

文章编号: 2096-1618(2021)01-0101-09

川南城市群空气污染特征及气象影响因素分析

雷雨¹, 张小玲¹, 杨凯晴¹, 青泉², 康平¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 四川省气象台/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

摘要:随着川南地区经济规模不断扩大,能源消耗量和机动车拥有量的不断增加,对空气质量的改善带来了较大困难。以四川盆地川南城市群为研究区域,利用环境空气质量监测资料和地面气象观测资料,分析了2015–2018年川南城市群6种污染物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 CO)的年、月、日变化特征以及其与气象要素的相关性,并对主要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 在不同污染等级下的气象要素区间进行讨论。得出以下结论:2015–2018年来川南城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度冬季>春季>秋季>夏季,日变化为“双峰双谷”型; O_3 月变化为“倒U”型,日变化为“单峰”型; SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度冬季高于夏季, SO_2 和 NO_2 日变化为“双峰双谷”型, CO 为“单峰”型。颗粒物污染日数呈下降趋势,其中泸州和内江 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均降低36.7%, PM_{10} 浓度分别降低32%和29.8%,而臭氧浓度和臭氧超标日数均具有升高趋势,其中自贡 O_3 -8 h浓度第90百分数上升幅度最大,可达28.7%。综合气象因子分析显示:静小风、高温、低温、无降水等气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散和清除十分不利,容易导致川南地区形成重污染天气过程;而静小风、高温、低湿有利于 O_3 的生成和累积。

关键词:空气污染;特征分析;气象因子;相关性

中图分类号:X513

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.01.016

0 引言

由于能源消耗、工业污染排放和机动车保有量不断增加,城市的空气污染形势愈发严峻^[1-2],冬季以可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为主的区域性空气污染问题和夏季近地面高浓度臭氧(O_3)造成的光化学污染问题日益加剧^[3-5]。过去几十年中,中国典型代表城市的AQI整体由北向南减小且冬季北方污染比南方严重^[6],这是由于华北地区工厂密集,排放出大量 $\text{PM}_{2.5}$ 的前体物^[7-8],导致该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显增高。严重雾霾的形成不仅与人为排放有关,还与大气之间的相互作用密不可分^[9-11],风、温度、湿度、降水、大气稳定性和混合层厚度等气象因子对大气污染物的输送、扩散和转变有重要作用^[12]。近几年,近地面 O_3 浓度在中国呈现出明显的上升趋势^[13],尤其是在经济发达、人口密集的京津冀、长三角和珠三角地区^[14-15], O_3 逐渐成为仅次于颗粒物的第二大空气污染物,周学思等^[16]发现,夏季 O_3 浓度最高且超标天数最多,高温、低湿条件有利于 O_3 的形成,局地地区的大气污染主要与本地污染源排放和污染物跨区域输送有关,徐敬等^[17]对北京夏季典型局地环流影响下的天气

个例模拟结果显示:城市的下风向地区 O_3 浓度高于上风向地区,具有明显的输送作用,Liao等^[18]对成都市冬季雾霾重污染时段进行了后向聚类轨迹及潜在源区的研究,发现 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要潜在源区位于四川盆地的东南部及西部边缘,而川南城市群位于高潜在源区内。

四川盆地位于中国西南部,由于其深山深盆的地形和稳定的大气层结,以及逆温层的存在^[19],使得污染物持续累积,是中国五大区域空气重污染城市群之一^[20]。与东部地区相比,有关四川盆地的重污染过程和气象因素的研究相对较少,并局限于成都和重庆等单一城市。川南城市群(包括乐山市、内江市、泸州市、宜宾市、自贡市5个经济区)是成渝经济区的核心区域之一,经济总量和汽车保有量约占四川省的1/5(经国家统计局审定,2017年四川省实现地区生产总值36980.2亿元,其中,川南城市群约为7595亿元;根据各市环境统计数据,2017年四川全省汽车保有量约为992万辆,其中川南城市群约达160万辆),是仅次于成都城市群的全省第二大城市群,经济基础好,城市发展快。

因此,以川南城市群作为研究区域,利用环境监测数据和常规气象观测资料,对2015–2018年川南城市群污染物的时间、空间分布特征展开分析,结合地形、风场、温度、相对湿度、气压、降水等气象条件深入分析川南城市群大气污染物特征及其与各气象因子的相关

收稿日期:2020-02-15

基金项目:国家自然科学基金重大资助项目(91644226);国家重点研发计划资助项目(2018YFC0214002,2018YFC0214001);四川省科技计划资助项目(2018JY0011,2018SZDZX0023)

性,归纳总结不同污染等级下的气象要素区间,以期为川南地区重污染天气预警与环保部门本地防控提供科学的依据和参考。

1 数据与地理概况

污染资料为全国空气质量环境监测平台实时发布的6种污染物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO)浓度逐小时资料;气象资料为MICAPS常规观测资料(温度、相对湿度、降水、风速、风向);时间范围为2015年1月1日至2018年12月31日,地理范围为川南城市群(乐山、自贡、宜宾、内江、泸州)。

为保证研究结果的准确性,根据《环境空气质量标准(GB 3095-2012)》^[21]针对数据有效性的要求对原始数据进行质量控制,同时将由于不可抗(停电、仪器校准)因素出现的缺测情况剔除(剔除数据占总数据的5.4%),从而得到较为可靠的数据。季节划分采用气象意义上的定义:3-5月为春季、6-8月为夏季、9-11月为秋季、12-次年2月为冬季。按照《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)(HJ 633-2012)》^[22]将污染物浓度划分为6个级别(优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染)。

2 2015-2018年川南城市群污染物浓度基本特征分析

2.1 污染物浓度的分布特征

通过统计2015-2018年川南5个城市 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、CO污染物和 O_3 日最大8h滑动平均的第90百分位数(以下简称为 O_3 -8h)的年均浓度值(图1),可知在2015-2018年 PM_{10} 的年均浓度最大值分布于自贡,最大可达 $107\mu\text{g}/\text{m}^3$,最小浓度在宜宾为 $51\mu\text{g}/\text{m}^3$,仅2018年宜宾、泸州、内江 PM_{10} 浓度年均值达到国家《环境空气质量标准》对环境空气的质量要求(以下简称“达标”)。与 PM_{10} 类似,2015-2018年 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度年平均的最大值均分布在自贡,最大为 $73\mu\text{g}/\text{m}^3$,最小浓度可达到 $38\mu\text{g}/\text{m}^3$,2015-2018年内5个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值均未达标。但从时间序列来看,2015-2018年川南各城市的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度均呈现出明显的下降趋势,峰值也逐年降低,说明在大气污染防治过程中,颗粒物污染状况得到显著改善。2015-2018年川南5个城市中 SO_2 浓度年均值的最大值为 $24\mu\text{g}/\text{m}^3$,最小值为 $7\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 浓度年均值均达标。2015-2018年 O_3 -8h的第90百分数的最大值为 $182\mu\text{g}/\text{m}^3$,最小值为 $127\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2015-2018年5个城市的 NO_2 和CO浓度年均值变化比较平稳,波动不明显。

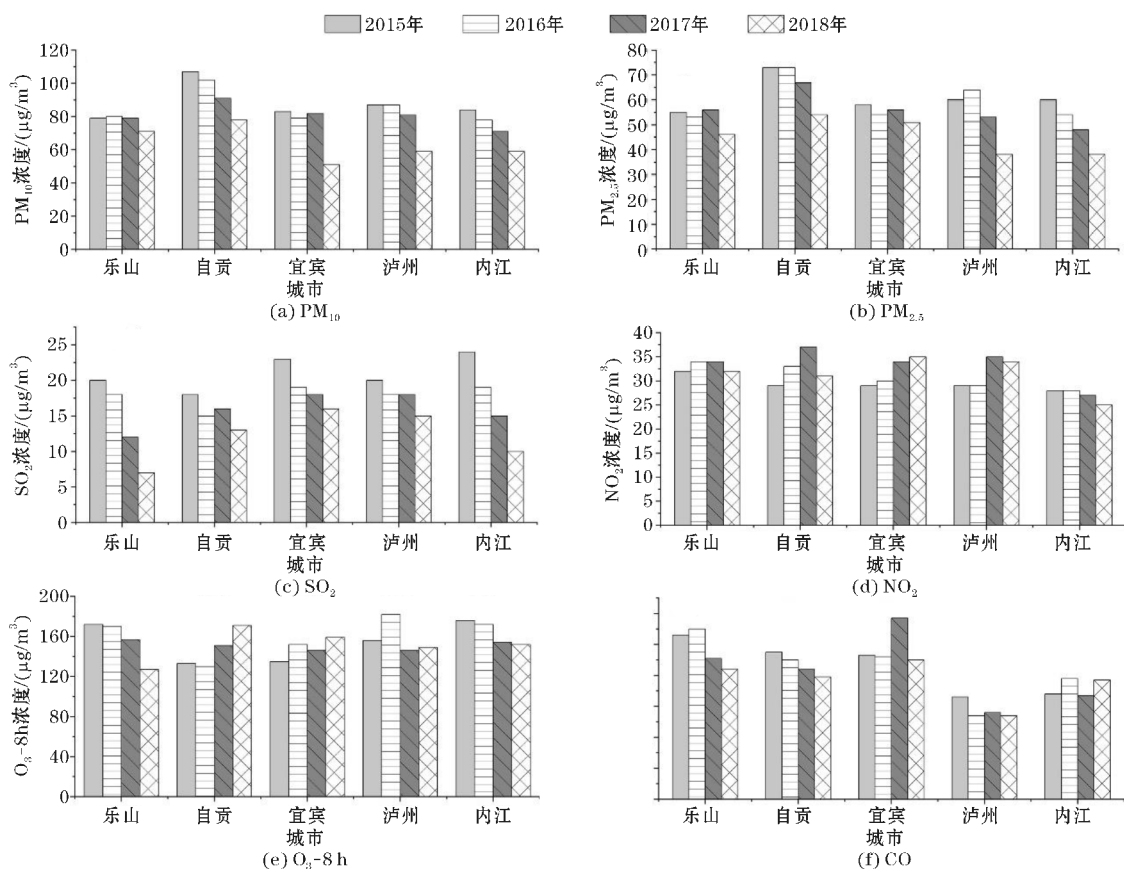


图1 2015-2018年川南5个城市的6种污染物浓度特征

统计发现,2018年与2015年相比,颗粒物的污染状况得到了显著的改善,但自贡、宜宾的 O_3 污染物以及 NO_2 浓度整体呈现上升趋势,其中泸州和内江市 $PM_{2.5}$ 浓度均降低了36.7%, PM_{10} 浓度分别降低了32%和29.8%,颗粒物防治工作效果显著;而自贡 O_3 -8 h浓度第90百分数上升幅度最大,可达28.7%,宜宾市 O_3 -8 h浓度第90百分位数上升了18%, NO_2 上升了20.7%。

随着大气污染防治行动计划的纵向推进,川南5个城市空气质量整体得到显著改善。图2是按照不同污染物等级统计的5个城市每年污染物超标日数之和,川南地区5个城市2015–2018年 PM_{10} 污染天数分别为202、205,其中2017年1月28日(春节)乐山 PM_{10} 达到严重污染,最大浓度为 $471\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 污染天数分别为460、510、413、261天,其中2015年1月26–27日泸州连续两日达到严重污染,最大浓度为 $253\mu g/m^3$,2016年2月8日(春节)乐山、泸州、自贡、内江的 $PM_{2.5}$ 达到严重污染等级,自贡最为严重,浓度达到 $316\mu g/m^3$,2017年1月28日(春节)乐山、自贡、宜宾 $PM_{2.5}$ 浓度均达到严重污染等级,乐山最为严重,浓度可达 $365\mu g/m^3$; O_3 污染天数分别为44、80、123、146天,2017年7月14日内江市 O_3 -8 h浓度达到重度污染的级别,最大浓度为 $282\mu g/m^3$,2018年5月14日宜宾市 O_3 -8 h浓度达到重度污染的级别,浓度达到 $269\mu g/m^3$ 。总体趋势是 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 为污染物统计的污染天数均呈现出明显的降低趋势,但是以 O_3 为污染物统计的污染天数却逐年增加。

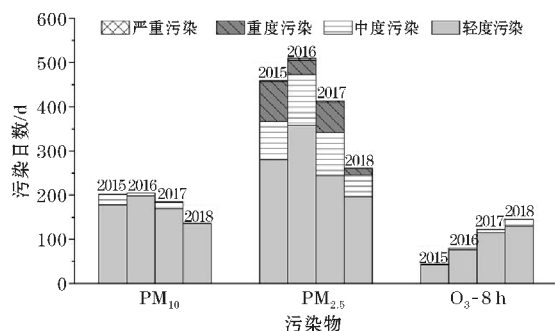


图2 2015–2018年川南地区5个城市污染天数统计

2.2 污染物浓度的时间特征

2.2.1 逐日变化特征

对川南城市2015–2018年AQI指数、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 -8 h浓度逐日变化分析可得, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与AQI指数逐日变化趋势保持高度一致,说明颗粒物是影响川南地区空气质量的主要污染物。从污染严重程度来看, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 冬季最重,为明显的峰值区,其次为春季,夏季和秋季颗粒物浓度明显小于其他季节, O_3 浓度夏季高冬季低,与颗粒物的季节变化特征相反。从线性趋势分析,2015–2018年川南城市群AQI指数和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 呈现出降低趋势,说明近几年的大气污染防治工作对降低颗粒物的浓度取得了一定的效益。2016年2月8日(春节)和2017年1月28日(春节)的AQI和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 均出现了异常增大,是由于除夕夜在短时间内集中燃放烟花爆竹^[23]和不利于污染物扩散稀释清除的气象条件共同影响所致。其中,对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 影响最为显著,其次是 SO_2 、 NO_2 和CO受烟花爆竹燃放影响程度相对小。从污染物小时浓度

数据来看,除夕夜烟花爆竹集中燃放阶段,正月初一 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 小时浓度最高可达 $586\mu g/m^3$ 和 $690\mu g/m^3$,最大小时增量分别为 $247\mu g/m^3$ 和 $350\mu g/m^3$ 。2015–2018年除夕夜与初一期间,川南地区由于风速小(平均风速 0.64 m/s)、气温低(平均温度 $12.49\text{ }^\circ\text{C}$)、相对湿度较高(平均相对湿度 72.05%)和降水稀少(累计降水 0.02 mm)等不利的气象条件使污染物不断累积,污染物浓度达到峰值。

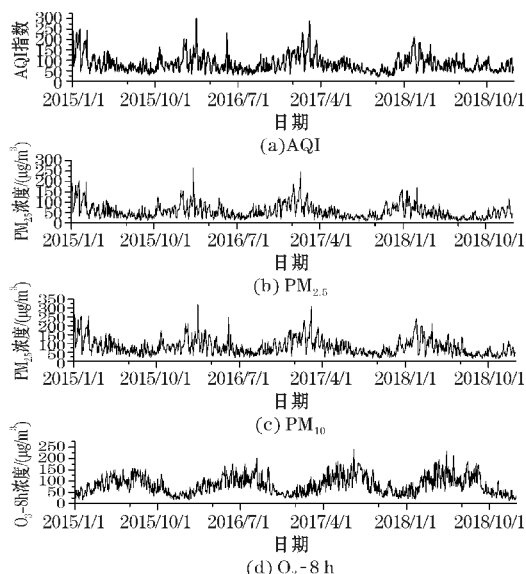


图3 2015–2018年川南城市群AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 -8 h逐日变化

2.2.2 逐月变化特征

通过对2015–2018年川南城市群6种污染浓度月平均值的统计(图4), PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的逐月变化呈现出“冬高夏低”的特点,冬季污染最严重,春秋季节次之,最低值分布在7月,最高值分布在1月,其中自贡污染最严重。 NO_2 和 SO_2 的浓度分布也有冬季高于夏季的表现,呈现“U”型。 NO_2 浓度分布与颗粒物一致,最低值分布在7月,最高值分布在1月。 SO_2 浓度的逐月变化在5个城市表现不一致,自贡、宜宾、泸州、内江的 SO_2 浓度最高值分布在1月,而乐山分布在3月,乐山、宜宾最低值在8月,而泸州最低值在6月,自贡在4月,内江在9月。 CO 和 O_3 浓度也有较明显的季节变化特征,但 CO 浓度类似于颗粒浓度的变化,呈现冬季高夏季低且全年较稳定, O_3 浓度呈现明显的,夏季高冬季低这与夏季辐射强、温度高有关。

2.2.3 日变化特征

如图5所示, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度的日变化相似,呈现“双峰双谷”型,峰值分别在11:00和22:00,谷值分别在6:00和16:00,川南城市中自贡颗粒物浓度最高,内江相对较低,但内江颗粒物的峰值和谷值出现时间相对较早。 NO_2 和 CO 浓度的日变化相似,也呈现“双峰双谷”型,峰值分别在9:00和22:00,谷值分别在6:00和16:00,5个城市 NO_2 浓度相差不大,但 CO 日变化浓度相差较明显,宜宾>乐山>自贡>内江>泸州。 SO_2 浓度的日变化则呈现“单峰”型,最高值出现在11:00,其余时段变化较小,乐山的峰值出现滞后性,在12:00左右。 O_3 浓度的日变化为“单峰”型,谷值和峰值分别出现在8:00和16:00左右,内江 O_3 浓度最大。

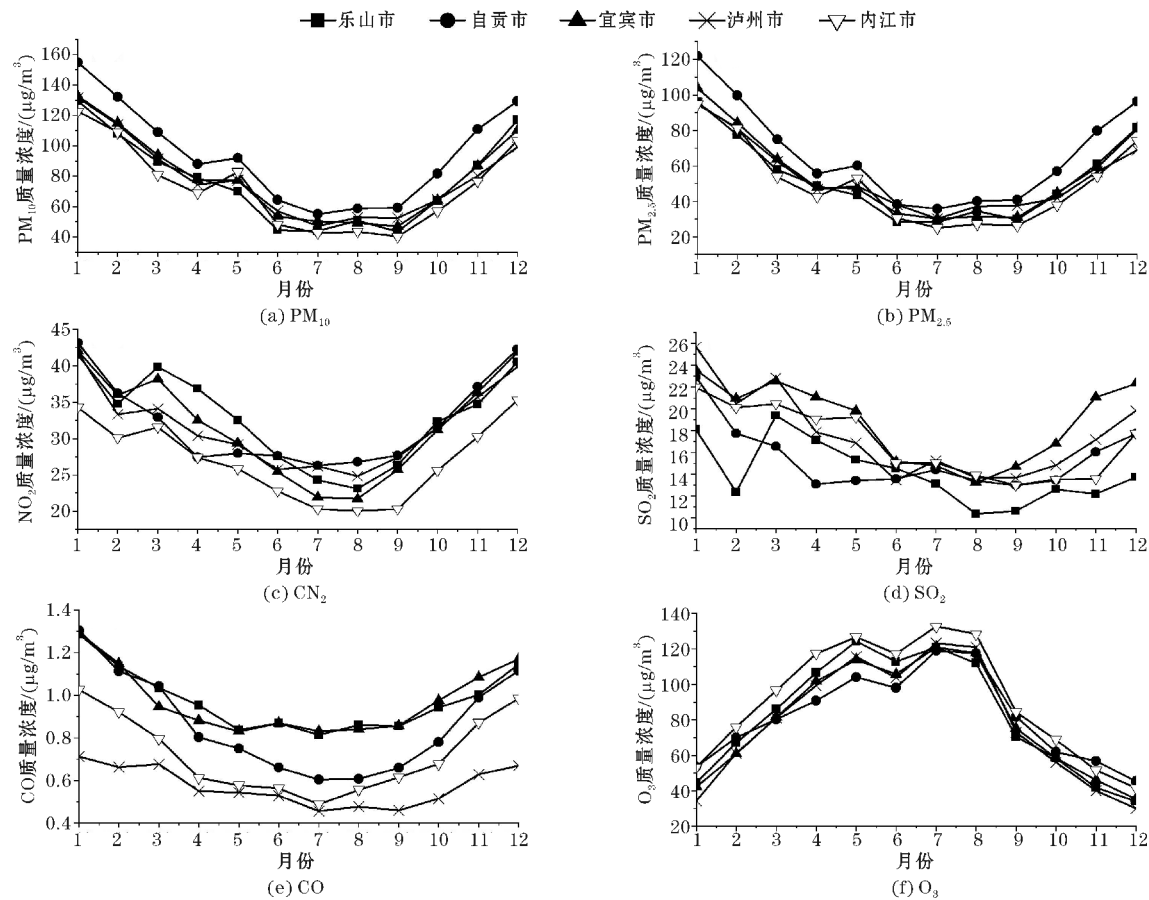


图4 2015-2018年川南城市群6种污染物月平均变化

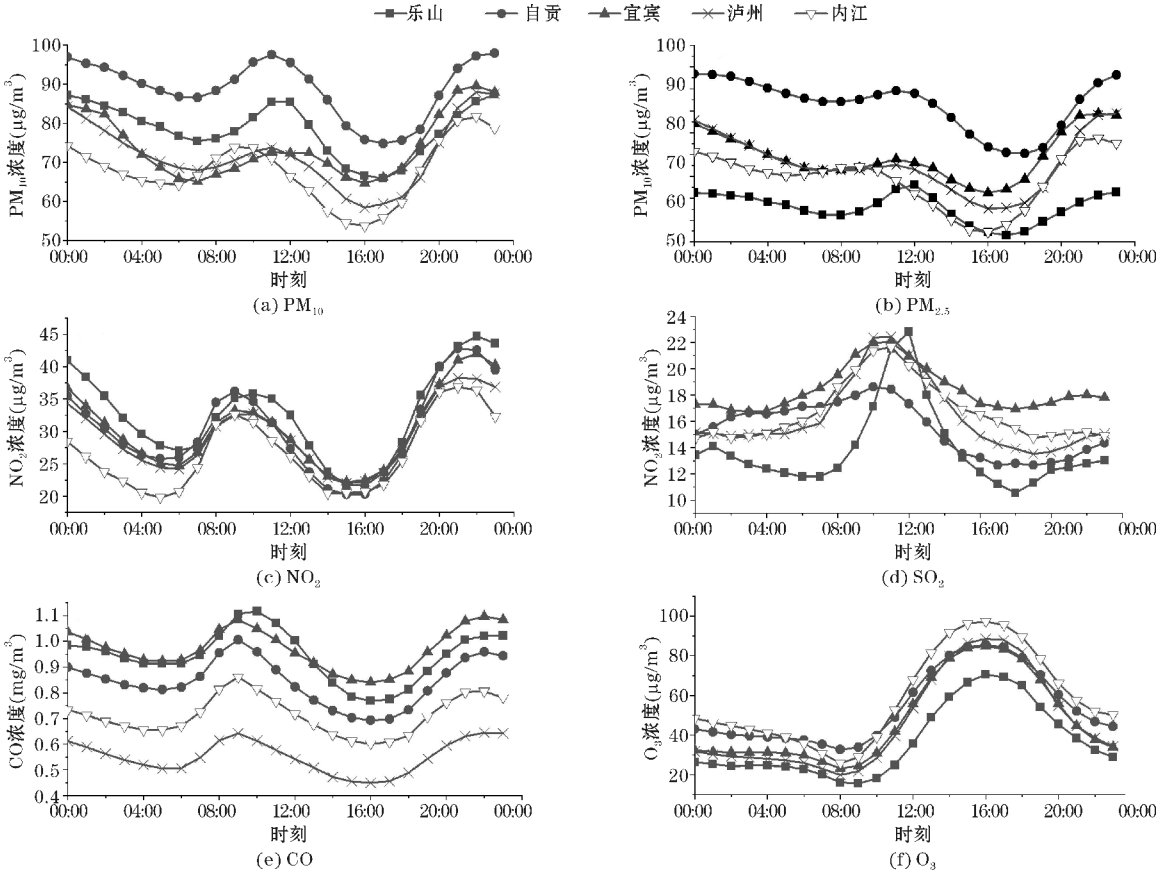


图5 2015-2018年川南城市群6种污染物浓度日变化

3 影响川南城市群空气污染的气象要素及其分布特征

研究表明,大气污染物浓度主要取决于本地排放和区域输送,浓度的大小不仅与污染源排放相关,还受到气象条件的制约,在一定的区域内,污染物的排放量可以通过人为干预得到控制,此时空气质量主要受到气象条件的支配和影响^[24]。静小风、高湿、低温、无降水、稳定层结等气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散和清除十分不利,容易导致川南地区形成重污染天气过程;而静小风、高温、低湿容易导致 O_3 的生成和累积。文中对 2015–2018 年川南地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 与气象要素进行相关性分析,统计分析造成 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度不同等级分布的气象条件区间,总结归纳影响川南城市群空气污染特征的气象因素特征。

3.1 气象要素对川南城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度的相关性分析

水平风影响着大气中污染物的输送,风向决定污染物的扩散方向,风速决定污染物的扩散强度,风速越大越利于大气污染物的扩散和输送。

对川南 5 个城市 2015–2018 年的逐日污染物数据和气象数据进行相关性分析,如图 6~9 所示。由图 6(a) 可知, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速呈负相关,风速大 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低,风速小 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高。但由于川南地区冬季风速基本维持在 $0 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 内,不利于污染物的输送和扩散,易导致颗粒物的堆积, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大可达 $265 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 O_3 浓度与风速的相关性较小,整体呈正相关的关系(图 6b),但风速对 O_3 浓度的影响比较复杂。有研究表明^[25],当风速较小时,由于臭氧不稳定,会被光化学反应分解为氧原子和氧分子;在风速较大时,臭氧还未能完全分解就能被监测到风速大有利于降低 NO_x 、 VOCs 等前体物浓度,降低光化学反应中前体物对臭氧的消耗。也有研究指出^[26],在一定风速情况下, O_3 及其前体物会输送至下游,造成下游地区的臭氧浓度增加。

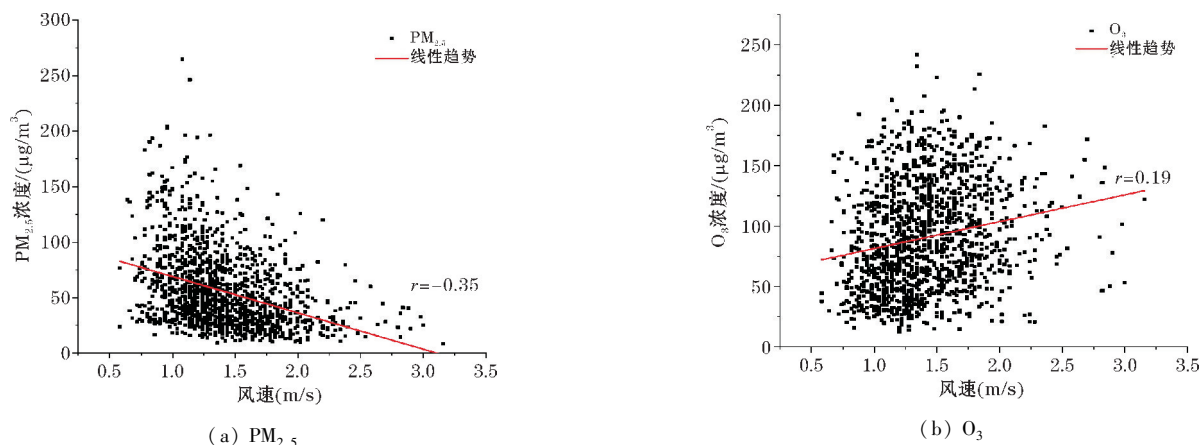


图 6 2015–2018 年川南城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 散点图

大气中的气溶胶颗粒由于相对湿度的增加而发生凝结增长,使颗粒物尺度、成分和光学特性发生变化,对大气的消光作用增强,在高湿和低温条件下形成雾霾,导致当地能见度下降并加剧大气污染^[27–28]。图 7 为川南城市 2015–2018 年相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 (剔除降水日) 的散点图由图 7(a) 可知,相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈正相关,重度及以上污染($>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 主要发生在相对湿度为 70%~90%,随着相对湿度的增大更易诱发高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染事件,说明相对湿度对颗粒物的吸湿特性较明显^[29]。 O_3 浓度与相对湿度呈明显的负相关(图 7b),轻度及以上污染($>160 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 主要集中在相对湿度为 55%~70% 的区间,当相对湿度达到 90%~100% 时, O_3 浓度维持在极低水平。研究表明,当相对湿度超过 90% 时, O_3 分解速率明显加快^[30],白天由于太阳辐射较强,促进光化学反应生成

O_3 ,而夜间没有太阳辐射,相对湿度大, O_3 的浓度主要取决于 O_3 的分解速率^[31]。

一般情况下,降水能对气溶胶颗粒启动有效的清除机制,继而改善空气质量,降水的强度直接决定对空气的净化作用^[32]。如图 8(a) 所示, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与降水呈现明显的负相关,且降水强度降水量越大对污染物的清除效果越明显。夏季降水强,污染物浓度低,冬季降水弱,污染物浓度高,这与颗粒物的季节分布特征一致。臭氧 O_3 浓度在降水日和非降水日的差异很大(图 8b),尤其是在白天,非降水日的 O_3 浓度明显大于降水日,这是由于近地面 O_3 主要通过光化学反应生成,白天太阳辐射大,而降水日多为阴天,辐射量降低。另外,由于雨水的冲刷作用,使 NO_x 、 VOCs 等前体物浓度降低,导致降水日的 O_3 浓度低于非降水日。

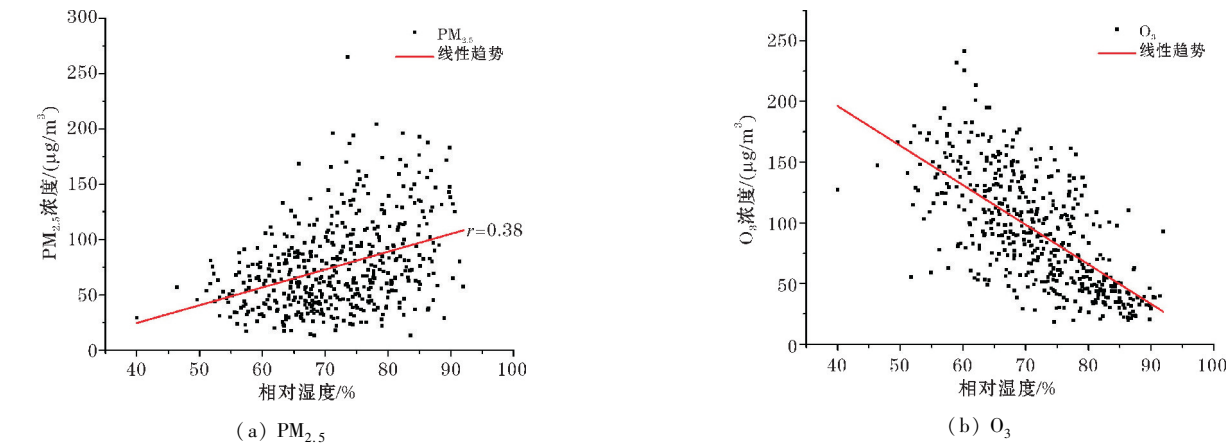


图7 2015–2018年川南城市群PM_{2.5}、O₃与相对湿度(剔除降水日)的散点图

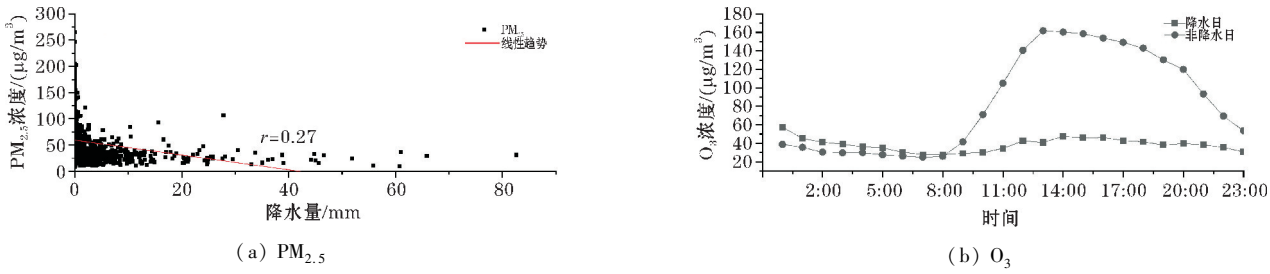


图8 2015–2018年川南城市群降水量与PM_{2.5}、O₃与日降水量的关系

PM_{2.5}与温度呈负相关(图9a),说明低温不利于颗粒物的传输和扩散,同时温度低时边界层高度较低,不利于污染物的垂直扩散。O₃浓度与温度呈明显的正相关(图9b),相关系数达0.73。高温有利于促进光

化学反应生成臭氧,如图9(b)所示,O₃浓度与温度呈正相关,温度对O₃浓度的贡献较大是由于太阳辐射强、温度高时,加快光化学反应生成臭氧的速率,使得O₃浓度持续增高。

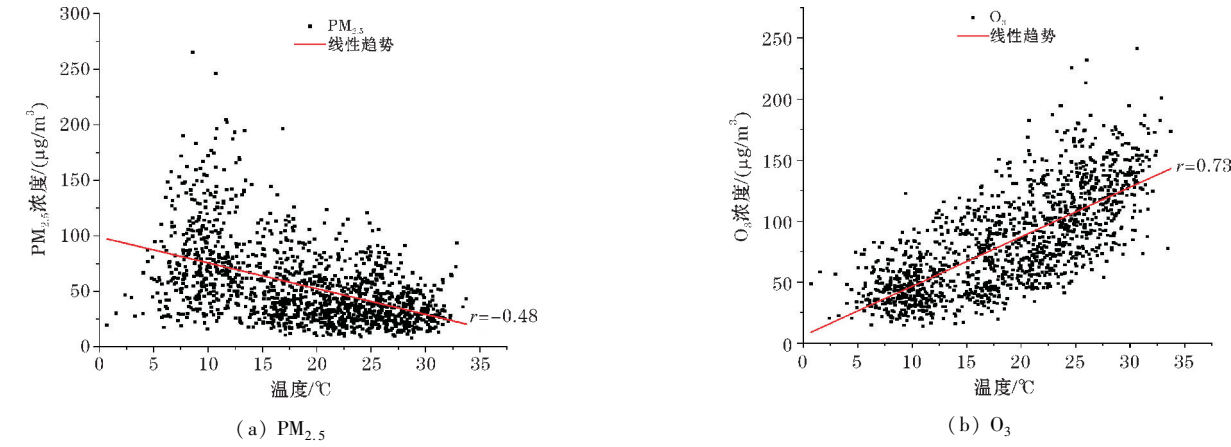


图9 2015–2018年川南城市群PM_{2.5}、O₃与地面温度的散点图

以上分析表明,PM_{2.5}浓度与温度、降水量、风速呈负相关,与相对湿度呈正相关,都通过显著性水平 $\alpha=0.01$ 的检验。O₃浓度与风速、温度呈正相关,与相对湿度、降水呈负相关,均通过显著性水平 $\alpha=0.01$ 的检验。综上,在静小风、高湿、低温、无降水的条件下,PM_{2.5}不易扩散和清除,气溶胶的吸湿增长能力加强,颗粒物浓度较高,容易形成持续性污染;而高温、干燥、弱风等气象条件有利于O₃的生成和积累。

3.2 不同等级污染物的气象条件分布特征

结合图2污染物不同等级的天数分布特征,为进一步探究颗粒物和臭氧浓度不同等级分布的气象因素的影响,统计了2015–2018年川南城市群PM₁₀、PM_{2.5}、O₃ 8 h浓度分别为轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染时所满足的相对湿度、温度、风速、降水等气象因素的区间(表1),其中O₃-8 h浓度严重污染的样本

数为 0,PM₁₀ 严重污染和中度污染日数为 1,样本数太少,因此不做参考。由表 1 可知,当相对湿度为 63.2%~97.5%,温度为 7.4℃~17.4℃,风速为 0.7~1.5 m/s,降水为 0 mm 时,容易诱发 PM_{2.5} 浓度达到严重污染;当相对湿度为 51.5%~99.3%,温度为 4.4℃~17.7℃,风速为 0.2~2.7 m/s,降水为 0~2.3 mm

时,容易诱发 PM_{2.5} 浓度达到重度污染。当相对湿度为 56.2%~71.4%,温度为 25.9℃~30.1℃,风速为 0.7~3 m/s,降水为 0 mm 时,容易诱发 O₃-8 h 浓度达到重度污染;当相对湿度为 50.6%~89.2%,温度为 23.3℃~32.9℃,风速为 1.2~4.2 m/s,降水为 0~10 mm 时,容易诱发 O₃-8 h 浓度达到中度污染。

表 1 2015–2018 年川南城市群 PM_{2.5}、O₃-8 h 浓度等级分布的气象条件

污染物	污染等级	气象因素			
		相对湿度/%	温度/℃	风速/(m/s)	降水/mm
PM _{2.5}	轻度污染	35.6~99.3	3.5~34.2	0.0~4.5	0.0~67.0
	中度污染	51.9~99.3	3.6~25.2	0.0~3.2	0.0~10.0
	重度污染	51.5~99.3	4.4~17.7	0.2~2.7	0.0~2.3
	严重污染	63.2~97.5	7.4~17.4	0.7~1.5	0.0~1.3
O ₃ -8 h	轻度污染	36.6~89.2	14.2~35.6	0.6~4.7	0.0~89.1
	中度污染	50.6~86.1	23.3~32.9	1.2~4.2	0.0~10.0
	重度污染	56.2~71.4	25.9~30.1	0.7~3.0	0.0
	严重污染	/	/	/	/

4 结束语

以四川盆地川南城市群为研究区域,利用环境空气质量监测资料和地面气象观测数据,对 2015–2018 年川南城市群 5 个城市的空气污染特征和气象条件进行综合分析,得出以下结论:

- (1)2015–2018 年川南 5 个城市 PM_{2.5}、PM₁₀ 呈明显下降趋势,峰值也逐年降低,月变化呈现“冬高夏低”,日变化呈现“双峰双谷”型,11:00 和 22:00 为峰值,6:00 和 16:00 为谷值;而 O₃ 浓度升高,成为继颗粒物之后的第二大主要污染物,月变化特征为“倒 U”型,日变化特征为“单峰”型,谷值和峰值分别在 8:00 和 16:00 左右;SO₂、NO₂ 和 CO 浓度冬季高于夏季,SO₂ 和 NO₂ 日变化特征为“双峰双谷”型,CO 为“单峰”型。
- (2)2015–2018 年川南城市群污染日数呈现下降趋势,其中 PM₁₀ 超标天数呈现缓慢下降趋势(由 202 天下降至 136 天),PM_{2.5} 超标天数下降明显(由 460 天下降至 261 天)且重污染天数大幅减少,而 O₃ 浓度却呈现升高趋势且臭氧超标日数逐年增加。
- (3)综合气象因子分析可知,颗粒物浓度与风速、温度、降水量呈负相关,与相对湿度呈正相关,在静小风、高湿、低温、无雨或少雨的条件下,PM_{2.5} 不易扩散;O₃ 浓度与温度、风速呈正相关,与相对湿度、降水呈负相关,因此高温、干燥、弱风等气象条件有利于 O₃ 的生成和积累。
- (4)根据污染物浓度等级划分得到的统计结果表

明:PM_{2.5} 浓度达到重度及以上污染时,相对湿度、温度、风速、降水多出现在 51.5%~99.3%、4.4℃~17.7℃、0.2~2.7 m/s、0~2.3 mm;O₃-8 h 浓度达到中度及以上污染时,以上气象要素大多依次分布在 50.6%~86.1%、23.3℃~32.9℃、1.2~4.2 m/s、0~10 mm。

参考文献:

[1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178–1187.

[2] Brauer M, Amann M, Burnett R T, et al. Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(2):652–660.

[3] 赵秀娟,李梓铭,徐敬.霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估[J].环境科学,2019,40(4):1688–1696.

[4] Fishman J. Grutzen P J. The origin of ozone in troposphere[J]. Nature. 1978,274(5674):855–858.

[5] 程麟钧,王帅,宫正宇,等.中国臭氧浓度的时空变化特征及分区[J].中国环境科学,2017,37(11):4003–4012.

[6] 张莹,贾旭伟,杨旭,等.中国典型代表城市空气污染特征及其与气象参数的关系[J].气象与环境学报,2017,33(2):70–79.

- [7] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTER-B emission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 5131–5153.
- [8] Zhao B, Wang P, Ma J Z, et al. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(1): 20331–20374.
- [9] An Z, Huang R, et al. Severe haze in northern China A synergy of anthropogenic emission [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 16(18): 8657–8666.
- [10] 张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等. 中国华北区域城市间污染物输送研究 [J]. *环境科学研究*, 2004, 17(1): 14–20.
- [11] 苟玉清, 许东蓓. 成都市2017年12月下旬重污染过程及气象条件特征 [J]. *干旱气象*, 2018, 36(6): 1012–1019.
- [12] Wehner B, Wiedensohler A. Long term measurements of submicrometer urban aerosols: statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, 3(27): 867–879.
- [13] Li J, Lu K, Lv W, et al. Fast increasing of surface ozone concentrations in Pearl River Delta characterized by a regional air quality monitoring network during 2006–2011 [J]. *Journal of Environmental Science*, 2014, 26(1): 23–36.
- [14] Min S, Bin W, Sihua L, et al. Effects of Beijing olympics control measures on reducing reactive hydrocarbon species [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(2): 514–519.
- [15] 廖志恒, 范绍佳. 2006–2012年珠江三角洲地区O₃污染对人群健康的影响 [J]. *中国环境科学*, 2015(3): 897–905.
- [16] 周学思, 廖志恒, 王萌, 等. 2013–2016年珠海地区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(1): 143–153.
- [17] 徐敬, 张小玲, 赵秀娟, 等. 夏季局地环流对北京下风向地区O₃输送的影响 [J]. *中国环境科学*, 2009, 29(11): 1140–1146.
- [18] Liao T, Wang S, Ai J, et al. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584(585): 1056–1065.
- [19] 杨华安, 但尚铭. 四川盆地冬季风速、降水量与大气污染浓度分析 [J]. *四川气象*, 1995, 15(3): 28–30.
- [20] Ning G, Wang S, Ma M, et al. Characteristics of air pollution in different zones of Sichuan Basin, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 612: 975–984.
- [21] 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.
- [22] 中华人民共和国国家环境保护标准环境空气质量指数(AQI)技术规定 [S]. HJ 633–2012.
- [23] 金鑫, 谢馨, 陆晓波, 等. 春节除夕燃放烟花爆竹对环境空气质量影响分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2015(2): 64–66.
- [24] 饶晓琴, 李峰, 周宁芳, 等. 我国中东部一次大范围霾天气的分析 [J]. *气象*, 2008, 34(6): 89–96.
- [25] 王闯, 王帅, 杨碧波, 等. 气象条件对沈阳市环境空气臭氧浓度影响研究 [J]. *中国环境监测*, 2015, 31(31): 32–37.
- [26] 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.
- [27] 董真, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶可见辐射吸收的影响 [J]. *气象科学*, 2000, 20(4): 487–493.
- [28] 杨军, 李子华, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响 [J]. *大气科学*, 1999, 23(2): 239–247.
- [29] 樊高峰, 马浩, 张小伟, 等. 相对湿度和PM_{2.5}浓度对大气能见度的影响研究: 基于小时资料的多站对比分析 [J]. *气象学报*, 2016, 74(6): 959–973.
- [30] 钱骏, 廖瑞雪, 邓利群, 等. 成都市大气中O₃污染水平及来源分析 [J]. *四川环境*, 2011, 30(3): 20–23.
- [31] Coglian E. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(16): 2871–2877.
- [32] 杨华安, 但尚铭. 四川盆地冬季风速、降水量与大气污染浓度分析 [J]. *四川气象*, 1995, 15(3): 28–30.

Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Affecting Factors in Southern Sichuan Urban Agglomeration

LEI Yu¹, ZHANG Xiaoling¹, YANG Kaiqing¹, QING Quan², KANG Ping¹

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Provincial Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China)

Abstract: With the continuous expansion of economic scale in southern Sichuan, the increasing energy consumption and motor vehicle ownership have brought great difficulties to the improvement of its air quality. In order to explore the yearly, monthly, and daily change characteristics of 6 kinds of pollutants (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , O_3 and CO) and the correlation between the it and analyze the meteorological factors in the southern Sichuan city group in the last four years, and discuss the meteorological elements range of main pollutants $PM_{2.5}$ and O_3 under different pollution levels. The following conclusions are drawn: From 2015 to 2018, the concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the southern Sichuan urban agglomeration is winter > spring > autumn > summer, and the daily change is "bimodal and double valley" type; The O_3 month change is "inverted U" type, and the daily change is "unimodal type"; The concentration of SO_2 , NO_2 and CO in winter is higher than that in summer, the daily change of SO_2 and NO_2 is of "bimodal and double valley" type, and CO is of "unimodal" type. The number of particulate pollution days showed a downward trend, which the concentration of $PM_{2.5}$ in Luzhou and Neijiang decreased by 36.7%, and the concentration of PM_{10} decreased by 32% and 29.8%, respectively. While the concentration of ozone and ozone exceeding standard days both showed an increasing trend, which the 90th percentile of Zigong O_3 -8 h concentration increased the most, up to 28.7%. Comprehensive meteorological factor analysis shows that the weather conditions such as quiet wind, high humidity, low temperature, and no precipitation are very unfavorable for the diffusion and removal of $PM_{2.5}$, which can easily lead to the formation of a heavily polluted weather process in southern Sichuan; While quiet wind, high temperature, and low humidity Conducive to the generation and accumulation of O_3 .

Keywords: air pollution; characteristics analysis; meteorological factors; correlation