

贵阳市大气颗粒物的污染特征及其影响因素分析*

苏志华¹, 王建华²

- (1. 贵州财经大学资源与环境管理学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275)

摘要:通过对贵阳市2014-2015年度的PM_{2.5}、PM₁₀和同期的气象资料进行整理、统计和计算,并进一步对各物理量之间的相互关系进行研究,查明了贵阳市大气颗粒物的污染特征及其影响因素。结果表明,贵阳市大气颗粒物污染以细颗粒物PM_{2.5}污染为主,呈现出夏秋季和冬春季2种典型的季节性污染特征,其中夏秋季以夏季污染最小,其PM_{2.5}日平均值仅为28.79 μg·m⁻³,分布于13~68 μg·m⁻³,冬春季以冬季污染最严重,其PM_{2.5}日均值达到60.64 μg·m⁻³,分布于15~127 μg·m⁻³之间。根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012),贵阳市春、夏、秋、冬PM_{2.5}超标率分别为4.4%、0、5.5%和29.2%;春、夏、秋、冬各季PM_{2.5}和PM₁₀的日变化特征均显示出“双峰”型分布,第一个峰值出现在10:00-13:00时,夏季达到峰值的时间最早,冬季最晚,第二个峰值出现在20:00-23:00时,春季最早,夏季最晚。峰值发生的时间差异受控于各季太阳辐射的变化及居民生活节拍的不同;PM_{2.5}的空间分布大致表现出从市区到郊区污染逐渐减小,反之增强的规律,平均污染程度在冬季表现为市环保站>冶金厅>花溪区>小河区>鸿边门>马鞍山>乌当区>桐木岭,在夏季为鸿边门>冶金厅>小河区>市环保站>花溪区>乌当区>马鞍山>桐木岭;气象条件是影响大气颗粒物污染的首要原因,其次为人类活动排放和局部地理环境。

关键词:贵阳市;大气颗粒物;PM_{2.5};PM₁₀;时空分布

中图分类号: X831 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)05-0077-08

Pollution Characteristics and Determinants of Atmospheric Particulate Matter and Its Determinants in Guiyang

SU Zhihua¹, WANG Jianhua²

- (1. School of Resource & Environmental Management, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550004, China;
2. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The pollution characteristics and determinants of the atmospheric particulates and its determinants in Guiyang were studied through sorting and statistical analysis of the data of PM_{2.5}, PM₁₀ and meteorological series of Guiyang during 2014-2015, together with assessing of their interaction. The result showed that PM_{2.5} was the main cause of atmospheric particulate matter in Guiyang, which possessed typical winter-spring and summer-fall seasonal characteristics. While the average of daily concentration of PM_{2.5} was 28.79 μg·m⁻³ in summer, which was fluctuated between 13 to 68 μg·m⁻³. It was increased to 60.64 μg·m⁻³ in winter, which ranged from 15 to 127 μg·m⁻³. According to the ambient air quality standard (GB3095-2012), the over standard rate of PM_{2.5} in spring, summer, fall and winter was 4.4%, 0, 5.5% and 5.5%, respectively. The daily distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ demonstrated a

* 收稿日期: 2015-04-25

基金项目: 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合J字[2014]2048号)

作者简介: 苏志华(1983年生),男;研究方向:自然地理与环境;通讯作者:王建华;E-mail: adswjh@mail.sysu.edu.cn

“twin peaks”, the first one of which occurred at 10:00 – 13:00, and it came earliest in summer while latest in winter the second peak occurred at 20:00 – 23:00, the first one of which came earliest in spring while latest in summer. This difference was mainly resulted from the change of season solar radiation and human daily routine. The spatial distribution of $PM_{2.5}$ showed roughly gradual reduction from urban to rural, the average of which was ordered as Shihuanbaozhan > Yejinting > Huaxi district > Xiaohedistrict > Hongbianmen > Maanshan > Wudang district > Tongmuling in winter, while the order was Hongbianmen > Yejinting > Xiaohedistrict > Shihuanbaozhan > Huaxi district > Wudang district > Maanshan > Tongmuling while in summer. Meteorological conditions played a dominant role in atmospheric particulate matter pollution, which was followed by human activities and the local geographical environment.

Key words: Guiyang; atmospheric particulate matter; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; temporal and spatial distribution

随着我国经济的高速发展,城市的大气污染问题日趋严重,大气颗粒物成为影响我国环境空气质量的重要污染物^[1-2]。其中,细颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 是反映空气质量状况的重要指标。基于此,美国环境保护局于 1997 年提出了对环境空气中颗粒物标准的修改提案,新增了关于 $PM_{2.5}$ 的标准,规定 $PM_{2.5}$ 的年平均值不得超过 $15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 24 h 平均值不得超过 $65 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[3];我国 1996 年颁布的《环境空气质量标准》(GB3095-1996)^[4] 中提出了 PM_{10} 标准,并于 2012 年 2 月新颁布的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)^[5] 中增加了关于 $PM_{2.5}$ 的标准限值,规定了 $PM_{2.5}$ 年平均及 24 小时平均二级浓度限值分别为 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分别指空气动力学当量直径小于或等于 $10 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物。 PM_{10} 也称为可吸入颗粒物,世界卫生组织 (WHO) 则称之为可进入胸部的颗粒物; $PM_{2.5}$ 因其能够进入人体肺泡,故被定义为可入肺颗粒物^[6],其对人体健康、能见度和气候变化等方面的危害已被国内外学者证实^[7-9]。在大气环境问题频发以及公众环境意识快速提高的背景下,大气污染的研究受到了越来越多的关注,全球范围内开展了一系列 $PM_{2.5}$ 观测研究以了解其来源和影响因素^[10-11]。研究标明,气象条件与大气污染的程度密切相关。降水和强风天气过后空气中大气颗粒物的浓度一般较小,而连续的低压、无风、相对湿度较高的雾天大气颗粒物的浓度相对较高。这是因为降雨对大气悬浮颗粒物有较好的清除效果^[12],或是颗粒物在强风作用下能迅速扩散。而在无风、高湿的雾天,颗粒物多附着、溶解或混合于雾气之中,不但得不到有效的扩散和去除,还易与其他污染物发生化学反应,增加二次气溶胶产生的可能性^[12]。然而,在中国有关

大气颗粒物观测研究的记录主要集中在经济最为发达的少数大城市和沿海地区^[13-18],而在其它的城市研究记录还非常稀少,为了减缓空气污染对该类地区人体健康和社会经济发展的负面影响,迫切需要对该类地区展开有关大气颗粒物的污染特征及其影响因素研究。

贵阳位于贵州的中部,是贵州省省会,曾是典型的以 SO_2 污染为主的城市。然而随着能源结构和产业结构的改变、机动车保有量的快速增加,贵阳市的空气污染在新时期呈现出与以往不同的特征:按照国家新颁布的《环境空气质量标准》(GB3095-2012),贵阳市 2013 年的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 均未达到国家环境空气质量二级标准,而其他的空气质量指标如 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 均达到国家环境空气质量二级标准^[19]。由此可见大气颗粒物是影响贵阳市空气环境质量的首要污染物。然而,贵阳市有关 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染的研究记录仍非常稀少^[20-24],且以往的研究主要局限于贵阳的个别监测点,研究的时间尺度也比较短,很难对贵阳市大气颗粒物污染水平及特征进行较长时间尺度的评价。基于此,本研究利用贵阳市环境监测中心站自动监测的空气质量数据,研究贵阳市大气颗粒物 ($PM_{2.5}$ 和 PM_{10}) 的污染现状和时空分布特征,并结合气象资料分析大气颗粒物污染的影响因素。本研究可以为贵阳市大气污染治理提供科学依据,以及为区域的大气污染防治措施的制定提供参考。

1 监测数据与方法

1.1 监测点的选择与数据的收集

目前,贵阳市共布设太慈桥、市环保站、冶金厅、鸿边门、马鞍山、小河、花溪、金阳、乌当、桐木岭 10 个国控空气自动监测点位。但因建设需要,太慈桥自动监测站点于 2014 年 3 月 1 日起停

运。剩余9个监测站中，桐木岭站位于花溪区的高坡民族中学，花溪区站位于花溪区自来水厂，乌当区站位于乌当区行政中心，金阳区站位于观山湖区的贵阳一中，马鞍山站位于观山湖区的黔灵山公园，鸿边门站位于云岩区的贵阳医学院，小河区站位于小河区行政中心，市环保站位于南明区贵阳市环保局，冶金厅站位于南明区贵州省环科院，空气环境自动监测站点具体位置见图1。在贵阳市的行政区中，云岩区和南明区为老城区，小河区为国家级经济技术开发区，工业占比较重，观山湖区主要功能为商业区和行政中心，乌当区和花溪区属于郊区。根据《环境空气质量标准》（GB3095-2012），以上9个站点均属于空气环境质量二类区。监测站的布设满足空气环境监测标准的要求，即距

地面一定高度，四周通风且无高大的建筑物和局地排放源，空气可以自由流动，地形平坦，受局地环流的影响较小。大气监测标准为HJ 618，自动监测方法为微量振荡天平法和 β 射线法。数据发布标准为《环境空气质量标准》（GB3095-2012）和《环境空气质量指数（AQI）技术规定（试行）》（HJ622-2012）的有关规定，发布的数据包括24 h日均值以及实时浓度值（即1 h平均值）。本研究选取数据的时间范围为2014年3月至2015年2月。

气象条件对污染物的扩散、稀释和积累作用已得到普遍公认。为研究贵阳市气象因素对大气颗粒物污染的影响，本研究收集了贵阳市部分气象资料，包括气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）和降水量（mm）。气象数据摘自中国天气网（<http://www.weather.com.cn>）。

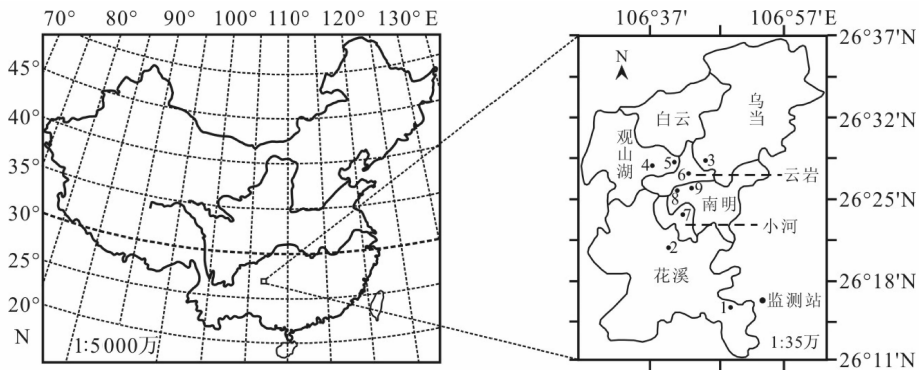


图1 贵阳市空气质量监测站分布图

Fig. 1 Monitoring sites of air quality in Guiyang

1. 桐木岭；2. 花溪区；3. 乌当区；4. 金阳区；5. 马鞍山；6. 鸿边门；7. 小河区；8. 市环保站；9. 冶金厅

1.2 数据处理及研究方法

本研究对贵阳市各监测站的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的24 h平均值数据进行求平均计算，求取贵阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的24 h平均值；并选择春夏秋冬各季中无突变天气变化的时段，时间范围为一周至半个月，对各个监测站一日中同一时刻的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 进行求平均，以获取贵阳市各监测点的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的1 h均值。通过时间序列分析法对筛选和整理过的数据进行分析，以查明贵阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 在一个自然年的年变化特征、各季的日变化特征和空间分布特征。

2 结果与讨论

2.1 贵阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度分布特征

2.1.1 季节性质量浓度变化特征及其分析 为叙述方便，首先把贵阳市的四季划分为春季、夏季、秋季和冬季。贵阳市2014年3月1日至2015年2

月28日 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 日平均值的变化范围较大，分别为11~127和19~161 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最大值可达最小值的12倍。大气颗粒物质量浓度的变化趋势显示出显著的冬春季和夏秋季2种季节性特征，冬春季 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的值较大，污染较为严重，夏秋季 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的值较小，污染较轻（图2）。

在冬春季又以冬季污染的最为严重， $\text{PM}_{2.5}$ 的日均值达到60.64 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，主要集中在15~127 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 的日均值达到了83.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，主要集中在20~161 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；在夏秋季以夏季的污染最轻， $\text{PM}_{2.5}$ 均值仅为28.79 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，主要集中在13~68 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 的日均值仅为50.43 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，主要集中在21~106 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ （表1）。贵阳市大气颗粒物浓度冬春季高于夏秋季，与北京、上海和广州的研究结果相一致^[13-14, 16]。

贵阳市大气颗粒物质量浓度的季节性差异主要受控于气象条件变化。由表2可知，贵阳市夏季太

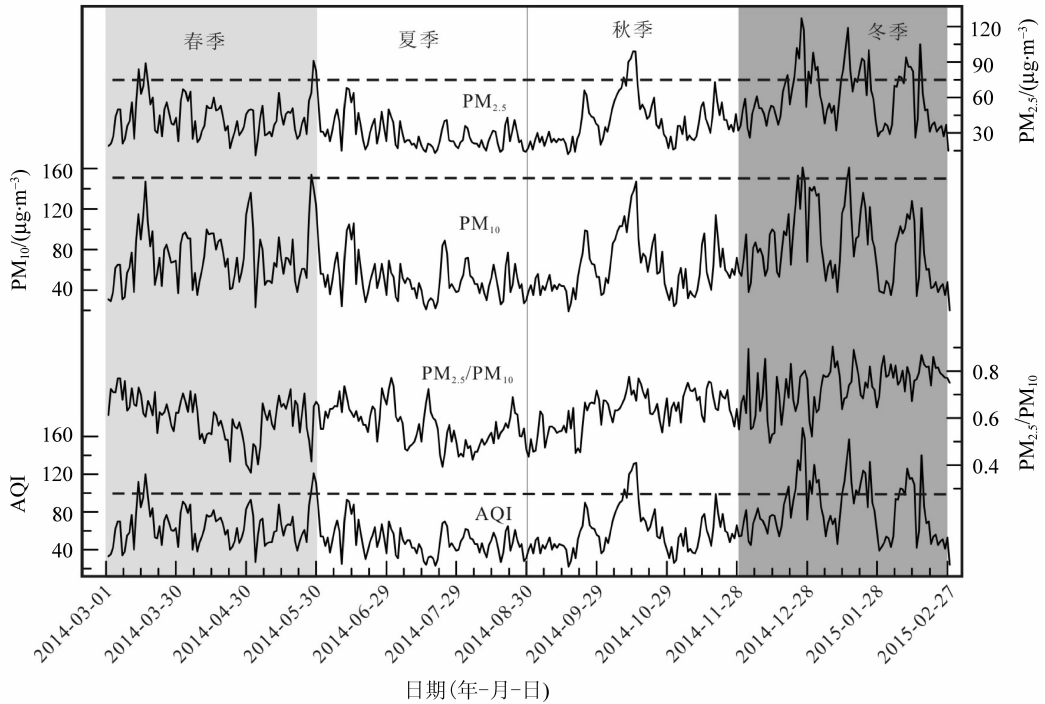


图2 贵阳市2014年3月1日至2015年2月28日的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 及AQI的逐日变化特征

Fig. 2 Daily variation of $PM_{2.5}$, PM_{10} , $PM_{2.5}/PM_{10}$ and AQI during from 2014-03-01 to 2015-02-28 in Guiyang (虚线为《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准中的质量浓度限值)

表1 贵阳市春、夏、秋、冬季大气颗粒物质量浓度及空气质量指数的分布

Table 1 Distribution of $PM_{2.5}$, PM_{10} , $PM_{2.5}/PM_{10}$ mass concentration and AQI in spring, summer, autumn and winter seasons in Guiyang

项目	春季			夏季			秋季			冬季		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
$PM_{2.5}^{1)}$	11	91	43.66	13	68	28.79	23	99	39.92	15	127	60.64
$PM_{10}^{1)}$	23	154	73.02	21	106	50.43	45	147	62.26	20	161	83.92
$PM_{2.5}/PM_{10}$	0.38	0.77	0.61	0.77	0.39	0.57	0.51	0.78	0.63	0.49	0.90	0.74
AQI	27	121	65.6	23	93	49.0	46	132	59.6	24	169	83.6

1) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

阳辐射强烈,地表温度较高,近10年7月份日平均最高气温达到 $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,导致空气对流与湍流强,盛行上升气流,风速较大,不容易形成逆温天气,可以促使大气颗粒物得到有效扩散,尤其对 $PM_{2.5}$ 扩散影响最显著。另外,贵阳夏季主要受海洋气团影响,盛行西南季风,风中携带的颗粒物含量少,而且带来丰沛的降水,近10年7月份平均降水总量为 156 mm ,降水对大气悬浮颗粒有较好的清除效果^[12],起到自然净化空气的作用。冬季气温相对最低,近10年12月份日平均最低温度仅为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,抑制了空气对流,导致风速较小,且受强冷高压影响,冷空气活动频繁,逆温天气发生的频率高且持续时间长,不利于污染物扩散。同时冬季盛行

东北风,降水稀少,近10年12月份平均总降水仅为 22 mm ,对 $PM_{2.5}$ 的冲刷作用不明显^[12];另外,植被繁茂程度的不同也对污染产生重要影响。夏季,植被最为繁茂,叶面积显著增加,湿润且具有一定粗糙度的叶片有利于 $PM_{2.5}$ 的捕获,易于 $PM_{2.5}$ 的净化^[25]。同时,植物的蒸腾作用可以增加空气湿度,降低空气温度,形成有利于 $PM_{2.5}$ 沉降的有利气候条件^[26]。而冬季植被凋零,在四季中对粉尘的吸附最差。贵阳市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 在夏季的均值仅为 0.57 ,而在冬季达到 0.74 (表1),显示夏季大气中细颗粒的含量相对冬季少,印证了空气对流、植被吸附等因素对细颗粒物稀释、扩散及沉降的显著效果。

表2 贵阳市气象要素2000-2010年累年平均均值
Table 2 Mean values of meteorological elements during 2000-2010 in Guiyang

气象参数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
日均最高气温/℃	9	11	16	21	24	26	29	28	25	20	16	11
日均最低气温/℃	2	4	8	13	16	19	21	20	17	13	9	4
平均降水总量/mm	20	22	34	96	152	166	156	136	89	93	49	22

2.1.2 污染特征及超标情况 根据《环境空气质量标准》，居住区、商业交通混合区、文化区、工业区和农村地区为二类环境空气功能区， $PM_{2.5}$ 污染物24 h平均质量浓度限值为 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 污染物24 h平均质量浓度限值为 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [5]。本文选取的研究区域均属于二类环境空气功能区，大气颗粒物的质量浓度限值应为二级标准的质量浓度限值。贵阳市2014年3月1日至2015年2月28日的大气颗粒物的污染特征如图2所示，大气颗粒物的日均质量浓度的变化范围较大，最高值出现在2014年12月26日， $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别为 127 和 $161 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在一年中 $PM_{2.5}$ 有35 d超过《环境空气质量标准》二级标准规定的24 h平均质量浓度限值 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，超标率为9.7%； PM_{10} 只有4 d超过二级标准规定的限制，超标率为1.1%。 $PM_{2.5}$ 的年均值为 $43.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，超过了二级标准的年平均质量浓度限值 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 的年均值为 $67.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，在标准的质量浓度限值之内，未出现超标。 $PM_{2.5}$ 在春、夏、秋、冬分别有4、0、5和26 d超标，超标率分别为4.4%、0、5.5%和29.2%； PM_{10} 超标仅发生在春季和冬季，春季为1 d，冬季为3 d。以上研究结果揭示了贵阳市大气颗粒物污染最严重的季节是冬季，且主要是 $PM_{2.5}$ 污染，春季污染程度次之，夏季最低。贵阳市空气质量指标AQI呈现出明显的季节性特征：冬季最大，AQI冬季的平均值为83.6，集中分布在24~169，夏季最小，AQI的平均值为49，集中分布在23~93（表1）。AQI与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 呈现出协调同步变化的特征（图2），说明AQI的变化受控于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的变化，证明了影响贵阳市空气质量的首要因素是空气中大气颗粒物的质量浓度。

2.2 贵阳市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的日变化特征

选取无突变天气的时段2014年4月14-23日、7月4-13日、10月5-12日、1月22-29日的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 小时质量浓度平均数据为代表，分别研究春、夏、秋、冬四季大气颗粒物在1 d内的

逐时变化特征，结果显示贵阳市四季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日变化呈现出显著差异（图3）。春季， $PM_{2.5}$ 的小时均值为 $42.45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，分布范围为 $37.4 \sim 45.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 的小时均值为 $75.48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，分布范围为 $58.3 \sim 90.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 $PM_{2.5}$ 的变化较为平缓，而 PM_{10} 的变化幅度较大（图3a）。从0:00-6:00时， $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的值逐渐降低，至6:00-8:00时降至最低，随着太阳辐射的逐渐增加，空气温度升高，人类活动逐渐加强，污染排放开始累积 [18, 27]，导致 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度也随之增加， $PM_{2.5}$ 在12:00时增加到最大， PM_{10} 在14:00时增加到最大。午后，太阳辐射有所减弱，但大气及地面累积的温度继续升高，局部温度差异增大，逆温层消失，空气流动性增强，导致大气颗粒物的浓度缓慢降低，在16:00时降低至最小值。从16:00时开始，由于下班高峰的到来，机动车的排放量增加，颗粒物的污染再次呈现逐渐攀升的趋势，到约20:00时达到了一天中的第二个峰值，之后持续下降；夏季， $PM_{2.5}$ 的小时均值仅为 $28.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，分布范围为 $19.50 \sim 24.59 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 的小时均值为 $46.57 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，分布范围为 $36.90 \sim 58.60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日均值为四季中的最小值，污染最轻（图3b）。从0:00-8:00时，大气颗粒物的质量浓度逐渐降低，其中 PM_{10} 降低幅度相对较大，从8:00时开始， $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 逐渐增加，至约10:00时达到最大，早于春季，这与夏季太阳辐射较强，逆温层遭受破坏较早，逆温层破坏之后，空气流动增强使大气颗粒物进一步扩散 [14]。10:00时之后逐渐下降，约17:00时降到最低，而后开始逐渐增加，23:00时达到最大值，这与下午下班机动车排放的积累、夜生活排放叠加及扩散慢等因素有关，夏季第二个“峰值”出现的时间在四季中最晚，可能是因为贵阳市夏季在四季中气候最好，夜生活持续时间最长。

秋季，贵阳市大气颗粒物质量浓度的逐时变化特征与夏季相似，不同之处为达到第一个峰值的时间为11:00时，早于夏季的10:00时（图3c）。

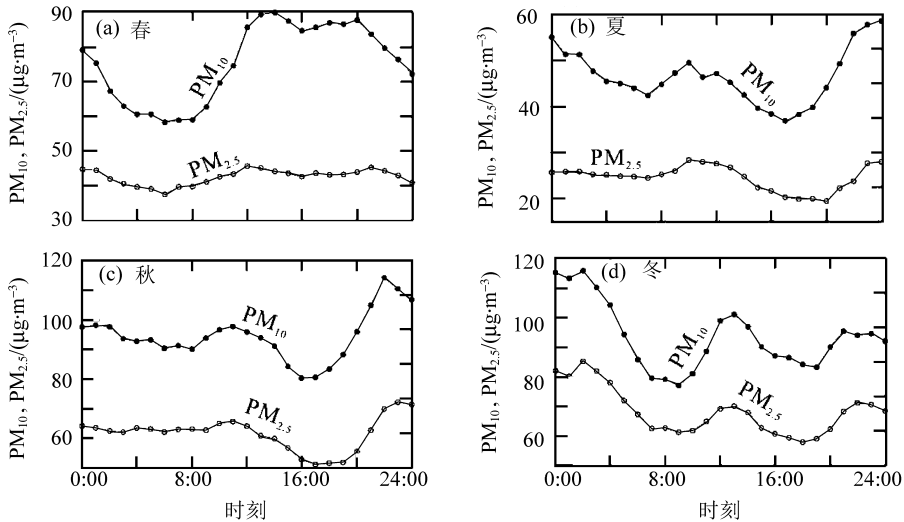


图3 贵阳市2014-2015年度春、夏、秋、冬季大气颗粒物质量浓度的日变化趋势

Fig. 3 Diurnal variations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration in spring, summer, autumn and winter seasons in Guiyang

这与秋季太阳辐射的减弱, 逆温层遭受破坏较夏季晚有关系。另外, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 达到一天中第二个峰值的时间为 22:00 时, 早于夏季的 23:00 时, 这与秋季城市夜生活的提早结束有关系; 冬季, $PM_{2.5}$ 的小时均值为 $68.39 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分布范围为 $58.00 \sim 85.33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 的小时均值为 $93.63 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分布范围为 $77.13 \sim 115.96 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。总体上 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的小时日均值均最大, 表明污染最为严重 (图 3d)。大气颗粒物质量浓度的日变化与夏秋类似, 也显示出“双峰”的变化特征。不同的是达到最值的时间有所滞后, 从 0:00-9:00 时, 大气颗粒物质量浓度逐渐下降, 至 9:00 时点下降到最低, 时间为四季当中的最晚, 从 9:00 时开始, 大气颗粒物质量浓度逐渐增加, 到 13:00 时达到最大值, 比其它 3 个季节滞后, 主要原因是冬季太阳辐射为四季中最弱, 日照开始的时间最晚, 导致逆温层破坏的时间也最晚^[14]。从 13:00-17:00 时逐渐降低, 17:00 时之后逐渐升高, 到约 22:00 时达到最大。通过对比可以发现, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 在春夏秋冬四季的特征均为“双峰”型, 这与赵晨曦和陈丹青的报道相一致^[13,28]。但峰值在四季出现的时间有所不同, 第一个峰值出现的时间在夏季最早, 在冬季最晚; 第二个峰值出现的时间为春季最早, 夏季最晚, 两个“峰值”的产生的时刻不同主要源于各季城市出行高峰期时间的不同, 人类活动作息时段的不同, 导致了机动车尾气排放及城市道路扬尘的差异^[18,27]。

2.3 贵阳市 $PM_{2.5}$ 的空间分布特征及影响因素分析
研究结果显示了贵阳市大气颗粒物污染主要为

$PM_{2.5}$ 污染, 因此仅研究 $PM_{2.5}$ 的空间分布特征。通过对马鞍山、市环保站、乌当区、花溪区、小河区、鸿边门、冶金厅和桐木岭 8 个国控点的 $PM_{2.5}$ 记录进行分析对比 (金阳新区国控点因收集的数据不全, 暂不进行对比), 结果显示 8 个国控点的 $PM_{2.5}$ 具有一致的变化趋势 (图 4), 均表现为冬春季的 $PM_{2.5}$ 值大且波动剧烈, 污染较为严重; 秋季除两次显著的污染事件之外其余污染较轻; 夏季在四季中的 $PM_{2.5}$ 值最小且波动最为平缓, 指示污染最小, 空气质量最好。

8 个国控点 $PM_{2.5}$ 日均值的分布结果 (表 3) 显示: 在冬季, 平均污染程度的从大到小的排列顺序为市环保站 > 冶金厅 > 花溪区 > 小河区 > 鸿边门 > 马鞍山 > 乌当区 > 桐木岭; 在夏季, 平均污染程度从大到小的排列顺序为鸿边门 > 冶金厅 > 小河区 > 市环保站 > 花溪区 > 乌当区 > 马鞍山 > 桐木岭。无论在冬季还是夏季, 桐木岭 $PM_{2.5}$ 的日均值均为最低, 冬季和夏季分别仅为 $44.81 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $17.32 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 乌当区和马鞍山的 $PM_{2.5}$ 在冬季和夏季也均较低。除冬季的花溪区外, $PM_{2.5}$ 的污染特征均显示出离市区越近, 污染越严重, 反之则越轻的规律。这是因为离市区越近, 人类活动越强, 机动车和燃煤等人为源的排放越强^[18,27], 在相同气象条件的情况下, 较强的人为排放源可以增大了 $PM_{2.5}$ 的质量浓度。花溪区在冬季 $PM_{2.5}$ 相对较高, 达到了 $66.83 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 在夏季较低, $PM_{2.5}$ 为 $25.19 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 可能与花溪大学城的建设、房地产的过快发展引发了拆迁, 植被遭受破坏, 扬尘作用增强且在冬季尤其突出有关^[26]。与其余 7 个国

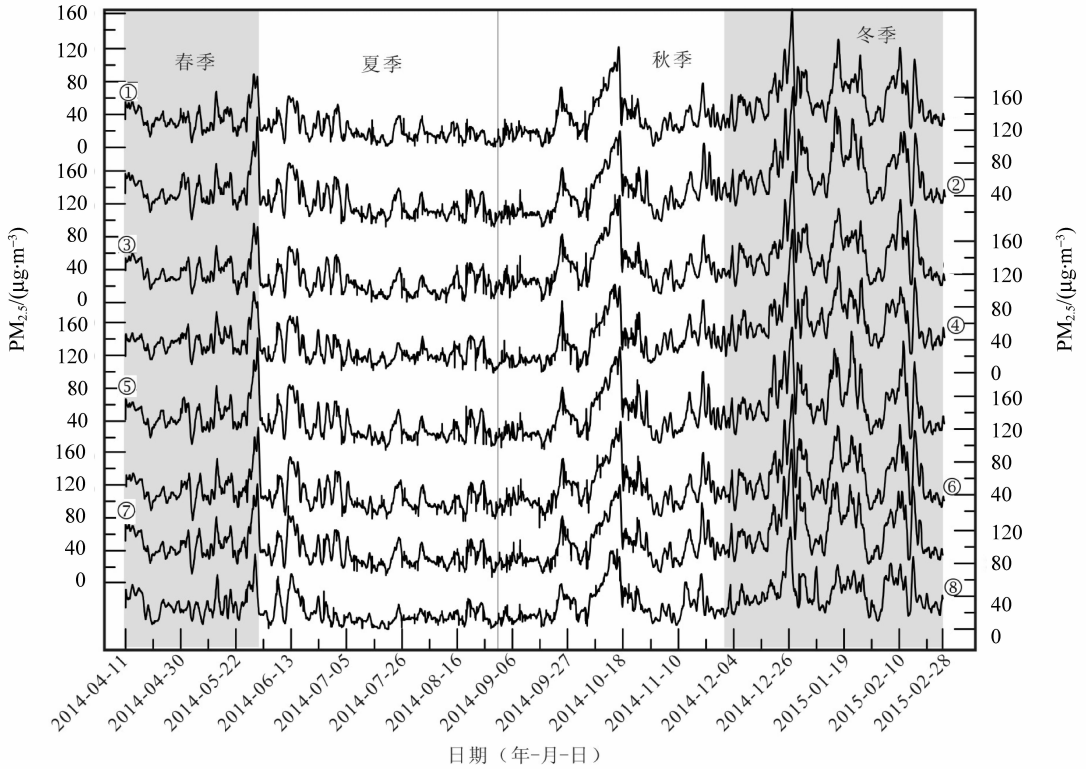


图 4 贵阳市 2014 - 2015 年度 PM_{2.5} 的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distributions of PM_{2.5} mass concentration in Guiyang during 2014 - 2015 year

① 马鞍山；② 市环保站；③ 乌当区；④ 花溪区；⑤ 小河区；⑥ 鸿边门；⑦ 冶金厅；⑧ 桐木岭

控点相比较，桐木岭站点的 PM_{2.5} 总体上最小。这主要是因为桐木岭位于郊区，人类活动较弱，机动车排放和燃煤排放强度较低，加上良好的植被覆盖，有利于吸附大气中的细颗粒物，从而降低 PM_{2.5} 的质量浓度^[25-26]。8 个国控点 PM_{2.5} 一致的变化趋势揭示了其在大气中的质量浓度主要受到气象条件的控制；从郊区到市区，污染逐渐加重进一步说明除气象因素外，人类活动排放和局地的地理环境是影响 PM_{2.5} 质量浓度的重要原因。

3 结 论

1) 于 2014 年 3 月 1 日至 2015 年 2 月 28 日阶段，贵阳市大气颗粒物污染以细颗粒物 PM_{2.5} 污染为主，呈现夏秋季和冬春季 2 种典型的季节性污染特征，夏季污染最小，PM_{2.5} 日平均值为 28.79 μg · m⁻³，分布在 13 ~ 68 μg · m⁻³，冬季污染最严重，PM_{2.5} 日均值为 60.64 μg · m⁻³，分布于 15 ~ 127 μg · m⁻³ 之间；

2) 根据《环境空气质量标准》（GB3095 - 2012），PM_{2.5} 在春、夏、秋、冬各季的超标率分别为 4.4%、0%、5.5% 和 29.2%；

3) 四季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的日变化特征均显示出“双峰”型分布，第一个峰值出现在 10:00 - 13:00 时，夏季达到峰值的时间最早，冬季最晚。第二个峰值出现在 20:00 - 23:00 时，春季最早，夏季最晚。峰值发生的时间差异与各季太阳辐射强度的变化及居民生活节拍的差异有关；

4) 冬季和夏季，贵阳市 PM_{2.5} 的污染特征均显示出从市区到郊区污染逐渐减小，反之增强的特征。在冬季，平均污染程度的顺序为市环保站 > 冶金厅 > 花溪区 > 小河区 > 鸿边门 > 马鞍山 > 乌当区

表 3 贵阳市国控空气自动监测站春、夏、秋及冬季 PM_{2.5} 日平均值的分布特征

Table 3 Daily mean values of PM_{2.5} mass concentration in spring, summer, autumn and winter seasons at Monitoring sites in Guiyang μg · m⁻³

国控点	春季	夏季	秋季	冬季
马鞍山	36.42	20.87	34.45	62.74
市环保站	48.17	29.36	41.49	72.47
乌当区	39.22	24.03	42.41	60.79
花溪区	39.91	25.19	37.21	66.83
小河区	49.49	33.51	45.67	66.19
鸿边门	48.65	35.93	47.24	65.80
冶金厅	49.83	35.56	45.30	67.84
桐木岭	30.35	17.32	29.47	44.81

> 桐木岭。在夏季为鸿边门 > 冶金厅 > 小河区 > 市环保站 > 花溪区 > 乌当区 > 马鞍山 > 桐木岭;

5) 气象条件是影响贵阳大气颗粒物污染程度的首要原因, 其次为人类活动排放和局地环境条件。

参考文献:

- [1] ROPE C A, DOCKERY W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2006, 56(6): 709 - 742.
- [2] HUANG D S, XU J H, ZHANG S Q. Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta, China [J]. Environmental Science & Policy, 2012, 15(1): 38 - 47.
- [3] United States Environmental Protection Agency. Office of Air & Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards, Fact Sheet [S]. EPA's Revised Particulate Matter Standards. 1997.
- [4] 国家环境保护部. GB 3095 - 1996 环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学院出版社, 1996.
- [5] 国家环境保护部. GB 3095 - 2012 环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学院出版社, 2012.
- [6] SLOSS L L, SMITH I M. PM₁₀ and PM_{2.5}: an international perspective [J]. Fuel Process Technol, 2000, 65(66): 127 - 141.
- [7] SAMET J M, DOMINICI F, CURRIERO F C, et al. Fine particulate air pollution and mortality in 20 US Cities, 1987 - 1994 [J]. New England Journal of Medicine, 2000, 343(24): 1742 - 1749.
- [8] WATSON J G. Visibility: Science and regulation [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(6): 628 - 713
- [9] RAMANATHAN V, CRUTZEN P J, KIEHL J T, et al. Atmosphere-Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. Science, 2001, 294(5549): 2119 - 2124.
- [10] MALM W C, SCHICHTEL B A, PITCHFORD M L, et al. Spatial and monthly trends in speciated fine particle concentration in the United States [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2004, 109(D3): 1 - 13.
- [11] VIANA M, KUHLBUSCH T A J, QUEROL X, et al. Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results [J]. Journal of Aerosol Science, 2008, 39(10): 827 - 849
- [12] 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, 16(5): 65 - 68.
- [13] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418 - 427.
- [14] 朱倩茹, 刘永红, 徐伟嘉, 等. 广州 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析 [J]. 中国环境监测, 2013, 29(2): 15 - 21.
- [15] 云慧, 何凌燕, 黄晓锋, 等. 深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 [J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1245 - 1251.
- [16] WANG Y, ZHUANG G S, ZHANG X Y, et al. The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 2935 - 2952.
- [17] 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 等. 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 [J]. 环境科学, 2014, 35(3): 820 - 829.
- [18] 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.
- [19] 贵阳市环保局. 贵阳市 2013 年环境状况公报 [R]. 贵阳, 2013.
- [20] 刘娜, 冯新斌, LANDIS M, 等. 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.
- [21] 肖劲松, 唐雄, 胡宇. 贵阳市大气颗粒物 PM_{2.5} 来源初探 [J]. 环保科技, 2014(5): 1 - 5, 18.
- [22] 李金娟, 杨荣师. 贵阳市大气颗粒物的污染特征及其与主要气象要素的相关性分析 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(1): 91 - 95.
- [23] 张雯婷, 王雪松, 刘兆荣, 等. 贵阳建筑扬尘 PM₁₀ 排放及环境影响的模拟研究 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(2): 258 - 264.
- [24] 杨荣师, 李金娟, 徐露, 等. 贵阳市西郊 PM₁₀ 污染特征及其与主要气象因素的关系探讨 [J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2009, 26(2): 123 - 127.
- [25] 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(8): 395 - 402.
- [26] 梁丹, 王彬, 王云琦, 等. 北京市典型绿化灌木阻滞吸附 PM_{2.5} 能力研究 [J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3605 - 3611.
- [27] DUAN F K, LIU X D, YU T, et al. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(9): 1275 - 1282.
- [28] 陈丹青, 师建中, 肖亮洪, 等. 粤东三市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度分布特征 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(4): 73 - 78.