

姬露露, 陈长坤, 王楠楠. 我国六大中心城市  $PM_{2.5}$  污染特征及诱因对比分析[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 230–234. [Ji LuLu, Chen Changkun and Wang Nannan. Comparison and Analysis on Characteristics and Causes of  $PM_{2.5}$  Pollution in Six Typical Central Cities of China [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 230–234.]

# 我国六大中心城市 $PM_{2.5}$ 污染特征及诱因对比分析<sup>\*</sup>

姬露露<sup>1</sup>, 陈长坤<sup>1,2</sup>, 王楠楠<sup>2</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:** 对2013年11月至2014年2月中旬时段内, 处于不同发展程度的上海、济南、福州、西安、武汉和长沙等六大中心城市  $PM_{2.5}$  指标值进行统计; 分析了各个城市  $PM_{2.5}$  污染特征, 并对比研究了导致该类污染的内外原因。结果表明: 内在因素方面, 城市  $PM_{2.5}$  污染程度与其发展速度呈倒 U 型关系; 特别是产业结构对城市  $PM_{2.5}$  污染的影响尤为显著; 外在因素方面, 充沛的降水量对区域该类污染的改善作用明显, 地形因素是导致地区  $PM_{2.5}$  严重超标的重要原因, 来自区域污染源的影响解释了相邻城市该指标变化规律相似的现象。

**关键词:** 城市;  $PM_{2.5}$ ; 污染特征; 诱因分析

**中图分类号:** X43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000–811X(2014)04–0230–05

**doi:** 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.04.042

自2000年以来, 随着我国城市化进程的加快, 区域环境污染急剧恶化。其中, 以大型城市群频繁出现的霾灾害最为突出, 尤其是在2013年春、冬两个季节, 我国出现大范围、持续性霾污染, 多地出现  $PM_{2.5}$  爆表情况, 致使  $PM_{2.5}$  一时成为热议焦点。 $PM_{2.5}$  浓度过高将不仅危害人们的身心健康<sup>[1]</sup>, 同时也会导致空气能见度降低, 进而对人们的生产与生活造成严重的不利影响<sup>[2]</sup>。而作为城市群的核心区域, 中心城市所面临的空气污染情况则更为严重, 又因其在区域发展中处于非常重要的地位, 使得对该类城市  $PM_{2.5}$  污染特征及原因进行研究, 以便提出有针对性的应对措施, 显得尤为迫切。

目前区域霾灾害已成为备受关注的研究热点, 而学者们多围绕特定城市的少量、短期的  $PM_{2.5}$  指标监测数据展开研究<sup>[3–6]</sup>; 其中杜新黎等人对西安市环境空气  $PM_{2.5}$  污染现状及对策进行研究<sup>[4]</sup>; 同时周家斌分析研究了武汉市冬、夏季大气  $PM_{2.5}$  浓度及其烃类化合物的变化特征<sup>[5]</sup>。但是, 对于不同城市该类污染的显著特征及深层次、多角度原因的对比研究还相对较少, 而这正是全面认识和治理区域环境污染的重要内容, 所以有必要通过

比较分析的方法, 来研究城市间不同的污染特征, 进而总结导致该类污染的内外原因及有效治理方法。

以上海、济南、福州、西安、武汉、长沙等六大中心城市为研究对象, 将其在2013年11月至2014年2月中旬期间, 对应的  $PM_{2.5}$  数据进行统计、处理, 并在此基础上对比分析了各个城市  $PM_{2.5}$  的污染特征及诱因, 从而为区域空气污染的有效治理提供相应的参考。

## 1 资料与数据来源

目前, 我国城市群密集的中东部以及东南沿海地区, 是经济发展的核心地区, 但空气污染情况却极为严重。因而, 我们将以城市群综合实力等级为依据<sup>[7]</sup>, 结合空气质量重点关注的三区十群, 从中选取了处于不同发展程度的六大城市群所对应的中心城市上海、济南、福建、武汉、西安、长沙作为研究对象。本文涉及到的环境监测数据均来源于天气后报网, 具体分析了  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、CO 指标值以及降水日数等相关数据, 在此基础上, 对各个城市的  $PM_{2.5}$  污染情况进行了进一步的综合分析。

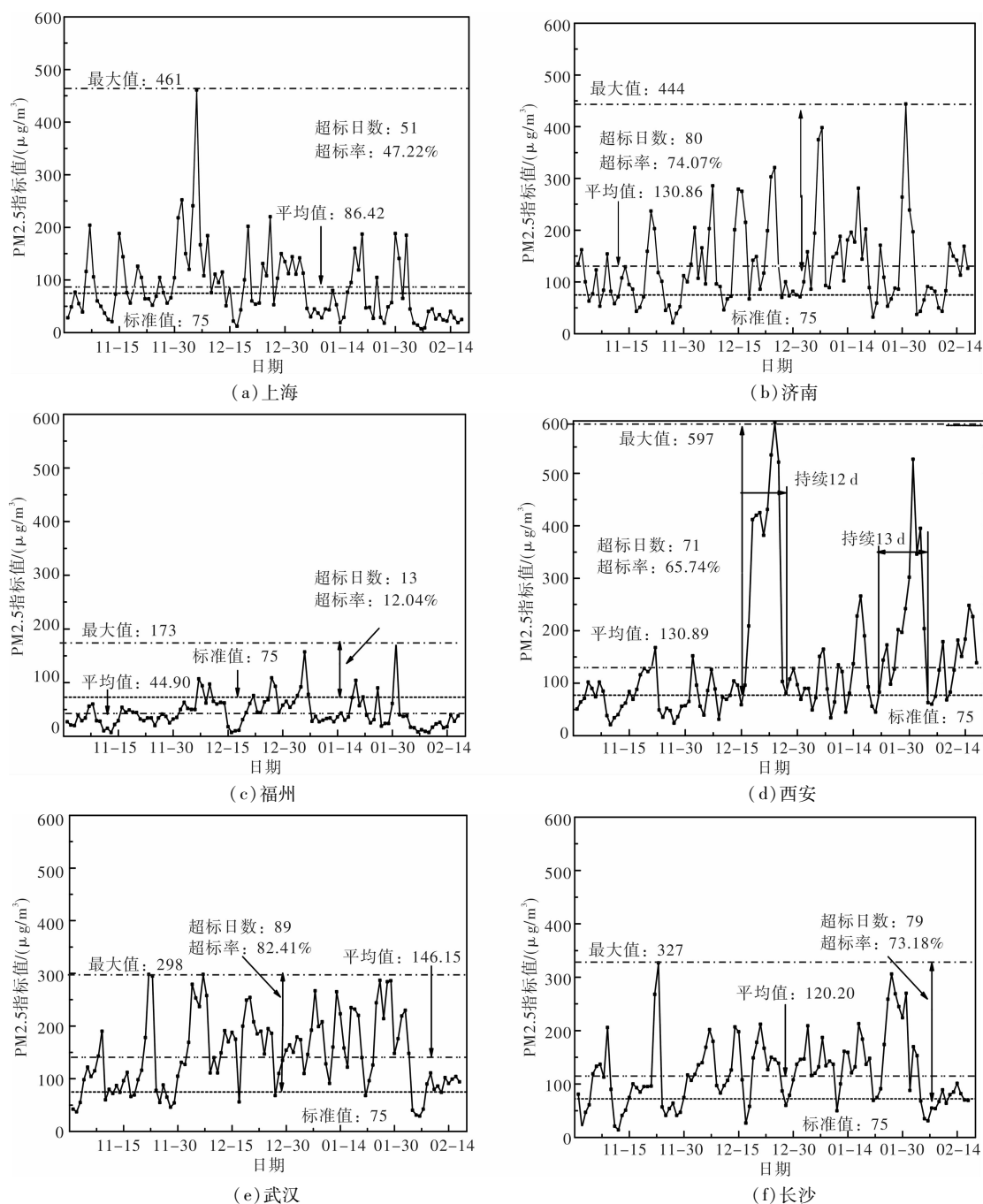
<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014–03–26      修回日期: 2014–05–21

基金项目: 湖南省自然科学基金重点项目(12JJ2033); 中央高校基本科研业务费用专项资金

作者简介: 姬露露(1989–), 女, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要研究重大突发公共事件演化与控制。E-mail: jilu0926@163.com.

通讯作者: 陈长坤(1977–), 男, 福建福安人, 博士, 教授, 从事重大突发公共事件演化与控制研究。

E-mail: cckchen@csu.edu.cn.

图1 2013年11月1日至2014年2月17日六大中心城市 PM<sub>2.5</sub> 指标统计图

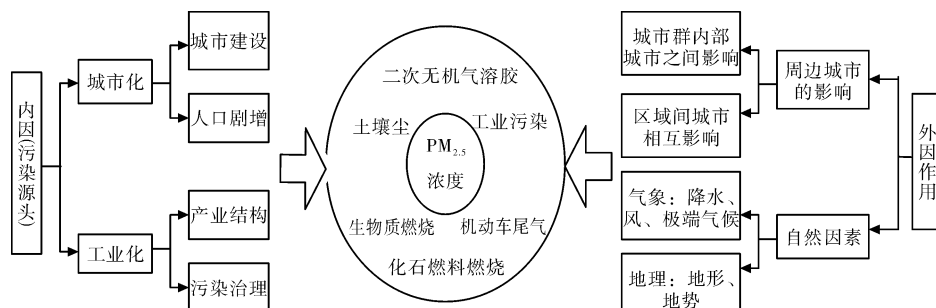
## 2 结果与分析

### 2.1 六大中心城市 PM<sub>2.5</sub> 指标值的对比分析

图1中给出了上述六大中心城市在对应的108 d内的 PM<sub>2.5</sub> 指标值,并给出了各城市 PM<sub>2.5</sub> 指标的最大值、平均值以及超标日数和超标率(即超标日数/总日数)。

从图1可以看出,整体而言,在2013年12月及2014年1月,各城市 PM<sub>2.5</sub> 污染情况明显严重于其他两个月;另外,1月30日之后的几天内,即春节期间,因烟花爆竹大量燃放,各城市 PM<sub>2.5</sub> 指

标值均有所上升;而在2014年2月10日之后各城市指标值迅速下降,空气质量大有好转。在地域方面还可以看出,沿海城市福州与上海的 PM<sub>2.5</sub> 污染程度比内陆城市相对要低,其 PM<sub>2.5</sub> 指标的平均值分别为 44.90 μg/m<sup>3</sup> 与 86.42 μg/m<sup>3</sup>,而超标率分别为 12.04% (超标日数为 13 d) 与 47.22% (超标日数为 51 d),均明显低于其他四个内陆城市(具体参见图1);而与南方城市相比,北方城市西安、济南该指标更易出现骤升骤降的突变特点。六大中心城市中,PM<sub>2.5</sub> 指标的最大值出现在北方内陆城市西安,达到 597 μg/m<sup>3</sup>,其次是上海和济南,分别达到 461 μg/m<sup>3</sup> 与 444 μg/m<sup>3</sup>,而沿海城

图2 影响中心城市PM<sub>2.5</sub>指标的内外因素分析图

市福州该指标最小，为  $157 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，武汉和长沙则分别为  $298 \mu\text{g}/\text{m}^3$  与  $327 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

同时，各城市中，武汉的PM<sub>2.5</sub>指标平均值最大，达到  $146.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ （超过福州的3倍），其超标率也最高，达到82.41%，即108 d中有89 d该市的PM<sub>2.5</sub>超标。其次是西安与济南，PM<sub>2.5</sub>指标平均值分别达到  $130.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $130.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标率分别为65.74%（超标日数达71 d）与74.07%（超标日数达80 d）。此外，还可以看出，同处于中南部地区的武汉与长沙的对应指标具有非常相似的变化规律，呈现一定的关联性。以上数据表明，武汉雾霾灾害天气的发生次数最为频繁、持续时间最长，而西安发生雾霾灾害时的超标程度最高、发生雾霾时发造成的污染情况最为严重。

## 2.2 内、外因作用分析

PM<sub>2.5</sub>主要来源于空气中的土壤尘、机动车尾气中的小颗粒毒害物质、生物质和化石燃料燃烧后的悬浮微粒，以及这些物质在大气中混合而形成的二次无机气溶胶等微小颗粒。目前，城市空气多呈复合式污染，一方面，地区产业结构特征，特别是工业所占的比重以及城市综合发展程度，是影响PM<sub>2.5</sub>污染的主要内在原因。另一方面，诸如区域地势、地形、降水量、季风，以及周边区域污染影响等外在因素的作用，使得城市群内PM<sub>2.5</sub>污染状况更为严峻，而在对应的中心城市该现象则更为显著。具体内外诱因分析如图2所示。

## 2.3 内因具体影响分析

图3与图4中分别给出了六大城市中的SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>及CO指标的柱状均值。结合图1，对PM<sub>2.5</sub>指标平均值进行比较分析表明，城市的发展程度及工业发展状况对区域PM<sub>2.5</sub>指标具有显著影响。例如六大城市中，福州作为海峡两岸城市群的中心城市，经济实力较强，产业结构已稳定，同时也是海峡西岸先进制造业基地（以电子产品等为主）和现代服务业中心，重工业基地较少，使得以上三项指标均为最小，PM<sub>2.5</sub>指标值最低，空气质量最好。此外，发展最好的长三角城市群中心城市

上海，以上指标值也相对较低，虽然在12月初上海出现了严重的霾污染，但后续空气质量很快好转，这可能与该城市先进的灾害预警、应对能力以及对环境治理的投入力度等因素密不可分。相反，处于快速发展阶段的武汉、西安及济南三座城市，由于产业结构不均衡、多为粗放型增长，且工业比重较大，与工业排放密切相关的NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>指标均普遍偏高，这应是导致以上三座城市PM<sub>2.5</sub>污染持续严重的一个主要原因。此外，图4表明，作为北方城市的西安与济南，冬季的供暖烧煤（CO指标最高），也是导致该阶段PM<sub>2.5</sub>污染严重的一个重要因素。而在六大城市中，发展相对较慢，规模较小的长株潭核心城市长沙，较以上三个城市则要好一些，SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>及CO指标相对要低。

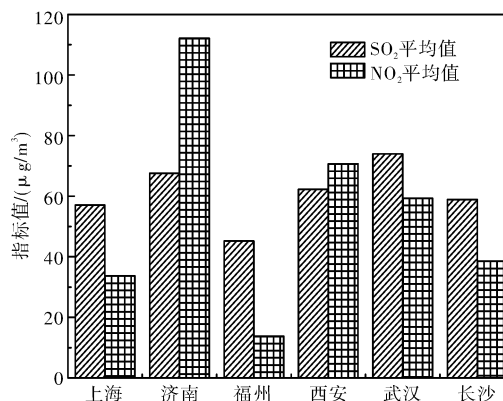
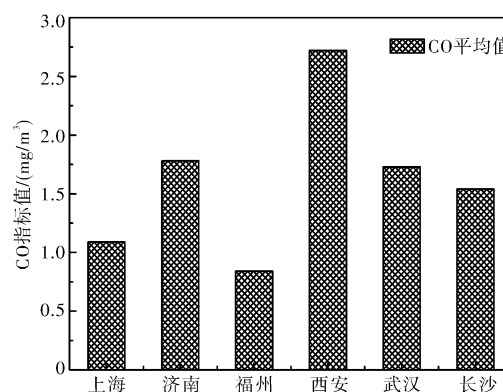
图3 六大城市SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>指标均值柱状图

图4 六大城市CO指标均值柱状图

总体而言, 区域空气的污染程度与城市发展水平之间大致呈倒 U 型关系, 具体关系如图 5 所示。由上分析知, 内因是导致各大城市 PM<sub>2.5</sub> 污染严重的根源, 是主要原因。因此相关城市应合理调整产业结构, 实现企业高效安全、环保生产, 提高资源利用率, 并通过开发新能源来减少化石能源的使用, 进而改善该类污染现状。

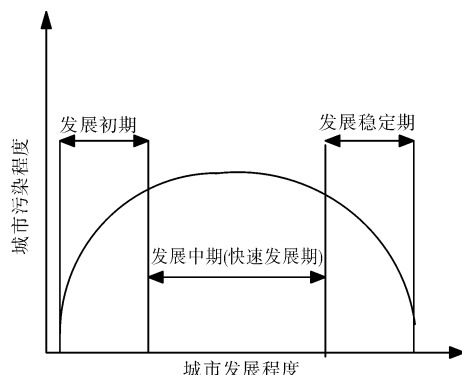


图5 城市发展速度与污染情况的倒 U 关系图

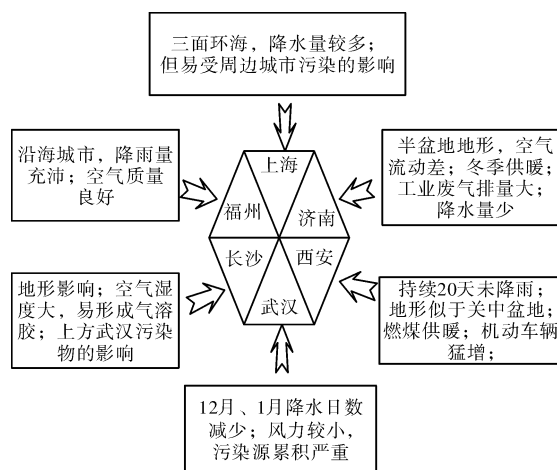


图6 影响各个城市 PM<sub>2.5</sub> 指标的具体外因分析

## 2.4 外因影响的具体表现

除了内因之外, 每个城市所处的地理位置以及相应的气候、降水等外在因素也对各个城市 PM<sub>2.5</sub> 的污染状况具有重要的影响。图 6 中给出了各个城市 PM<sub>2.5</sub> 污染特性的外在原因分析。图 7 中给出了六大城市在该阶段的降水日数统计柱状图。

从图 7 可以看出, 六大城市 12 月份的降雨量较 11 月均显著减少, 同期风力也有所减弱。特别是在六大城市中, 西安 12 月份的降雨日数为 0, 由于长期连续无雨, 该城市在 12 月 17 日 PM<sub>2.5</sub> 指标直线上升, 不仅变化幅度大, 而且超出达标值 450  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 持续超标时间更是长达 12 d, 造成连续 8 d 的霾天气, 给人们的生活造成严重的危害。

而进入 2014 年 2 月份后, 我国绝大多数地区出现持续降水天气, 各城市 PM<sub>2.5</sub> 指标值均迅速降

低, 空气质量大有改善。由此可见, 气象因素中降水量对区域 PM<sub>2.5</sub> 污染具有显著的作用。

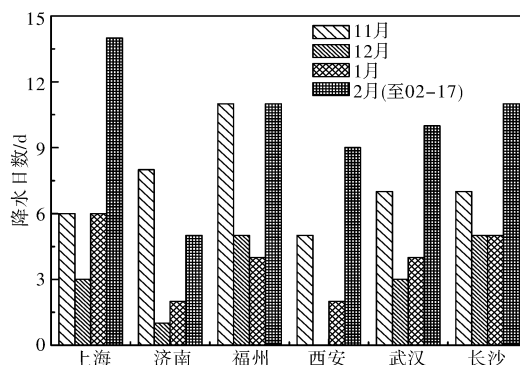


图7 六大城市各月份降水日数统计柱状图

(注: 西安 12 月无数据表明 12 月该城市降水日数为 0)

其次, 根据图 1(e) 及(f), 可以看出武汉和长沙两个城市 PM<sub>2.5</sub> 指标变化规律存在极为相似的情况, 而且相对于武汉, 长沙该指标的变化呈略微滞后的一致性, 即长沙 PM<sub>2.5</sub> 对应的极值点总是滞后于武汉 1~2 d, 具体比较分析如图 8 所示。这主要是因为: 一方面, 武汉作为长江中游城市群的中心, 是重要的制造业基地, 也是综合交通运输枢纽, 自身 PM<sub>2.5</sub> 污染十分严重, 且对周边地区的空气质量影响也较大; 而另一方面, 长沙的地形具有四周高、中间低的特点, 这使得污染物更易于从周围进入后而难以扩散出去, 累积效应显著。以上因素使得, 位于武汉南部且较为接近的长沙, 受武汉污染物跨境传输的影响巨大, 最终呈现出了与武汉类似且存在一定滞后性的污染特征。

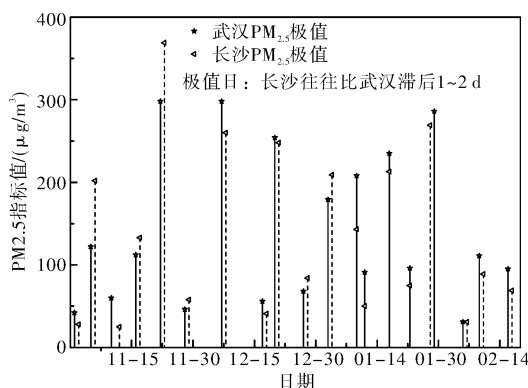


图8 武汉、长沙 PM<sub>2.5</sub> 指标变化规律相关比较分析图

此外, 地形、地势对 PM<sub>2.5</sub> 污染物的汇聚与扩散情况起到了很关键的作用。例如, 沿海城市福州与上海, 因较低的气压及海风的作用, 污染物扩散情况良好, 这也是导致其 PM<sub>2.5</sub> 指标值持续相对较低、空气质量达标率较高的重要原因。然而, 对于北方城市西安, 其地形表现为南接秦岭, 北抵黄土高原, 即处于关中盆地的地形, 因此, 当来自北方的冷空气与南边秦岭山脉的暖气流汇聚

于关中平原, 却因难以流动扩散, 而形成逆温层, 这些使得西安及其周边城市经历了 2013 年度最为严重的霾灾害污染。

综上所述, 气象、气候、地形等外因也是影响各个城市  $PM_{2.5}$  指标的关键因素, 各个城市由于其所处的地理位置、气候条件、地形等不同, 也使得这些外因具有不同的特点; 而对于一些城市, 受到邻近城市污染影响则显得尤为显著, 这说明了  $PM_{2.5}$  的污染, 具有跨区域跨省份扩散蔓延的特点, 对于这些城市, 则需要针对环境污染进行整体区域的综合预防与治理<sup>[8-9]</sup>。

### 3 结论

对 2013 年 11 月至 2014 年 2 月 17 日共 108 d 期间内, 上海、济南、福建、西安、武汉以及长沙六大中心城市  $PM_{2.5}$  污染状况的特征及原因对比分析, 最终得到以下 4 方面的结论:

(1) 以武汉和济南两个重点工业城市  $PM_{2.5}$  污染情况为例, 城市  $PM_{2.5}$  污染与当地产业结构紧密相关; 相反, 对比分析以服务业和先进制造业为主导产业的福州及上海, 该类污染则相对较轻。

(2) 针对上述六个城市的发展程度, 以及对应的  $PM_{2.5}$  污染程度, 进而可以推测出城市化进程与该指标之间呈现出倒 U 型的对应关系。

(3) 气象因素对空气质量的影响十分显著, 其中, 降水情况对区域整体空气质量的改善具有重要的作用, 同时, 相对于雨水丰富的南方城市, 西安与济南两个北方城市受降水天气的影响更

著,  $PM_{2.5}$  指标值波动性较大; 另外, 以西安、长沙为例, 地理位置、地势情况等因素在一定程度上恶化了城市空气污染。

(4) 对武汉和长沙  $PM_{2.5}$  指标变化规律的对比分析可知, 来自周边地区污染源的影响也是导致某地  $PM_{2.5}$  污染的重要因素。

### 参考文献:

- [1] 张衍桑, 马国霞, 於方, 等. 2013 年 1 月灰霾污染事件期间京津冀地区  $PM_{2.5}$  污染的人体健康损害评估[J]. 中华医学杂志, 2013, 93(34): 2707-2710.
- [2] Chen J, Zhao C S, Ma N, et al. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain[J]. Atmos-Chem-Phys, 2012, 12(11): 4935-4950.
- [3] Liao Y F, Wu X Y, Pan Z X, et al. Climatic characteristics of haze in Hunan Province during 1996-2006[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(5): 260-265.
- [4] 杜新黎, 李扬扬, 白慧莉, 等. 西安市环境空气  $PM_{2.5}$  污染现状及对策初探[J]. 中国环境监测, 2013, 29(6): 44-60.
- [5] 周家斌, 黄磊, 钱佳, 等. 武汉市冬夏季大气  $PM_{2.5}$  浓度及其烃类化合物的变化特征[J]. 环境污染与预防, 2013, 13(1): 109-115.
- [6] 陈磊. 自然灾害社会脆弱评估研究——以上海市为例[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 98-103.
- [7] 姚士谋, 李青, 武清华. 我国城市群总体发展趋势与方向初探[J]. 地理研究, 2010, 29(8): 1345-1354.
- [8] 吴晓涛. 突发事件区域应急联动影响因素的实证研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 139-146.
- [9] 余纳新. 基于层次分析法的城市灾害应急管理指标分析[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 152-157.
- [10] 廖永丰, 赵飞, 王志强, 等. 2000-2011 年中国自然灾害灾情空间分布格局分析[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 55-60.

## Comparison and Analysis on Characteristics and Causes of $PM_{2.5}$ Pollution in Six Typical Central Cities of China

Ji Lulu<sup>1</sup>, Chen Changkun<sup>1,2</sup> and Wang Nannan<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The data of  $PM_{2.5}$  index in six typical central cities in china as Shanghai, Jinan, Fuzhou, Xi'an, Wuhan and Changsha with different development levels during November 2013 to mid-February 2014 are collected and processed. The characteristics of  $PM_{2.5}$  pollution in each city are analyzed and compared, and the external and internal causes are explored further. The results could be given as follows: as for the internal factors, the relationship between the development speed and the pollution level of  $PM_{2.5}$  renders a reversed U-shape; additionally, the condition of  $PM_{2.5}$  pollution is greatly affected by the industrial structure of cities. As for external causes, the polluted situation is mostly ameliorated by the abundant precipitation; Meanwhile, the terrain factor plays an important role in the extremely overload of  $PM_{2.5}$ ; In addition, the influence of neighboring areas' pollution gives a good explanation of the similar index Variation between nearby cities.

**Key words:** cities;  $PM_{2.5}$ ; characteristics of pollution; analysis for causes