付桂琴,张杏敏,尤凤春,等. 气象条件对石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度的影响分析[J]. 干旱气象,2016,34(2):349-355,[FU Guiqin, ZHANG Xingmin, YOU Fengchun, et al. Effect of Meteorological Conditions on $PM_{2.5}$ Concentration in Shijiazhuang of Hebei[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(2):349-355], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-02-0349

气象条件对石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度的影响分析

付桂琴[1,2],张杏敏[1],尤凤春[3],田亚芹[1],李二杰[4]

(1. 河北省气象服务中心,河北 石家庄 050021;2. 河北省气象与生态环境实验室,河北 石家庄 050021;
3. 北京市气象台,北京 100089;4. 河北省气象环境中心,河北 石家庄 050021)

摘 要:利用2013~2014年石家庄逐小时 $PM_{2.5}$ 监测浓度与地面及探空等气象观测资料,从大气的垂直扩散、水平扩散和地面局地环流等方面,探讨气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度的定量影响关系。结果表明:(1)石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度具有明显的日、月和季节变化特征,早晨08时前后 $PM_{2.5}$ 浓度最高,下午16时前后浓度最低;冬季 $PM_{2.5}$ 浓度最高,夏季最低;(2)2 a共出现485 d逆温,其中10~12月出现频率最多,达82.8%~86.2%,逆温致使低层大气垂直运动受阻,不利于污染物扩散;(3)大气混合层高度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈反相关,$PM_{2.5}$ 浓度<75 μg/m^3(空气质量优良),对应大气混合层高度平均为1 448 m,而 $PM_{2.5}$ 浓度≥150 μg/m^3(空气重污染)的混合层高度降到878 m;(4)受地形影响,石家庄地面风与边界层附近风对污染物的影响明显不同:925 hPa西南风、地面偏东风不利于污染物扩散;925 hPa西北风、地面偏西风有利于污染物浓度降低。925 hPa风速>4 m/s、地面偏西风风速>2 m/s、地面偏东风风速>3 m/s,有利于污染物扩散;(5)降水对污染物有湿清除作用,清除量不仅与降水量有关,还与前期 $PM_{2.5}$ 浓度有关,且冬季降雪过程对 $PM_{2.5}$ 的清除作用是降雨的4倍。

关键词:$PM_{2.5}$ 浓度;风向风速;降水量;混合层高度

文章编号:1006-7639(2016)-02-0349-07 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-02-0349

中图分类号:X513 **文献标识码**:A

引 言

$PM_{2.5}$ 是指大气中直径≤2.5 μm的颗粒物。虽然 $PM_{2.5}$ 在大气成分中含量少,但与较粗颗粒物相比,在大气中停留时间长,输送距离远,且含有大量有毒有害物质,对大气环境和人体健康有较大影响[1-3],2013年1月我国中东部出现大范围重污染天气,引起社会各界高度关注[4-6]。关于雾、霾污染,已有一些学者进行了相关研究[4-17],如王跃思等[6]从大气环流形势、气象条件、边界层结构等方面对2013年1月我国中东部大气污染成因进行分析发现,天气系统弱、强冷空气活动少和极其不利于污染物扩散的局地气象条件及地理位置是造成污染形成的外部条件;吴兑等[9]分析了2013年1月华北典型霾污染过程近地层流场变化,总结出环首都圈霾天气过程的近地层输送概念模型;韩霄等[10]通过对华北平原重霾过程的数值模拟表明,风速偏小、逆温明显、相对湿度偏高不仅有利于污染物的堆积,还利于颗粒物的吸湿性增长;王英峰[11]、张夏琨[12]、陈雷华[14]、吴庆梅[15]、郭立平[16]、刘新春[17]等分析了不同城市空气质量与气象条件的关系,表明空气污染与本地气压、相对湿度、风速等有很好的相关性,总结出一些有价值的预报指标。

以往研究多从气象条件与大气污染关系方面进行定性分析,对逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度与气象条件定量化、精细化分析较少。从公众及政府决策服务需求出发,在不利扩散的气象条件下,更需要污染物浓度精细化服务。石家庄是河北省省会,属大气污染较严重城市,2013年全国74个重点城市空气质量状况和排名中,河北省占七席,石家庄位居第二[18]。

收稿日期:2015-09-21;**改回日期**:2015-12-31

基金项目:国家自然科学基金(41375134)和中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金(IUMKY201304PP0104)共同资助

作者简介:付桂琴(1968-),女,硕士,高级工程师,主要从事环境等应用气象预报服务技术研究. E-mail:fgq84@tom.com, 919942110@qq.com

通讯作者:尤凤春(1958-),女,正研级高级工程师,主要从事灾害性天气成因及预报技术研究. E-mail:youfengchun@vip.sina.com

因此,本文利用 2013 ~ 2014 年石家庄逐小时 $PM_{2.5}$ 监测浓度及对应的气象观测资料,分析气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的定量化关系,探索关键气象条件预报指标,为进一步做好大气污染预报预警及防治提供参考。

1 资 料

所用资料为河北省环保局提供的 2013 ~ 2014 年石家庄逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据(17 328 个样本),以及河北省气象局气象信息中心提供的石家庄站对应的逐小时风向风速、降水量和邢台站探空资料。其中,$PM_{2.5}$ 浓度按照中华人民共和国国家环境保护标准 HJ633 - 2012 规定限值分级:空气质量优良($PM_{2.5}$ 浓度 < 75 μg/m^3)、轻度到中度污染(75 μg/m^3 ≤ $PM_{2.5}$ 浓度 < 150 μg/m^3)和重度污染以上($PM_{2.5}$ 浓度 ≥ 150 μg/m^3);风向是实时变化的矢量,同一站风向的最大频率相对稳定[19-20]。风向分析中,结合实际业务应用习惯,以本站 8 个方位风向风频进行统计分析。

石家庄(114.42°E,38.03°N)和邢台(114.50°E,37.07°N)均位于河北省太行山东部中南部平原,海拔高度分别为 81 m 和 78 m,天气气候条件基本一致,因此用邢台站探空资料近似代替石家庄站进行分析。

2 石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度特征

2.1 $PM_{2.5}$ 浓度日变化

经统计(表略),2013 ~ 2014 年石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度日平均为 140.2 μg/m^3,超过环境空气质量标准(GB3095 - 2012)所规定的二级浓度限值 75 μg/m^3 近 1 倍[21];小时最大浓度为 1 043 μg/m^3,出现在 2013 年 1 月 12 日 09 时(北京时,下同),最小为 0.5 μg/m^3,出现在 2013 年 6 月 27 日 00 时和 9 月 10 日 11 时;2 a 来平均每年 $PM_{2.5}$ 浓度 ≤ 75 μg/m^3(空气质量优良级)的时数达 3 023 h,相当于 126 d/a,而 $PM_{2.5}$ 浓度 ≥ 150 μg/m^3(重度污染以上)有 2 879 h,相当 120 d/a。可见,近 2 a 石家庄 $PM_{2.5}$ 优良日数、轻度到中度污染日数以及重度污染以上日数基本各占 1/3。

从 2013 ~ 2014 年石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度逐时变化(图 1)可以看出:石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度具有明显的"双峰型"日变化特征,一般凌晨 02 时至早晨 09 时 $PM_{2.5}$ 浓度相对较高,且波动较小,尔后开始持续下降,至下午 16 时前后降到最小值,16 时以后开始持续增加,至夜间 23 时再次达到次峰值,在短暂的下降后又再次增加。$PM_{2.5}$ 浓度日变化与地面风速日变化正好相反,且略滞后于地面风速日变化[22]。另外,白天随着气温升高,大气垂直运动增强,利于污染物扩散,夜间大气层结稳定,易有逆温生成,不利于污染物扩散。

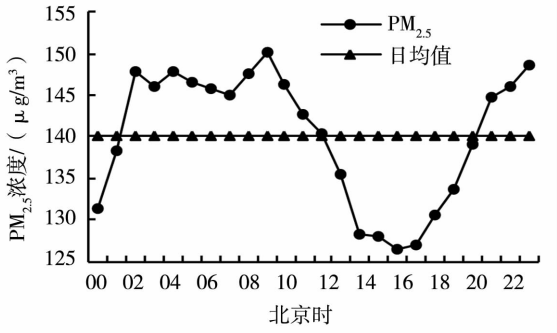

图 1 2013 ~ 2014 年石家庄逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度及日均值

Fig. 1 Hourly concentration of $PM_{2.5}$ and daily mean value in Shijiazhuang of Hebei during 2013 - 2014

2.2 $PM_{2.5}$ 浓度月季变化

由 2013 ~ 2014 年石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度月、季变化(图 2)可以看出:1 月 $PM_{2.5}$ 浓度最高,其次是 2 月和 12 月,7 ~ 8 月是全年最低时段。其中,2013 年除 3、4、7 月 $PM_{2.5}$ 平均浓度略低于 2014 年外,其他各月都明显高于 2014 年同期,尤其是 1 月和 12 月显著偏高。2013 年污染最重的 1 月 $PM_{2.5}$ 浓度达 350.6 μg/m^3,是 7 月(70.6 μg/m^3)的近 5 倍。从季节分布上看:$PM_{2.5}$ 浓度冬季最高,秋季次之,夏季最低。冬季大气层结稳定,近地层多逆温,气象条件不利于污染物垂直扩散。另外,石家庄冬季燃煤取暖,造成污染物排放量增大,使得 $PM_{2.5}$ 浓度升高;春季冷空气活动频繁,风力加大,气象条件有利于污染物扩散,加之采暖期结束后燃煤排放量减少,$PM_{2.5}$ 浓

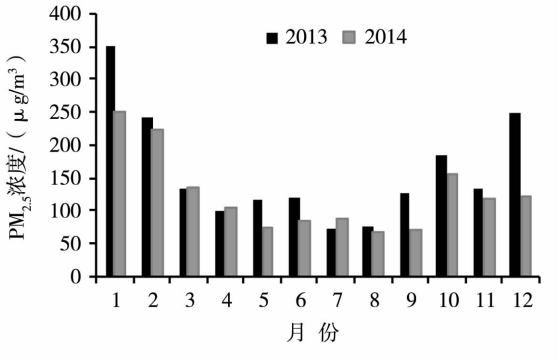

图 2 2013 ~ 2014 年石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度月、季变化

Fig. 2 Monthly and seasonal variations of $PM_{2.5}$ concentration in Shijiazhuang of Hebei during 2013 - 2014

度较冬季明显降低;夏季降水集中,且多对流性天气,大气垂直运动增强,利于污染物垂直扩散,降雨冲刷利于空气净化,$PM_{2.5}$浓度为全年最低;秋季降水减少,多辐射逆温,大气层结趋于稳定,$PM_{2.5}$浓度再次升高。何建军等[23]研究表明:特殊气象条件是造成城市大气污染事件的主要因子之一。可见,$PM_{2.5}$浓度月、季分布与气象条件的季节性变化有明显关系。

3　气象条件对 $PM_{2.5}$影响

3.1　垂直扩散的影响

污染物质量浓度除了受污染源影响外,还取决于大气的稀释扩散能力。故而,大气稳定度变化对污染物垂直扩散有一定影响[24]。石家庄处于太行山东部山脉背风处,大气扩散条件明显弱于开阔平原[25]。受地形等影响,河北省中南部平原早晨多逆温。分析 08 时大气层结特征发现(图略),2013 ~ 2014 年共出现逆温 485 d,平均 242.5 d/a;逆温层底平均高度 433.2 m,逆温层顶高 654.4 m,逆温强度 3.5 ℃;出现逆温时 $PM_{2.5}$浓度(日平均为 160.1 μg/m^3)比没有逆温时(日平均 108.9 μg/m^3)高,尤其在污染较重的冬季表现更为明显。另外,分析逆温月出现频次发现(图略),逆温出现频率最多的是 10 ~ 12 月,达 82.8% ~ 86.2%,其次是 1 ~ 3 月,为 71.4% ~ 77.4%,逆温频次最低的是 5 ~ 7 月,为 46.4% ~ 51.6%。可见,逆温抑制了大气垂直运动,限制了污染物垂直扩散。

大气混合层高度也是反映大气垂直扩散能力的重要参数[26]。2013 ~ 2014 年石家庄大气混合层高度在 10 ~ 2 520 m 之间,混合层平均高度 1 142 m。图 3 给出 2013 ~ 2014 年大气混合层高度与 $PM_{2.5}$浓度的关系。可以看出,随着大气混合层高度的升高,$PM_{2.5}$浓度逐渐降低,整体表现出显著的下降趋势,二次多项式拟合的相关系数达 -0.396。

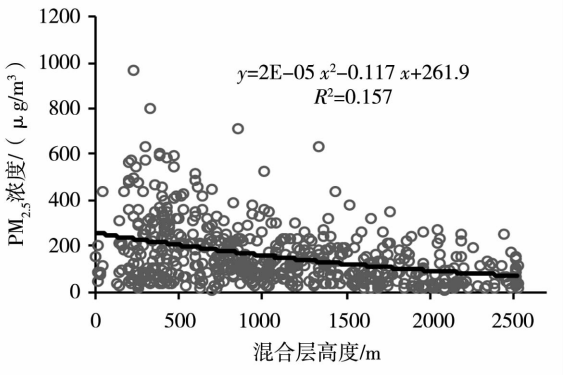

图 3　2013 ~ 2014 年石家庄大气混合层高度与 $PM_{2.5}$浓度的关系

Fig. 3　Relationship between the atmospheric mixing layer height and $PM_{2.5}$ concentration in Shijiazhuang of Hebei during 2013 - 2014

根据 $PM_{2.5}$污染指数分级标准,分别统计大气混合层平均高度。可知,$PM_{2.5}$浓度 < 75 μg/m^3,对应大气混合层平均高度为 1 448 m;当 $PM_{2.5}$浓度在 75 ~ 150 μg/m^3 时,大气混合层平均高度为 1 179 m;$PM_{2.5}$浓度增大到 150 μg/m^3 以上出现重度污染时,大气混合层平均高度降至 878 m。可见,空气质量较好时,大气混合层高度较高,当大气混合层高度降低时,$PM_{2.5}$浓度增大,易出现重污染天气。

3.2　水平输送的影响

刘宇[27]、王喜全[28]等研究表明:风对大气污染物的扩散和三维输送起重要作用,其中风向决定污染物的输送方向,风速则影响污染物的扩散程度。污染物主要集中在边界层以下,因此,重点分析边界层以下风向风速对污染物输送的影响。河北省中南部平原地区,925 hPa 大约位于 800 m 高度,基本是边界层高度。图 4 是 925 hPa 和地面不同风向对应的 $PM_{2.5}$浓度玫瑰图。从图 4a 可以看出:925 hPa 高度上,西南风方向时 $PM_{2.5}$浓度最高,为 193.2 μg/m^3,西北风时 $PM_{2.5}$浓度最低为 117.9 μg/m^3。从风向出现频率统计看(图略),925 hPa 北风风频最大,为 23.1%,其次西南风 15.9%,东南风风频最小为 2.9%。其中,对应 $PM_{2.5}$浓度较高的南风、西南风、西风风频之和为 41.1%。也就是说,边界层高度风向在 180° ~ 270°,不利于石家庄大气污染物扩散,$PM_{2.5}$浓度高;风向在 315° ~ 360°及 0° ~ 45°时,有利于大气污染物扩散,$PM_{2.5}$浓度较低。可见,石家庄全年中有近一半时间不利于污染物浓度的降低。

在没有明显天气系统影响时,石家庄多受地方性风影响,表现为地面白天以偏东风为主,夜间以偏西风为主。由石家庄 $PM_{2.5}$浓度随地面风向变化玫瑰图(图 4b)可以看出:当地面为偏东风时,$PM_{2.5}$浓度高,其中东北风时 $PM_{2.5}$浓度最高为 164.7 μg/m^3;当地面为西南风时,对应的 $PM_{2.5}$浓度较低。由于无冷空气影响,大气垂直扩散能力较弱,加之受西部山脉阻挡(石家庄处于太行山东麓),地面偏东风对污染物起到输送累积作用,而偏西风则有利于污染物向外输送扩散。从地面风向频率统计看(图略),石家庄地面出现偏东风频率 39.1%,偏西风频率 37%。可见,石家庄地面风向与边界层附近风向对污染物影响明显不同。

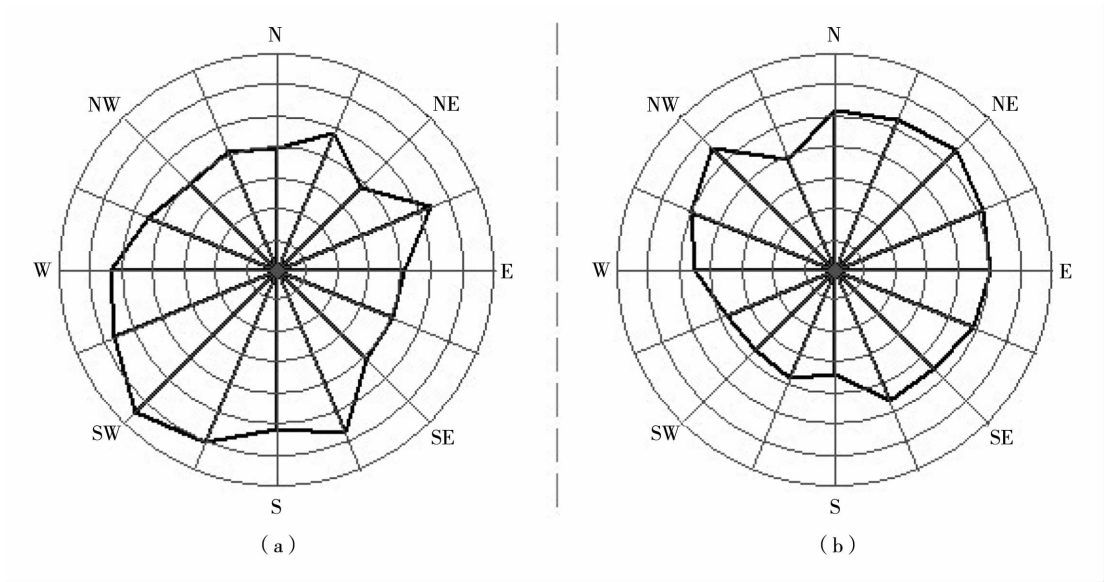

图 4 石家庄 925 hPa(a)和地面(b)不同风向 $PM_{2.5}$浓度变化玫瑰图

(圆圈代表 $PM_{2.5}$浓度值,间隔为 30 μg/m^3)

Fig. 4 Variation of $PM_{2.5}$ concentration with different wind direction on 925 hPa (a) and surface (b) in Shijiazhuang of Hebei Province (The circles represent the value of $PM_{2.5}$ concentration with 30 μg/m^3 interval)

从环流形势分析,没有明显冷空气影响时,石家庄近地面层多受西南气流控制,925 hPa 为西南风,由于太行山地形影响,石家庄地面为偏东风。探空图上表现为风随高度顺时针旋转,近地层常伴有暖平流或暖脊。暖平流生成了持续暖空气盖,易形成边界层逆温,影响污染物扩散[29]。

由 925 hPa 风速与 $PM_{2.5}$浓度变化(图 5a)可以看出:925 hPa 风速 <4 m/s 时,污染物浓度随风速增大而增加;当风速 >4 m/s 时,污染物浓度随风速增大而减小。说明边界层高度 4 m/s 以下风速不利于污染物扩散。2 a 来,925 hPa 上 4 m/s 以下风速为 281 d,平均每年有 140.5 d 不利于污染物扩散。由地面风速与 $PM_{2.5}$浓度变化(图 5b)可知:随着风速增大,$PM_{2.5}$浓度总体呈降低趋势,但不同风向对 $PM_{2.5}$浓度的影响有所不同。偏东风时各风速区间的 $PM_{2.5}$浓度都比偏西风时大。风速 <2 m/s 的偏西风,对应 $PM_{2.5}$浓度在严重污染以上,当风速 >2 m/s 时,随着风速增大,$PM_{2.5}$浓度明显减小,说明 2 m/s 以上的偏西风有利于污染物扩散。偏东风:当风速 <3 m/s 时,$PM_{2.5}$浓度基本在严重污染以上,且随风速增大,$PM_{2.5}$浓度降低较小;风速 >3 m/s 时,$PM_{2.5}$浓度随风速增大呈明显降低趋势,有利于石家庄污染物扩散。

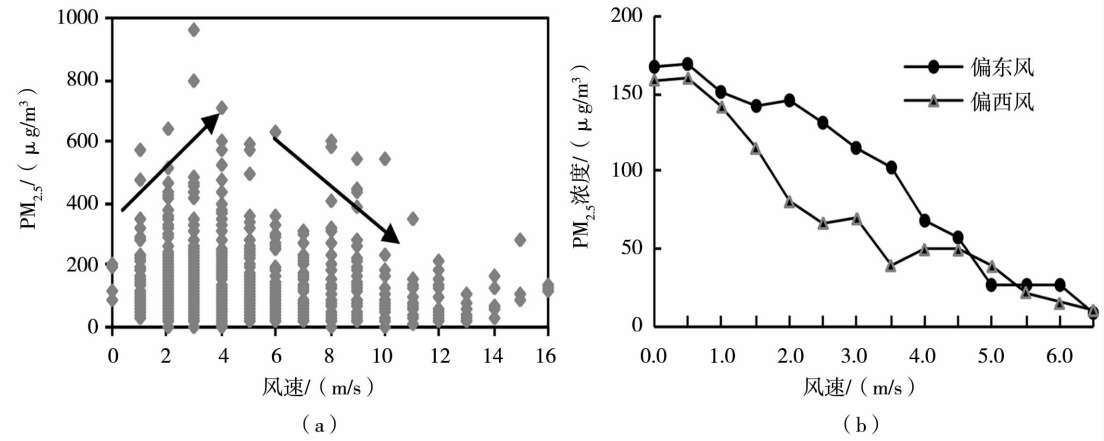

图 5 石家庄 925 hPa(a)和地面(b)风速与 $PM_{2.5}$浓度变化

Fig. 5 Variation of $PM_{2.5}$ concentration with different wind speed on 925 hPa (a) and surface (b) in Shijiazhuang of Hebei Province

3.3　降水的影响

为分析降水对 $PM_{2.5}$的影响,首先筛选出 2013 ~2014 年石家庄降水日(日降水量≥0.1 mm)与非降水日,分别统计 $PM_{2.5}$浓度,得出降水日 $PM_{2.5}$浓度平均为 111.7 μg/m^3,非降水日 $PM_{2.5}$浓度平均为 143.7 μg/m^3。图 6 是石家庄日降水量与 $PM_{2.5}$日均浓度的关系,可知随着日降水量的增大,$PM_{2.5}$日均浓度表现出明显下降趋势,尤其是 25 mm 以下降水量,二者反相关关系更明显。可见降水量对 $PM_{2.5}$有湿清除作用。

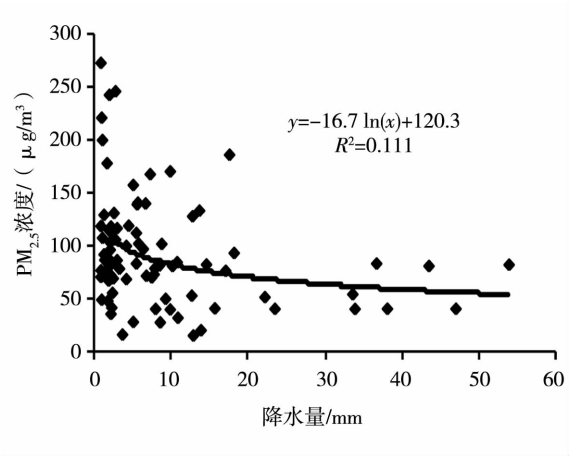

图 6　石家庄 2013 ~2014 年日降水量与 $PM_{2.5}$浓度的关系

Fig. 6　The relationship between daily precipitation and $PM_{2.5}$ concentration in Shijiazhuang of Hebei during 2013 – 2014

基于降水日前后 $PM_{2.5}$浓度变化,定量分析降水量对污染物的清除作用。本文规定:降水前一日 $PM_{2.5}$日均浓度($PM_{2.5}$初始浓度)减去降水后一日 $PM_{2.5}$日均浓度表示降水对 $PM_{2.5}$的清除作用。若清除量 >0,表示降水对 $PM_{2.5}$有清除作用。为分析降水量和 $PM_{2.5}$初始浓度对清除量的影响,对 $PM_{2.5}$初始浓度(P)、降水量(R)和清除量(Y)进行归一化处理,建立多元回归方程如下:

$$Y = 1.029 \times P + 0.212 \times R \qquad (1)$$

其中,相关系数 $r = 0.887$,$F = 132$,通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。回归方程系数均为正数,表明降水前 $PM_{2.5}$初始浓度越高、降水量越大,其清除量也越大。

另外,分析污染严重的冬季降雪过程与降雨过程对 $PM_{2.5}$小时浓度变化的影响。2 a 来石家庄降雪过程共计 8 次,均出现在 1 月和 2 月,降雪量在 0.5 ~6.8 mm 之间;降雨过程 111 次,降雨量在 0.1 ~ 54 mm 之间。按以下方法进行统计:降水前 1 h 的 $PM_{2.5}$浓度为过程初始浓度,初始浓度减去降水结束后 1 h 的 $PM_{2.5}$浓度为过程清除量,清除量与初始浓度的比值为清除率。统计降雪和降雨过程 $PM_{2.5}$浓度的变化(表 1),发现石家庄冬季降雪前 $PM_{2.5}$平均浓度(214.4 μg/m^3)是降雨前(105.8 μg/m^3)的 2 倍之多,降雪对 $PM_{2.5}$的清除量是 185.1 μg/m^3,为降雨清除量 23.3 μg/m^3 的 8 倍。从过程清除率的对比看,降雪对 $PM_{2.5}$清除率是降雨的近 4 倍。由于冬季污染物浓度高,雪花一般比雨点面积大,下落过程相对较缓,在空中停留时间长,对 $PM_{2.5}$浓度的清除作用比降雨大。

图 7 是 2013 年 1 月 19 日 22 时至 20 日 12 时典型的一次降雪过程逐时降雪量与 $PM_{2.5}$浓度变化。降雪初期 19 日 22 时,$PM_{2.5}$小时浓度最大达 539 μg/m^3,随着降雪的持续,$PM_{2.5}$浓度开始略有下降,而后降雪量进一步加大(尤其是小时降雪量在 0.8 mm 以上),在持续时间长达 4 h 后,$PM_{2.5}$浓度迅速下降到 114 μg/m^3;22 日 04 时以后降雪大幅减弱,$PM_{2.5}$浓度呈平缓波动变化,过程最大清除量达 418 μg/m^3。降雪期间,小时风速在 0.9 ~ 1.9 m/s 之间,尤其在小时降雪 0.8 mm 以上的连续 4 h 内,风速在 0.9 ~ 1.4 m/s 之间,风速较小,可见主要是降雪对 $PM_{2.5}$起到清除作用。

表 1　2013 ~2014 年石家庄降雪与降雨过程 $PM_{2.5}$浓度变化

Tab. 1　Variation of $PM_{2.5}$ concentration before and after rain and snow processes during 2013 – 2014 in Shijiazhuang of Hebei

	次数/次	平均降水量/mm	$PM_{2.5}$平均初始浓度/(μg/m^3)	$PM_{2.5}$平均清除量/(μg/m^3)	$PM_{2.5}$平均清除率/%	$PM_{2.5}$最大初始浓度/(μg/m^3)	$PM_{2.5}$最大清除量/(μg/m^3)
降雪	8	2.5	214.4	185.1	86.3	539.0	418.0
降雨	111	6.7	105.8	23.3	22.0	290.3	263.1

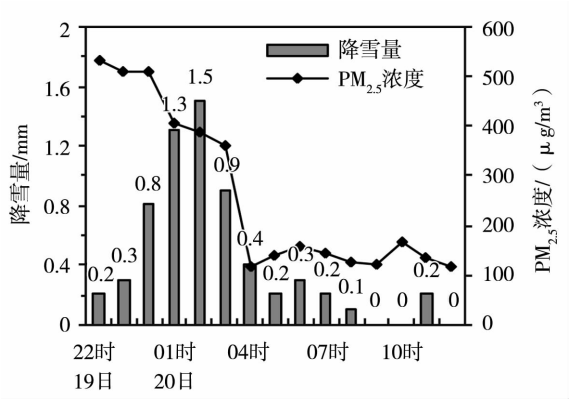

图7 石家庄2013年1月19日22时至20日12时降雪过程对$PM_{2.5}$浓度的影响

Fig. 7 The effect of hourly snowfall on $PM_{2.5}$ concentration from 22:00 BST 19 to 12:00 BST 20 January 2013 in Shijiazhuang of Hebei

4 结 论

(1)2013~2014年石家庄$PM_{2.5}$浓度存在明显的日、月和季节变化特征。一天中$PM_{2.5}$浓度最高值出现在09时左右,最低值出现在16时左右。从月和季节变化看,冬季污染最重,$PM_{2.5}$浓度最高,秋季次之,夏季$PM_{2.5}$浓度最低,季节性变化明显。

(2)石家庄平均每年242.5 d早晨有逆温,其中10~12月逆温频率最高,其次是1~3月,逆温是影响污染物垂直扩散的一个主要原因。空气质量优良时,大气混合层高度平均为1 448 m;空气质量重度污染以上时,大气混合层高度明显降低,平均为878 m。

(3)近地面层风向风速对污染物的水平输送与扩散有明显影响。当没有明显天气系统影响时,925 hPa为西南风、地面偏东风时,不利于石家庄本地污染物扩散,易出现污染;925 hPa风速>4 m/s、地面偏西风2 m/s和偏东风3 m/s以上时,均有利于污染物浓度降低。

(4)降水对污染物有湿清除作用,清除量不仅与降水量有关,还与降水前$PM_{2.5}$浓度有关,降雪的湿清除作用比降雨更大。

参考文献:

[1] Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems Brisban (Australia) using multiple linear regression techniques[J]. Atmospheric Environment, 1999,33(19):3237-3250.

[2] Popen C R, Burnett R M J, Calle T E, et al. Lung cancer cardiopulmonary mortality and long term exposure to fine particulate air porppution[J]. Journal of the American Medical Association, 2002, 287:1132-1141.

[3] 彭艳梅,钟玉婷,何清,等. 大气气溶胶细粒子研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,7(1):69-74.

[4] 穆泉,张世秋. 2013年1月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估[J]. 中国环境科学,2013,33(11):2087-2094.

[5] 魏哲,杨晶,王立涛,等. 2013年1月邯郸市严重霾天气的污染特征分析[J]. 环境科学学报,2014,34(5):118-1124.

[6] 王跃思,姚利,王莉莉,等. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(1):15-26.

[7] 王开燕,邓雪娇,李海洋,等. 不同天气状况下气溶胶散射系数变化特征分析[J]. 气象与环境科学,2014,37(1):29-32.

[8] 靳军莉,颜鹏,马志强,等. 北京及周边地区2013年1-3月$PM_{2.5}$变化特征[J]. 应用气象学报,2014,25(6):690-700.

[9] 吴兑,廖碧婷,吴蒙,等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. 环境科学学报,2014,34(1):1-11.

[10] 韩霄,张美根. 2013年1月华北平原重霾成因模拟分析[J]. 气候与环境研究,2014,19(2):128-139.

[11] 王英峰,丁国安,严鹏. 北京地区$PM_{2.5}$的成分特征及来源分析[J]. 应用气象学报,2007,18(5):645-654.

[12] 张夏琨,王春玲,王宝鉴. 气象条件对石家庄市空气质量的影响[J]. 干旱气象,2011,29(1):191-199.

[13] 周巧兰,束炯,王坚捍. 上海地区低能见度特征分析[J]. 气象与环境科学,2009,32(2):26-29.

[14] 陈雷华,余晔,陈晋北,等. 2001-2007年兰州市主要大气污染物污染特征分析[J]. 高原气象,2010,29(6):1627-1633.

[15] 吴庆梅,张胜军. 一次雾霾天气过程的污染影响因子分析[J]. 气象与环境科学,2010,33(1):12-16.

[16] 郭立平,乔林,石茗化,等. 河北廊坊市连续重污染天气的气象条件分析[J]. 干旱气象,2015,33(3):497-504.

[17] 刘新春,钟玉婷,何清,等. 乌鲁木齐大气黑碳气溶胶浓度变化特征及影响因素分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,7(3):36-42.

[18] 魏哲,杨晶,王立涛,等. 2013年1月邯郸市严重霾天气的污染特征分析[J]. 环境科学学报,2014,34(5):118-124.

[19] 江滢,罗勇,赵宗慈. 近50年我国风向变化特征[J]. 应用气象学报,2008,19(6):666-672.

[20] 付桂琴,赵春生,张杏敏,等. 1961~2010年河北省地面风变化特征及成因探讨[J]. 干旱气象,2015,33(5):497-504.

[21] 刘庆阳,刘艳菊,杨峥,等. 北京城郊冬季一次大气重污染过程颗粒物的污染特征[J]. 环境科学学报,2014,34(1):12-18.

[22] 付桂琴,赵春生,张杏敏,等. 河北省地面风减小趋势特征及与大气重污染关系研究[A]. 中国气象学会2013年年会论文集[C]. 2013.338-345.

[23] 何建军,余晔,刘娜,等. 基于WRF模式的兰州秋冬季大气污染预报模型研究[J]. 气象,2013,39(10):1293-1303.

[24] 孙玫玲,穆怀斌,吴丹朱,等. 天津城区秋季$PM_{2.5}$质量浓度垂直分布特征研究[J]. 气象,2008,34(10):60-66.

[25] 齐冰,刘寿东,杜荣光,等. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析[J]. 气象,2012,38(10):1225-1231.

[26] 尤焕苓,刘伟东,潭江瑞. 北京地区平均最大混合层厚度的时间变化特征[J]. 气象,2010,36(5):51-55.

[27] 刘宇,王式功,尚可政. 兰州市低空风时空变化特征及其与空

气污染的关系[J]. 高原气象,2002,21(3):322 - 326.
[28] 王喜全,杨婷,王自发. 灰霾污染的跨控制区影响——一次京津冀与东北地区灰霾污染个案分析[J]. 气候与环境研究,2011,16(6):690 - 696.
[29] 康娜,辛金元,蔺永耀,等. 北京山前典型细粒子污染过程的气象条件分析[J]. 环境科学研究,2009,22(9):1013 - 1020.

Effect of Meteorological Conditions on $PM_{2.5}$ Concentration in Shijiazhuang of Hebei

FU Guiqin[1,2], ZHANG Xingmin[1], YOU Fengchun[3], TIAN Yaqin[1], LI Erjie[4]

(1. *Hebei Provincial Meteorological Service Center*, *Shijiazhuang* 050021, *China*;
2. *Key Laboratory for Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021, *China*; 3. *Beijing Meteorological Observatory*, *Beijing* 100089, *China*;
4. *Hebei Provincial Meteorological Environment Center*, *Shijiazhuang* 050021, *China*)

Abstract: To improve the environmental forecasting service ability and meet the needs of the public and government, the effects of meteorological condition on $PM_{2.5}$ concentration were quantitatively analyzed from aspects of atmospheric horizontal and vertical diffusion, local circulation based on the hourly observation data of $PM_{2.5}$ concentration, wind direction, wind speed, precipitation in Shijiazhuang and atmosphic mixing height of sounding data from Xingdai station during 2013 - 2014. The results are as follows: (1) The daily variation of $PM_{2.5}$ concentration was obvious, the daily concentration was highest at 08:00 and lowest at 16:00 in Shijiazhuang. And it had significant seasonal variation with highest concentration in winter and lowest concentration in summer. (2) There were 485 days temperature inversion during 2013 - 2014 in Shijiazhuang, and the frequency appearring in October to December was the most ranging from 82.8% to 86.2%. The temperature inversion blocked the vertical motion of atmosphere in lower layer, which wasn't conducive to spread of air pollutants. (3) The correlation of mixing layer height with $PM_{2.5}$ concentration was negative. When the $PM_{2.5}$ concentration was less than 75 $\mu g/m^3$, the average mixing layer height was 1 448 metres, while that was more than or equal to 150 $\mu g/m^3$, the mean mixing layer height declined to 878 metres. (4) The influences of wind direction and wind speed on pollutants over the surface and boundary layer were obviously different in Shijiazhuang owing to the different terrain. The southwest wind on 925 hPa and easterly winds on ground weren't helpful to diffusion of pollutants. However the northwest wind on 925 hPa and westerly wind on ground were beneficial to diffusion of pollutants. When wind speed on 925 hPa was greater than 4 m/s and the westerly wind speed was greater than 2 m/s or the easterly wind speed was greater than 3 m/s on surface, it was conducive to pollution diffusion. (5) Precipitation had wet removing effect on pollutants, the cleaning quantity was not only related to the precipitation, but also to the $PM_{2.5}$ concentration before the rainfall. The removing effect of snowfall in winter on the quantity of $PM_{2.5}$ concentration was 4 times more than the rainfall.

Key words: $PM_{2.5}$ concentration; wind direction and wind speed; precipitation; mixing layer height