

杨云芸, 胡燕, 肖童觉, 等. 湖南省长株潭城市群臭氧分布特征研究及分析 [J]. 灾害学, 2021, 36(2): 97–103.
[YANG Yunyun, HU Yan, XIAO Tongjue, et al. Distribution Characteristics of Ozone in Chang Zhu Tan Urban Agglomeration of Hunan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 97–103. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.017.]

湖南省长株潭城市群臭氧分布特征研究及分析*

杨云芸^{1,2}, 胡 燕^{1,2}, 肖童觉³, 李 蔚^{1,2}, 刘焕乾⁴

(1. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410118; 2. 湖南省气象台, 湖南 长沙 410118;
3. 湖南省生态环境监测中心, 湖南 长沙 410019; 4. 湖南省气象技术装备中心, 湖南 长沙 410008)

摘 要: 利用长沙、株洲、湘潭城市群 2015–2019 年臭氧质量日浓度资料及同期气象要素数据, 对典型城市群臭氧(O_3)浓度变化特征及其与气象条件之间关系进行研究。结果表明: 2015–2019 年间长株潭城市群臭氧浓度呈上升趋势, 年平均浓度增幅和臭氧超标率由高到低的顺序为长沙 > 湘潭 > 株洲; 臭氧浓度在夏季最高, 而月变化特征呈现双峰结构, 次高峰和高峰分别出现在 5 月和 9 月, 臭氧高值区处于 5–9 月间, 且逐月升高; 夏季为臭氧最高的季节且; 最高气温、平均气温和相对湿度与臭氧变化相关性最高, 相对而言, 降水量和地面风速与臭氧为弱相关。

关键词: 长株潭城市群; 臭氧污染; 分布特征; 气象因素; 相关性分析

中图分类号: P642; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)02–0097–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.017

在我国“三区十群”城市化高度集中区域大气污染已逐渐由气溶胶污染向光化学污染或以细颗粒物和臭氧占主导的复合污染过渡^[1–2]。臭氧浓度与分布除了光化学反应外, 气象要素场对臭氧的形成及转化过程有着显著的作用, 是造成臭氧浓度不同时间尺度变化的重要因素^[3–4]。国内外学者近几年逐步开始对臭氧的形成和变化开展研究, 张亮^[5]等利用 WRF 模式对夏季长江三角洲臭氧污染个例的时空分布特征和物理化学机制进行了数值模拟研究, 表明有利于光化学污染的形成气象条件为晴天、高温和小风; 刘楚薇^[6]等得出高温、低湿度、低风速条件有利于臭氧污染维持和发展。臭氧季节性特点形成的重要外因与气象条件休戚相关^[7–8], 吴锴^[9]等通过对成都臭氧污染特征及气象成因研究, 得到量化的气象因子与臭氧浓度变化关系。梁卓然^[10]等研究发现局地气象因子与臭氧浓度间存在显著相关性, 基于季节环流分型的逐步回归模型对臭氧浓度的模拟效果改善明显。

我国中部新崛起的城市群之一长株潭城市群热岛现象明显, 高温导致臭氧污染持续加重, 区域防治压力加大。目前对长株潭臭氧年际、月际变化及相关气象因素分析研究较少, 本文主要利用长沙、株洲、湘潭 3 个国控城市环境空气质量监测点大气污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 SO_2 、 NO_2 、CO)监测数据, 气象数据采用 CIMISS 数据库中各

站点日最高气温、日平均气温、日均海平面气压, 日平均相对湿度、日照总时数、日降水量、日平均风速等观测数据进行分析^[10], 得到长株潭城市群臭氧空气质量时空变化特征及其规律, 以期为湖南大气污染预警体系建设和大气污染防治事业提供科学参考。

1 数据来源与统计分析

1.1 数据来源

基于湖南省长沙、株洲和湘潭 3 个重点城市环境空气质量国控监测站的 6 项大气污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 SO_2 、 NO_2 、CO)监测数据, 气象数据采用 CIMISS 数据库中各站点日最高气温、日平均气温、日均海平面气压, 日平均相对湿度、日照总时数、日降水量、日平均风速等观测数据进行分析, 得到湖南城市空气质量时空变化特征及其规律, 以期为湖南大气污染预警体系建设和大气污染防治事业提供科学参考。出于资料完整性、连续性、质量控制等因素考虑, 本研究重点以对 2015–2019 年共 5 a 的分析为主, 臭氧污染有效数据样本 5 478 个。

1.2 统计口径的设计

本文臭氧日值为日最大 8 h 滑动平均浓度值,

* 收稿日期: 2020–10–20 修回日期: 2021–01–04

基金项目: 中国气象局预报员专项“2019 年长株潭城市群重污染过程气象条件影响机理及输送通道分析”(CMAYBY2020–088)

第一作者简介: 杨云芸(1984–), 女, 汉族, 湖南长沙人, 高级工程师, 主要从事环境气象预报与研究工作。

E-mail: 337850710@qq.com

通讯作者: 胡燕(1980–), 女, 汉族, 湖南永州人, 高级工程师, 主要从事环境天气预报与研究工作。

E-mail: 16491614@qq.com

8 h 滑动时段内连续 6 h 满足有数据,则认为该数据有效,以 00:00–24:00 时间共有 16 个 8 h 有效滑动时段为有效值。结合国家《环境空气质量标准(GB3095–2012)》^[12]确定的臭氧时平均、日最大 8 h 滑动平均浓度限值(小时均浓度限值一级限值 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、二级限值 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,日最大 8 h 滑动平均浓度一级限值 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、二级限值 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)和《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)(HJ633–2012)》^[13],对臭氧浓度进行污染等级划分,将轻度、中度、重度和严重污染臭氧日最大 8 h 滑动平均浓度分别定义在 160~215、215~265、265~800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。当某市年臭氧日最大 8 h 滑动平均值的第 90 百分位数浓度大于 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,则判定为超标,本文中当长株潭任意一个城市出现臭氧日最大 8 h 滑动平值大于 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 则定义为一个臭氧污染日,本文中臭氧年浓度值指一个历年内城市日最大 8 小时滑动均值的第 90 百分位数。

2 结果与分析

2.1 长株潭城市群臭氧时空变化特征

2015 年以来长株潭城市群臭氧年浓度值呈上升趋势,2019 年城市群浓度较 2015 年增长了 26.4%,最高为长沙的 187 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,以臭氧为首要污染物的日数比较 2015 年增长了 1.36 倍,呈大幅增长趋势,臭氧成为继细颗粒物污染之后的第二污染因子。

2.1.1 长株潭城市群臭氧年际变化特征

作为湖南臭氧污染的重点防护区域,长株潭城市群 2015–2019 年臭氧浓度值分别为 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、146 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、154 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、182 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,呈逐步递增趋势,增幅最大为 2019 年。从近 5 年年浓度值分析(图 1),长沙市年浓度增幅最大,2019 年较 2015 年增长了 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,达 187 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。株洲和湘潭均增长了 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,浓度分别达 177 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 183 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

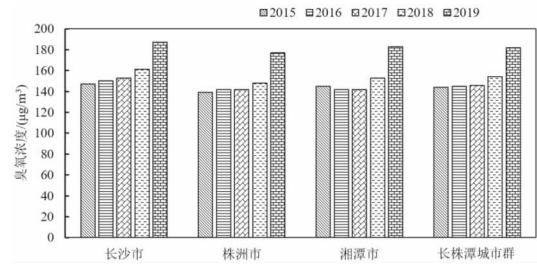


图1 2015–2019 年长株潭城市群臭氧年际浓度变化对比

2015–2019 年长株潭城市群出现轻度污染及以上总污染天数为 1 466 d,其中臭氧为首污的日数为 447 d,占总污染天数 33.2%,占总监测天数 8.7%(表 1)。定义臭氧超标率为臭氧总污染天数与总监测天数的比值,长沙、株洲和湘潭的超标率分别为 10.3%、7.3% 和 8.4%,其中 2019 年长株潭城市群超标率上升至 17.0%~19.7%。从城市群分布来看,长沙各项污染指标均居最高,这可能与长沙作为省会城市其汽车保有量高于其它两地区,汽车排放的氮氧化物量更多从而导致臭氧浓度上升有关。

2015–2019 年,长株潭城市群臭氧为首要污染物的天数在 2018 年出现骤增(图 2),由 2017 年的 252 d 增长到 390 d。2019 年虽然臭氧为首要污染物天数仅增加 9 d,但是整体浓度上升,成为主要超标污染物,超标率从 2018 年的 8.3% 骤增至 18.1%。这也是 2019 年长株潭城市群空气质量较 2018 年不降反增的原因之一。

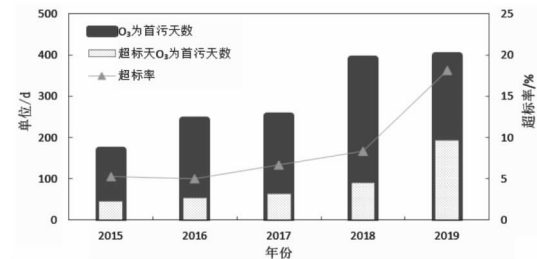


图2 2015–2019 年长株潭城市群臭氧总污染天数、首污天数及超标率年际变化对比

表1 2015–2019 年长株潭城市群臭氧日浓度范围、超标率等统计

城市	年度	日最大 8 h 浓度范围 /($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	超标天数/d	超标率/%
长沙	2015	6~201	27	7.4
	2016	7~221	24	6.6
	2017	8~230	28	7.7
	2018	7~230	37	10.1
	2019	7~253	72	19.7
株洲	2015	3~180	8	2.2
	2016	4~222	15	4.1
	2017	6~229	22	6.0
	2018	5~212	27	7.4
	2019	5~252	62	17.0
湘潭	2015	12~204	23	6.3
	2016	9~220	16	4.4
	2017	11~257	23	6.3
	2018	4~227	27	7.4
	2019	6~259	64	17.5

2.1.2 长株潭城市群臭氧月分布特征

月浓度值指一个月内日最大 8 h 滑动平均浓度的算术平均浓度。从长株潭近 5 a 臭氧逐月分布(图 3)可知 1 月为波谷,株洲最低为 $42.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2-3 月略有上升, 3 月较 4 月陡升 $19.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (湘潭)~ $26.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (长沙),增幅达 37.8%,到 5 月达到全年第一个波峰,进入臭氧第一个污染月,峰值在 $106.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (株洲)~ $111.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (长沙)。6 月略有下降,浓度值与 10 月接近。8-9 月长株潭城市群进入第二个臭氧波峰月,9 月达到全年最高值,最高为长沙市 $140.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。10 月和 11 月臭氧浓度有显著下降,降幅在 26%~38%之间,其中 9 月月均最高在 $131.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ $140.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,且浓度峰值均出现在长沙,其次是湘潭和株洲。4 月、6 月、10 月差别不大,低浓度月份为 1 月、11-12 月,其中 1 月最低。

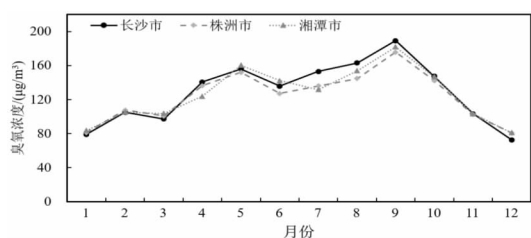


图 3 2015-2019 年长株潭城市群臭氧月变化特征

2.1.3 长株潭城市群臭氧季分布特征

本文季浓度值指一个季度内日最大 8 h 滑动平均浓度的算术平均浓度。长株潭城市群季节分布变化(图 4)表明,2015-2019 年长株潭城市群整体呈冬春低,夏秋高的特点,冬季低值范围在 $46.6 \sim 59.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,夏季高值范围在 $97.6 \sim 129.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。2019 年臭氧浓度夏秋季升高明显,成为近年来最高浓度值,浓度分别为 $129.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $128.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,春、冬季较 2018 年有所降低。与 2015 年相比,2019 年各季节平均浓度分别升高了 31.2%、31.1%、37.6% 和 3.5%。

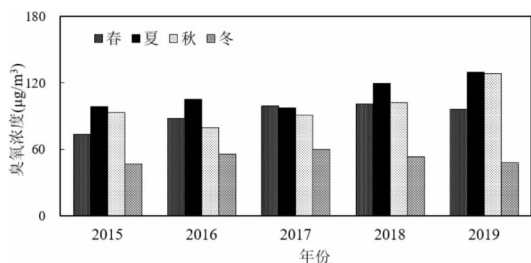


图 4 2015-2019 年长株潭城市群臭氧季节变化特征

综上所述,长株潭城市群臭氧浓度的月分布特点与全国基本相同,夏季气温高,光照强度较大,日照时间长,光化学反应速率较高,臭氧二次生成浓度相对较大。冬季紫外强度与平均温度较低,光化学反应较弱,且在一定条件下高浓度颗粒物导致气溶胶光学厚度增大,削弱臭氧光化学生成率,两者相互作用,故冬季臭氧最低。夏季全国气温较高,受太阳辐射的影响,氮氧化物和挥发性有机物的光化学反应加剧。

2.1.4 长株潭城市群臭氧空间分布特征

由近 5 年臭氧浓度分布(图 5)可知湖南中北部

最高,2016-2019 年中北部较高浓度范围有明显的扩大趋势。2019 年中北部地区大部分点位浓度超过 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$,长沙望城区经开区点位浓度达到 $194 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。造成长株潭城市群中北部高、其他地区低的原因是中北部为经济核心地带,是长株潭的中心区域,企业污染源集中分布在此区域。

2.2 臭氧与其他污染物的关系

从近 5 a 各污染物逐月分析来看(图略), $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 与 O_3 基本呈反位相。1 月 $\text{PM}_{2.5}$ 单项指数全年最高, O_3 单项指数全年最低。直至 5 月, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐月上升, O_3 浓度逐月下降。6 月和 7 月 O_3 浓度与 5 月略有降低,8 月继续上升,9 月 O_3 浓度达全年波峰值,11 月浓度陡降,在 11 月之后至 1 月浓度就维持在波谷区域。总体而言,全年长株潭城市群 O_3 与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度变化趋势呈反位相,但 O_3 浓度的峰值比 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度谷值要延后 2 个月,这与气象和污染物传输有较大关系。夏季没有采暖的需要,本地秸秆燃烧现象也很少,加之有利的大气污染扩散条件, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在夏季最低。9 月份,湖南地区出现最高气温,更有利于 O_3 的二次生成, O_3 浓度出现全年峰值。

从 CO 、 NO_2 及 O_3 月均浓度分布来看,5-9 月 O_3 和 NO_2 变化趋势完全一致,9-10 月出现全年波峰值。2015、2018 和 2019 年在 10 月开始明显下降,2016 和 2017 年则 9 月开始明显下降,2015-2019 年 12 月至 1 月 O_3 下降、 NO_2 上升,二者变化呈反位相。结果分析表明,当作为前体物的 NO_2 在春末、夏季和初秋气温较高、日照时长充足时,在太阳辐射作用下发生光化学反应,使 O_3 也达到全年最高值^[14]。而冬季虽然受到上游传输影响使 NO_2 上升,但由于气温低、日照时数少,光化学反应弱,因此 O_3 浓度很低。 CO 与 O_3 全年大部分时段均呈现反位相变化特点,两条趋势呈 X 交叉状态,6-8 月达到交叉点,到达交叉点之前 CO 先下降、 O_3 逐步上升,交叉点之后 CO 逐步上升、 O_3 维持平衡或逐渐下降,12 月-1 月 CO 达最高值, O_3 达全年最小值,呈显著反位相特点。可见,适量 CO 的存在是可以促进 NO 向 NO_2 的转化,促进 O_3 积累。2015-2019 年 O_3 波峰值处对应 CO 月均值范围在 $0.9 \sim 1.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 之间。

对 2015-2019 年长株潭城市群日均空气质量数据春、夏、秋、冬四季共 32 868 个样本进行分析(表 2),由于样本数量大,采用单因素方差分析方法对 O_3 与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 等污染物分别进行显著性检验, $\alpha=0.01$ 时 O_3 与其他污染物均存在显著差异。计算斯皮尔曼相关系数,可知, O_3 与 $\text{PM}_{2.5}$ 全年呈正相关,夏季相关系数 0.61,为显著正相关,冬季最低 0.15 为微弱相关。湖南四季 O_3 均与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈正相关,可能是因为大气中高浓度的 O_3 促进 $\text{PM}_{2.5}$ 二次生成,使其浓度上升。冬季微弱相关可能是长株潭城市群以重工业、机械制造业为主要产业, O_3 前体物本地排放物冬季浓度较高,且湖南朝东北开口的三面环山地形有利于冬季北方污染物外来输入使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度冬季达到峰值。高 $\text{PM}_{2.5}$ 会降低消光系数,加上湖南冬季日照时数较短,进一步削弱太阳辐射,共同作用使 O_3 浓度出现一定程度下降。

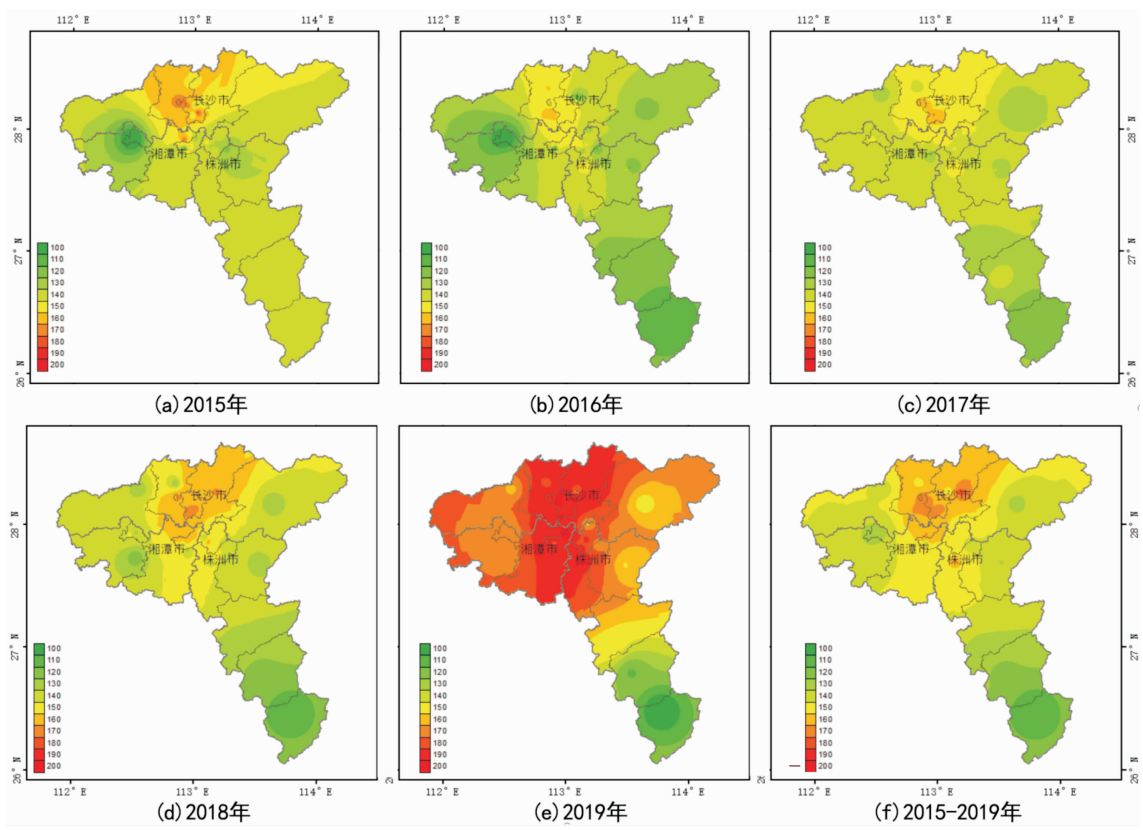


图5 2015 – 2019 年长株潭城市群臭氧浓度逐年空间分布图及5 a 平均图

表 2 臭氧与其他污染物分季节斯皮尔曼相关系数

	春	夏	秋	冬
PM _{2.5}	0.122 0	0.606 0	0.352 3	0.146 0
NO ₂	0.328 5	0.663 5	0.495 2	0.301 0
SO ₂	0.090 2	0.420 1	0.204 1	0.175 2
CO	0.155 7	-0.042 8	0.323 2	0.420 5

O₃ 与 NO₂ 全年也呈正相关，夏季接近显著相关，秋季次之为低度相关，这说明总体而言 NO₂ 作为 O₃ 前体物有利地促进了 O₃ 积聚，使浓度增高^[15]。CO 除了夏季表现为弱相关，其他季节均为负相关，与前述分析结论一致。

2.3 臭氧与气象因子的关系

气象条件在臭氧化学生成、消耗过程中起着非常重要的作用，通过影响大气环流、光化学环境和臭氧前体物扩散等影响大气中臭氧浓度^[16]。臭氧作为光化学反应的二次污染物，其化学生成依赖于太阳辐射中的紫外辐射，浓度与之呈正相关。本文采用 R 语言 openair 程序包的 corplot 相关性研究表明(图6)，最高气温、平均气温和相对湿度与臭氧变化相关性最高，特别是最高温度相关系数达0.71，相对湿度与臭氧为显著负相关，这可能是水汽可削减大气紫外辐射，最高温度高表示紫外辐射强，有利于光化学反应有关^[16]。因此，臭氧高浓度主要出现在太阳辐射强、温度高、相对湿度低的天气。

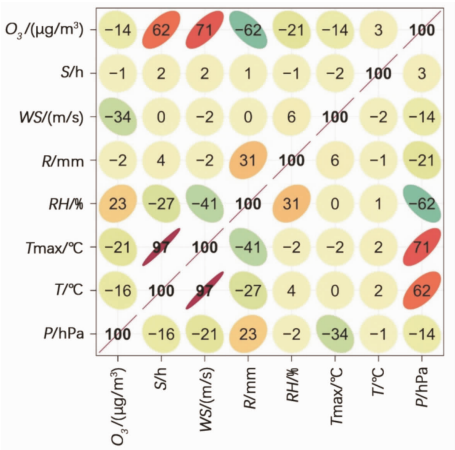


图6 长株潭城市群臭氧与各气象要素的相关性

2.3.1 臭氧与气温

2015 – 2019 年长株潭城市群污染日分析相应时段日平均气温、日最高气温(图7)可知：长株潭城市群达臭氧轻度污染时，最高气温在 30 ~ 35℃ 之间占 46.9%，其次是在 35 ~ 40℃ 之间占 28.8%，在 25 ~ 30℃ 占比为 22.4%，最少的为低于 25℃ 占比为 1.9%。达中度污染时，35 ~ 40℃ 和 30 ~ 35℃ 占比最高，分别为 54.8% 和 35.7%，其次是 25 ~ 30℃ 为 9.5%，最高气温小于 25℃ 达中度污染天数为 0。结果表明，长株潭城市群臭氧污染主要发生在高温天气，且当最高气温达小于 25℃ 几乎不会发生臭氧污染，30℃ 以上可作为出现臭氧污染的判

别指标, 其相关性达 0.71, 与臭氧浓度呈较这个高正相关性。平均气温特征有所不同, 当长株潭城市群出现轻度污染时, 平均气温在 $25 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 占比最高为 42.6%, $20 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 占比为 32.9%, 其次是平均气温在 $30 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 为 18.0%, 最少的为小于 20°C 为 6.5%。达中度污染时, 平均气温依旧是在 $20 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 占比最高为 57.1%, 其次是 $20 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 和 $30 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 分别为 23.8% 和 19.0%, 大于 35°C 和小于 20°C 没有出现中度污染。平均气温往往是判断某地区进入四季的标准, 当平均气温达 $25 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 长株潭城市群出现臭氧污染比例达到 58.9%, 与前述分析春末、夏季为臭氧主要污染季节结论一致。从臭氧日均浓度达 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上时平均气温和最高气温散点分布可看出, 气温与臭氧浓度并不是简单的一一对应增长关系。达中度污染时最高气温和平均气温主要集中在 $25 \sim 35^{\circ}\text{C}$, 轻度污染时高温较高, 平均气温值也反映城市群处于春末和夏季阶段^[17]。

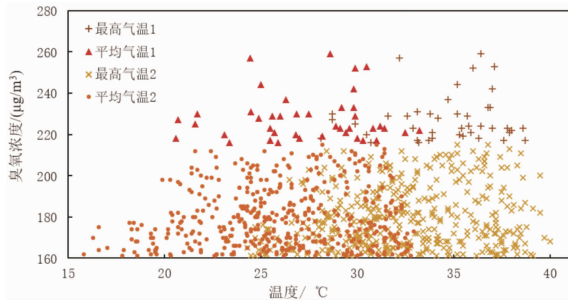


图7 2015–2019 年长株潭城市群污染日最高气温与平均气温点聚图(气温1: 臭氧浓度(161–215); 气温2: 臭氧浓度(216–260))

2.3.2 臭氧与相对湿度

分析得相对湿度和臭氧日均浓度相关性为 -0.62 , 为负相关。当达臭氧轻度污染时(图8), 相对湿度主要分布在 $61\% \sim 70\%$ 和 $71\% \sim 80\%$, 分别占比 36.9% 和 32.3%, 其次是低湿度的 60% 以下占比 21.4%, 其他区间出现较少; 而达中度污染时, 相对湿度小于 60% 占比最大为 55.3%, 其次是 $61 \sim 70\%$ 占比为 39.5%。总体而言, 低湿环境有利于高浓度臭氧污染发生, $61 \sim 70\%$ 有利臭氧轻度污染发生, 超过 80% 臭氧污染发生可能性较小, 对中度污染而言则是超过 70% 臭氧污染发生可能性小。

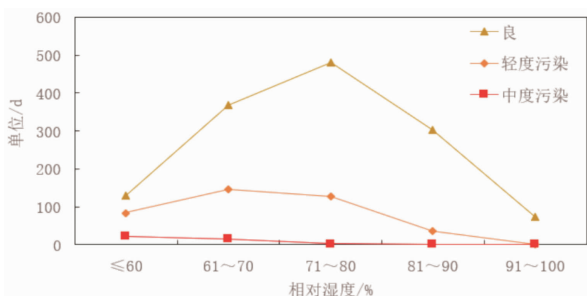


图8 2015–2019 年长株潭城市群日均相对湿度与臭氧浓度对应区间分布图

2.3.3 臭氧与日降雨量

长株潭城市群日降雨量与臭氧日均浓度表现

出现微弱负相关, 相关性为 0.21。有效降雨量使太阳辐射减弱, 降低光化学反应, 对臭氧污染能起到清除作用, 另外近地面层增加的水汽也会将臭氧分解为氧分子, 使臭氧浓度降低。考虑到空气质量数据时段是 00 时至次日 00 时, 日降雨量选取的是 08 时至次日 08 时段。从臭氧日均浓度与降雨量点聚分析(图9), 不论对应臭氧超标程度如何, 对应的日降雨量主要集中在 $0 \sim 5 \text{ mm}$ 范围内。其中, 达臭氧轻度污染时, $R \leq 0.1 \text{ mm}$ 出现 388 d, 占比为 90%, $0.1 < R \leq 3 \text{ mm}$ 出现 20 d, 占比为 4%, 其它累计雨量总占比不到 5%。达臭氧中度污染时, 降雨量均 $\leq 0.1 \text{ mm}$ 。可知 0.1 mm 降雨量或无雨日对长株潭城市群出现臭氧污染是有利的。通常认为降水天气太阳辐射较弱, 不利于臭氧光化学反应, 降水过程对臭氧及其前体物浓度有湿清除作用, 但长株潭城市群分析结果表明大于 3 mm 的降水才能对该区域臭氧污染起到一定湿清除作用。

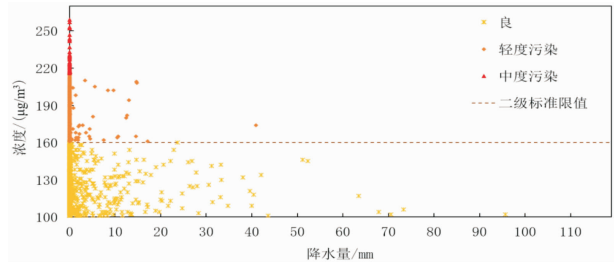


图9 2015–2019 年长株潭城市群日降雨量与臭氧日均浓度散点图

2.3.4 臭氧与海平面气压

日均海平面气压是可以较好地反映城市群环流背景的量化指标, 根据 2015–2019 年臭氧日均浓度达 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上样本分析(图10), 臭氧浓度在 $101 \sim 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $161 \sim 215 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $216 \sim 265 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的阶段相对应的海平面气压趋势均表现一致, 在 $1005.0 \sim 1010.0 \text{ hPa}$ 时出现概率最多, 其次是 $1010.0 \sim 1015.0 \text{ hPa}$ 和 $1000.0 \sim 1005.0 \text{ hPa}$, 气压更高或更低的样本数均较少, 这说明 $1000.0 \sim 1015.0 \text{ hPa}$ 是造成臭氧污染的日均海平面气压量化指标。

分析表明, 长株潭城市群气压变化区间主要在 5–9 月, 10 月之后日均气压往往达 1020.0 hPa 以上, 可见臭氧污染往往发生在春夏地面低压或均压环流形势下, 无明显冷空气影响。

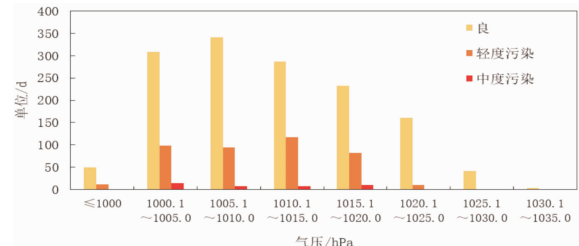


图10 2015–2019 年长株潭城市群日均海平面气压与臭氧浓度对应区间分布图

2.3.5 臭氧与平均风速

风速的大小是反映静稳条件的一个指标, 静稳天气下气体污染物的水平和垂直扩散都会减弱, 使其在近地层容易集聚导致浓度的上升。从长株

潭风速与臭氧浓度分析(图 11)得知, 臭氧达 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, 不论达到轻度或以上等级污染, 风速均以 $1.6 \sim 3.3 \text{ m/s}$ (2 级) 为主导风力, 其次为 $0.0 \sim 1.5 \text{ m/s}$ (1 级) 频数较多, 再者是 $3.4 \sim 5.4 \text{ m/s}$ (3 级)。对于臭氧轻度污染, 风力主要集中在 $1 \sim 2$ 级, 3 级或以上频数较少, 而中度污染除主要以 $1 \sim 2$ 级风为主外, 风力达 3 级以上几乎没有发生。因此, 长株潭城市群的臭氧中度污染天气主要考虑在风力 2 级或以下。

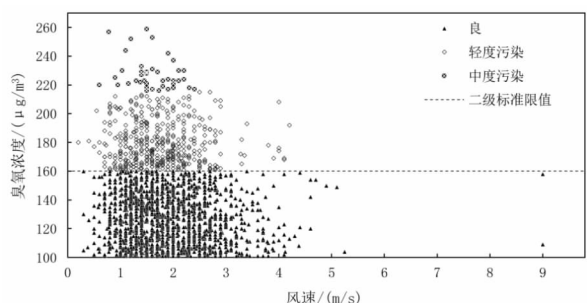


图 11 2015–2019 年长株潭城市群日平均风速与臭氧日均浓度点聚图

3 结论

(1) 长株潭城市群 2015–2019 年臭氧浓度分布总体来说表现为北高南低且大值区位于中北部, 年均臭氧浓度呈现逐年上升的趋势。

(2) 从长株潭城市群月、季臭氧分布来看, 长沙污染日指标最高, 这可能与长沙作为省会城市其汽车保有量高于其它两地区, 汽车排放的氮氧化物浓度更高, 从而导致臭氧浓度更高。

(3) 从长株潭各气象要素与臭氧浓度相关性研究表明, 最高气温、平均气温和相对湿度与臭氧变化相关性最高, 相对湿度与臭氧为显著负相关, 这可能是水汽可削减大气紫外辐射, 最高温度高表示紫外辐射强, 有利于光化学反应有关。

(4) 长株潭城市群其他五项污染物对臭氧也具有一定影响, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 与 O_3 基本呈反位相相关。

参考文献:

- [1] 周明卫, 康平, 汪可可, 等. 2016–2018 年中国城市臭氧浓度时空聚集变化规律[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 1963–1974.
- [2] 徐杰. 中国主要城市群环境空气中臭氧浓度的变化规律分析[J]. 上海节能, 2020, 6(6): 549–553.
- [3] 严晓瑜, 侯晓辉, 杨婧, 等. 中国典型城市臭氧变化特征及其与气象条件的关系[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 416–430.
- [4] 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.
- [5] 张亮, 朱彬, 高晋徽, 等. 长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 3981–3988.
- [6] 刘楚微, 连鑫博, 黄建平. 我国臭氧污染时空分布及其成因研究进展[J]. 干旱气象, 2020, 38(3): 355–361.
- [7] CARTER CA, CMIXM, DING A J, et al. Stage-specific, nonlinear surface ozone damage to rice production in China[J]. Scientific Reports, 2017, 3(7): 1–6.
- [8] KALABOKAS P, HJORTH J, FORET G, et al. An investigation on the origin of regional springtime ozone episodes in the western Mediterranean[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(6): 3905–3928.
- [9] 吴锴, 康平, 王占山, 等. 成都市臭氧污染特征及气象成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4241–4252.
- [10] 梁卓然, 顾婷婷, 杨续超, 等. 基于环流分型法的地面臭氧预测模型[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4469–4479.
- [11] 梁碧玲, 张丽, 赖鑫, 等. 深圳市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 66–71.
- [12] GB 3095–2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [13] HJ 633–2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [14] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 813–820.
- [15] 刘宁微, 马建中. 东亚区域对流层臭氧及其前体物的季节性关联[J]. 应用气象学报, 2017, 28(4): 427–435.
- [15] 林燕粉, 王茜, 付晴艳, 等. 上海市臭氧污染时空分布及影响因素[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 60–67.
- [16] 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.
- [17] 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.

Distribution Characteristics of Ozone in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration of Hunan Province

YANG Yunyun^{1,2}, HU Yan^{1,2}, XIAO Tongjue³, LI Wei^{1,2} and LIU Huanquan⁴

- (1. Key Laboratory of Weather Disaster Prevention and Mitigation in Hunan Province, Changsha 410118, China;
2. Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118, China;
3. Human ecological and environmental monitoring center, Changsha 410019, China;
4. Meteorologic Technology Equip Center of Hunan, Changsha 410118, China)

Abstract: Based on the daily ozone concentration data of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan Urban Agglomerations from 2015 to 2019 and meteorological data of the same period, the variation characteristics of ozone concentration in typical urban agglomerations and the relationship between ozone concentration and meteorological conditions

are studied. The results show that; from 2015 to 2019, the ozone concentration of Changsha Zhuzhou Xiangtan Urban Agglomeration shows an upward trend, with the average annual concentration increase and ozone exceeding rate increasing from high to low in order of Changsha > Xiangtan > Zhuzhou >. The changing characteristics show the structure of Twin Peaks, with the sub-peaks and peaks occurring in May and September, and the ozone high-value zone rising month by month between May and September; the highest ozone concentration is in summer. Average temperature and relative humidity have the highest correlation with ozone change, while precipitation and surface wind speed are weakly correlated.

Key words: Chang ZhuTan urban agglomeration; ozone pollution; meteorological factors; correlation analysis

(上接第 88 页)

- [18] 朱红霞, 陈文, 冯涛, 等. 冬季西伯利亚高压的主要年际变化模态及其对东亚气温的影响[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 685–692.
- [19] 武炳义. 2012 年 1 月、2016 年 1 月东亚两次极端严寒事件及其与北极增暖的可能联系[J]. 大气科学导报, 2019, 42(1): 14–27.
- [20] 王晓娟, 沈柏竹, 龚志强, 等. 中国冬季区域性极端低温事件分类及其与气候指数极端性的联系[J]. 物理学报, 2013, 62(22): 1–11.
- [21] 宋丽华, 李永生, 张健. 2009 年冬季至 2010 年春季黑龙江省气温持续偏低成因[J]. 气象与环境学报, 2011, 29(2): 14–18.
- [22] 李永生, 巩远发, 王莹. 黑龙江冬季极端低温气候特征与环流异常[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(S1): 123–128.
- [23] 班晋, 李永生, 赵佳莹, 等. 2017–2018 年冬季黑龙江省气温异常成因分析[J]. 黑龙江气象, 2019, 36(1): 14–18.
- [24] 侯亚红, 杨修群, 李刚. 冬季西伯利亚高压变化特征及其与中国气温的关系[J]. 气象科技, 2007, 35(5): 646–649.

Determination of Winter Abnormal Warm Climate Events in Heilongjiang Province and its Relationship with Circulation Index

ZHAO Jiaying¹, CHEN Li¹, BAN Jin¹, LIU Yanhua², LIU Ze'en³ and LI Yabin

(1. Heilongjiang Climate Center, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Meteorological Service Center, Harbin 150030, China; 3. Heilongjiang Harbin Meteorological Bureau, Harbin 150028, China)

Abstract: Based on the winter daily average temperature data of 61 stations in Heilongjiang Province from 1961 to 2018, the winter abnormal warm climate events in Heilongjiang Province are judged by taking the positive anomaly of daily average temperature over 1 standard deviation for 5 consecutive days as the standard, and are divided into first, second and third abnormal warm climate events according to 0.3 standard deviation. The analysis shows that there are 35 abnormal warm climate events in winter in Heilongjiang Province in 58 years, with a total of 270 days. The occurrence of abnormal warm climate events has obvious periodic changes, with low occurrence period in 1961–1986 and 2009–2018 and high occurrence period in 1987–2008. 71.4% of the abnormal warm climate events occurred after 1986, indicating that the frequent occurrence of abnormal warm climate events contributed directly to the significant increase of winter temperature in the province in the middle and late 1980s. From 1961 to 2018, level I, II and III abnormal warm climate events occurred in the province in winter for 9, 10 and 16 times respectively. By studying the relationship between the monthly scale anomaly of the circulation index and the abnormal warm climate events in Heilongjiang Province, it is found that the abnormal area of polar vortex in the northern hemisphere is smaller, the intensity of polar vortex is stronger, the intensity of East Asian trough is weaker, and the positive phase of Arctic Oscillation anomaly is in good correspondence with the occurrence of abnormal warm climate events. It provides reliable predictions for future abnormal warm climate events in winter in Heilongjiang Province.

Key words: Heilongjiang Province; winter; abnormal warm; climate events