

苏志华,韩会庆,陈波.贵阳城区大气污染物的时空变化和复合污染特征[J].中国岩溶,2020,39(3):442-452.
DOI:10.11932/karst20200310

贵阳城区大气污染物的时空变化和复合污染特征

苏志华¹,韩会庆²,陈波³

(1.贵州财经大学管理科学与工程学院,贵阳 550025; 2.贵州理工学院建筑与城市规划学院,贵阳 550003; 3.贵州财经大学公共管理学院,贵阳 550025)

摘要:选取贵阳市10个空气质量监测站发布的PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃实时浓度数据,通过时间序列分析法和插值法研究贵阳市大气污染物的时空变化和复合污染特征。结果表明:(1)贵阳市2014—2018年主要污染物PM_{2.5}和PM₁₀的年平均浓度逐渐下降,光化学污染物O₃年平均浓度有所增加,空气质量逐渐转好,环境治理取得明显效果;(2)2018—2019自然年PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和O₃在春季污染最严重,SO₂和CO在冬季污染最严重,反映出污染源、阶段性燃料燃烧和二次离子生成等因素对不同污染物的影响不同;(3)PM_{2.5}和PM₁₀日变化特征为“午峰晚峰”型,峰值发生的时间因季节而异,主要由不同季节人类作息的起止时间不同所致,O₃日变化为单峰型,夜间O₃浓度较低,从早晨8:00点开始随着太阳辐射的增大和温度的升高,在15:00—16:00点左右达到峰值;(4)PM_{2.5}的空间分布呈现出部分郊区和工业区较高,市中心居民区较低的特征,指示城市建设向郊区推进。O₃浓度呈现出市区低、郊区高的空间分布特征,反映郊区植被覆盖好,释放的天然源VOCs促进了O₃生成;(5)主要污染物O₃与颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀在春季造成的复合污染最为严重,在夏季O₃与PM₁₀造成一定程度的复合污染,在秋冬季O₃浓度最低,O₃与颗粒物不产生复合污染;一天之内同一时刻O₃与颗粒物不会产生叠加从而造成复合污染。

关键词:贵阳城区;大气污染物;复合污染;时空分布

中图分类号:X51 **文献标识码:**A

文章编号:1001—4810(2020)03—0442—11 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

随着城市化的加速,中国城市的大气污染特征逐渐从煤烟型向复合型转变,城市大气复合污染的形势日趋严峻^[1]。大气复合污染是多种污染物以较高浓度存在,并形成非单一污染要素影响的污染^[2]。其中,细颗粒物PM_{2.5}和光化学污染物O₃是大气复合污染的两种核心污染物,对大气质量影响显著^[3]。过去位于中国西部的云贵高原相比于中东部经济发达地区大气环境较为清洁,但随着西部大开发加速,近

年来生态环境问题逐步凸显^[4]。研究表明,高原大部分地区能见度明显下降,人为排放污染物浓度有所增加^[5]。贵州省会贵阳市位于云贵高原东侧,经济快速发展导致城市大气污染呈现出新的特征,雾霾日数逐渐增加^[6]。在此背景下,大气环境污染及影响分析成为国内外学者关注的焦点。前人研究结果:贵阳市颗粒物污染以PM_{2.5}为主,其浓度夏季最低、冬季最高^[7];空间分布上,PM_{2.5}呈现“市区高,郊区低”的污染特征^[8];污染物夏季低的原因是因为夏季盛行南风,该风向没有明显的污染源,且气象条件有利,加

基金项目:贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2018]162);国家自然科学基金项目(41964005)

第一作者简介:苏志华(1983—),男,博士,副教授,主要研究方向为大气污染防治。E-mail:suzhihua1219@163.com。

通信作者:韩会庆(1983—),男,博士,副教授,研究方向为生态系统服务和气候变化。E-mail:284958131@qq.com。

收稿日期:2019—07—17

速了污染物的洗脱和扩散。但在冬季,东北风容易把白云工业园区排放的污染物带入主城区,气象条件较差,使污染物容易积累^[9]。有研究发现,气象条件对污染物浓度的影响非常复杂,PM_{2.5}质量浓度和气象因素间表现出复杂的非线性关系^[10],例如,在夏季小雨和中雨量级降水对PM_{2.5}吸湿增长较弱,中雨以上降水对PM_{2.5}具有清除作用,而在冬季小雨对PM_{2.5}吸湿增长明显,中雨以上降水对PM_{2.5}清除显著^[4]。而物源分析发现,颗粒物多来自生物质燃烧和机动车尾气排放等人为源^[11],一次性PM_{2.5}主要源自烟尘集合物排放^[12]。污染物之间的关系非常复杂,因气象条件不同存在显著区别,夏季高浓度的O₃在较强的大气氧化条件下可促进二次颗粒物形成,增加环境中PM_{2.5}的浓度水平,两者表现为正相关;而冬季PM_{2.5}削弱了太阳辐射,同时抑制O₃的产生,两者表现为负相关^[13]。目前对于大气污染物的研究主要集中在颗粒物方面,综合PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃的复合污染研究较少。因此,本文基于贵阳市10个环境空气监测点2014–2019年的监测数据,研究贵阳大气PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃质量浓度的多时间尺度变化特征,空间分布特征和复合污染特点,以为贵阳市的大气污染监测与治理提供科学依据。

1 研究区概况

贵阳市地处中国西南部,是中国南方的大数据中心,平均海拔约1 100 m。贵阳城区为典型的喀斯特地貌,根据地形的起伏度可划分为中盆地、中丘和中山3种类型(图1)^[14];地形为向南部开口的盆地,盆地底部与盆地边缘的高差为300~400 m^[15],特殊的地形导致大气中的污染物较难扩散。贵阳处于费德尔环流圈,常年受西风带控制,属于亚热带湿润温和型气候,夏季盛行西南季风,受其影响夏半年降水占全年的80%以上^[16];冬季受东北季风的控制,降水发生率低,降水量少,全年平均总降水量为1 129.5 mm。

2 研究方法

2.1 数据来源

目前,贵阳市共有10个环境空气监测国控站点(图1),分布于不同的功能区,包括工业区、居民区和郊区。其中中院村为工业区站,桐木岭、燕子冲、碧云窝、马鞍山和鉴湖路5站为郊区站,其余4站为居

民区站^[15],各站点监测的污染物质量浓度数据实时发布于网络上。污染物监测设备运行期间按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T193—2005)定期进行校准,以保证监测数据的准确性。本文选取贵阳市2014年1月1日—2019年2月28日的监测数据,包括PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃六项常规监测项目。数据来源于中国空气质量在线监测分析平台(<http://www.aqistudy.cn/>)和青悦开放环境数据中心(<http://data.epmap.org/>)。同期气象观测数据来自贵阳市国家基本气象站(WMOID=57816)(<http://data.cma.cn/user/toLogin.html/>)。

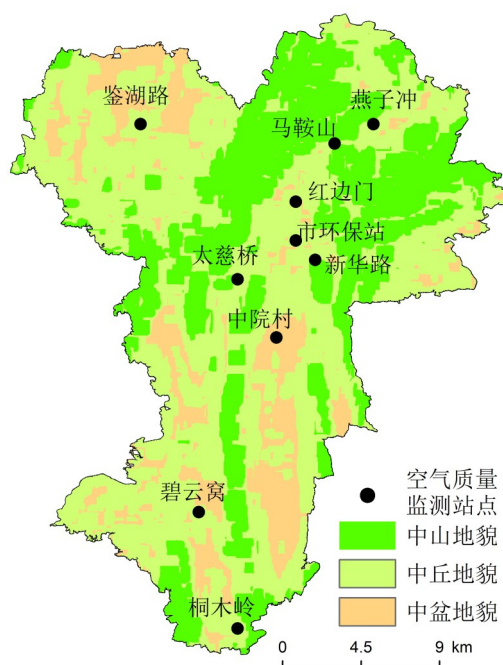


图1 贵阳市环境空气质量监测站点分布图

Fig. 1 Distribution of air environmental monitoring stations in urban Guiyang

2.2 数据处理

文中使用的PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃质量浓度数据均基于小时浓度,并通过小时浓度计算出不同时间尺度(日、月、季和年)平均浓度。研究污染物空间分布情况时,常利用插值法,通过已知点的值计算同一区域内其他未知点的数据,从而推导出整个区域的污染物分布情况。反距离权重(IDW)插值法基于相似相近的原理,以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大,反之离得越远赋予的权重越小。通过IDW插值,将离散的污染物平均浓度数据点转化

为连续变化的平滑曲面,能更好地模拟不同污染物的空间分布特征^[17-18]。本文应用ArcGIS10.2软件,选择IDW进行插值,以研究贵阳市主要大气污染物PM_{2.5}和O₃的空间分布特征及其影响因素。

3 大气污染物的时间变化特征

3.1 大气污染物的年变化特征

贵阳市2014–2018年度PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃–8h_max(O₃日最大8h滑动平均浓度)和CO年平均浓度分别为45.50、68.42、21.92、28.58、82.08 μg·m⁻³和0.77 mg·m⁻³。PM_{2.5}、PM₁₀和SO₂年平均浓度总体上呈现下降趋势,与空气质量指数(AQI)的变化一致。其中PM_{2.5}在前3年均超过《环境空气质量标准》(GB3095–2012)二级标准规定的年平均质量浓

度限值(35 μg·m⁻³),后两年虽未超标但与标准值较为接近;PM₁₀年平均浓度均未超标,但与其二级标准(70 μg·m⁻³)较为接近;SO₂和NO₂的年平均浓度均较小,分别远低于其二级标准限值60 μg·m⁻³和40 μg·m⁻³,CO年平均浓度远低于24小时平均浓度限值(4 mg·m⁻³);光化学污染物O₃–8h_max浓度远低于二级标准限值(日最大8小时平均值160 μg·m⁻³),但在2014–2016年呈明显递增趋势,后两年浓度下降了一定幅度(图2)。综上说明PM_{2.5}和PM₁₀污染较严重,是主导空气质量变化的主要污染物,这与前人的研究结果一致^[7];从年际变化来看,贵阳市颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀污染浓度逐渐减轻,O₃–8h_max浓度有所增强,AQI总体上呈现递减趋势(图2),这反映出近五年贵阳空气质量逐渐转好,其空气质量的变化趋势与中国其他城市保持一致^[19-21],说明近年来环境治理取得了明显效果^[22]。

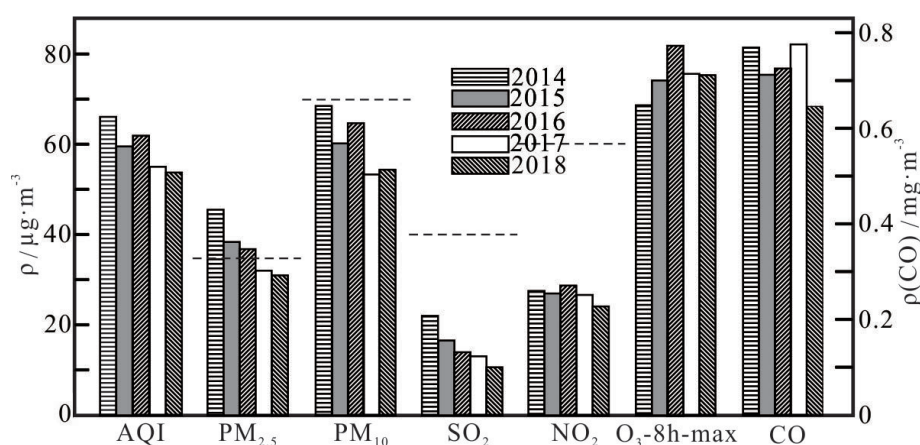


图2 贵阳市AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃–8h_max和CO的年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of AQI, PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃–8h_max and CO in urban Guiyang

注:虚线为《环境空气质量标准》(GB3095–2012)二级标准规定的质量浓度限值。

3.2 一个自然年大气污染物的时间变化特征

影响污染物浓度的主要因素为当地的气象条件和污染源的排放情况,其中气象条件为主要原因^[23]。气象条件是决定大气污染物浓度水平、化学组成和污染特征的基本因素^[24-25]。本文选择2018年3月1日至2019年2月28日一个完整自然年的6项常规监测污染物,研究其在一年内不同时间尺度的变化特征。

3.2.1 2018–2019自然年大气污染物的季节变化特征

贵阳市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^[26]。由图3可知,贵阳市

PM_{2.5}和PM₁₀的季度均值分布都是春季>冬季>秋季>夏季,NO₂的为春季>秋季>冬季>夏季,SO₂和CO的同为冬季>春季>秋季>夏季,O₃–8h_max的为春季>夏季>秋季>冬季。对比发现,PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和O₃–8h_max季度均值的最大值都发生在春季,SO₂和CO则在冬季。除了O₃–8h_max季度均值的最小值出现在冬季以外,其余5种污染物的最小值都出现在夏季。由此可见,贵阳市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃–8h_max和CO浓度的季节性差异显著。

3.2.2 2018–2019自然年大气污染物的逐月和逐日变化特征

图4显示贵阳市2018–2019自然年PM_{2.5}、PM₁₀、

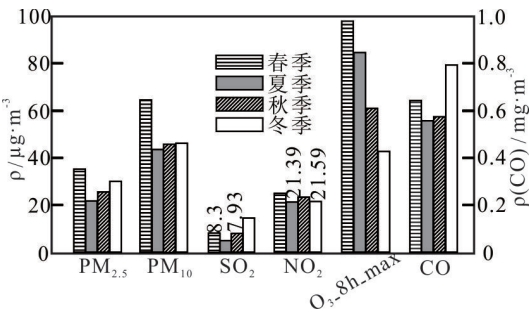


图 3 贵阳市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃-8h_max和CO浓度的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃-8h_max and CO concentration in urban Guiyang

SO₂、NO₂、CO和O₃-8h_max月均浓度最大值分别出现在2018年3月(42 μg·m⁻³)、2018年4月(72 μg·m⁻³)、

2018年12月和2019年1月(16 μg·m⁻³)、2018年3月(30 μg·m⁻³)、2019年1月(0.929 mg·m⁻³)和2018年4月(103 μg·m⁻³)，最小值分别出现在2018年9月、2018年9月、2018年6月—9月、2018年7月、2019年2月和2019年1月，6项大气污染物的月平均浓度变化存在一定的时间差异。6个基本项目的月均质量浓度均远低于环境空气质量标准(GB3095-2012)规定的二级浓度限值，说明空气质量较好。PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂和CO日均值均呈现“峰对峰，谷对谷”的同步波动变化规律，显示出冬春浓度较高、污染较严重，夏秋浓度低、污染较轻的变化特征。O₃-8h_max的日均值总体上呈现递减趋势，与其余项目显著不同，反映其作为二次污染物的特殊性，主要由前体物在一定气象条件下生成^[1,13]。

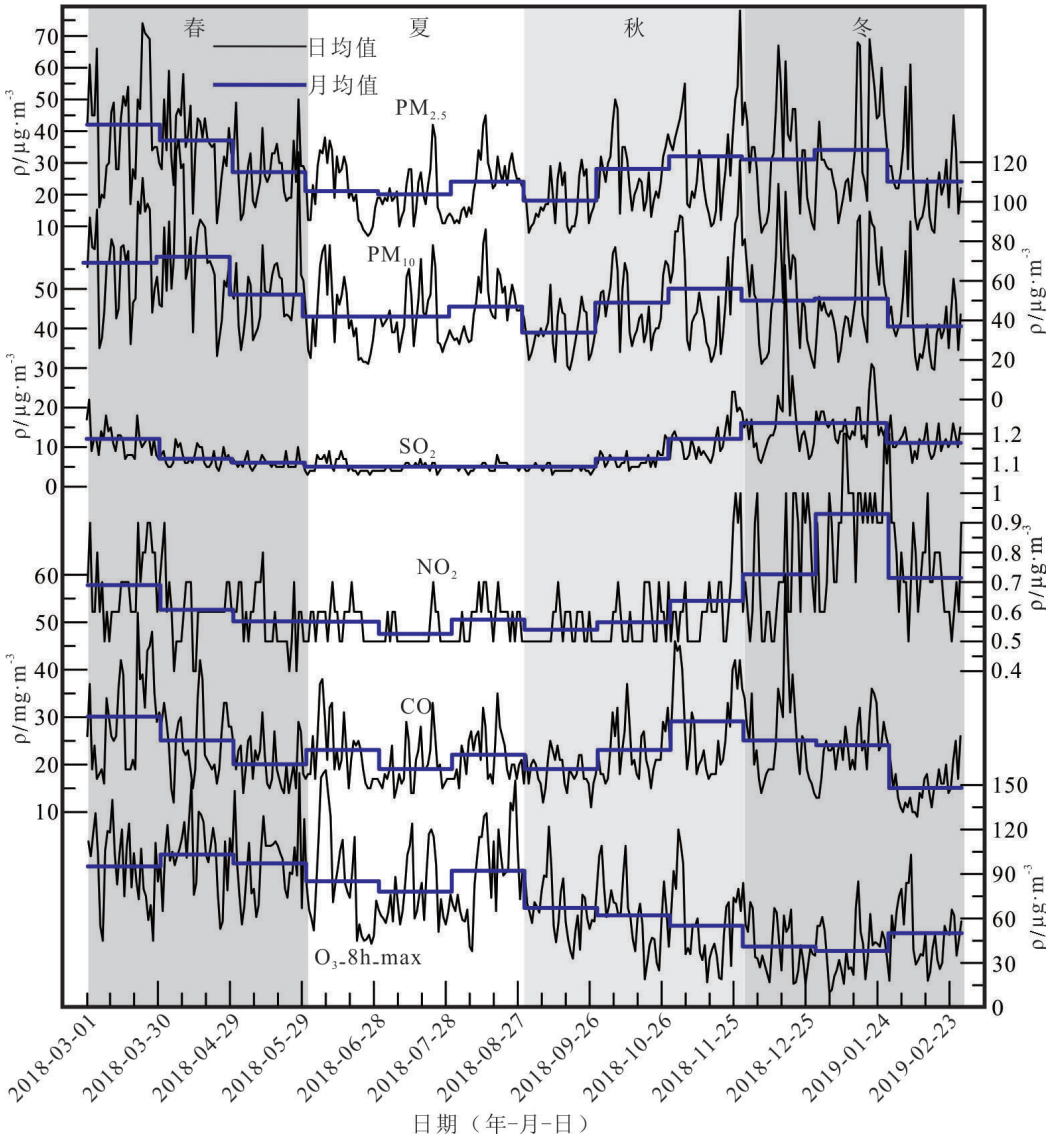


图 4 贵阳市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃-8h_max和CO浓度的逐月和逐日变化

Fig. 4 Monthly and daily variation of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃-8h_max and CO concentration in urban Guiyang

根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012), 2018-2019自然年仅有 $PM_{2.5}$ 的日均值超过二级标准, 且超标时间仅为1 d, 超标率为0.27%, 其余基本项目均没有超过二级标准(表1), 这进一步证实了贵阳市空气质量总体上较为清洁^[4]。 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 O_3 超过一级标准的天数分别为84 d、153 d、1 d、85 d, 超标率分别为22.95%、41.80%、0.27%和23.22%, CO和 NO_2 没有超过一级标准(表1), 说明贵阳市空气环境的主要污染物除了 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 外, O_3 污染相对较为严重, 主要污染物为 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 , 这与全国大多数城市相同^[27]。 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 代表人为源排放细颗粒物的贡献, 贵阳市2018-2019自然年 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 范围为0.32~0.83之间, 平均值为0.56, 远低于天津、石家庄和乌鲁木齐等北方城市的 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值^[28-30], 说明贵阳市细颗粒物污染相对较轻。贵阳位于喀斯特湿润地区, 降水较多, 相对北方城市颗粒物更容易湿沉降, 再加上城市规模不大, 废气排放量小, 通过化学反应产生的二次颗粒物相对也少^[31]。

表1 贵阳市环境空气污染物基本项目超标率

Table 1 Excess rate of basic items of environmental air pollutants in urban Guiyang

	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	O_3 8h _{max}
一级标准/ $\mu g \cdot m^{-3}$	35	50	50	4 $mg \cdot m^{-3}$	80	100
超标天数	84	153	1	0	0	85
一级超标率/%	22.95	41.80	0.27	0	0	23.22
二级标准/ $\mu g \cdot m^{-3}$	75	150	150	4 $mg \cdot m^{-3}$	80	160
超标天数	1	0	0	0	0	0
二级超标率/%	0.27	0	0	0	0	0

3.2.3 2018-2019自然年主要大气污染物日变化特征

选取贵阳市的主要污染物 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 , 分析其在不同季节的日变化特征(图5), 结果显示4个季节 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 浓度与我国中东部城市的日变化特征基本一致^[20,32]。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 日变化呈“午峰晚峰”的双峰型, 上午随着人为活动和交通运输的加强, 排放的污染物开始累积^[33], 导致 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 在10:00~13:00点达到高峰, 其中夏季达到峰值的时间最早, 冬季最晚。随着午后温度升高, 对流活动旺盛、水平扩散能力增强导致颗粒物浓度逐渐下降。从15:00~16:00点开始, 由于下班高峰的到来, 加上

地表降温, 边界层高度降低, 大气趋于稳定, 颗粒物逐渐累积并在19:00点左右出现晚峰。晚峰通常大于午峰, 因为交通早高峰虽然导致排放增加, 但由于温度升高, 对流旺盛, 污染物扩散逐渐增强, 而晚峰达到以后, 由于太阳辐射减少, 气温降低, 大气边界层下降导致污染物不易扩散。“晚峰”在春季、夏季、秋季和冬季的出现时间分别为22:00、23:00、21:00、20:00点, 夏季发生最晚, 冬季最早。“午峰晚峰”在不同季节发生的时间不同, 这可能与不同季节昼夜时长不同、人类作息的起止时间不同有关^[7]。

4个季节 O_3 浓度的日变化曲线类似(图5), 夜间 O_3 浓度维持较低水平, 主要是因为 O_3 为二次污染物, 夜间生成 O_3 的化学反应较弱, 而NO不断“滴定”消耗 O_3 , 同时 O_3 还受到近地面的沉积作用影响^[34]。早上8:00点开始, 随着太阳辐射的增大和温度的升高, 生成 O_3 的光化学反应逐渐增强, O_3 浓度开始积累升高, 在15:00~16:00点左右达到峰值之后又随着太阳辐射的减少而降低。在秋季和冬季的夜间, O_3 会出现不太明显的第二峰值, 可能是气流的垂直输送和晚间边界层高度较低造成的污染物积累所致^[35]。

4 主要大气污染物的空间分布

贵阳市主要的大气污染物为 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 , $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 同属于颗粒物指标, 具有一致的污染特征, 且相比于 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 的污染更为严重。因此本文选择 $PM_{2.5}$ 和 O_3 项目的季度均值, 研究其地面浓度的空间分布。运用IDW插值得出的贵阳市一个自然年内不同季节 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布(图6): 春季、夏季、秋季和冬季4个季节 $PM_{2.5}$ 的空间分布规律相似, 郊区站燕子冲和桐木岭, 工业区站中院村的 $PM_{2.5}$ 浓度均较高, 指示细颗粒物污染较为严重。而郊区站鉴湖路的 $PM_{2.5}$ 浓度最低, 污染最轻。居民区站太慈桥、新华路、市环保站和红边门的 $PM_{2.5}$ 浓度均较低, 污染较轻。在春季和夏季, 居民区站红边门的 $PM_{2.5}$ 浓度也较高。

图7为运用IDW插值得出的贵阳市一个自然年内不同季节 O_3 8h_{max}的空间分布, 春季、夏季、秋季和冬季4个季节 O_3 的空间分布规律相似, 郊区站鉴湖路、桐木岭和燕子冲的 O_3 8h_{max}浓度较高, 污染较为严重, 工业区站和居民区站的 O_3 浓度均较低, 污染较轻。由此可看出, 从市区到郊区 O_3 浓度总体上为逐渐递增的层次变化特征, 这与其他城市 O_3 的空间分布特征相似^[27,36], 其原因为居民区和工业区由于机

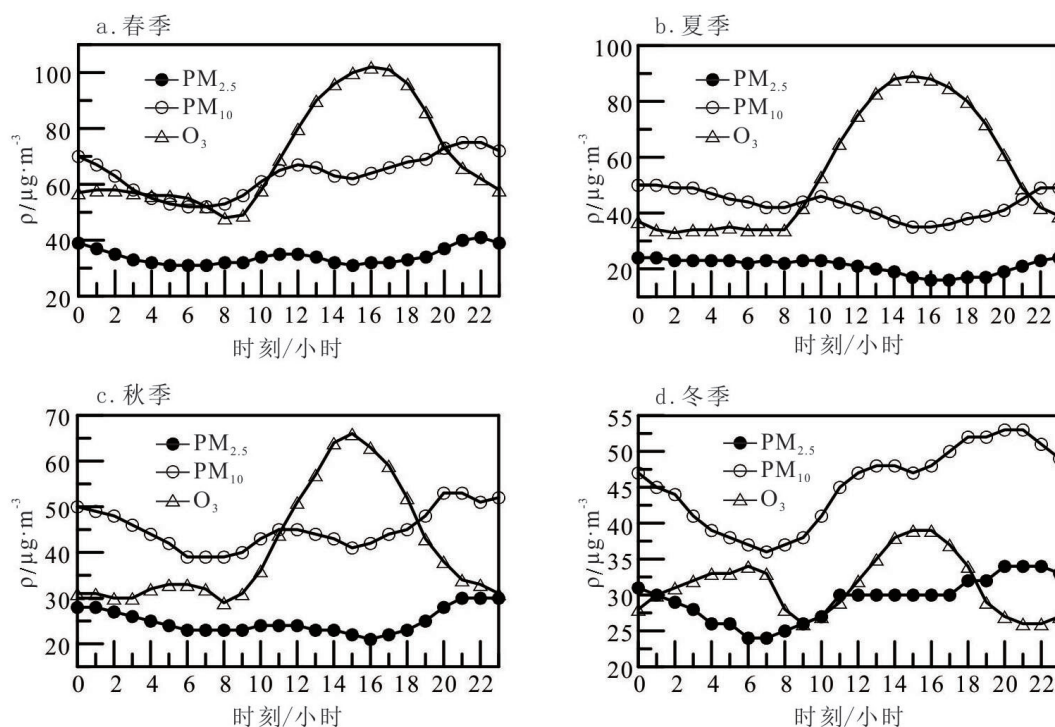


图5 贵阳市2018–2019自然年四季主要污染物的日变化趋势

Fig. 5 Daily variation trend of major pollutants in the four seasons of urban Guiyang from 2018 to 2019

动车排放等因素,使得NO浓度较高,高浓度的NO不仅阻碍O₃的生成,还会消耗已生成的O₃^[34]。另外,贵阳市郊区桐木岭、鉴湖路和燕子冲周边区域植被覆盖率高,其排放的天然源VOCs是光化学反应的重要前体物,反应活性较高,能促进O₃的生成^[37–38]。在夏季,居民区太慈桥站的O₃浓度较高,其具体原因尚待进一步研究。

5 大气复合污染特征

大气复合污染是指多种污染物以较高浓度存在,其污染源较为复杂^[2],表现为污染物之间源和汇的相互交错、污染转化过程耦合和环境影响具有协同效应^[39–40]。6个基本项目中PM_{2.5}、PM₁₀和O₃是主要污染物,而SO₂、CO和NO₂浓度较小,均远低于二级标准,不能产生复合污染。因此,本文只讨论颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀与O₃_{8h_max}的复合污染特征。从日均值来看,3个指标仅有PM_{2.5}超过二级标准,且超标率仅有0.27%(表1),因此,以3个项目相对于二级标准的超标率不能判定其复合污染情况。本文选择PM_{2.5}、PM₁₀和O₃_{8h_max}相对于《环境空气质量标准》(GB3096–2012)一级标准的超标率来判定大气复合污染在2018–2019自然年的四季分布。图8显示

PM_{2.5}、PM₁₀和O₃_{8h_max}在2018–2019自然年春季的超标率分别为41%、71%和55%,该季节复合污染最为严重;在夏季,PM_{2.5}的一级超标率最低,仅为7%。PM₁₀和O₃的一级超标率分别为32%和29%,两者在夏季构成了一定程度的复合污染;在秋季和冬季,O₃超标率均很低,分别为7%和1%。这说明O₃与颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀不会联合造成复合污染。从小时均值来看,图5显示在四个季节的夜晚,O₃浓度均处于较低水平,O₃不会与颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀产生复合污染。在春季、夏季和秋季的白天,PM_{2.5}和PM₁₀浓度先减小后增大,而O₃浓度先增大后减小,两者呈现反相位变化,不会产生复合污染。在冬季的白天,O₃浓度相对夜晚有所增加。但冬季光化学反应很弱,不利于O₃生成^[34],O₃浓度总体很低,也不会与颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀在同一时刻产生复合污染。

6 讨论

2018–2019一个自然年内,贵阳市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂和CO的季均浓度和月均浓度变化存在明显差异(图3,图4),而日均浓度和小时浓度均呈现“峰对峰,谷对谷”的同步变化(图4),这反映了大气污染物经污染源排放以后,其浓度变化主要受到大尺度

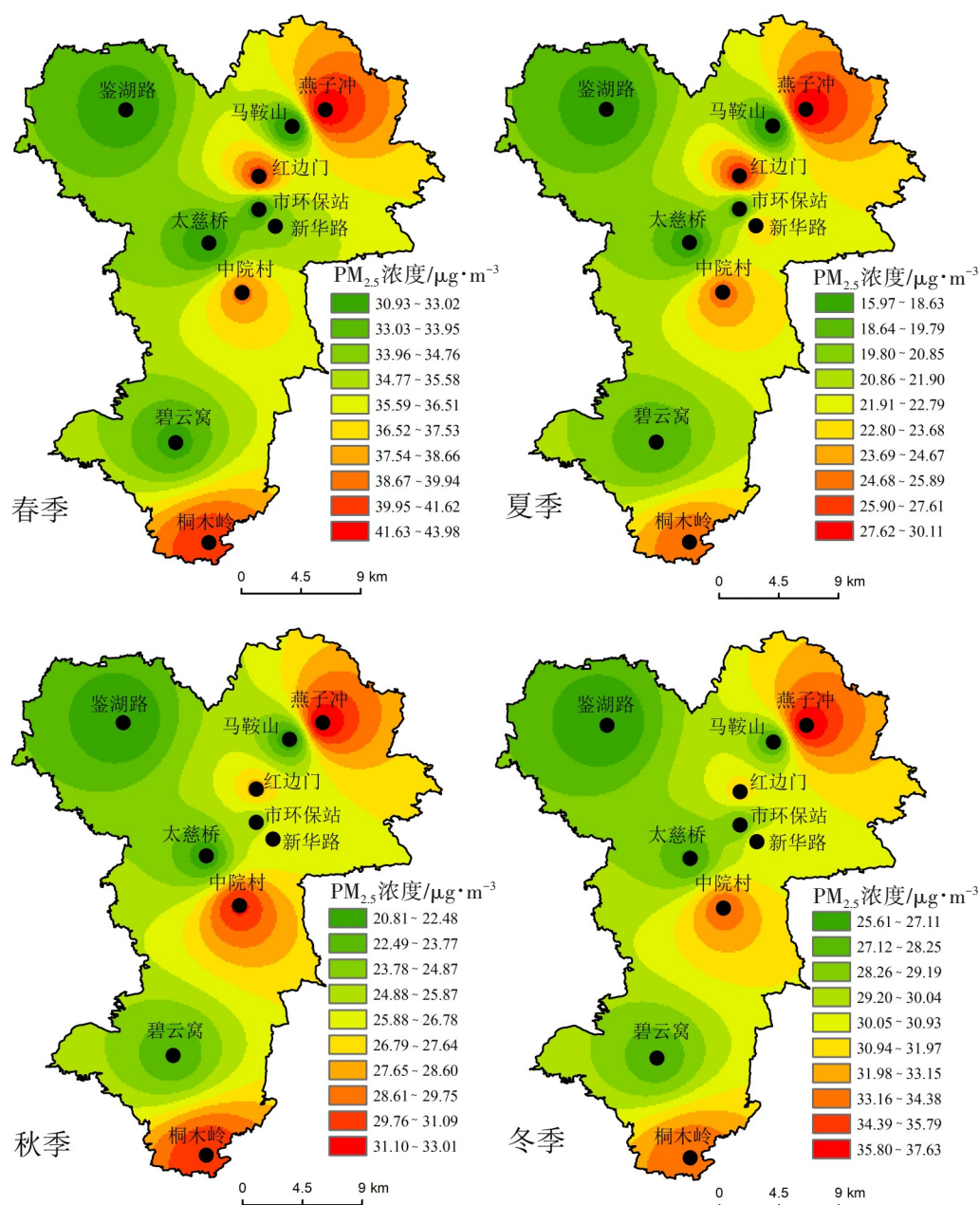


图6 贵阳市四个季节 $PM_{2.5}$ 浓度空间插值分布

Fig. 6 Spatial interpolation distribution of $PM_{2.5}$ concentration in four seasons in urban Guiyang

天气系统的影响^[21],此外,污染源、阶段性燃料燃烧,二次离子生成的差异对不同项目($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和CO)的影响不同。其中, SO_2 和CO在春季、夏季和秋季整体上浓度较低,变化幅度较小,在冬季浓度大幅增加,说明了采暖季燃料燃烧是其主要来源。 NO_2 浓度在四个季节的差异较小且存在大幅波动,指示了机动车尾气排放是其主要来源,浓度大幅波动主要受控于气象条件的变化。而 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 组成较为复杂,除了来源于污染源排放,二次离子生成也对其浓度的变化产生了重大影响^[41]。 O_3 主要为二次污

染物,其浓度变化与其余5个项目存在显著差异。 O_{3-8h_max} 在春夏秋冬四季的平均浓度分别为98.22、84.82、61.21和42.84 $\mu g \cdot m^{-3}$,总体上呈现逐渐下降的趋势,污染越来越轻(图3)。图9显示,夏季平均日照时数和气温在4个季节中最高,这有利于 O_3 的生成^[13]。但夏季降水量和相对湿度也较春季大,不利于发生光化学反应生成 O_3 ^[4]。因此,可能是2018-2019年度夏季出现特殊的水热组合抑制了 O_3 的生成,导致 O_3 的最高浓度没有出现在夏季而发生在春季。

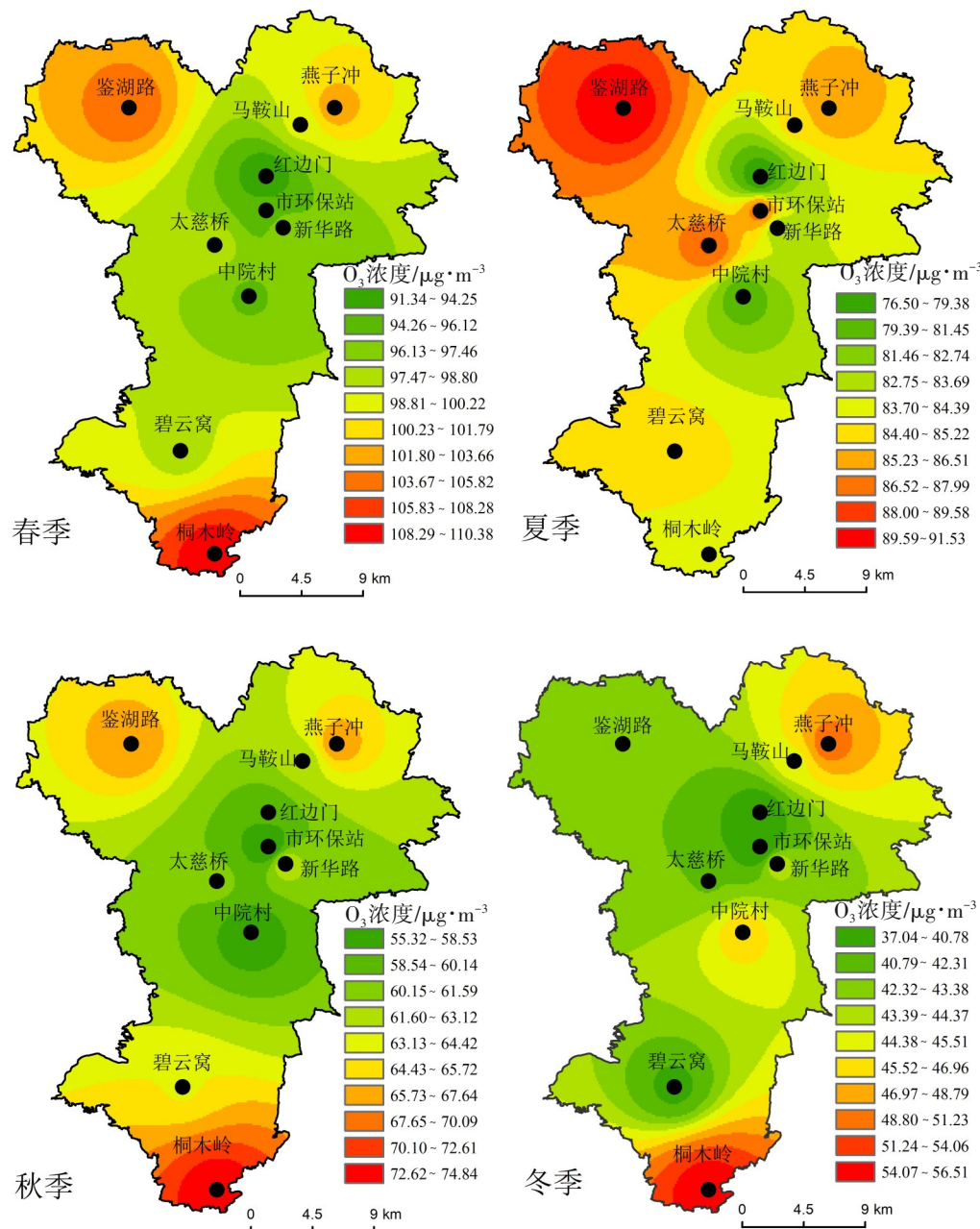


图 7 贵阳市四个季节 $O_3_{8h_max}$ 浓度空间插值分布

Fig. 7 Spatial interpolation distribution of $O_3_{8h_max}$ concentration in four seasons in urban Guiyang

贵阳市 2018–2019 自然年 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 季度均值的最大值均发生在春季,不同于贵阳先前的研究记录^[7-9,12],也不同于其他地区在冬季污染最严重的特征^[19-20]。前人研究指出:降水对污染物尤其是大气颗粒物有较好的清除作用^[42];湿度越大,部分污染物如细颗粒物 $PM_{2.5}$ 会发生吸湿增长导致污染加大^[4];日照时数越大,温度越高,空气对流越旺盛,越有利于污染物的扩散^[25];云贵高原与中国中东部城市风场驱动大气污染物扩散的特征不同,尤其是在平均风速小于 $3 m \cdot s^{-1}$ 的情况下,风速对污染物的作

用不明显^[4]。图 9 显示贵阳市 2018–2019 自然年 4 个季节的平均风速均较低,其中春季的平均风速最高仅为 $2.7 m \cdot s^{-1}$,风力对污染物扩散及外源输入的影响可以忽略。对比发现,平均降水量、日照时数和气温都是春季大于冬季,湿度是冬季大于春季,春季的气象条件较冬季更有利于污染物扩散。因此, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 季度均值的最大值出现在春季可能说明本年度的春季人类活动较为强烈,污染源排放较冬季大得多。

贵阳市 2018–2019 自然年 4 个季度的主要污染

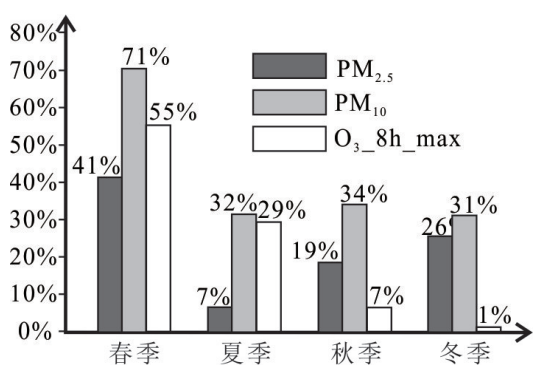


图8 2018-2019自然年四季PM_{2.5}、PM₁₀和O₃_8h_max的一级超标率

Fig. 8 First-level exceeding rate of PM_{2.5}, PM₁₀ and O₃_8h_max in the four seasons of natural year from 2018 to 2019

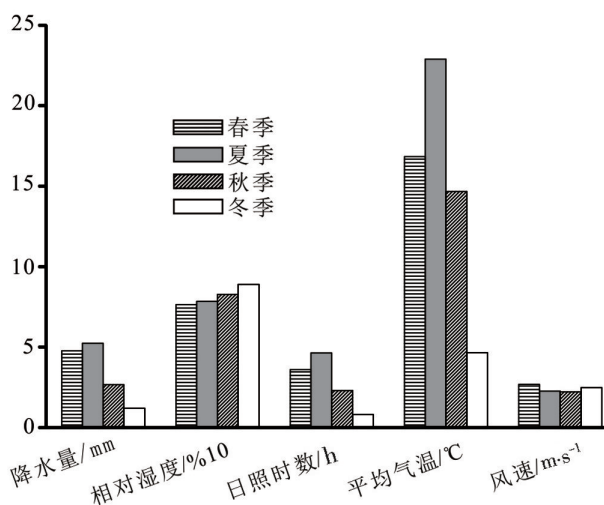


图9 贵阳市2018-2019自然年平均气象条件的季节变化

Fig. 9 Seasonal variation of average meteorological conditions in urban Guiyang of natural year from 2018 to 2019

物PM_{2.5}显示出部分郊区站(桐木岭和燕子冲)和工业区站浓度高,居民区站浓度低的污染特征(图6)。而前人研究显示贵阳市PM_{2.5}浓度居民区最高,工业区较高,郊区最低,从市区到郊区颗粒物浓度逐渐降低^[10,15],与本研究有明显区别。调查发现,造成郊区站PM_{2.5}浓度较高的原因是桐木岭站和燕子冲站周边,近年来土地开发强度较大,扬尘和机动车尾气排放剧增,导致地面细颗粒物的浓度增高。而中院村属于工业区,工业排放强度较大,加上处于喀斯特盆地(图1)^[14],相对其他监测站较为封闭,污染物较难扩散,从而导致地面的PM_{2.5}浓度较高。老城区发展已经成熟,开发强度相对较小,颗粒物浓度低。而东北部的鉴湖路站点位于观山湖公园边上,监测站周围植被覆盖较好,丰富的植物叶片有利于捕获PM_{2.5},因而导致其浓度最低^[43]。PM_{2.5}的空间分布与前人研究

的不同可能反映出城市建设向郊区扩展,使郊区的细颗粒物浓度超过了城区。

因时间尺度不同,大气污染物的复合污染特征不同。从日均值来看,O₃与颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀的复合污染在春季最为严重,在夏季O₃与PM₁₀造成了一定程度的复合污染,在秋季和冬季,O₃浓度较低,不会与颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀产生复合污染(图8);在小时尺度上,O₃与颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀在春季、夏季和秋季的白天表现为反相位变化(图5),不产生复合污染。因为在太阳辐射较强的季节,当颗粒物浓度增加时,太阳光受到颗粒物反射及漫反射,使到达地表的太阳辐射减弱,从而影响光化学反应生成O₃^[1]。而在冬季的白天因风速较夜晚大,高空O₃垂直向下输送^[44],使地面O₃浓度较夜晚高,但由于冬季O₃浓度总体较低,O₃与颗粒物也不会同一时刻造成复合污染。

7 结论

(1)贵阳市近5年颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀污染逐渐减轻,O₃污染有所增强,AQI总体上逐渐降低,空气质量逐渐转好,反映出环境治理取得明显效果;

(2)2018-2019自然年主要污染物PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂在春季污染最严重,可能反映春季人类活动强烈,污染源排放大,而O₃在春季的季度均值最大,指示出特殊的水热组合对光化学反应的影响;

(3)主要污染物PM_{2.5}和PM₁₀日变化特征为“午峰晚峰”型,峰值发生的时间因季节而异,受控于不同季节昼夜时长不同,人类作息的起止时间不同;O₃日变化为单峰型,夜间O₃浓度维持较低水平,早上08:00点开始,随着太阳辐射的增大和温度的升高,在15:00-16:00点左右达到峰值;

(4)PM_{2.5}浓度呈现出部分郊区站浓度较高的新特征,指示了城市建设向郊区扩展;O₃浓度呈现出市区低、郊区高的空间分布特征,反映了郊区植被覆盖好,释放的天然源VOCs促进了O₃生成。

(5)O₃与颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀在春季造成的复合污染最为严重,在夏季O₃和PM₁₀造成一定程度的复合污染,在秋冬季O₃与颗粒物不造成复合污染;在一天之内的同一时刻,O₃与颗粒物浓度呈反相位变化,不会产生叠加从而导致复合污染。

致谢:审稿专家的指正和建设性意见极大提升了本文的质量,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] Jia M W, Zhao T L, Cheng X H, et al. Inverse relations of $PM_{2.5}$ and O_3 in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of East China [J]. *Atmosphere*, 2017, 8(12):59-70.
- [2] 杨孝文, 周颖, 程水源, 等. 北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(3): 679-686.
- [3] Pausata F S R, Gaetani M, Messori G, et al. The role of aerosol in altering North Atlantic atmospheric circulation in winter and its impact on air quality [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(4):1725-1743.
- [4] 舒卓智, 赵天良, 郑小波, 等. 清洁大气背景下贵阳空气质量变化及气象作用 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(12): 4460-4468.
- [5] 郑小波, 王学锋, 罗宇翔, 等. 云贵高原1961—2006年大气能见度和消光因素变化趋势及原因 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 314-319.
- [6] Zhao T, Liu D, Zheng X, et al. Revealed variations of air quality in industrial development over a remote plateau of Southwest China: an application of atmospheric visibility data [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2016, 129(6): 659-667.
- [7] 苏志华, 王建华. 贵阳市大气颗粒物的污染特征及其影响因素分析 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(5): 77-84.
- [8] 杨佳, 葛馨, 吴起鑫. 贵阳市主城区空气质量指数时空分布特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(8): 1827-1835.
- [9] 梁隆超, 仇广乐, 陈卓. 贵阳市城区大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 的污染特征与季节变化规律 [J]. *地球与环境*, 2015, 43(3): 290-295.
- [10] 李松, 邓宝昆, 邵技新, 等. 基于GIS的贵阳 $PM_{2.5}$ 质量浓度城乡过渡特征及影响因素研究 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(8): 1298-1304.
- [11] 刘娜, 冯新斌. 贵阳市大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 污染特征及气象参数的影响 [J]. *地球与环境*, 2014, 42(3): 311-315.
- [12] 杜德艳, 李金娟, 陶芸, 等. 贵阳市 $PM_{2.5}$ 微观特征的季节变化分析 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(6): 1645-1650.
- [13] 尚媛媛, 舒卓智, 郑小波, 等. 云贵高原城市冬夏季 $PM_{2.5}$ 与 O_3 相互作用机理:以贵阳市为例 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27(12): 110-115.
- [14] 李卫海, 李阳兵, 周焱, 等. 岩溶山地城市扩展空间差异的地形效应 [J]. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 85-92.
- [15] 尚媛媛, 郑小波, 夏晓玲, 等. 贵阳市 $PM_{2.5}$ 分布特征及气象条件的影响 [J]. *高原山地气象研究*, 2018, 38(3): 45-50.
- [16] 何尧启, 汪永进, 孔兴功, 等. 贵州董哥洞近1 000a来高分辨率洞穴石笋 $\delta^{18}O$ 记录 [J]. *科学通报*, 2005(11):1114-1118.
- [17] 段平, 盛业华, 李佳, 等. 自适应的IDW插值方法及其在气温场中的应用 [J]. *地理研究*, 2014, 33(8): 1417-1426.
- [18] 李凯, 赵华甫, 吴克宁, 等. 土壤重金属Cd污染指数的适宜插值方法和合理采样数量研究 [J]. *土壤通报*, 2016, 47(5): 1056-1064.
- [19] 唐宜西, 张小玲, 徐敬, 等. 北京城区和郊区本底站大气污染物浓度的多时间尺度变化特征 [J]. *环境科学学报*, 2016, 8: 2783-2793.
- [20] 周勤迁, 潘月鹏, 王剑, 等. 黑龙江海伦农业区冬春 $PM_{2.5}$ 和气态污染物污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(4): 844-851.
- [21] 赖安琪, 陈晓阳, 刘一鸣, 等. 珠江三角洲高质量浓度 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染特征 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2018, 57(4): 30-36.
- [22] 朱佳文, 余光辉, 李振国, 等. 中国典型城市环境空气质量变化趋势分析研究 [J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(12): 45-49.
- [23] 张思远, 吴开亚. 合肥市 $PM_{2.5}$ 污染特征及影响因素分析研究 [J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(1): 51-56.
- [24] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(32): 3976-3984.
- [25] Pateraki S, Asimakopoulos D, Flocas H A, et al. The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$) [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 419(3): 124-135.
- [26] 张东海, 白慧, 周文钰, 等. 气候季节划分标准在贵州地区的适用性分析 [J]. *高原山地气象研究*, 2014, 34(4): 77-82.
- [27] 林燕芬, 王茜, 伏晴艳, 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.
- [28] Kong S, Han B, Bai Z, et al. Receptor modeling of $PM_{2.5}$, PM_{10} and TSP in different seasons and long-range transport analysis at a coastal site of tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4681-4694.
- [29] 杜吴鹏, 王跃思, 宋涛, 等. 夏秋季石家庄大气污染变化特征观测研究 [J]. *环境科学*, 2010, 31(7): 1409-1416.
- [30] 徐锋. 乌鲁木齐市2011年冬季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 浓度特征分析 [J]. *干旱环境监测*, 2012, 26(2): 81-84.
- [31] Heidi O, Gaarder P I, Johansen B V. Quantification and characterization of suspended particulate matter in indoor air [J]. *The Science of the Total Environment*, 1997, 193: 185-196.
- [32] 赵辉, 郑有飞, 魏莉, 等. G20峰会期间杭州及周边地区空气质量的演变与评估 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(6): 2016-2024.
- [33] Louie P K K, Watson J G, Chow J C, et al. Seasonal characteristics and regional transport of $PM_{2.5}$ in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(9): 1695-1710.
- [34] 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, 164-165: 110-117.
- [35] Zhang J, Wang T, Chameides W L, et al. Ozone production and hydrocarbon reactivity in Hong Kong, Southern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(2): 557-573.
- [36] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京市臭氧的时空分布特征 [J].

- 环境科学, 2014, 35(12): 4446-4453.
- [37] Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2015, 57(1): 14-25.
- [38] Lu K D, Rohrer F, Holland F, et al. Observation and modeling of OH and HO₂ concentrations in the Pearl River Delta 2006: a missing OH source in a VOC rich atmosphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(3): 1541-1569.
- [39] Parrish D D, Zhu T. Clean Air for Megacities [J]. *Science*, 2009, 326(5953): 674-675.
- [40] Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, et al. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE—PRD2004): Overview [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(25): 6157-6173.
- [41] 张宇静, 赵天良, 殷翀之, 等. 徐州市大气 PM_{2.5} 与 O₃ 作用关系的季节变化[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(06): 2267-2272.
- [42] 王艳秋, 杨晓丽. 哈尔滨市降水形势对大气污染物浓度稀释的影响[J]. *自然灾害学报*, 2007(5): 65-68.
- [43] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, et al. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 395-402.
- [44] 徐家骝, 朱毓秀. 气象因子对近地面臭氧污染影响的研究[J]. *大气科学*, 1994, 18(6): 751-757.

Spatial and temporal variation and combined pollution characteristics of atmospheric pollutants in urban Guiyang

SU Zhihua¹, HAN Huiqing², CHEN Bo³

(1. School of Management Science, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. College of Architecture and Urban Planning, Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550003, China; 3. College of Public Management, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract Guiyang city, located in southwestern China, is a big data center of southern China. Its special industrial structure raises higher requirements on air quality. In order to reduce the negative impact of air pollution on the social and economic development of Guiyang, it is necessary to study the characteristics of air pollution in this area. In this study, we obtained real time data of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO and O₃ concentration from 10 air quality monitoring stations in Guiyang by time series analysis and the interpolation method to study the spatial and temporal changes and combined pollution of atmospheric pollutants. The results show that the annual average concentrations of the main pollutants PM_{2.5} and PM₁₀ in urban Guiyang decreased gradually from 2014 to 2018, the average concentration of photochemical pollutants O₃ increased, the quality of air gradually improved, and environmental treatment achieved good results. The PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ and O₃ are most polluted in spring, and the SO₂ and CO are most polluted in winter in the natural year from 2018 to 2019, which reflect the influences of pollution sources, staged fuel combustion, and secondary ion generation on different pollutants were different. The daily variation of PM_{2.5} and PM₁₀ was characterized by the "noon peak and evening peak" type. The peak occurrence time varied with seasons due to different day and night lengths in different seasons, and different start and stop times of human life in different seasons. The daily variation of O₃ day was single-peak type, and the concentration of O₃ was low at night. From 8:00 in the morning, as the solar radiation increased and the temperature rose, it reached a peak around 15:00 to 16:00. The spatial distribution of PM_{2.5} presented the characteristics of some suburbs and industrial areas were higher, and the downtown residential areas were lower, indicating that urban construction is expanded to the suburbs construction. The spatial distribution of O₃ concentration presented characteristics of low in the urban and high in suburb, reflecting the good coverage of suburban vegetation, and the release of natural source VOCs promoting the generation of O₃. The major pollutant O₃ and particulates PM_{2.5} and PM₁₀ caused the most serious combined pollution in spring, while O₃ and PM₁₀ caused a certain degree of combined pollution in summer, and the concentration of O₃ was the lowest in autumn and winter, which will not produce combined pollution with particulate pollutants. At the same moment within a day, the particulates and O₃ did not superimpose and cause combined pollution.

Key words urban Guiyang, atmospheric pollutants, combined pollution, temporal and spatial distribution

(编辑 黄晨晖)