安徽省臭氧污染时空变化及污染成因研究

汪水兵^{1,2},刘桂建¹,张红²,洪星园²,杨鹏²,陈建²,卫尤文²

(1.中国科学技术大学 地球和空间科学学院,合肥 230026;2.安徽省环境科学研究院,合肥 230071)

摘要:目的 了解安徽省臭氧时空分布特征及其与气象要素的关系。方法 利用 2017—2019 年环境空气质量 监测的臭氧数据和气象观测数据,并结合后向轨迹模型和潜在源区分析,分别评价安徽省臭氧污染区域分 布和气象要素对臭氧浓度的影响,并分析区域传输对安徽省臭氧浓度的影响。结果 2017—2019 年安徽省及 各市臭氧浓度增长显著,2019 年同比 2017 年增幅为 12.2%,第二季度(4、5、6月)和第三季度(7、8、9 月)是 O₃浓度相对较高的时期,且 O₃污染有"前移后滞"趋势。污染气团主要来自于安徽省内部地区,潜在 源分布显示,皖中地区(合肥、安庆、马鞍山等城市)的贡献比例最大,外地源贡献主要来源于江苏省和 山东省等。臭氧浓度与温度和太阳总辐射强度呈正相关,与降水量和相对湿度呈负相关,与风速关联性不 大。结论 安徽省臭氧污染逐年增加的主要原因是本地排放的加剧,外源输送可能会产生一定影响,加之高 温和强太阳辐射的影响,会加剧臭氧污染的程度,并导致重污染。 关键词:臭氧;气象要素;空气质量监测;空气质量指数 中图分类号:X821 文献标识码:A 文章编号: 1672-9242(2021)08-0124-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.08.020

Study on the Temporal and Spatial Variation of Ozone Pollution and its Causes in Anhui Province

WANG Shui-bing^{1,2}, LIU Gui-jian¹, ZHANG Hong², HONG Xing-yuan², YANG Peng², CHEN Jian², WEI You-wen²

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.
 Anhui Research Academy of Environmental Sciences, Hefei 230071, China)

ABSTRACT: In order to explore the temporal and spatial distribution characteristics of ozone and its impact on meteorological factors in Anhui Province, we use the ozone data and meteorological observation data of ambient air quality monitoring from 2017 to 2019, combined with HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model and PSCF(Potential

收稿日期: 2020-12-24; 修订日期: 2021-03-16

Received: 2020-12-24; Revised: 2021-03-16

基金项目:安徽省省级环保科研课题(201702),安徽省重点研究与开发计划(1804a0802196),国家重点研发计划课题(2018YFC0213803、06)

Fund: Supported by Anhui Provincial Environmental Protection Research Project (201702), Anhui Provincial Key Research and Development Plan (1804a0082196), Key Research and Development Plan in Anhui Province (2018yfc0213803, 06)

作者简介:汪水兵(1978—),男,博士研究生,主要研究方向为大气环境。

Biography: WANG Shui-bing (1978—), Male, Doctoral candidate, Research focus: atmospheric environment.

引文格式:汪水兵,刘桂建,张红,等. 安徽省臭氧污染时空变化及污染成因研究[J]. 装备环境工程,2021,18(8):124-130.

WANG Shui-bing, LIU Gui-jian, ZHANG Hong, et al. Study on the temporal and spatial variation of ozone pollution and its causes in anhui province[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 124-130.

通讯作者:刘桂建(1966—),男,博士,教授,主要研究方向为环境地球化学、能源与环境、微量元素与健康、环境工程与管理、矿山环境与安全等。

Corresponding author: LIU Gui-jian (1966—), Male, Doctor, Professor, Research focus: environmental geochemistry, energy and environment, trace elements and health, environmental engineering and management, mine environment and safety, etc.

Source Area Analysis), respectively evaluates the regional distribution of ozone pollution and the impact of meteorological factors on ozone concentration in Anhui province, and analyze the impact of regional transmission on ozone concentration in Anhui province. The results show that: from 2017 to 2019, the ozone concentration in Anhui province increased significantly, with a year-on-year increase of 12.2%. The second quarter (April, May and June) and the third quarter (July, August and September) are periods with relatively high ozone concentration. The results show that the air pollution mainly comes from the inner part of Anhui province, while the potential source distribution shows that the contribution of air pollution mainly comes from the midland (Hefei, Anqing, Ma'anshan, etc.), and other sources were mainly from Jiangsu and Shandong provinces. Ozone concentration is positively correlated with temperature and total solar radiation intensity, negatively correlated with precipitation and relative humidity, and has little correlation with wind speed.. The results show that the increase of ozone pollution in Anhui province is mainly due to the aggravation of local emissions, and the external transport may have a certain influence. In addition, the impact of high temperature and strong solar radiation will aggravate the degree of ozone pollution and lead to heavy pollution. **KEY WORDS:** ozone, meteorological elements, cause of pollution

随着大气污染防治的深入,PM_{2.5} 污染已得到一 定好转,但臭氧浓度呈上升趋势,臭氧污染已成为亟 需解决的问题^[1]。近地面臭氧(O₃)是影响空气质量 指数的重要污染成分,氮氧化物和挥发性有机物 (VOCs)等前体物在合适的气象条件下通过一系列 光化学反应生成 O₃^[2-3]。高浓度臭氧对人体健康会产 生很大的伤害^[4-5],甚至会严重影响植被的正常生长, 产生明显的生态环境负效应^[6-7]。目前,臭氧正逐渐 成为安徽省大气污染治理面临的主要问题之一,了解 其臭氧时空分布特征及成因,对科学化、精准化臭氧 污染防治具有重要意义。研究表明:O₃浓度季节性变 化明显^[8-9];湿度、降雨量与O₃浓度有一定关系^[10-12]; O₃受气象因素影响,存在季节变化^[13-15]。有研究分析 了区域传输和潜在源对 O₃浓度的影响^[16-17]。

文中利用环境空气质量监测的 O₃数据和气象观测数据,综合分析了安徽省 O₃时空分布特征及其与 气象要素的关系,并采用 HYSPLIT(后向轨迹模型) 和 PSCF(潜在源区分析模型)分析区域传输对安徽 省 O₃浓度影响,以期为区域 O₃污染防治、联防联控 提供技术支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

文中 O₃浓度数据来自合肥市空气质量实时公布 平台公布的监测数据,气象因子数据来自中国气象科 学数据共享服务网观测台数据。

1.2 研究方法

1.2.1 后向轨迹模型

后向轨迹模型(HYSPLIT)由美国大气海洋局 (NOAA)开发,利用美国国家环境预报中心(NCEP) 提供的全球资料同化系统(GDAS)的气象数据进行 模拟。模拟高度设为 500 m,该高度能够较准确地模 拟边界层流场特征^[18]。选取合肥市为轨迹起点,计算 到达安徽省气团的后向轨迹。

1.2.2 潜在源区分析

潜在源区分析(PSCF)是基于条件概率函数发 展而来的一种判断污染源可能方位的方法[19],该方法 通过结合 HYSPLIT 气团轨迹和某因素值给出可能的 排放源位置。PSCF 函数定义为经过任意区域(i和 j 分别代表经度和纬度)的气团到达观测点时对应的某 因素值超过设定阈值的条件概率。将研究区域设定为 0.5°×0.5°网格, 取 O₃的日最大 8h 平均一级标准值 $(100 \mu g/m^3)$ 作为判断污染轨迹的标准,经过任意网 格的气团轨迹抵达安徽省时对应的 O3浓度超过日最 大8h平均一级标准值时,则认为该轨迹为污染轨迹。 PSCF 的值越大,表明该网格点对观测点的粒子质量 浓度贡献越大。反之,则认为该轨迹较清洁。PSCF 高值区对应的网格可认为是影响安徽省 O3 浓度的潜 在源区。由于 PSCF 是一种条件概率,众多学者^[20] 引入权重函数 W;;来降低不确定性,以减小误差,见 式(1)。

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.00 & n_{ij} > 80 \\ 0.72 & 20 < n_{ij} \le 80 \\ 0.42 & 10 < n_{ij} \le 20 \\ 0.05 & n_{ij} \le 10 \end{cases}$$
(1)

2 结果及分析

2.1 臭氧浓度时空变化

从安徽省 O₃浓度变化(图 1—3)可以看出:从 时间上看,2017—2019 年 O₃年均浓度呈明显上升趋势,2019 年同比 2017 年增幅为 12.2%;第二季度(4、 5、6 月)和第三季度(7、8、9 月)是 O₃浓度相对 较高的时期;2018 年同比 2017 年增幅较大的为 6 月、





Fig.2 Quarterly variation of O_3 concentration from 2017 to 2019



图 3 2017—2019 年 O_3 月均浓度变化情况 Fig.3 Monthly variation of average concentration of O_3 from 2017 to 2019

8—10月,2019年同比2018年增幅较大的为5月、 7—11月,O₃污染有"前移后滞"趋势(即O₃污染出 现月份有提前到来和滞后消除现象)。从空间上看, 安徽省臭氧污染主要呈现北高南低,且中部地区(如 合肥、六安)以及部分南方地区(如安庆、池州)的 臭氧污染情况正在逐年恶化,2019年安徽省的臭氧 污染为165 μg/m³,同比上升 8.6%。

2.2 臭氧污染成因

2.2.1 区域输送影响

采用 HYSPLIT (后向轨迹模型)和 PSCF (潜在 源区分析模型)分析 (见图 4)可以看出,以宿州为 代表的皖北区域,2017—2019 年污染气团主要来自

于安徽省内部地区, 说明 O; 主要由本地源贡献。潜 在源分布显示, 安徽西部地区(安庆、六安等城市) 对皖北地区的贡献比例最大, 2017 年能达到 45%以 上,其次江苏与安徽中部的交界处对皖北地区也有较 大输送;2018 皖北地区臭氧潜在源区与 2017 年近似, 但源区贡献占比有所上升,安徽西部地区以及江苏与 安徽中部交界处对于皖北地区的贡献达 55%以上; 2019 年对皖北地区臭氧贡献较大的潜在源区为安徽 中北部以及江苏与安徽中部交界处,贡献占比达 50%。2017—2019年安徽本地潜在源区对皖北的贡献 从大到小依次为 2018 年>2019 年>2017 年。此外,周 边省份对安徽省 O3 污染也有一定的贡献,其中贡献 最大来自于江苏省, 2017—2019 年江苏对安徽的贡 献比例从大到小依次为: 2018 年>2019 年>2017 年。 结合 2017—2019 年安徽及周边省份 O3浓度分布(见 图 5), O₃浓度较高的区域位于东部和北部省份(江 苏、山东),高 O;浓度省份气流的输入对皖北地区 O3浓度会造成一定影响。尤其是江苏省,3年期间, O₃浓度均超过170 μg/m³,在向西的气流作用下,对 皖北地区 O₃浓度升高有一定影响。

以合肥市为代表的皖中区域,2017—2019 年后 向轨迹和潜在源区如图 6 所示。2017—2019 年污染 气团主要来自于安徽省内部地区,说明 O₃ 主要由本 地源贡献。潜在源分布显示,安徽中南部地区(六安、 芜湖等地)对皖中地区的贡献比例最大,2017 年能 达到 40%以上;2018 年皖中地区臭氧潜在源区为安 徽中南部和江浙皖交界处,对于皖中地区的贡献达 50%以上;2019 年对皖中地区臭氧贡献较大的潜在源 区为安徽中南部交界处,贡献占比达 45%。 2017—2019 年安徽本地潜在源区对皖中的贡献从大 到小依次为 2018 年>2019 年>2017 年。结合 2017—2019 年安徽及周边省份 O₃浓度分布(见图 5), O₃浓度较高的东部和北部省份(江苏、山东),对皖



图 4 2017—2019 年宿州市后向轨迹与臭氧潜在源区分析 Fig.4 Analysis of (a) backward trajectory and (b) ozone potential source area of Suzhou city from 2017 to 2019





中地区 O3浓度的升高同样有一定影响。

以铜陵市为代表的皖南区域,2017—2019 年后 向轨迹和潜在源区如图 7 所示。2017—2019 年污染 气团主要来自于江浙皖交界处,潜在源分布显示,江 浙皖交界处对皖南地区的贡献比例最大,2017 年能 达到 25%以上;2018 皖南地区臭氧潜在源区为江浙 皖交界处,对于皖南地区的贡献达 30%以上;2019 年对皖南地区臭氧贡献较大的潜在源区为江浙皖交 界处,贡献占比达 35%。2017—2019 年安徽本地潜 在源区对皖南的贡献从大到小依次为 2019 年>2018 年>2017 年。结合 2017—2019 年安徽及周边省份 O₃ 浓度分布(见图 7),O₃浓度较高的东部和北部省份 (江苏、山东),对皖南地区 O₃浓度的升高也有一定 影响。

2.2.2 气象条件影响

1) 气温、风速的影响。从 2017—2019 年气温和 风速与 O₃浓度逐月变化情况(见图 8、9)可以看出: 温度较高的 5—10 月,O₃浓度也相对较高;O₃浓度 变化与风速关联性不大。从逐年变化来看,臭氧浓度 呈现出整体逐年上升的趋势,而气温年变化不明显, 所以从年变化来看,气温与臭氧的相关性较低。从风 速来看,臭氧浓度与风速的相关性也不明显。总体来 看,风速和气温并非对污染产生影响的决定气象因素。



图 6 2017—2019 年合肥市后向轨迹与臭氧潜在源区分析 Fig.6 Analysis of (a) backward trajectory and (b) ozone potential source area of Hefei city from 2017 to 2019







图 8 2017—2019 年逐月气温与 O₃ 浓度变化情况 Fig.8 Monthly variation of temperature and O₃ concentration in 2017 to 2019



图 9 2017—2019 年逐月风速与 O_3 浓度变化情况 Fig.9 Monthly variation of wind speed and O_3 concentration from 2017 to 2019

2)降水、相对湿度的影响。从 2017—2019 年降 水和相对湿度与 O₃浓度逐月变化情况(见图 10、11) 可以看出:降水量较少、相对湿度较低的 8—10 月, O₃浓度较高。逐年来看,2017—2019 年安徽省降水 量呈现逐年下降的趋势,同时臭氧浓度呈现逐年上升



图 10 2017—2019 年月降水量与 O₃ 浓度变化情况 Fig.10 Changes of precipitation and O₃ concentration in 2017 to 2019



图 11 2017—2019 年相对湿度与 O₃ 浓度变化情况 Fig.11 Changes of relative humidity and O₃ concentration in 2017 to 2019

的趋势,降水量的逐年下降为臭氧浓度的上升提供了 气象条件。相对湿度的年变化与降水量的变化趋势近 似,两者与臭氧均呈现较强的负相关关系。

3)太阳总辐射的影响。从2017—2019年太阳总 辐射与 O₃浓度逐月变化情况(见图 12)可以看出: O₃逐月浓度与太阳总辐射强度具有良好的对应关系, O₃浓度的高值月对应太阳辐射的高值月,太阳总辐 射与 O₃浓度呈显著相关性,太阳总辐射越强,O₃浓 度越高。2017—2019年的下半年,太阳总辐射呈现 逐年上升的趋势,而臭氧浓度也呈现逐年上升的趋 势,说明太阳总辐射这一局地气象条件是2017—2019 年安徽省臭氧浓度上升的气象因素之一。



图 12 2017—2019 年太阳总辐射与 O₃ 浓度变化情况 Fig.12 Variation of total solar radiation and O₃ concentration in 2017 to 2019

3 结论

1)2017—2019 年安徽省及各市臭氧浓度增长 显著,增幅为 12.2%。臭氧浓度上升较快的时段集 中在第二季度和第三季度,且臭氧污染有"前移后 滞"趋势。

2)根据 PSCF 潜在源区分析,安徽省臭氧污染主要来源于本地源,外地源贡献主要来源于江苏省和山东省等。皖北和皖中臭氧潜在源区以安徽本地和江苏西部地区为主,而皖南臭氧潜在源区为江浙皖交界处。

3)臭氧浓度与太阳总辐射强度呈正相关,与降水量和相对湿度呈负相关,与风速关联性不大。 2017—2019 年安徽省臭氧浓度上升与太阳总辐射的逐年上升,以及降水量、相对湿度的逐年下降这些气象要素的变化有着密切的关系。

参考文献:

- 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 Xiao-yan, GONG Zheng-yu, YE Chun-xia, et al. Characteristics of changes in ozone concentration in 74 cities from 2013 to 2016[J]. China Environmental Monitoring, 2017, 33(5): 101-108.
- [2] FISHMAN J, CRUTZEN P J. The origin of ozone in the troposphere[J]. Nature, 1978, 274(5674): 855-858.

[3] 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 Bing, NIU Yu-wen, DU Rong-guang, et al. Characteristics of surface ozone concentration in urban site of Hangzhou[J]. China environmental science, 2017, 37(2): 443-451.

[4] 王鑫. 安徽省大气中挥发性有机物污染特征、来源解 析及健康风险评价[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.

> WANG Xin. The pollution charactristics, source apportionment, health risk assessment of volatile organic compounds in Anhui Province, China[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.

[5] 刘丹, 解强, 张鑫, 等. 北京冬季雾霾频发期 VOCs 源 解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3693-3701.

> LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, et al. Source apportionment and health risk assessment of VOCs during the haze period in the winter in Beijing[J]. Environmental science, 2016, 37(10): 3693-3701.

- [6] FENG Zhao-zhong, SUN Jing-song, WAN Wu-xing, et al. Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China[J]. Environmental pollution, 2014, 193: 296-301.
- [7] 冯兆忠,李品,袁相洋,等. 我国地表臭氧生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1530-1541.
 FENG Zhao-zhong, LI Pin, YUAN Xiang-yang, et al. Progress in ecological and environmental effects of ground-level O3 in China[J]. Acta ecologica sinica, 2018, 38(5): 1530-1541.
- [8] 李连和.珠三角区域地表臭氧浓度变化趋势研究[J]. 能源与环境, 2017(4): 30-31.
 LI Lian-he. Study on the variation trend of surface ozone concentration in the Pearl River Delta region[J]. Energy and environment, 2017(4): 30-31.
- [9] 卢自勇,李越越,谭晋,等.贵阳市 2013—2016 年臭氧 污染特征分析[J].环境与可持续发展,2019,44(3):89-92.
 LU Zi-yong, LI Yue-yue, TAN Jin, et al. Characteristics analysis on ozone pollution in Guiyang in 2013-2016[J].

Environment and sustainable development, 2019, 44(3): 89-92.

- [10] 王磊,刘端阳,韩桂荣,等.南京地区近地面臭氧浓度 与气象条件关系研究[J].环境科学学报,2018,38(4): 1285-1296.
 WANG Lei, LIU Duan-yang, HAN Gui-rong, et al. Study on the relationship between surface ozone concentrations and meteorological conditions in Nanjing, China[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2018, 38(4): 1285-1296.
- [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 Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, 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] 钱悦,许彬,夏玲君,等. 2016—2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2190-2201.
 QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, et al. Characteristics of ozone pollution and relationships with meteorological

of ozone pollution and relationships with meteorological factors in Jiangxi Province[J]. Environmental science, 2021, 42(5): 2190-2201.

- [13] 王男. 气象因素对沈阳市大气中臭氧的影响[J]. 环境 科学与技术, 2015, 38(S1): 61-65.
 WANG Nan. Effect of meteorological factors on ozone in Shenyang city[J]. Environmental science & technology, 2015, 38(S1): 61-65.
- [14] 许亚宣,李小敏,于华通,等. 长三角区域 O3 污染分布特征与影响因素[J]. 环境影响评价, 2018, 40(5): 18-22.
 XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, et al. Distribution characteristics and influencing feature of source and

tion characteristics and influencing factors of ozone concentration in the Yangtze River Delta[J]. Environmental impact assessment, 2018, 40(5): 18-22.

- [15] MONKS P S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum[J]. Atmospheric environment, 2000, 34(21): 3545-3561.
- [16] LIAO Ting-ting, WANG Shan, AI Jie, et al. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM2.5 during the winter of 2013 in Chengdu (China)[J]. Science of the total environment, 2017, 584-585: 1056-1065.
- [17] 张涛,王新明,周炎,等.利用HYSPLIT模型研究珠三角地区 VOCs 时空分布特征[J].中国环境科学,2020,40(10):4216-4223.
 ZHANG Tao, WANG Xin-ming, ZHOU Yan, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of VOCs in the Pearl River Delta region using HYSPLIT model[J]. China environmental science, 2020, 40(10): 4216-4223.
- [18] DVORSKÁ A, LAMMEL G, HOLOUBEK I. Recent trends of persistent organic pollutants in air in central Europe-Air monitoring in combination with air mass trajectory statistics as a tool to study the effectivity of regional chemical policy[J]. Atmospheric environment, 2009, 43(6): 1280-1287.
- [19] ASHBAUGH L L, MALM W C, SADEH W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park[J]. Atmospheric environment (1967), 1985, 19(8): 1263-1270.[
- [20] XU X, AKHTAR U S. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2010, 10(15): 7073-7083.