

DOI: 10.5846/stxb201505020901

张淑平, 韩立建, 周伟奇, 郑晓欣. 冬季 $PM_{2.5}$ 的气象影响因素解析. 生态学报, 2016, 36(24): - .

Zhang S P, Han L J, Zhou W Q, Zheng X X. Relationships between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological factors in winter at typical Chinese cities. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

冬季 $PM_{2.5}$ 的气象影响因素解析

张淑平^{1,2}, 韩立建¹, 周伟奇^{1,*}, 郑晓欣¹

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 气象因素能够显著影响 $PM_{2.5}$ 浓度, 可减轻或加剧城市空气污染, 尤其是在雾霾严重的冬季。同时由于城市间污染物排放强度和扩散条件的差异, 雾霾的发生往往具有较强的区域性。选择了石家庄、西安、北京、太原、广州 5 个不同污染区域的典型城市, 首先分析多个气象因子与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系, 进而研究气象因素对 $PM_{2.5}$ 浓度变异解释度的差异, 以及气象因子对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的相对重要性, 进一步对比分析气象因素对 $PM_{2.5}$ 浓度影响在不同污染程度的城市之间的差异, 解析了不同城市的主要气象影响因素和气象因素的综合影响程度。得到以下主要结果: (1) 气象条件与 $PM_{2.5}$ 日浓度显著相关, 且在不同污染程度的城市与 $PM_{2.5}$ 浓度相关的气象因子不同。与石家庄冬季 $PM_{2.5}$ 浓度相关的气象因素为相对湿度、平均风速; 与西安 $PM_{2.5}$ 浓度相关的主要气象因素为相对湿度、平均风速和最大持续风速; 与北京 $PM_{2.5}$ 浓度相关的主要气象因素相对湿度、日均温度、平均风速、最大持续风速和最低温; 与太原 $PM_{2.5}$ 浓度相关的主要气象因素为日均温、相对湿度、平均风速、最高温、最低温和最大持续风速; 与广州 $PM_{2.5}$ 浓度相关的主要气象因素为相对湿度、平均风速、最高温和降雨量。(2) $PM_{2.5}$ 浓度越高的地区, 气象因素能够解释的 $PM_{2.5}$ 浓度变异越小。严重污染区的石家庄气象因素多元回归分析的 R^2 为 0.27, 重污染区的西安气象因素多元回归分析 R^2 为 0.29, 中污染区的北京气象因素多元回归分析 R^2 为 0.46, 污染地区的太原气象因素多元回归分析 R^2 为 0.67。该结果揭示了不同城市的主要气象影响因素及其综合影响程度, 可为城市 $PM_{2.5}$ 控制和预测精度提高提供理论参考, 并为区域生态环境规划和城市协调发展提供科学依据。

关键词: 细颗粒物 $PM_{2.5}$; 日均温; 最高温; 最低温; 相对湿度; 平均风速; 最大持续风速; 降雨量

Relationships between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological factors in winter at typical Chinese cities

ZHANG Shuping^{1,2}, HAN Lijian¹, ZHOU Weiqi^{1,*}, ZHENG Xiaoxin¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Meteorological conditions may have a great impact on $PM_{2.5}$ pollution during the heavy haze winter in Chinese cities. Here, we examined the effects of meteorological factors on $PM_{2.5}$ concentrations from December 2013 to February 2014, and from December 2014 to February 2015, in five cities—Shijiazhuang, Xi'an, Beijing, Taiyuan, and Guangzhou exhibiting different levels of $PM_{2.5}$. We found (1) meteorological factors affected daily $PM_{2.5}$ concentrations, and variables differed in cities with varied pollution levels. Significant positive correlations were obtained between humidity and $PM_{2.5}$ concentrations in Shijiazhuang, and a significant negative correlation was also obtained for wind speed. Significant positive

基金项目: 自然科学基金青年基金(41301199); 中国科学院生态环境研究中心“一三五”重点培育方向项目(YSW2013B04); 国家科技支撑计划子课题(2012BAC13B01)

收稿日期: 2015-05-02; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@rcees.ac.cn

correlations were obtained between humidity and $PM_{2.5}$ concentrations in Xi'an, and a significant negative correlation was found for wind speed. Significant positive correlations were obtained between humidity/temperature/minimum temperature and $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing, and a significant negative correlation was found for wind speed. Significant positive correlations were obtained between humidity/temperature/minimum temperature/maximum temperature and $PM_{2.5}$ concentrations in Taiyuan, and a negative correlation was found for the maximum sustained wind speed. Significant positive correlations were obtained between humidity/maximum temperature/precipitation and $PM_{2.5}$ concentrations in Guangzhou, and a significant negative correlation was found for wind speed. (2) Meteorological factors can explain the smaller variability in $PM_{2.5}$ concentration in cities that have heavier $PM_{2.5}$ pollution. Shijiazhuang, which represented a severely polluted area, showed meteorological factors of 0.27 after multiple regression analysis (R^2). Xi'an, which represents a heavy polluted area, showed meteorological factors of 0.29 (R^2). Beijing, which represents a moderately polluted area, showed meteorological factors of 0.46 (R^2). Taiyuan, which represents a polluted area, showed meteorological factors of 0.67 (R^2). The results provide a scientific basis for regional ecological environment planning and coordinated urban development. Therefore, understanding the main meteorological factors and their impact on urban $PM_{2.5}$ in different cities provides a theoretical reference for air pollution control and improvement of prediction accuracy.

Key Words: fine particulate ($PM_{2.5}$); temperature; maximum temperature; minimum temperature; humidity; wind speed; maximum sustained wind speed; precipitation

我国快速、大规模的工业化和城市化进程,给城市及其周边区域带来了一系列的生态环境问题。尤其是 $PM_{2.5}$ 浓度升高导致的雾霾问题在我国的京津冀、长三角、珠三角、成渝等地区普遍存在,严重限制了该区域经济的可持续发展。 $PM_{2.5}$ 空气动力学直径小,可通过呼吸道进入人体,沉积肺部,并可以穿过肺泡进入循环系统,对人体健康产生严重危害。仅京津冀地区 2013 年 1 月份就因严重的空气污染超额死亡 2725 人^[1]。同时, $PM_{2.5}$ 还会通过影响太阳辐射强度和增强散射,影响大气透明度,改变大气热力学性质,进而影响气候变化^[2]。 $PM_{2.5}$ 的危害和影响具有“同呼吸,共命运”的特点,即危害严重、影响广泛且无法有效预防,成为政府、学者和公众关注的焦点。

城市作为我国 $PM_{2.5}$ 污染最为严重的区域^[3],不仅对自身,同时也对其周边区域产生严重的影响^[4-5]。张淑平等^[6]就根据该特点对 $PM_{2.5}$ 在全国重点城市的空间分布进行了研究。然而城市 $PM_{2.5}$ 的浓度变化除了受汽车尾气、工业排放等人为排放影响,还受到大气环流条件,以及日均温、风速、降雨量等地面气象条件影响。后者对雾霾的形成和扩散有决定性作用,因此了解不同城市地面气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响不仅可以为其空间分布研究提供更有利的划分依据,也能够提高这些城市严重雾霾事件的监测和预报精度^[7]。目前已经有一些气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的研究。Xu 等^[8]通过对城区和郊区站点的对比分析发现风对北部平原区雾霾发生就有强的依赖影响关系。孟昭阳等^[9]的研究结果表明 $PM_{2.5}$ 质量浓度日变化与风速、能见度和气压呈负相关,与相对湿度呈正相关。然而,这些研究的城市选择未考虑到 $PM_{2.5}$ 在全国的空间分布状况,气象因素的选择也不够全面。

不同城市 $PM_{2.5}$ 形成的物理化学过程有所不同,甚至截然相反,那么不同空间分布区的城市 $PM_{2.5}$ 浓度受那些气象因素影响? 其相对重要性如何? 各气象因子影响的重要性是否一致? 这些问题在已有的研究中也较少涉及。本文基于全国 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布^[6],选择了 5 个 $PM_{2.5}$ 浓度不同的典型城市,首先采用相关性分析解析多个气象因子与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系,进而采用多元逐步回归的方法研究气象因素对 $PM_{2.5}$ 浓度变异解释度的差异,以及气象因子对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的相对重要性,进一步对比分析气象因素对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响在不同污染程度的城市之间差异,揭示不同城市的主要气象影响因素和综合影响程度。为城市 $PM_{2.5}$ 控制和预测精度提高提供理论参考,并可为区域生态环境规划和城市协调发展提供科学依据。

1 数据和方法

1.1 数据及预处理

冬季地面温度低,不利于空气上下对流,细粒子更多地积聚在距地面较近的范围内,对居民的暴露影响更大。同时,受到燃煤供暖和春节等人类活动影响,我国大气污染在冬季最为严重^[10],它的研究也更为迫切,因此选择冬季数据开展研究。采用的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据为全国空气质量实时发布平台发布的 2013 年 12 月—2014 年 2 月和 2014 年 12 月—2015 年 2 月两年的空气质量日浓度数据。该数据根据环保部《环境空气颗粒物 (PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$) 连续自动监测系统技术要求及检测方法》(HJ 653—2013) 新标准检测获得,具有时间连续性好、监测范围广等优点。人为排放和气象条件均会影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,但在季节范围内可以认为人为排放是稳定的,因此选择日均温、最低温、最高温、平均风速、最大持续风速、相对湿度、降雨量等地面气象因素进行研究。该部分城市气象数据源自美国气候数据中心 (National Climate Data Center) 发布的全球日产品汇总数据 (Global Summary of the Day) (图 1)。数据包含了气象站监测的日均温、最低温、最高温、平均风速、最大持续风速、露点温度、降雨量 7 项气象指标。然后基于日均温、露点温度和钱同生等^[11] 提出的相对湿度算法计算出日相对湿度。气象数据截取的是同 $\text{PM}_{2.5}$ 数据相对应的 2013 年 12 月—2014 年 2 月和 2014 年 12 月—2015 年 2 月两年冬季的日浓度数据。其中石家庄、西安、北京、太原和广州五个城市的降雨天数分别为 25、5、17、

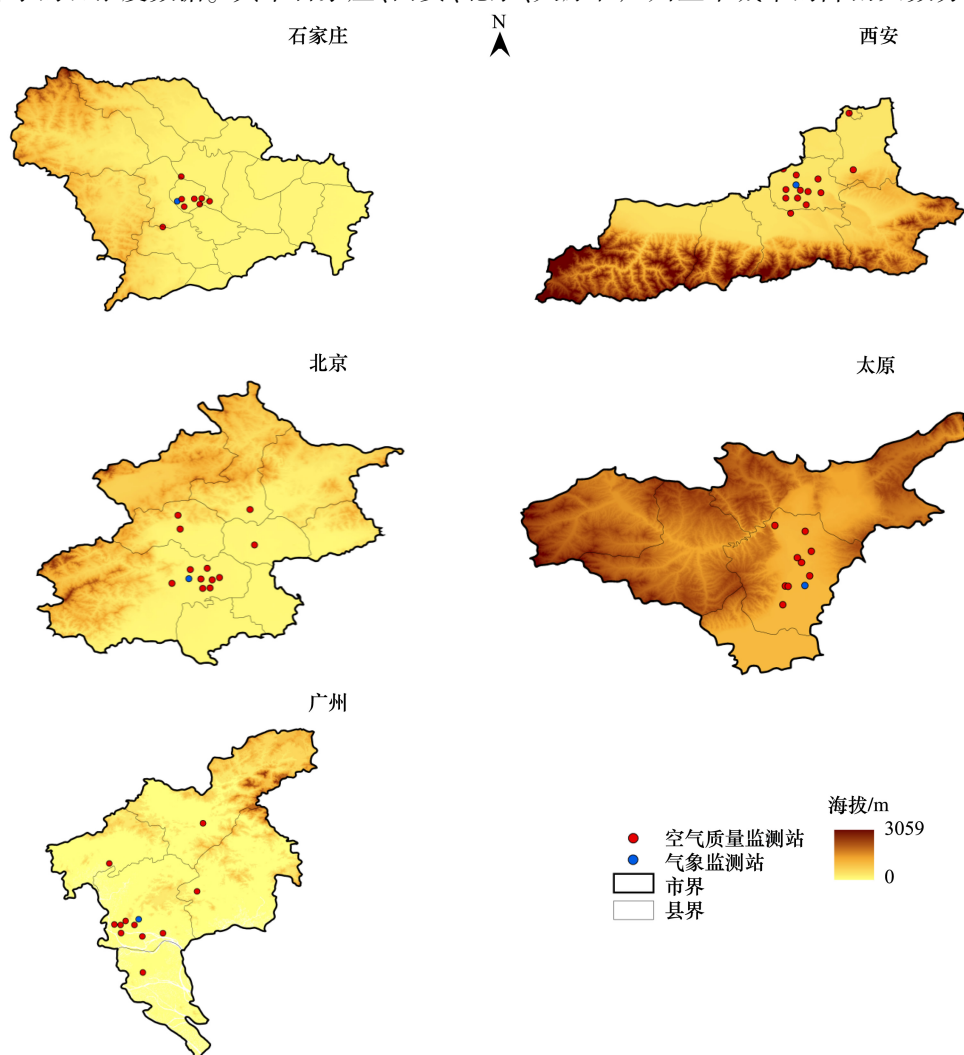


图 1 各典型城市空气质量和气象监测站位置

Fig.1 Maps showing the locations of meteorological and air quality stations in the five cities

21 和 56。五个典型城市的人口总数数据、第二产业比例数据、万元 GDP 能耗数据来自各城市 2013 年的统计年鉴。

1.2 方法

基于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的区域空间分布图^[6], 结合影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的城市人口总量、用电量、GDP、万元 GDP 能耗、二产比例等指标, 分别从 5 个污染区域各选取一个典型城市(石家庄、西安、北京、太原和广州)进行分析(表 1)。具体的分析包括有显著相关性的气象影响因素差异分析和气象因素综合影响程度分析。气象影响因素差异分析是从日均温、最高温、最低温、相对湿度、平均风速、最大持续风速和降雨量中筛选出与各典型城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有显著相关关系的气象因素, 并比较不同城市气象因素种类的差异。David 等^[12]认为多元线性逐步回归可以用于气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响程度的研究, 尤其是冬季的研究。因此综合影响程度分析采用多元线性逐步回归的方法了解气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响程度, 即气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 日浓度变异的解释程度。本文以 $\text{PM}_{2.5}$ 日浓度为因变量, 以有显著相关性的气象要素为自变量进行逐步线性回归分析(式 1)。建立 5 个典型城市气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化的多元线性方程。

$$\hat{Y} = b_0 + \sum b_i X_i \quad (1)$$

$\hat{Y}$ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日浓度预测值; X_i 是预测的气象因素变量; b_i 是相应变量的系数。并根据 R^2 确定各典型城市气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变异的解释程度。为消除变量个数和样本量大小的影响, 本文选取线性回归的调整可决系数(调整 R^2)进行分析比较。同时, 为了确定不同气象因素的重要性, 本文对结果中的偏回归系数 b_i 进行了标准化处理, 用标准化后的 b_i 来比较获得各影响因素的重要性。

表 1 典型城市选取指标

Table 1 Descriptive statistics of the indexes of the five cities

类型 Type	城市 City	$\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度 $\text{PM}_{2.5}$ concentrations	备注 Reference
严重污染区 Severely polluted area	石家庄	221.54	省会
重污染地区 Heavy polluted area	西安	165.43	省会
中污染地区 Moderately polluted area	北京	98.01	首都
污染地区 Polluted area	太原	88.02	省会
低污染地区 Mild polluted area	广州	72.87	省会

2 结果和分析

2.1 城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度特征

按照我国空气质量二级标准($75\mu\text{g}/\text{m}^3$), 石家庄冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 超标率为 83.72%, 超标倍数达 7.57(表 2); 西安、北京、太原和广州冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标率依次降低, 最高超标倍数也逐渐减小; 广州超标率为 52.33%, 最高超标倍数为 1.08。按照 WHO 标准($25\mu\text{g}/\text{m}^3$) 石家庄和西安冬季日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标率为 100%, 超标倍数分布达到 24.71 和 22.98; 北京冬季超标率为 81.40%, 超标倍数为 0.04—13.21; 太原和广州的冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标率为 91.86% 和 93.02%。

2.2 城市 $\text{PM}_{2.5}$ 时间分布特征

从图 2 中可以看出, 5 个重点城市中冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高的是石家庄, 波动范围为 $31.27\text{—}396.30\mu\text{g}/\text{m}^3$, 最高值出现在 12 月 23 日; 其次为西安, 浓度波动范围 $33.27\text{—}367.80\mu\text{g}/\text{m}^3$, 最高值出现在 12 月 24 日; 接下来是北京, 浓度波动范围 $7.71\text{—}108.33\mu\text{g}/\text{m}^3$, 最高值出现在 2 月 19 日; 再然后是太原, 浓度波动范围 $12.21\text{—}75.02\mu\text{g}/\text{m}^3$, 最高值出现在 12 月 23 日; 最后是广州, 浓度波动范围 $23.50\text{—}66.08\mu\text{g}/\text{m}^3$, 最高值出现在 1 月 6 日, 该结果与平均浓度(表 2)结果相似。

表 2 各典型城市 PM_{2.5} 浓度
Table 2 Concentration of PM_{2.5} in the five cities

类型 Type	城市 City	PM _{2.5} 平均浓度 PM _{2.5} concentrations	中国标准 (75) Air quality standard of China		WHO 标准 (25) Air quality guideline of WHO	
			超标率 Over standard rate	超标倍数 Superstandard multiple	超标率 Over standard rate	超标倍数 Superstandard multiple
严重污染区 Severely polluted area	石家庄	221.54	83.72	0.02—7.57	100.00	0.06—24.71
重污染地区 Heavy polluted area	西安	165.43	77.90	0.02—6.99	100.00	0.29—22.98
中污染地区 Moderately polluted area	北京	98.01	50.00	0.06—3.74	81.40	0.04—13.21
污染地区 Polluted area	太原	88.02	58.14	0—1.62	91.86	0.04—6.86
低污染地区 Mild polluted area	广州	72.87	52.33	0.03—1.08	93.02	0.02—5.24

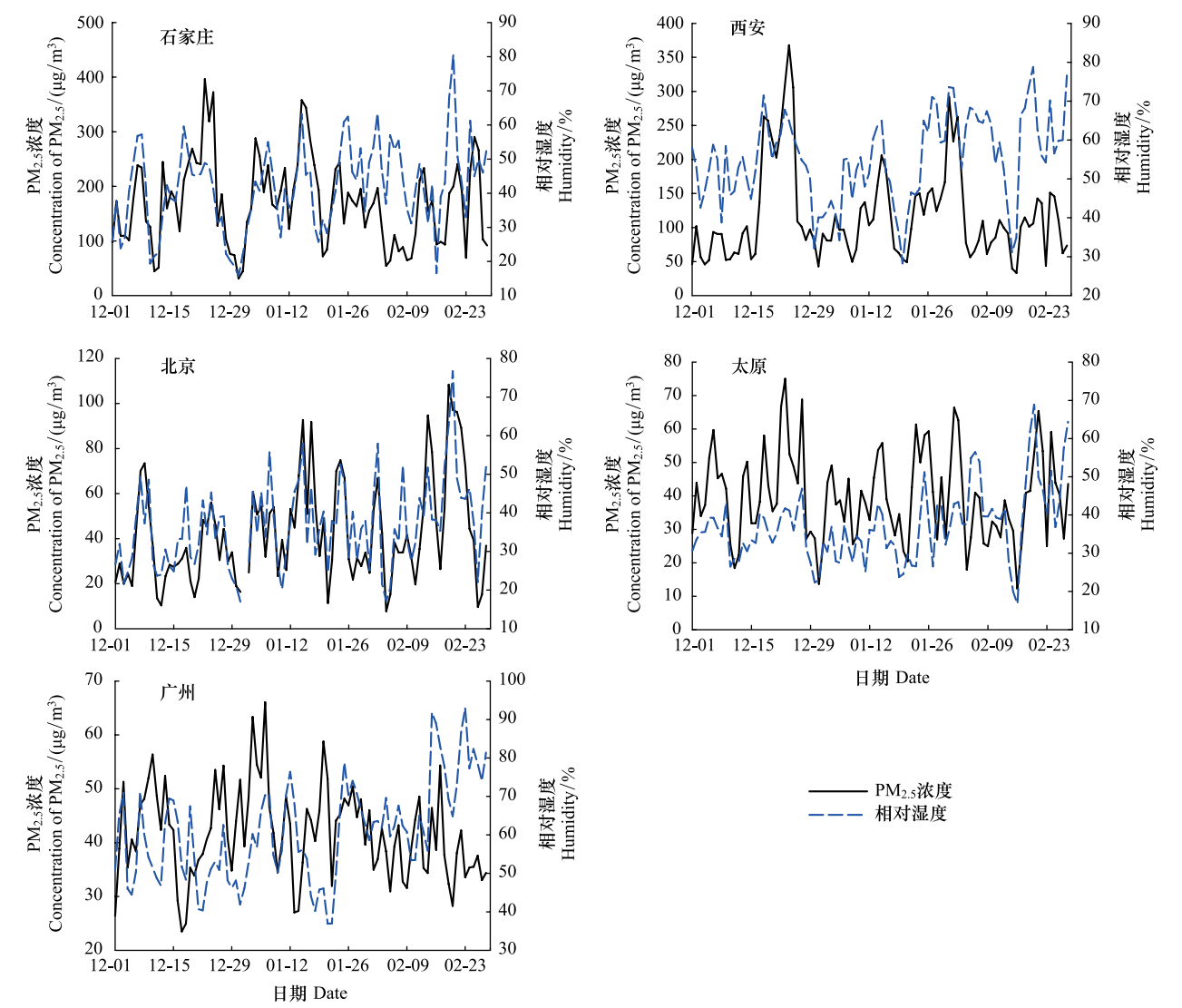


图 2 各典型城市相对湿度同 PM_{2.5} 浓度的变化特征
Fig.2 Fluctuation of PM_{2.5} concentration and humidity

2.2.1 相对湿度

从总体上来看(图 2),5 个城市的 PM_{2.5} 浓度变化同相对湿度有紧密的联系。石家庄、西安、北京和太原 4 个城市的冬季 PM_{2.5} 浓度同相对湿度呈相似的变化趋势,广州冬季 PM_{2.5} 浓度同相对湿度呈相反的变化趋势。

在无降雨时 $PM_{2.5}$ 浓度同相对湿度有很相似的变化趋势, 当有降雨时 $PM_{2.5}$ 浓度同相对湿度有相反的变化趋势。

无论是高污染区的城市还是低污染区的城市, 相对湿度在其细颗粒物的监测和预报中起着重要作用。当无降雨空气相对湿度在 60%—80% 以下时, 颗粒物的二次生成作用较强, $PM_{2.5}$ 的浓度同相对湿度呈正比关系。当空气湿度大于 80% 时, 容易形成降雨, 对空气中的颗粒物有冲刷作用, 颗粒物的浓度同空气相对湿度呈反比。随着湿度的增加颗粒物中的水溶性组分和有机碳中水溶性有机碳的组分比例增加, 在高相对湿度的条件下水溶性有机碳和元素碳的比例显著升高^[13], 冬季城市相对湿度的升高对重雾霾的形成有直接关系。

2.2.2 平均风速

风对颗粒物的影响主要是物理作用, 包括颗粒物的传输和分布等。通过对颗粒物的扬起和传输过程研究, Han 等^[14] 人认为风速对颗粒物浓度的影响不是呈线性变化, 而是呈自然对数的趋势变化。经非线性拟合发现, 石家庄、西安、北京、太原和广州 5 个城市风速与 $PM_{2.5}$ 的关系如表 3。

表 3 各典型城市风速与 $PM_{2.5}$ 浓度拟合方程

Table 3 Nonlinear Curve Fit of $PM_{2.5}$ and wind speed in the five cities

$PM_{2.5}$	风速和 $PM_{2.5}$ 浓度拟合方程 Fitting equation of wind speed and $PM_{2.5}$ concentration	$PM_{2.5}$	风速和 $PM_{2.5}$ 浓度拟合方程 Fitting equation of wind speed and $PM_{2.5}$ concentration
石家庄	$y = -2873.98 \ln(x + 78.86) + 12780.70$	西安	$y = -54.91 \ln(x - 0.71) + 128.63$
北京	$y = -29.93 \ln(x - 1.16) + 92.75$	太原	$y = -32.87 \ln(x - 0.62) + 94.98$
广州	$y = -17.56 \ln(x + 0.07) + 80.78$		

在石家庄、西安、北京、太原和广州 5 个城市平均风速同 $PM_{2.5}$ 浓度呈对数的变化关系(图 3、图 4)。一方面是因为在低风速情况下颗粒物扩散速度慢; 另一方面是低风速导致细颗粒物混合均匀, 二次生成速率升高^[15]。另外, 湿气流在风的作用下跨界传输是形成区域性雾霾的重要原因。

2.2.3 日均温

从折线图(图 5)可以看出石家庄、北京和太原 3 个城市的冬季 $PM_{2.5}$ 浓度同日均温呈相似的变化趋势, 尤其是在发生降雨前后。

2.3 气象因素影响

2.3.1 城市气象影响因素差异

严重污染城市: 在 $PM_{2.5}$ 浓度最高的石家庄(表 4), 与冬季 $PM_{2.5}$ 浓度相关的气象因素为相对湿度($r = 0.53$, $P < 0.01$)、平均风速($r = -0.22$, $P < 0.01$);

重污染城市: 在冬季 $PM_{2.5}$ 浓度次高的西安, 与其 $PM_{2.5}$ 浓度相关的主要气象因素为相对湿度($r = 0.43$, $P < 0.01$)、平均风速($r = -0.37$, $P < 0.01$)和最大持续风速($r = -0.26$, $P < 0.01$);

中度污染城市: 与北京 $PM_{2.5}$ 浓度相关的主要气象因素相对湿度($r = 0.61$, $P < 0.01$)、平均风速($r = -0.47$, $P < 0.01$)、最低温($r = 0.36$, $P < 0.01$)、最大持续风速($r = -0.25$, $P < 0.01$)和日均温度($r = 0.24$, $P < 0.01$);

一般污染城市: 与太原 $PM_{2.5}$ 浓度相关的主要气象因素为平均风速($r = -0.47$, $P < 0.01$)、最大持续风速($r = -0.39$, $P < 0.01$)、相对湿度($r = 0.36$, $P < 0.01$)、最高温($r = 0.36$, $P < 0.01$)、日均温($r = 0.29$, $P < 0.01$)和最低温($r = 0.23$, $P < 0.01$);

低污染城市: 与广州 $PM_{2.5}$ 浓度相关的主要气象因素为最高温($r = 0.34$, $P < 0.01$)、平均风速($r = -0.32$, $P < 0.01$)、相对湿度($r = 0.28$, $P < 0.01$)和降雨量($r = 0.26$, $P < 0.01$)。

2.3.2 气象因素的综合影响

从以上分析可以看出影响不同城市的地面气象因素有所不同, 为了深入研究各城市气象条件的综合影响程度, 本文采用与 $PM_{2.5}$ 具有显著相关性的气象因子, 对 $PM_{2.5}$ 日浓度进行逐步回归, 并将结果标准化(表 5、

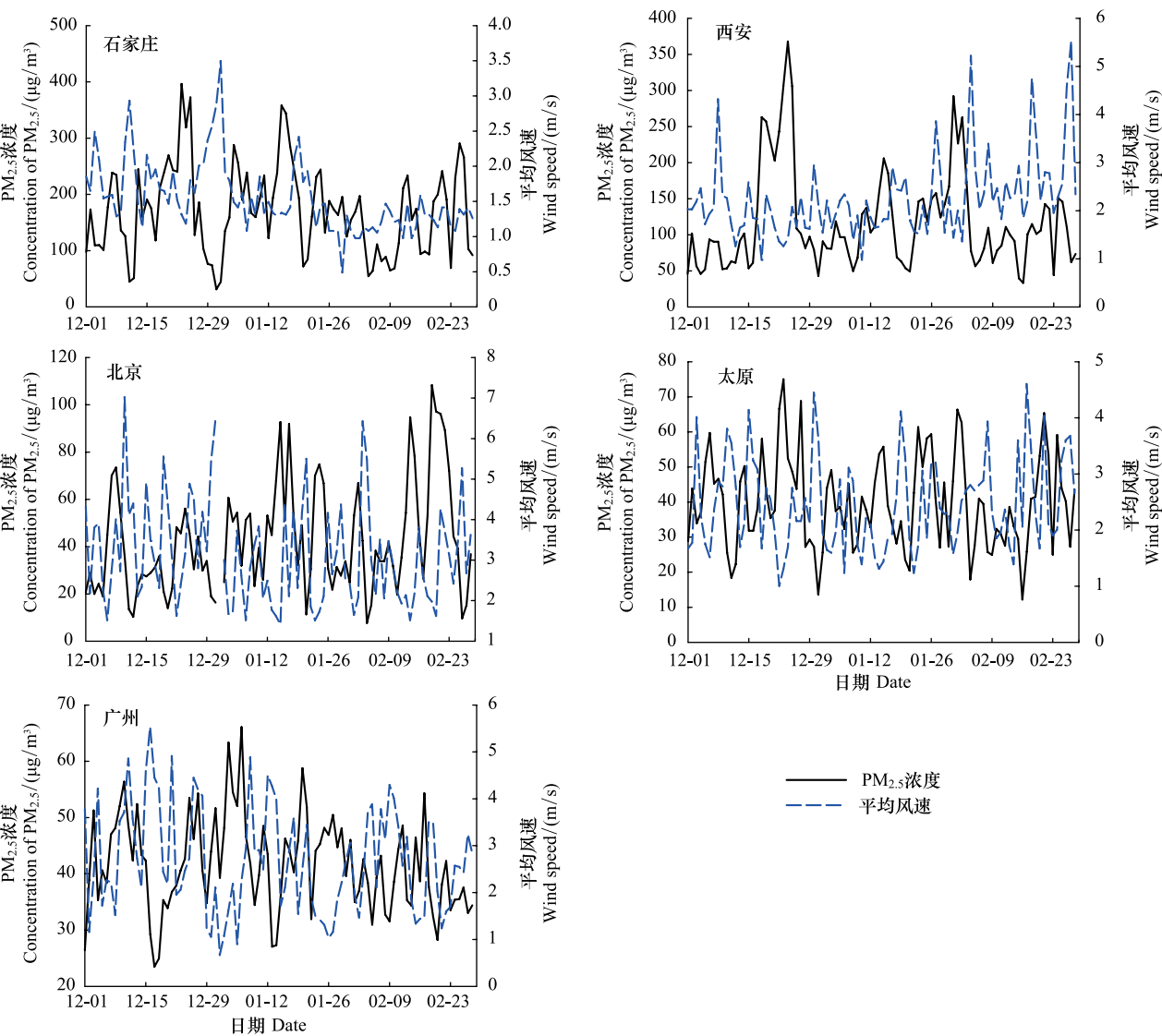


图3 各典型城市PM_{2.5}浓度同平均风速变化特征

Fig.3 Fluctuation of PM_{2.5} concentration and wind speed

表6)。

表4 各典型城市气象因素与PM_{2.5}浓度相关性

Table 4 Correlations of PM_{2.5} and meteorological condition in the five cities

PM _{2.5}	日均温 Temperature	相对湿度 Relative humidity	平均风速 Wind speed	最大持续风速 Maximum sustained wind speed	最高温 Maximum temperature	最低温 Minimum temperature	降雨量 Precipitation
石家庄	-0.18 *	0.53 **	-0.22 **	-0.19 *			
西安		0.43 **	-0.37 **	-0.26 **			
北京	0.24 **	0.61 **	-0.47 **	-0.25 **		0.36 **	
太原	0.29 **	0.36 **	-0.47 **	-0.39 **	0.36 **	0.23 **	
广州		-0.28 **	-0.32 **		0.34 **		-0.26 **

* :显著相关; * * :极显著相关

在石家庄,对PM_{2.5}浓度变异解释度最大气象因素是相对湿度。在西安,对PM_{2.5}浓度变异解释度最大气

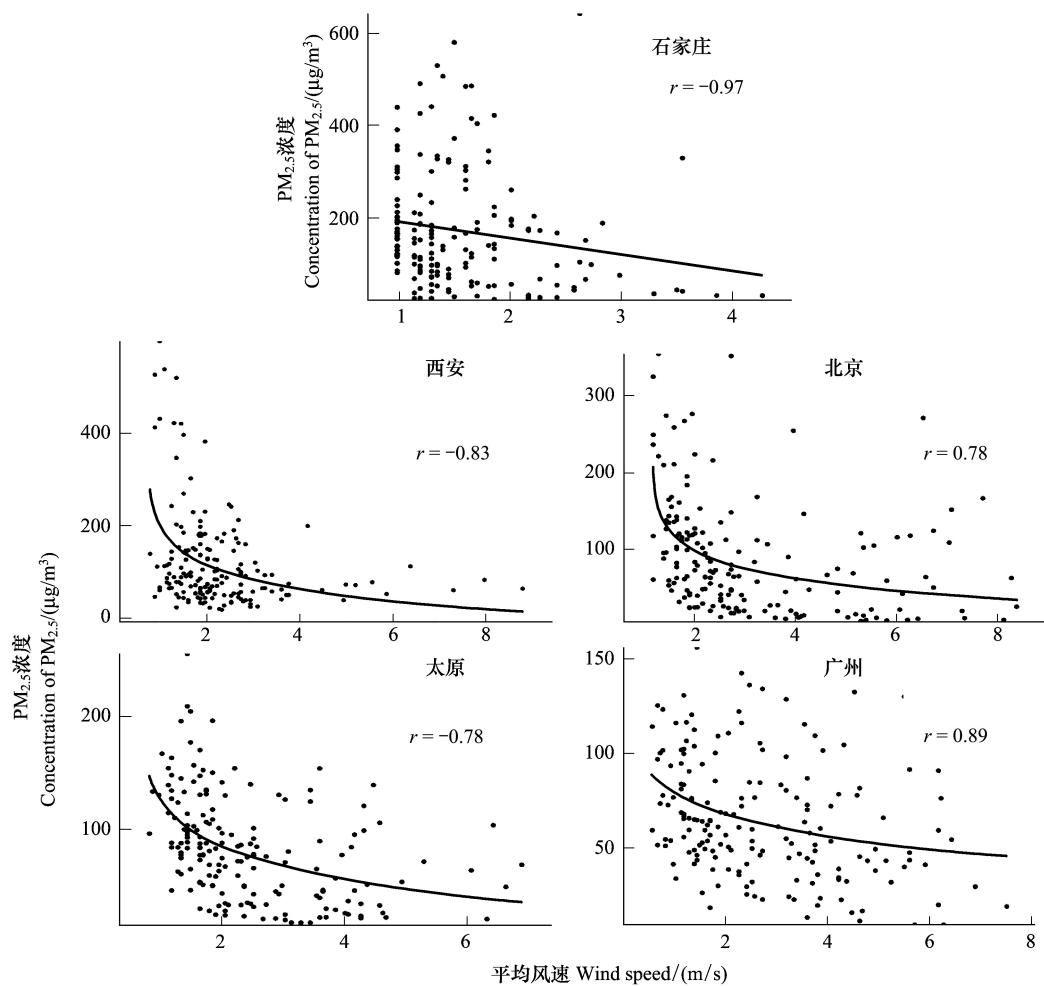


图 4 各典型城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同平均风速关系

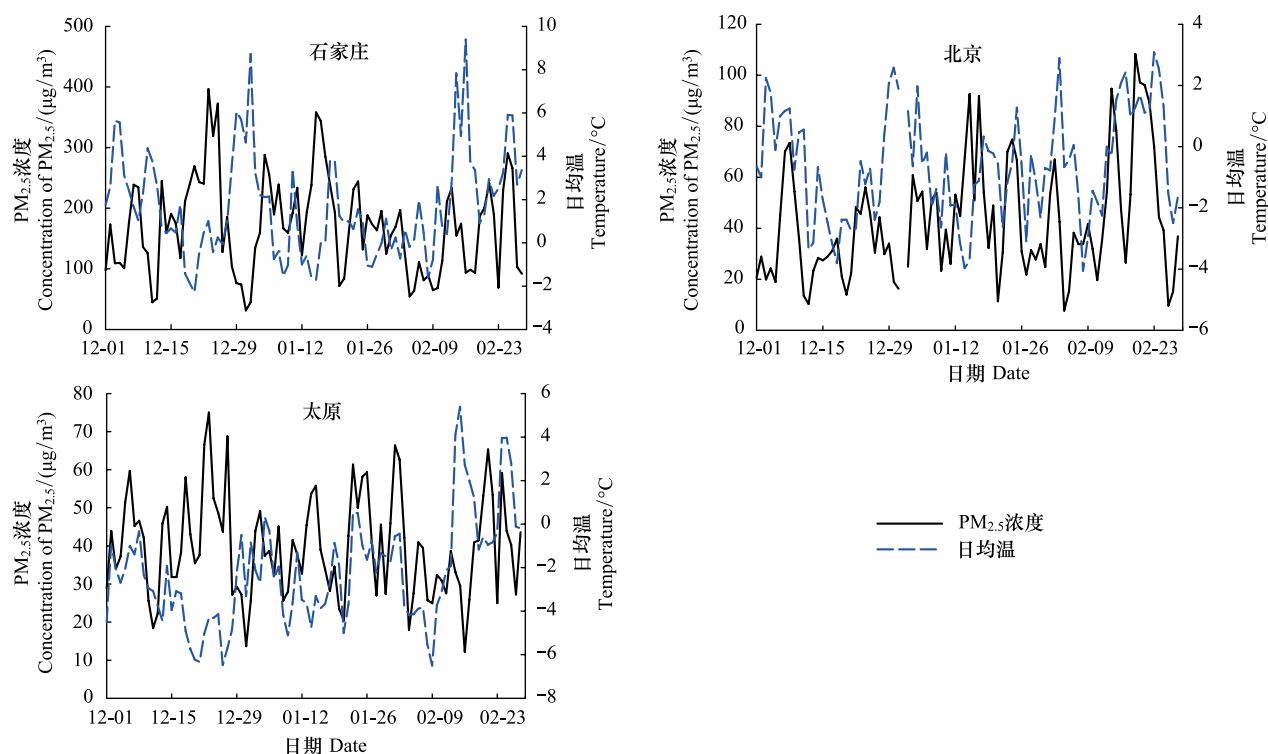
Fig.4 The relationship between $\text{PM}_{2.5}$ concentration and wind speed

象因素也是相对湿度,但是平均风速对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响也较大,达到 30%。在北京,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变异解释度最大气象因素也是相对湿度,日均温和平均风速也分别有 29%和 20%的影响。在太原,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变异解释度最大气象因素也是相对湿度,平均风速和最高温分别有 27%和 40%的影响。位于南方的广州,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变异解释度最大气象因素还是相对湿度,最高温和平均风速分别有 21%和 22%的变异解释度。

表 5 各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同气象因素的标准化回归方程

Table 5 Multiple Linear Regression of $\text{PM}_{2.5}$ concentration and meteorological variables		
城市 City	调整 R^2 Adjusted R^2	标准化回归方程 Standardization regression equation
石家庄	0.27 ($P<0.01$)	$Y=0.53X_1$; X_1 : 相对湿度;
西安	0.29 ($P<0.01$)	$Y=0.38X_1-0.30X_2$; X_1 : 相对湿度; X_2 : 平均风速
北京	0.46 ($P<0.01$)	$Y=0.53X_1+0.29X_4+0.2X_2$; X_1 : 相对湿度; X_4 : 日均温; X_2 : 平均风速
太原	0.67 ($P<0.01$)	$Y=-0.27X_2+0.44X_1-0.40X_5$; X_2 : 平均风速; X_1 : 相对湿度; X_5 : 最高温
广州	0.18 ($P<0.01$)	$Y=0.21X_5-0.25X_1-0.22X_2$; X_5 : 最高温; X_1 : 相对湿度; X_2 : 平均风速

5 个城市可决系数 R^2 的大小依次为广州<石家庄<西安<北京<太原,即气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 日浓度变异解释能力依次为广州<石家庄<西安<北京<太原。北方的四个城市中, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越高的城市气象因素对其变异解释能力越低。严重污染区的石家庄线性回归分析的 R^2 为 0.27,重污染区的西安气象因素多元回归分析 R^2 为

图 5 各典型城市日均温同 PM_{2.5}浓度变化特征Fig.5 Fluctuation of PM_{2.5} concentration and temperature

0.29,中污染区的北京气象因素多元回归分析 R^2 为 0.46,污染区的太原气象因素多元回归分析 R^2 为 0.67,低污染区的广州气象因素多元回归分析 R^2 为 0.18。

表 6 各城市相关气象因素同 PM_{2.5}浓度的偏回归系数Table 6 Partial correlation of PM_{2.5} concentration and relative meteorological variables

PM _{2.5}	日均温 Temperature	相对湿度 Relative humidity	平均风速 Wind speed	最大持续风速 Maximum sustained wind speed	最高温 Maximum temperature	最低温 Minimum temperature	降雨量 Precipitation
石家庄	0.073	0.527	-0.061	0.026			
西安		0.400	0.330	0.05			
北京	0.376	0.522	0.330	0.255		-0.019	
太原	-0.017	0.467	0.402	0.195	0.483	-0.036	
广州		-0.264	0.204	-0.025	0.195		-0.065

3 讨论

由相关性分析可以看出气象条件和 PM_{2.5}浓度有较强的相关性。相对湿度和平均风速对城市 PM_{2.5}浓度影响较大。平均风速、降雨量同 PM_{2.5}浓度呈负相关,相对湿度、日均温、最高温、最低温同 PM_{2.5}浓度呈正相关。大风可以通过水平输送和稀释扩散效应^[16]降低细颗粒物浓度。降水主要通过惯性碰并过程和布朗扩散作用,捕获颗粒物和气溶胶粒子,使之从大气中清除^[5]。相对湿度能够通过吸湿增长促使核模态粒子(0.005—0.050µm)转化为积聚模态(0.05—2.00µm)^[17],导致 PM_{2.5}的不断积累。高温期间活跃的光化学反应应产生大量的 VOC、SO₄²⁻、NO₃⁻,增加了 PM_{2.5}的来源,从而导致 PM_{2.5}的浓度升高^[18]。因此气象因素能够显著影响 PM_{2.5}浓度的日变化。

不同污染程度的城市,影响 $PM_{2.5}$ 浓度的主导气象因子不同。从本文的研究结果来看,影响石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度的主要气象因素为相对湿度;影响西安 $PM_{2.5}$ 浓度的主要气象因素为相对湿度和平均风速;影响北京 $PM_{2.5}$ 浓度的主要气象因素为相对湿度、日均温和平均风速;影响太原 $PM_{2.5}$ 浓度的主要气象因素为相对湿度、最高温和平均风速;影响广州 $PM_{2.5}$ 浓度的主要气象因素为相对湿度、平均风速和最高温。相对湿度和风速对石家庄、西安、北京、太原、广州 5 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度均有影响,日均温仅对北京、太原、广州 3 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度有影响。该结果同车瑞俊^[19]、韩婧^[20]、孟昭阳^[5]、朱倩茹等^[21]在北京、西安、太原和广州的研究结果相似。因此在建立各城市的 $PM_{2.5}$ 浓度预报系统时,应根据各城市 $PM_{2.5}$ 浓度和气象因子建立不同的预报系统。

气象因素对 $PM_{2.5}$ 日浓度的综合影响程度随着 $PM_{2.5}$ 浓度的升高逐渐减弱。从本文多元线性回归的调整 R^2 结果来看,石家庄<西安<北京<太原。调整 R^2 是多元线性回归的可决系数,也是对 $PM_{2.5}$ 浓度日变异的解释度。所以,气象因素对 $PM_{2.5}$ 日浓度变异解释度大小依次为石家庄<西安<北京<太原。而这 4 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度为石家庄>西安>北京>太原。因此, $PM_{2.5}$ 浓度越高的地区气象因素能够解释的日变异度越小。出现该现象可能是因为存在气象因素以外的其它因素强烈影响 $PM_{2.5}$ 浓度变化。广州的 $PM_{2.5}$ 浓度低于北京和太原,但其气象因素的变异解释度比石家庄要低。这是因为广州冬季 $PM_{2.5}$ 浓度波动范围($11.25—156.34\mu g/m^3$)明显小于石家庄($22.46—642.8\mu g/m^3$)、北京($5.6—355.14\mu g/m^3$)太原($14.41—196.46\mu g/m^3$)。在 $PM_{2.5}$ 波动范围较大的城市中,气象因素能够解释的日变异度越小。

尽管本文的结果说明地面表层气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度有重要影响,但是大气边界层和垂直结构对 $PM_{2.5}$ 的浓度也有重要影响。相关的研究也应该深入进行。气象条件不仅能够影响城市尺度的 $PM_{2.5}$ 浓度还能够影响区域尺度的污染物浓度分布。该方面研究对于污染物的跨区域联防联控研究和长距离输送研究有重要的意义。

4 主要结论

本文采用重点城市典型大气污染物- $PM_{2.5}$ 浓度的实时监测数据,分析在不同污染区域的城市,影响 $PM_{2.5}$ 浓度的主要气象因子,解析多种气象因子对 $PM_{2.5}$ 浓度的综合影响程度,主要结论如下:

(1) 气象条件与 $PM_{2.5}$ 日浓度显著相关,且在不同污染区域的城市,与 $PM_{2.5}$ 浓度相关的气象因子不同。影响石家庄市冬季 $PM_{2.5}$ 浓度的主要气象因素为相对湿度;西安是相对湿度、和平均风速;北京是相对湿度、日均温和平均风速;太原市是相对湿度、平均风速和最高温;广州是相对湿度、平均风速、最高温和降雨量。

(2) $PM_{2.5}$ 浓度越高的地区,气象因素能够解释的 $PM_{2.5}$ 浓度变异越小,说明污染严重的地区主要受到人为排放因素的影响。严重污染区的石家庄市多元回归分析的 R^2 为 0.27,重污染区的西安市气象因素多元回归分析 R^2 为 0.29,中污染区的北京市气象因素多元回归分析 R^2 为 0.46,太原市气象因素多元回归分析 R^2 为 0.67,广州市气象因素多元回归分析 R^2 为 0.18。

参考文献 (References):

- [1] 张衍桑,马国霞,於万,曹东. 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. 中华医学杂志, 2013, 93 (34): 2707-2710.
- [2] Chen L W A, Watson J G, Chow J C, Green M C, Inouye D, Dirks K. Wintertime particulate pollution episodes in an urban valley of the Western US: a case study. Atmospheric Chemistry Physics 2012, 12: 10051-10064.
- [3] Han L J, Zhou W Q, Li W F. City as a major source area of fine particulate ($PM_{2.5}$) in China. Environmental Pollution, 2015, 206: 183-187.
- [4] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Increasing impact of urban fine particles ($PM_{2.5}$) on areas surrounding Chinese cities. Scientific Reports, 2015, 5: 12467.
- [5] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Li L. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chinese cities. Environmental Pollution, 2014, 194: 163-170.
- [6] 张淑平,韩立建,周伟奇. 城市规模对大气污染物 NO_2 和 $PM_{2.5}$ 浓度的影响. 生态学报, 2015.

- [7] Xu J M, Yan F X, Xie Y, Wang F Y, Wu J B, Fu Q Y. Impact of meteorological conditions on a nine-day particulate matter pollution event observed in December 2013, Shanghai, China. *Particuology*, 2015, 20: 69-79.
- [8] Xu W Y, Zhao C S, Ran L, Deng Z Z, Liu P F, Ma N, Lin W L, Xu X B, Yan P, He X, Yu J, Liang W D, Chen L L. Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2011, 11 (9): 4353-4369.
- [9] 孟昭阳, 张怀德, 蒋晓明, 颜鹏, 王雁, 林伟立, 周春红, 刘洪利, 闫世明, 梁丽明. 太原地区冬春季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及影响因素. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(5): 648-656.
- [10] 何友江. 2002 年我国城市大气环境污染的区域性特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [11] 钱同生. 湿度计算公式的简化计算方法. *南京化工大学学报: 自然科学版*, 1998, 20(2): 69-71.
- [12] Whiteman C D, Hoch S W, Horel J D, Charland A. Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's salt lake valley. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 742-753.
- [13] Cheng Y, He K B, Du Z Y, Zheng M, Duan F K, Ma Y L. Humidity plays an important role in the $\text{PM}_{2.5}$ pollution in Beijing. *Environmental Pollution*, 2015, 197: 68-75.
- [14] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Meshesha D T, Li L, Zheng M Q. Meteorological and urban landscape factors on severe air pollution in Beijing. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015, 65(7): 782-787.
- [15] Tao M H, Chen L F, Su L, Tao J H. Satellite observation of regional haze pollution over the North China Plain. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(D12): D12203.
- [16] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 257-269.
- [17] 宋明, 韩素芹, 张敏, 姚青, 朱彬. 天津大气能见度与相对湿度和 PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系. *气象与环境学报*, 2013, 39(2): 34-41.
- [18] 唐孝炎. 大气环境化学. 北京: 高等教育出版社, 1990: 343.
- [19] 车瑞俊, 刘大锰, 袁杨森. 北京冬季大气颗粒物污染水平和影响因素研究. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(5): 556-563.
- [20] 韩婧, 代志光, 李文韬. 西安灰霾天气下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象条件分析. *环境污染与防治*, 2014, 36(2): 52-56.
- [21] 朱倩茹, 刘永红, 徐伟嘉, 黄敏. 广州 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及影响因素分析. *中国环境监测*, 2013, (2): 15-21.