

 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



**2019**

Vol.40 No.3  
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估.....尹晓梅,李梓铭,熊亚军,乔林,邱雨露,孙兆彬,寇星霞(1011)

利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响.....李颖若,汪君霞,韩婷婷,王焱,何迪,权维俊,马志强(1024)

京津冀郊区站点秋冬季大气PM<sub>2.5</sub>来源解析.....王彤,华阳,许庆成,王书肖(1035)

四川省典型工业行业PM<sub>2.5</sub>成分谱分析.....冯小琼,陈军辉,熊文朋,梅林德,徐雪梅,尹寒梅,范武波,姜涛,钱骏,叶宏(1043)

典型物流城市2016年冬季2次污染过程PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源解析.....赵雪艳,杨文,王静,刘盈盈,白雯宇,徐艳萍,王歆华,白志鹏(1052)

沈阳市采暖期与非采暖期空气PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源分析.....张显,田莎莎,刘盈盈,赵雪艳,余浩,张辉,陈莉,王歆华(1062)

新乡冬季PM<sub>2.5</sub>中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析.....闫广轩,雷豪杰,张靖雯,唐明双,张佳羽,曹治国,李云蓓,王跃思,樊静,李虎(1071)

烟台市环境受体PM<sub>2.5</sub>四季污染特征与来源解析.....刘童,王晓军,陈倩,温杰,黄渤,朱红霞,田瑛泽,冯银厂(1082)

常州市冬季PM<sub>2.5</sub>中类腐殖质昼夜特征分析.....顾远,李清,黄雯倩,赵竹子,马帅帅,叶招莲(1091)

西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险.....曹红梅,赵留元,穆熙,李尧捷,毛潇萱,黄韬,马建民,高宏(1101)

京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析.....邱昀,李令军,姜磊,王新辉,赵文慧,张立坤,鹿海峰(1111)

中国城市O<sub>3</sub>浓度时空变化特征及驱动因素.....黄小刚,赵景波,曹军骥,宋永永(1120)

基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征.....张倩倩,张兴赢(1132)

舟山市臭氧污染分布特征及来源解析.....王俏丽,董敏丽,李素静,吴成志,王刚,陈必新,李伟,高翔,叶荣民(1143)

中国建筑涂料使用VOCs排放因子及排放清单的建立.....高美平,邵霞,聂磊,王海林,安小栓(1152)

异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化.....黄亚娟,曹罡,朱荣淑,欧阳峰(1163)

兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征.....栗世学,郭文凯,何昕,朱玉凡,陈强(1172)

成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析.....胡月,刘国东,孟玉川,张文江,夏成城(1179)

基于TBL模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面CO<sub>2</sub>扩散通量估算.....张逸飞,杨平,赵光辉,李玲,谭立山,全川(1188)

渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化.....刘兆冰,梁文健,秦礼萍,唐建辉(1198)

思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学.....劳心宇,原杰,刘瑜, Khan M. G. Mostofa(1209)

厦门湾海滩微塑料污染特征.....刘启明,梁海涛,锡桂莉,胡欣,葛健(1217)

高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析.....王奇岗,肖琼,赵海娟,王健力,郭永丽,张清华(1222)

鲜水河断裂带拉花盆地地下水化学特征及控制因素.....何锦,张幼宽,赵雨晴,韩双宝,刘元晴,张涛(1236)

成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征.....吴迪,印红玲,李世平,王增武,邓旭,罗怡,罗林(1245)

丹江口库区表层浮游细菌群落组成与PICRUS1功能预测分析.....张菲,田伟,孙峰,陈彦,丁传雨,庞发虎,姚伦广,李玉英,陈兆进(1252)

蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响.....刘志迎,许海,詹旭,朱广伟,秦伯强,张运林(1261)

基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价.....苏瑛,许育新,安文浩,王云龙,何振超,楼颖雯,沈阿林(1270)

生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响.....黄磊,梁根坤,梁岩,罗星,陈玉成(1280)

城市不同材料屋面径流的污染负荷特性.....何湖滨,陈诚,林育青,严晗璐,董建玮,陈求稳(1287)

BiOCl-(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制.....张文海,吉庆华,兰华春,李静(1295)

微米铁复合生物碳源对地下水中1,2-二氯乙烷的高效去除.....吴乃瑾,宋云,魏文侠,王海见,孙仲平(1302)

鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除.....邓曼君,王学江,成雪君,景焕平,赵建夫(1310)

Ca/Mg负载改性渣渣生物炭对水中磷的吸附特性.....易蔓,李婷婷,李海红,黄巧,杨金娥,陈玉成,杨志敏(1318)

两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素.....程扬,沈启斌,刘子丹,杨小莹,张太平,廖志钟(1328)

静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响.....俞阳,林建伟,詹艳慧,何思琪,吴小龙,王艳,赵钰颖,林莹,刘鹏茜(1337)

4种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制.....王大鹏,张烟,颜昌宙(1347)

以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析.....徐婷,李勇,朱怡嘉,薛梦婷,汤同欢(1353)

进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响.....李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰(1360)

除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复.....李海玲,李冬,张杰,刘博(1367)

CAST工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能.....马娟,杨蕊春,俞小军,周猛,陈永志(1375)

不同曝气量和好氧时间下SPNDPR系统处理低C/N城市污水的脱氮除磷性能.....袁梦飞,于德爽,巩秀珍,王晓霞,陈光辉,杜世明,甄建园(1382)

ABR除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水.....李田,曹家炜,谢凤莲,沈耀良,吴鹏,宋吟玲(1390)

室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性.....谢璐琳,王建芳,钱飞跃,张泽宇,沈耀良,齐泽坤(1396)

不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征.....任君怡,陈林艺,李慧春,秦玉洁,姜雁,王桐屿,周少奇(1405)

降温过程中生物膜CANON反应器的运行特征.....付昆明,廖敏辉,周厚田,付巢,姜婍,仇付国,曹秀芳(1412)

IEM-UF同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析.....刘子奇,张岩,马翔山,张博康,曹孟京,陈昌明(1419)

温度对硝化杆菌(Nitrobacter)活性动力学影响.....于雪,孙洪伟,李维维,祁国平,马娟,陈永志,吕心涛(1426)

零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化.....牛雨彤,刘吉宝,马爽,李亚明,解立平,魏源送,孟晓山(1431)

牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响.....彭磊,王科,谷月,王爱杰(1439)

环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响.....张彦军,郭胜利(1446)

三峡库区典型微生物土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的反应.....李一凡,王玉杰,王彬,王云琦(1457)

三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响.....王甜,黄志霖,曾立雄,肖文发,宋文梅(1468)

长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征.....宁赵,程爱武,唐海明,葛体达,邓扬悟,苏以荣,陈香碧(1475)

不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征.....童瑶瑶,王季斐,祝贞科,邓扬悟,陈珊,葛体达,袁红朝,吴金水(1483)

桂林市仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征.....徐广平,李艳琼,沈育伊,张德楠,孙英杰,张中峰,周龙武,段春燕(1491)

缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征.....王富华,吕盛,黄容,高明,王子芳,徐畅(1504)

大气污染对居民健康影响研究进展.....秦耀辰,谢志祥,李阳(1512)

《环境科学》征订启事(1042) 《环境科学》征稿简则(1162) 信息(1208, 1235, 1286)

## 舟山市臭氧污染分布特征及来源解析

王俏丽<sup>1,2</sup>, 董敏丽<sup>2</sup>, 李素静<sup>2</sup>, 吴成志<sup>3</sup>, 王刚<sup>3</sup>, 陈必新<sup>3</sup>, 李伟<sup>2\*</sup>, 高翔<sup>1\*</sup>, 叶荣民<sup>4</sup>

(1. 浙江大学能源工程学院, 能源清洁利用国家重点实验室, 热能工程研究所, 杭州 310027; 2. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 生物质化工教育部重点实验室, 工业生态与环境研究所, 杭州 310027; 3. 三捷环境工程咨询(杭州)有限公司, 杭州 310012; 4. 浙江省舟山海洋生态环境监测站, 舟山 316021)

**摘要:** 臭氧及其前体物在环境空气中传输和反应过程复杂, 本研究利用舟山市国控点 2014 年的监测数据对臭氧污染时空分布开展了统计分析, 并利用 CMAQ (community multiscale air quality) 模型模拟了舟山市 2014 年臭氧污染形成, 选用 ISAM (integrated source apportionment method) 源追踪算法计算来源贡献率. 结果表明, 舟山市春秋季节的臭氧浓度相对较高, 浓度高值出现在午后 13:00 ~ 15:00. 普陀站的臭氧平均浓度最高而位于中心城区的临城站最低. 臭氧总体浓度不高, 但易出现单日浓度高值, 其中 5 月臭氧超标率最高. 舟山市本地臭氧形成主要受 VOCs 浓度控制, 而源解析结果表明舟山市全年外来源占总贡献的 69.46%. 本地源中, 工业燃烧源、工艺过程源、道路移动源、非道路移动源的贡献率相差不大, 且表现出显著的港口城市特征, 船舶源、石化源、储运源分别占总贡献的 4.45% 和 1.01% 和 1.80%. 控制臭氧污染应采取周边区域联防联控的措施, 以 VOCs 排放源为主, 不同来源协同调控的措施.

**关键词:** 臭氧; 时空分布; 区域多尺度空气质量 (CMAQ) 模型; 源解析; 外来源; 本地源

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1143-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805220

## Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan

WANG Qiao-li<sup>1,2</sup>, DONG Min-li<sup>2</sup>, LI Su-jing<sup>2</sup>, WU Cheng-zhi<sup>3</sup>, WANG Gang<sup>3</sup>, CHEN Bi-xin<sup>3</sup>, LI Wei<sup>2\*</sup>, GAO Xiang<sup>1\*</sup>, YE Rong-min<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering, College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Key Laboratory of Biomass Chemical Engineering of Ministry of Education, Institute of Industrial Ecology and Environment, College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Trinity Consultants, Inc. (China office), Hangzhou 310012, China; 4. Zhejiang Provincial Zhoushan Marine Ecological Environmental Monitoring Station, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** The processes affecting photochemical reactions and regional transport of ozone and its precursors in ambient air are very complicated. In this study, statistical analysis of the spatial and temporal distributions of ozone pollution in Zhoushan was carried out based on monitoring data from state monitoring stations in Zhoushan in 2014. Specifically, ozone formation was simulated by CMAQ (the community multiscale air quality) model, and the source contribution rate was calculated using the Integrated Source Apportionment Method (ISAM) source tracking algorithm. The results showed that ozone pollution was more severe in spring and autumn than in summer and winter, and the highest ozone concentrations mostly appeared during 13:00-15:00 in the afternoon. Putuo Station had the highest ozone concentration while Lincheng Station, located in the downtown area of the city, had the lowest ozone concentration. The overall average ozone concentration was not high; however, peak concentrations that exceeded the standards usually occurred, which occurs most often in May. Local ozone formation in Zhoushan City is controlled by the VOC concentration, and source tracking results showed that non-local sources accounted for 69.46% of the total contribution. Among local emission sources, fuel burning boiler sources, industry process sources, on-road mobile sources, and non-road mobile sources made similar contributions to ozone formation. Moreover, they showed significant characteristics of a port city. The contribution rates from shipping sources, petrochemical sources, and storage and transportation sources were 4.45%, 1.01%, and 1.80%, respectively. In conclusion, control of the ozone pollution in Zhoushan City should be based on simultaneous reduction and coordinated prevention involving multiple sources (VOCs as the main one) both locally and in surrounding areas.

**Key words:** ozone; spatial and temporal distribution; community multiscale air quality (CMAQ) model; source apportionment; non-local sources; local sources

除了颗粒物 (PM) 污染<sup>[1,2]</sup>, 臭氧 (O<sub>3</sub>) 污染<sup>[3,4]</sup> 也越来越受到重视, 已然成为我国复合型大气污染的重要污染物之一<sup>[5]</sup>. 但区别于 PM, O<sub>3</sub> 并非来自污染源直接排放, 而是二次转化后的产物<sup>[6,7]</sup>. 挥发性有机物 (VOCs) 和氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 作

为 O<sub>3</sub> 的主要前体物, 本身的复杂性使得大气中 O<sub>3</sub>

收稿日期: 2018-05-26; 修订日期: 2018-09-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0214102)

作者简介: 王俏丽 (1990 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染特征研究及模拟, E-mail: chocowang@zju.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: w\_li@zju.edu.cn; xgaol@zju.edu.cn

的形成过程尤为复杂。同时,  $O_3$  的形成需要一定的时间, 考虑到大气环境的传输与扩散, 区域  $O_3$  污染的形成还受到外来源的影响<sup>[8]</sup>。因此,  $O_3$  污染形成及防治的研究是我国空气质量改善的一大难点。

早期, 针对  $O_3$  与其前体物之间的关系, Atkinson<sup>[9]</sup> 和 Carter<sup>[10, 11]</sup> 分别从  $\cdot OH$  的反应性及增量反应的角度探究 VOCs、 $NO_x$  与  $O_3$  形成的关系, 开展了一系列的研究, 形成了分别利用  $\cdot OH$  反应速率和最大增量反应 (maximum incremental reactivity, MIR) 的两类计算臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 的理论体系。随着对臭氧生成系列反应研究的深入, 以及数学统计和计算机技术的应用, 形成了多种描述臭氧生成规律的模拟方法, 包括目前应用较多的 EKMA (empirical kinetic modeling approach) 曲线模拟<sup>[12]</sup>、烟雾箱<sup>[13, 14]</sup>、OBM (observation-based model)<sup>[15, 16]</sup>、以及多种模拟大气污染形成及其迁移转化的模式<sup>[17-19]</sup>, 如 CMAQ (community multiscale air quality)、CAMx (comprehensive air quality model with extension) 等。其中, 模式模拟方法由于能够模拟大气环境中的化学反应、嵌套气象模块、网格化地理信息等优势而被广泛应用于臭氧扩散模拟及来源解析等研究。

舟山市位于我国长三角沿海地区, 东经  $121^{\circ}30' \sim 123^{\circ}25'$ , 北纬  $29^{\circ}32' \sim 31^{\circ}04'$ , 属亚热带季风气候区, 年均气温为  $16.7^{\circ}C$ , 年均降水日  $140.6 d$ <sup>[20]</sup>。2017 年全年日照时数  $1980.3 h$ , 其中 5、7、8 月的日照超过  $200 h$ <sup>[21]</sup>。作为我国典型的海岛城市, 舟山市拥有得天独厚的港口、海岛、海洋资源, 形成了依托发达港口的捕捞、水产加工、船舶修造、船舶运输、化学工业以及海洋型旅游业等特有的产业结构。其中, 船舶修造、船舶运输、化学工业等均存在典型的工艺过程排放 VOCs、 $NO_x$  等  $O_3$  前体物, 影响舟山市的  $O_3$  污染形成。舟山市

空气质量较好, 但仍存在轻度污染及以上事件, 以  $O_3$  为首要污染物的污染天数往往大于  $PM_{2.5}$  为首要污染物的污染天数<sup>[22]</sup>,  $O_3$  已成为舟山市最重要的空气质量防治污染物。同时, 发达的旅游业又对空气质量要求更高, 且海岛的特殊气候使得污染物扩散更为复杂, 舟山市的臭氧污染控制面临更为严峻的挑战<sup>[23]</sup>。

本文以舟山市臭氧污染为研究对象, 探究在复杂扩散条件及特殊工业结构下臭氧污染特征, 并结合 CMAQ 模式模拟对臭氧开展来源解析, 追踪各类来源的贡献值与分担率。

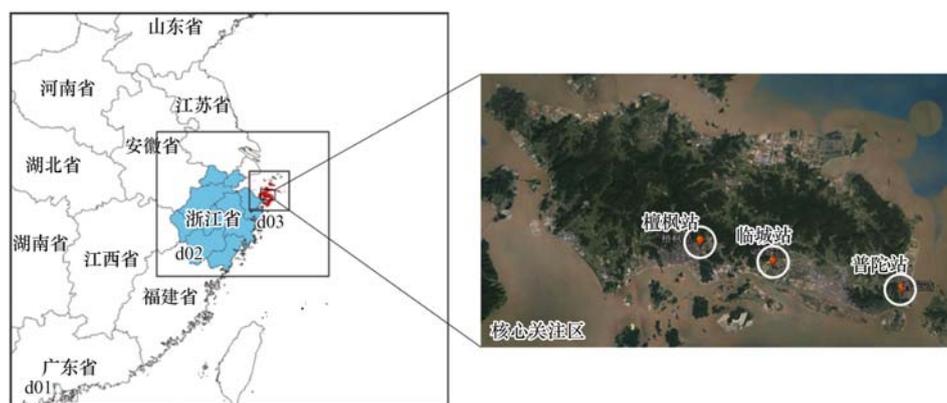
## 1 材料与方法

### 1.1 模拟设置

Models-3/CMAQ 是美国环保署和北卡罗来纳大学环境模拟中心合作研发的基于一个大气理念的第三代空气质量模式<sup>[24, 25]</sup>。同时, 采用 WRF-ARW (weather research and forecasting model-advanced research WRF) 中尺度气象模式模拟气象场作为 CMAQ 的气象模块输入。CMAQ 和 WRF 均采用兰伯特投影坐标系。化学机制采用 CB05, 气溶胶机制采用 AER06, 包含 156 个化学反应和 52 个化学物种。CCTM (CMAQ chemical-transport model) 化学传输模块中采用了 ISAM (integrated source apportionment method) 源贡献算法<sup>[26]</sup>。

### 1.2 模拟区域及时段

本研究采用三层嵌套网格, 如图 1 所示, 第一层为我国东部地区, 范围  $1782 km \times 1620 km$ , 分辨率  $27 km$ ; 第二层为浙江地区, 范围  $702 km \times 594 km$ , 分辨率  $9 km$ ; 第三层包括舟山的 2 个市辖区 (定海区、普陀区)、2 个县 (岱山县、嵊泗县), 范围  $162 km \times 162 km$ , 分辨率  $3 km$ 。最外层采用默认的预设值作为边界条件, 第二层边界条件采用第一



d01、d02 和 d03 分别表示第一层、第二层和第三层网格边界

图 1 模拟三层网格及核心关注区

Fig. 1 Simulation domain of three layers and core region

层的浓度输出结果,第三层边界条件采用第二层的浓度输出结果.在垂直方向上设置 16 层.核心关注区域为舟山市,关注点为舟山市国家环境空气监测站:定海檀枫站点(檀枫站)、临城新区站点(临城站)和普陀东港站点(普陀站).模拟时段为 2014 年.

### 1.3 数据来源

第一层和第二层的污染源数据以 MEIC 排放清单为基准<sup>[27, 28]</sup>,同时根据长三角地区、浙江省历年环境统计数据,重点污染源调研数据等对 MEIC 数据库进行合理的修正与更新.利用对舟山市本地人为排放源的现有统计数据整理及企业现场调研,根据相关国家规范指南,以排放因子法为主<sup>[29-31]</sup>,根据舟山市的污染源特征,采用分级体系对污染源类型进行划分,一级大气污染源包括电厂锅炉、工业燃烧源、工艺过程源、道路移动源、非道路移动源、居民生活源、农牧源、扬尘源、自然源、油品储运源以及废弃物处置源.分别统计各源类 7 种污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、CO、VOCs 以及 NH<sub>3</sub>)的排放量,从而建立第三层排放清单.针对臭氧的主要前体物来看,NO<sub>x</sub>的首要来源是船舶,占 53.0%,其次是电厂和道路移动源,分别占 18.2%和 13.6%.而工业生产(如船舶修造业的涂装过程、石化过程等)、油品储运是 VOCs 的主要贡献源,分别占 34.6%和 30.2%.统计结果也体现了舟山作为港口城市的特点.

同时采用 MEGAN 生物源处理模式计算各层自然源清单,从而建立更为准确更符合实际的排放清单数据输入.源成分谱则依赖美国环保署开发的基于污染源分类的 SPECIATED 数据库<sup>[32]</sup>.气象数据来自美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 ds083.2 数据集,时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 1°,垂直方向分为 26 层.地形、土地利用等数据利用官方地理数据.从而构成 CMAQ 模拟所需的原始数据输入.

### 1.4 模型验证

根据模型需求格式化数据后开展模拟,CMAQ 模拟尚存在较大的不确定性,主要包括污染源排放

清单的不确定性,气象场模拟的不确定性,扩散机制的简化以及化学反应的简化.因此需要对模型的模拟结果进行验证.利用在线监测站常规监测数据与 CMAQ 模拟结果进行比较,采用相关统计参数量化评价拟合的可靠性,统计参数包括标归一化平均偏差 NMB(normalized mean bias)、归一化平均误差 NME(normalized mean error)、FB(fractional bias)、FE(fractional error)、平均偏差 MB(mean bias)、平均误差 ME(mean error)、相关系数  $R$ (correlation coefficient)<sup>[33]</sup>.

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^n (P - O)}{\sum_{i=1}^n O} \times 100 \quad (1)$$

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^n |P - O|}{\sum_{i=1}^n O} \times 100 \quad (2)$$

$$FB = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (P - O)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P + O}{2}\right)} \times 100 \quad (3)$$

$$FE = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n |P - O|}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P + O}{2}\right)} \times 100 \quad (4)$$

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P - O}{O} \times 100 \quad (5)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P - O|}{O} \times 100 \quad (6)$$

式中, $P$ 为污染物模拟浓度, $O$ 为污染物监测浓度, $n$ 为样本个数.

利用式(1)~(6)评估模拟的可靠性,在线监测数据来自舟山市 3 个国家环境空气监测站点,分别计算 3 个站点的统计参数及舟山市平均臭氧浓度的统计参数,计算结果如表 1 所示.模拟结果与监测数据相关性总体达 0.68. NMB 在  $\pm 15$  以内, NME 在 30 以内, MB 在 35 以内, ME 在 45 以内,可以认为模拟的结果可靠<sup>[34, 35]</sup>.

表 1 CMAQ 模拟结果与监测数据统计计算

Table 1 Comparison between CMAQ simulation results and monitoring data

站点	$R$	NMB	NME	FB	FE	MB	ME
檀枫站	0.58	1.60	24.58	0.01	0.20	12.75	30.38
临城站	0.66	13.95	27.43	0.11	0.21	30.81	41.32
普陀站	0.64	-1.40	23.51	-0.01	0.19	10.70	30.09
舟山市	0.68	4.25	22.23	0.03	0.18	14.26	28.98

## 2 结果与讨论

### 2.1 舟山市臭氧污染时空分布

根据舟山市 3 个国控点的监测数据统计,如图 2 所示,春秋季节的臭氧浓度相对较高,冬季臭氧浓度最低. 一般城市以夏秋季节的臭氧浓度较高<sup>[36, 37]</sup>,而舟山市夏季受台风影响明显,且夏季午后常伴有雷雨天气<sup>[20]</sup>,反而不利于臭氧浓度积累,不易形成高浓度臭氧污染,因此舟山市夏季臭氧浓度并不高. 3 个站点相比,檀枫站春秋季节的臭氧浓度相近,临城站春季的臭氧浓度最高,而普陀站则以秋季的臭氧浓度最高. 总

体而言,臭氧平均浓度普陀站最高,而位于中心城区的临城站最低,与其他城市研究结果一致<sup>[38]</sup>. 据国控点 2014 年  $\text{NO}_x$  监测浓度分析,临城站的年均  $\text{NO}_x$  浓度( $22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )最高,而普陀站  $\text{NO}_x$  浓度最低( $16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),如表 2 所示,推测原因是主城区机动车尾气排放高于郊区. 对比  $\text{NO}_x$  和  $\text{O}_3$  浓度的时空分布说明中心城区臭氧浓度较低一定程度上受到  $\text{NO}_x$  的影响. 统计 24 h 中臭氧浓度随时间的变化,如图 2 所示,臭氧浓度高值出现在午后 13:00~15:00,此时光照强度高,温度高,相对湿度较低,有利于光化学反应的进行<sup>[39]</sup>.

表 2 舟山市 2014 年  $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Concentration of  $\text{NO}_2$  and  $\text{O}_3$  in Zhoushan during 2014/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

季节	檀枫		临城		普陀	
	$\text{NO}_2$	$\text{O}_3$	$\text{NO}_2$	$\text{O}_3$	$\text{NO}_2$	$\text{O}_3$
春季	23	86	24	85	19	86
夏季	13	69	16	60	13	72
秋季	18	85	20	69	10	97
冬季	31	58	32	51	22	71
年均	21	74	22	67	16	81

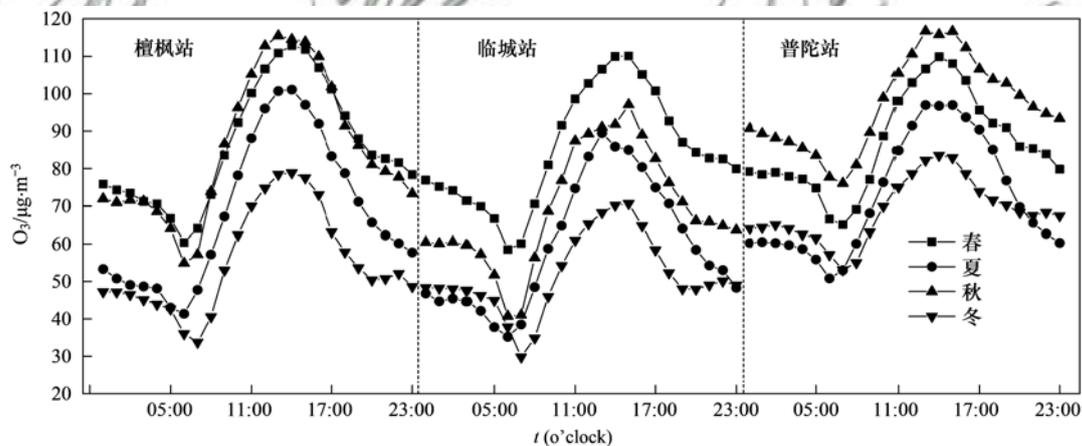


图 2 舟山市 2014 年臭氧浓度随时刻变化

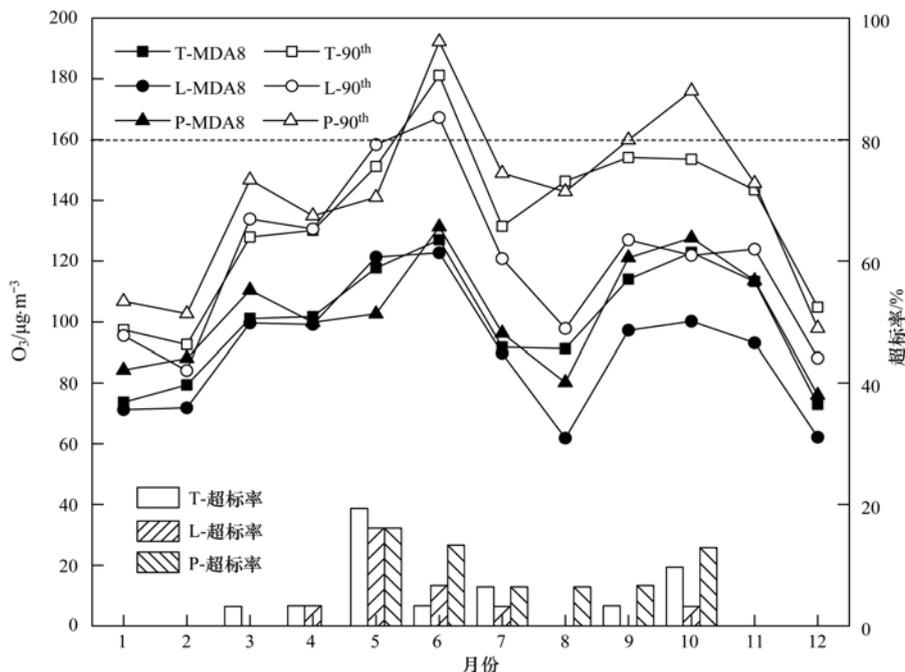
Fig. 2 Variation of  $\text{O}_3$  concentration with time in Zhoushan during 2014

臭氧浓度常以日最大 8 h 平均值 (MDA8, maximum daily average 8-hour) 评价一天的臭氧浓度水平,以第 90 百分位的 MDA8 ( $90^{\text{th}}$  MDA8) 评价一段时期的臭氧浓度水平,计算结果如图 3 所示. 6 月的臭氧浓度最高,10 月次之,12 月最低. 平均 MDA8 水平为  $98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,而  $90^{\text{th}}$  MDA8 则明显高于平均水平. 逐日分析可以发现,MDA8 低值较低,最低可低至  $17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (临城站 2014 年 7 月 18 日),正是超强台风影响沿海的时间. 根据国家空气质量二级标准<sup>[40]</sup>,进一步统计每个站点不同月份的臭氧超标率可知,5 月的超标率最高,檀枫站、临城站和普陀站分别超标 6、5 和 5 d,超标了

19.36%、16.13% 和 16.13%,而 1、2、11 和 12 月均没有超标. 从全年来看,普陀站的超标率较高,檀枫站、临城站和普陀站分别超标 15、10 和 19 d. 因此,舟山市受扩散条件影响明显,臭氧浓度平均水平不高,但同时易出现浓度高值,危害环境健康.

### 2.2 臭氧前体物控制区分析

臭氧形成主要受到前体物 VOCs 和  $\text{NO}_x$  的影响,利用 VOCs 和  $\text{NO}_x$  比值 ( $\text{VOCs}/\text{NO}_x$ ) 判断臭氧前体物控制区,当比值大于 8 时,一般认为是  $\text{NO}_x$  控制区,反之则为 VOCs 控制区<sup>[12, 41]</sup>. 利用模拟结果可以获得对应的 VOCs 和  $\text{NO}_x$  浓度分布,结果如



T 表示檀枫站, L 表示临城站, P 表示普陀站

图 3 舟山市 2014 年每月臭氧浓度变化

Fig. 3 O<sub>3</sub> concentration each month in Zhoushan during 2014

图 4 所示. 其中虚线表示臭氧前体物控制区分界线, 左上方为 NO<sub>x</sub> 控制区, 右下方为 VOCs 控制区. 显然, 舟山市基本处于 VOCs 控制区, 仅有少数时间基本处于 NO<sub>x</sub> 控制区. 结果与相关研究结果一致<sup>[6]</sup>. 相较而言, 冬季有 2 次在 VOCs 浓度较高时出现 NO<sub>x</sub> 控制区, 分别出现在临城站和普陀站. 其余 NO<sub>x</sub> 控制区均出现在 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 浓度都较低的情况下, 在 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 浓度均较低的情况下本地形成的 O<sub>3</sub> 量较少, 主要来自远距离输送. 从季节上看, 春季偏离 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值为 8 的分隔线最为明显, 均处在 VOCs 控制区, 其余季节有个别情况处于 NO<sub>x</sub> 控制区. 空间上则以檀枫偏离 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值为 8 的分隔线最为明显, 而以普陀出现 NO<sub>x</sub> 控制区的情况最多, 这主要是由于普陀站扩散条件好, 污染物扩散和输送明显, 偶尔出现 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值大于 8 的情况, 但此时的 O<sub>3</sub> 浓度应主要受外

来源的控制. 因此, 舟山市本地臭氧形成基本受 VOCs 控制, 在臭氧浓度的控制上应以控制 VOCs 浓度为主.

### 2.3 臭氧来源分析

在模拟结果可靠的基础上开展臭氧的源解析, 利用 ISAM 源追踪算法将污染来源分配到外来源和本地源中, 其中本地源又包括工业燃烧源(包括电厂及供热锅炉等)、工艺过程源、道路移动源、非道路移动源、居民生活源、农牧源和生物源. 并结合舟山市的工业特征, 单列船舶源、石化源及储运源, 并在大类源类中去除对应的贡献. 结果如图 5 所示. 外来源是舟山市臭氧污染形成的主要来源, 占总贡献的 65.38%~72.57%. 外来源占主导的结果与长三角、珠三角等地开展的研究结果一致<sup>[42, 43]</sup>. 春秋的外来源占比较大, 分别占总贡献的 71.90% 和 71.34%, 而夏冬的外来源占比分别为

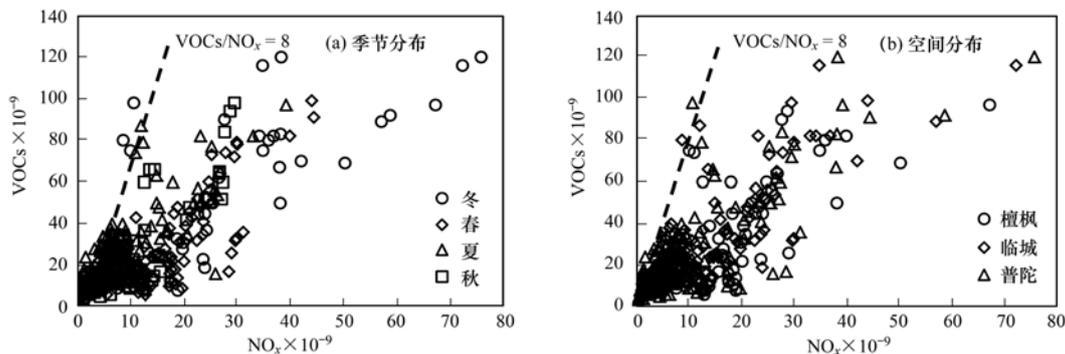
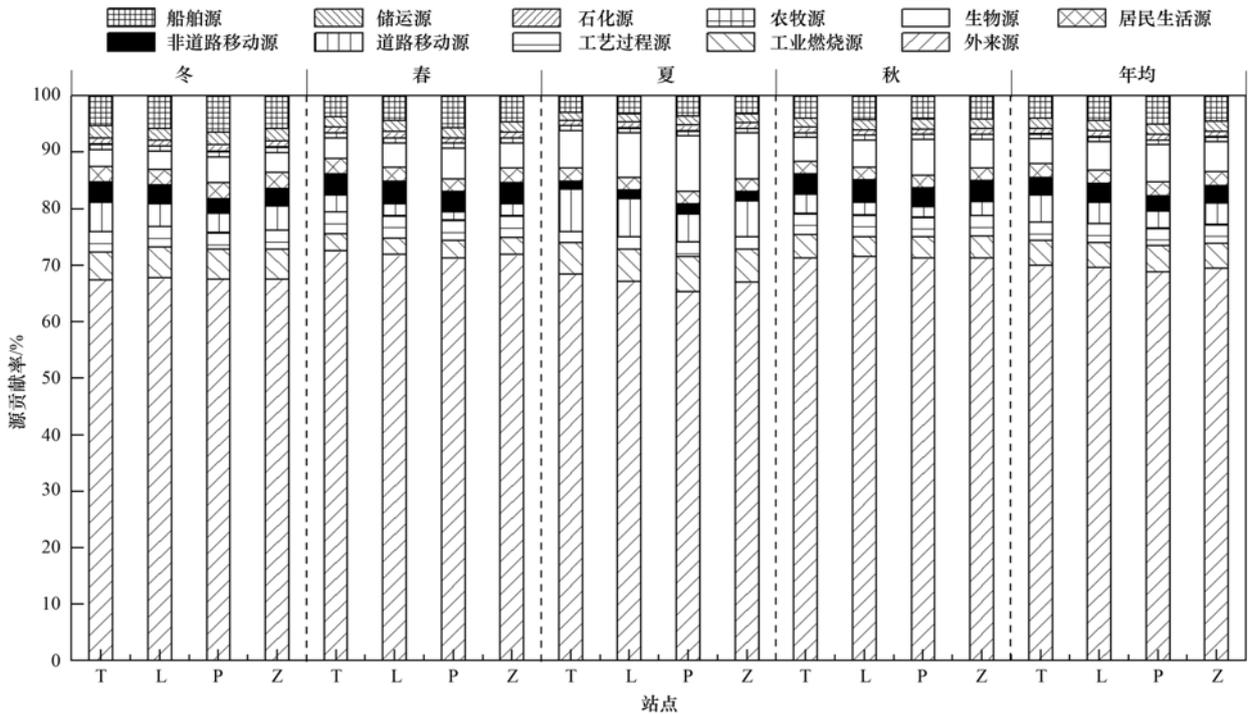


图 4 舟山市 2014 年 VOCs/NO<sub>x</sub> 分布

Fig. 4 Distribution of VOCs/NO<sub>x</sub> in Zhoushan during 2014



T 表示檀枫站, L 表示临城站, P 表示普陀站

图 5 舟山市 2014 年臭氧源解析结果

Fig. 5 Source apportionment of O<sub>3</sub> in Zhoushan in 2014ss

67.00% 和 67.59%。从空间分布来看, 3 个站点的外来源年均贡献值较为接近, 檀枫站、临城站和普陀站外来源年均贡献率分别为 69.94%、69.58% 和 68.86%。舟山市全年平均占总贡献的 69.46%。臭氧形成的来源中, 外来源往往是最主要的来源, 且由于臭氧的形成需要一定的时间, 往往长距离输送是外来源中的主要来源<sup>[6]</sup>。舟山市作为海岛城市, 拥有发达的港口, 船舶往来频繁, 且船舶主要排放地是在航道上, 对舟山市而言属外来源。同时, 海域太阳短波辐射强, 更易形成高浓度的臭氧污染, 且舟山市主要受到季风气候和海陆风影响, 常年以东北风、东风和东南风为主<sup>[20]</sup>, 在有利的扩散条件下极易影响舟山市本地的臭氧浓度。由上述舟山市臭氧平均浓度的空间分布特征表明, 最易受海域臭氧污染影响的普陀站年均浓度最高, 年 MDA8 和年 90<sup>th</sup> MDA8 也最高, 这也印证了海域向舟山市扩散臭氧的推论。因此, 对船舶排放的控制是舟山市臭氧污染防治的重要途径。

有研究表明, 本地臭氧形成受到外来源的影响显著的同时, 也会传输大量的臭氧及其前体物进入周边区域, 影响周边区域的空气质量<sup>[37]</sup>。因此, 本地源的构成对区域臭氧污染的控制尤为重要<sup>[3]</sup>。舟山市植被覆盖面积较大<sup>[44]</sup>, 导致其生物源贡献率在本地源贡献中最大, 全市 2014 年平均占总贡献的 5.33%, 其次为工业燃烧源和船舶源, 全市年均

分别占总贡献的 4.46% 和 4.45%。相比以工业源排放贡献最大的上海市<sup>[32]</sup>, 舟山市拥有较高的植被覆盖面积和相对较少的工业, 因此本研究结果亦是合理的。其中船舶源表现出明显的空间分布, 檀枫站年均贡献率最小, 而最靠近海域并邻近码头的普陀站年均贡献率最高。道路移动源平均贡献率为 3.80%, 且夏季的贡献率明显高于其他季节, 为 6.36%, 与旅游业的变化规律一致, 应是旅游旺季提高了舟山市车流量, 进而导致了道路移动源的排放增加, 可见机动车尾气的排放也是本地臭氧形成的一大来源。不包括船舶源的非道路移动源平均贡献率为 3.06%, 包括各类农业机械、港口机械等。不包括石化源和储运源的工艺过程源平均贡献率为 3.30%。石化源和储运源单项平均贡献率为 1.01% 和 1.80%。居民生活源和农牧源平均贡献率较低, 为 2.42% 和 0.90%。舟山市农牧业较少, 以渔业为主, 因此农牧源的贡献较少。

扣除外来源进一步计算各类本地源的占比, 结果如表 3 所示。生物源占本地源贡献的 17.45%, 且表现出明显的季节特点, 植物挥发量最大的夏季贡献率最高, 达本地源贡献的 24.64%。船舶源作为二级分类从非道路移动源中单列而出, 其贡献率与工业燃烧源相差无几, 两者分别占本地源贡献的 14.60% 和 14.57%, 可见船舶源在本地源中的贡献也是尤为显著。船舶源以冬季的贡献率最高而夏季

最低, 主要与夏季边界层高, 风速大等有利扩散条件有关. 石化源和储运源分别占本地排放源的 3.31% 和 5.89%, 季节和空间变化不明显. 道路移动源占本地源的 12.44%, 工艺过程源和非道路移动源分别占 10.81% 和 10.02%.

上述分析可知, 舟山市的臭氧污染形成主要受外来源的影响, 其中船舶在舟山市外的航行排放会对舟山市臭氧污染造成一定影响, 且本地源中船舶源的贡献亦不可小视. 因此, 提高船舶排放标准、提高船舶燃料标准等控制船舶排放的手段将对舟山

市臭氧污染控制有所帮助.

舟山市本地臭氧形成来源中, 工业燃烧源、工艺过程源、道路移动源、非道路移动源及船舶源的整体贡献率相差不大, 同时具有港口特征的船舶源、石化源和储运源也有明显的贡献, 而不同的排放源所排放的主要污染物不同, 不同污染物的排放影响环境空气中 VOCs 和  $\text{NO}_x$  的浓度比值, 进而影响臭氧浓度水平. 因此, 针对舟山市的臭氧污染还需采取与周边区域联防联控, 不同来源协同调控的方式科学的开展控制措施.

表 3 舟山市 2014 年臭氧本地源贡献率/%

Table 3 Source apportionment of local ozone formation in Zhoushan in 2014/%

项目	工业燃烧源	工艺过程源	道路移动源	非道路移动源	居民生活源	生物源	农牧源	石化源	储运源	船舶源
冬季	16.04	10.55	13.02	9.72	8.58	11.17	2.87	3.42	6.70	17.93
春季	10.64	13.67	7.79	13.42	8.83	15.87	3.24	3.67	6.55	16.33
夏季	17.61	6.85	19.27	4.88	6.76	24.64	2.61	2.97	4.55	9.76
秋季	13.40	12.77	8.51	12.98	7.68	17.86	3.07	3.28	5.86	14.52
檀枫站	14.64	11.04	15.77	10.21	8.32	14.60	3.03	3.33	5.82	13.21
临城站	14.46	11.28	12.33	10.78	7.79	16.63	2.93	3.39	5.98	14.46
普陀站	14.74	10.08	9.38	9.09	7.74	21.03	2.86	3.24	5.88	15.96
舟山市	14.60	10.81	12.44	10.02	7.92	17.45	2.95	3.31	5.89	14.57

### 3 结论

(1) 舟山市 2014 年春秋季节的臭氧浓度相对较高, 冬季臭氧浓度最低. 1 d 内臭氧浓度高值一般出现在 13:00~15:00, 空间分布表现为普陀站最高, 而位于中心城区的临城站最低. 平均 MDA8 水平不高, 但易出现单日 MDA8 水平高值.

(2) 舟山市本地臭氧形成主要受 VOCs 浓度控制. 舟山市全年平均外来源占总贡献的 69.46%. 本地臭氧形成来源中, 生物源贡献率最高, 达 5.33%. 工业燃烧源、工艺过程源、道路移动源、非道路移动源的整体贡献率相差不大, 并表现出显著的港口城市特征, 船舶源、石化源、储运源分别占本地源贡献的 14.57%、3.31% 和 5.89%.

(3) 控制臭氧污染应采取与周边区域联防联控, 以控制 VOCs 排放为主, 不同来源协同调控的科学措施, 其中控制船舶排放的手段将是舟山市臭氧污染防治的有效手段之一.

#### 参考文献:

[1] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对  $\text{PM}_{2.5}$  污染改善贡献评估[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 867-875.  
Wu W J, Chang X, Xing J, et al. Assessment of  $\text{PM}_{2.5}$  pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 867-875.  
[2] 陶志华, 谢松青, 何微娜, 等. 台州市不同功能区环境空气  $\text{PM}_{2.5}$  的污染特征研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2017,

44(4): 464-471.

Tao Z H, Xie S Q, He W N, et al. Pollution characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  in Taizhou, Zhejiang province[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2017, 44(4): 464-471.

[3] 李浩, 李莉, 黄成, 等. 2013 年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市  $\text{O}_3$  来源识别[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 1-10.

Li H, Li L, Huang C, et al. Ozone source apportionment at urban area during a typical photochemical pollution episode in the summer of 2013 in the Yangtze River Delta[J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 1-10.

[4] 林旭, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶潜在贡献的研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 976-986.

Lin X, Zhu B, An J L, et al. Potential contribution of secondary organic aerosols and ozone of VOCs in the northern suburb of Nanjing[J]. China Environmental Science, 2015, 35(4): 976-986.

[5] 郝建奇, 葛宝珠, 王自发, 等. 2014 年 6 月南京大气复合污染观测[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3585-3593.

Hao J Q, Ge B Z, Wang Z F, et al. Observational study of air pollution complex in Nanjing in June 2014[J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3585-3593.

[6] Li L, An J Y, Shi Y Y, et al. Source apportionment of surface ozone in the Yangtze River Delta, China in the summer of 2013[J]. Atmospheric Environment, 2016, 144: 194-207.

[7] 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  $\text{O}_3$  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  $\text{O}_3$  and SOA formation potential during the combined pollution process in Guangzhou Panyu atmospheric composition station [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2246-2255.

[8] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京市臭氧的时空分布特征



- [36] 潘本锋, 程麟钧, 王建国, 等. 京津冀地区臭氧污染特征与来源分析[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(5): 17-23.  
Pan B F, Cheng L J, Wang J G, *et al.* Characteristics and source attribution of ozone pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(5): 17-23.
- [37] 包艳英, 徐洁, 唐伟, 等. 大连市夏季近地面臭氧污染数值模拟和控制对策研究[J]. 中国环境监测, 2018, **34**(1): 9-19.  
Bao Y Y, Xu J, Tang W, *et al.* Modeling of summertime ground-level ozone pollution and its control strategies in Dalian [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, **34**(1): 9-19.
- [38] 王闯, 王帅, 杨碧波, 等. 气象条件对沈阳市环境空气臭氧浓度影响研究[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(3): 32-37.  
Wang C, Wang S, Yang B B, *et al.* Study of the effect of meteorological conditions on the ambient air ozone concentrations in Shenyang[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(3): 32-37.
- [39] 关玉春, 肖致美, 陈魁, 等. 天津市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 40-49.  
Guan Y C, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Characteristics of ozone pollution and its influencing factors in Tianjin[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 40-49.
- [40] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [41] 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.
- [42] Gao J, Zhu B, Xiao H, *et al.* Diurnal variations and source apportionment of ozone at the summit of Mount Huang, a rural site in Eastern China[J]. Environmental Pollution, 2017, **222**: 513-522.
- [43] Gao J H, Zhu B, Xiao H, *et al.* A case study of surface ozone source apportionment during a high concentration episode, under frequent shifting wind conditions over the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **544**: 853-863.
- [44] 李洪伟. 浙江省植被覆盖的时空变化研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2010.  
Li H W. Study on the spatial-temporal change of vegetation in Zhejiang province [J]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2010.



## CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ling, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM <sub>2.5</sub> During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO <sub>2</sub> Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)