

中国大范围雾霾期间大气污染特征分析

吕效谱, 成海容, 王祖武, 张帆

(武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:为分析我国2013年1月份大范围雾霾成因及特点,在收集相关污染物与气象数据的基础上,运用主成分及相关性分析,对雾霾期间我国8个重点城市大气细颗粒物($PM_{2.5}$)浓度、粒径分布,时空变化规律,雾霾与气象因素的关系以及雾霾期间各城市大气污染指标的主成分及相关性进行了分析.结果显示雾霾期间8个城市 $PM_{2.5}$ 平均超标2.34倍,11~14号超标最为严重, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 浓度比值平均为0.72,高湿、逆温、低压、静风等气象条件有利于雾霾的形成, $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 等表现出较好的相关性,主成分分析表明多数城市表现出明显的复合污染特征.此次雾霾是以特殊气象条件为主导的机动车尾气及煤烟型复合污染引起的大范围污染现象.

关键词:雾霾; $PM_{2.5}$;气象条件;机动车尾气;复合污染

中图分类号:X51 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9102(2013)03-0104-07

随着我国城市化进程的加快,各类环境问题日益凸显.2013年1月份我国遭受持续雾霾天气,多个城市大气环境质量达到六级重度污染,AQI指数达到500上限.雾霾天气使城市空气质量明显下降,严重影响人体健康,同时低能见度影响下的交通安全事故频发.人类生产活动,包括交通运输、工业生产、生物质燃烧等产生的一次颗粒物,各类气态污染物经过光化学反应产生的二次颗粒物,在一定的温度、湿度条件下形成气溶胶体系.大气气溶胶在对流层大气稳定度高的情况下可长期存在并积累,最终形成雾霾.

国内外关于雾霾期间大气污染特征的研究大多针对某个城市^[1-5],具有地域局限性,不利于从区域气候特征以及污染物迁移扩散的角度考察大范围雾霾的生消.本文在分析雾霾期间大气颗粒物粒径分布以及 $PM_{2.5}$ 时空变化规律的基础上,从雾霾与气象因素的关系以及雾霾期间主要大气污染物主成分分析2个方面对2013年1月份我国大范围雾霾形成原因进行初步分析,以期为大范围雾霾研究以及预

防控制提供理论支持.

1 数据来源

1.1 各污染物数据

刘俊^[1]、张桂芹^[2]等研究发现城市灰霾期间各类大气污染物均出现超标现象;陈晓秋^[3]等对福州市各点位 PM_{10} 化学成分谱分析表明,冬季 PM_{10} 以二次离子和总碳占首位;周丽^[4]等研究发现北京市冬季 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 、 O_3 均表现出了较好的相关性,相关系数分别为0.72、0.83、-0.41.雾霾期间各类大气污染指标数据是分析大气污染程度、类型及特征所必需的.

本次雾霾波及到包括京津冀、山东、山西、河南、陕西、湖北等十几个省市,本文对雾霾期间污染严重的北京、天津、石家庄、济南、太原、郑州、西安、武汉8个重点城市的大气污染特征进行分析.雾霾期间中国环境监测总站全国空气质量实时发布平台公布了我国主要城市空气质量实时监测数据.为了综合

收稿日期:2013-06-17

基金项目:国家自然科学基金(41103061);博士点基金(20110141120015);国家973计划项目(2011CB707106)

通信作者:王祖武(1962-),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事大气污染与大气环境研究. E-mail: hjge1891@163.com

反映雾霾期间各城市空气污染特征,本文取各城市每日 10:00,17:00,23:00 大气污染物实时数据,其均值反映各指标日变化特征。

1.2 气象条件

雾霾的产生,特别是二次气溶胶的形成有赖于特定的气象条件,如温度、湿度、辐射强度等;雾霾发展与消除也受风力、降水、降雪等因素影响。同时,雾霾细颗粒一方面对太阳光线的散射、吸收等作用减少了到达地面的太阳辐射,影响地面温度、能见度;另一方面,PM_{2.5}是大气中最主要的凝结,其含量和成分对成云和地面雾的生消有重要影响^[5]。可见雾霾与气象要素之间有着密切的联系,雾霾期间各城市基本气象条件对于分析雾霾生消具有重要意义。

本次研究结合中国环境监测总站发布的污染物数据^[6]以及中国气象台发布的气象数据^[7]对雾霾期间各城市大气污染特征进行分析。

2 分析方法

多因子之间的相关性分析是判断因子相互作用以及是否有共同来源的重要方法;主成分分析可以将相关因子归类并计算各自分担率以及成分贡献率,对于探讨雾霾期间各城市主要污染因子及其来源有重要作用。因此,本文主要利用 SPSS 软件对各污染因子进行主成分及相关性分析。

3 结果与讨论

大气中颗粒物增多,能见度降低是雾和霾 2 种天气现象的共性,二者的主要区别在于含水量的差异^[8]。而细粒子对雾霾形成、发展的影响一直是研究的热点,吴兑^[9]等人通过比较气溶胶中粒子数量浓度和气溶胶粒子谱峰值得出广州市灰霾天气能见度的恶化主要与细粒子的关系比较大。陈燕^[10]等人研究发现,南阳市 2004~2005 年灰霾天数月比例与 PM₁₀浓度有很强相关性,Pearson 相关系数达 0.8 以上。因此 PM₁₀,PM_{2.5}是本次我国大范围雾霾期间大气污染特征研究的 2 个主要指标。

图 1 为本次雾霾期间 8 个重点城市 PM_{2.5},PM₁₀浓度均值与我国《环境质量标准》(GB3095-2012)中规定的 PM_{2.5}日均值之间的比较。PM_{2.5}超标倍数 1.59~4.22 倍,平均超标 2.34 倍,其中以石家庄市最为严重,其次是济南和西安。

X. Querol^[11-12]等人研究表明 PM_{2.5}/PM₁₀比值在不同地区变化很大,对于城市样品,该比值主要取决于交通源的排放。大量研究显示,正常情况下 PM_{2.5}占 PM₁₀质量浓度的 65%~75%左右^[13-14],G.

M. Marcazzan^[15]等人对米兰市区样品分析发现,冬季 PM_{2.5}/PM₁₀比值为 0.73±0.13,出现严重大气污染时,该比值会升高到 80%~90%。

雾霾期间 8 个城市 PM_{2.5}/PM₁₀浓度比值平均 0.72,其中石家庄、济南最小为 0.58,北京最大为 0.98。说明交通源污染对本次雾霾影响较大,特别是北京、太原、武汉三市,PM_{2.5}/PM₁₀值分别为 0.98,0.83 和 0.78。

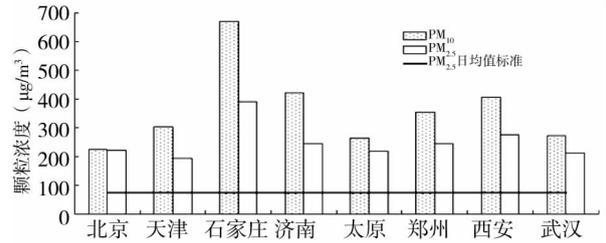


图 1 雾霾期间各城市 PM_{2.5}及 PM₁₀均值

Fig. 1 Mean value of PM_{2.5} and PM₁₀ during haze period

3.1 时空变化规律

分析雾霾的时空变化特征有助于了解雾霾产生、发展以及消除规律,同时也可以了解区域性污染对大范围雾霾形成的影响。以武汉市为例,图 2 反映了 2013.1.2~2013.1.22 雾霾期间武汉市 PM_{2.5}日均值变化。

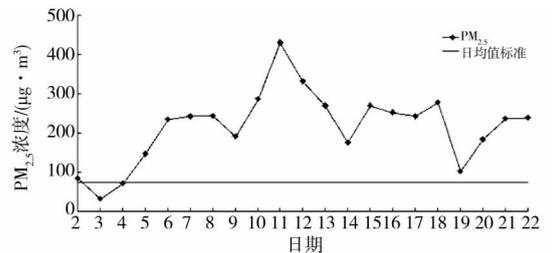


图 2 雾霾期间武汉市 PM_{2.5}变化特征

Fig. 2 PM_{2.5} change features during haze period in Wuhan

可见,武汉市 2013 年 1 月份雾霾期间 PM_{2.5}日均值从 4 号开始攀升,持续严重超标,其中 10~13 号以及 15~18 号表现最严重,11~14 号以及 18~19 号有较明显的改善。PM_{2.5}日均值峰值出现在 11 号,浓度达到 431 μg/m³。

对其他城市雾霾发展过程分析表明:济南与郑州变化趋势接近,PM_{2.5}日均值极值点分别出现在 8,11,14,19 号和 8,10,14,18 号。两市 PM_{2.5}日均值自 2 号开始持续升高,8 号达到极值,9 号有明显下降,均在 14 号达到峰值。太原与西安变化趋势接近,PM_{2.5}日均值极值点分别出现在 6,14,18,21 和 6,

14,18 号. 两市 $PM_{2.5}$ 日均值均在 2~4, 11, 15 号有明显降低趋势.

以河北省境内的北京、天津、石家庄为例, 分析 3 个城市 $PM_{2.5}$ 日均值变化, 结果如图 3 所示.

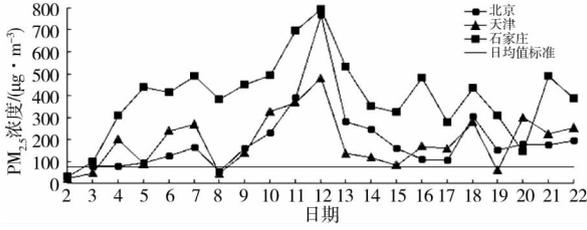


图 3 北京、天津、石家庄 $PM_{2.5}$ 日均值变化

Fig. 3 $PM_{2.5}$ daily average of Beijing, Tianjin and Shijiazhuang

3 号开始, 三市 $PM_{2.5}$ 日均值超标并较快增长, 其中石家庄市增幅最大, 4 号即达到 $311\mu\text{g}/\text{m}^3$ 并维持在较高浓度. 8 号同时出现极小值, 之后又表现出急速上升趋势, 并且均在 12 号达到峰值, 13~14 号期间有明显降低, 之后在 18 号再次同日出现峰值. 从三市雾霾期间 $PM_{2.5}$ 的日变化情况可以看出雾霾产生及发展过程具有区域性特征. 污染物质的迁移是导致区域污染的重要原因, 特别是细粒子 $PM_{2.5}$ 具有远距离迁移能力^[16-17], 在局地环流的作用下, 造成区域污染; 地区区域气候条件的相似性变化也可能是导致 $PM_{2.5}$ 日均值相似性变化的原因.

3.2 雾霾与气象因素的关系

以北京市为例, 由图 4 可知, 2013. 1. 1~2013. 1. 10 期间北京市平均气温低于历史同期平均气温, 2013. 1. 11~2013. 1. 22 期间除 20 号最高气温低于历史同期平均最高气温外, 其余时期均高于历史平均气温, 特别是夜间最低气温有明显偏高.

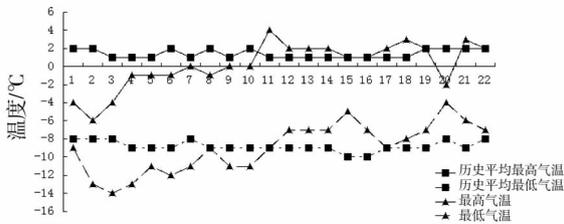


图 4 北京市雾霾期间气温与同时期历史气温比较

Fig. 4 Temperature comparison between haze period and historical average in Beijing

结合图 3 所示北京雾霾发展规律可以发现气温与 $PM_{2.5}$ 浓度表现出相同的变化趋势. 这主要是因为白天温度偏高, 辐射强度大, 有利于光化学反应进行; 夜间逆温致使污染物扩散困难, 积累并导致雾

霾. 雾霾形成后, 大气稳定度高, 对流边界层发展缓慢, 更加不利于污染的消除, 形成恶性循环^[6].

以武汉市为例, 中国气象台发布的气象数据显示, 2013 年 1 月份武汉市除 20, 21, 22 号 3 天出现最高气温低于历史平均最高气温, 最低气温高于历史平均最低气温外, 其余时期最高气温基本高于历史平均最高气温, 最低气温低于历史平均最低气温.

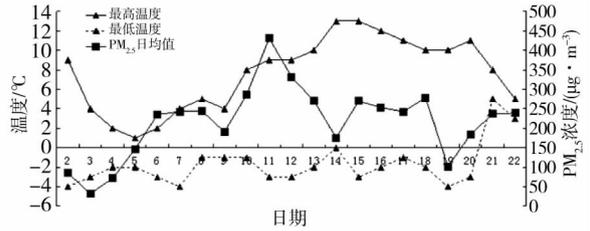


图 5 武汉市雾霾期间 $PM_{2.5}$ 浓度与气温变化

Fig. 5 Variation of $PM_{2.5}$ and temperature during haze period in Wuhan

图 5 反映了雾霾期间武汉市 $PM_{2.5}$ 日均值与气温之间的关系, 可以看到 $PM_{2.5}$ 日均值与最低气温存在一定的负相关性. 这是因为武汉市 1 月份历史平均气温基本在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 而 2013 年 1 月份夜间最低气温在 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 有利于空气中的水蒸气液化形成小液滴, 即雾滴. 雾滴在白天温度上升的过程中蒸发浓缩, 最终气相成核形成气溶胶, 即霾滴. 随着夜间湿度增加, 温度降低, 霾滴作为凝结核吸附水汽以及 SO_2 , NO_x , NH_3 等物质, 再次形成雾滴^[18], 如此循环导致持续雾霾天气.

另外, 降雨降雪、大气压强、空气湿度、风力风向、混合层高度等对雾霾的形成都有影响. 随机选择武汉市 2013 年冬季 20 天, 对 $PM_{2.5}$ 日均值与大气压强和平均风速之间的关系进行研究发发现: $PM_{2.5}$ 容易在低压静风的条件下积累从而形成雾霾天气, 如图 6、图 7 (数据来源于武汉市环境空气质量实时发布系统).

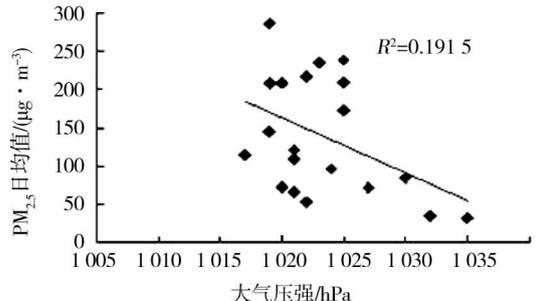


图 6 $PM_{2.5}$ 与大气压强关系

Fig. 6 Correlations between $PM_{2.5}$ and atmospheric pressure

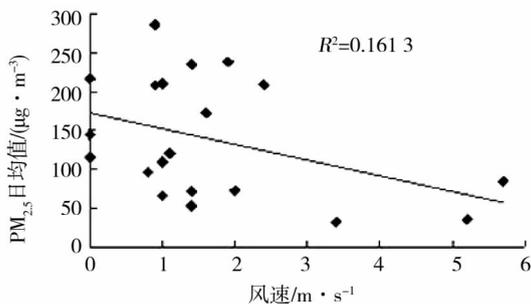


图7 PM_{2.5}与平均风速关系

Fig. 7 Correlations between PM_{2.5} and mean wind velocity

大气压强对 PM_{2.5} 的影响主要表现在低气压场情况下容易形成静风天气,不利于各类污染物的迁移扩散,造成颗粒物的积累,同时更加有利于气态污染物进行非均相反应,相关研究表明,大气污染过程易发生在高压后部或低压槽前部^[6];风速风向主要影响近地面污染物的水平迁移,高空气流的输送则是导致区域性污染的主要原因^[19],徐祥德^[6]等人研究发现 PM_{2.5} 浓度与前期及同期风场均成负相关,其中与前期风场的负相关性显著;北京地区夏末秋初气象要素对 PM_{2.5} 污染的影响研究表明混合层高度突破 1 500 m 时,垂直扩散对污染物的稀释扩散效果明显^[19].

2013 年 1 月份影响我国的冷空气势力较弱,大部分地区气温有所回升,近地点相对湿度较大,风力较小,夜间辐射降温幅度较大,容易使空气达到饱和凝结,从而形成雾.雾的出现一方面使空气中污染物扩散困难,加重了大气污染,另一方面雾滴与霾粒相互转化,形成持续雾霾天气.可见,特殊的气象条件对此次大范围雾霾的形成及发展有重要影响.

3.3 主成分及相关性分析

大量研究表明,大气颗粒物(PM)主要由碳组分,水溶性离子(硫酸盐、硝酸盐、氨盐)以及地质尘几个部分组成.其中包括(NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃, NH₄Cl 等的二次无机气溶胶占 PM_{2.5} 质量浓度 30% 左右^[12,20-22].水溶性离子是细颗粒物中非常重要的化学组成部分,研究证实水溶性离子对大气的消光系数具有较高的分担率,是雾霾导致能见度降低的主要原因^[23-24].魏玉香^[23]等对南京市霾天气水溶性离子研究发现 SO₂, NO₂ 等前体物质向硫酸盐和硝酸盐的转化在霾日均高于非霾日,霾天气下水溶性离子质量浓度占 PM_{2.5} 的 47%,是非霾日 31% 的 1.6 倍.研究 SO₂, NO₂ 等气态污染物与 PM_{2.5} 的相关性及雾霾天气大气污染指标主成分分析可以定性的判断雾霾期间各城市大气污染类型及主要贡献源.

以济南市为例,利用 SPSS 软件对雾霾期间大气指标进行主成分分析.表 1 和图 8 分别为济南市雾霾期间大气污染指标方差分解主成分提取分析表和各指标在主成分空间上的投影.

表 1 济南市雾霾期间大气污染指标方差分解主成分提取分析表

Tab. 1 Extraction of principal components analysis of Jinan city

主成分	初始特征值			提取求和的平方载荷		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	4.204	70.068	70.068	4.204	70.068	70.068
2	0.856	14.271	84.339	0.856	14.271	84.339
3	0.405	6.743	91.082	-	-	-
4	0.367	6.111	97.193	-	-	-
5	0.121	2.014	99.207	-	-	-
6	0.048	0.793	100.000	-	-	-

表 1 显示提取得到的两个因子特征值分别为 4.204 和 0.856,特征值可以看成是表示主成分影响力度大小的指标,如果特征值小于 1 表示该主成分的解释力度不够^[25].而从累计贡献率的角度看,成分 1 贡献率达到 70.068%,说明能解释大部分数据.因此认为成分 1 能基本反映济南市雾霾期间大气污染状况.

图 8 所示各指标距离中心轴越远表示与主成分之间的相关性越好,各指标之间相距越近表示相互之间联系越紧密^[25].可见 PM_{2.5}, PM₁₀, CO 与主成分 1 之间的相关系数最大,说明其为雾霾期间济南市主要大气污染物,其次是 SO₂ 和 NO₂. PM_{2.5}, PM₁₀, CO 和 SO₂ 相距较近,说明相关性较好.而 CO 和 SO₂ 均是化石燃料燃烧产物,同时内燃机也是 CO 的重要排放源,考虑到 PM_{2.5} 与 NO₂ 的相关性也较强,说明汽车尾气污染也是本次济南市雾霾形成的重要原因.因此,雾霾期间济南市大气污染状况表现出显著的以煤烟型污染为主导的煤烟型与汽车尾气复合污染特征.

采用同样的方法对北京、武汉等其他城市进行分析,提取得到各城市雾霾期间主要污染成分以及各指标之间的相关性,表 2 为各城市主成分分析得到的 2 个主成分特征值.

表 2 各城市主成分特征值

Tab. 2 Extraction sums of squared loadings

主成分	北京	天津	石家庄	济南	郑州	太原	西安	武汉
主成分 1	3.126	3.887	3.551	4.204	3.839	3.043	3.024	4.431
主成分 2	1.489	0.895	1.101	0.856	0.998	1.328	1.199	0.824

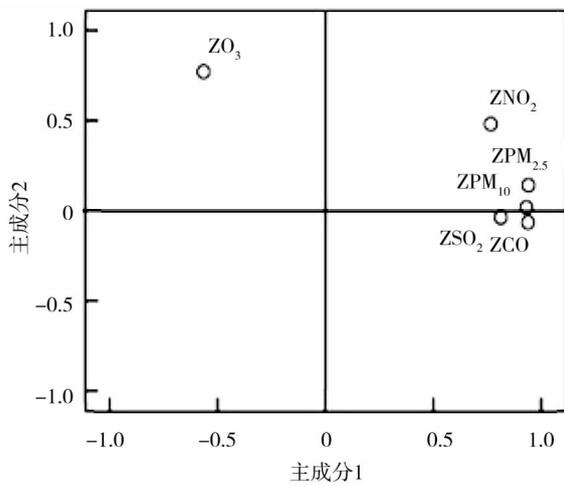


图8 各污染指标在主成分空间上的投影

Fig. 8 Projection of the principal component space

各城市成分1特征值均较大,而成分2特征值在1.000左右,从贡献率的角度看,除太原和西安外,成分1贡献率都超过70%,因此本文主要选取成分1进行分析。

分析表明,各城市主成分1中 $PM_{2.5}$, PM_{10} 均与主成分间有很好的相关关系,相关系数平均分别为0.903和0.912,说明可吸入颗粒物,特别是细粒子是雾霾期间的主要污染物;各城市 $PM_{2.5}$ 与CO均表现出很高的相关性,且各污染指标在主成分空间上的投影显示CO与 NO_2 联系紧密,说明汽车尾气污染是本次雾霾的重要成因。

其中,郑州、石家庄、北京 $PM_{2.5}$, PM_{10} 与 SO_2 相关性较差,说明3个城市 SO_2 对雾霾贡献较小,这可能是由于北方冬季气温及湿度相对较低, SO_4^{2-} 的生成以 SO_2 气相氧化为主要途径^[11,26],过程较为缓慢;天津、济南、武汉 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 相关关系显著,相关系数分别达到0.688,0.686和0.594,表明燃料燃烧产生的 SO_2 ,CO等气体也对3个城市雾霾天气有较大影响;除太原外,其余城市 O_3 均与主成分1成负相关,说明 O_3 参与光化学反应促进了二次气溶胶的形成。

表3为西安、太原两市大气污染指标方差分解主成分提取表,要准确的反映雾霾期间大气污染状况,即主成分贡献率 $\geq 85\%$ ^[27-28],西安、太原两市分别需要提取4个和3个主成分,说明雾霾期间两市具有典型的复合污染特征,从两市主成分图中也能得到体现,如图9、图10。

从图中可以看出,西安市各种大气污染指标与主成分1和主成分2均有较好的相关性,而 $PM_{2.5}$ 与

各指标之间并无紧密联系,太原市 O_3 与主成分1,2均呈正相关,且与主成分2有较好的相关性,可见两市有比较明显的多污染物、多污染源以及多途径的复合污染现象。

表3 西安、太原两市大气污染指标方差分解主成分提取表
Tab.3 Extraction of principal components analysis of Xi'an and Taiyuan city

主成分	初始特征值			提取求和的平方载荷		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.024	50.406	50.406	3.043	50.716	50.716
2	1.199	19.991	70.397	1.328	22.125	72.841
3	0.754	12.566	82.963	0.890	14.834	87.675
4	0.487	8.123	91.085	0.366	6.102	93.777
5	0.428	7.131	98.217	0.290	4.830	98.607
6	0.107	1.783	100.000	0.084	1.393	100.000

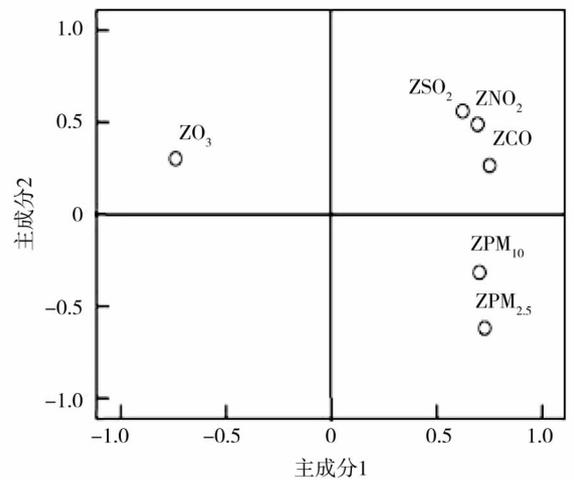


图9 西安市主成分图

Fig. 9 Component plot of Xi'an city

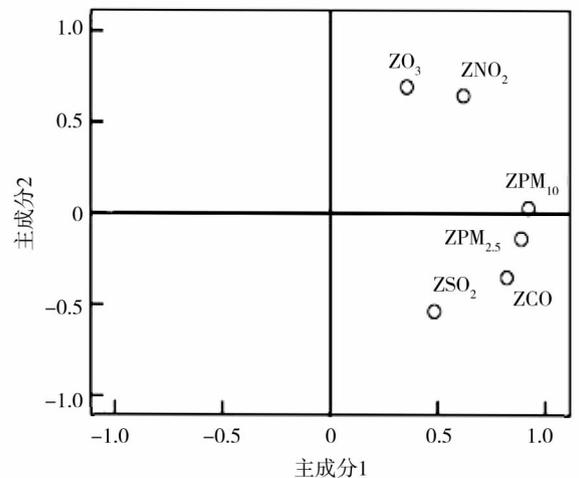


图10 太原市主成分图

Fig. 10 Component plot of Taiyuan city

4 结论

1) 我国大范围雾霾期间, 8 个重点城市 $PM_{2.5}$, PM_{10} 均严重超标, 其中 $PM_{2.5}$ 平均超标 2.34 倍, 以石家庄市污染最严重; $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值平均为 0.72, 北京最高为 0.98, 交通源污染对雾霾天气贡献明显。

2) 雾霾形成、发展表现出显著的区域性特点, 北京、天津、石家庄三市变化趋势基本相同, 济南与郑州、太原与西安发展趋势接近。区域气候变化及污染物的迁移是形成雾霾区域性的主要原因。

3) 夜间逆温与雾的形成导致污染物扩散困难, 以及雾霾相互转化形成恶性循环, 加上长期无降水降雪及大风天气, 是本次持续大范围雾霾天气的气象成因。

4) 主成分及相关性分析表明, 机动车尾气污染是本次雾霾形成的重要原因, 济南、太原、西安等市大气污染表现出显著的复合污染特征。

参考文献:

[1] 刘俊, 袁鸾, 刘衍君. 珠江三角洲一次大范围雾霾天气下的空气污染特征分析[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(4): 78-82.
Liu J, Yuan L, Liu Y J. Analysis of air pollution characteristics of a wide range haze in Pearl river delta [J]. Environment Science Survey, 2009, 28(4): 78-82.

[2] 张桂芹, 焦红云, 齐鸣, 等. 济南市灰霾期大气复合污染特征分析[J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27(1): 84-88.
Zhang G Q, Jiao H Y, Qi M, et al. Analysis of atmospheric compound pollution characteristics of haze period in Jinan [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2012, 27(1): 84-88.

[3] 陈晓秋, 冯宏芳, 余华. 福州市春冬季灰霾天气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染水平和气象特征分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(9): 44-49.
Chen X Q, Feng H F, Yu H. Analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution status and meteorological feature of haze weather in spring and winter in Fuzhou [J]. Environment Science and Management, 2009, 34(9): 44-49.

[4] 周丽, 徐祥德, 丁国安, 等. 北京地区气溶胶 $PM_{2.5}$ 粒子浓度的相关因子及其估算模型[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 761-771.
Zhou L, Xu X D, Ding G A, et al. Correlation factors and estimation model of aerosol $PM_{2.5}$ mass concentrations in Beijing district [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(6): 761-771.

[5] 王珏, 孟维宸, 张奇漪, 等. 南京市灰霾期间颗粒物污染的主要影响源识别[J]. 环境保护科学, 2012, 38(4): 6-12.
Wang J, Meng C C, Zhang Q Y, et al. Main influencing sources identification of particle pollution during haze period in Nanjing [J]. Environment Protection Science, 2012, 38(4): 6-12.

[6] 中国环境监测总站. 全国空气质量实时发布平台 [EB/OL]. <http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>, 2013-1-4/2013

- 1 - 31.

China National Environmental Monitoring Centre. National air quality real-time publishing platform [EB/OL]. <http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>, 2013-1-4/2013-1-31.

[7] 中国气象局. 历史气象数据查询 [EB/OL]. <http://www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qsjcx/>, 2013-1-4/2013-1-31.
China Meteorological Administration. Historical meteorological data query [EB/OL]. <http://www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qsjcx/>, 2013-1-4/2013-1-31.

[8] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 雾霾过程演变与气溶胶粒子微物理特征 [C]//第 28 届中国气象学会年会 - S9 大气物理学与大气环境. 北京: 气象出版社, 2011.
Yang J, Niu Z Q, Shi C E, et al. Haze process evolution and micro physical characteristics of aerosol particles [C]//The 28th annual meeting of China meteorological society - S9 Atmospheric physics and atmospheric environment symposia. Beijing: China Meteorological Press, 2011.

[9] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降 [J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 1-9.
Wu D, Deng X J, Bi X Y, et al. Visibility drops caused by haze weather formed with pollution of fine particles in Guangzhou area [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(1): 1-9.

[10] 陈燕, 祝晓红, 陈建新, 等. 南阳市灰霾天气及其与相关污染物的关系分析 [C]//第 28 届中国气象学会年会 - S8 大气成分与天气气候变化的联系. 北京: 气象出版社, 2011.
Chen Y, Zhu X H, Chen J X, et al. Nanyang haze weather and analysis of correlations with relevant pollutants [C]//The 28th annual meeting of China meteorological society - S8 Contact between atmospheric composition and weather and climate change symposia. Beijing: China Meteorological Press, 2011.

[11] Querol X, Alastuey A, Rodriguez S, et al. PM_{10} and $PM_{2.5}$ source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 6407-6419.

[12] Querol X, Alastuey A, Ruiz C R, et al. Speciation and origin of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in selected European cities [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 6547-6555.

[13] Parkhurst W J, Tanner R L, Weatherford F P, et al. Historic $PM_{2.5}/PM_{10}$ concentrations in the southeastern united states - potential implications of the revised particulate matter standard [J]. Journal Air and Waste Management Association, 2011, 49: 1060-1067.

[14] Gehrig R, Buchmann B. Characterizing seasonal variations and spatial distribution of ambient PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations based on long-term Swiss monitoring data [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 2571-2580.

[15] Marcazzan G M, Ceriani M, Valli G, et al. Source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Milan (Italy) using receptor modeling [J]. The Science of the Total Environment, 2003, 317: 137-147.

[16] Dominici P, Peng R D, Bell M L, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases [J]. JAMA, 2006, 295: 1127-1134.

[17] Sondreal E A, Benson S A, Pavlish J H, et al. An overview of air quality III: mercury, trace elements and particulate matter [J].

- [18] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric Environment[M]. Beijing: Higher Education Press,2006.
- [19] 蒲维维,赵秀娟,张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J]. 应用气象学报,2011,22(6):716 - 723.
Pu W W, Zhao X J, Zhang X L. Effects on $PM_{2.5}$ pollution of meteorology factors in late summer early autumn in Beijing area [J]. Journal of Applied Meteorological Science,2011,22(6):716 - 723.
- [20] Chow J C, Watson J G, Edgerton S A, et al. Chemical composition of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Mexico City during winter 1997 [J]. The Science of the Total Environment,2002,287:177 - 201.
- [21] Marcazzan G M, Vaccaro S, Valli G, et al. Characterization of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particulate matter in the ambient air of Milan (Italy)[J]. Atmospheric Environment,2001,35:4639 - 4650.
- [22] Zheng M, Cass C R, Schauer J J, et al. Source apportionment of $PM_{2.5}$ in the southeastern united states using solvent - extractable organic compounds as tracers [J]. Environmental Science and Technology ,2002,36:2361 - 2371.
- [23] 魏玉香,杨卫芬,银燕. 霾天气南京市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征[J]. 环境科学与技术,2009,32(11):66 - 71.
Wei Y X, Yang W F, Yin Y. Pollution characteristics of water - soluble ions in atmospheric $PM_{2.5}$ in Nanjing under haze weather [J]. Environmental Science and Technology,2009,32(11):66 - 71.
- [24] 陶俊,张仁健,董林. 夏季广州城区细颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 水溶性无机离子特征[J]. 环境科学,2010,31(7):1417 - 1424.
Tao J, Zhang R J, Dong L. Characteristics of water - soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$ fine particles in the summer of Guangzhou urban area [J]. Environmental Science,2010,31(7):1417 - 1424.
- [25] 杨竞,童祯恭,刘玉哲. SPSS 软件对饮用水水质进行主成分分析评价的应用[J]. 环境科学与技术,2011,34(7):171 - 175.
Yang J, Tong Z G, Liu Y Z. SPSS software application of principal component analysis evaluation on drinking water quality [J]. Environmental Science and Technology, 2011,34(7):171 - 175.
- [26] Yao X H, Chan C K, Fang M, et al. The water - soluble ionic composition of $PM_{2.5}$ in Shanghai and Beijing, China [J]. Atmospheric Environment,2002,36:4223 - 4234.
- [27] 林海明,张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件 [J]. 统计分析,2005,3:65 - 76.
Lin H M, Zhang W L. Similarities and differences between principal component analysis and factor analysis and SPSS software [J]. Statistical Analysis,2005,3:65 - 76.
- [28] 曹敏,沈立成,肖琼,等. 基于 SPSS 的岩溶地下水水质变化及其影响因素 - - 以重庆市金佛山表层岩溶地下水为例 [J]. 湖南师范大学自然科学学报,2012,35(2):82 - 87.
Cao M, Shen L C, Xiao Q, et al. Application of factor analysis in assessment of influence factors of karst groundwater quality - a case from epikarst groundwater at Jinfo Mountain in Chongqing [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2012,35(2):82 - 87.

Analysis of a wide range haze pollution in China

LV Xiao - pu, CHENG Hai - rong, WANG Zu - wu, ZHANG Fan

(School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To analyze causes and characteristics of a wide range haze in January 2013 in China, mass concentrations, size distribution and spatio - temporal variation of atmospheric particles in eight major cities were investigated, as well as correlations were analysed between haze and meteorological factors, principal component and correlation analysis also were investigated that of atmospheric pollution indicators in eight major cities during haze period. Results showed that mass concentrations of fine particles ($PM_{2.5}$) exceeded standard by 234% on average, with most serious from 11th to 14th, the mean ratio of $PM_{2.5}/PM_{10}$ is 0.72. In addition, meteorological conditions with high humidity, thermal inversion, low pressure and calm wind are in favor of formation of haze. Strong correlations are found between $PM_{2.5}$ and SO_2 as well as NO_2 , principal component analysis indicated that combined pollution existed in many cities. The haze of wide range in January 2013 in China was caused by vehicle exhaust and coal fume combined pollution which additionally dominated by specific meteorological conditions.

Key words: haze; $PM_{2.5}$; meteorological conditions; vehicle exhaust pollution; combined pollution