

李松, 罗绪强. 综合 GIS 的贵阳冬季 $PM_{2.5}$ 污染时空特征及驱动因素分析[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 63–68. [Li Song, Luo Xuqiang. Study on Spatiotemporal Characteristics of $PM_{2.5}$ Pollutant and Its driving Factors Using GIS Technology in Winter[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 63–68.]

综合 GIS 的贵阳冬季 $PM_{2.5}$ 污染时空特征及驱动因素分析^{*}

李松^{1,2}, 罗绪强^{1,3}

(1. 贵州师范学院 资源环境与灾害研究所, 贵州 贵阳 550018; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要: $PM_{2.5}$ 是大气污染的主要物质。通过对贵阳市的太慈桥、市环保站、冶金厅、鸿边门、马鞍山、小河区、金阳新区、乌当区、桐木岭 9 个监测点进行监测, 获取 2013 年 12 月 9 日至 2014 年 1 月 21 日的 $PM_{2.5}$ 日均浓度数据, 以及 2014 年 1 月 7 日 0 时到 2014 年 1 月 20 日 23 时共 336 h 的时均浓度数据, 通过指标统计和计算, 参考世界卫生组织的空气质量准则, 结合地理信息系统技术, 对贵阳市冬季 $PM_{2.5}$ 浓度变化的时空特征, 进行定量和定性分析, 分析污染物浓度变化及其各相关驱动因素之间的关系。结果表明, 冬季贵阳 $PM_{2.5}$ 日均浓度的平均值为 $85.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 日均浓度的最大值和最小值分别是主城区太慈桥 $96.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和远郊区桐木岭 $67.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 全距达 $28.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。日均浓度和时均浓度的抽样平均误差分别为 $4.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。时均浓度变化趋势包括了单峰型、双峰型、递减型、递增型和 U 型等类型, 它们表现出的类似趋势是: 在清晨 6:00 降低到最低值, 并在 21:00 左右升高到最大值。贵阳 $PM_{2.5}$ 浓度变化受气象条件、土地利用、工业污染、扬尘、汽车尾气和燃煤为主的能源结构的影响, 它们表现出复杂的相关性。

关键词: 冬季; $PM_{2.5}$ 浓度; 时空特征; 驱动因素; 贵阳市

中图分类号: X513; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)04-0063-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.04.013

近几年来 $PM_{2.5}$ 成为频繁出现在人们社会生活中的一个热门词汇, 对社会经济发展产生了越来越严重的影响, 受到国内外的广泛关注。早在 2013 年初, 日本因担心空气污染取消学生团访华。在国内因雾霾造成交通事故诱发伤亡的事件也屡有发生。 $PM_{2.5}$ 是空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的大气细颗粒物, 也被称为入肺颗粒物, 是一种成分很复杂的复合污染物。 $PM_{2.5}$ 可以通过无意识吸食、呼吸和皮肤接触等途径进入人体, 危害人体呼吸和消化系统^[1], 引起气道病理变化, 导致气道阻力增加和气道高反应性出现, 并诱发或加剧哮喘症状^[2]。严重的 $PM_{2.5}$ 污染事件, 会导致急性支气管炎患病人数量激增, 哮喘发病人数和儿科门诊量大幅增加^[3-4], 严重损害居民的身体健康。 $PM_{2.5}$ 污染成了影响中国的大事, 在这样的背景下, 2012 年 2 月 29 日颁布了国家标准《环境空气质量标准(GB3095-2012)》^[5], 并发布《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》^[6] 配合实施。当前对 $PM_{2.5}$ 的研究主要有物质组成及来源解析^[7-9]、影

响因素分析^[10-12]、污染特征^[12-13]、疾病诱发机理和健康效应^[14-18]等领域, 还没有见到利用地理信息系统(GIS)技术研究 $PM_{2.5}$ 的空间分布规律。本文综合地理学的学科和 GIS 在空间分析的优势, 研究 2013 年深冬贵阳市 $PM_{2.5}$ 的时间和空间变化规律, 供政府决策和居民生活提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

贵阳简称筑, 地处贵州中部, 因位于贵山之阳而得名, $106^{\circ}7' \sim 107^{\circ}17'E$, $26^{\circ}11' \sim 27^{\circ}22'N$, 是贵州的省会和政治、经济和文化中心, 现辖云岩区、花溪区、南明区、乌当区、白云区、观山湖区, 市区面积 $2\,403 \text{ km}^2$, 耕地面积 9.78 万 hm^2 。喀斯特地貌发育, 地形崎岖破碎, 地势西南高, 东北低。区内最高海拔 $1\,762 \text{ m}$, 最低海拔 506 m , 主城区平均海拔 $1\,000 \text{ m}$ 。地貌以山地、丘

^{*} 收稿日期: 2014-02-24 修回日期: 2014-04-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAC09B01); 贵州省科技厅项目(J20112343); 乌当科技局项目(2012 乌科技合同字第 48 号)

作者简介: 李松(1980-), 男, 贵州省织金县人, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害遥感研究。E-mail: zhijinese@163.com

陵为主，剥蚀丘陵和盆地、谷地、洼地相间分布。2010 年森林覆盖率 41.8%，有林城的雅称。潮湿多雨，多年平均降水量 1 096 mm。南明河从西南向东北流经贵阳，流域面积约占贵阳的 70%。属亚热带湿润温和型气候，有明显的高原季风气候特征，平均气温约 15.3 ℃，极端气温为 32.5 ℃和 -4.1 ℃。2013 年平均风速 8.3 km/h，月均最大和最小风速分别为 6 km/h(10 月)和 13 km/h(7 月)，年平均气压 1015.4 hPa，最低、最高月均气压为 1 008 km/h(夏季)和 1 023 hPa(冬季)。2010 年建成区面积 188.16 km²，城镇人口 294.63 万(第六次人口普查)。

1.2 数据源

数据源来自环保部国家空气质量自动监测站，单位为 μg/m³，有时均和日均两种浓度。PM_{2.5}对应的气象数据来自国际交换站，主要包括气压、气温、风速、湿度、能见度。其中时均气象数据缺 2014 年 1 月 10 日 7 时。PM_{2.5}数据来自 9 个监测点(图 1)，分别是：太慈桥(贵阳发电厂大门旁神奇水厂内)、市环保局(环保局办公楼顶)、冶金厅(原贵州省环科院楼顶)、鸿边门(贵阳医学院基础一号楼顶)、马鞍山(黔灵公园园林科研所内)、小河区(小河区政府楼顶)、金阳新区(贵阳一中内)、乌当区(乌当区行政中心内)、桐木岭(民族高坡中学)。其中，主城区监测点 6 个，远郊区监测点 1 个。本研究采集 2013 年 12 月 9 日到 2014 年 1 月 21 日的 PM_{2.5}日均浓度数据，以及 2014 年 1 月 7 日



图 1 贵阳市 PM_{2.5}监测点位置

0 时到 1 月 20 日共 14 d 的时均数据，数据覆盖了晴朗、阴、小雨、中雨和小雪多类天气。

1.3 研究方法

采用统计分析方法，包括相关系数、变异系数和不重复采用条件下的抽样平均误差分析，研究贵阳 PM_{2.5}浓度变化及影响因素。世界卫生组织的 PM_{2.5}浓度和空气质量等级划分标准^[19]中，最优标准为≤25 μg/m³，次优标准为 25~37.5 μg/m³，第三级标准为 37.5~50 μg/m³，第四级标准为 50~75 μg/m³，第五级标准大于≥75 μg/m³。美国标准和中国标准分别对应 WHO 标准的严格和宽松标准，本研究参考世界卫生组织的日均浓度标准，分析贵阳市 PM_{2.5}的污染特征，见表 1。经差分 GPS 定位后，利用地理信息系统(GIS)技术，将监测点位置转为 shape 点文件。PM_{2.5}数据获取后，依据采集日期建立不同的数据文件，建立字段录入 9 个监测点的 PM_{2.5}信息，以及与其相关的气象和社会经济要素。以 1:10000 地形图为参考，配准最新时相的高分辨率遥感影像，以分析 PM_{2.5}与下垫面的关系，包括土地利用现状和地形。并分析贵阳市 PM_{2.5}浓度变化与气象因素的关系。

表 1 PM_{2.5}日均浓度分级 μg/m³

等级	上限	下限	依据
I	25	0	
II	44	25	增加 1.2% 以下死亡风险
III	63	44	增加 1.2% 死亡风险
IV	88	63	增加 2.5% 死亡风险
V	150	88	增加 5% 的死亡风险
VI		150	增加超过 5% 死亡风险

2 PM_{2.5}浓度变化特征

2.1 PM_{2.5}浓度变化

2013 年 12 月 9 日到 2014 年 1 月 21 日，9 个监测点 PM_{2.5}日均浓度为 85.8 μg/m³，浓度≤均值的监测点有金阳新区(82.5)、鸿边门(85.8)、乌当(82.2)、马鞍山(81.2)和桐木岭(67.8)，高于平均值的监测点有太慈桥(96.1)、小河(95.9)、环保局(91.7)和冶金厅(89.0)，其中最低和最高值分别是桐木岭和太慈桥。监测期间贵阳 PM_{2.5}最低浓度为 2013 年 12 月 15、16 日，平均为 29 μg/m³。日均浓度≥100 μg/m³ 的日数有 14 d，占监测日数的 31.8%。2013 年 12 月 22 日到 2014 年 1 月 6 日，贵阳 PM_{2.5}日均浓度的平均值达 110 μg/m³，污染持续了 16 d，占总监测日数的 36.4%。9 个监测点中，桐木岭 PM_{2.5}符合表 1 中 I 类目标的天数为 3 d，占监测日数的 6.8%，金阳为 2 d，占 4.5%。优于 II 级天数，桐木岭 9 d，马鞍山 6 d，金阳新区、乌当、鸿边门、冶金厅、环保局 5 d，

太慈桥、小河各 3 d。优于 III 级天数桐木岭 20 d, 马鞍山 14 d, 金阳新区 12 d, 乌当、小河 11 d, 其他监测点 10 d。V 级以上污染日数桐木岭 10 d, 占监测日数的 22.7%; 马鞍山 17 d, 占 38.6%; 金阳 18 d, 占 40.9%, 乌当 20 d, 占 45.5%; 鸿边门 23 d, 占 52.3%; 冶金厅 24 d, 占 54.5%; 环保局、小河 28 d, 占 63.6%; 太慈桥 29 d, 占 65.9%。VI 级以上污染日数小河、环保局、金阳各 2 d, 太慈桥 1 d, 见表 2。如图 2 所示, 12 月 15–18 日是监测期 $PM_{2.5}$ 浓度为最低值的时候, 日均浓度 $36.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。19 日后, 浓度开始升高, 桐木岭浓度升高日期延迟了 1 d。污染从 2013 年 12 月 19 日持续到 2014 年 1 月 9 日共 22 d, 占监测日数的 50%。2013 年 12 月 22–26 日是监测期间贵阳 $PM_{2.5}$ 浓度最高, 空气质量最差的时候, 平均浓度超过 $126.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 浓度最低的桐木岭也高于 $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2014 年 1 月 10–12 日, 贵阳 $PM_{2.5}$ 浓度降至低谷, 并于 13 日开始攀升, 1 月 14–21 日的日均浓度为 $93.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中 1 月 16 日 21、22 时贵阳 $PM_{2.5}$ 瞬时浓度超过 $276 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 为监测期最高值。9 个监测点中, 桐木岭的变异系数最高, 达 0.42, 金阳新区 0.38, 它们的 $PM_{2.5}$ 浓度日变化最剧烈。此外, 马鞍山 0.35, 乌当、冶金厅、环保局、小河、鸿边门 0.34, 最低的太慈桥 0.33。总体上, 变异系数和 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关, 相关系数达 -0.87 。

2014 年 1 月 7 日 0 时到 2014 年 1 月 20 日 23 时共 14 d 的时均浓度连续监测, 空气质量最好的桐木岭, 监测点优于 II 级的小时数占其监测总时数的 33.5%, 优于 III 级的小时数占 60.4%, IV 级以上污染明显的小时数占 39.6%, V 级以上污染严重的小时数占 8.8%。其次是马鞍山优于 II 级

者占 21.4%, 优于 III 级者占 35.2%, 劣于 IV 的小时数占 64.8%, V 级以上为 35.5%。金阳新区优于 II 级的小时数为 19.4%, 优于 III 级者占 43.3%, IV 以上污染时数占 56.7%, V 级以上严重污染时数占 27.1%。乌当优于 II 级的小时数为 16.7%, 优于 III 级者占 34.8%, IV 以上污染时数占 65.2%, V 级以上严重污染时数占 37.0%。鸿边门优于 II 级的时数为 15.0%, 优于 III 级为 30.1%, 劣于 IV 级的时数占 69.9%, 劣于 V 级的时数占 44.2%。冶金厅优于 II 级的时数为 15.1%, 优于 III 级者占 30.8%, 劣于 IV 级的时数占 69.2%, 劣于 V 级的时数占 44.6%。环保局优于 II 级的时数为 13.9%, 优于 III 级的时数为 26.6%, 劣于 IV 的时数占 73.4%, 劣于 V 级的时数占 45.5%。小河优于 II 级的小时数为 13.0%, 优于 III 级者占 25.3%, 劣于 IV 级的时数占 74.7%, 劣于 V 级的时数占 46.5%。太慈桥优于 II 级的时数为 10.9%, 优于 III 级的时数为 24.7%, 劣于 IV 的时数占 75.3%, 劣于 V 级的时数占 47.4%, 见表 3。9 个监测点中, 太慈桥、小河、环保局、冶金厅和鸿边门是 $PM_{2.5}$ 的高浓度区。太慈桥与环保局相关系数最高, 为 0.96, 其次是小河为 0.95, 冶金厅、鸿边门分别为 0.93, 都是贵阳 $PM_{2.5}$ 浓度最高的区域。其中, 桐木岭监测点与其他点监测数据的相关系数均值仅 0.58, 其次是马鞍山 0.74, 金阳新区 0.79, 乌当 0.82, 太慈桥 0.83, 小河、冶金厅、鸿边门 0.85, 环保局 0.86。见表 4。

2.2 $PM_{2.5}$ 浓度日变化特征

$PM_{2.5}$ 浓度变化过程复杂(图 3), 为分析 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化特征, 采用如下公式, 计算 2014 年 1 月 7–20 日, 共 14 日中某钟点(0~23 h)时均浓

表 2 贵阳 $PM_{2.5}$ 日均浓度各等级日数统计

标准与站点	马鞍山	环保局	金阳	小河	乌当	鸿边门	冶金厅	太慈桥	桐木岭
I			2						3
II	6	5	3	3	5	5	5	3	6
III	8	5	7	8	6	5	5	7	11
IV	13	6	14	5	13	11	10	5	14
V	17	26	16	26	20	23	24	28	10
VI		2	2	2				1	

表 3 贵阳 $PM_{2.5}$ 时均浓度等级统计表

等级与站点	马鞍山	环保局	金阳	小河	乌当	洪边门	冶金厅	太慈桥	桐木岭
I	15	17	13	12	18	18	20	8	36
II	55	28	48	29	33	31	29	25	74
III	45	41	75	39	55	49	51	42	88
IV	96	90	93	89	86	84	80	85	101
V	110	133	81	131	107	130	131	121	29
VI	6	14	4	16	6	14	14	23	0
合计	327	323	314	316	305	326	325	304	328

表 4 贵阳 PM_{2.5} 日均浓度统计变量

项目与站点	马鞍山	环保局	金阳	小河	乌当	洪边门	冶金厅	太慈桥	桐木岭
最大值/(μg/m ³)	143	157	171	168	137	140	148	165	140
最小值/(μg/m ³)	29	33	22	36	29	30	32	32	13
平均值/(μg/m ³)	81.2	91.7	82.5	95.9	82.2	85.8	89.0	96.1	67.8
变异系数	0.35	0.34	0.38	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.42

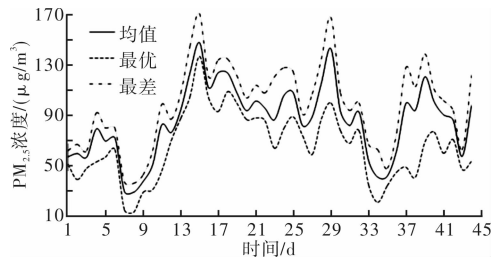


图 2 贵阳 PM_{2.5} 日均浓度变化趋势

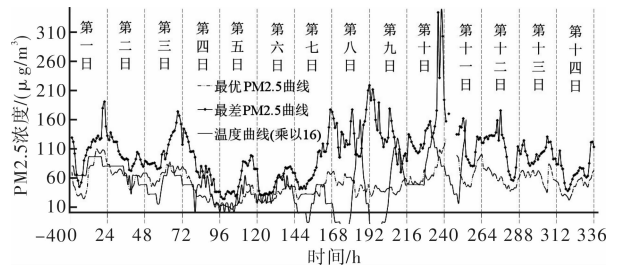


图 3 贵阳 PM_{2.5} 浓度与温度的相关关系

度的均值:

$$\frac{\sum_{i=1}^{14} PM_{ij}}{14}, \quad (j=0, 1, 2 \dots 23)。(1)$$

式中: PM_{ij} 是 14 日中 j 钟点 $PM_{2.5}$ 平均浓度, i 为日期数, 共 14 d; j 为钟点数, 为 0 ~ 23 点, 结果如图 4 所示。日均浓度变化的速率公式如下:

$$\frac{PM_{ij-1} - PM_{ij}}{PM_{ij}}, \quad (i=1, 2 \dots 14; j=0, 1 \dots 23)。(2)$$

式中: i, j 符号同式(1), $j-1$ 为 j 前 1 钟点。

监测的 14 日中, $PM_{2.5}$ 时均浓度日变化曲线有递增型、递减型、单峰型、双峰型、U 型, 如图 3 和图 4 所示。 $PM_{2.5}$ 趋势变化的主导因素复杂多变, 导致浓度变化趋势的复杂性。尽管每个监测点浓度有差异, 但是它们却呈现了相似的变化趋势, 如图 3 和图 4 所示。全省平均值表明, 前 1 日 21:00 以后 $PM_{2.5}$ 浓度逐步降低, 除了凌晨 2:00 浓度上升外, 于凌晨 6:00 降至最低值 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。6:00 后浓度逐步升高, 并在 14:00 - 16:00 出现略微降低的趋势, 平均降幅 1.8%。17:00 至 21:00 点浓度增速显著升高, 从 2.9% 增加到 10.0%, 并在 21:00 达到最大值 $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。马鞍山、环保局、金阳新区、小河、冶金厅和太慈桥监测点 $PM_{2.5}$ 浓度在凌晨 2:00 有 1 个小峰值。马鞍山、环保局、乌当、鸿边门、冶金厅和桐木岭最低浓度出现在 6:00, 此后逐步升高, 并在 12:00 - 14:00 出现 1 个小峰值, 环保局、金阳新区、小河、乌当、鸿边门、冶金厅和太慈桥在 21:00 出现最大浓度, 随后逐步降低, 直至次日清晨。日均浓度最低值为桐木岭 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 最大值是太慈桥 $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

以年为基准, 采用抽样平均误差公式进行数据选取分析:

$$\mu = \sqrt{\frac{(N-n) \sum (x_i - \bar{x})^2}{n^2 (N-1)}}。(3)$$

式中: σ 为标准差, N, n 分别为总体和样本单位数, x_i, \bar{x} 为指标值及其均值。

日均浓度: n 为 44(d), N 为 365.25(d), σ^2

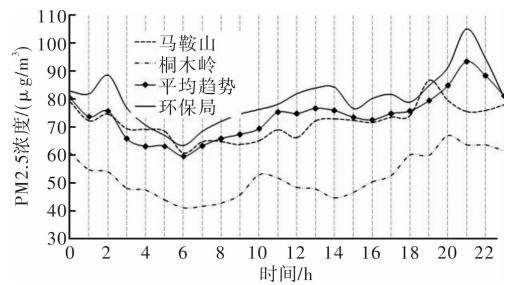


图 4 贵阳 PM_{2.5} 时均浓度变化趋势

为 823.3, 计算得 μ 为 $4.1 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, 其中马鞍山 4.0, 环保局 4.3, 金阳新区 4.3, 小河 4.5, 乌当 3.9, 鸿边门 4.1, 冶金厅 4.2, 太慈桥 4.4, 桐木岭 3.9。时均浓度: n 为 336(h), N 为全年小时数 8 766, σ^2 为 1 106.8, 计算得 μ 为 $1.8 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$, 其中马鞍山 1.9, 环保局 2.1, 金阳新区 1.7, 小河 2.0, 乌当 1.9, 鸿边门 2.1, 冶金厅 2.1, 太慈桥 2.1, 桐木岭 1.3。

3 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因素分析

$PM_{2.5}$ 和其他影响因素的关系非常复杂。皮尔逊相关系数适用于服从二元正态分布的双变量, 并且不排除第三变量的影响, 在进行 Z 标准化处理后, 借助 SPSS 的 Pearson 相关系数, 分析 $PM_{2.5}$ 浓度与其他因素的关系。同时, 借助遥感和 GIS 技术, 利用经验分析方法, 分析 $PM_{2.5}$ 浓度与人类活动和土地利用间的关系。主城区四面环山的岩溶盆地地貌, 不利于空气对流, 也是影响主城区 $PM_{2.5}$ 的重要因素。

3.1 土地利用对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响

城市下垫面和植被与 $PM_{2.5}$ 的扩散具有明显的关系。由于热岛效应的影响, 城区大气温度显著高于城郊和农村, 直接或间接影响了 $PM_{2.5}$ 的扩散。9 个监测点中, 处于主城区的太慈桥、小河、环保局和冶金厅 $PM_{2.5}$ 浓度明显高于其他监测点。在 5 个监测点中, 处于远郊农村的桐木岭浓度最低。张小玲等针对北京的研究也得出类似的结论^[20]。

森林植被对 $\text{PM}_{2.5}$ 的作用主要表现在污染物的沉降和移除污染物, 稀释和促进有害成分扩散的作用, 植被也是促进贵阳 $\text{PM}_{2.5}$ 扩散的积极因素。日均浓度最低的 4 个监测点金阳新区 (82.5)、乌当 (82.2)、马鞍山 (81.2) 和桐木岭 (67.8) 植被覆盖度都比较高。

3.2 人类活动对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

这是目前关于 $\text{PM}_{2.5}$ 影响因素研究和分析比较容易忽略的问题。连续 14 d 的时均浓度数据分析表明, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与人类活动关系密切。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在晚上人类入睡后持续降低, 并在清晨人类起床工作后开始升高, 直至晚上 21:00 后升高至最大值。影响冬季贵阳的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的因素, 主要有汽车尾气排放, 还有工农业生产布局和取暖格局。入夜以后, 由于这些污染源停止或降低排放, 直接导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续降低, 直至第 2 日 6:00 后排放源重新发挥作用。在主城区, 由于城市规划的限制, 加上经济收入较高, 取暖主要靠电, 对本区域 $\text{PM}_{2.5}$ 影响较小。靠近城郊燃煤取暖的比率增加, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响增大。扬尘也是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要来源, 它除了自然扬尘外, 主要来自公路扬尘、城市扬尘、建筑扬尘。

3.3 气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 有重要的影响。以本次监测为例, 1 月 5 日晚开始的逆温层严重地阻碍着空气的对流运动, 垂直输送减弱, 导致污染物的聚集, 最终形成了 1 月 6 日较严重的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染。通过对包括气温 ($^{\circ}\text{C}$)、露点、湿度、气压 (hPa)、能见度和风速 (km/h) 的每小时平均值与 9 个监测点的 Pearson 相关分析, 研究气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响。日均浓度和最高气温相关系数 0.18, 最高风速相关系数 0.03, 与平均湿度相关系数 -0.61, 与露点相关系数 -0.31, 与最低气压的相关系数 -0.24, 与最大能见度相关系数 -0.41。

气温与 $\text{PM}_{2.5}$ 时平均浓度成复杂的相关关系, 相关系数 0.12。如图 4 所示, $x = 163$ (h), 即 13 日 18 时前为正相关, 相关系数 0.76; 而 $x = 164$ 后则无明显相关关系 (为便于对比分析, 图中温度放大了 16 倍), 如图 4 所示。13 日 19 时至 19 日 8 时, 两者是负相关关系, 相关系数为 -0.29。19 日 9 时至 20 日 23 时两者表现为正相关, 相关系数为 0.45。湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关系数 -0.21, 其中 13 日 18 时前为 -0.70, 13 日 19 时至 19 日 8 时为 0.38, 19 日 9 时以后为 -0.41。气压 (hPa) 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关系数 -0.21, 其中 13 日 18 时前为 -0.48, 13 日 19 时至 19 日 8 时为 0.22, 19 日 9 时以后为 -0.75。露点 ($^{\circ}\text{C}$)、风速和 $\text{PM}_{2.5}$ 相关系数为 -0.10。能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关系数 -0.16, 为了验证该相关系数, 在离乌当监测点 3.0 km 处拍摄了空气质量优良和重度污染的照片 (尼康 D3200): 1 月 8 日 14 时, 能见度 1.9 km, 小雨, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 属 II 向 III 过渡的良好级别; 18 日 11 时, 晴, 能见度 6.0 km, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 属于 VI 级重度污染, 能见度 6.0 km, 如图 5 所示。



(a) 2014 年 1 月 8 日 14:00 ($\text{PM}_{2.5}$: 46, 能见度: 1.9 km)



(b) 2014 年 1 月 18 日 11:00 ($\text{PM}_{2.5}$: 170, 能见度: 6 km)

图 5 贵阳乌当 $\text{PM}_{2.5}$ 不同浓度下的能见度对比

4 结论和讨论

监测期间贵阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度 $85.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 时均浓度最高达 $276 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 最低值 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 日均浓度大于 $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 日数占总日数的 36.4%, 贵阳的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况并不乐观。贵阳 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高的是中心城区的太慈桥和小河的 $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 污染物浓度并表现出中心城区向城郊降低的梯度趋势。依据土地用途划分, 交通干线的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大于商业区浓度, 大于居民区浓度, 以森林植被覆盖率高的地方浓度较低。时间维度上, 总体上 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在清晨最低, 傍晚最高。

$\text{PM}_{2.5}$ 污染物受气象因素、汽车尾气、扬尘、土地利用、工业污染、自然环境和能源结构等多种因素的影响, 其浓度变化受大气物质组成和结构的影响, 受气象因素综合影响及主导因素的影响。它们复杂的相关关系表明, 治理 $\text{PM}_{2.5}$ 污染不是通过几个因素能解决的, 它是个复杂的系统工程。这一点可以从欧美发达国家治霾经历得到体现。对于贵州而言, 燃煤和汽车尾气是主要的污染源, 部分地区还叠加了工业污染的影响。除了工业污染源比较集中, 容易治理以外, 其他污染源比较分散, 给 $\text{PM}_{2.5}$ 治理带来了困难。

严重的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染形势下, 污染治理是必须考虑的迫切问题。在 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析, 搞清 $\text{PM}_{2.5}$ 的物质组成和结构的基础上, 采取一些有的放矢的紧急措施, 缓解当前严重的污染状况。从长远的角度, 努力实现集约型的经济发展模式, 积极革新技术, 发展循环经济模式, 努力推广节能减排技术。控制汽车尾气排放, 改变燃煤为主的能源结

构。大力推广环境保护教育, 改变当前全民整体素质落后, 环境意识淡薄的状况, 在此基础上, 提倡绿色的生活方式, 是 $PM_{2.5}$ 污染治理, 以及其他环境整治的重要保障。

参考文献:

- [1] Tyler G, Pahlsson M B, Bengtsson G, et al. Heavy-metal ecology of terrestrial plants, microorganisms and invertebrates[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1989, 47(3/4): 189–215.
- [2] 时彦玲, 邓林红. 细颗粒物($PM_{2.5}$)对气道的病理作用及其与哮喘病理机制的关系[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(2): 127–134.
- [3] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $PM_{2.5}$ 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. *环境科学*, 2013, 35(1): 1–8.
- [4] 殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染与呼吸科(儿呼吸科门诊人数)的相关分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1894–1898.
- [5] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3095–2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [6] 环境保护部. HJ 633–2012 环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [7] Harrison R M, Jones A M, Lawrence R G. Major component composition of PM_{10} and $PM_{2.5}$ from roadside and urban background sites [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 4531–4538.
- [8] Karne Saritha, John Kuruvilla. Source apportionment of fine particulate matter measured in an industrialized coastal urban area of South Texas [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45 (23): 3769–3776.
- [9] Baohua Li, Chenghong Feng. Spatial distribution and source apportionment of PAHs in surficial sediments of the Yangtze Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(3): 636–643.
- [10] Pitchford M, Malm W, Schichtel B, et al. Revised formula for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, 57(11): 1326–1336.
- [11] 孟晓艳, 魏桢, 王瑞斌, 等. 灰霾试点城市 $PM_{2.5}$ 浓度特征及其影响因素分析[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(9): 76–80.
- [12] Xu L L, Chen X Q, Chen J S, et al. Seasonal variations and chemical compositions of $PM_{2.5}$ aerosol in the urban area of Fuzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, 104: 104–105.
- [13] Zhao Xiujuan, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng, et al. Seasonal and diurnal variations of ambient $PM_{2.5}$ concentration in urban and rural environments in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 2893.
- [14] Brook J R, Graham L, Charland J P, et al. Investigation of the motor vehicle exhaust contribution to primary fine particle organic carbon in urban air [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41 (1): 119–135.
- [15] Huang W, Tan J, Kan H, et al. Visibility, air quality and daily mortality in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(10): 3295–3300.
- [16] Kan H, London S J, Chen H, et al. Diurnal temperature range and daily mortality in Shanghai, China [J]. *Environmental Research*, 2007, 103(3): 424–431.
- [17] Ma Y, Chen R, Pan G, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality in Shenyang, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(13): 2473–2480.
- [18] Guo Y, Barnett A G, Zhang Y, et al. The short-term effect of air pollution on cardiovascular mortality in Tianjin, China: comparison of time series and case-crossover analyses [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 409(2): 300–306.
- [19] World Health Organization (WHO). Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide-Global Update 2005-Summary of Risk Assessment[R]. 2005.
- [20] 张小玲, 赵秀娟, 蒲维维, 等. 北京城区和远郊区大气细颗粒物 $PM_{2.5}$ 元素特征对比分析[J]. *中国粉体技术*, 2010, 16 (1): 28–34.

Spatiotemporal Characteristics of $PM_{2.5}$ Pollutant in Guiyang in Winter and Its driving Factors Based on GIS Technology

Li Song^{1, 2} and Luo Xuqiang^{1, 3}

(1. Institute of Resources, Environment and Disasters, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: $PM_{2.5}$ is the main material of atmospheric pollution. Daily average concentration data from December 9, 2013 to January 21, 2014 and hourly average concentration data of 336 h from 0: 00 on January 7, 2014 to 23: 00 on January 20th 2014 are got from monitoring points including Taiciqiao, the municipal environmental protection station, Yejinting, Hongbianmen, Maanshan, Xiaohe, Jinyang, Wudang, Tongmuling. Spatiotemporal characteristics of $PM_{2.5}$ pollutant in Guiyang in winter are analyzed by reference to the World Health Organization air quality standards using quantitative and qualitative method and geographic information system technology. Consequently, a complex relationship between $PM_{2.5}$ variations and related factors is analyzed based on the last analysis. It is shown that the average daily concentration is $85.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and the minimum and maximum daily average concentration is respectively 96.1 of Taiciqiao which is located at the main urban zone, and 67.8 of Tongmuling which is located at urban exurbia. Sampling mean error of daily and hourly mean concentration are respective 4.1 and 1.8. Daily concentration of $PM_{2.5}$ includes single-peak, bimodal, descending, ascending and U-type, but there is a similar evolution from minimum value at 6: 00am to maximum value at 21: 00. $PM_{2.5}$ variations could be driven by complexly correlated factors as climate condition, land use, industrial pollution, dust, vehicle exhaust, and coal-based energy structure.

Key words: winter; $PM_{2.5}$ concentration; spatial and temporal characteristics; driving factors; Guiyang