

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.001

气象条件对合肥市 O₃ 质量浓度变化的影响

邓 鹏^{1,2}, 林保国², 夏晓宇², 陈公名², 朱承驻¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽皖欣环境科技有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要:文章基于 2016—2020 年合肥市大气污染物逐时监测数据及同期逐日气象数据, 利用 KZ(Kolmogorov-Zurbenko)滤波法将合肥市 O₃ 质量浓度及各气象要素逐日序列分解为长期、季节以及短期分量, 并针对分解浓度序列建立气象因子回归模型, 综合评估合肥市 O₃ 质量浓度变化趋势及气象条件对 O₃ 质量浓度的影响。结果表明: 季节变化是引起 O₃ 质量浓度原始序列波动的最主要因素, 合肥市 O₃ 质量浓度的长期变化趋势为先增长后下降; 在长期分量中, 相对湿度可能是影响 O₃ 质量浓度的最主要气象要素, 且呈现显著负相关($r=-0.581$), 而在原始序列以及其余分量中, 太阳净辐射对 O₃ 质量浓度的影响最为重要, 呈现为显著正相关(r 最高为 0.911); 聚类分析发现 O₃ 在较重污染时对应的日最高温度和相对湿度的均值分别为 30.9 °C 和 71%; 气象条件在 2019 年中期以前对 O₃ 污染起促进作用, 使 $\rho(\text{O}_3)$ 平均上升了 2.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 而在 2019 年中期以后对 O₃ 污染起抑制作用, 使 $\rho(\text{O}_3)$ 平均下降了 3.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

关键词:合肥市; O₃ 污染; Kolmogorov-Zurbenko 滤波法; 气象要素

中图分类号: X823

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)08-1009-06

Influence of meteorological conditions on O₃ mass concentration variation in Hefei City

DENG Peng^{1,2}, LIN Baoguo², XIA Xiaoyu², CHEN Gongming², ZHU Chengzhu¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Wanxin Environmental Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: Based on the hourly monitoring data of atmospheric pollutants in Hefei City from 2016 to 2020 and the daily meteorological data of the same period, this paper used Kolmogorov-Zurbenko(KZ) filtering to decompose the O₃ mass concentration and daily series of meteorological elements in Hefei City into long-term, seasonal and short-term components, and a meteorological factor regression model was established according to the decomposed mass concentration series. The variation trend of O₃ mass concentration and the influence of meteorological conditions on O₃ mass concentration in Hefei City were comprehensively evaluated. The results show that seasonal variation is the most important factor that causes the fluctuation of the original sequence of O₃ mass concentration. The long-term trend of O₃ mass concentration in Hefei City is increasing first and then decreasing. Among the long-term components, relative humidity may be the most important meteorological element that affects O₃ mass concentration, and exhibits a significant negative correlation($r=-0.581$). Among the original sequence and other components, solar net radiation is the most important factor affecting O₃ mass concentration, with a significant positive correlation($r=0.911$). Cluster analysis finds that the average daily maximum temperature and relative humidity corresponding to heavy pollution of O₃ are 30.9 °C and 71%, respectively. Meteorological conditions promoted O₃ pollution before the middle of 2019, with an average increase of 2.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\rho(\text{O}_3)$, while inhibited O₃ pollution after the middle of

收稿日期: 2021-10-20; 修回日期: 2021-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21876038); 合肥市生态环境保护局资助项目(2018FFCZ3692)

作者简介: 邓 鹏(1997—), 男, 四川自贡人, 合肥工业大学硕士生;

朱承驻(1967—), 男, 安徽太湖人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

2019, with an average decrease of $3.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\rho(\text{O}_3)$.

Key words: Hefei City; ozone(O_3) pollution; Kolmogorov-Zurbenko(KZ) filtering; meteorological element

“十三五”是我国大气环境质量改善的重要时期,在此期间,全国大部分城市的细颗粒物污染均得到一定程度的控制^[1-2],雾霾天气数量下降明显,空气质量优良天数比例显著上升,但与此同时,全国各地 O_3 污染问题在此期间日趋严峻^[3-4]。 O_3 一般是由其前体物挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)、 NO_x 以及 CO 等发生光化学反应产生的典型的二次污染物^[5-6],近地面高质量浓度的 O_3 会对环境空气质量及对人体和动植物产生不良影响^[7-9], O_3 质量浓度不仅与其前体污染物的排放有关,且较大程度地受到太阳辐射强度、温度、相对湿度以及风速等气象要素的影响^[10-12]。在国内,多数学者就气象条件对 O_3 质量浓度的影响开展较多研究^[13-15],但针对气象条件对 O_3 的变化趋势的影响方面的研究则相对较少。目前,这类研究主要基于两类方法:① 采用空气质量模式,通过扰动气象条件来模拟气象条件的变化,从而讨论气象条件对 O_3 变化的贡献,这种方法需要较为完善的污染源清单作为基础,并需要借助庞大的计算资源才能得出较为可靠的结果^[16-17];② 基于数理统计方法定量计算气象条件对 O_3 变化的贡献,这种方法对数据的要求相对较为简单,且不需要庞大的计算资源,近年来应用较多^[18-19]。文献^[20]利用 KZ(Kolmogorov-Zurbenko)滤波法,定量分析气象条件对天津市 O_3 质量浓度的影响,得到消除气象条件影响的 O_3 质量浓度序列,结果表明消除气象条件影响的 O_3 污染有所加重。

合肥市作为长三角城市群的副中心城市,对于 O_3 问题的研究颇具意义,因此,本研究借助文献^[21]提出的 KZ 滤波法,利用 2016—2020 年合肥市 O_3 监测数据以及同期气象数据,综合分析“十三五”期间气象条件对 O_3 质量浓度的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据

合肥市全市共有 10 个空气质量国控监测点位,为了确保空气质量数据和气象数据之间具有更加准确的相关性,选取了一组相距最近的空气质量点位和气象站点,如图 1 所示。

本研究所采用的 2016—2020 年 O_3 质量浓度逐时监测数据来源于青悦开放环境数据中心

(<https://data.epmap.org>),研究所需的气象要素包括每日的平均气压 p 、平均温度 θ 、最高温度 θ_{\max} 、平均相对湿度 H_{RH} 、降雨量 Q 、平均风速 v_{WS} 、日照时数 T_{SST} 、地表净太阳辐射 R_{SR} 以及边界层高度 H_{BLH} 。其中, p 、 θ 、 θ_{\max} 、 H_{RH} 、 Q 、 v_{WS} 以及 T_{SST} 数据源于 2016—2020 年中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)发布的中国地面气候资料日值数据集(V3.0), R_{SR} 和 H_{BLH} 数据来自于欧洲中期天气预报中心的再分析资料数据集 ERA5,所有数据的缺失值均以线性内插的结果来替代。

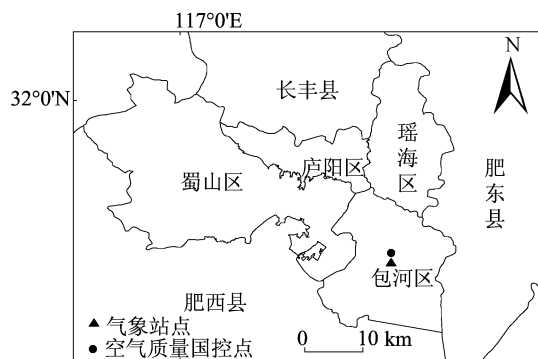


图 1 选取的合肥市空气质量国控监测点位及气象站点

1.2 研究方法

本研究所用的 O_3 逐日质量浓度值为合肥市包河区国控站点的逐时监测数据计算的日最大 8 h 平均值,下文中 O_3 质量浓度均为日最大 8 h 平均值。为得到 O_3 质量浓度的长期变化趋势,采用 KZ 滤波法^[21-22]将 O_3 质量浓度原始序列分解为短期分量、季节分量和长期分量,3 种分量分别能表示 O_3 质量浓度的短期变化、季节变化以及长期变化趋势。

文献^[21]指出 $\text{KZ}_{15,5}$ 可以得到原始时间序列的基线分量(季节分量和长期分量之和), $\text{KZ}_{365,3}$ 可以提取长期分量,而短期分量可以计算为原始序列与基线分量之差。为了探究排除气象条件影响下的 O_3 质量浓度变化趋势,对 O_3 质量浓度与气象要素的基线分量 $\text{KZ}_{15,5}$ 和短期分量进行了多元线性回归分析,并由此得到了排除气象要素影响的 O_3 质量浓度浓度序列。

2 结果与讨论

2.1 合肥市 O_3 质量浓度变化趋势

合肥市“十三五”期间 O_3 质量浓度原始序列

及经 KZ 滤波分解后的浓度序列如图 2 所示,从原始序列中可以看出,研究时段内 O₃ 质量浓度的峰值多出现于年中,最高值出现于 2017 年 6 月,为 277 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;为进一步探究不同时间尺度的 O₃ 质量浓度变化趋势,使用 KZ 滤波对 O₃ 质量浓度序列进行分解,得到 O₃ 质量浓度的短期、季节以及长期分量,3 个分量的方差之和相对于 O₃ 质量浓度原始序列方差的占比为 92.8%,表明该方法对 O₃ 质量浓度原始序列进行了有效地分离^[23],3 个分量方差分别占总方差的 45.1%、46.6%、1.1%,这说明合肥市 O₃ 质量浓度的季节敏感性较高,由季节变化引起的气象要素以及排放量的变化可能是合肥市 O₃ 质量浓度变化的最大贡献因素之一。

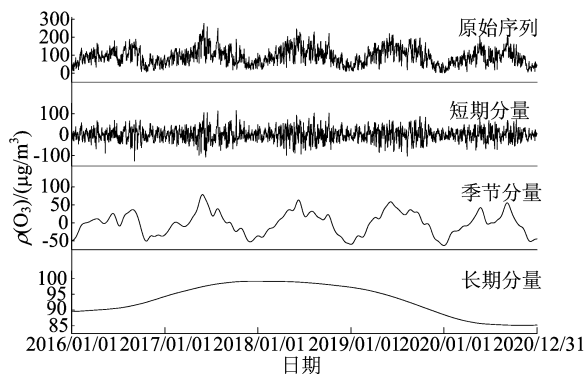


图 2 O₃ 质量浓度原始序列及经 KZ 滤波分解后的质量浓度序列

从季节分量中可以看出,合肥市 O₃ 质量浓度的季节变化基本呈现为夏季高、冬季低,且每年的峰值与谷值的差值为 $(127.4 \pm 36.0) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 季节变化幅度较大,另外研究时段内 O₃ 质量浓度的峰值存在“单峰”和“双峰”,这可能与夏季季风带来的 7 月和 8 月的降雨有关^[24]。研究时段内合肥市 O₃ 质量浓度水平从 2016 年到 2019 年为上升趋势,而后于 2019 年开始下降,且 2020 年末的浓度低于 2016 年初,说明从长期来看,合肥市 O₃ 质量浓度于“十三五”期间是略微有所下降的,其中,2019 年以后 O₃ 质量浓度快速下降,结合 2020 年 O₃ 质量浓度季节分量的“双峰”特征,可以初步判断出,2020 年 O₃ 质量浓度的快速下降极有可能是受到 2020 年内梅雨季节的影响,合肥市 2016—2020 年夏季降雨量见表 1 所列。由表 1 可知,2020 年夏季总降水量较前 4 年显著升高,并且降雨量的显著升高集中出现在 O₃ 污染高发的 6、7 月,由于降雨对 O₃ 具有很好的消除作用,因此可以推断出,2020 年的强降雨是 2019 年以

后合肥市 O₃ 质量浓度的长期分量快速下降的重要原因之一。此外 2018 年国务院印发了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,使得全国各地对于当地的空气质量更为重视,合肥市在 O₃ 污染防治方面采取了较多相应的防治措施,这也有可能是导致 O₃ 质量浓度的长期分量在研究时段末期出现下降的原因之一。

表 1 合肥市 2016—2020 年夏季降雨量

年份	降雨量/mm			
	6 月	7 月	8 月	合计
2016	191.0	295.0	60.4	546.4
2017	54.0	63.5	243.2	360.7
2018	92.1	318.9	281.4	692.4
2019	156.7	20.8	51.3	228.8
2020	369.8	529.9	90.7	990.4

2.2 气象要素对 O₃ 的影响

各气象要素原始序列及其分量与 O₃ 质量浓度原始序列及其对应分量的相关系数见表 2 所列。由表 2 可知,原始序列、短期分量和季节分量中, θ 、 θ_{\max} 、 T_{SST} 、 R_{SR} 与 $\rho(\text{O}_3)$ 均呈现显著正相关关系,且相关系数明显高于其他气象要素,由于这四者均与辐射强度存在直接或间接的正相关关系,而辐射强度是光化学反应的重要因素^[15],在较小的时间尺度内,O₃ 偏向于受光化学反应的控制,其中以 R_{SR} 与 O₃ 质量浓度的相关性为最强(r 分别为 0.791、0.689、0.911),表明太阳辐射对 O₃ 质量浓度的影响在各气象要素中占据了主导作用。太阳辐射的年周期驱动了 O₃ 质量浓度的季节变化^[25],因此在季节分量中,其他气象要素与 O₃ 质量浓度的相关性可能并非直接相关,Q 在其余分量中与 O₃ 质量浓度为显著负相关,但在季节分量中为正相关,这很大程度归因于合肥市的季风气候造成的夏季降雨量显著高于其他季节,而合肥市夏季的 O₃ 质量浓度受到强太阳辐射等气象要素的影响也高于其他季节^[26],由此造成了这种正相关。同样地,P 在季节分量中与 $\rho(\text{O}_3)$ 为显著负相关,但在短期分量和长期分量中却与 O₃ 质量浓度的相关性不显著,这可能是由于这种负相关性源自于季节的更替,夏季的气压低于冬季,而夏季的 O₃ 质量浓度高于冬季,由此产生了负相关性。同时大多数气象要素与 O₃ 质量浓度在长期分量与其余分量中的正负性并不一致,文献^[27]指出,O₃ 质量浓度长期分量是总排放量、污染物输送、气候、政策和经济变化综合作用的结

果,因此,气象要素与 O_3 质量浓度的长期分量的相关系数可能并不能反映真实的相关性,例如 θ 在其他所有分量与 O_3 质量浓度中均为正相关,而在长期分量中却为显著负相关,这可能是由多种其他因素共同作用的结果。 H_{RH} 与 O_3 质量浓度在原始序列与各分量中始终呈现显著负相关关系,并且 H_{RH} 与 O_3 质量浓度在长期分量中的相关性较强(斯皮尔曼相关系数 $r = -0.581$),能相对更好地解释 O_3 质量浓度的变化,因此,较大的时间尺度下,在各气象要素中, O_3 质量浓度可能偏向于受 H_{RH} 的控制。

表 2 合肥市各气象要素与 O_3 质量浓度的斯皮尔曼相关系数

气象要素	原始序列	短期分量	季节分量	长期分量
P	-0.502**	-0.032	-0.822**	-0.011
v_{WS}	-0.084**	0.166**	0.162**	-0.554**
Q	-0.427**	-0.368**	0.203**	-0.431**
θ	0.613**	0.301**	0.816**	-0.426**
θ_{max}	0.701**	0.557**	0.844**	-0.865**
T_{SST}	0.663**	0.677**	0.765**	-0.381**
H_{RH}	-0.447**	-0.562**	-0.156**	-0.581**
H_{BLH}	0.257**	0.043	0.720**	-0.430**
R_{SR}	0.791**	0.689**	0.911**	0.150**

注: **表示在 $P < 0.01$ 级别(双尾),相关性显著; *表示在 $P < 0.05$ 级别(双尾),相关性显著。

由于合肥市 θ_{max} 、 H_{RH} 与 O_3 质量浓度都具有良好的相关性,且这 2 种气象要素一直以来都是各地研究 O_3 质量浓度影响因素的重点^[10-12,28-29],但两者均无法单独对 O_3 质量浓度的浓度水平做出较好的解释,故对研究时段内的 H_{RH} 和 θ_{max} 进行综合分析,结果如图 3 所示。

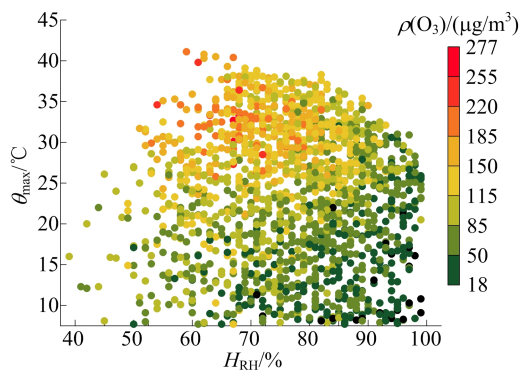


图 3 不同 θ_{max} 、 H_{RH} 下 O_3 质量浓度变化

从图 3 可以看出, O_3 质量浓度分布主要呈现为左上角质量浓度高,右下角质量浓度低,即高温和中等偏高的 H_{RH} 的气象条件下, O_3 质量浓度会

呈现较高水平,而在低温和过高相对湿度的情况下, O_3 质量浓度则较低,这与国内其他城市的研究结果相同^[28-29]。这种现象主要是由于高温的气象条件下,更有利于光化学反应的发生,但过高的 H_{RH} 往往会降低太阳辐射强度或者以湿沉降的形式抑制光化学反应的发生^[30-31]。总体上看,研究时段内合肥市的 H_{RH} 相对较高,主要分布在 65%~90% 范围内,而 O_3 超标天气主要出现于 $\theta_{max} > 25$ °C 且 H_{RH} 介于 50%~80% 的气象条件下。

利用 k -均值分类,将研究时段内合肥市的 O_3 污染按照 O_3 质量浓度以及相对应的 θ_{max} 和 H_{RH} 进行聚类分析,聚类结果见表 3 所列。从表 3 可以看出,聚类 1 和聚类 2 的聚类中心与文献^[32]中 O_3 的一级标准和二级标准值较为接近,故将聚类 1 定为轻度污染类型,聚类 2 定义为较重污染类型,而聚类 3 的 O_3 质量浓度水平较低,故命名为无污染类型。根据聚类结果,聚类 1(轻度污染类型)和聚类 3(无污染类型)在整个“十三五”期间出现天数较为接近,分别为 737、715 d,分别占总天数 40.3%、39.2%,聚类 1 和聚类 3 占据了整个研究时段的主体部分,而此类型对应的气象条件特点为较低的温度和较高的相对湿度,多出现于冬季、春初和秋末,在以上时间段内,基本不会出现严重的 O_3 污染。聚类 2(较重污染类型)出现的天数为 375 d,约占总天数的 20.5%,此时对应的 H_{RH} 和 θ_{max} 均值分别为 71% 和 30.9 °C,这种气象条件多出现于晴朗且高温的夏季、春末和秋初,当 H_{RH} 和 θ_{max} 在此均值左右时,可能会形成较重的 O_3 污染。

表 3 O_3 污染与主要气象要素聚类分析结果

类别	聚类 1	聚类 2	聚类 3
$\rho(O_3)/(\mu g/m^3)$	101.3	161.5	47.8
$H_{RH}/\%$	75	71	83
$\theta_{max}/\text{°C}$	23.9	30.9	14.6
t/d	737	375	715

2.3 气象条件对 O_3 变化的影响评估

文献^[33]采用构建气象要素逐步线性回归模型的方法,有效地消除了气象要素对 O_3 变化趋势的影响。因此,对合肥市 2016—2020 年的逐日气象条件序列构建逐步线性回归模型得到了基于气象条件调整后的 O_3 长期变化序列,如图 4 所示。经气象条件调整后的序列分离出气象条件对其的影响,从图 4 可以看出,与原始序列相比,两

者质量浓度水平差异较为明显,最为显著的差别在于两者的线性拟合变化趋势相反,原始序列的线性拟合结果表明,O₃ 总体上呈现下降趋势,O₃ 质量浓度平均每年以 1.424 μg/m³ 的速率下降,而调整后的线性拟合结果与之相反,总体呈上升趋势,平均每年上升趋势为 0.474 μg/m³,并且在 2020 年,调整后的序列质量浓度较原始序列显著升高,这说明 2020 年的气象条件极度不利于 O₃ 的生成。

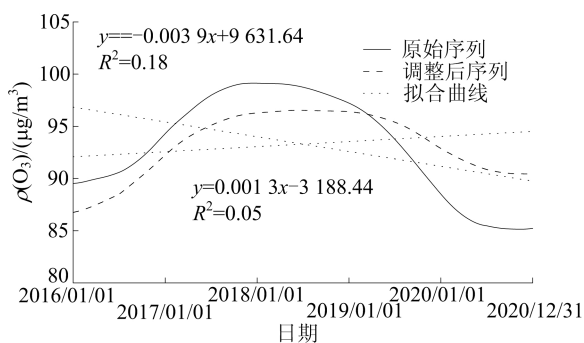


图 4 O₃ 质量浓度原始序列与调整后序列关系

由于调整后的序列可以看作是由污染物排放等其他因素引起的 O₃ 质量浓度变化序列,O₃ 质量浓度原始序列减去调整后序列后,得到的新序列可以看作是由气象条件变化引起的 O₃ 质量浓度变化(记为 O₃(M)-long)。将各气象要素的长期分量分别与 O₃(M)-long 进行相关性分析,最终发现 H_{RH} 与 O₃(M)-long 的相关性最强($r = -0.938$)。因此,将 O₃(M)-long 与合肥市相对湿度的长期序列(记为 H_{RH}-long)进行比较,结果如图 5 所示。

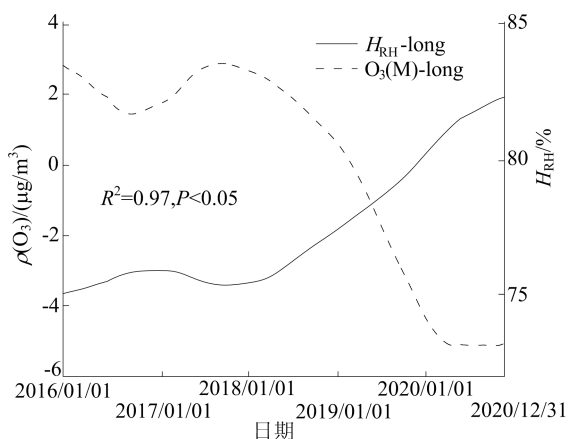


图 5 气象条件影响的下 $\rho(\text{O}_3)$ 和 H_{RH} 长期序列的关系

从图 5 可以看出,在 2019 年的中期以前,

O₃(M)-long 均为正值,此阶段为气象有利期,即气象条件不利于 O₃ 质量浓度的下降,对减轻合肥市的 O₃ 污染呈抑制作用,不利气象条件使 O₃ 质量浓度在这一阶段平均上升了 2.19 μg/m³;而在 2019 年中期以后,O₃(M)-long 逐渐减小为负值,此阶段为气象不利期,即气象条件抑制了合肥市 O₃ 的产生,有利的气象条件使 O₃ 在这一阶段平均质量浓度下降了 3.91 μg/m³。H_{RH} 的长期趋势呈现为总体波动上升,由气象条件引起的 O₃ 的长期变化趋势与 H_{RH} 的长期变化趋势完全相反($R^2 = 0.97$),高 H_{RH} 气候通常不利于 O₃ 的生成^[26],这与图 3 中的情况较为符合,表明在研究时段后期的持续升高的 H_{RH} 可能是合肥市 O₃ 质量浓度下降的重要因素。

3 结 论

利用 KZ 滤波法对合肥市“十三五”期间的 O₃ 质量浓度序列进行分解,得到短期、季节及长期 3 个分量的方差贡献分别为 45.0%、46.4%、1.1%,说明主要是季节和短期变化引起了 O₃ 质量浓度原始序列的波动。长期来看,合肥市 O₃ 质量浓度呈现先增长后下降的趋势,总体质量浓度水平略微有所下降。

在原始序列、短期分量和季节分量中,合肥市 O₃ 质量浓度最易受太阳辐射的影响,而在长期分量中,H_{RH} 对 O₃ 质量浓度的影响可能更为显著。O₃ 超标天气多出现于 $\theta_{\max} > 25$ °C 且相对湿度介于 50%~80% 的气象条件下。 k -均值定量分类分析表明,O₃ 较重污染时,H_{RH} 和 θ_{\max} 的平均值分别为 71% 和 30.9 °C。

经逐步线性回归消除气象条件影响的 $\rho(\text{O}_3)$ 的长期分量每年以 0.474 μg/m³ 的趋势波动上升,与未调整序列中每年 1.424 μg/m³ 的变化趋势相反。2016 到 2019 年上半年,不利的气象条件使得 O₃ 质量浓度平均上升了 2.19 μg/m³;而 2019 年下半年至 2020 年,气象条件使 O₃ 质量浓度平均下降了 3.91 μg/m³。高相对湿度的气候可能是导致合肥市 O₃ 质量浓度下降的重要因素之一。

[参 考 文 献]

- [1] 赵文斐,于占江,王让会,等. 石家庄市 PM_{2.5} 时空特征及其对土地利用变化的响应[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2404-2413.

- [2] 夏晓圣,汪军红,宋伟东,等. 2000—2019年中国PM_{2.5}时空演化特征[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4832-4843.
- [3] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等. 长三角城市群O₃浓度的时空分异及驱动因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1434-1445.
- [4] 钱悦,许彬,夏玲君,等. 2016—2019年江西省O₃污染特征与气象因子影响分析[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2190-2201.
- [5] STAHELIN J, HARRIS N, APPENZELLER C, et al. Ozone trends: a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39(2): 231-290.
- [6] ANENBERG S, HOROWITZ L, TONG D, et al. An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(9): 1189-1195.
- [7] LIU H, LIU S, XUE B, et al. Ground-level ozone pollution and its health impacts in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 173: 223-230.
- [8] MONKS P S, ARCHIBALD A T, COLETTE A, et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(15): 8889-8973.
- [9] DANIELA N, DAVIDE P, FABIO V. The effects of ozone on human health[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(9): 8074-8088.
- [10] 陈优良,李亚倩. 长三角PM_{2.5}和O₃变化特征及与气象要素的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(2): 382-396.
- [11] 符传博,徐文帅,丹利,等. 前体物与气象因子对海南省O₃污染的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 45-50.
- [12] 谢祖欣,冯宏芳,林文,等. 气象条件对福州市夏季O₃浓度的影响研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2251-2261.
- [13] 石春娥,杨关盈,张浩,等. 安徽省臭氧污染特征及其气象成因[J]. 三峡生态环境监测, 2020, 5(3): 71-84.
- [14] 李莉莉,王隆,刘喜平,等. 哈尔滨市臭氧时空分布特征及气象要素的关系[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 1991-1999.
- [15] 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.
- [16] STRODE S A, RODRIGUEZ J M, LOGAN J A, et al. Trends and variability in surface ozone over the United States[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(17): 9020-9042.
- [17] 张毓麟,沈劲,陈多宏,等. 定量气象与源排放对PM₁₀浓度影响[J]. 中国科技论文, 2014, 9(9): 1039-1042.
- [18] YIN C Q, DENG X J, ZOU Y, et al. Trend analysis of surface ozone at suburban Guangzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 695: 133880.
- [19] LIANG X, LI S, ZHANG S Y, et al. PM_{2.5} data reliability, consistency, and air quality assessment in five Chinese cities[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 121(17): 10220-10236.
- [20] 张洁琼,王雅倩,高爽,等. 不同时间尺度气象要素与空气污染关系的KZ滤波研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3662-3672.
- [21] RAO S T, ZURBENKO I G. Detecting and tracking changes in ozone air quality[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1994, 44(9): 1089-1092.
- [22] CHEN Z Y, CHEN D L, KWAN M P, et al. The control of anthropogenic emissions contributed to 80% of the decrease in PM_{2.5} concentrations in Beijing from 2013 to 2017[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(21): 13519-13533.
- [23] UPADHAYA P, DU H B, KOMMALAPATI R R. Meteorological detrending of ozone at three sites in the dallas-fort worth area: application of KZ filter method[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(11): 1226.
- [24] MA Z Q, XU J, QUAN W J, et al. Significant increase of surface ozone at a rural site, north of eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 16(6): 3969-3977.
- [25] PAPANASTASIOU D K, MELAS D, BARTZANAS T, et al. Estimation of ozone trend in Central Greece, based on meteorologically adjusted time series[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2012, 17(4): 353-361.
- [26] 赵旭辉,董昊,季冕,等. 合肥市O₃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.
- [27] YU Y J, WANG Z, HE T, et al. Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Yangtze River Delta, China, during 2013-2017[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(4): 1357-1364.
- [28] 张晓,张艳品,钤伟妙. 石家庄市主城区臭氧污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 245-253.
- [29] 杨健,尹沙沙,于世杰,等. 安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 115-124.
- [30] 赵伟,高博,刘明,等. 气象因素对香港地区臭氧污染的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 55-66.
- [31] LI K W, CHEN L H, YING F, et al. Meteorological and chemical impacts on ozone formation: a case study in Hangzhou, China[J]. *Atmospheric Research*, 2017, 196: 40-52.
- [32] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 3.
- [33] WISE E K, COMRIE A C. Extending the Kolmogorov-urbenko filter: application to ozone, particulate matter, and meteorological trends[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, 55(8): 1208-1216.

(责任编辑 吴亮)