石家庄市一次大气重污染过程的边界层 特征和成因分析

韩军彩,陈静,石文雅,张立霞

(河北省石家庄市气象局,石家庄 050081)

摘要:针对石家庄市 2015 年 12 月 5—14 日出现的重污染过程,利用石家庄市逐日地基微波辐射计、风廓 线雷达、地面气象观测资料以及同期的污染物观测资料,分析了重污染过程期间大气边界层温度、湿度、 风变化特征及对 PM_{2.5}的影响,采用 Hysplit 后向气团轨迹模式对污染来源进行分析。此次重污染以局地排 放为主要形成源,期间冷空气势力弱,地面日平均风速均在 1.5 m/s 以下,日平均相对湿度均在 70%以上, 风速小、湿度大,稳定的大气环流形势为重污染提供了持续稳定的大气环境背景。逆温形成及快速增厚导 致重污染开始,逆温层平均厚度为 683 m,逆温层厚、强、不易消散,导致重污染持续时间长、污染重。近 地面小风层厚(平均 700 m 左右),通风能力弱,导致污染物难以稀释扩散。同时近地层湿度大、厚度厚, 使得 PM_{2.5}更容易形成和积累,对重污染加重起到了促进作用。

关键词:重污染;微波辐射计;温度层结;湿度层结;风廓线雷达

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2019.06.014

中图分类号: X823 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)06-0085-07

Formation Mechanism and Boundary Layer Meteorology Characteristic of a Serious Pollution in Shijiazhuang

HAN Jun-cai, CHEN Jing, SHI Wen-ya, ZHANG Li-xia (Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang, 050081, China)

ABSTRACT: The temperature and humidity and wind change of the atmospheric boundary layer and its impact on $PM_{2.5}$ for the severe pollution event during December 5-14, 2015 were studied with daily observation data from ground-based microwave radiometer, radar wind profiler, meteorological station and air pollution observation station, respectively. In this paper, the pollution forming source was analyzed with the Hysplit model. The results showed that local pollutant emission was the main pollution forming source during the severe pollution. The cold air was weak, the mean wind speed was less than 1.5m/s and relative humidity was more than 70% during the sustained fog-haze event. The weather background of weak breeze, abundant humidity and stable atmosphere circulation was favorable for the formation of serious pollution. The beginning and increasing in inversion layer thickness caused the pollution formation. The average height of inversion layer was about 700m. And the severe and long-lasting fog-haze event was attributed to the thick, strong and long-lasting inversion layer. The small wind layer thickness near ground was high (average 700m) and the ventilating capacity was weak, resulting in difficult dilution and diffusion of pollutants. In addition, high humidity layer thickness made it easier for $PM_{2.5}$ to form and accumulate, and it also contributed to the beginning and increasing severe pollution.

作者简介:韩军彩(1968-),女,河北高邑人,高级工程师,主要从事环境气象预报服务工作。

收稿日期: 2019-01-15; 修订日期: 2019-02-10

基金项目:石家庄科技计划项目(171241143A和181240343A)

KEY WORDS: heavy pollution; microwave radiometer; stratification of temperature; stratification of humidity; radar wind profiler

石家庄地处太行山东麓,特有的地理气候特征使 得常年风速较小,再加上秋冬季大气层结稳定,近地 面经常出现逆温,不利于污染物扩散,造成可吸入颗 粒物等污染物在近地层堆积,致使雾霾天气频繁出 现,环境空气质量明显下降。2015年12月石家庄重 度以上污染日数达到15天,其中6—13日、21—26 日重污染过程持续时间长、污染严重,严重影响交通、 公众生活及人体健康,成为公众关注的热点和焦点, 因此加强其成因研究具有重要意义。

国内外已有很多研究分析了不同地区空气重污 染现状及其影响因素。大量研究^[1-3]表明,短期内, 在大气污染物排放量变化不大的情况下,污染物浓度 变化主要受气象扩散条件的制约,其中一个很重要的 因素就是边界层内的大气层结状况。Davis等^[4]指出, 短时间内,大尺度环流形势和局地气象条件对重污染 过程起着决定作用。李二杰等^[5]基于邢台探空资料和 常规地面气象资料分析了河北省中南部重污染天气 的边界层气象特征。李国翠等^[6]分析了石家庄中度及 以上典型污染日对应的气象要素和天气背景特点,但 受探空站点网布局限制,石家庄一直没有探空资料, 至今仍缺乏利用本地探空资料分析边界层气象特征 的研究。

2015 年,石家庄市国家基本气象站先后建设了 Airda-HTG4型地基微波辐射计、CFL-06 L 波段低对 流层风廓线雷达,填补了探空的空白。目前,国内在 利用地基微波辐射、风廓线雷达等资料分析雾霾天气 边界层特征方面刚刚起步。邓长菊等^[7]利用微波辐射 资料分析了北京雾与霾天气大气液态水含量和湿度 层结特征。吴蒙等^[8]基于风廓线仪等资料进行了珠江 三角洲污染气象条件研究。因此文中利用微波辐射 计、风廓线雷达资料及地面气象观测资料,分析石家 庄市 2015 年 12 月 5—14 日的一次典型空气重污染过 程,揭示该过程的大气边界层温度、湿度、风场变化 特征及对空气质量的影响,以期为重污染天气的预报 预警提供科学依据。

1 资料与方法

本研究所用资料包括:石家庄市环境监测中心提供的 2015 年 12 月 5—14 日逐日环境观测资料(市区 7 个环境观测站的平均值)、石家庄市国家基本气象站相应时间段的地面气象观测资料、地基微波辐射计和风廓线雷达观测资料。气象与环境观测站点分布如图 1 所示。微波辐射计为 Airda-HTG4 型,每 2 min 完成 1 次全天空扫描观测。利用测量到的亮温数据,

通过神经网络、线性/非线性统计回归反演,最后获 得天顶方向地面至 10 km 高度共 93 层的温度、湿 度、液态水含量廓线等数据。风廓线雷达为 CFL-06 L 波段低对流层风廓线雷达,探测高度为 6~8 km, 最小探测高度为 150 m,观测数据的时间精度为 6 min,垂直精度在 4 km 以下为 120 m,在 4 km 以 上为 240 m。



研究采用轨迹模式 HYSPLIT-4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory-4)进行后 推气团轨迹模拟。HYSPLIT-4 是由美国国家海洋大气 研究中心 (NOAA) Draxler 等^[9]开发的供质点轨迹、 扩散及沉降分析用的综合模式系统。所使用的气象场 资料为 NOAA 全球同化系统 (GDAS)资料,分辨率 为 1°×1°,每次的后向延伸时间为 72 h。

2 结果与讨论

2.1 污染过程和天气形势

2015年12月6—13日石家庄市持续出现重污染 天气过程,期间只有1天为中度污染,首要污染物均 为PM_{2.5}。由2015年12月5—14日石家庄逐日天气 状况和AQI变化(见表1)可见,空气质量从5日 的良跳至6日的重度污染,之后呈加重趋势,8— 10日出现AQI持续高于300的严重污染。10日达 到此次重污染天气过程峰值,AQI达391。11日上 午开始,低空弱冷空气以偏北路径缓慢南压,污染 程度逐渐减轻。12日转为中度污染,但随着气压场 的减弱,13日污染再次加重,下降到重度污染。13 日夜间出现雨夹雪,14日上午随着较强冷空气以偏 西路径侵入,风速增大,湿度明显下降,至此重污 染过程结束。

表 1 2015 年 12 月 5—14 日石家庄市逐日大气状况和空气质重								
日期	AQI	$\frac{PM_{2.5}}{(\mu g \cdot m^{-3})}$	风速/ (m·s ⁻¹)	相对湿 度/%	地面 气压场	850 hPa 高度场	500 hPa 高度场	天气现象
12月5日	94	60	1.9	39	高压前部	西北气流	槽后	霾
12月6日	227	183	1.1	60	高压底部	西南气流	偏西气流	轻雾/霾
12月7日	259	212	1.2	72	高压底部	偏西气流	偏西北气流	轻雾
12月8日	332	284	1.1	79	高压后部	西南气流	西南气流	轻雾/雾
12月9日	382	342	0.8	84	均压场	偏西气流	偏西气流	轻雾/雾
12月10日	391	344	1.0	85	高压底部	偏北气流	偏北气流	轻雾/雾
12月11日	233	184	1.4	72	高压底部	偏北气流	偏南气流	轻雾/霾
12月12日	180	148	1.0	75	高压底部	偏北气流	西南气流	轻雾/霾
12月13日	243	194	0.6	78	均压场	偏南气流	西南气流	轻雾
12月14日	107	80	2.3	63	高压前部	偏北气流	偏西气流	轻雾/雾/雨夹雪

重污染过程前期随着地面高压东移,6日气压场 减弱, 与 5 日相比, 平均风速减小了 0.8 m/s, 平均 相对湿度增加了 21%, 静稳天气形成。AQI 从 5 日的 94 上升至 6 日的 227, 出现重污染, 风速减小、湿度 增加显著是重污染形成的主要原因之一。重污染过程 期间,高空 500 hPa 以偏南、偏西气流为主,边界层 内 850 hPa 前期以偏南、偏西气流为主。10 日开始转 为弱偏北气流,地面为均压、高压底部弱气压场控制。 7日、10日 500 hPa 高度场有 2 次浅槽东移, 但冷空 气势力弱,且以偏北路径缓慢南压,弱冷空气到达前, 均为暖脊或暖湿气流影响。这种高低空天气形势的配 合,导致静稳天气持续,日平均风速均在1.5 m/s以 下,日平均相对湿度均在70%以上,风速小且湿度大, 伴有雾、轻雾、霾,抑制了污染物的扩散,为大气污 染的形成及维持提供了稳定的大气环境背景。

2.2 气象要素与污染物浓度变化

2015年12月5-14日石家庄市 PM2.5浓度、相 对湿度、风向风速及能见度逐时对比如图 2 所示。从 图 2 中可见, 5 日白天小时风速为 2~3 m/s, 相对湿 度不足 40%, 空气质量优良。17 时开始, 风速减小 到 2 m/s 之下, 大气水平扩散能力下降, 相对湿度增 加, PM25浓度也开始增加, 能见度下降到 10 km 之 下,出现霾、轻雾。6日1时相对湿度为64%,风速 不足1m/s, 能见度只有3km, 空气质量达到重度污 染,风速减小、湿度增加,导致重污染过程开始。 8-10日连续严重污染期间是风速较低、相对湿度较 高的时期,大部分时段,风速在1.5 m/s之下,相对 湿度在 70%之上, 能见度在 1 km 之下。9 日、10 日 平均 PM₂₅浓度分别达到了 342、344 µg/m³, 其中 10 日凌晨到上午最高,最高值为434 μg/m³,正好对应 地面为均压场控制。近地层风速不足1 m/s, 相对湿 度超过 90%, 能见度不足 500 m, 出现雾。低风速不 利于污染物扩散,高相对湿度有利于气态污染物向颗 粒物的二次转化,导致污染进一步加重^[10-11]。11—12

日受偏北路径弱冷空气影响,中午前后风速增大到2 m/s 左右,相对湿度下降到 50%之下,空气质量有所 好转,能见度增大到5km之上。13日夜间出现雨夹 雪,但对污染物清除作用较弱,而湿度的增加使得 PM25浓度再次升高。14日10时开始,地面偏西风增 大到 4 m/s 之上,相对湿度下降到 40%之下,空气质 量快速转好。



2.3 污染气团来源

为了解本次污染过程的来源,应用 HYSPLIT-4 后推气团轨迹模式对污染来源进行气团轨迹模拟,按 气团轨迹传输的方向和速度对影响石家庄市空气质 量的污染物输送型进行分类,从而解析污染形成源。 一般来说,城市上空 300 m 以上主要以大尺度远距离 输送为主,100m以下则主要受局地近距离污染输送 影响^[12]。以石家庄市(38.03°N, 114.42°E)为参考 点,模式高度分别设置为 500 m 和 100 m,用该方法

模拟出 2015 年 12 月 5—14 日每天 00:00、06:00、12:00 及 18:00(世界时)4个时刻后推 72 h 的气团轨迹。 再利用聚类分析方法,将具有一定相似度的轨迹归为 一类,得到具有代表性的5 簇后向轨迹,如图 3 所示。 结果表明,100 m 高度 68%的气团来自局地近距离输 送,15%来自西北的内蒙古,10%来自山西跨区域远 距离输送。500 m 高度局地气团近距离输送占 58%, 40%来自西北的内蒙、山西跨区域远距离输送,西北 方输送的一般为清洁气团。因此,此次污染过程以局 地排放为主要形成源,短期内排放源可以认为变化不 大,主要考虑当地气象扩散条件所致。





2.4 重污染过程边界层特征

2.4.1 边界层逆温特征

大气层结稳定状况与大气污染物的稀释扩散能 力密切相关,逆温层结是边界层大气的重要特征之 一^[3]。逆温会限制近地面层强对流的发生,阻止近地 面空气中的水汽和污染物向高层扩散,使之大量聚集 在对流层底部,加剧大气污染的程度^[5]。

首先对微波辐射计数据反演的近地面层逆温底 高、顶高、厚度和强度进行统计,本次重污染过程逆 温生成演变与 AQI 对比如图 4 所示。AQI 升高与逆 温层的形成、增厚相关。5日19时开始,大气层结 趋于稳定,近地层出现逆温,大气扩散能力减弱,污 染物 AQI 值随之上升, 20 时空气质量由良下降到轻 度污染。随着逆温层厚度的增加,6日凌晨1点开 始, 逆温层厚度达到 300 m 以上, 空气质量也下降 到重度污染。7日高空有弱冷空气东移,地面逆温 减弱消散,但风速小,水平扩散能力较弱,空气质 量仍为重度污染,且 AQI 值较 6 日略有上升。8— 10日逆温层持续存在,平均厚度达到 683 m,最厚 达1200m,使得污染物在近地层累积,污染加重, 空气质量达严重污染。其中10日6-11时逆温厚、 强度强,08时逆温强度达0.6℃/100m,11时AQI 达到"爆表"。10日夜间到11日有弱冷空气侵入, 逆温层减弱, AQI 稍有下降。12 日为中度污染, 但 13 日夜间逆温层又有所增强, AQI 再度上升。14 日中午前后,随着强冷空气的到来,逆温层彻底被 打破,空气质量转优。



由于冬季平均脱地逆温层底相对高度还在大气 边界层的范围之内,故它仍会对市区空气污染物的稀 释扩散产生重要影响,因此下面重点分析 12 月 6— 13 日重污染过程期间,污染较重的 8—10 日温度的 垂直廓线变化特征。8—10 日 2000 m 以下每天 02 时、 08 时和 20 时微波辐射计数据反演的温度垂直廓线如 图 5 所示。可以看出,8—10 日每天三个时段均有逆 温层出现,8 日、9 日 200 m 以下贴地逆温不明显, 在 200 m 以上出现多层逆温层或等温层,但逆温强度 较弱。10 日三个时次均从地面开始出现逆温层,其 中 08 时逆温层最厚、强度最强,这与 10 日凌晨到上 午污染物浓度最高一致。另外,1000 m 以下大气温 度廓线呈非常明显的锯齿状,可能是由于大量污染物 使氧气在空间分布发生不均匀现象,致使仪器在测量 氧气辐射能量时发生锯齿现象。

2.4.2 边界层湿度特征

2015 年 12 月 6—13 日重污染过程期间,首要污染物均为 PM_{2.5},是形成雾霾天气的重要细颗粒物。



图 5 2015 年 12 月 8~10 日石家庄市温度垂直廓线图

研究表明^[13-14],颗粒物吸湿增长是灰霾形成的重要原因。从微波辐射计监测的 5—14 日大气相对湿度(如图 6 所示)变化来看,6 日重污染发生前,近地层湿度缓慢增加,1 km 以下相对湿度不足 40%,相对湿度超过 60%主要集中在 1~3 km 高度, PM_{2.5}浓度变化缓慢,空气质量以轻度污染为主。14 时之后,随着近地层湿度增大,高湿厚度增厚,PM_{2.5}浓度快速上升,500 m 以下相对湿度增加到 60%以上,2~3 km 最

大相对湿度超过 80%。14—15 时, PM_{2.5} 浓度由 134 µg/m³(中度污染)上升到 168 µg/m³(重度污染), 18 时达到 269 µg/m³(严重污染),严重污染持续期间, 湿度层结少变。7 日 4 时之后,高湿的厚度层变薄, 湿度下降,相对湿度在 60%左右,主要集中在 1 km 以下, PM_{2.5}浓度稍有下降,空气质量维持重度污染。 8—10 日近地层持续维持高湿层结,其中 1 km 以下 相对湿度较 5—7 日更大, PM_{2.5}浓度累积上升。特别 是 8 日 19—24 时,相对湿度超过 60%的厚度达到 7 km, PM_{2.5}浓度在 318~383 µg/m³之间,24 时达到本 次重污染过程的峰值。这可能是由于污染期间湿度较 大,有利于一次污染气体在大气颗粒物表面通过非均 相反应转化生成硫酸盐和硝酸盐等二次气溶胶,对重 污染形成起到了促进作用^[15]。

2.4.3 边界层垂直风廓线特征

本次重污染天气发生于静稳天气状态下,小风使 得污染物水平扩散能力差,大气处于停滞状态。风廓 线雷达以其高时空分辨率间隔 6 min 连续观测,为分 析风向风速垂直分布及随时间演变特征提供了基础 资料。2015年12月6—14日,石家庄市重污染过程 维持和结束风向风速随时间-高度变化情况如图 7 所 示。重污染期间,风的垂直分布是小风层厚,通风能 力弱,小风的风速普遍小于3 m/s,底层 600 m 以下 甚至小于2 m/s。小风从近地面向上伸展,具有日变 化,中午前后伸展高度向上延伸,平均高度约在 700 m 左右, 有时伸展高度超过 1000 m, 深厚的小风 层使大气处于停滞区,污染物累积。地面与低空风向 具有相似性,在弱气压场影响下,具有日变化特点。 18 时到次日 10 时以偏西风为主, 11-17 时风向以偏 南风为主。冷空气侵入是打破静稳态的主要动力,14 日上午,随着强冷空气以偏西路径侵入,低空偏西风 增大,并向地面延伸,霾自西向东快速消散,持续重 污染结束。



图 6 石家庄市 2015年12月5-14日相对湿度廓线变化



图 7 2015 年 12 月 6—10 日和 11—14 日石家庄市风的垂直分布

3 结论

1)此次重污染过程与当地气象条件密切相关,
稳定的大气环流形势为污染提供了持续稳定的大气
环境背景,近地面层风速小、湿度大、持续逆温是造
成重污染持续时间较长、污染较重的主要原因。

2) 逆温限制了污染物的垂直扩散,重污染过程 期间逆温层主要集中在 1000 m 以下,平均厚度为 700 m 左右,存在一层或多层贴地逆温或脱地逆温。 逆温层的形成、增厚导致重污染开始,逆温层厚、强、 持续时间长、不易消散导致重污染持续时间长、污染 重,逆温较强时段污染也最重。

3)大气水汽含量与 PM_{2.5}浓度关系密切,湿度较 大时,易于二次污染物转化,近地层湿度增大、增厚 导致 PM_{2.5}浓度快速上升,对重污染形成和加重起到 了促进作用。

4)重污染期间,小风层平均高度约在700 m 左 右,有时伸展高度超过1000 m,深、厚的小风层使 大气处于停滞区,通风能力弱,导致污染物累积。

气象条件对持续重污染的开始和结束起到了关键性作用,尤其是近地层大气温湿风层结的变化。因此需要加强边界层气象要素监测和重污染预报预警研究,以有效预防和应对重污染天气。

参考文献:

- 朱敏,王体键,卢兆民.一次持续空气污染过程的气象 条件分析[J]. 气象科学,2008,28(6):673-677.
- [2] 张蓬勃,金琼,陆晓波,等. 2013年1月持续性霾天气 中影响污染程度的气象条件分析[J]. 气象科学, 2016, 36(1):112-120.
- [3] 姜大膀, 王式功, 郎咸梅, 等. 兰州市区低空大气温度 层结特征及其与空气污染的关系[J]. 兰州大学学报(自 然科学版), 2001, 37(4): 133-139.
- [4] DAVIS R E, KALKSTEIN L S. Using a Spatial Synoptic Climatological Classification to Assess Changes in Atmospheric Pollution Concentrations[J]. Physical Geography, 1990, 11(4): 320-342.
- [5] 李二杰,刘晓慧,李洋,等.一次重污染过程及其边界 层气象特征量分析[J]. 干旱气象,2015,33(5):856-860.
- [6] 李国翠, 连志鸾, 郭卫红, 等. 石家庄市污染日特征及 其天气背景分析[J]. 气象科技, 2006, 34(6): 674-678.
- [7] 邓长菊, 尹晓惠, 甘璐. 北京雾与霾天气大气液态水含量和相对湿度层结特征分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 193-199.
- [8] 吴蒙, 吴兑, 范绍佳. 基于风廓线仪等资料的珠江三角 洲污染气象条件研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3): 619-626.
- [9] DRAXLER R R, HESS G D. An Overview of the HYSPLIT-4 Modeling System for Trajectories, Disper-

sion and Deposition[J]. Process in Materials Science, 1998, 47: 295-308.

- [10] SMYTH S C, JIANG W M, ROTH H, et al. A Comparative Performance Evaluation of the AURAMS and CMAQ Air-quality Modelling Systems[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(5): 1059-1070.
- [11] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次 空气重污染成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1154-1163.
- [12] 王芳, 陈东升, 程水源, 等. 基于气流轨迹聚类的大气 污染输送影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 637-642.
- [13] DU Huan-huan, KONG Ling-dong, CHENG Tian-tao, et al. Insights into Summertime Haze Pollution Events over Shanghai Based on Online Water-soluble Ionic Composition of Aerosols[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 5131-5137.
- [14] 王勇, 刘严萍, 李江波, 等. 水汽和风速对雾霾中 PM_{2.5}/PM₁₀变化的影响[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 5-7.
- [15] YAO X H, CHAN C K, FANG M , et al. The Water-soluble Ioniccomposition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(26): 4223-4234.