

杨晓春, 杜萌萌, 吴其重, 等. 西安地区一次重污染过程的气象条件及轨迹分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 547-552. [YANG Xiaochun, DU Mengmeng, WU Qizhong, et al. Analysis on Meteorological Condition and Trajectory of a Serious Pollution Weather in Xi'an of Shaanxi[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(3): 547-552], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0547

西安地区一次重污染过程的气象条件及轨迹分析

杨晓春¹, 杜萌萌¹, 吴其重², 程 龙¹, 毕 旭¹, 翟 园¹

(1. 陕西省西安市气象局, 陕西 西安 710016; 2. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘 要:利用西安市气象常规观测资料、美国国家环境预报中心(NCEP)1°×1°再分析资料 FNL (Final), 对西安地区 2012 年 12 月 11—15 日的一次重污染天气过程进行分析。结果表明:(1)与历史同期常年值比较,此次重污染天气过程中地面气象数据显示出明显的寡照、低温、高湿以及低风速;(2)高压后部的形势与地面弱辐合有利于近地面水汽的输送和凝结,与 850 hPa 的高湿相互配合,使得水汽与污染物相互吸附加剧污染天气。700 hPa 以下明显的下沉气流、持续出现的逆温层结、较低的混合层厚度将污染物聚集于近地面层内,引起污染的持续和加重;(4)西安地区所处的“喇叭口”盆地地形也是重污染天气持续的一个重要原因;(5)后向轨迹模拟结果显示偏东方向的河南、山西、渭南等地区为此次重污染过程中输入污染物的主要来源。

关键词:重污染天气;气象条件;后向轨迹

文章编号:1006-7639(2016)-03-06-0547 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0547

中图分类号:P458

文献标识码:A

引 言

近年来,随着我国经济迅速发展,各地雾霾天气频发,污染状况日趋严重,引起学界和公众的广泛关注。在污染排放源短期内无法有效控制的情况下,气象条件对于污染过程的出现、加重和缓解起到至关重要的作用。诸多研究表明,局地大气污染与大气环流背景、本地大气温压湿的垂直分布、地形条件、边界层风场变化以及常规气象因子如气温、降水、相对湿度、日照、风速、气压等都密切相关。如风速、风向和相对湿度与持续污染相关性较好^[1-2];气温与污染物浓度之间为负相关^[3];在空气未饱和状态下,湿度的适当增加会加重污染、恶化能见度^[4-5];弱降水并不能缓解污染,反而会使空气质量变得更差^[6-7];气压梯度增加,霾出现减少^[8];稳定的大气层结是导致区域污染发生的重要因素^[9-10]。特殊的地形条件在污染天气中也起到一定作用,如太行山地形与河北省中南部严重污染频繁出现有直接关系^[11],兰州河谷的槽形盆地限制污染物的扩散^[12]。

西安地区处于“喇叭口”特殊地形之中,也受地形环流影响,霾天气多出现在秋冬季节^[13]。胡琳^[14]、宁海文^[15]等分析了西安的污染物浓度与风速、逆温、混合层高度等气象要素的相关性,但结合气象要素、地形与后向轨迹对重污染天气的形成、维持分析比较少。2012 年 12 月 11—15 日西安地区出现连续重污染天气,监测数据显示 PM_{2.5} 小时最高浓度达到 753 μg·m⁻³。本文采用西安地区环境监测数据、气象常规观测数据及 NCEP 的 FNL 全球再分析资料,对这次重污染天气过程进行气象条件、地形条件和污染物来源分析。

1 监测实况

西安环保局的监测数据显示,2012 年 12 月 11—15 日西安地区出现重污染天气过程,5 日内 PM₁₀ 日平均浓度均 >400 μg·m⁻³, PM_{2.5} >300 μg·m⁻³, 远高于国家二级浓度限值(图 1)。其中 15 日的污染最为严重,PM₁₀ 的日均浓度达到 514 μg·m⁻³, PM_{2.5} 小时最高浓度达 753 μg·m⁻³, 达到严重污染等级。

收稿日期:2015-07-31;改回日期:2015-08-25

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(41305121)及陕西省气象局预报员专项(2015Y-17)共同资助

作者简介:杨晓春(1984-),女,汉族,陕西安塞人,硕士,工程师,主要从事天气气候、数值模拟研究。E-mail: y_xiaochun@sina.com

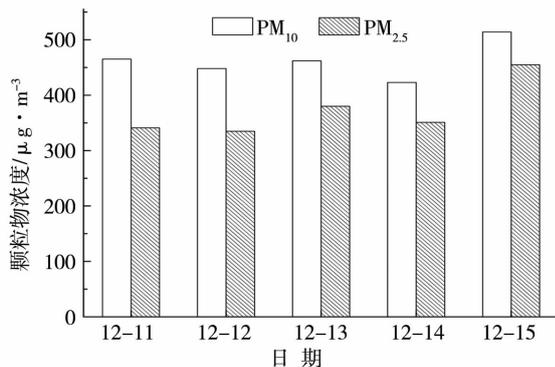


图1 2012年12月11—15日西安
PM₁₀与PM_{2.5}日均浓度

Fig. 1 The daily mean mass concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} from December 11 to 15, 2012 over Xi'an

2 地面气象条件

将2012年12月中旬的日照、气温、相对湿度、风速与历史同期30 a(1981—2010年)平均值进行比较,结果显示在重污染天气下,日照偏少、气温偏低、风速偏小,而相对湿度偏高。

西安市12月累计日照时数的30 a平均值为91.4 h,其中中旬为28.4 h,此次重污染过程中12日日照时数为1.5 h,其他几日均为0。说明重污染天气影响太阳辐射,导致日照时数急剧减少,促使地面气温降低,而近地面较低气温有利于逆温的维持。本次过程中日均气温仅为1.1℃,低于12月中旬30 a的平均气温(1.5℃)。气温与湿度有较好的反相关性,12月11—15日平均相对湿度为70%,污染最严重的15日达到88%,高于12月的30 a平均值(67%)。高湿度与高污染具有一致性,污染物颗粒附着在水汽上,增大水滴半径,降低能见度,同时也不易扩散,进一步加重污染^[16]。

西安地区常年风速较低,12月的30 a平均风速为1.2 m·s⁻¹,此次重污染过程中,5 d平均风速仅为0.9 m·s⁻¹,低风速不利于污染物扩散,也是重污染天气维持的有利条件^[17]。

此次重污染天气过程中寡照、低温、高湿以及低风速等气象条件有利于污染物累积,造成重污染天气。同时,重污染天气也加剧了日照时数减少和气温降低。

3 环流形势

3.1 高空形势

采用FNL全球资料分析污染过程的高空形势。由12月11—15日500 hPa平均高度场和850 hPa

平均温度场(图2)可见:西安地区受弱高压脊控制,高空形势稳定少变。低层850 hPa陕西中部经山西至内蒙中部为东北—西南向温度暖脊,无明显冷空气活动,西安地区850 hPa温度较高。稳定的大尺度环流及较弱的天气系统,有利于污染物聚集,而850 hPa的较高温度对逆温层的形成和维持有重要作用,同样不利于污染物扩散。

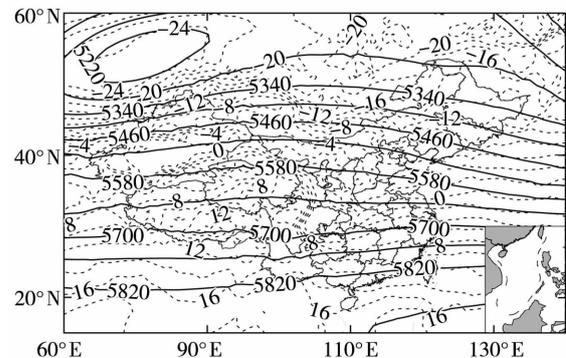


图2 2012年12月11—15日500 hPa
平均高度场(实线,单位:gpm)

与850 hPa平均温度场(虚线,单位:℃)

Fig. 2 The 500 hPa average height field (solid lines, Unit: gpm) and 850 hPa average temperature field (dotted lines, Unit: °C) from 11 to 15 December 2012

3.2 地面形势

污染天气过程地面形势一般对应弱气压场,其中以高压影响居多^[9]。由12月11—15日5 d平均的地面气压场(图3)看出,此次污染过程中,西安地区位于东北高压后部,等压线稀疏、气压梯度小、地面形势稳定。高压后部型是西安地区出现雾霾天气的典型地面气压场,在这种形势下西安地区主要受

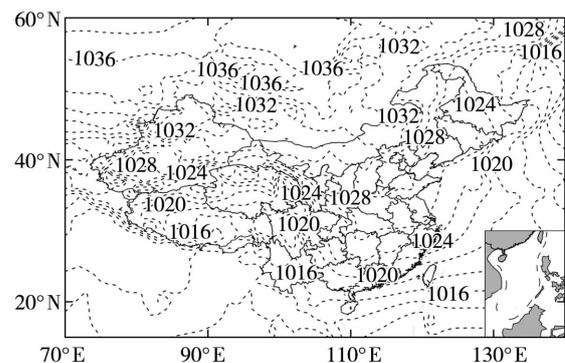


图3 2012年12月11—15日平均
地面气压场(单位:hPa)

Fig. 3 Average surface pressure field from 11 to 15 December 2012 (Unit: hPa)

偏东气流影响,这不仅会带来污染物,同样会有水汽自东向西往西安地区输送,湿度增加造成亲水粒子吸湿增长、能见度降低。进一步分析本次过程的地面平均散度场(图4),西安所在的陕西中部维持弱的水汽辐合,说明地面有气流辐合使得污染物聚集、加重污染。

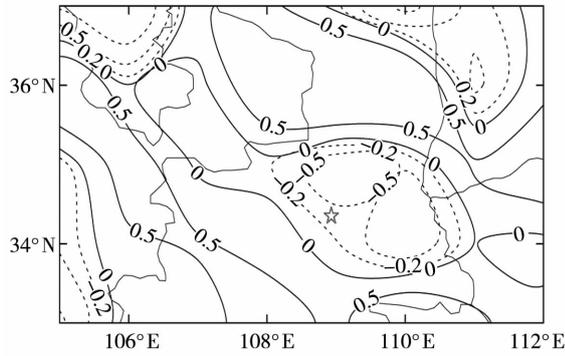


图4 2012年12月11—15日平均的地面散度(单位: 10^{-5} s^{-1})分布
Fig. 4 Average surface divergence from 11 to 15 December 2012 (Unit: 10^{-5} s^{-1})

3.3 高空气象要素

利用 FNL 资料,对邻近西安的格点(34°N 、 109°E)进行时空剖面分析,由12月11—15日逐日湿度和垂直速度剖面(图5)可以看出,5 d内850 hPa以下相对湿度均 $> 60\%$,个别时段超过 80% ;5 d内700 hPa以下均为下沉气流。大气低层相对湿度未达到饱和状态,使得污染物易附着到水汽粒子,更加

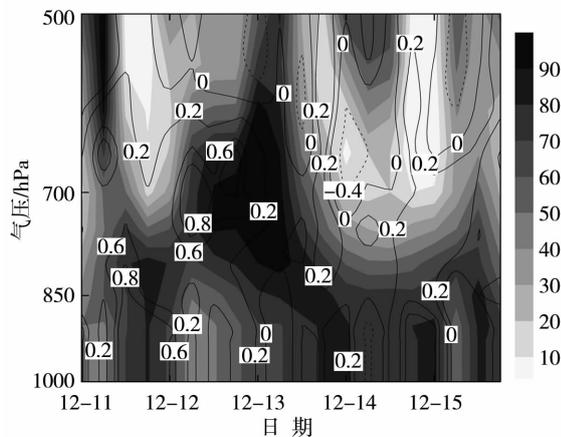


图5 2012年12月11—15日格点(34°N 、 109°E)上空垂直速度(等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)与相对湿度(阴影,单位:%)时间—高度剖面
Fig. 5 Time - height profiles of vertical velocity (isolines, Unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and relative humidity (shaded, Unit:%) over the grid point (34°N , 109°E) from December 11 to 15, 2012

难以扩散,同时受下沉气流制约,污染物伴随水汽累积在近地面层,在扩散条件没有改变之前,污染物浓度持续增加,雾霾持续加重。

利用西安泾河站探空资料对12月11—15日500 hPa以下风场进行分析。由图6可见,整个污染过程期间,西安近地面风速(850 hPa以下)都 $< 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且为一致的偏东风。风速小表明大气水平运动较弱,有利于污染物堆积,同时上下层之间风向与风速的切变较弱,大气层结的垂直交换能力差,不利于污染物的对流扩散。

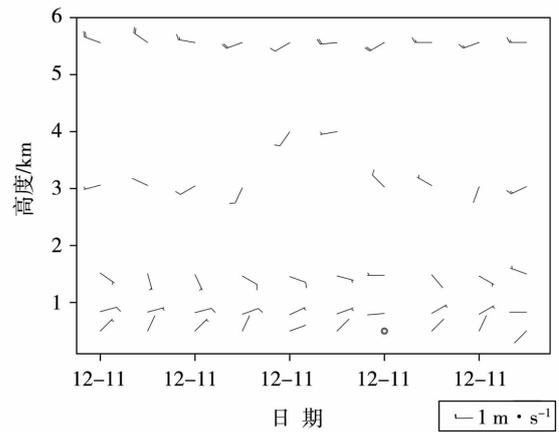


图6 2012年12月11—15日西安上空风场时间高度剖面

Fig. 6 Time - height profile of wind field over Xi'an from December 11 to 15, 2012

逆温层的存在不利于污染物的扩散,按照其起始高度可分为接地逆温与不接地逆温。图7是用探空数据计算的11—15日中10个时次西安地区的逆温层高度、厚度和强度的时间序列。除12日20:00

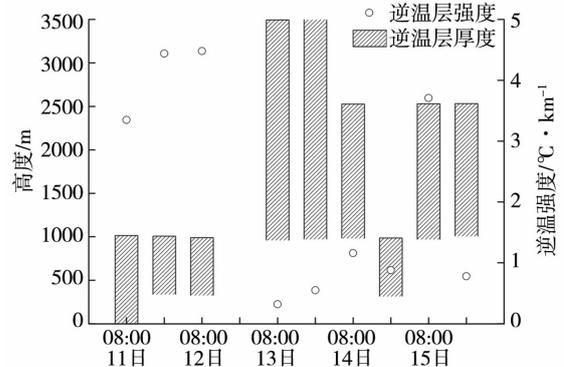


图7 2012年12月11—15日西安地区逆温层高度、厚度和强度变化

Fig. 7 The variation of height, thickness and intensity of inversion layer over Xi'an from December 11 to 15, 2012

(北京时,下同)外,其他时次均出现逆温现象,其中 11 日 08:00 为接地逆温,其他为不接地逆温。重污染天气刚开始时,11—12 日逆温层出现高度较低、强度较大,最大值为 12 日 08:00 的 $4.48\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$; 13—15 日逆温层出现高度较高,强度较前期变弱,但持续出现的逆温现象使大气层结一直处于稳定状态,不利于污染物的对流扩散。由此得知当大气层结出现静稳状态时,即便后期逆温强度减弱,前期积累的污染物以及新产生的污染物仍将持续累积,难以扩散,从而导致污染不断加重,污染物浓度持续增加。

混合层在污染气象学中定义为湍流特征不连续界面以下湍流较充分发展的大气层^[18]。混合层厚度反映污染物在垂直方向被湍流充分交换稀释的范围,是影响大气污染物扩散的主要气象因子^[19-20]。

利用罗氏法^[21-22]计算本次污染过程中西安日平均大气混合层厚度 L :

$$L = 20.17(6 - P)(T - T_a) + [0.169P \times (U_z + 0.257)] / 12f \ln(Z/Z_0) \quad (1)$$

式中 P 为帕斯奎尔大气稳定度,分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定 6 级(取值 1 ~ 6),本次过程选 $P = 4$ 。 $T - T_a$ 为温度露点差, U_z 为 Z 高度平均风速, f 为地转参数, Z_0 为地面粗糙度,取值为 1。由图 8 可以看出,本次污染过程中 5 d 内大气混合层厚度均在 800 m 以下,其中污染最严重的 15 日混合层厚度仅为 426 m,混合层高度不断下降,污染最严重时期混合层高度降到最低。较低的混合层高度限制污染物扩散,在排放没有改变的情况下,近地层污染物浓度持续增大。

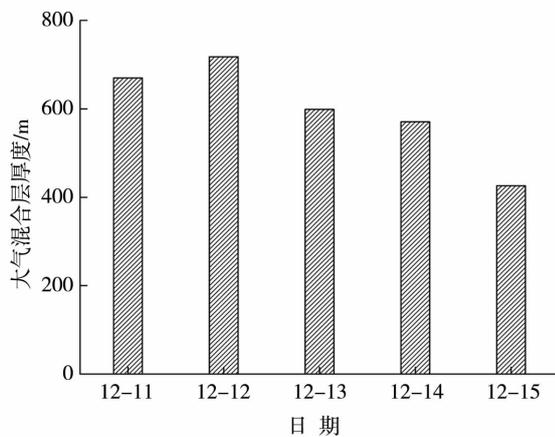


图 8 2012 年 12 月 11—15 日西安地区大气混合层厚度变化

Fig. 8 Variation of boundary mixing layer depth over Xi'an from December 11 to 15, 2012

高空弱脊的维持使得天气系统稳定少变。地面上西安处于高压后部,近地面为一致偏东风,有利于水汽及污染物的输送,地面辐合加速污染物汇集,850 hPa 的高湿区则促使水汽与污染物相互吸附,加剧污染天气。下沉气流、逆温层结、较低的混合层厚度使得污染物不易扩散。

4 特殊地形环流

山脉阻挡所形成的地形环流在污染天气中起到一定作用。西安市的北部为黄土高原,南部为秦岭山脉,在地形上相当于“盆地”^[23],但与盆地略有不同,西安所处的“关中盆地”为向东开口的“喇叭口”地形。图 9 为 15 日 00:00 (UTC) 沿 109°E 的经向垂直环流剖面,可以看出,当污染物进入“关中盆地”后,经向环流中由于受南北地形阻挡而产生的 2 支上升气流在 850 ~ 700 hPa 高度上产生辐合,并在西安地区 (34°N) 近地面附近出现下沉,下沉气流抑制了污染物的扩散。三面环山、向东开口的“喇叭口”地形配合本次污染过程近地面盛行的偏东风,使污染物在纬向和经向均难以扩散,这也是污染加重和持续的重要原因之一。

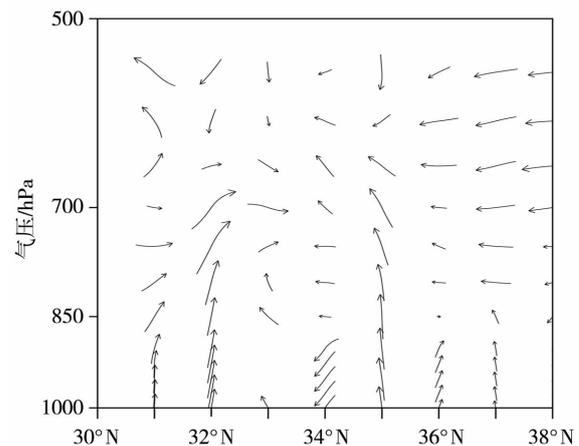


图 9 2012 年 12 月 15 日 00:00 UTC

沿 109°E 的经向垂直环流剖面

Fig. 9 Meridional section of vertical circulation along 109°E at 00:00 UTC December 15, 2012

5 污染物后向轨迹

HYSPLIT-4 是由美国 NOAA 研制的用于计算及分析污染物扩散、输送的轨迹模型^[24-25]。该模型可以处理多种气象场,具有多种物理过程和较完整的输送、扩散与沉降模式,已经应用到各个地区各种污染物的污染来源及输送路径研究中^[26-31]。

为分析此次重污染天气过程中污染物的来向,以西安(108.9°E,34.3°N)为参考点,选取近地面层10 m、50 m、100 m 3个高度,利用 HYSPLIT-4 模型分别计算 2012 年 12 月 12—15 日 12:00 UTC 气团的 48 h 后向输送轨迹(图 10)。可以看出,48 h 的后向轨迹显示气团从河南西部出发,其中 12 日经湖北北部、商洛地区,从东南方向到达西安市,其余 3 d 则是经山西,由“喇叭口”地形先进入渭南,从偏东

方向到达西安。进一步分析 24 h 内气团的后向轨迹,其中 14 日气团的运动距离最短,从偏北的咸阳地区直接到达西安,而 13 日和 15 日气团的运动距离较远,从河南经山西、渭南到达西安。综上所述,在 48 h 内,气团的移动方向主要是自东向西移入西安市区,这与高压后部的地面形势带来的偏东风表现一致。根据气团后向轨迹判断,本次污染过程中的输入污染主要来自河南、山西渭南和咸阳地区。

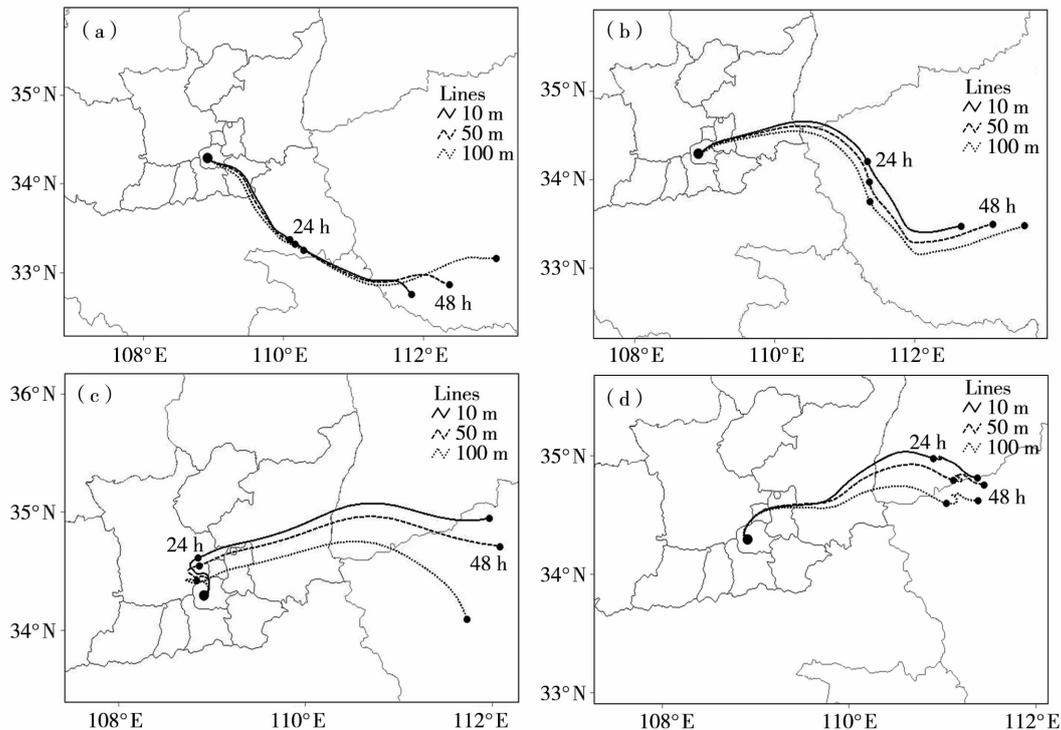


图 10 2012 年 12 月 12(a)、13(b)、14(c)、15(d)日 12:00 UTC 48 h 后向轨迹

Fig. 10 The 48 h backward trajectory at 12:00 UTC December 12(a), 13(b), 14(c), 15(d), 2012

6 结 论

(1)与历史数据相比,重污染天气过程中地面气象数据显示出明显的寡照、低温、高湿以及低风速天气特征,寡照、低温使得逆温层结维持,导致大气层结更加稳定,而高湿加剧了污染物累积、低风速使污染物难以扩散。

(2)稳定的大尺度环流及较弱的天气系统使得污染物不易扩散。高压后部形势、地面弱辐合有利于近地面水汽的输送和凝结,与 850 hPa 的高湿度相互配合,使得水汽与污染物相互吸附加剧污染天气。700 hPa 以下明显的下沉气流、持续出现的逆温层结、较低的混合层厚度将污染物聚集于近地面层内,引起污染的持续和加重。

(3)西安地区三面环山,向东开口的“喇叭口”地形配合本次污染过程近地面盛行的偏东风,使得

污染物在纬向与经向均难以扩散,也是此次污染加重和持续的一个重要原因。

(4)HYSPLIT-4 模型对本次污染过程的后向轨迹模拟显示西安地区 24 h 内的输入污染主要来自偏东方向。

参考文献

- [1] 隋珂珂,王自发,杨军,等. 北京 PM₁₀持续污染及与常规气象要素的关系[J]. 环境科学研究,2007,20(6):77-82.
- [2] 杨静,武疆艳,李霞,等. 乌鲁木齐冬季大气边界层结构特征及其对大气污染的影响[J]. 干旱区研究,2011,28(4):717-723.
- [3] 陈月霞,曹琳,杨淑萍. 气温对大气主要污染物的影响[J]. 现代农业科技,2011,(10):277-278.
- [4] 孙燕,张备,严文莲,等. 南京及周边地区一次严重烟霾天气的分析[J]. 高原气象,2010,29(3):794-800.
- [5] 江文华,陈道劲,胡春梅. 重庆主城区一次重雾霾天气过程分析[J]. 气象科技,2013,41(2):343-346.

- [6] 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):42-47.
- [7] 马丽云,曹磊,李杨,等. 乌鲁木齐市不同区域 PM₁₀ 的监测与分析[J]. 干旱区地理,2010,33(2):231-235.
- [8] 程一帆,张兰慧,尚可政,等. 兰州市冬季霾统计预报研究[J]. 中国沙漠,2011,31(3):750-756.
- [9] 王丛梅,范引琪,张海霞. 京津冀采暖期大气污染天气特征[J]. 气象科技,2010,38(6):659-694.
- [10] 赵桂香,杜莉,卫丽萍,等. 一次持续性区域雾霾天气的综合分析[J]. 干旱区研究,2011,28(5):871-878.
- [11] 王丛梅,杨永胜,李永占,等. 2013年1月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. 环境科学研究,2013,26(7):695-702.
- [12] 贾晓鹏,陈开锋. 沙尘事件对兰州河谷大气环境 PM₁₀ 的影响[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1573-1578.
- [13] 邵天杰,赵景波. 西安空气质量时空变化特征分析[J]. 干旱区研究,2008,25(5):723-728.
- [14] 胡琳,苏静,陈建文,等. 西安地区霾天气特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(7):41-45.
- [15] 宁海文,王式功,杜继稳. 西安沙尘天气特征及其对空气质量的影响[J]. 中国沙漠,2005,25(6):886-890.
- [16] 丁一汇,柳艳菊. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(1):37-48.
- [17] 王宏,冯宏芳,隋平,等. 福州市灰霾气象要素场特征分析[J]. 气象科技,2009,37(6):670-675.
- [18] 廖国莲. 大气混合层厚度的计算方法及影响因子[J]. 中山大学研究生学刊,2005,26(4):66-73.
- [19] 马金,郑向东. 混合层厚度的经验计算及与探空观测对比分析[J]. 应用气象学报,2011,2(5):567-576.
- [20] 杨静,李霞,李秦,等. 乌鲁木齐近30a大气稳定性和混合层高度变化特征及与空气污染的关系[J]. 干旱区地理,2011,34(5):747-752.
- [21] 程水源,席德立,张宝宁,等. 大气混合层高度的确定与计算方法研究[J]. 中国环境科学,1997,17(6):512-513.
- [22] 史宝忠,郑方成,曹国良. 对大气混合层高度确定方法的比较分析[J]. 西安建筑科技大学学报,1997,29(2):139-140.
- [23] 刘翠,薛科社. 西安市雾霾天气成因及治理措施分析[J]. 地下水,2013,35(3):220-221.
- [24] Wang F, Chen D S, Cheng S Y, et al. Identification of regional atmospheric PM₁₀ transport pathways using HYSPLIT, MM5 - CMAQ and synoptic pressure pattern analysis[J]. Environmental Modelling & Software, 2010,25(8):927-934.
- [25] Draxler R, Stunder B, Rolph G, et al. HYSPLIT - 4 user's guide. http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf, 2014.
- [26] 王剑,徐美,叶霞,等. 沧州市冬春季 PM₁₀ 污染特征及影响因素[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(7):46-51.
- [27] 石春娥,姚叶青,张平,等. 合肥市 PM₁₀ 输送轨迹分类研究[J]. 高原气象,2008,27(6):1383-1391.
- [28] 张亚妮,张碧辉,宗志平,等. 影响北京的一例沙尘天气过程的起沙沉降及输送路径分析[J]. 气象,2013,39(7):911-922.
- [29] 李兰,刘敏,方思达,等. 湖北省2013年1月特大霾过程的气象成因分析[J]. 环境科学与技术,2014,37(5):16-20.
- [30] 窦筱艳,许嘉,韩德辉,等. 西宁市典型污染日 PM₁₀ 输送规律研究[J]. 气象与环境学报,2012,28(2):85-90.
- [31] 韩茜,魏文寿,刘明哲,等. 气流输送对乌鲁木齐市 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 质量浓度的影响[J]. 中国沙漠,2013,33(1):223-230.

Analysis on Meteorological Condition and Trajectory of a Serious Pollution Weather in Xi'an of Shaanxi

YANG Xiaochun¹, DU Mengmeng¹, WU Qizhong², CHENG Long¹, BI Xu¹, ZHAI Yuan¹

(1. Xi'an Meteorological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710016, China; 2. College of Global Change and Earth System Science (GCESS), Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The weather conditions, atmospheric circulation background, formation mechanism and pollutant trajectory of a heavy air pollution weather occurring from 11 to 15 December 2012 in Xi'an were analyzed based on daily data including air quality observation, the routine weather observation and reanalysis data from NCEP (FNL) with spatial grid $1^\circ \times 1^\circ$. The results are as follows: (1) Compared with climatological normal, the meteorological elements were abnormal from 11 to 15 December 2012 with obviously shorter sunshine hours, lower air temperature, higher relative humidity and weaker surface wind speed. (2) The location of southwest anticyclone and weak convergence near surface benefited transportation and gathering of water vapor and pollutants and cooperated with high humid region of low layer, which provided favorable environmental field for hazy weather and heavy air pollution. In addition, the descending air flows, strong temperature inversion layer, lower mixing layer depth and stable large scale circulation prevented pollutants from diffusing to the upper air. (3) The special geographical condition of Xi'an was an important factor for the lasting of serious pollution. The south and north downdrafts gathered in Xi'an which restrained pollutants from diffusing and aggravated the pollution. (4) The pollutant trajectories simulation indicated that the main pollutants came from the east of Xi'an.

Key words: serious pollution weather; meteorological conditions; backward trajectory