

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, 黄爱倩, 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, 安小桂 (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)                    |
| 鲜水河断裂带拉沁盆地断面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                                                                   | 苏瑶, 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 负载改性沼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, 薛梦娜, 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, 郭跃利, 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 and 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, 甄建国 (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, 曹雁, 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, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (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, 曹昌明 (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)                                       |
| 三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应                                                                     | 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)          |
| 桂林会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)                                                                       |                                                       |



# 中国城市 O<sub>3</sub> 浓度时空变化特征及驱动因素

黄小刚<sup>1,2</sup>, 赵景波<sup>1,3\*</sup>, 曹军骥<sup>3</sup>, 宋永永<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 陕西师范大学地理科学学院, 临汾 041004; 3. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061)

**摘要:** 基于 2015~2017 年 O<sub>3</sub> 浓度监测数据, 采用克里金插值、空间自相关分析、热点分析和地理探测器等方法, 研究了中国城市 O<sub>3</sub> 浓度的时空变化特征及驱动因素。结果表明: ① 2015~2017 年中国城市 O<sub>3</sub> 污染逐年加重, 年评价指标超标城市由 74 个增加到 121 个, 平均超标天数比例由 5.2% 上升到 8.1%。② O<sub>3</sub> 污染主要发生在 4~9 月, 超标天数占全年总超标天数的 87.5%~95.3%。5~7 月 O<sub>3</sub> 浓度上升最快、污染最严重, 超标天数比例由 2015 年的 10.6% 上升到 2017 年的 20.5%, 2017 年 83.0% 的中度污染和 91.0% 的重度污染发生在 5~7 月。③ 华北平原 O<sub>3</sub> 浓度的持续上升, 已将京津冀和长三角地区 O<sub>3</sub> 高污染区连成一片, 形成了包括环渤海地区、中原城市群、长三角城市群、山西、关中地区和内蒙古中部集中连片的 O<sub>3</sub> 高污染区, 是我国 O<sub>3</sub> 污染最严重的区域。珠三角、成渝城市群和华东地区南部 O<sub>3</sub> 浓度上升也较快, 成渝城市群的核心城市已初步形成我国新的 O<sub>3</sub> 污染中心。④ O<sub>3</sub> 浓度空间集聚性逐年增强, 年度热点主要分布在华北平原和长江中下游地区, 冷点主要分布于东北、西南及华南地区。⑤ 地理探测器分析表明, 气象、工业化、城市化因素和 O<sub>3</sub> 前体物排放量因子对 O<sub>3</sub> 浓度分布均有显著驱动作用, 但不同地区 O<sub>3</sub> 浓度的驱动因素存在差别, 同一因子在不同季节的驱动作用也不尽相同。

**关键词:** O<sub>3</sub> 浓度; 时空变化; 驱动因素; 地理探测器; 中国

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1120-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807038

## Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China

HUANG Xiao-gang<sup>1,2</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>1,3\*</sup>, CAO Jun-ji<sup>3</sup>, SONG Yong-yong<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China; 3. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Based on the ozone monitoring data from 2015 to 2017, this study presents the spatial-temporal variation of the ozone concentration and its driving factors in major cities in China via Kriging interpolation, spatial autocorrelation analysis, hotspot analysis, and geographical detector. The results show that: ① The ozone pollution became increasingly heavier from 2015 to 2017, with the number of cities in which the 90th percentile of daily maximum 8-h ozone concentration exceeded the air quality standard (GB 3095-2012) increased from 74 to 121, and the proportion of non-attainment days increased from 5.2 percent to 8.1 percent. ② Ozone pollution mainly happened from April to September, during which the non-attainment days contributed 87.5 percent to 95.3 percent to the yearly total number of ozone polluted days. From May to July, ozone concentrations increased the most dramatically, with the proportion of non-attainment days increasing from 10.6 percent in 2015 to 20.5 percent in 2017. Moreover, in 2017, 83.0 percent of the moderate ozone pollution and 91.0 percent of the severe ozone pollution happened from May to July. ③ With the ever increasing ozone concentration over the North China Plain, the high ozone polluted areas such as the Beijing-Tianjin-Hebei region and Yangtze River Delta urban agglomeration are connected geographically. They form the most highly polluted area in China, which includes the Bohai Rim region, Zhongyuan urban agglomeration, Yangtze River Delta urban agglomeration, Shanxi Province, Guanzhong area, and the middle part of Inner Mongolia. In addition, cities in Pearl River Delta region, Chengdu-and-Chongqing urban agglomeration, and the southern part of East China are also gathering speed in terms of ozone pollution, among which Chengdu-and-Chongqing urban agglomeration has become a new ozone-polluted center. ④ The spatial agglomeration of ozone concentration has been enhanced year by year with hot spots distributed mainly in the North China Plain and the middle and lower reaches of the Yangtze River. In contrast, there are cold spots in Northeast China, Southwest China, and Southern China. ⑤ The analysis results from geographical detector show that meteorological factors, industrialization, urbanization, and emissions of ozone precursors all have a significant effect on the distribution of the ozone concentration, but there are also discrepancies in the priority of the driving factors in different regions and seasons.

**Key words:** ozone concentration; spatial-temporal variation; driving factors; geographical detector; China

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-09-25

基金项目: 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室项目(KLACP-2018-01); 国家自然科学基金国际合作重大项目(41210002)

作者简介: 黄小刚(1978~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为生态环境评价与治理, E-mail: huangxg@sxnu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

近地面  $O_3$  主要来源于光化学反应<sup>[1]</sup>。由于城市化和工业化的快速发展,能源消费迅速增长,人类活动排放的  $NO_x$ 、VOCs 和 CO 等污染物激增,许多城市的光化学污染越来越严重, $O_3$  已成为中国仅次于  $PM_{2.5}$  的重要大气污染物<sup>[2]</sup>。 $O_3$  是强氧化剂和温室气体,近地面大气中的  $O_3$  浓度过高,将会加快材料老化,损害人体健康,影响植物生长,严重危害生态环境,甚至对全球气候变化造成不良影响<sup>[3, 4]</sup>。科学实施污染治理,不断提升城市空气质量,是中国绿色转型发展的重要目标之一。由于中国城市经济发展水平参差不齐,气象和地形条件复杂多样, $O_3$  浓度空间分异显著,其主导驱动因素在不同的区域也不尽相同<sup>[5]</sup>。揭示不同地区  $O_3$  浓度的变化特征,识别  $O_3$  浓度空间分异的主导因素,对科学制定  $O_3$  污染防控与治理措施具有重要的理论和现实意义<sup>[6]</sup>。

$O_3$  浓度的改变是光化学反应和区域传输综合作用的结果<sup>[7]</sup>,国内外学者基于气象<sup>[2]</sup>、本地源排放<sup>[8]</sup>、 $O_3$  生成敏感性<sup>[9]</sup>、区域输送条件<sup>[10]</sup>等方面,从不同的时空尺度对  $O_3$  浓度的影响因素做了广泛的研究。小尺度的一般以单个城市作为研究对象,着重探讨  $O_3$  浓度与气象因子、前体物浓度的关系<sup>[11]</sup>,及垂直输送<sup>[12]</sup>、区域输送<sup>[13]</sup>、机动车<sup>[14]</sup>、前体物构成<sup>[15]</sup>、城市化引起的土地利用和局地环流<sup>[16, 17]</sup>等对  $O_3$  的影响,其中气象因素与  $O_3$  浓度的关系最密切,是造成  $O_3$  浓度出现季节变化和昼夜循环的主要原因,不少学者以气象因子作为城市

$O_3$  污染预警的主要指标<sup>[18, 19]</sup>。由于跨区域输送的影响, $O_3$  污染一般具有空间关联性<sup>[6]</sup>,区域尺度  $O_3$  污染问题也引起了重视,有学者基于气象、地形、流场、机动车、城市化、产业结构、 $O_3$  生成敏感性等方面,利用不同的模型对不同地区乃至全国  $O_3$  浓度的变化特征及影响因素进行过研究<sup>[5, 20~24]</sup>。

现有研究成果为深入认识  $O_3$  浓度时空变化规律及其影响因素奠定了理论和方法基础,为城市化地区  $O_3$  污染的科学防控提供了理论借鉴。但已有研究注重不同时空尺度  $O_3$  浓度规律的分析,对其影响机制的揭示多从某一方面的因素进行考察,在区域尺度上对自然和人文因素综合作用下的  $O_3$  浓度分布规律与机制的研究仍显不足。本文采用 2015~2017 年中国 356 个监测城市  $O_3$  日值数据,运用克里金插值、空间自相关分析、热点分析和地理探测器等方法,分析中国城市  $O_3$  浓度的时空演变特征,总结  $O_3$  浓度的空间集聚规律,揭示  $O_3$  浓度变化的驱动机制,识别不同区域  $O_3$  浓度空间分异的主导因素,以期为制定科学有效的  $O_3$  污染防控措施提供理论参考和决策支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源和评价标准

如图 1 所示, $O_3$  浓度数据来源于全国城市空气质量实时发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>),数据起止时间为 2015 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日。 $O_3$  日评价指标采用  $O_3$  日最大 8 h

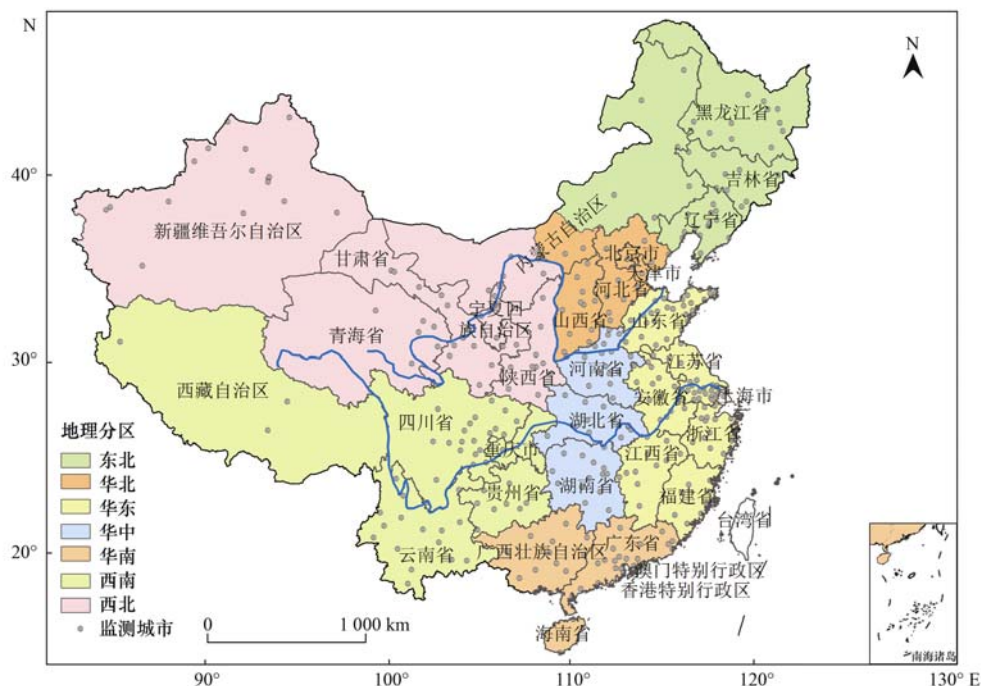


图 1 中国空气质量监测站点位置示意

Fig. 1 Spatial distribution of air quality monitoring sites in China



(滑动)平均浓度,年评价指标为  $O_3$  日最大 8 h(滑动)平均浓度第 90 百分位数,数据统计的有效性按《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)执行. 2015 ~ 2017 年全国城市空气质量实时发布平台发布的监测城市共 367 个,由于部分城市有数据缺失,本文选取其中 356 个数据较完备的城市(图 1)来研究  $O_3$  浓度时空变化特征. 根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012),  $O_3$  浓度划分优( $0 \sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、良( $101 \sim 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、轻度污染( $161 \sim 215 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、中度污染( $216 \sim 265 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、重度污染( $266 \sim 800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和严重污染( $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上)等 6 个等级,其中轻度污染及其以上为超标. 受研究资料限制,本文的研究区域不包括港澳台地区.

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)公布的中国地面气候资料日值数据集(V3.0). 地貌类型来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)发布的中国 100 万地貌类型空间分布数据.  $\text{NO}_x$  和 VOCs 排放数据来源于清华大学 MEIC 模型网站(<http://www.meicmodel.org>)提供的网格化排放清单. 社会经济统计数据主要来源于文献[25],缺失部分采用相应省市的统计年鉴或国民经济和社会发展统计公报补充. 考虑到空气质量监测站点主要在城区,模型计算使用市辖区统计口径数据. 由于社会经济统计数据以行政区为统计单元,为使数据具有可比性,本文仅对地级以上城市  $O_3$  浓度分布的驱动因素进行评价. 2016 年中国大陆共有 297 个地级以上城市,因有 7 个城市的社会经济统计数据缺失较多,2 个城市  $O_3$  监测数据缺失较多,驱动因素实际评价的城市共 288 个. 研究  $O_3$  浓度分布驱动因素的空间差异时,将中国大陆划分为 7 大地理分区<sup>[6]</sup>.

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 空间插值

由于监测数据为点状,本文采用普通克里金插值法(OKM)将  $O_3$  浓度插值成为连续的数据表面,以反映中国  $O_3$  浓度的整体分布格局. OKM 是一种基于半变异函数理论,在空间数据分布不均的情况下能对插值点属性进行全面分析的无偏最优估计算法<sup>[26]</sup>. 空间插值借助 ArcGIS 10.2 进行,计算时随机选取 10 个监测城市对结果进行交叉验证,精度在 85% 以上,插值结果能满足分析要求.

### 1.2.2 空间自相关分析

地理事物或现象在空间分布上一般具有相关性,且距离越近相关性越强. 全局 Moran's  $I$  是表征地理事物或现象空间自相关性的一个常用且有效的

指标<sup>[27]</sup>,本文使用全局 Moran's  $I$  来测度中国城市  $O_3$  浓度的空间自相关性. 计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中,  $I$  为全局 Moran's  $I$ ;  $n$  为监测城市个数;  $x_i$ 、 $x_j$  分别为城市  $i$ 、 $j$  的  $O_3$  浓度值;  $\omega_{ij}$  为空间权重矩阵;  $\bar{x}$  为平均值.  $I \in [-1, 1]$ ,  $I > 0$  表示正相关,  $I < 0$  表示负相关,  $|I|$  越大表示相关性越强,  $I = 0$  表示不相关. 采用  $Z$  检验对全局 Moran's  $I$  进行显著性检验,计算公式为:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}}$$

式中,  $Z(I)$  为全局 Moran's  $I$  的  $Z$  检验值;  $E(I)$  为其数学期望;  $\text{VAR}(I)$  为其方差.

### 1.2.3 热点和冷点分析

虽然全局 Moran's  $I$  能从整体上反映研究区事物或现象的空间自相关性,但无法识别局部的集聚状态和程度. 本文采用 Getis-Ord  $G_i^*$  来识别区域内不同空间位置的高值簇和低值簇<sup>[28]</sup>,即热点区(hot spots)和冷点区(cold spots),计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^2 - \left( \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \right)^2}{n-1}}}$$

式中,  $n$  为监测城市个数;  $x_j$  为城市  $j$  的  $O_3$  浓度值;  $\omega_{ij}$  为空间权重矩阵;  $\bar{x}$  为平均值;  $S = \sqrt{\left( \sum_{j=1}^n x_j^2 / n \right) - (\bar{x})^2}$ .  $G_i^*$  计算结果即为  $Z$  检验值,如果  $G_i^*$  值为正且显著,表明位置  $i$  周围的价值较高(高于均值),属热点;  $G_i^*$  值为负且显著,则为冷点.

### 1.2.4 地理探测器

地理探测器是揭示空间分异性及其驱动力的一组统计学方法,其核心思想是:如果自变量对因变量有重要影响,那么自变量的空间分布应该和因变量具有相似性<sup>[29]</sup>. 地理探测器已被广泛应用于自然和人为因素影响机制的研究<sup>[30]</sup>. 本文采用其中的因子探测器计算各评价因子对  $O_3$  浓度变化的解释力,计算公式如下:

$$P_{D,U} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m N_{D,i} \sigma_{U_{D,i}}^2}{N \sigma_U^2}$$

式中,  $P_{D,U}$  为影响因子  $D$  对  $O_3$  浓度的解释力;  $U$  为

影响因子  $D$  的分区;  $N$  为全国有效监测城市数量;  $N_{D,i}$  为次一级分区城市数量;  $m$  为次级分区数量;  $\sigma_U^2$  为全国有效监测城市 O<sub>3</sub> 浓度的方差;  $\sigma_{U,D,i}^2$  为次一级分区 O<sub>3</sub> 浓度方差. 因 O<sub>3</sub> 年评价指标为 O<sub>3</sub> 日最大 8 h(滑动)平均浓度第 90 百分位数, 因此, 计算评价因子的影响力时 O<sub>3</sub> 浓度也使用该指标.  $P_{D,U}$  的值为  $[0,1]$ , 值越大说明影响因子  $D$  对 O<sub>3</sub> 浓度变化的解释力越强.

因地理探测器不能识别探测因子的影响方向, 本文采用相关分析为数值型因子确定影响方向, 探测因子与 O<sub>3</sub> 浓度呈正相关关系确定为正向影响, 负相关关系为负向影响.

2 中国城市 O<sub>3</sub> 浓度时空变化特征

2.1 时间变化特征

2015~2017 年, 中国城市 O<sub>3</sub> 浓度加速上升, 年评价指标超标的城市快速增加, 优良率下降(表 1). 各城市 O<sub>3</sub> 日最大 8 h(滑动)平均浓度第 90 百分位数的平均值由 2015 年的 137  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 上升到 2016 和 2017 年的 140  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 151  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 分别

比上一年增加了 2.2% 和 7.9%. 年评价指标为优和良的城市分别由 2015 年的 26 个和 256 个下降到 2017 年的 8 个和 227 个, 优和良的比例分别下降了 5.1 个百分点和 8.1 个百分点; 超标城市则由 74 个增加到 121 个, 超标城市比例上升了 13.2 个百分点.

2015~2017 年 O<sub>3</sub> 日评价结果以优良为主(表 2), 但超标天数比例稳步提高, 中、重度污染天数比重加大. O<sub>3</sub> 日评价指标为优的平均天数由 2015 年的 248 d, 下降到 2017 年的 224 d, 减少了 24 d. O<sub>3</sub> 平均超标天数则由 2015 年的 19 d(超标天数比例 5.2%), 上升到 2017 年的 30 d(超标天数比例 8.2%), 增幅为 57.9%, 其中 O<sub>3</sub> 轻度污染平均天数由 17 d 上升到 24 d, 增幅为 41.2%; 中度污染由 2 d 上升到 5d, 增幅为 150.0%; 重度污染由 0 d 上升到 1 d. O<sub>3</sub> 中、重度污染天数在总污染天数中的比重由 11.8% 上升到 20.0%. 以 O<sub>3</sub> 为首要污染物的污染天数占总污染天数的比例由 19.1% 上升到 34.4%, 仅次于 PM<sub>2.5</sub>.

O<sub>3</sub> 浓度和超标天数的月变化图显示(图 2), O<sub>3</sub> 污染主要发生在 4~9 月, 且 2016 年后集中程度

表 1 2015~2017 年中国城市 O<sub>3</sub> 年评价结果

Table 1 Annual evaluation results of ozone during the years 2015 to 2017 in China

| 年份   | O <sub>3</sub> 浓度 <sup>1)</sup><br>/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 优    |      | 良    |      | 轻度污染 |      | 中度污染 |      | 重度污染 |      |
|------|----------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      |                                                                      | 数量/个 | 比例/% | 数量/个 | 比例/% | 数量/个 | 比例/% | 数量/个 | 比例/% | 数量/个 | 比例/% |
| 2015 | 137                                                                  | 26   | 7.3  | 256  | 71.9 | 74   | 20.8 | 0    | 0.0  | 0    | 0.0  |
| 2016 | 140                                                                  | 21   | 5.9  | 266  | 74.7 | 68   | 19.1 | 1    | 0.3  | 0    | 0.0  |
| 2017 | 151                                                                  | 8    | 2.2  | 227  | 63.8 | 119  | 33.4 | 2    | 0.6  | 0    | 0.0  |

1) O<sub>3</sub> 浓度指所有监测城市 O<sub>3</sub> 日最大 8 h(滑动)平均浓度第 90 百分位数的平均值

表 2 2015~2017 年中国城市 O<sub>3</sub> 日评价结果<sup>1)</sup>

Table 2 Daily evaluation results of ozone during the years 2015 to 2017 in China

| 年份   | 优    |      | 良    |      | 轻度污染 |      | 中度污染 |      | 重度污染 |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | 数量/个 | 比例/% | 数量/个 | 比例/% | 数量/个 | 比例/% | 数量/个 | 比例/% | 数量/个 | 比例/% |
| 2015 | 248  | 68.1 | 97   | 26.7 | 17   | 4.7  | 2    | 0.5  | 0    | 0.0  |
| 2016 | 242  | 66.2 | 103  | 28.1 | 19   | 5.2  | 2    | 0.5  | 0    | 0.0  |
| 2017 | 224  | 61.3 | 112  | 30.6 | 24   | 6.6  | 5    | 1.3  | 1    | 0.2  |

1) 天数指所有监测城市的平均天数

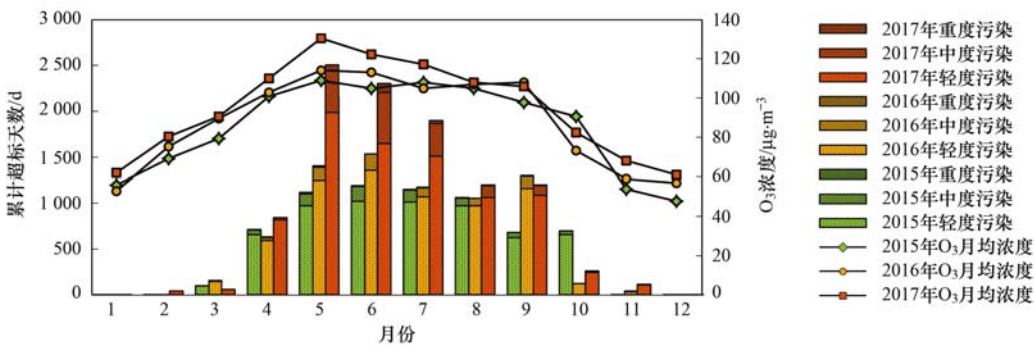


图 2 2015~2017 年 O<sub>3</sub> 浓度和超标天数的月变化

Fig. 2 Monthly variation of ozone concentration and the number of days with ozone non-attainment during the years 2015 to 2017 in China



更高. 2015 年中国城市  $O_3$  累计超标天数为 6 784 d, 其中有 5 931 d 发生在 4 ~ 9 月, 占全年超标天数的 87.5%, 2016 年和 2017 年这一比例提高到 95.3% 和 95.1%. 图 2 还可以看出, 除在个别月份  $O_3$  浓度变化曲线有交叉外, 各月平均浓度总体呈逐年上升趋势. 其中, 5 ~ 7 月上升最快, 平均浓度由 2015 年的  $107 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  上升到 2017 年的  $123 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均超标天数比例由 10.6% 上升到 20.5%.  $O_3$  中度和重度污染主要发生在 5 ~ 7 月, 2017 年 5 ~ 7 月  $O_3$  中度和重度污染累计天数分别为 1 375 d 和 191 d, 分别占全年的 83.0% 和 91.0%. 可见,  $O_3$  污染主要发生在仲春至初秋, 且污染越严重的季节, 污染加重趋势越明显.

## 2.2 空间格局的演变

### 2.2.1 空间格局的年际演变

分别对 2015 ~ 2017 年中国城市  $O_3$  日最大 8 h (滑动) 平均浓度第 90 百分位数进行插值, 用以反映  $O_3$  浓度的空间分布格局的演变过程, 结果表明 [图 3(a) ~ 3(c)],  $O_3$  污染具有城市群污染特征, 且高污染范围和强度逐年扩大和增强. 一般认为, 京津冀、长三角和珠三角地区是我国三大  $O_3$  污染最严重的区域, 随着华北平原  $O_3$  浓度的快速上升, 京津冀、长三角地区  $O_3$  高污染区域已连成一片,

形成了包括环渤海地区、中原城市群、长三角城市群、山西、关中地区和内蒙古中部集中连片分布的  $O_3$  高污染区, 也是我国  $O_3$  污染最严重的区域. 2017 年该区域内 80% 以上的城市年评价指标超标,  $O_3$  日最大 8 h (滑动) 平均浓度第 90 百分位数的平均值由 2015 年的  $151 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  上升到 2017 年的  $172 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均超标天数比例由 8.7% 上升到 14.2% [图 3(d) ~ 3(f)]. 其中, 山西中南部、关中平原、河北南部、河南北部和安徽省的  $O_3$  浓度上升最快, 各城市  $O_3$  日最大 8 h (滑动) 平均浓度第 90 百分位数的平均值由 2015 年的  $125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  上升到 2017 年的  $185 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 年均上升 22%, 平均超标天数比例由 3.5% 上升到 17.7%. 珠三角地区  $O_3$  污染持续增加, 年评价指标超标城市由 2015 年的 1 个增加到 2017 年的 4 个,  $O_3$  日最大 8 h (滑动) 平均浓度第 90 百分位数的平均值由  $145 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  上升到  $165 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均超标天数比例由 6.2% 上升到 11.2%, 稳居华南  $O_3$  污染中心. 成渝城市群  $O_3$  污染逐年加重, 特别是重庆市,  $O_3$  日最大 8 h (滑动) 平均浓度第 90 百分位数已由 2015 年的  $127 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  上升到 2017 年的  $162 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 与成都和德阳一起, 成为我国新的  $O_3$  污染中心. 此外, 江西和福建  $O_3$  浓度上升也较快, 虽然目前污染率仍较低,

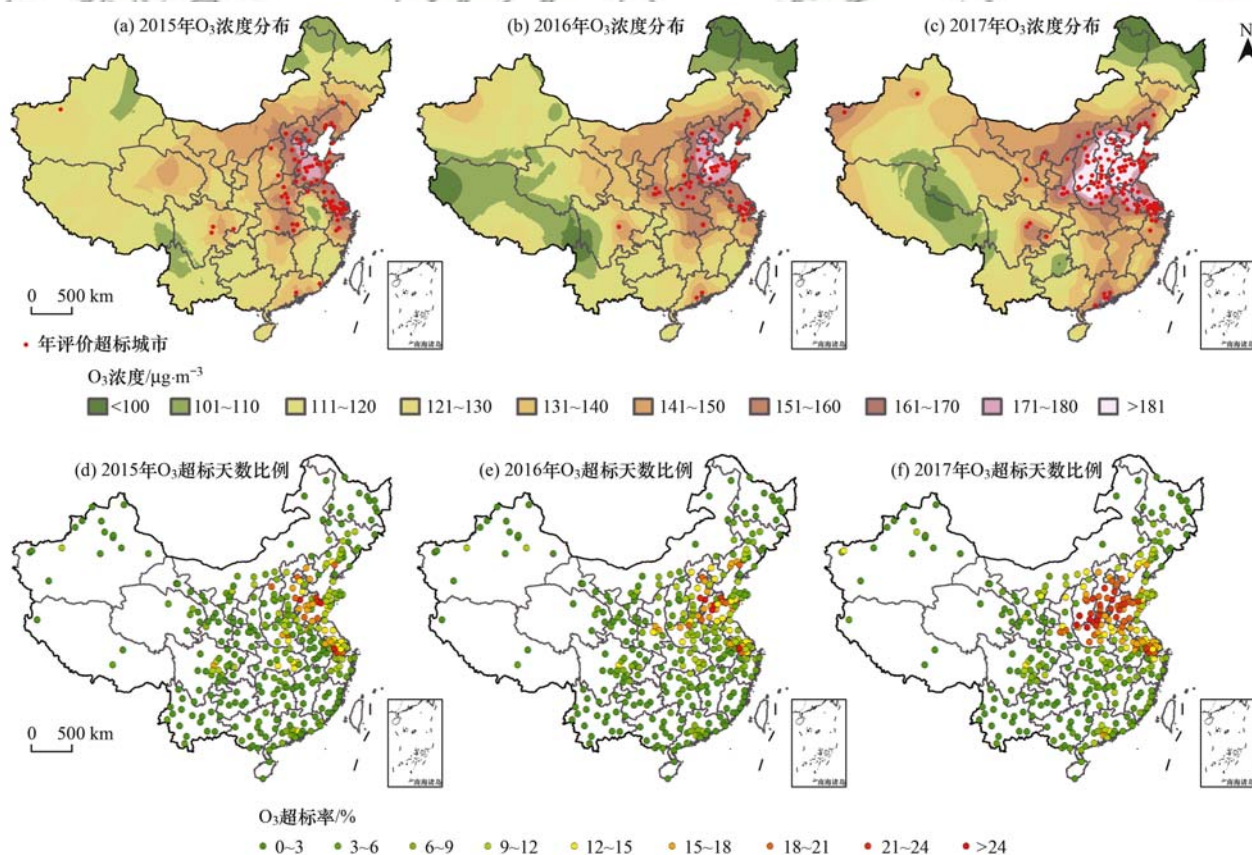


图 3 2015 ~ 2017 年  $O_3$  浓度空间格局的演变

Fig. 3 Spatial evolution of ozone concentration from the years 2015 to 2017 in China

但也应引起重视。西藏、青海、新疆、云南、贵州、广西、海南及东北地区中北部O<sub>3</sub>空气质量总体保持良好，O<sub>3</sub>日最大8 h(滑动)平均浓度第90百分位数多在130 μg·m<sup>-3</sup>以下，大部分城市未出现O<sub>3</sub>超标现象。

2.2.2 空间格局的季节演变

本文以2016年为例说明O<sub>3</sub>浓度空间格局的季节演变过程(图4)，浓度插值指标采用O<sub>3</sub>日最大8 h(滑动)平均浓度第90百分位数。图4显示，春、夏季O<sub>3</sub>浓度分布格局与年度分布格局大体相同，华北平原是全国O<sub>3</sub>污染中心，在经济发达的长三角城市群、珠三角城市群和成渝城市群形成局部O<sub>3</sub>污染中心，东北中北部、华南和西南的大部分地区是O<sub>3</sub>浓度的低值区。但夏季O<sub>3</sub>浓度、超标天数比例明显更高，污染范围也更广，各城市O<sub>3</sub>日最大8 h(滑动)平均浓度第90百分位数的平均值由春季的141 μg·m<sup>-3</sup>上升到夏季的151 μg·m<sup>-3</sup>，平均超标天数比例由6.7%上升到11.5%。超标天数比例大于20%的城市由春季的

24个，扩大到夏季的83个，分布范围由华北平原和长三角地区，向北扩展到辽宁南部，向西扩展到关中平原地区，成渝城市群、珠三角城市群也有部分城市超标天数比例超过了20%。秋季，除华南和华中略有上升外，其余地区O<sub>3</sub>浓度总体开始下降，纬度越高下降的速度越快，其中东北、华北降幅最大，分别为45 μg·m<sup>-3</sup>和44 μg·m<sup>-3</sup>，全国O<sub>3</sub>日最大8 h(滑动)平均浓度第90百分位数的平均值降至128 μg·m<sup>-3</sup>，平均超标天数比例降至4.5%。由于O<sub>3</sub>浓度的下降，华北平原O<sub>3</sub>高污染范围明显缩小，但仍是全国O<sub>3</sub>高污最严重的区域。而随着华中O<sub>3</sub>浓度的上升，在长江中游城市群形成了O<sub>3</sub>污染次中心，全国O<sub>3</sub>浓度高值中心有经华中地区南移的趋势。冬季，全国O<sub>3</sub>浓度持续下降，O<sub>3</sub>日最大8 h(滑动)平均浓度第90百分位数的平均值降至88 μg·m<sup>-3</sup>，O<sub>3</sub>污染基本消失，平均超标天数比例为0.08%。但华中、华东和华北下降速度快于华南，O<sub>3</sub>浓度分布格局演变为南高北低。

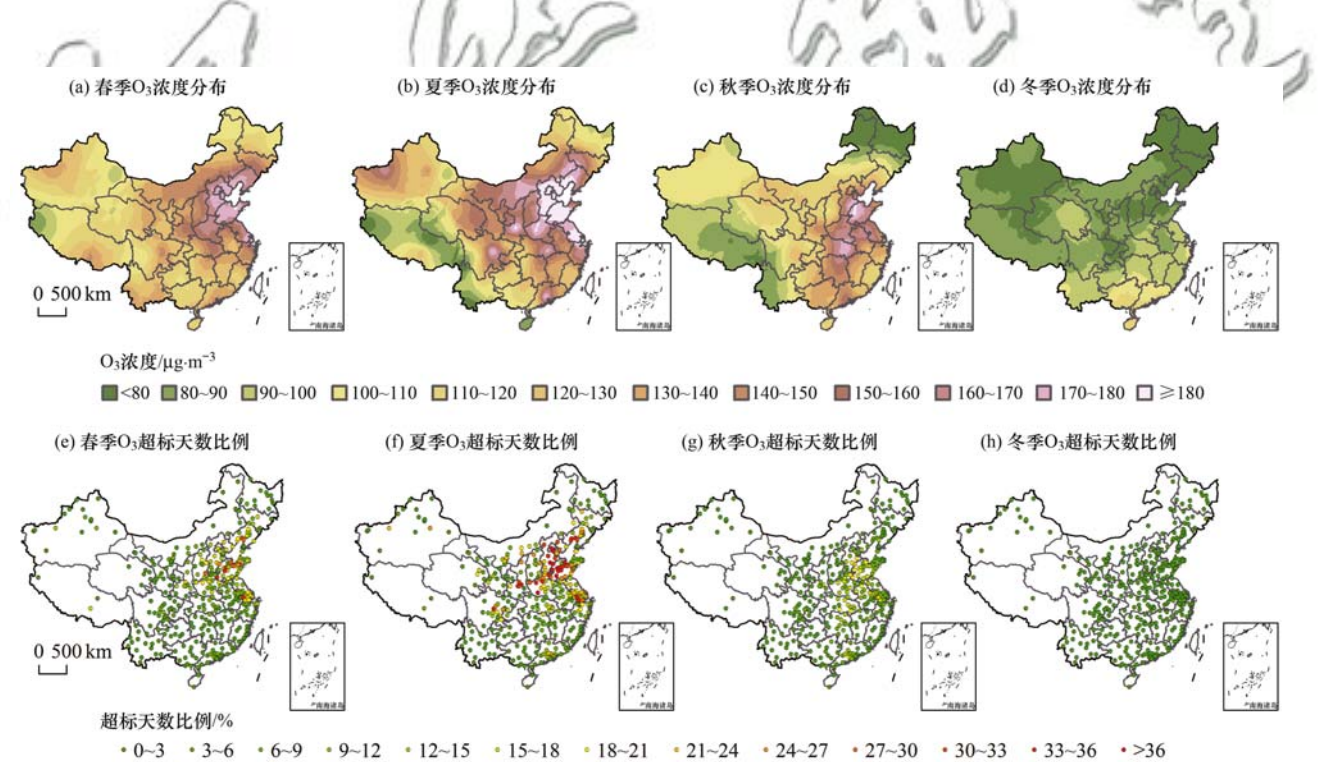


图4 2016年O<sub>3</sub>浓度空间格局的季节演变

Fig. 4 Seasonal evolution of ozone concentration in China in 2016

2.3 空间集聚的演变特征

2.3.1 空间集聚的年际演变

表3列出了2015~2017年中国城市O<sub>3</sub>日最大8 h(滑动)平均浓度第90百分位数的全局Moran's I。由表3可知，Moran's I均大于0，且通过了99%的显著性检验，表明中国城市O<sub>3</sub>浓度存在极显著

表3 2015~2017年中国城市O<sub>3</sub>浓度全局Moran's I<sup>1)</sup>

Table 3 Moran's I of ozone concentrations in China from 2015 to 2017

| 项目        | 2015年    | 2016年    | 2017年    |
|-----------|----------|----------|----------|
| Moran's I | 0.37 *** | 0.49 *** | 0.66 *** |
| Z(I)      | 24.92    | 33.06    | 44.87    |

1) \*\*\*、\*\*、\* 分别表示通过了置信度为99%、95%、90%的显著性检验，下同



的正空间自相关, 空间上具有相似值的集聚特征. 全局 Moran's  $I$  逐年增大, 说明  $O_3$  集聚性逐年增强.

利用 Getis-Ord  $G_i^*$  探测  $O_3$  浓度具体的集聚区域, 结果表明(图 5), 2015~2017 年中国城市  $O_3$  浓度热点区主要分布于华北平原和长江中下游平原, 冷点区主要分布于东北、西南和华南, 但热点

区在逐年扩大、冷点区也有局部调整. 2017 年热点区向西扩展至陕西中北部和内蒙古中部, 向南扩展至长江中游城市群北部, 北面则收缩至辽宁的南部; 西南冷点区扩展至湖南中部, 东北地区的冷点区则扩展至辽宁境内, 华南及华东南部沿海地区大部分冷点消退, 新疆境内的冷点大体保持不变.

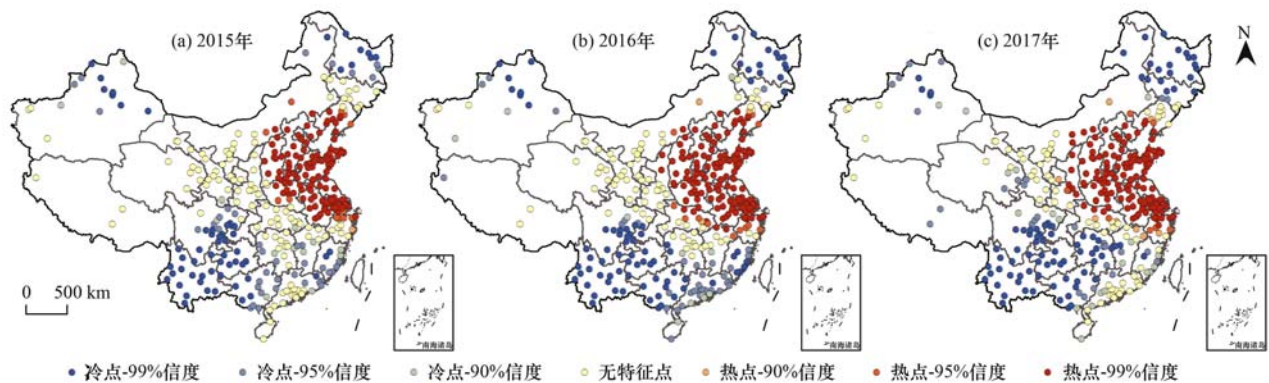


图 5 2015~2017 年  $O_3$  浓度空间集聚的演变

Fig. 5 Spatial agglomeration of annual ozone concentrations in China from 2015 to 2017

### 2.3.2 空间集聚的季节演变

$O_3$  浓度空间集聚的季节演变过程如图 6 所示, 春、夏季  $O_3$  浓度集聚格局与年度集聚格局大体相同, 热点主要分布在以华北平原为中心, 南至长三角城市群, 北至东北南部, 西至关中平原的广大区域, 冷点主要分布在华南、西南、东北中北部和新

疆北部. 但与春季相比, 夏季冷点明显向南收缩. 秋季, 热点区北部向南收缩, 南部经华中向南扩展至华南, 冷点具有由内陆向北转移的趋势. 冬季, 除东北保持为冷点外, 其余地区冷、热点格局与春、夏季相反, 热点主要分布在南方, 华北平原等北方地区多演变为冷点.

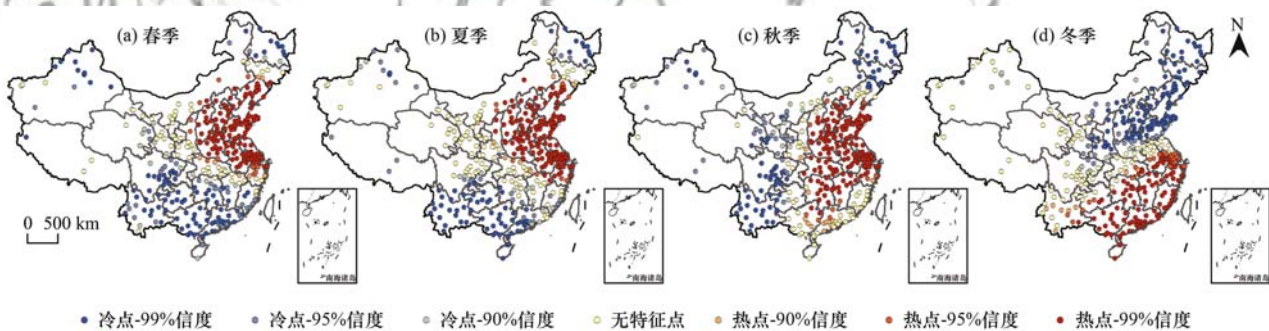


图 6 2016 年  $O_3$  浓度空间集聚的季节演变

Fig. 6 Seasonal evolution of the spatial agglomeration of ozone concentration in China in 2016

## 3 中国城市 $O_3$ 浓度空间格局的驱动因素

### 3.1 评价因子选择

$O_3$  污染的根源在于工业化和城市化等人类活动排放的  $O_3$  前体物增加, 自然因素则对  $O_3$  的生成、积累、扩散有重要影响<sup>[2]</sup>. 总结发现,  $O_3$  浓度分布的驱动因素涉及气温、太阳辐射、大气环流、降雨、地形地貌等自然因素, 还与产业活动、机动车尾气排放、燃料燃烧等人为因素关系密切. 据此, 本文选取对  $O_3$  浓度影响较大的气温( $X_1$ )、日照时数( $X_2$ )、风速( $X_3$ )、降水量( $X_4$ )、相对湿度( $X_5$ )、地貌类型( $X_6$ )等自然因素, 年平均人口

( $X_7$ )、建成区面积( $X_8$ )、绿地面积( $X_9$ )、人均地区生产总值( $X_{10}$ )、民用汽车拥有量( $X_{11}$ )等城市化因素, 第二产业占 GRP 比重( $X_{12}$ )、规模以上工业总产值( $X_{13}$ )、工业二氧化硫排放量( $X_{14}$ )、工业烟(粉)尘排放量( $X_{15}$ )、供气总量( $X_{16}$ )等工业化因素, 以及  $NO_x$  排放量( $X_{17}$ )和 VOCs 排放量( $X_{18}$ )等  $O_3$  前体物排放量指标, 共 18 个指标. 各指标使用分位数(quantile)法等分为 5 级.

### 3.2 中国城市 $O_3$ 浓度空间格局驱动因素解析

从全国尺度来看, 有 16 个因子的解释力通过了显著性检验(表 4), 气象、工业化、城市化因素和  $O_3$  前体物排放量对  $O_3$  浓度分布都有显著影响.

其中，O<sub>3</sub> 前体物排放量指标的影响力最大，VOCs 排放量(0.323<sup>\*\*\*</sup>)和 NO<sub>x</sub> 排放量(0.292<sup>\*\*\*</sup>)*P* 值居前 2 位，表明前体物排放是造成中国城市 O<sub>3</sub> 污染的主要驱动力。VOCs 排放量影响力大于 NO<sub>x</sub>，可能与 O<sub>3</sub> 生成敏感型有关，已有的中国城市 O<sub>3</sub> 生成敏感型研究成果统计表明<sup>[24]</sup>，城区 O<sub>3</sub> 生成敏感型多属于 VOCs 控制型，O<sub>3</sub> 浓度对 VOCs 排放量更敏感。工业化因素的影响力次之，其中供气总量(0.249<sup>\*\*\*</sup>)和规模以上工业总产值(0.187<sup>\*\*\*</sup>)的 *P* 值仅次于 O<sub>3</sub> 前体物排放量指标，此外，工业二氧化硫排放量(0.081<sup>\*\*\*</sup>)和工业烟(粉)尘排放量(0.065<sup>\*\*\*</sup>)的影响力也通过了显著性检验。第二产业占 GRP 比重的影响力未通过显著性检验，可能是因为目前我国正处于经济结构调整时期，经济发达地区第二产业占 GRP 比重虽已率先下降，但整体上对工业的依赖度仍然较高，污染仍比较严重，导致第二产业占 GRP 比重对 O<sub>3</sub> 浓度分布的区分度不高。城市化因素的影响力第三，所有评价因子的影响力都通过了显著性检验，其中民用汽车拥有量(0.179<sup>\*\*\*</sup>)最大，其余依次为建成区面积(0.121<sup>\*\*\*</sup>)、年平均人口(0.120<sup>\*\*\*</sup>)、人均地区生产总值(0.097<sup>\*\*\*</sup>)和绿地面积(0.091<sup>\*\*\*</sup>)。气象因

素的影响力最小，其中气温(0.166<sup>\*\*\*</sup>)相对较大，降水量(−0.080<sup>\*\*\*</sup>)、风速(0.054<sup>\*</sup>)、相对湿度(−0.040<sup>\*\*</sup>)和日照时数(0.035<sup>\*\*</sup>)依次。所有通过显著性检验的影响因子中，只有降水和相对湿度的影响是负向的，二者都是 O<sub>3</sub> 的重要清除因子。云雨天气一方面能使日照时数减少，光化学反应减弱，另一方面降雨本身对 O<sub>3</sub> 和 O<sub>3</sub> 前体物都有冲刷作用，能直接和间接地使 O<sub>3</sub> 浓度降低。而水汽所含的自由基 H、OH 等能迅速将 O<sub>3</sub> 分解<sup>[2]</sup>，消耗 O<sub>3</sub>。我国西南和华南地区冷点的形成就主要受其驱动。值得注意的是，风速的影响力是正向的，这与许多城市的研究结论不同，一般认为风有助于污染物的扩散，能显著降低污染物浓度<sup>[2,18]</sup>。对于污染较严重的城市来说确实如此，但同时也对下风向城市造成输入型污染，使污染物浓度升高，这种正相关关系在临安得到证实<sup>[31]</sup>。这说明，从大的空间尺度来看，风对 O<sub>3</sub> 的扩散作用并非对 O<sub>3</sub> 清除，而是使区域 O<sub>3</sub> 污染出现趋同性，造成区域性污染的重要原因。地貌类型因子未通过显著性检验，说明地形地貌对局部 O<sub>3</sub> 浓度的变化可能有一定影响<sup>[20]</sup>，但从全国尺度来看其影响并不明显，这与段晓瞳等<sup>[23]</sup>的研究结论一致。

表 4 不同尺度 O<sub>3</sub> 浓度空间分布驱动因素的地理探测结果

Table 4 Geographical detector analysis of driving factors for the spatial distribution of ozone concentration at various levels

| 指标              | 全国                    | 东北                   | 华北                 | 华东                    | 华中                    | 西南                   | 华南                   | 西北                 |
|-----------------|-----------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| X <sub>1</sub>  | 0.166 <sup>***</sup>  | 0.665 <sup>***</sup> | 0.241              | −0.379 <sup>***</sup> | −0.352 <sup>**</sup>  | 0.198                | 0.056                | 0.209              |
| X <sub>2</sub>  | 0.035 <sup>**</sup>   | 0.19                 | 0.261              | 0.292 <sup>***</sup>  | 0.477 <sup>***</sup>  | 0.127                | 0.166                | 0.126              |
| X <sub>3</sub>  | 0.054 <sup>*</sup>    | 0.058                | 0.115              | 0.172 <sup>*</sup>    | 0.085                 | 0.077                | 0.108                | 0.052              |
| X <sub>4</sub>  | −0.080 <sup>***</sup> | 0.138                | 0.183              | −0.360 <sup>***</sup> | −0.385 <sup>***</sup> | 0.083                | 0.273                | 0.071              |
| X <sub>5</sub>  | −0.040 <sup>**</sup>  | −0.269 <sup>*</sup>  | 0.25               | −0.309 <sup>***</sup> | 0.304                 | −0.410 <sup>**</sup> | 0.174                | 0.103              |
| X <sub>6</sub>  | 0.154                 | 0.093                | 0.053              | 0.202                 | 0.587                 | 0.214                | 0.154                | 0.341              |
| X <sub>7</sub>  | 0.120 <sup>***</sup>  | 0.248                | 0.113              | 0.251 <sup>***</sup>  | 0.186                 | 0.139                | 0.179                | 0.062              |
| X <sub>8</sub>  | 0.121 <sup>***</sup>  | 0.085                | 0.207              | 0.287 <sup>***</sup>  | 0.021                 | 0.179                | 0.341 <sup>**</sup>  | 0.157              |
| X <sub>9</sub>  | 0.091 <sup>***</sup>  | 0.072                | 0.149              | 0.207 <sup>***</sup>  | 0.062                 | 0.314                | 0.265                | 0.128              |
| X <sub>10</sub> | 0.097 <sup>***</sup>  | 0.376 <sup>**</sup>  | 0.3                | 0.154 <sup>**</sup>   | 0.062                 | 0.154                | 0.214                | 0.224              |
| X <sub>11</sub> | 0.179 <sup>***</sup>  | 0.161                | 0.296              | 0.284 <sup>***</sup>  | 0.450 <sup>***</sup>  | 0.131                | 0.289 <sup>*</sup>   | 0.244              |
| X <sub>12</sub> | 0.011                 | 0.221                | 0.364 <sup>*</sup> | 0.048                 | 0.077                 | 0.327 <sup>*</sup>   | 0.088                | 0.360 <sup>*</sup> |
| X <sub>13</sub> | 0.187 <sup>***</sup>  | 0.323 <sup>*</sup>   | 0.423 <sup>*</sup> | 0.252 <sup>***</sup>  | 0.099                 | 0.184                | 0.433 <sup>***</sup> | 0.162              |
| X <sub>14</sub> | 0.081 <sup>***</sup>  | 0.237                | 0.114              | 0.199 <sup>***</sup>  | 0.102                 | 0.051                | 0.181                | 0.072              |
| X <sub>15</sub> | 0.065 <sup>***</sup>  | 0.342 <sup>**</sup>  | 0.332              | 0.065                 | 0.123                 | 0.075                | 0.097                | 0.111              |
| X <sub>16</sub> | 0.249 <sup>***</sup>  | 0.215                | 0.147              | 0.351 <sup>***</sup>  | 0.143                 | 0.208                | 0.393 <sup>**</sup>  | 0.343              |
| X <sub>17</sub> | 0.292 <sup>***</sup>  | 0.517 <sup>***</sup> | 0.349 <sup>*</sup> | 0.257 <sup>***</sup>  | 0.307 <sup>**</sup>   | 0.256                | 0.305 <sup>*</sup>   | 0.115              |
| X <sub>18</sub> | 0.323 <sup>***</sup>  | 0.519 <sup>***</sup> | 0.413 <sup>*</sup> | 0.246 <sup>***</sup>  | 0.291 <sup>*</sup>    | 0.356 <sup>**</sup>  | 0.355 <sup>**</sup>  | 0.112              |

3.3 O<sub>3</sub> 浓度空间分布驱动因素的区域差异

为了了解中国不同地理分区 O<sub>3</sub> 浓度空间分布的驱动因素，本文利用地理探测器分别对中国 7 大地理分区进行了探测，结果如表 4 所示。

(1) 东北地区通过显著性检验的驱动因子有气温(0.665<sup>\*\*\*</sup>)、NO<sub>x</sub> 排放量(0.517<sup>\*\*\*</sup>)、VOCs 排

量(0.519<sup>\*\*\*</sup>)、人均地区生产总值(0.376<sup>\*\*</sup>)、工业烟(粉)尘排放量(0.342<sup>\*\*</sup>)、规模以上工业总产值(0.323<sup>\*</sup>)和相对湿度(−0.269<sup>\*</sup>)等 7 个。其中气温的解释力远大于其他因素，说明气温是东北地区 O<sub>3</sub> 浓度分布的主导因素。东北地区尤其是东北地区中北部年均气温较低，夏季高温持续的时间



短,光化学反应较弱, $O_3$ 浓度全年普遍较低。 $NO_x$ 排放量、VOCs排放量、人均地区生产总值、工业烟(粉)尘排放量和规模以上工业总产值对东北地区 $O_3$ 浓度分布也有重要影响,其中辽宁南部 $O_3$ 污染较严重,除因气温相对较高外,其地处环渤海经济圈,经济较发达、工业密集、工业污染物排放量较大也是重要原因;大庆、鹤岗、佳木斯等能源型或经济相对发达的城市 $O_3$ 浓度明显比周边城市高,也是受其驱动的结果。

(2)华北地区 $O_3$ 浓度分布主要受规模以上工业总产值(0.423<sup>\*</sup>)、VOCs(0.413<sup>\*</sup>)、第二产业占GRP比重(0.364<sup>\*</sup>)和 $NO_x$ (0.349<sup>\*</sup>)驱动,只有这4个因素通过了显著性检验。京津冀地区工业发达、人口密布、城市化水平高,是我国经济发平水展最高的地区之一,也是我国环境污染最严重的区域。山西、内蒙古中部大多是重工业城市,空气污染也比较严重。导致华北地区 $O_3$ 浓度分布具有明显的工业指向性,工业总产值越高、第二产业占GRP比重越大的城市, $O_3$ 前体物的排放量往往越大, $O_3$ 浓度就越高。气象因素的影响力不大,尤其是降水和相对湿度对 $O_3$ 的清除弱,这可能也是华北地区 $O_3$ 污染较严重的原因。

(3)华东地区信度超过90%的驱动因素有15个, $P$ 值在0.154~0.379之间。气象要素的影响明显高于其它因子, $P$ 值最大的5个影响因子中有4个是气象要素因子,分别为气温(-0.379<sup>\*\*\*</sup>)、降水量(-0.360<sup>\*\*\*</sup>)、相对湿度(-0.309<sup>\*\*\*</sup>)和日照时数(0.292<sup>\*\*\*</sup>)。然而与传统的认识不同,华东地区气温的驱动是负向,这是由于气温的影响被降水量、相对湿度和日照时数的影响抵消所致。华东地区年均气温由南部最高的22.5℃(漳州),降到北部最低的13.3℃(烟台),南北年均气温虽然相差9.2℃,但 $O_3$ 污染主要发生在夏季午后13~16点,这个时段华东地区温度相差并不大,且多超过25℃,都具备强烈光化学反应的温度条件<sup>[18]</sup>。降水量和相对湿度的南北差异却很大,降水量由南部最高的2875.4 mm(龙岩),下降到北部最低的531.1 mm(烟台),两者相差5.4倍,相对湿度由南部最高的80.5%(三明),下降到北部最低的57.1%(济南)。因此,降水和相对湿度对 $O_3$ 的清除作用远大于气温对光化学反应的正向影响,致使气温的影响力被降水量“挟持”而呈负向,并非其真实作用的反映。此外,华东地区日照时数的空间分布与气温相反,由南部最小的1187h(宁德),逐渐增加到北部最大的2665 h(东营),更长的日照时数使北部的光化学反应更强烈, $O_3$ 浓度更高,这也是华东地区

$O_3$ 浓度北高南低的重要原因。工业化和城市化影响因素中,供气总量的驱动力(0.351<sup>\*\*\*</sup>)最大,建成区面积(0.287<sup>\*\*\*</sup>)、民用汽车拥有量(0.284<sup>\*\*\*</sup>)、规模以上工业总产值(0.252<sup>\*\*\*</sup>)、年平均人口(0.251<sup>\*\*\*</sup>)依次,工业二氧化硫排放量(0.199<sup>\*\*\*</sup>)和人均地区生产总值(0.154<sup>\*\*</sup>)也有较大影响。综合反映到 $O_3$ 前体物的排放量上, $NO_x$ 排放量(0.257<sup>\*\*\*</sup>)和VOCs排放量(0.246<sup>\*\*\*</sup>)对 $O_3$ 浓度分布有显著的驱动力。在降水量较大的长三角地区, $O_3$ 浓度污染却较严重,就是工业化、城市化和前体物排放量因素驱动的结果。

(4)华中地区有6个影响因子通过了显著性检验, $P$ 值大小依次为日照时数(0.477<sup>\*\*\*</sup>)、民用汽车拥有量(0.450<sup>\*\*\*</sup>)、降水量(-0.385<sup>\*\*\*</sup>)、气温(-0.352<sup>\*\*</sup>)、 $NO_x$ 排放量(0.307<sup>\*\*</sup>)和VOCs排放量(0.291<sup>\*</sup>)。华中地区日照时数北高南低,且南北差异明显,是华中地区 $O_3$ 浓度北高南低的主导因素。降水量作为抑制因子,南高北低,是华中地区 $O_3$ 浓度北高南低分布的另一个重要驱动因子。与华东地区相似,受日照时数和降水量影响的“挟持”,华中地区气温的驱动作用也表现为负向,也并非其真实作用的反映。人为因素方面只有民用汽车拥有量通过了显著性检验,河南是我国人口大省,2016年民用汽车保有量达2150万辆,在省级行政单元中居全国第三位,远高于湖南的1179万辆和湖北的1104万辆,汽车尾气的排放量大可能是河南省 $O_3$ 浓度较高的重要原因。

(5)西南地区是我国另一个 $O_3$ 浓度低值区,与东北地区以气温为主要驱动因素不同,西南地区相对湿度(-0.410<sup>\*\*</sup>)的影响最大。西南地区相对湿度较大,特别是四川盆地和云贵高原地区,受盆地地形和西南气流的影响,湿度大、多阴雨天气、多云雾,成为西南地区 $O_3$ 浓度分布的主要影响因子。第二产业占GRP比重(0.327<sup>\*</sup>)也有较大的解释力,西南地区经济发展对第二产业的依赖较大,各城市第二产业占GRP比重平均为47.3%,成渝城市群甚至达52.2%,远大于全国的39.8%。经济发展对工业依赖过大,这可能是近年来成渝城市群 $O_3$ 浓度上升较快的原因。 $O_3$ 前体物排放因子中,只有VOCs(0.356<sup>\*\*</sup>)的影响力通过了显著性检验,短期内 $O_3$ 污染治理应优先控制VOCs排放量。除相对湿度、第二产业占GRP比重和VOCs排放量外,其余因子的影响力未通过显著性检验。

(6)华南地区 $O_3$ 浓度分布主要受工业化、城市化因素和 $O_3$ 前体物排量因子的驱动,信度超过90%的影响因子均属于此, $P$ 值由大到小依次为规

模以上工业总产值 (0.433<sup>\*\*\*</sup>)、供气总量 (0.393<sup>\*\*</sup>)、VOCs (0.355<sup>\*\*</sup>)、建成区面积 (0.341<sup>\*\*</sup>)、NO<sub>x</sub> (0.305<sup>\*</sup>) 和民用汽车拥有量 (0.289<sup>\*</sup>)。华南地区降水普遍较大,雨季长,大部分地区属 O<sub>3</sub> 浓度冷点区。但珠三角地区却是我国主要的 O<sub>3</sub> 高污染地区之一,就主要受工业化、城市化等造成的 O<sub>3</sub> 前体物排放量增加的影响。

(7)相较于东部沿海地区,西北地区 O<sub>3</sub> 浓度分布的驱动因素并不明显,信度超过 90% 的驱动因素只有第二产业占 GRP 比重(0.360<sup>\*</sup>)。可能是因为西北地区深居内陆,面积广大,地形复杂,气候条件多变,经济相对落后,各城市 O<sub>3</sub> 浓度的影响因素不一,难以形成强有力的、全局性的主导影响因素。

3.4 O<sub>3</sub> 浓度空间分布驱动因素的季节差异

由于工业化、城市化统计量一般按年度统计,季度指标值难以获取,因此季节 O<sub>3</sub> 浓度分布驱动因素的探测只针对气象和前体物排放量因子(表 5)。表 5 显示,不同季节 O<sub>3</sub> 浓度分布的主导因素不同。春、夏季 O<sub>3</sub> 浓度分布的主导因素是 O<sub>3</sub> 前体物排放因子,其中春季 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 排放量的影响力分别为 0.225<sup>\*\*\*</sup> 和 0.224<sup>\*\*\*</sup>,夏季分别为 0.362<sup>\*\*\*</sup> 和 0.337<sup>\*\*\*</sup>;秋季的主导因素为气温(0.264<sup>\*\*\*</sup>)和 VOCs 排放量(0.217<sup>\*\*\*</sup>);冬季的主导因素为气温(0.365<sup>\*\*\*</sup>)。

表 5 不同季节 O<sub>3</sub> 浓度空间分布驱动因素的地理探测结果

Table 5 Geographical detector analysis of driving factors for the seasonal distribution of ozone concentration

| 季节              | 春                     | 夏                    | 秋                     | 冬                     |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| X <sub>1</sub>  | -0.144 <sup>***</sup> | -0.18 <sup>***</sup> | 0.264 <sup>***</sup>  | 0.365 <sup>***</sup>  |
| X <sub>2</sub>  | 0.133 <sup>***</sup>  | 0.04 <sup>**</sup>   | -0.155 <sup>***</sup> | -0.218 <sup>***</sup> |
| X <sub>3</sub>  | 0.07 <sup>***</sup>   | 0.031                | -0.049 <sup>***</sup> | 0.009                 |
| X <sub>4</sub>  | -0.087 <sup>***</sup> | -0.029 <sup>*</sup>  | 0.067 <sup>***</sup>  | 0.355 <sup>***</sup>  |
| X <sub>5</sub>  | -0.098 <sup>***</sup> | -0.048 <sup>**</sup> | 0.082 <sup>***</sup>  | 0.22 <sup>***</sup>   |
| X <sub>17</sub> | 0.225 <sup>***</sup>  | 0.362 <sup>***</sup> | 0.118 <sup>***</sup>  | -0.069 <sup>***</sup> |
| X <sub>18</sub> | 0.224 <sup>***</sup>  | 0.337 <sup>***</sup> | 0.217 <sup>***</sup>  | 0.005                 |

此外,同一因子在不同季节的驱动作用相差很大。我国气温、降水量和相对湿度的空间分布特征大体为南高北低,日照时数则相反。气温、降水量和相对湿度在春、夏季都表现为负向影响,说明在春、夏季,降水对 O<sub>3</sub> 的冲刷作用及水汽对 O<sub>3</sub> 的消耗作用大于气温的正向作用,使南方 O<sub>3</sub> 浓度普遍低于北方,气温的影响力受其“挟持”而呈负向,上文分析的降水量和相对湿度由南向北减少最明显的华中和华东就是最典型的地区。但在秋、冬季,随着气温的降低,气温成为影响光化学反应的主要因素,是我国 O<sub>3</sub> 浓度分布影响力最大的正向影响因

子。秋季在全国 O<sub>3</sub> 浓度普降的时候华南却有所上升,冬季 O<sub>3</sub> 浓度形成南高北低的格局,就主要受气温的驱动。与气温南高北低分布特征大体相同的降水量和相对湿度反而受气温的“挟持”而呈正向影响,日照时数也受气温的“挟持”而呈负向影响,都非其真实作用的反映。NO<sub>x</sub> 和 VOCs 排放量在春、夏、秋季对 O<sub>3</sub> 浓度分布都有显著的正向影响,且夏季影响力最大,春季次之,秋季再次。其中春季 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 排放量的影响力基本相同,夏季 NO<sub>x</sub> 排放量的影响力大于 VOCs,秋季 VOCs 排放量的影响力大于 NO<sub>x</sub>。冬季 NO<sub>x</sub> 排放量表现为负向影响,表明冬季 NO<sub>x</sub> 对 O<sub>3</sub> 主要表现为消耗作用,冬季 VOCs 排放量的影响力未通过显著性检验。说明前体物对 O<sub>3</sub> 浓度的影响主要通过气象条件实现,温度越高、太阳辐射越强烈,前体物对 O<sub>3</sub> 浓度分布的影响越明显。

4 结论

(1)2015~2017 年中国 O<sub>3</sub> 污染逐年加重。各城市 O<sub>3</sub> 日最大 8 h(滑动)平均浓度第 90 百分位数的平均值已由 2015 年的 137 μg·m<sup>-3</sup> 上升到 2017 年的 151 μg·m<sup>-3</sup>,超标天数比例由 5.2% 上升到 8.1%,以 O<sub>3</sub> 为首要污染物的污染天数占总污染天数的比例由 19.1% 上升到 34.4%。

(2)O<sub>3</sub> 污染主要发生在 4~9 月,超标天数分别占 2015、2016、2017 年总超标天数的 87.45%、95.3% 和 95.1%。其中 5~7 月 O<sub>3</sub> 浓度上升最快、污染最严重,超标天数比例由 2015 年的 10.6% 上升到 2017 年的 20.5%,2017 年 83.0% 的中度污染和 91.0% 的重度污染发生在 5~7 月。

(3)华北平原 O<sub>3</sub> 浓度上升最快,其次是珠三角地区、成渝城市群和华东地区南部。华北平原 O<sub>3</sub> 浓度的持续上升,使京津冀和长三角地区 O<sub>3</sub> 高污染区连成一片,形成了包括环渤海地区、中原城市群、长三角城市群、山西、关中地区和内蒙古中部的连片 O<sub>3</sub> 高污染城市群,成渝城市群的核心城市则初步形成我国新的 O<sub>3</sub> 污染中心。西藏、青海、新疆、云南、贵州、广西、海南及东北地区中北部空气质量总体保持良好。

(4)O<sub>3</sub> 浓度空间集聚性逐年增强。2015~2017 年中国城市 O<sub>3</sub> 浓度热点主要分布于华北平原和长江中下游地区,冷点主要分布于东北、西南及华南部分地区。春、夏季的空间集聚格局与年度空间集聚格局大体相同,秋、冬季热点由华北平原和长江中下游地区经华中向南转移,冷点则由西南及华南经内陆向北方转移,东北地区中北部在各季节均为



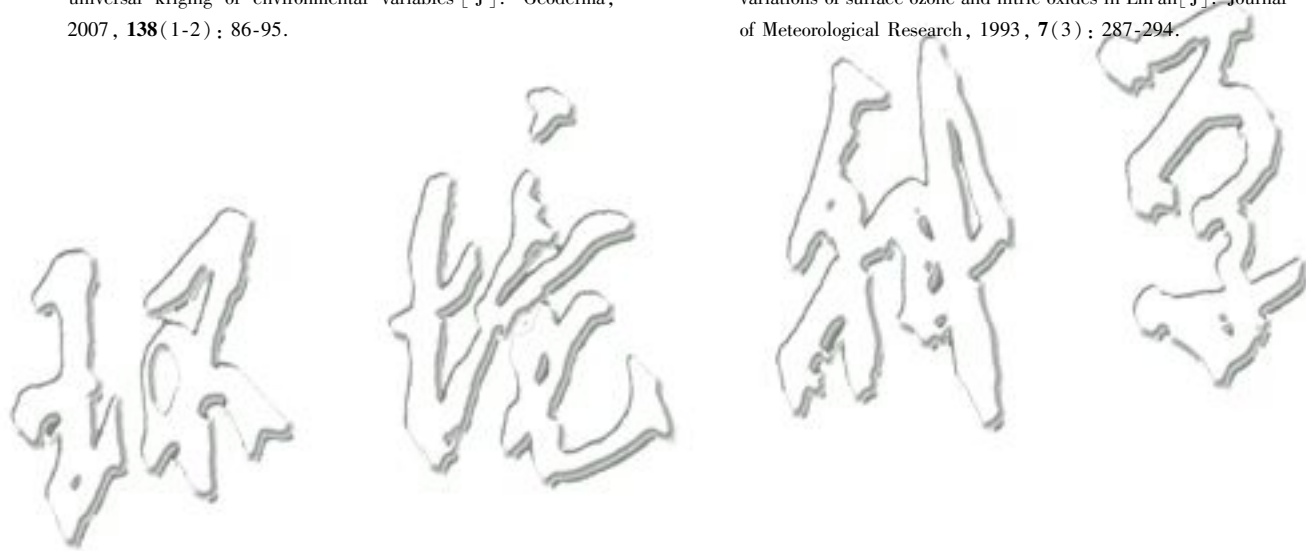
冷点.

(5)气象、工业化、城市化因素和前体物排放因子对  $O_3$  浓度分布均有显著驱动作用,但不同尺度、不同地区的驱动因素明显不同,同一因素在不同季节的影响力也不尽相同. 从全国尺度来看,前体物排放因子影响最大,工业化因素和城市化因素依次,气象因素最小. 分区域来看,气温和相对湿度分别是东北和西南地区形成  $O_3$  低值区的主要驱动力,华北  $O_3$  浓度主要受工业化因素和前体物排放因子的影响,华南则同时受工业化、城市化因素和前体物排放因子的驱动,气象因素对华东和华中  $O_3$  浓度分布影响最大,西北地区未形成明显的主导驱动因素. 从季节来看,春、夏季  $O_3$  浓度分布的主导因素是  $O_3$  前体物排放因子,秋季以气温和 VOCs 排放量为主导,冬季则主要受气温驱动.

#### 参考文献:

- [1] Fishman J, Crutzen P J. The origin of ozone in the troposphere [J]. *Nature*, 1978, **274**(5674): 855-858.
- [2] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [3] Tang H Y, Liu G, Zhu J G, *et al.* Seasonal variations in surface ozone as influenced by Asian summer monsoon and biomass burning in agricultural fields of the northern Yangtze River Delta [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 67-76.
- [4] Tilmes S, Kinnison D E, Garcia R R, *et al.* Impact of very short-lived halogens on stratospheric ozone abundance and UV radiation in a geo-engineered atmosphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(22): 10945-10955.
- [5] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 中国臭氧浓度的时空变化特征及分区[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4003-4012.  
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, *et al.* Spatial and seasonal variation and regionalization of ozone concentrations in China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4003-4012.
- [6] 李霄阳, 李思杰, 刘鹏飞, 等. 2016 年中国城市臭氧浓度的时空变化规律[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1263-1274.  
Li X Y, Li S J, Liu P F, *et al.* Spatial and temporal variations of ozone concentrations in China in 2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1263-1274.
- [7] Su R, Lu K D, Yu J Y, *et al.* Exploration of the formation mechanism and source attribution of ambient ozone in Chongqing with an observation-based model [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(1): 23-32.
- [8] Wang B, Shao M, Lu S H, *et al.* Variation of ambient non-methane hydrocarbons in Beijing city in summer 2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2010, **10**(13): 5911-5923.
- [9] Li L, Chen C H, Huang C, *et al.* Ozone sensitivity analysis with the MM5-CMAQ modeling system for Shanghai [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(7): 1150-1157.
- [10] Wang X S, Li J L, Zhang Y H, *et al.* Ozone source attribution during a severe photochemical smog episode in Beijing, China [J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 2009, **52**(8): 1270-1280.
- [11] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2041-2051.  
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing city in 2014 [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2041-2051.
- [12] 严茹莎, 陈敏东, 高庆先, 等. 北京夏季典型臭氧污染分布特征及影响因子[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(1): 43-49.  
Yan R S, Chen M D, Gao Q X, *et al.* Characteristics of typical ozone pollution distribution and impact factors in Beijing in summer [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(1): 43-49.
- [13] 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  $O_3$  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.
- [14] 梁永贤, 尹魁浩, 胡泳涛, 等. 深圳市机动车限行对臭氧浓度影响分析[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(1): 197-201.  
Liang Y X, Yin K H, Hu Y T, *et al.* Analysis of motor vehicle restriction effect on ozone concentration in Shenzhen [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(1): 197-201.
- [15] Xing J, Wang S X, Jang C, *et al.* Nonlinear response of ozone to precursor emission changes in China: a modeling study using response surface methodology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(10): 5027-5044.
- [16] Wolf K, Cyrys J, Hrcinková T, *et al.* Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 1531-1540.
- [17] Sarra C, Lemonsu A, Masson V, *et al.* Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(10): 1743-1758.
- [18] 赵旭辉, 董昊, 季冕, 等. 合肥市  $O_3$  污染时空变化特征及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 649-660.  
Zhao X H, Dong H, Ji M, *et al.* Analysis on the spatial-temporal distribution characteristics of  $O_3$  and its influencing factors in Hefei City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 649-660.
- [19] 齐冰, 牛彧文, 杜荣光, 等. 杭州市近地面大气臭氧浓度变化特征分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(2): 443-451.  
Qi B, Niu Y W, Du R G, *et al.* Characteristics of surface ozone concentration in urban site of Hangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 443-451.
- [20] 曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1275-1284.  
Cao T W, Wu K, Kang P, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and meteorological cause of Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
- [21] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(8): 2370-2377.  
Yi R, Wang Y L, Zhang Y J, *et al.* Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
- [22] 南国卫, 孙虎. 基于灰色关联模型对陕西省  $O_3$  浓度影响因

- 素分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(12): 4519-4527.
- Nan G W, Sun H. Analysis of the driving factors of  $O_3$  in Shaanxi province based on grey correlation model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(12): 4519-4527.
- [23] 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 等. 2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4976-4982.
- Duan X T, Cao N W, Wang X, *et al.* Characteristics analysis of the surface ozone concentration of China in 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4976-4982.
- [24] 吴锴, 康平, 于雷, 等. 2015—2016 年中国城市臭氧浓度时空变化规律研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(6): 2179-2190.
- Wu K, Kang P, Yu L, *et al.* Pollution status and spatio-temporal variations of ozone in China during 2015-2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2179-2190.
- [25] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [26] Brus D J, Heuvelink G B M. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables [J]. *Geoderma*, 2007, **138**(1-2): 86-95.
- [27] Goodchild M, Haining R, Wise S, *et al.* Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1992, **6**(5): 407-423.
- [28] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. *Geographical Analysis*, 2010, **24**(3): 189-206.
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [30] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国  $PM_{2.5}$  时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of  $PM_{2.5}$  in China between 2000 and 2011 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [31] Zhou X J, Luo C, Ding G A. Preliminary analysis of the variations of surface ozone and nitric oxides in Lin'an [J]. *Journal of Meteorological Research*, 1993, **7**(3): 287-294.





## 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-ting, <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 SPNDPR 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) |