0 \times 10^{-9}$  和  $22.9 \times 10^{-9}$ , 秋季较夏季高 63.6%. 与工业区和交通居民混合区不同, 风景区夏季和秋季 VOCs 小时平均体积分数基本相同, 秋季比夏季仅略高  $0.3 \times 10^{-9}$ .

对不同季节、功能区大气 VOCs 浓度情况开展进一步分析, 如图 3 所示. 夏季风景区 VOCs 小时平均浓度最高 ( $21.5 \times 10^{-9}$ ), 其次为工业区 ( $20.5 \times 10^{-9}$ ), 交通居民混合区浓度最低 ( $14.0 \times 10^{-9}$ ); 秋季工业区浓度最高 ( $35.4 \times 10^{-9}$ ), 显著高于交通居民混合区 ( $22.9 \times 10^{-9}$ ) 和风景区 ( $21.8 \times 10^{-9}$ ). 夏季, 风景区周边基本没有局地  $\text{NO}_x$  排放源, VOCs 难以和  $\text{NO}_x$  发生光化学反应, 消耗极少, 大气 VOCs 浓度较高.

## 2.2 大气 VOCs 物种组成特征

观测期间, 连云港城区大气 VOCs 的组成特征如图 4 所示. 可见, 烷烃是含量最高的组分, 平均小

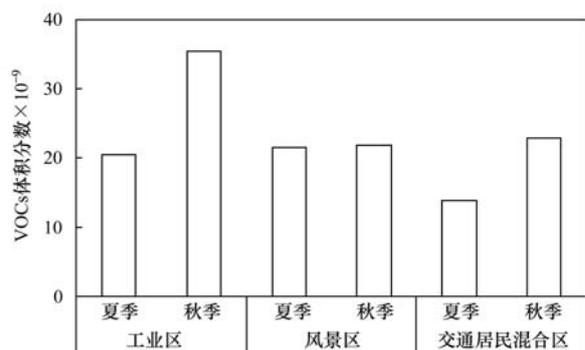


图 3 连云港城区不同功能区夏秋季大气 VOCs 浓度水平

Fig. 3 VOCs Concentrations in different functional zones in summer and autumn

时体积分数为  $8.13 \times 10^{-9}$ , 占 TVOCs 的 35.3%; 含氧硫化合物仅次于烷烃, 平均小时体积分数为  $6.19 \times 10^{-9}$ , 占 TVOCs 的 26.9%; 卤代烃是含量占比第 3 的组分, 平均小时体积分数为  $3.59 \times 10^{-9}$ , 占 TVOCs 的 15.6%; 芳香烃、烯烃和乙炔的平均小时体积分数依次为  $2.46 \times 10^{-9}$ 、 $1.80 \times 10^{-9}$  和  $0.88 \times 10^{-9}$ , 分别占 TVOCs 的 10.7%、7.8% 和 3.8%.

夏季和秋季大气 VOCs 物种组成基本一致, 相对含量最高的前 3 种组分依次为烷烃、含氧硫化合物和卤代烃, 分别占夏季和秋季 TVOCs 的 34.0%、28.7%、17.6% 和 35.8%、26.4%、11.5%, 夏季含氧硫化合物和卤代烃的相对含量比秋季高. 相对含量最低的成分为乙炔, 依次占夏季和秋季 TVOCs 的 3.0% 和 4.1%. 芳香烃和烯烃分别占夏季和秋季 TVOCs 的 8.6%、8.8% 和 11.5%、7.4%. 夏季大气光化学反应较秋季剧烈, 芳香烃消耗相对较多, 夏季含量占比低于秋季; 另一方面, 夏季高温易于汽柴油等燃料短链烯烃的挥发, 使得烯烃含量占比高于秋季.

工业区、风景区和交通居民混合区由于受周边排放源的影响, 大气 VOCs 物种组成有显著差异. 按含量高低, 工业区大气 VOCs 组分排序为: 含氧硫化合物 ( $10.0 \times 10^{-9}$ ) > 烷烃 ( $9.5 \times 10^{-9}$ ) > 卤代烃 ( $4.1 \times 10^{-9}$ ) > 芳香烃 ( $2.1 \times 10^{-9}$ ) > 烯烃 ( $1.8 \times$

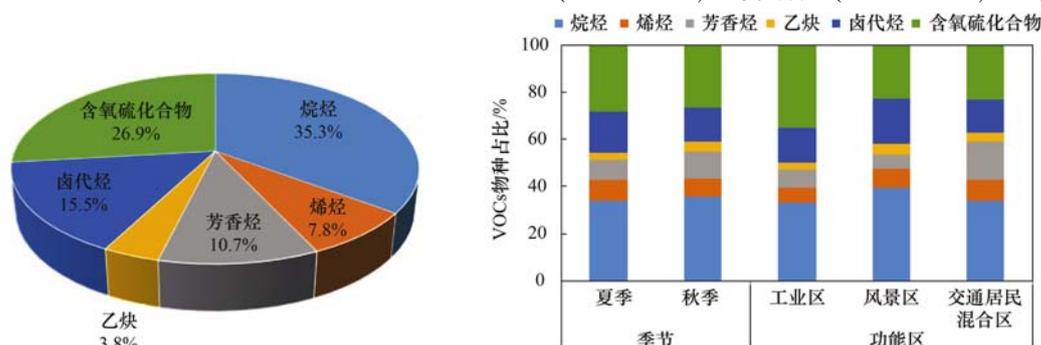


图 4 连云港大气 VOCs 物种组成

Fig. 4 Species composition of ambient VOCs in Lianyungang

$10^{-9}$ ) > 乙炔( $0.9 \times 10^{-9}$ );风景区为: 烷烃( $8.5 \times 10^{-9}$ ) > 含氧硫化物( $4.8 \times 10^{-9}$ ) > 卤代烃( $4.1 \times 10^{-9}$ ) > 烯烃( $1.7 \times 10^{-9}$ ) > 芳香烃( $1.3 \times 10^{-9}$ ) > 乙炔( $1.0 \times 10^{-9}$ );通居民混合区为: 烷烃( $7.1 \times 10^{-9}$ ) > 含氧硫化物( $4.8 \times 10^{-9}$ ) > 芳香烃( $3.3 \times 10^{-9}$ ) > 卤代烃( $3.0 \times 10^{-9}$ ) > 烯烃( $1.8 \times 10^{-9}$ ) > 乙炔( $0.8 \times 10^{-9}$ ). 工业区含氧硫化物的绝对浓度水平和相对含量占比显著高于风景区和交通居民混合区, 主要与周边众多医药制造企业的生产排放有关. 医药制造属于有机精细化工, 其 VOCs 排放主要源于采用有机溶剂对药品进行分离和提取过程产生的有机溶剂废气, 有机溶剂中含有大量的含氧硫化物<sup>[23,24]</sup>.

### 2.3 大气 VOCs 关键物种

按含量排序, 不同季节、不同功能区大气 VOCs 的关键物种如表 1 所示, 主要为 C2 ~ C4 的烷烃、烯烃和含氧硫化物, 占 TVOCs 含量的 59.8% ~ 75.8%.

丙酮和乙酸乙酯是含氧硫化物中的主要物种. 丙酮是最主要的 VOCs 物种, 是重要的有机合成原料, 主要来自于汽车尾气光化学氧化二次生成和工业排放<sup>[25]</sup>. 乙酸乙酯是工业区秋季 VOCs 浓度最高的物

种, 主要来源于医药制造提取、合成过程的排放.

乙烷和丙烷是烷烃中的主要物种. 乙烷主要来自于燃烧过程和燃气, 丙烷主要来自于液化石油气(LPG)燃烧<sup>[26]</sup>. 此外, 正丁烷、异丁烷和异戊烷的浓度也较高, 其主要来自于机动车尾气及油气蒸发<sup>[27]</sup>. 乙烯是烯烃中最主要的物种, 主要受机动车尾气排放影响. 与乙烯类似, 乙炔同样主要来自于交通排放, 主要为摩托车和使用 LPG 作为燃料的车辆<sup>[28]</sup>. 甲苯与苯的浓度比即 T/B 常用来评价环境大气受机动车尾气影响的程度<sup>[29]</sup>. 通常认为, T/B < 2.0 表示受机动车尾气影响显著<sup>[30]</sup>, 而受溶剂挥发等其他 VOCs 排放源影响时, T/B 则相对较大<sup>[31, 32]</sup>. 可见, 工业区和交通居民混合区以及夏季风景区大气 VOCs 受机动车影响较大. 根据乔月珍等人对机动车尾气实测 T/B 结果<sup>[33]</sup>, 工业区主要受柴油车的影响, 交通居民混合区主要受汽油车影响. 风景区夏季和秋季大气 VOCs 的 T/B 比有显著差异, 主要受污染来源的影响. 夏季风景区主导风向为东南风, 大气 VOCs 主要受沿海公路机动车排放的影响, T/B 比较低. 秋季风景区盛行西南风, 城区工业涂装等典型溶剂使用企业排放的污染气团经传输扩散到风景区, 使其大气 VOCs 的 T/B 比较高.

表 1 连云港城区大气 VOCs 体积分数前 10 物种

Table 1 Top 10 species of VOCs in urban Lianyungang

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	占比/%	T/B
工业区	乙酸乙酯	丙酮	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	乙烯	乙炔	氯甲烷	2-丁酮	67.9	1.0
夏季	丙酮	乙烷	丙烷	异丁烷	氯甲烷	正丁烷	乙烯	乙炔	异戊烷	二氟二氯甲烷	59.8	1.0
秋季	乙酸乙酯	丙烷	乙烷	丙酮	正丁烷	异丁烷	乙炔	2-丁酮	乙烯	对/间-二甲苯	73.4	1.0
风景区	丙酮	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	二硫化碳	乙炔	乙烯	氯甲烷	异戊烷	68.5	2.3
夏季	丙酮	乙烷	丙烷	异丁烷	氯甲烷	正丁烷	异戊烷	乙炔	乙烯	二氟二氯甲烷	60.6	1.6
秋季	丙酮	乙烷	丙烷	正丁烷	异丁烷	二硫化碳	乙炔	乙烯	氯甲烷	二氟二氯甲烷	75.8	3.5
交通居民混合区	丙酮	乙烷	丙烷	萘	二氯甲烷	乙烯	正丁烷	乙炔	异戊烷	甲苯	64.3	1.7
夏季	丙酮	丙烷	乙烷	乙烯	丙烯	异丁烷	正丁烷	二氯甲烷	乙炔	萘	62.3	2.1
秋季	丙酮	乙烷	丙烷	萘	二氯甲烷	乙烯	正丁烷	乙炔	异戊烷	甲苯	65.0	1.6

### 2.4 大气 VOCs 对臭氧生成的影响

本研究采用 VOCs 最大增量反应活性法来研究 VOCs 化合物对臭氧生成贡献的大小. VOCs 最大增量反应活性计算的是单个 VOCs 物种的 OFP, 其可以用来简单估计各 VOCs 物种在一定条件下能生成的  $O_3$  量, 计算公式如下.

$$OFP_i = E_i \times MIR_i$$

式中,  $OFP_i$  为第  $i$  种 VOCs 的 OFP 值,  $E_i$  为第  $i$  种 VOCs 的体积分数,  $MIR_i$  为第  $i$  种 VOCs 的臭氧最大反应活性, 来自 Carter 的修正值<sup>[34]</sup>. VOCs 物种 OFP 相加即可获得 TVOCs 的 OFP.

观测期间连云港市 57 种 PAMs 物种的 OFP 值为  $35.5 \times 10^{-9}$ , 不同物种的贡献如图 5 所示. 可

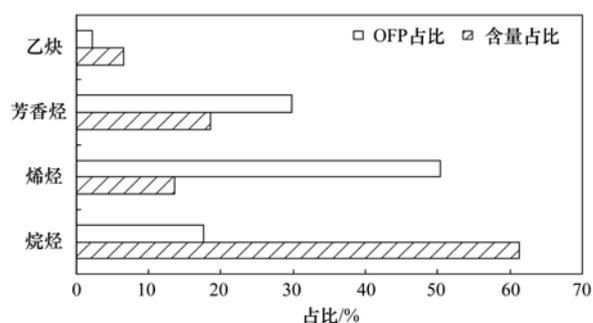


图 5 连云港城区大气 VOCs 组分含量占比及其对 OFP 的贡献

Fig. 5 Percentage of VOCs components and their OFP in urban Lianyungang

见, 含量占比 13.5% 的烯烃对 OFP 的贡献最高, 达 50.3%. 其次为芳香烃, 对 OFP 的贡献为 29.8%.

尽管烷烃物种的 MIR 较低,但其环境浓度较高,对 OFP 的贡献为 17.6%。炔烃对 OFP 的贡献较小,仅占 2.2%。VOCs 物种的 OFP 贡献与其浓度水平直接相关。与南京<sup>[18]</sup>、厦门<sup>[23]</sup>、成都<sup>[26]</sup>和上海<sup>[35]</sup>等城市相比,烯烃对连云港市 VOCs 的含量贡献相对较高,芳香烃贡献显著下降,故而烯烃成为连云港市 VOCs OFP 的首要贡献物种,这一特征与杭州<sup>[36]</sup>和武汉<sup>[37]</sup>等市 VOCs OFP 物种组成情况相同。

工业区、风景区、交通居民混合区大气 VOCs

的 OFP 值分别为  $38.7 \times 10^{-9}$ 、 $31.7 \times 10^{-9}$  和  $35.6 \times 10^{-9}$ ,烯烃是贡献最高的物种,对 OFP 的贡献为 45.0%~55.1%。芳香烃对工业区和交通居民混合区站点 OFP 的贡献仅次于烯烃,分别为 32.9% 和 30.9%;对风景区 OFP 的贡献较烷烃低,仅为 19.2%。烷烃对三站点 OFP 的贡献为 16.4%~19.8%。夏季和秋季大气 VOCs OFP 值分别为  $30.5 \times 10^{-9}$  和  $37.3 \times 10^{-9}$ 。与浓度组成特征类似,夏季烯烃对 OFP 的贡献较秋季高,秋季芳香烃对 OFP 的贡献较夏季高(图 6)。

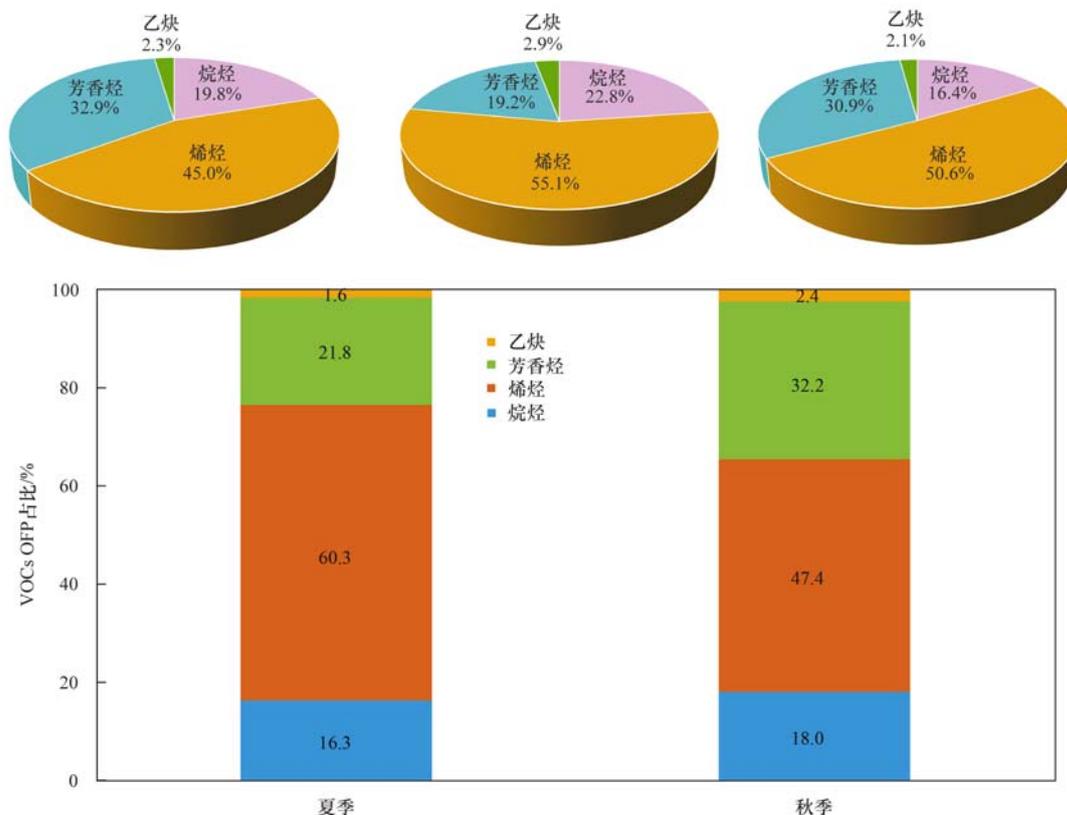


图 6 不同功能区和季节 VOCs 组分 OFP 贡献占比

Fig. 6 Contribution to OFP in different functional zones and during different seasons

### 3 结论

(1) 连云港城区大气 VOCs 平均体积分数为  $(22.1 \pm 13.1) \times 10^{-9}$ , 工业区、风景区和交通居民混合区 VOCs 小时平均体积分数依次为  $(28.4 \pm 13.5) \times 10^{-9}$ 、 $(21.7 \pm 4.4) \times 10^{-9}$  和  $(20.8 \pm 7.2) \times 10^{-9}$ 。夏季和秋季 VOCs 小时平均体积分数分别为  $(18.9 \pm 6.2) \times 10^{-9}$  和  $(25.4 \pm 9.9) \times 10^{-9}$ 。C2~C4 的烷烃、烯烃及丙酮和乙酸乙酯是连云港城区大气 VOCs 的主要物种,占 TVOCs 含量的 59.8%~75.8%。

(2) 夏季和秋季大气 VOCs 浓度空间分布特征不一致。夏季风景区 VOCs 小时平均浓度最高  $(21.5 \times 10^{-9})$ , 秋季工业区浓度最高  $(35.4 \times 10^{-9})$ 。

(3) 烷烃、含氧硫化物和卤代烃是连云港大气 VOCs 含量最高的组分,依次占 TVOCs 的 35.3%、26.9% 和 15.6%,芳香烃、烯烃和乙炔仅占 TVOCs 的 10.7%、7.8% 和 3.8%。不同功能区 VOCs 物种组成有显著差异,工业区含氧硫化物浓度显著高于风景区和交通居民混合区。夏季和秋季大气 VOCs 物种组成基本一致。与浓度特征不同,烯烃和芳香烃对 OFP 的贡献最高,分别达 50.3% 和 29.8%。

(4) 根据 T/B 判断结果,工业区和交通居民混合区大气 VOCs 主要受机动车尾气影响,风景区夏季主要受机动车尾气影响,秋季主要受城区工业涂装等企业排放的影响。

#### 参考文献:

[1] Yue X, Unger N, Harper K, et al. Ozone and haze pollution

- weakens net primary productivity in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(9): 6073-6089.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] Hatfield M L, Huff Hartz K E. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2211-2219.
- [ 4 ] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 255-256.
- [ 5 ] Choi E, Choi K, Yi S M. Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of a Metropolitan City and a background site in South Korea: sources and health risk potentials [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(40): 7563-7573.
- [ 6 ] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 10-16.
- Wu F K, Wang Y S, An J L, *et al.* Study on concentration, ozone production Potential and sources of VOCs in the atmosphere of Beijing during Olympics period[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 10-16.
- [ 7 ] 王思源, 邵敏, 王玮. 北京市大气中 VOCs 垂直分布的航测研究[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(7): 679-684.
- Wang S Y, Shao M, Wang W. The measurement of vertical distribution of airborne VOCs mixing ratios in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(7): 679-684.
- [ 8 ] 卢学强, 韩萌, 冉靓, 等. 天津中心城区夏季非甲烷有机化合物组成特征及其臭氧产生潜力分析[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 373-380.
- Lu X Q, Han M, Ran L, *et al.* Characteristics of nonmethane organic compounds and their ozone formation potentials in downtown Tianjin in summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(2): 373-380.
- [ 9 ] Liu B S, Liang D N, Yang J M, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 757-769.
- [ 10 ] Zou Y, Deng X J, Zhu D, *et al.* Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> at a suburban site in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(12): 6625-6636.
- [ 11 ] Shao M, Zhang Y H, Zheng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO<sub>x</sub> in its production[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 512-518.
- [ 12 ] Wang H L, Chen C H, Wang Q, *et al.* Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the source analysis through a two-year continuous measurement [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 488-498.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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 sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 424-433.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 朱用宇, 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.
- Zhu 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.
- [ 17 ] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O<sub>3</sub> 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 刘雅婷, 彭跃, 白志鹏, 等. 沈阳市大气挥发性有机物 (VOCs) 污染特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2777-2785.
- Liu Y T, Peng Y, Bai Z P, *et al.* Characterization of atmospheric volatile organic compounds in Shenyang, China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2777-2785.
- [ 20 ] 钟雪芬, 陈峰, 丁晖, 等. 福州清洁地区夏季和秋季 VOCs 浓度特征及化学反应活性[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(4): 1393-1401.
- Zhong X F, Chen F, Ding H, *et al.* Concentration characteristics and chemical reactivity of ambient volatile organic compounds in summer and autumn in Fuzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1393-1401.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] 徐慧, 邓君俊, 邢振雨, 等. 厦门不同功能区 VOCs 的污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2701-2709.
- Xu H, Deng J J, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs in different functional zones of Xiamen [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2701-2709.
- [ 23 ] 徐慧, 张哈, 邢振雨, 等. 厦门冬春季大气 VOCs 的污染特征及臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 11-17.
- Xu H, Zhang H, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in winter and spring in Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 11-17.
- [ 24 ] 周子航, 邓也, 吴柯颖, 等. 成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3949-3961.

- Zhou Z H, Deng Y, Wu K Y, *et al.* Source profiles of VOCs associated with typical industrial process in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3949-3961.
- [25] 何华飞, 王浙明, 许明珠, 等. 制药行业 VOCs 排放特征及控制对策研究-以浙江为例[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2271-2277.
- He H F, Wang Z M, Xu M Z, *et al.* Studies on the emission characteristics and countermeasures of VOCs from pharmaceutical industry-Based on Zhejiang Province[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2271-2277.
- [26] 印红玲, 袁桦蔚, 叶芝祥, 等. 成都市大气中挥发性有机物的时空分布特征及臭氧生成潜势研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 386-393.
- Yin H L, Yuan H W, Ye Z X, *et al.* Temporal and spatial distribution of VOCs and their OFP in the atmosphere of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 386-393.
- [27] Guo H, Wang T, Blake D R, *et al.* Regional and local contributions to ambient non-methane volatile organic compounds at a polluted rural/coastal site in Pearl River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(13): 2345-2359.
- [28] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 机动车排放及汽油中 VOCs 成分谱特征的研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, **39**(4): 507-511.
- Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Study on the characteristics of VOCs source profiles of vehicle exhaust and gasoline emission [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, **39**(4): 507-511.
- [29] Lai C H, Chang C C, Wang C H, *et al.* Emissions of liquefied petroleum gas (LPG) from motor vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(7): 1456-1463.
- [30] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [31] Ho K F, Lee S C, Guo H, *et al.* Seasonal and diurnal variations of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Hong Kong[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **322**(1-3): 155-166.
- [32] Tsai W Y, Chan LY, Blake D R, *et al.* Vehicular fuel composition and atmospheric emissions in South China: Hong Kong, Macau, Guangzhou, and Zhuhai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3281-3288.
- [33] 乔月珍, 王红丽, 黄成, 等. 机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- Qiao Y Z, Wang H L, Huang C, *et al.* Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds from vehicle exhaust[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- [34] Carter WPL. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [35] 王红丽. 上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- Wang H L. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the formation of ozone in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- [36] 李康为, 应方, 陈玲红, 等. 杭州市主城区 VOCs 污染特征及影响因素[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, **53**(4): 671-683.
- Li K W, Ying F, Chen L H, *et al.* Ambient VOCs characteristics and associated effects in urban Hangzhou [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, **53**(4): 671-683.
- [37] 曾沛, 郭海, 梁胜文, 等. 武汉市大气 VOCs 污染特征及其对臭氧生成的影响[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(7): 117-124.
- Zeng P, Guo H, Liang S W, *et al.* Ambient volatile organic compounds and their contributions to ozone formation in Wuhan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(7): 117-124.

## CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM <sub>2.5</sub> of Typical Regions in China Based on GAM Model .....	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui ( 499 )
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China .....	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. ( 510 )
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain .....	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. ( 520 )
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Nanjing Jiangbei New Area .....	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. ( 529 )
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM <sub>2.5</sub> ) in Northern Suburb of Nanjing .....	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. ( 537 )
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM <sub>2.5</sub> at Background Site of Yangtze River Delta .....	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. ( 554 )
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> in Changchun City, Autumn of 2017 .....	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. ( 564 )
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM <sub>2.5</sub> Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018 .....	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. ( 574 )
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province .....	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. ( 587 )
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province .....	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na ( 600 )
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM <sub>2.5</sub> with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS) .....	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. ( 609 )
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing .....	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. ( 620 )
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China .....	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. ( 630 )
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives .....	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao ( 638 )
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City .....	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu ( 647 )
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms .....	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. ( 656 )
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030 .....	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. ( 665 )
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine .....	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. ( 674 )
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin .....	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. ( 682 )
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River .....	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. ( 691 )
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River .....	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. ( 702 )
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China .....	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. ( 713 )
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea .....	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. ( 728 )
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai .....	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. ( 734 )
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an .....	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. ( 743 )
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure .....	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. ( 750 )
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation .....	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. ( 756 )
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite .....	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. ( 763 )
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism .....	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. ( 773 )
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar .....	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. ( 784 )
Phosphate Adsorption from Water on CaO <sub>2</sub> -loaded Magnetic Diatomite .....	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. ( 792 )
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach .....	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. ( 801 )
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed .....	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. ( 809 )
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process .....	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. ( 815 )
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge .....	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. ( 823 )
Denitrification Process and N <sub>2</sub> O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL .....	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. ( 831 )
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. ( 839 )
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application .....	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. ( 849 )
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. ( 856 )
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules .....	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. ( 867 )
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi .....	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. ( 876 )
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau .....	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. ( 886 )
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta .....	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. ( 895 )
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau .....	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. ( 905 )
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types .....	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. ( 914 )
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil .....	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. ( 922 )
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism .....	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. ( 932 )
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds .....	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. ( 941 )
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry .....	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. ( 952 )
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium .....	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. ( 962 )
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars .....	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. ( 970 )
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA .....	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. ( 979 )
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks .....	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. ( 986 )
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors .....	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. ( 997 )
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces .....	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. ( 1005 )