

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 ₃ 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 ₂ 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 ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 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)	

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*

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 采用卫星和地面观测臭氧(O_3)浓度, 分析 2013 年以来我国 O_3 的时空分布和年际变化特征. 卫星观测对流层 O_3 总量和地面观测 O_3 浓度分布相互印证, 我国高浓度 O_3 主要分布在东部人口密集、经济发达的区域, 并且呈现夏季高、冬季低的季节分布趋势. 4 个重点关注城市(北京、上海、广州、成都) O_3 日变化均呈现单峰分布, 最高值在每日 15:00~16:00. 统计分析发现, 4 个城市除上海市之外, 其他 3 个城市 O_3 浓度在周末和工作日没有显著差别, 表明 O_3 的“周末效应”减弱. 2013 年 4 月~2018 年 6 月, 我国地面观测 O_3 浓度呈现明显上升趋势. 2014~2017 年, 北京、上海和成都市近地面 O_3 浓度分别以 2.36 、 3.3 和 $3.6 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$ 的速度显著上升. 4 个城市 2014~2017 年 O_3 超标天数占比分别为 17.2% (北京)、 10.7% (上海)、 8.8% (广州) 和 11.2% (成都), 北京市 O_3 超标天数最多、超标期间 O_3 浓度最高, O_3 污染最为严重.

关键词: 臭氧; 中国; 卫星观测; 地面观测; 时空分布; 变化趋势

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1132-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201808028

Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation

ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying*

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Satellite and surface observed O_3 concentrations were applied to analyze the spatial-temporal distribution and trends of O_3 over China. The satellite and surface observations agree well, revealing that the highest concentrations of O_3 are distributed in East China, and with a seasonal pattern of high in summer and low in winter. Records of the diurnal variation of O_3 over the four cities of interest (Beijing, Shanghai, Guangzhou, and Chengdu) reveal that O_3 peaked at 15:00-16:00 each day. Statistical analysis indicates that there is no significant difference in O_3 concentration between weekends and weekdays for the cities of Beijing, Guangzhou, and Chengdu. Surface O_3 over China increased dramatically from April 2013 to June 2018. The increase of the surface O_3 concentration from 2014 to 2017 is significant for Beijing, Shanghai, and Chengdu, and the rates of increase were 2.36 , 3.3 , and $3.6 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$, respectively. Analysis based on the daily max 8 h rolling mean O_3 concentration reveals that the percentage of days with O_3 concentration exceeding the national standard ($160 \mu g \cdot m^{-3}$) in 2014-2017 were 17.2% for Beijing, 10.7% for Shanghai, 8.8% for Guangzhou, and 11.2% for Chengdu. O_3 pollution is most severe in Beijing where the highest O_3 concentration occurs, along with the largest number of days with daily max 8 h rolling O_3 concentration exceeding $160 \mu g \cdot m^{-3}$.

Key words: ozone; China; satellite observation; surface observation; spatial-temporal distribution; trend

大气中绝大部分臭氧(O_3)位于平流层, 大约占 O_3 总量的 90% 以上. O_3 是重要的温室气体, 可以吸收太阳紫外辐射. 平流层 O_3 浓度的变化, 会影响大气温度场和大气环流^[1~4]. 另外约 10% 的 O_3 位于近地面, 对人类和环境有十分重要的影响. 近地面 O_3 是大气中最重要氧化性物质, 能够促进 SO_2 、 NO_x 等气态污染物的氧化, 从而转化为硫酸盐、硝酸盐等颗粒物, 导致颗粒物浓度的急剧上升^[5~7]. 另外, 近地面 O_3 浓度的升高, 会导致农作物减产和人群死亡率的升高^[8, 9].

过去, 由于缺乏大范围、长期以及公开的监测网络, 对 O_3 的研究往往需要借助卫星数据^[10~13], 如美国 Aura 卫星搭载的 O_3 监测仪(OMI)、中国“风云三号”气象卫星搭载的紫外 O_3 总量探测仪

(TOU)等. Shen 等^[11]用 TES 卫星数据研究我国西部、华北和华南地区 2005~2010 年对流层 O_3 变化, 刘小正等^[12]通过 OMI 探究了我国中东部近地面 O_3 在 2005~2014 年的变化趋势. 2012 年我国颁布了新的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[14], 对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 等空气污染物规定了新的限值. 自 2013 年起, 环境保护部开始在全国大范围展开监测各污染物浓度, 到目前为止已经扩展到全国 300 多个城市的 2 000 多

收稿日期: 2018-08-03; 修订日期: 2018-09-10

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项应用共性关键技术攻关项目(32-Y20A18-9001-15/17); 国家自然科学基金项目(41775028)

作者简介: 张倩倩(1987~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为大气污染控制与模拟, E-mail: zhangqq@cma.gov.cn
* 通信作者, E-mail: zxy@cma.gov.cn

个站点. 当前, 已有多项研究基于环保部监测的 O_3 数据探究我国各地区 O_3 的浓度和分布^[15~22], 但对近年来我国 O_3 污染的变化趋势的研究较少^[23, 24], 且多只集中于某一城市或区域^[16, 25, 26].

人类生产和社会活动排放的 NO_x 、VOCs 等污染物是大气中 O_3 的前体物. 近年来, 尤其是 2000 年以来, 随着人口数量的增长、工业生产的发展和机动车保有量的增加, NO_x 和 VOCs 的排放也迅速增长, 从而导致了我国 O_3 污染的加剧^[11, 12]. 2013 年, 我国颁布了《大气污染防治行动计划》, 对 $PM_{2.5}$ 及其前体物的排放进行控制, 以应对严重的灰霾污染. 作为 $PM_{2.5}$ 的重要前体物之一, NO_x 的排放得到有效控制, 卫星观测到我国大部分地区 NO_x 柱浓度自 2012 年起显著下降^[27, 28], 但 VOCs 的排放却仍然处于上升趋势^[29]. 到 2017 年底, 全国大部分地区的 $PM_{2.5}$ 浓度都有明显的降低^[30, 31], 然而 O_3 的污染日益凸显^[31]. 因此, 有必要对 2013 年以来我国 O_3 污染的整体状况和变化趋势进行总结分析, 期望能够为我国 O_3 污染控制提供一定的建议. 本研究将分别从卫星和地面观测的角度探究我国 O_3 的时空分布特征, 并通过 2013~2018 年地表观测 O_3 数据分析近年来我国 O_3 污染的变化趋势. 本研究的创新之处在于结合卫星和地面观测数据分析我国 O_3 的时空分布特征, 并对 4 个 O_3 污染严重的重点关注城市进行对比分析.

1 材料与方法

1.1 数据来源和研究区域

卫星观测对流层 O_3 的数据往往通过间接方法获得, 即用整层 O_3 柱总量减去平流层 O_3 , 从而得到对流层 O_3 浓度. 本研究采用的对流层卫星观测 O_3 浓度来自 Ziemke 等^[32] 的计算数据集. 他们以搭载在 Aura 卫星上的 O_3 监测仪 (OMI) 提供的整层 O_3 柱总量, 以及微波临边探测器 (MLS) 探测的平流层 O_3 为基础, 通过二者之差计算出对流层 O_3 总量. 该数据集当前提供 2004 年 10 月~2017 年 12 月的逐月对流层 O_3 数据, 其水平分辨率为 $1^\circ \times 1.25^\circ$. 该数据集在全球得到广泛验证、引用和采纳使用, 数据可靠性较高^[33~36]. 本研究使用的是 2013 年 1 月~2017 年 12 月数据, 数据采用多步森单位 (Dobson unit, DU, $1DU = 2.69 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$). 地面观测数据来源于环境保护部发布的 O_3 逐小时浓度, 时间范围是 2013 年 4 月~2018 年 6 月. 站点数目包括 2013 年全国 74 个城市, 2014 年全国 188 个城市, 2015~2018 年全国 354 个城市.

本研究重点关注的区域包括: 华北地区 ($115^\circ \sim 120^\circ \text{E}$, $36^\circ \sim 42^\circ \text{N}$)、华东 ($117^\circ \sim 122^\circ \text{E}$, $27^\circ \sim 34^\circ \text{N}$)、华南地区 ($109^\circ \sim 119^\circ \text{E}$, $21^\circ \sim 26^\circ \text{N}$)、四川盆地 ($101^\circ \sim 110^\circ \text{E}$, $28^\circ \sim 34^\circ \text{N}$), 如图 1 黑色方框所示, 以及位于这 4 个区域的 4 个重点城市, 如图 1 深绿色圆点: 北京 (116.42°E , 40.02°N)、上海 (121.52°E , 31.22°N)、广州 (113.33°E , 23.15°N) 和成都 (104.08°E , 30.66°N).

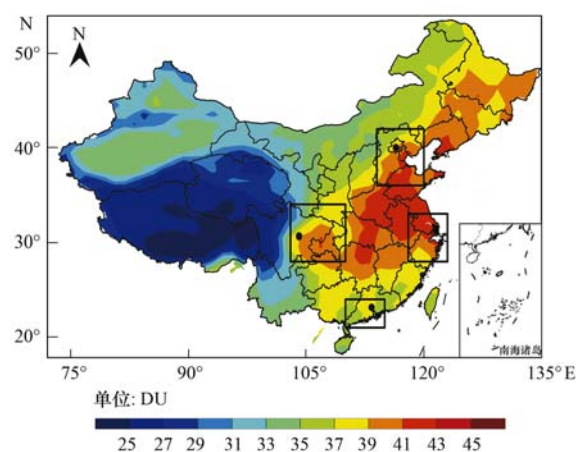


图 1 卫星观测 2013~2017 年平均对流层 O_3 浓度

Fig. 1 Satellite observed mean troposphere ozone from 2013 to 2017

1.2 数据分析方法

1.2.1 平均浓度计算

对于卫星数据, 月平均和年平均浓度的计算是基于 Ziemke 等^[32] 发布的逐月数据, 季节的划分为春季 (3~5 月)、夏季 (6~8 月)、秋季 (9~11 月) 和冬季 (12 月~次年 2 月).

对于地面观测数据, 月平均、季节平均和年平均浓度的计算均是基于逐小时观测浓度. 根据文献 [14, 37] 的规定, 对于 8 h 滑动平均数据的计算保证每 8 h 至少有 6 h 平均浓度值; 日平均浓度计算则剔除日数据量小于 20 的站点; 年平均浓度计算只保留每年有 324 个日均浓度 (每月至少 27 个日均浓度, 2 月至少 25 个日均浓度) 以上的站点.

1.2.2 趋势估计

本研究采用 Openair 这一大气污染分析工具^[38, 39] 对 O_3 柱浓度和近地面浓度数据进行趋势分析. 采用基于非参数估计的泰尔森回归模型计算 O_3 地面观测浓度的变化趋势. 泰尔森回归是一种线性回归方法, 其最大的优点是能够剔除数据中异常值的影响, 稳健性强. 泰尔森回归模型的基本公式为:

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon$$

$$\beta = \text{Median} \left\{ \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}, x_i \neq x_j, i < j = 1, 2, \dots, n \right\}$$

式中, α 和 β 为模型的参数, ε 为随机误差. x_i 和 x_j 为自变量, y_i 和 y_j 为因变量.

2 结果与讨论

2.1 O_3 时空分布特征

2.1.1 区域和季节分布

2013~2017 年的 5 a 平均卫星观测对流层 O_3 和地面观测近地面 O_3 浓度分布分别如图 1 和图 2 所示. 卫星和地面观测 O_3 浓度的区域分布较为一致, 均显示我国 O_3 的高浓度主要分布在东部地区. 这些地区人口密集、经济发达, 人类活动水平和能源消耗量都高于其他区域, O_3 前体物的浓度及排放量都很大, 从而导致较高的 O_3 浓度. 另一方面, 由于平流层 O_3 输入的影响, 对流层 O_3 总浓度和地面观测 O_3 浓度分布之间也存在一定的差异. 观测显示青藏高原区域 O_3 地面观测浓度较高, 而卫星观测则显示该区域 O_3 浓度最低. 地面观测 O_3 浓度的区域性差异也高于卫星观测; 卫星观测对流层 O_3 的浓度在 23~43 DU 之间, 最大值约为最小值的 2 倍; 地面观测 O_3 浓度的变化幅度稍大, 在 35~100 $\mu g \cdot m^{-3}$ 之间, 最大值约为最小值的 3 倍.

图 3 展示了卫星观测 4 个重点关注区域 5a 平均对流层 O_3 逐月分布, 并给出其 95% 置信区间. 5 年中, 4 个重点关注区域的对流层 O_3 浓度波动较小, 几乎全部在 ± 3 DU 之间. 在季节变化上, 呈现“钟型”单峰分布, 具体逐月分布趋势稍有不同. O_3 最高浓度出现的时间自南向北逐渐后延. 如, 华南

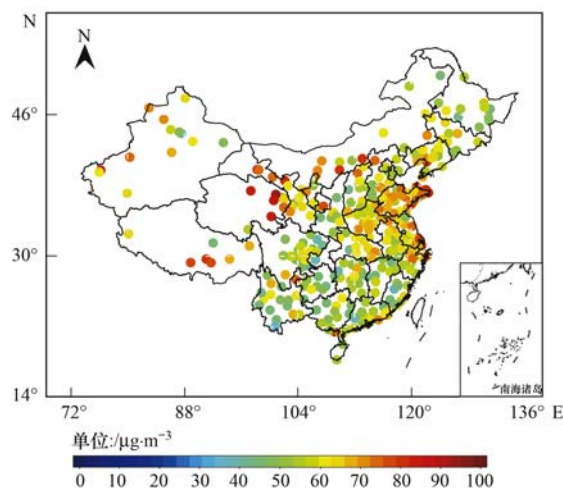
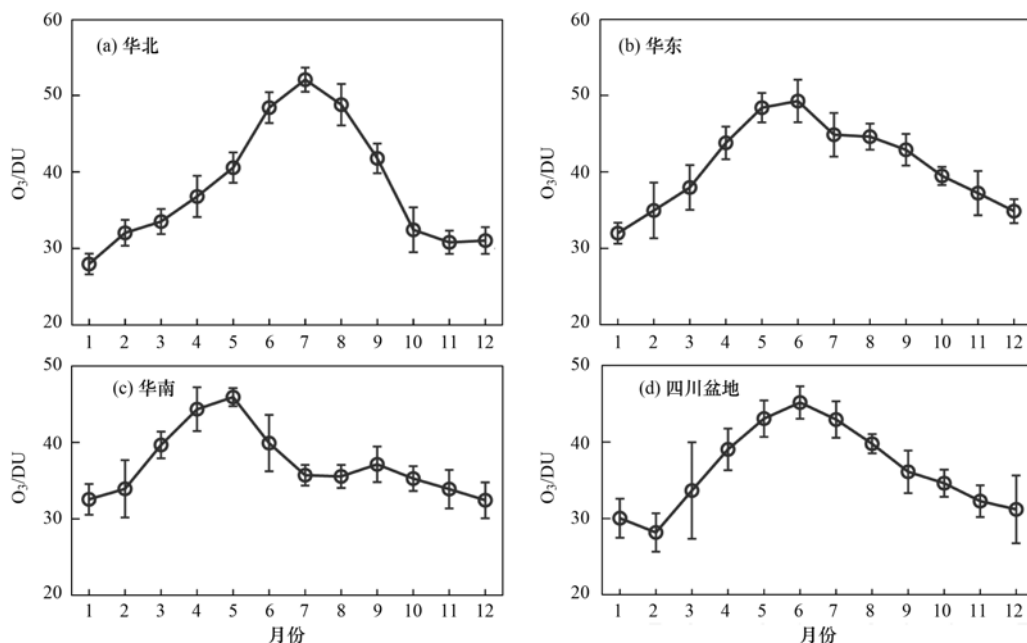


图 2 2013 年 4 月~2018 年 6 月平均地表 O_3 观测浓度

Fig. 2 Mean O_3 concentration observed at the surface from April 2013 to June 2018

地区[图 3(c)]最高浓度出现在 5 月, 华东[图 3(b)]和四川盆地[图 3(d)](二者纬度相近)最高值出现在 6 月, 而华北地区[图 3(a)]对流层 O_3 最高值则出现在 7 月. 4 个区域的对流层 O_3 浓度最低值都出现在冬季的 12 月或 1 月. 4 个区域的年平均对流层 O_3 浓度约为 36~41 DU, 华东地区最高, 四川盆地最低; O_3 浓度的逐月变化范围约为 28~52 DU, 最大月浓度和最小月浓度的比值为 1.4~1.9, 华北地区的 O_3 浓度季节差异最大, 华南地区最小.

与对流层 O_3 总浓度形成鲜明对比, 地面观测 O_3 浓度[图 4(a)]中变化较大, 尤其是在 O_3 浓度



误差棒显示的是月平均浓度的 95% 置信区间

图 3 卫星观测 4 个重点关注区域 2013~2017 年平均对流层 O_3 逐月浓度分布

Fig. 3 Satellite observed monthly mean troposphere O_3 concentration over the four regions of interest

较高的季节. 在季节变化上, 4 个重点关注城市也有一定的差异. 对于北京市[图 4(a)], 与华北地区对流层 O_3 浓度分布的季节变化相似, 呈明显的“钟型”单峰分布, 最高值一般出现在夏季的 6~8 月, 最低值一般出现在冬季 12 月. 自 2014 年起, 北京市观测 O_3 最高月浓度均超过 $100.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最高浓度是 2018 年 6 月的 $118.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最低浓度一般在 $20.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右. 北京市地面 O_3 浓度的季

节变化非常大, 每年(2014~2017 年)的最高月平均浓度与最低月平均浓度之比在 4.5~7.6 之间. 段晓瞳等^[18]研究发现, 地面 O_3 浓度与温度有很好的正相关关系, 华北地区冬夏温差较大, 从而导致 O_3 浓度的季节差异. 另一方面, 冬季为灰霾多发期, 颗粒物浓度较高, 从而导致气溶胶光学厚度升高, 光化学反应减弱, O_3 浓度降低; 另外, 冬季颗粒物的非均相化学反应也会对 O_3 造成消耗^[15, 40].

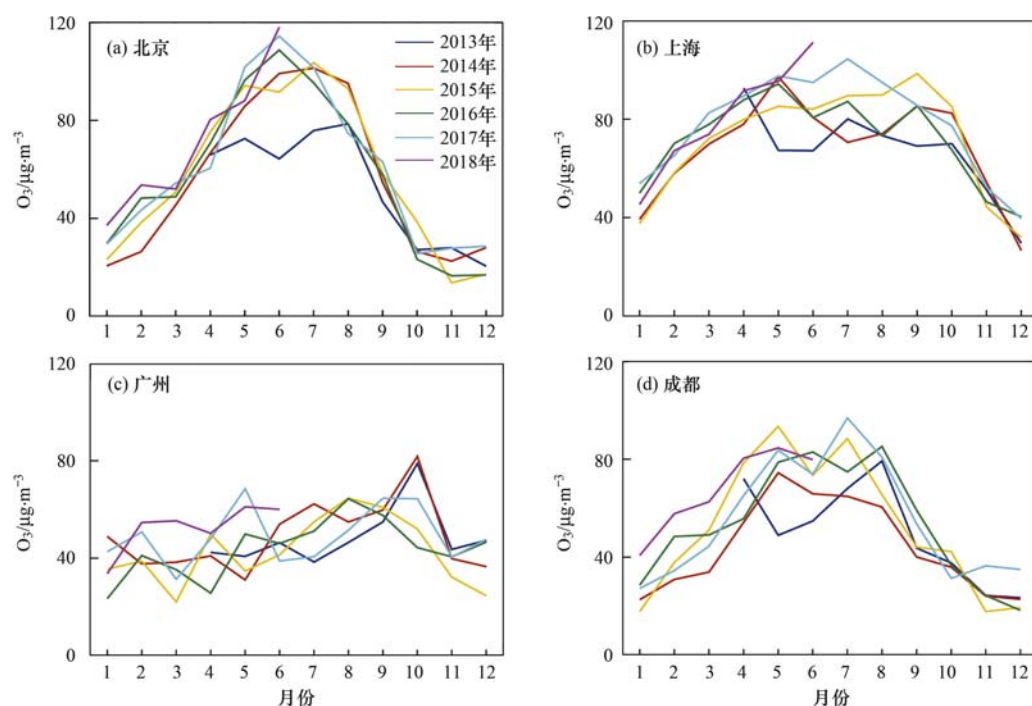


图 4 地面观测 4 个重点关注城市 2013 年 4 月~2018 年 6 月 O_3 逐月浓度分布

Fig. 4 Surface observed monthly O_3 concentrations at the four cities of interest from April 2013 to June 2018

上海市[图 4(b)]地面观测 O_3 浓度一般在 5~9 月出现高值, 但整体上 O_3 平均浓度在 4~10 月间变化较小, 都处于较高浓度水平. 上海市最低值同样出现在冬季. 与北京市相比, 上海市地面 O_3 浓度的月变化幅度较小, 每年最高月浓度与最低月浓度之比约为 2.3~3.6. 上海市观测到的地面 O_3 浓度月最高值一般低于北京市, 但在 2018 年 6 月, 也同样出现了 $110.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的高值; 上海市地面观测 O_3 浓度的最低值通常高于北京市, 一般在 $30.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右. 与上海市纬度相近的成都市[图 4(d)], 其地面观测 O_3 浓度的季节变化与上海市相似, 在每年 5~8 月间 O_3 浓度都处于较高水平. 成都市 O_3 浓度较上海市稍低, 最高值为 $96.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2017 年 7 月), 但其每年最高浓度与最低浓度之比为 3.3~5.3, 高于上海市.

广州市地面观测 O_3 浓度的最高值出现在 7~10 月, 其最高月浓度 ($81.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2014 年 10 月) 明显低于其他 3 个城市. 广州市近地面 O_3 浓度

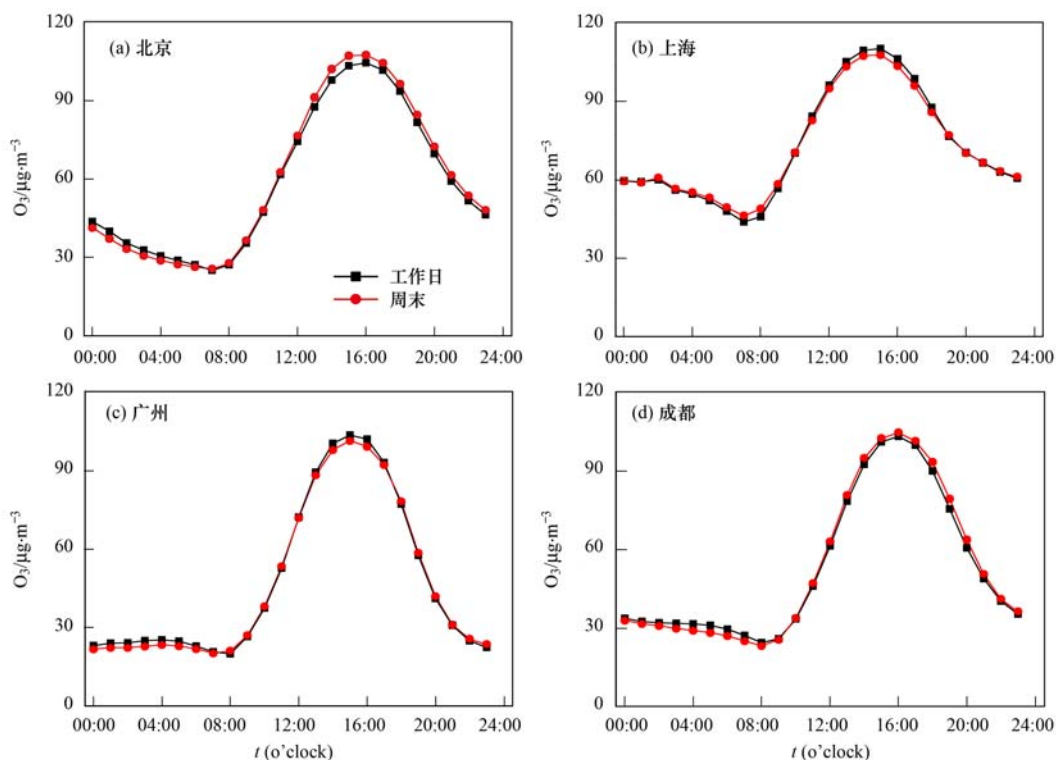
最高值出现的时间晚于其他 3 个城市, 可能是由于夏季风带来清洁的海洋气团导致夏季 O_3 浓度较低^[40], 而秋季来自大陆上风向的区域传输以及局地污染导致 O_3 浓度的聚集^[41, 42]. 另外, 由于广州市所处纬度较低, 气温的季节差异较小, 因此广州市地面 O_3 浓度的极差最小, 最高值仅为最低值的 1.7~2.7 倍.

我国地面 O_3 浓度在纬度分布上有一定的规律: 随着纬度的提高, O_3 浓度水平逐渐升高、最高月浓度出现的时间提前、最高月与最低月浓度的比值升高.

总体来讲, 卫星观测对流层 O_3 总浓度和地面观测近地面 O_3 浓度在区域和季节分布上具有较好的一致性, 二者可以相互印证. 两者之间在区域和季节分布上的差异主要是由于平流层 O_3 向对流层输入导致^[2, 4].

2.1.2 日变化

图 5 展示了 4 个城市周末和工作日 O_3 浓度的

图5 4个城市工作日和周末 O_3 浓度日变化Fig. 5 Diurnal variation of surface observed O_3 in the four cities on weekdays and weekends

日变化。段玉森等^[43]曾发现东西部地区城市 O_3 浓度最大值出现的时间有一定的差异。而在本研究中, 4 个城市的 O_3 日变化都呈现典型的单峰分布, 日最大值都出现在每日 15:00 ~ 16:00, 最低值都出现在凌晨 04:00 ~ 08:00, 没有明显的区域差异。

Cleveland 等^[44]曾提出 O_3 浓度的“周末效应”, 即由于非工作日道路机动车数目减少, NO_x 排放降低, 光化学反应减弱, 从而导致的 O_3 浓度升高的现象。很多大城市如亚特兰大^[45]、洛杉矶^[46]、旧金山^[47]、香港^[48]、北京^[49, 50]、南京^[51]和上海^[52]等都观测到过 O_3 浓度周末和工作日的差别。本研究同样关注了 4 个城市 O_3 浓度在周末和工作日的差别。首先, Anderson-Darling 统计检验方法发现 4 个城市的 O_3 浓度分布并不服从正态分布, 这与 Wang 等^[53]对北京市的研究结果类似; 然而, Mann-Whitney U 统计检验方法表明, 在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下, 4 个城市中, 仅有上海市[图 5(b)] O_3 浓度在周末和工作日存在显著差异($P = 0.04$)。与唐文苑等^[52]的发现相反, 上海市工作日 O_3 浓度高于周末。4 个季节 O_3 浓度在工作日和周末 24 个时段均不存在显著差异。雷瑜等^[50]发现 2009 ~ 2012 年北京市 O_3 年均体积分数为 44.5×10^{-9} , 周六和周日分别为 46.4×10^{-9} 和 48.7×10^{-9} , 周五仅有 40.8×10^{-9} ; 本研究计算 2013 年 4 月 ~ 2018 年 6 月北京市周末和工作日的平均浓度分别为 59.6

$\mu g \cdot m^{-3}$ 和 $58.6 \mu g \cdot m^{-3}$, 周末和工作日的浓度差异小于雷瑜等^[50]的结果, 这可能是由于后者是基于较早的观测数据, 而随着社会和经济的发展, 工作日和非工作日的人类活动频繁程度已没有明显区别, 机动车排放导致的 O_3 前体物排放区别也逐渐变小, 从而导致 O_3 浓度的“周末效应”减弱。另外, 吕慧珂等^[48]通过对香港从 2000 ~ 2014 年连续多年 O_3 的观测研究发现的确实存在“周末效应”减弱的现象。

2.2 近地面 O_3 变化趋势

2.2.1 近地面 O_3 平均浓度变化趋势

2013 ~ 2018 年逐年平均近地面 O_3 浓度分布如图 6 所示。全国各区域近地面 O_3 浓度均有明显的上升, 其中上升最明显的是华北和华东区域。图 7 以 4 个重点关注城市为例, 估算近地面 O_3 浓度的变化趋势。由 2.1.1 节可知, 近地面 O_3 浓度有非常明显的季节变化, 因此, 在估计其变化趋势时将其季节变化去除。4 个城市中, 北京[图 7(a)]、上海[图 7(b)]和成都[图 7(d)]近地面 O_3 浓度都呈现显著的上升趋势, 而广州市[图 7(c)] O_3 浓度的变化趋势不明显。这与其他研究^[11 ~ 13, 16, 25, 26]有很好的的一致性和连续性。刘小正等^[12]用 OMI 卫星数据分析 2005 ~ 2014 年北京所在的京津冀地区和上海所在的长三角区域近地面 O_3 浓度都有明显的上升趋势, 而广州所在的珠三角地区近地面 O_3 浓

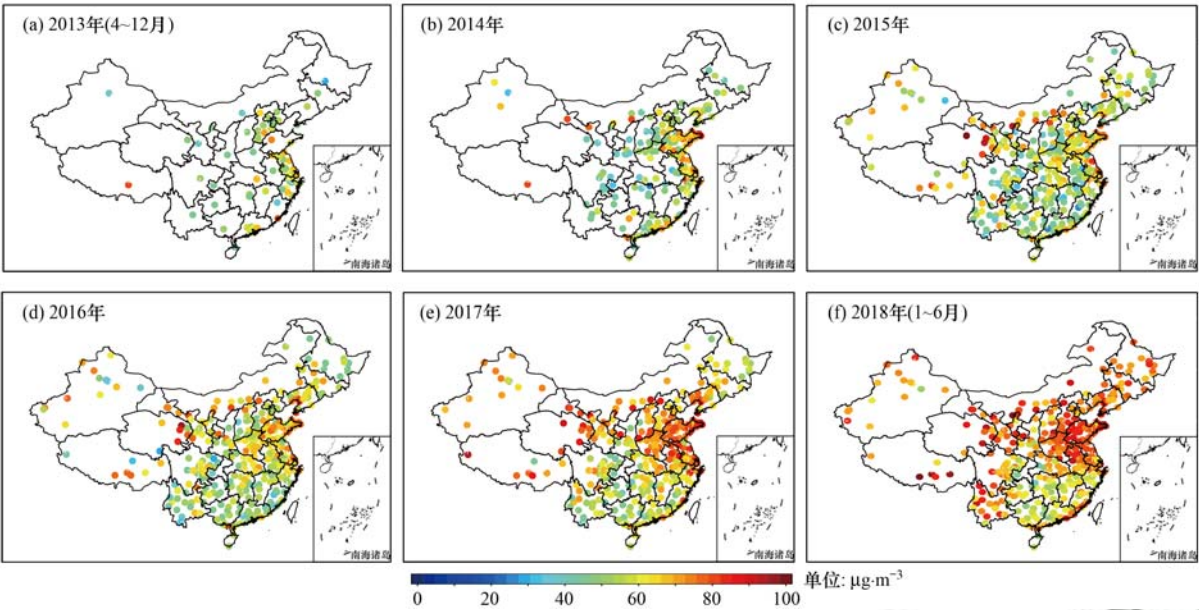


图 6 基于 1 h 平均浓度的 2013 年 4 月~2018 年 6 月逐年平均近地面 O₃ 浓度区域分布
Fig. 6 Surface observed mean O₃ concentration over China from April 2013 to June 2018 based on 1 h hour data

度变化并不明显; Shen 等^[11] 同样发现 TES 卫星观测近地面 O₃ 2005~2010 年在华北地区和西部地区上升明显, 而华南地区仍然没有显著的变化趋势. 刘湾湾等^[13] 也发现上海地区 OMI 卫星观测近地面 O₃ 浓度 2008~2016 年有明显地上升趋势, 地面观测 2010~2016 年上海市 O₃ 也呈现出显著的上升^[26].

由于 O₃ 浓度有明显的季节变化, 且 2013 和 2018 年数据量不全, 因此用 2014~2017 年数据计算 4 个城市近地面 O₃ 浓度的变化趋势, 图 7 展示了 4 个城市基于地面观测 1 h 平均 O₃ 浓度的 2014~2017 年变化趋势. 从中可以看出, 除广州市外, 其他 3 个城市近地面 O₃ 浓度均有显著上升. 北京、上海、成都这 3 个城市 O₃ 浓度上升速率分别达到 2.36、3.3 和 3.62 μg·(m³·a)⁻¹. 为更好地对比 3 个城市的 O₃ 浓度变化, 用以下公式计算其相对变化比例:

$$T(\% \cdot \text{a}^{-1}) = \left(\frac{c_{\text{end}}}{c_{\text{start}}} - 1 \right) / N_{\text{years}} \times 100\%$$

式中, c_{end} 和 c_{start} 分别表示末尾和起始时间的 O₃ 浓度 (μg·m⁻³), N_{years} 代表观测的持续年数. 由此可得 3 个城市的近地面 O₃ 浓度相对增长比例为 4.35%·a⁻¹ (北京)、5.07%·a⁻¹ (上海) 和 8.44%·a⁻¹ (成都). 因此, 尽管成都市 O₃ 浓度低于北京和上海市, 但其 O₃ 浓度相对增长比例明显高于其他两个城市.

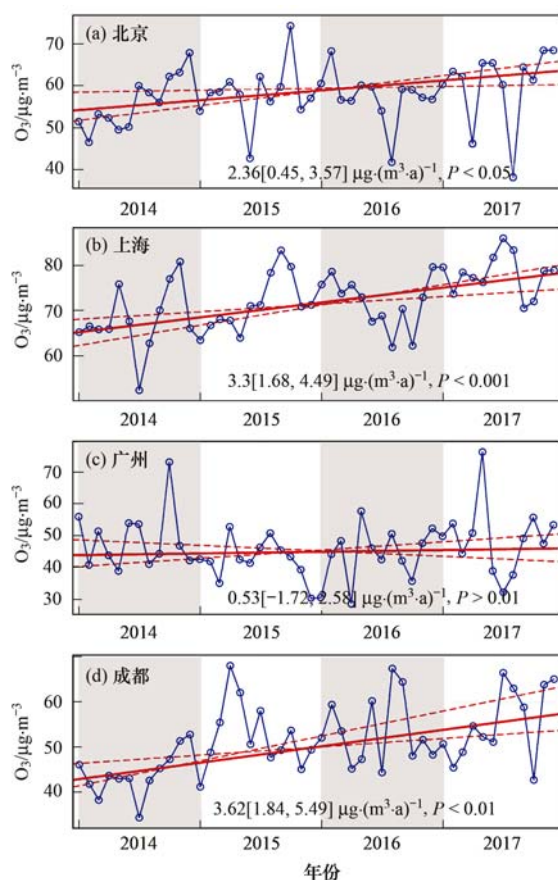
表 1 总结了 4 个城市不同季节近地面 O₃ 浓度的变化趋势. 从各个季节上来看, 北京市近地面 O₃

浓度的上升主要是在春、夏、冬三季, 其中冬季上升速率最快, 为 4.91 μg·(m³·a)⁻¹ (14.18%·a⁻¹), 这主要是由于华北地区冬季 O₃ 浓度由 VOCs 控制^[30], NO_x 排放和浓度的降低导致了 O₃ 浓度的升高; 尽管夏季北京市 O₃ 浓度远高于其他季节, 但夏季 O₃ 浓度上升只有 2.86%·a⁻¹. 同样, 上海、广州和成都这 3 个城市近地面 O₃ 浓度在冬季也都呈现明显的上升趋势. 从整体趋势上看, 广州市近地面 O₃ 浓度并没有明显的变化趋势, 但在春季和冬季均表现出大幅度上升, 分别达到 13.35 μg·(m³·a)⁻¹ (29.06%·a⁻¹) 和 7.88 μg·(m³·a)⁻¹ (17.91%·a⁻¹). Shen 等^[11] 的研究认为, 华南地区近地面 O₃ 变化趋势不明显可能是受到季风环流和自然源排放的影响, 本研究中广州市近地面 O₃ 在可能受到这两项因素较大影响的夏、秋季没有显著变化趋势, 在季风环流和自然源排放都比较弱的冬季和春季则明显上升, 这在一定程度上佐证了 Shen 等^[11] 的结论.

表 1 2014~2017 年 4 个重点关注城市地面 O₃ 浓度分季节增长速率¹⁾/μg·(m³·a)⁻¹
Table 1 Rate of seasonal increase at the four cities from 2013 to 2017/μg·(m³·a)⁻¹

城市	春季	夏季	秋季	冬季
北京	2.63	2.28	—	4.91
上海	—	5.94	—	5.97
广州	13.35	—	—	7.88
成都	—	12.86	6.3	4.62

1) “—”代表无明显变化趋势



红色实线代表估计的变化趋势,红色虚线代表变化趋势的95%置信区间;括号内外的数字分别表示变化趋势及其95%置信区间; P 值代表趋势的显著性水平

图7 基于1 h平均浓度的4个重点关注城市地面观测 O_3 浓度变化趋势

Fig. 7 Trend of surface observed O_3 at the four cities based on 1-hour mean data

2.2.2 O_3 日最大8 h 滑动平均值及日最大8 h 滑动平均的第90百分位数变化趋势

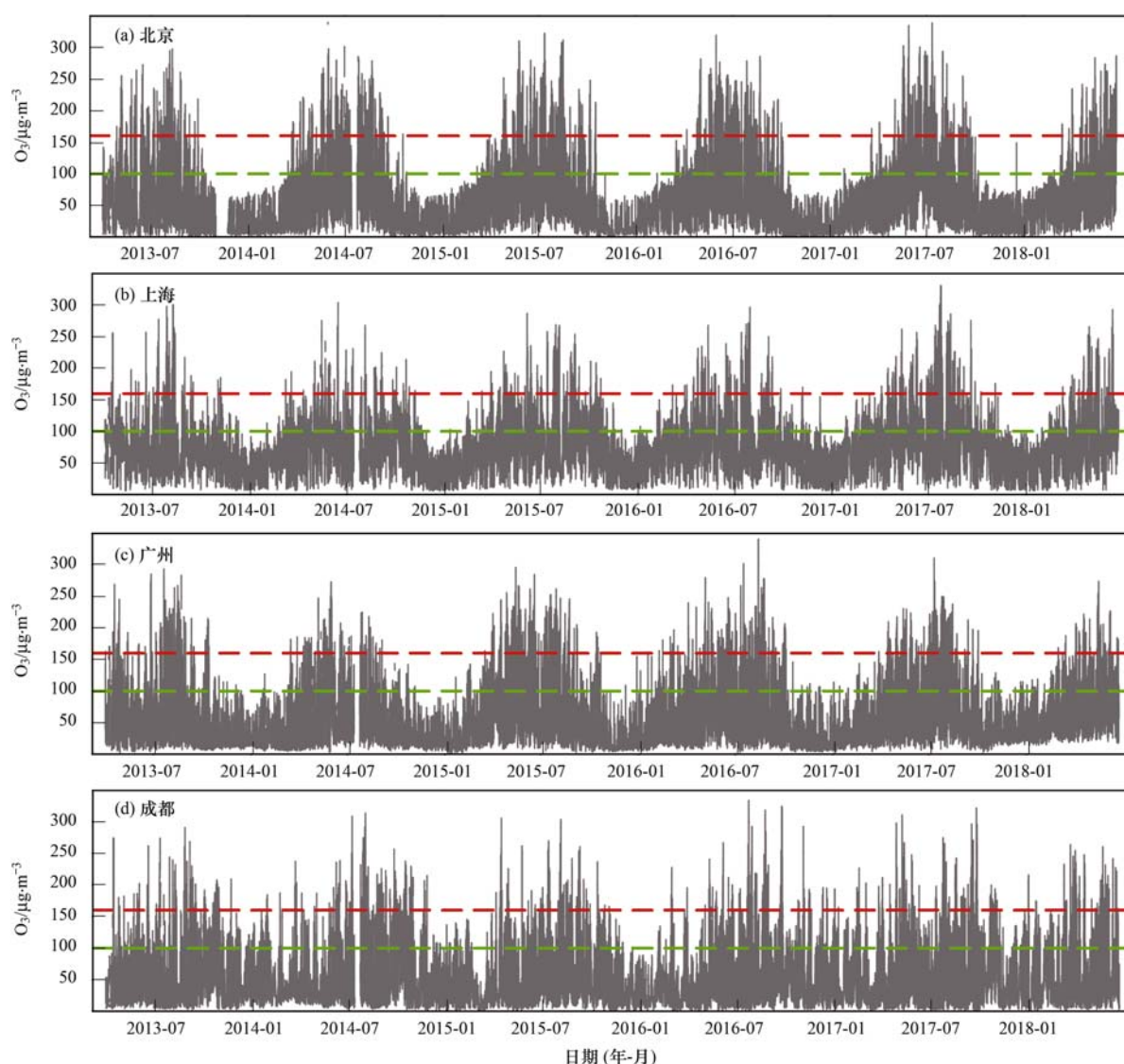
我国标准^[14]规定 O_3 日最大8 h 滑动平均值的一级和二级标准分别为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,并采用日最大8 h 滑动平均值的第90百分位数进行 O_3 浓度的年评价.图8给出了4个重点关注城市2013年4月~2018年6月 O_3 日最大8 h 滑动平均值分布.为叙述方便,本研究将所有观测天数根据 O_3 日最大8 h 滑动平均值进行划分:低于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数为第Ⅰ区间(Ⅰ区), $100 \sim 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间为第Ⅱ区间(Ⅱ区),大于 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为第Ⅲ区间(Ⅲ区).另外,由于2013年和2018年的观测日数不足324 d,因此探讨年际变化时只比较2014~2017年.

2014~2017年,北京市Ⅰ区天数占比为60.6%(2015年)~64.2%(2016年),Ⅱ区天数占比为17.5%(2016年)~22.3%(2017年),Ⅲ区天数占比为15.6%(2017年)~18.3%(2016年).也

就是说,北京市2014~2017年约17.2%的天数均为 O_3 超标(Ⅲ区),高于程麟钧等^[23]对2008~2016年的统计结果(15.6%).根据北京市近地面 O_3 的季节分布情况来看,绝大部分 O_3 超标日出现在每年4~9月,即“非灰霾污染期”(因为北京市灰霾污染多发于秋冬季节,灰霾出现较少的4~9月可称为“非灰霾污染期”).值得注意的是,2018年的前6个月中,北京市已有19.5%的天数 O_3 超标.另一方面,北京市 O_3 日最大8 h 滑动平均浓度在各区间的占比有微弱的年际变化.整体来讲,Ⅰ区天数占比呈现下降趋势,Ⅱ区和Ⅲ区天数占比呈上升趋势,但上升的趋势和比例都比较小.各区间 O_3 日最大8 h 滑动平均浓度的均值也呈现上升的趋势.如Ⅰ区平均浓度由2014年的 $51.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到2017年的 $58.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,升幅达到14%;Ⅲ区平均浓度则由2014年的 $199.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到2017年的 $210.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,涨幅也达到5.5%.北京市日最大8 h 滑动平均的第90百分位数从2014年的 $188.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,上升到2016年的 $197.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但2017年有所下降,为 $190.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降比例为4%.

上海市各浓度区间占比分别为Ⅰ区46%(2017年)~55.4%(2016年),Ⅱ区33.6%(2016年)~39.8%(2014年),Ⅲ区6.5%(2014年)~14.8%(2017年).总体来讲,上海市有10.7%的天数为 O_3 浓度超标,同样也高于程麟钧等^[23]对2008~2016年的统计结果(7.7%).上海市的 O_3 超标日也大部分出现在4~9月的“非灰霾污染期”.从年际变化来看,上海市Ⅰ区天数占比呈现逐年下降的趋势,从2014年的53.6%下降到2017年的46%,下降了14.2%;Ⅲ区占比则从2014年的6.5%上升到2017年的14.8%,增幅达到129%,Ⅱ区占比变化不明显.各区间平均浓度分别为71.9、123.9和 $193.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中Ⅰ区平均浓度明显高于北京市(32.3%),Ⅱ区和Ⅲ区浓度则比北京市稍低,分别低3%和5.3%.另外,上海市各区间 O_3 平均浓度也同样呈现上升趋势,其中Ⅰ区和Ⅲ区浓度2014年~2017年分别上升8.2%和7.1%,Ⅱ区浓度变化较小.同样,上海市 O_3 日最大8 h 滑动平均的第90百分位数从2014年的 $146.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到2017年的 $180.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年平均增长率约为7.4%.另外,2018年1~6月上海市各污染区间 O_3 平均浓度相比于2017年平均都有一定的升高.

广州市 O_3 超标天数占比稍低于上海市,约为8.8%,从2015年的7.2%到2017年的9.0%,并没有明显的逐年变化趋势.广州市 O_3 污染多出现



绿色虚线代表环境空气 O_3 日最大 8 h 滑动平均浓度一级标准限值($100 \mu g \cdot m^{-3}$),

红色虚线代表二级标准限值($160 \mu g \cdot m^{-3}$)

图 8 2013 年 4 月~2018 年 6 月每日最大 8 h 滑动平均 O_3 浓度

Fig. 8 Daily max rolling 8 h mean O_3 concentration from April 2013 to June 2018

在 6~10 月,但在 2018 年 1~6 月,污染天数占比已达到了 12.1%,因此可以预计 2018 年广州市 O_3 污染可能会比较严重.各区间平均浓度为:Ⅰ区 $56.2 \mu g \cdot m^{-3}$,与北京市接近,低于上海市;Ⅱ区 $126 \mu g \cdot m^{-3}$ 和Ⅲ区 $193 \mu g \cdot m^{-3}$,都与上海市比较接近.各区间 O_3 平均浓度的年际变化上来看,Ⅰ区和Ⅱ区浓度先下降后上升,最低浓度都出现在 2015 年,分别是 $54.3 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $122.9 \mu g \cdot m^{-3}$,最高浓度都出现在 2017 年,分别是 $59.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $126.8 \mu g \cdot m^{-3}$.而Ⅲ区浓度则呈现明显的上升趋势,从 2014 年的 $185.7 \mu g \cdot m^{-3}$ 上升到 2017 年的 $197.7 \mu g \cdot m^{-3}$,上升了 6.6%.与北京市和上海市不同,广州市 O_3 日最大 8 h 滑动平均值的第 90 百分位数 2014 年最高 ($163.1 \mu g \cdot m^{-3}$),2015 年最低

($145.5 \mu g \cdot m^{-3}$),2017 年则与 2014 年接近,为 $158.4 \mu g \cdot m^{-3}$.

成都市 2014~2017 年约有 11.2% 的天数为 O_3 超标,与上海市接近.成都市 O_3 超标日集中于每年的 4~8 月,每年超标日占比分别为 14.8% (2014 年)、16.8% (2015 年)、13.4% (2016 年)和 12.1% (2017 年).同样地,成都市 O_3 日最大 8 h 滑动平均值的第 90 百分位数在 2015 年 ($180.1 \mu g \cdot m^{-3}$) 远高于其他各年,比最低的 2014 年高 27.6%.各污染区间平均浓度为Ⅰ区 $55.9 \mu g \cdot m^{-3}$,与北京、广州类似;Ⅱ区 $128.5 \mu g \cdot m^{-3}$,与上海和广州市接近,Ⅲ区浓度 $187 \mu g \cdot m^{-3}$,稍低于其他 3 个城市.成都市Ⅰ区 O_3 浓度逐年上升,Ⅱ区和Ⅲ区浓度没有明显的年际变化.

总体来讲,4个城市的O₃污染多集中于年中非灰霾污染时期,并有逐年加重的趋势,北京市超标天数最多、超标期间O₃浓度最高,成为O₃污染最严重的城市。

4个重点关注城市的近地面O₃浓度在总体或季节的趋势上呈现显著的上升趋势,且O₃污染也逐渐加重,这可能是由于:①我国还没有充分地控制O₃的重要前体物VOCs,飞速发展的工业和急剧上升的机动车数目导致VOCs排放的迅速增长,从而导致O₃浓度的上升;②近年来我国排放控制的重点在于PM_{2.5}及其前体物,PM_{2.5}浓度大幅下降^[30]、气溶胶光学厚度降低,在一定程度上促进了光化学反应,因此也会导致O₃浓度上升^[54]。

3 结论

(1)卫星观测对流层O₃总浓度和地面观测近地面O₃浓度二者相互印证,显示我国高浓度O₃主要分布在东部人口密集、经济发达的区域,并且呈现夏季高、冬季低的季节分布趋势。

(2)4个重点关注城市北京、上海、广州和成都的近地面O₃日变化呈现相似的单峰分布。统计结果表明,除上海市之外,其他3个城市O₃浓度在周末和工作日没有显著差异。

(3)2013年以来,我国近地面O₃浓度呈现明显的上升趋势。2014~2017年,北京、上海和成都市近地面O₃浓度分别以2.36、3.3和3.6 μg·(m³·a)⁻¹的速度显著上升。

(4)2014~2017年,北京、上海、广州和成都O₃超标天数占比分别为17.2%、10.7%、8.8%、11.2%,北京市超标天数最多、超标期间O₃浓度最高,是O₃污染最严重的城市。

参考文献:

- [1] Baldwin M P, Dunkerton T J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes[J]. *Science*, 2001, **294** (5542): 581-584.
- [2] 陈洪滨,卞建春,吕达仁. 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望[J]. *大气科学*, 2006, **30**(5): 813-820.
Chen H B, Bian J C, Lü D R. Advances and prospects in the study of stratosphere-troposphere exchange[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, **30**(5): 813-820.
- [3] 吕达仁,卞建春,陈洪滨,等. 平流层大气过程研究的前沿与重要性[J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(3): 221-228.
Lü D R, Bian J C, Chen H B, et al. Frontiers and significance of research on stratospheric processes[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(3): 221-228.
- [4] 张健恺,刘玮,韩元元,等. 平流层臭氧变化对对流层气候影响的研究进展[J]. *干旱气象*, 2014, **32**(5): 685-693.
Zhang J K, Liu W, Han Y Y, et al. Progresses in influence of variations in stratospheric ozone on tropospheric climate[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, **32**(5): 685-693.
- [5] 赵晴. 典型地区无机细粒子污染特征及成因研究[D]. 北京:清华大学,2010.
Zhao Q. Characteristics and formation of inorganic fine particulate pollution in typical regions of China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [6] Wang Y, Zhang Q Q, He K, et al. Sulfate-nitrate-ammonium aerosols over China: response to 2000-2015 emission changes of sulfur dioxide, nitrogen oxides, and ammonia[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(5): 2635-2652.
- [7] Unger N, Shindell D T, Koch D M, et al. Cross influences of ozone and sulfate precursor emissions changes on air quality and climate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(12): 4377-4380.
- [8] 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.
- [9] Madaniyazi L, Nagashima T, Guo Y M, et al. Projecting ozone-related mortality in East China[J]. *Environment International*, 2016, **92-93**: 165-172.
- [10] 张玉强. 研究中国地面臭氧时空分布特征[D]. 北京:清华大学,2011.
Zhang Y Q. Seasonal and spatial variability of surface ozone over China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [11] Shen L L, Wang Y X. Changes in tropospheric ozone levels over the Three Representative Regions of China observed from space by the Tropospheric Emission Spectrometer (TES), 2005-2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(22): 2865-2871.
- [12] 刘小正,楼晟荣,陈勇航,等. 基于OMI数据的中国中东部城市近地面臭氧时空分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2811-2818.
Liu X Z, Lou S R, Chen Y H, et al. Spatiotemporal distribution of ground-level ozone in mid-east China based on OMI observations[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2811-2818.
- [13] 刘湾湾,刘琼,陈勇航,等. 上海地区对流层低层臭氧及硫酸盐气溶胶时空分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2214-2222.
Liu W W, Liu Q, Chen Y H, et al. The temporal and spatial distribution characteristics of lower tropospheric ozone and sulfate aerosols in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2214-2222.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB 3095-2012,环境空气质量标准[S].
- [15] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2014年北京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.
- [16] 程麟钧,王帅,宫正宇,等. 京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(1): 14-21.
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, et al. Pollution trends of ozone and its characteristics of temporal and spatial distribution in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(1): 14-21.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 沈劲, 黄晓波, 汪宇, 等. 广东省臭氧污染特征及其来源解析研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(12): 4449-4457.
Shen J, Huang X B, Wang Y, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and source apportionment in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(12): 4449-4457.
- [20] 黄俊, 廖碧婷, 吴兑, 等. 广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 23-31.
Huang J, Liao B T, Wu D, *et al.* Guangzhou ground level ozone concentration characteristics and associated meteorological factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 23-31.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 孟晓艳, 宫正宇, 叶春霞, 等. 2013—2016 年 74 城市臭氧浓度变化特征[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(5): 101-108.
Meng X Y, Gong Z Y, Ye C X, *et al.* Characteristics of ozone concentration variation in 74 cities from 2013 to 2016 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(5): 101-108.
- [25] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 2008—2016 年臭氧监测试点城市的臭氧污染特征[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(4): 26-32.
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, *et al.* Pollution trends of ozone in ozone monitoring pilot cities from 2008 to 2016 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 26-32.
- [26] 张小娟, 李莉, 王红丽, 等. 2010~2016 年上海城区臭氧长时间序列变化特征初探[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 86-94.
Zhang X J, L L, Wang H L, *et al.* Preliminary study on the long-term trends of ozone in urban Shanghai from 2010 to 2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 86-94.
- [27] Krotkov N A, McLinden C A, Li C, *et al.* Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(7): 4605-4629.
- [28] Liu L, Zhang X Y, Xu W, *et al.* Temporal characteristics of atmospheric ammonia and nitrogen dioxide over China based on emission data, satellite observations and atmospheric transport modeling since 1980 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(15): 9365-9378.
- [29] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 935-963.
- [30] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the “Air Pollution Prevention and Control Action Plan” on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 197-209.
- [31] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lzghjzkgb/>, 2018-05-31.
- [32] Ziemke J R, Chandra S, Duncan B N, *et al.* Tropospheric ozone determined from Aura OMI and MLS: Evaluation of measurements and comparison with the Global Modeling Initiative's Chemical Transport Model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(D19): D19303.
- [33] Martin R V. Satellite remote sensing of surface air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(34): 7823-7843.
- [34] Martin R V, Sauvage B, Folkins I, *et al.* Space-based constraints on the production of nitric oxide by lightning [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D9): doi: 10.1029/2006JD007831.
- [35] Nassar R, Logan J A, Worden H M, *et al.* Validation of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) nadir ozone profiles using ozonesonde measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(D15): D15S17.
- [36] Schoeberl M R, Ziemke J R, Bojkov B, *et al.* A trajectory-based estimate of the tropospheric ozone column using the residual method [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D24): D24S49.
- [37] 环境保护部. 环境空气质量评价技术规范(试行) [S]. http://hbt.hubei.gov.cn/xxcx/dqjhjbhz/qjcbz/qjchb/201309/t20130926_64103.html, 2013-10-01.
- [38] Carslaw D C, Ropkins K. openair—An R package for air quality data analysis [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, **27-28**: 52-61.
- [39] Carslaw D C. The openair manual—open-source tools for analyzing air pollution data. Manual for version 1.1-4 [M]. London: King's College, 2015.
- [40] Deng X J, Zhou X J, Wu D, *et al.* Effect of atmospheric aerosol on surface ozone variation over the Pearl River Delta region [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, **54**(5): 744-752.
- [41] Chan L Y, Chan C Y, Qin Y. Surface ozone pattern in Hong Kong [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**(10): 1153-1165.
- [42] Luo C, John J C S, Zhou X J, *et al.* A nonurban ozone air pollution episode over eastern China: Observations and model simulations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D2): 1889-1908.
- [43] 段玉森, 张懿华, 王东方, 等. 我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, **23**(S1): 34-39.
- [44] Duan Y S, Zhang Y H, Wang D F, *et al.* Spatial-temporal patterns analysis of ozone pollution in several cities of China [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, **23**(S1): 34-39.
- [44] Cleveland W S, Graedel T E, Kleiner B, *et al.* Sunday and weekday variations in photochemical air pollutants in New Jersey and New York [J]. *Science*, 1974, **186**(4168): 1037-1038.
- [45] Motallebi N, Tran H, Croes B E, *et al.* Day-of-week patterns of

- particulate matter and its chemical components at selected sites in California [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, **53**(7): 876-888.
- [46] Yarwood G, Grant J, Koo B, *et al.* Modeling weekday to weekend changes in emissions and ozone in the Los Angeles basin for 1997 and 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(16): 3765-3779.
- [47] Altshuler S, Arcadio T D, Lawson D R. Weekday vs. weekend ambient ozone concentrations: discussion and hypotheses with focus on Northern California [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45**(12): 967-972.
- [48] 吕慧珂, 何红弟, 郝杨杨. 香港港口氮氧化物和臭氧的变化特征和周末效应[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(7): 4196-4201.
- Lyu H K, He H D, Hao Y Y. Variation characteristics and weekend effect of nitrogen oxides and ozone in Hong Kong Port [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(7): 4196-4201.
- [49] 石玉珍, 徐永福, 王庚辰, 等. 北京市夏季 O_3 、 NO_x 等污染物“周末效应”研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2832-2838.
- Shi Y Z, Xu Y F, Wang G C, *et al.* Study of the “Weekend effect” of O_3 , NO_x and other pollutants in summer of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(10): 2832-2838.
- [50] 雷瑜, 张小玲, 唐宜西, 等. 北京城区 $PM_{2.5}$ 及主要污染气体“周末效应”和“假日效应”研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1520-1528.
- Lei Y, Zhang X Y, Tang Y X, *et al.* Holiday effects on $PM_{2.5}$ and other major pollutants in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1520-1528.
- [51] 王俊秀, 安俊琳, 邵平, 等. 南京北郊大气臭氧周末效应特征分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2256-2263.
- Wang J X, An J L, Shao P, *et al.* Characteristic study on the “Weekend Effect” of atmospheric O_3 in northern suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2256-2263.
- [52] 唐文苑, 赵春生, 耿福海, 等. 上海地区臭氧周末效应研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39**(1): 99-105.
- [53] Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Ground-level ozone in urban Beijing over a 1-year period: Temporal variations and relationship to atmospheric oxidation [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **164**: 110-117.
- [54] Li G H, Bei N F, Cao J J, *et al.* Widespread and persistent ozone pollution in eastern China during the non-winter season of 2015: observations and source attributions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(4): 2759-2774.

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 ₂ 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 ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 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)