

黄少妮,袁媛,井宇,等. 陕西关中地区冬季一次重霾污染过程及气象条件影响分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 1037-1046. [HUANG Shaoni, YUAN Yuan, JING Yu, et al. Characteristics of a Severe Haze Pollution Process in Winter of 2013 and Meteorological Cause in Guanzhong of Shaanxi[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(6): 1037-1046], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-06-1037

陕西关中地区冬季一次重霾污染过程 及气象条件影响分析

黄少妮¹,袁媛²,井宇¹,陈小婷¹,刘瑞芳¹

(1. 陕西省气象台,陕西 西安 710014; 2. 江苏省南京市气象局,江苏 南京 210019)

摘要:利用陕西关中多站气象观测资料和颗粒物浓度监测资料,对2013年12月16—26日关中一次持续多日重霾污染天气过程的颗粒物污染特征及气象条件进行统计分析。结果表明,此次重霾污染事件主要是由细粒子 $PM_{2.5}$ 造成。关中各站颗粒物浓度在污染过程中的变化具有区域同步性特征,各站 $PM_{2.5}$ 浓度日均值的相关系数达0.71~0.96,且严重超标,区域最高小时浓度均值达 $508 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,污染非常严重。关中盆地特殊的喇叭口地形以及关中东部持续的强东风使得区域污染传输叠加本地污染循环累积,是17日关中各站 $PM_{2.5}$ 浓度剧增的主要原因。污染严重阶段,西安和渭南持续的弱风和静风使得局地排放的污染物聚集,引起 $PM_{2.5}$ 浓度振荡上扬;宝鸡21日 $PM_{2.5}$ 浓度的爆发式增长则是由上游西安和渭南储备的高浓度 $PM_{2.5}$ 在持续偏东风作用下远程传输所致;而铜川受山谷风影响, $PM_{2.5}$ 浓度具有显著日变化特征。长时间贴地、悬浮的多层逆温和低混合层高度的存在,抑制了污染物的垂直扩散,也造成低空水汽聚集在近地层,是 $PM_{2.5}$ 浓度持续累积增长的重要原因。关中此次重霾污染的快速有效清除最终依赖于冷高压加强南下。

关键词:关中;霾天气;细粒子污染;气象要素

文章编号:1006-7639(2016)-06-1037-10 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-06-1037

中图分类号:P427.2

文献标识码:A

引言

近年来,我国空气质量整体加速恶化趋势明显,特别是冬季采暖排放源增多,叠加不利于扩散的气象条件,使得空气污染严重,持续性霾污染集中爆发,京津冀、珠三角、长三角、关中地区等城市经济发展带尤为显著。国内学者^[1-5]针对京津冀、长三角和珠三角地区大气污染的时空分布和变化规律及成因分析,分别从试验、理论、数值模拟等方面做了深入,取得了一定的研究成果。陕西关中地区,北靠黄土高原南缘,南依秦岭山脉北坡,西起宝鸡峡,东到潼关,自西向东逐渐变宽,呈喇叭口形状,形成关中盆地;冬春季降水少,气候干燥,其特殊的地形地貌和气候特征是造成该区大气污染物不易扩散和局地大气污染的重要原因之一。

研究表明,城市大气污染物浓度由排放源、区域

输送和大气扩散能力3方面共同决定^[6],短时间内,污染源变化不大的情况下,后两者起主要作用^[7]。尤其是城市环境下持续性重污染事件,更是由不利于扩散的气象条件决定。2013年12月陕西关中的西安、咸阳、宝鸡、渭南、铜川5个城市的 $PM_{2.5}$ (空气动力学当量直径 $<2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物,即细颗粒物)浓度日均值全部超过国家空气质量一级标准(日均值阈值为 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,GB3095—2012),其中西安、咸阳、宝鸡、渭南和铜川分别有21 d、26 d、24 d和18 d日平均 $PM_{2.5}$ 浓度超过国家空气质量二级标准(日均值阈值为 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。特别是12月16—26日关中地区多站出现了持续性重霾污染过程,其中西安站24日 $PM_{2.5}$ 浓度日均值达 $598.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,超过国家空气质量六级标准(日均值阈值为 $350 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), $PM_{2.5}$ 污染非常严重。目

收稿日期:2016-06-22;改回日期:2016-08-22

基金项目:陕西省气象局研究型业务重点科研项目(2015Z-3)和南京市气象科研开发项目(NJ201608)共同资助

作者简介:黄少妮(1981-),女,陕西西安人,博士,高级工程师,从事天气气候预测、环境气象研究。E-mail:huangshaoni@126.com

前关中地区大气污染研究多集中在单个站点的研究^[8-10],而结合关中盆地地理环境、大气污染物空间分布及污染时段气象条件等因素的分析相对较少。此外,气象条件与PM_{2.5}浓度的关系缺少综合性分析,且PM_{2.5}浓度的增长、维持和消散过程的气象成因缺乏针对性研究。因此,本文针对陕西关中地区2013年12月16—26日发生的长时间持续性重霾污染过程,结合该地区特殊的地形地貌条件,利用其东、西、北和中心城市群多个站点颗粒物浓度及地面气象要素、能见度、边界层温湿等资料,深入开展该地区大气污染物时空分布和变化特征,以及气象要素和边界层的演变特征分析,为霾预报预警和大气污染防治提供重要参考。

1 资料与方法

1.1 站点分布和数据

从陕西关中及周边地区的地形(图1)看出,关中盆地北临渭北高原、南依秦岭,西起宝鸡峡,自西向东逐渐变宽,呈喇叭口形状,仅在渭南的潼关与黄河之间形成通风口,这种特殊地形使得大气污染物极易在关中盆地聚集且不易扩散,特别是在冬季采暖排放源增多且不利于扩散的气象条件下极易造成持续重污染天气。关中地区的西安、咸阳、宝鸡、渭南和铜川5个监测站中,西安和咸阳位于关中城市群中心,代表关中盆地中部城市群的大气环境状况。西安和咸阳2站相距较近,污染物浓度及其变化非常接近,故本文仅选取西安站进行分析讨论;宝鸡位

于关中西部且三面环山,代表西部峡谷地区的大气环境状况;铜川位于关中北部渭北高原南缘,较好代表了关中北部的大气环境状况;渭南位于关中东部,是关中盆地的东大门,受区域输送的影响较大。

选取关中地区4站2013年12月16—26日PM_{2.5}和PM₁₀浓度日均值数据,以及PM_{2.5}浓度逐时数据,该资料来自国家环境监测总站网上发布的监测结果;同时段的自动气象站逐时观测资料,包括风向、风速、温度、相对湿度和海平面气压等地面气象要素,以及西安站每日08:00(北京时,下同)探空数据和逐3h能见度数据。

1.2 方法

大气混合层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^[11],湍流特征不连续界面的高度称为混合层高度(Mixing Layer Height, MLH),表征了污染物在垂直方向上被热力湍流稀释的范围,大气混合层高度越高,越有利于污染物的扩散和稀释,是反映大气边界层污染气象特征的重要参数^[12]。本文采用罗氏法计算混合层高度^[11],计算公式如下:

$$h = \frac{121}{6}(6 - P) \times (T - T_d) + \frac{0.169 P \times (U_z + 0.257)}{12 f \ln(Z/Z_0)} \quad (1)$$

其中, h 为混合层高度(m), $(T - T_d)$ 为温度露点差(°C), U_z 为高度 Z 处的平均风速($m \cdot s^{-1}$), Z_0 为地表粗糙度(m), f 为地转参数(s^{-1}), P 为Pasquill稳定度级别(综合考虑热力和动力因子,把太阳高度角、云量和风速分级定量化,将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个级别,分别以A、B、C、D、E、F表示,对应的 P 值依次为1~6)。

另外,累积风速定义为某一时刻之前同一风向持续风速之和,若风向发生改变,则累积风速归0,并在新的风向下重新开始累计。

2 结果与分析

2.1 霾污染过程颗粒物浓度的时空分布

图2给出2013年12月16—26日关中地区西安、宝鸡、渭南、铜川4站颗粒物平均浓度的日变化曲线,发现此次霾污染具有显著的区域同步变化特征,但不同地区略有差异。由图2a可看出,除26日外,关中4站PM_{2.5}浓度日均值都超过国家空气质量二级标准,是二级标准的1.1~7.9倍。其中,西安有8d超过国家空气质量六级标准;宝鸡有5d

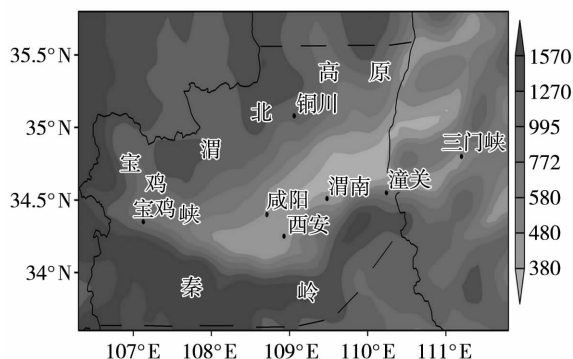


图1 陕西关中及邻近地区环境和气象站点分布及地形高度(阴影,单位:m)(实线与虚线所围区域为关中地区)

Fig. 1 The distribution of atmospheric environment monitoring sites, meteorological stations and terrain height (the shaded, Unit: m) in Guanzhong of Shaanxi and adjacent area (The region bounded by the solid lines and dotted lines for Guanzhong area)

超过六级标准,1 d 超过五级标准(日均值阈值为 $250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$);渭南有 2 d 超过六级标准,6 d 超过五级标准;铜川有 5 d 超过五级标准。污染过程期间整个区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日平均为 $296 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,最高日均浓度达 $437 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中 24 日西安站高达 $598.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,可见 $\text{PM}_{2.5}$ 污染非常严重。

另外,西安、渭南、铜川和宝鸡 4 站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日均值的相关系数在 0.71 ~ 0.96 之间,这种区域多站同步的持续污染与气象过程密不可分。受关中盆地喇叭口地形和各地排放源影响,各站浓度值也有差异,西安和渭南处于污染核心区差异较小,整个过程 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别为 $375 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $301 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,且 2 站逐时浓度的相关系数达 0.84;宝鸡和铜川

$\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别为 $296 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $211 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,均低于西安和渭南。铜川站位于关中北部黄土高原南缘,离山体较近,浓度值最低。宝鸡站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有显著的阶段性变化特征,出现了 20—21 日连续骤降,22 日剧增的变化过程,其原因将在后文详细分析。

$\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比重可以反映 $\text{PM}_{2.5}$ 对 PM_{10} 的贡献。由图 2 可知,关中各站 PM_{10} 浓度的日变化与 $\text{PM}_{2.5}$ 有极显著的一致性,说明 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比重较大。其中,西安、宝鸡、渭南、铜川 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 浓度的百分比分别为 68%、79%、76% 和 70%,说明可吸入颗粒物中细颗粒物的比重明显大于粗颗粒物,可见此次重霾污染过程主要是由细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 造成的,下面仅对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行分析讨论。

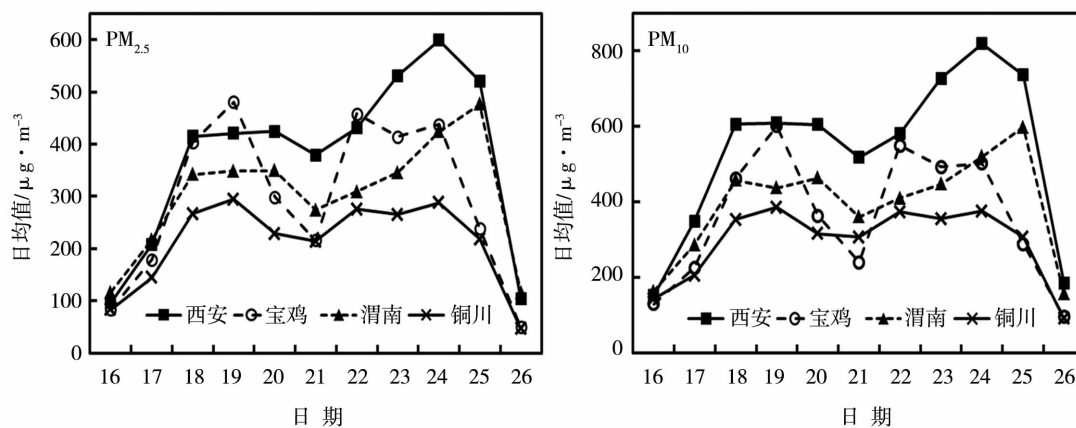


图 2 2013 年 12 月 16—26 日关中地区 4 站 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓度日变化

Fig. 2 The daily variations of average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} at different stations in Guanzhong region of Shaanxi from 16 to 26 December 2013

2.2 大尺度天气形势

天气形势是影响气象要素分布及演变的主要背景场,大尺度环流形势和局地气象条件是影响污染物生成、积累和清除的主要因素^[13-18]。此次霾污染开始阶段(图 3a),500 hPa 环流场上欧亚中高纬地区维持“2 槽 1 脊”型,贝加尔湖附近长波脊缓慢东移加强,形成了稳定少动的阻塞环流形势,是我国中东部霾最易产生的典型高空形势场^[19];对应地面图上(图 3b),贝加尔湖高压稳定少动,关中地区持续受均压场控制,气压梯度力小,风速小,有利于污染物累积。20—21 日,随着东北冷涡东移入海,阻塞环流形势减弱,不断有分裂南下的冷空气和高原短波槽合并加深东移,给关中西部地区带来短暂的雨雪天气,宝鸡大气污染物暂时得到清除(图 3c)。22 日后,欧亚地区调整为“1 槽 1 脊”型(图略),欧亚中高纬度地区环流较平直,我国大部受脊前偏西气

流控制,气压梯度力小,冷空气活动弱;对应地面图上(图 3d),贝加尔湖高压南压控制我国中东部大部分地区,关中地区再度受控于高压底部均压场下,气压梯度小,风力小,西安和渭南频繁出现静风天气,低层大气层结稳定,气象扩散条件较差,污染物再次累积。25 日开始,500 hPa 环流场上随着东北冷涡东移(图 3e),贝加尔湖高压脊明显减弱,不断有分裂南下的冷空气和高原短波槽合并加深东移至陕甘宁地区;地面图上(图 3f),贝加尔湖高压加强南下,低层冷空气自北向南横扫陕西大部,关中地区持续长达 9 d 的重污染过程结束。

综上所述,在稳定少动的阻塞型高空环流形势下,关中地区受地面高压底部均压场弱偏东风的控制往往会造成污染物的汇聚和积累;而高空纬向型环流场和地面均压场的长时间控制,大气层结稳定,往往使得污染物持续增加,霾污染持续时间较长。

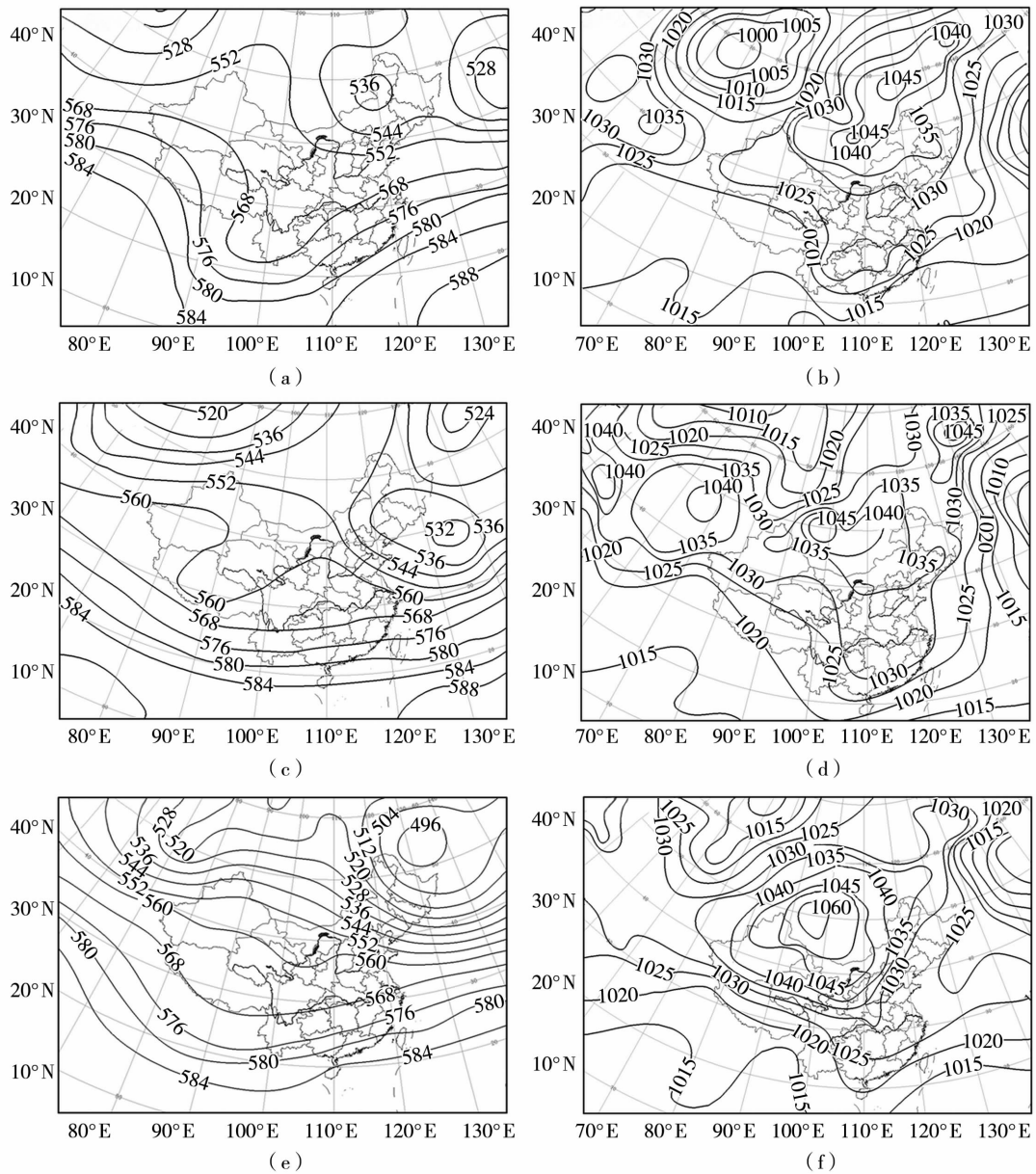


图3 2013年12月16日(a)、20日(c)08:00及25日20:00(e)500 hPa高度场(a,c,e,单位:dagpm)和16日14:00(b)、22日02:00(d)、25日20:00(f)海平面气压场(b,d,f,单位:hPa)
 Fig. 3 The geopotential height fields on 500 hPa (a, c, e, Unit:dagpm) at 08:00 BST 16 (a) and 20 (c), 20:00 BST 25 (e) December and the sea level pressure fields (b, d, f, Unit:hPa) at 14:00 BST 16 (b), 02:00 BST 22 (d), 20:00 BST 25 (f) December 2013

2.3 地面气象要素变化特征

为进一步探讨气象要素对细颗粒物污染过程的影响,分析了关中各站 PM_{2.5}浓度和地面气象要素逐时变化及二者的关系(图4和图5)。根据图4关中各站 PM_{2.5}浓度变化曲线,将此次霾污染过程分为3个阶段:污染开始阶段(16—17日)、污染严重阶段(18—25日)和污染清除阶段(26日)。污染开始阶段,关中各站 PM_{2.5}浓度缓慢增加;17日09:00开始,PM_{2.5}浓度迅速增加,12 h后西安 PM_{2.5}浓度从 89 μg · m⁻³急增至

406 μg · m⁻³,增幅为 26 μg · m⁻³ · h⁻¹,同时宝鸡、渭南和铜川也分别增至 348、324、294 μg · m⁻³。18—25日污染严重阶段,西安和渭南 PM_{2.5}维持高浓度且振荡上扬,而宝鸡 PM_{2.5}浓度增长至峰值,经不完全清除后再次骤增至次峰值,并维持较高浓度,至24日再次降低。与其他3站不同,铜川 PM_{2.5}浓度有极显著的日变化特征,清晨08:00前后降至谷值,夜间20:00前后达到峰值,这可能与其地处渭北高原南缘盛行山谷风有关(图4)。

24 h 正变压能够反映冷空气活动的强弱,重污

染天气往往与 24 h 变压关系密切^[20]。从关中各站海平面气压的逐时变化可见(图 4),17 日 09:00 污染剧增前,关中各站海平面气压降幅显著,16 日 14:00—17 日 08:00,24 h 变压为 -7.6 ~ -4.0 hPa,海平面气压平均为 1 027 hPa;污染严重阶段,关中处在均压场控制下,22 日前海平面气压基本维持在 1 035 hPa 左右稳定少变,22 日后,海平面气压略有降低(1 033 hPa),PM_{2.5}浓度较 22 日前有所加强;污染清除前 25 日 08:00,冷锋过境后冷高压南下,至 16:00 左右关中各站海平面气压显著升高,24 h 变压达 4 ~ 9 hPa。可见,24 h 负变压有利于污染天气的出现,而 24 h 正变压有利于清洁空气。另外,海平面气压与 PM_{2.5}浓度同步性较差,而与滞后 6 h 的 PM_{2.5}浓度相关性更显著,表明 PM_{2.5}浓度对海平面气压存在明显的滞后性。其中,铜川和宝鸡 2 站二者存在显著负相关(表 1)。

就气温而言(图 4),在污染严重阶段,关中地区温度整体有下降趋势,日最高温度明显降低,且宝鸡、渭南和西安日变化幅度明显减小,温度降低对应着 PM_{2.5}浓度升高。经相关分析发现,宝鸡、渭南和西安 PM_{2.5}浓度与温度呈负相关,其中后两者 6 h 滞后性较同步性更显著(表 1);铜川站温度的日变化依然显著,且 PM_{2.5}浓度的日变化较温度变化滞后约 1/4 位相(约 6 h),二者存在显著的滞后正相关,相关系数 0.42,通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验(表 1)。

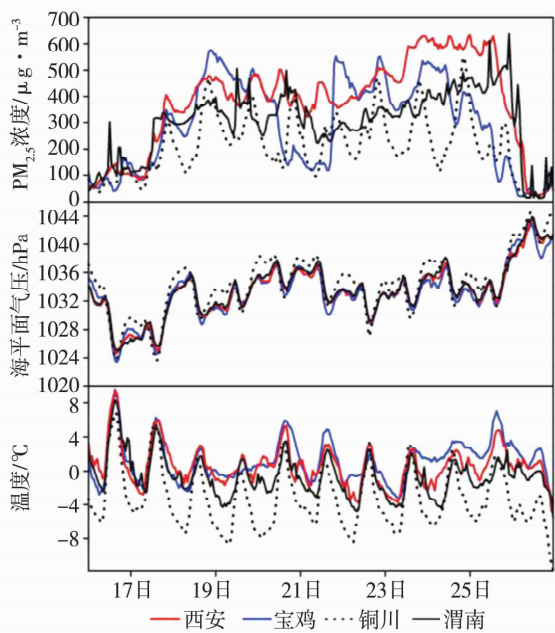


图 4 2013 年 12 月 16—26 日关中 4 站 PM_{2.5} 浓度、海平面气压和温度逐时变化

Fig. 4 The hourly variations of PM_{2.5} concentration, sea level pressure and temperature from 16 to 26 December 2013

表 1 关中 4 站 PM_{2.5}浓度与地面气象要素的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients between PM_{2.5} concentration and meteorological factors based on the hourly data in Guanzhong of Shaanxi

站点	滞后时间/h	海平面气压	温度	相对湿度	风向	风速
渭南	0	-0.020	-0.090	0.581 *	-0.055	-0.312 *
	6	0.030	-0.218 *	0.548 *	-0.131 *	-0.323 *
西安	0	0.033	-0.236 *	0.597 *	0.117	-0.323 *
	6	0.122 *	-0.353 *	0.551 *	0.077	-0.255 *
宝鸡	0	-0.139 *	-0.254 *	0.697 *	-0.081	-0.157 *
	6	-0.260 *	-0.167 *	0.494 *	-0.251 *	0.094
铜川	0	-0.155 *	-0.005	0.469 *	-0.019	-0.281 *
	6	-0.358 *	0.420 *	-0.067	0.595 *	-0.164 *

注: * 表示通过 0.01 的显著性检验;6 表示滞后 6 h 的 PM_{2.5}浓度

PM_{2.5}颗粒物的聚集和传输与风速、风向均高度相关,风速越小对应细颗粒物浓度越高,而风速增大时则对应着细颗粒物浓度的累积(远程输送)或消散^[21-22]。由于关中盆地特殊的喇叭口狭长地形,仅在东部渭南的潼关和黄河之间形成通风口,因此风与 PM_{2.5}浓度的关系更为密切。整体来看,污染严重阶段,渭南和西安以弱风和静风为主(图 5),对应着 PM_{2.5}高浓度阶段,可见 PM_{2.5}浓度与风速呈显著负相关,且同步性较好,而与风向的相关性不显著(表 1)。由图 4 和图 5 看出:在 16 日污染开始阶段,渭南、西安和宝鸡持续受静风和弱风控制,大气扩散条件差,当地排放的污染物开始积累,PM_{2.5}浓度逐渐升高。17 日 PM_{2.5}浓度剧增阶段,风场的作用尤为重要。关中以东的河南三门峡站 15 日开始处于重霾污染下,16 日 08:00—18 日 06:00 受偏东风控制,累积风速达 87 m · s⁻¹;关中盆地东部通风口潼关站 17 日 02:00—18 日 04:00 为持续偏东风,累积风速为 51.2 m · s⁻¹;渭南站 17 日 08:00—23:00 偏东风显著加强,累积风速为 31.6 m · s⁻¹(表 2)。可见,三门峡—潼关—渭南持续一致的偏东风将上游污染物源源不断地向西输送到关中盆地,污染循环累积加重,进而使 PM_{2.5}浓度从 17 日 09:00 开始出现剧增(图 4)。关于这一污染过程的西安局地分析结果认为^[9],17 日白天西安较强的偏北风(图 5)使得污染物浓度不降反升的原因是受关中盆地特殊地形影响,污染物不易扩散。以上分析可知,除了受地形影响外,17 日白天西安持续较强的偏北风将上游远程输送来的污染物输送到西安城区是 PM_{2.5}浓度

出现剧增的主要原因。

18日11:00,渭南站由静风转为偏东风,而西安站风速减小,但依然以偏北风为主;13:00开始,宝鸡站东南风显著加强,持续的东南风将聚集在关中中部的污染物不断向西输送至宝鸡,加之宝鸡三面环山,污染物输送受阻并循环聚集在此地,致使 $PM_{2.5}$ 浓度急速增至峰值。随后受地面弱冷空气东移南下的影响,20日宝鸡转为偏西风, $PM_{2.5}$ 浓度大

幅降低。21日,渭南和西安再度被偏东风和东北风控制,区域污染输送致使污染物不断累积,进而使得下游宝鸡在21日13:00转为东南风后, $PM_{2.5}$ 浓度出现爆发式增长,增幅达 $108 \mu g \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ 。22日以后,渭南站完全为静风控制,关中盆地仅有的东部通风口关闭,而西安和宝鸡以弱风为主,整个关中盆地几乎完全处于封闭状态,随着本地污染排放累积,关中各站 $PM_{2.5}$ 浓度振荡上扬,先后再次达到峰值。

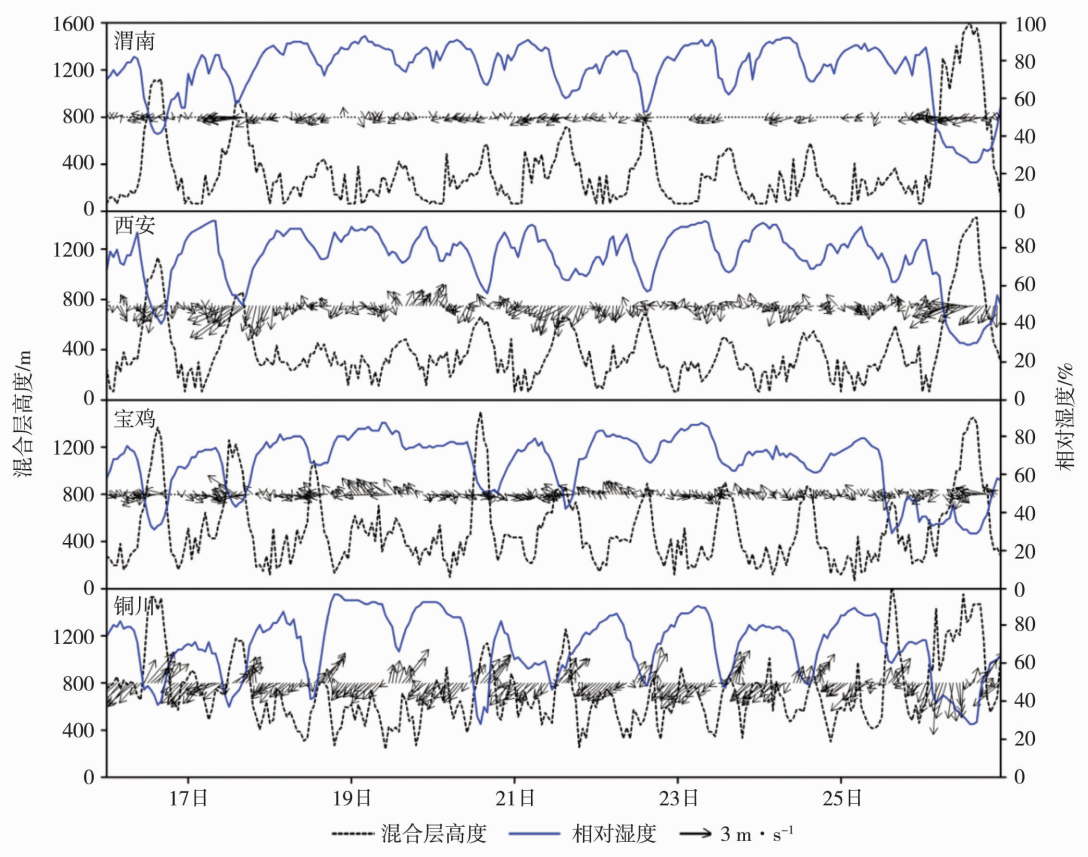


图5 2013年12月16—26日关中4站相对湿度、大气混合层高度和风向、风速(风矢量,单位: $m \cdot s^{-1}$)逐时演变

Fig. 5 The hourly evolutions of relative humidity, atmospheric mixing layer height, wind direction and wind speed (wind vector, Unit: $m \cdot s^{-1}$) from 16 to 26 December 2013 in Guanzhong of Shaanxi

表2 霾污染过程开始和消除阶段渭南、三门峡、潼关3站的风向及累积风速(单位: $m \cdot s^{-1}$)

Tab. 2 Wind direction and cumulative wind speed (Unit: $m \cdot s^{-1}$) in Weinan, Sanmenxia and Tongguan at the beginning and the ending of haze pollutants

站点	起始时间	累积风速/风向	结束时间	累积风速/风向
三门峡	16日08:00—18日06:00	87/偏东风	25日12:00—26日21:00	70.4/偏西风
潼关	17日02:00—18日04:00	51.2/偏东风	24日19:00—26日23:00	67.2/偏西风
渭南	17日08:00—23:00	31.6/偏东风	26日02:00—23:00	42.7/偏东风

与以上3站不同,位于关中北部的铜川受地理环境影响盛行山谷风,风向具有显著的日变化特征(图5)。日出后2~3h至傍晚以偏南风为主,持续的偏南风将关中中部城市群的污染物向关中北部铜

川输送,加之白天本地污染物的累积,使得 $PM_{2.5}$ 浓度在20:00左右达到日最大值;日落后2h左右转为偏北风,持续的偏北风将污染物向南输送,使得 $PM_{2.5}$ 浓度在清晨08:00左右降到日最小值。因此,

山谷风的日变化导致铜川站 $PM_{2.5}$ 浓度也具有显著的日变化特征(图4),且位相落后于风向约 $1/4$ 个周期(约6 h)。可见铜川站 $PM_{2.5}$ 浓度与风向存在滞后6 h的显著正相关,相关系数0.595(表1)。同时, $PM_{2.5}$ 浓度值也受关中城市群 $PM_{2.5}$ 浓度水平的影响。当17日渭南和西安 $PM_{2.5}$ 浓度剧增到高值时,铜川站 $PM_{2.5}$ 浓度日最大值达 $305 \mu g \cdot m^{-3}$;18—25日渭南和西安重污染阶段,铜川 $PM_{2.5}$ 日均浓度也随之升高,日最大值与西安和渭南接近,而入夜后铜川转为偏北风,污染物向南传输到关中城市群,使得西安和渭南 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化幅度较小(图4)。

受地面冷高压系统南下影响(图3f),25日晚至26日地面冷高压系统南下至关中盆地和河南地区,三门峡站25日12:00—26日21:00被偏西风控制,累积风速为 $70.4 m \cdot s^{-1}$;潼关站24日19:00—26日23:00持续偏西风,累积风速为 $67.2 m \cdot s^{-1}$,持续偏西风将本地污染物向东输送,雾霾得到有效清除(表2)。26日02:00开始,渭南站偏东风增强,至23:00累积风速 $42.7 m \cdot s^{-1}$,西安站东北风累积风速 $50.1 m \cdot s^{-1}$,铜川站偏北风累积风速 $46.6 m \cdot s^{-1}$,持续的偏东风和偏北风将持续多日的重霾污染天气快速清除。

综上所述,受关中盆地地形影响,渭南和西安常年盛行偏东风^[10],当上游三门峡等地区处于重霾污染下,关中东部持续的偏东风可能将污染物输送到关中盆地,对关中污染物循环累积有一定贡献。同时发现,累积风速比即时风速能更好地解释 $PM_{2.5}$ 的变化,对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响更加明显。

对比关中各站 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度的逐时变化(图5)发现,两者均有较一致的变化趋势,且具有显著正相关(表1)。污染开始阶段16日20:00—17日08:00,西安站相对湿度迅速增加,相对湿度平均为86%,而其他3站相对湿度在70%左右,高湿条件下颗粒物易于吸湿增长,从而有利于17日白天 $PM_{2.5}$ 浓度的激增;高污染阶段,关中各站相对湿度日变化幅度减小,总体呈现高湿状态,其中西安和渭南相对湿度平均达80%,铜川和宝鸡分别为74%和72%,这种持续高湿条件是 $PM_{2.5}$ 维持在高浓度状态的一重要因素;污染清除阶段,25日夜到26日白天冷锋过境后干冷空气横扫关中地区,温度骤降,相对湿度骤减到30%左右。

此次污染过程中,关中各站均出现低能见度的天气现象,特别是在严重污染阶段多站大气能见度降到5 km以下,西安站甚至降到2 km以下。从图6可以看出,西安 $PM_{2.5}$ 浓度和大气能见度存在较好

的反相关性,二者呈显著的幂指数关系,相关系数为0.76(通过了 $\alpha=0.01$ 显著性检验)。同时,相对湿度与能见度也存在较好的反位相变化,说明相对湿度和 $PM_{2.5}$ 浓度是决定能见度大小的2个关键因子^[23]。由拟合曲线可知,当能见度为10 km时,对应的 $PM_{2.5}$ 浓度约为 $100 \mu g \cdot m^{-3}$,也就是说当 $PM_{2.5}$ 浓度 $>100 \mu g \cdot m^{-3}$ 时,西安可能出现较低能见度(<10 km)天气,这与北京^[24]出现较低能见度时 $PM_{2.5}$ 浓度的阈值不同。此外, $PM_{2.5}$ 浓度 $<100 \mu g \cdot m^{-3}$ 时,相对湿度较小,大部分低于60%,能见度随着颗粒物增加衰减迅速;而当 $PM_{2.5}$ 浓度 $>100 \mu g \cdot m^{-3}$ 时,相对湿度较大,大部分高于70%,能见度随颗粒物增加衰减缓慢;在 $PM_{2.5}$ 浓度相同时,相对湿度越大,能见度越低。

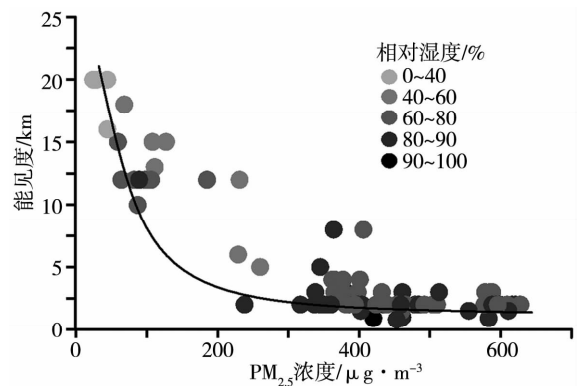


图6 2013年12月16—26日西安站

逐时 $PM_{2.5}$ 浓度和能见度的关系

Fig. 6 Relationship between the hourly $PM_{2.5}$ concentration and visibility in Xi'an station from 16 to 26 December 2013

2.4 边界层特征

表3给出2013年12月16—26日关中4站逐时大气混合层高度与颗粒物浓度的相关系数。可见,关中各站大气混合层高度与 $PM_{2.5}$ 浓度均有显著负相关关系,说明大气混合层高度是影响颗粒物浓度的重要因素。其中,铜川站相关系数最大达-0.95。大气混合层高度主要受辐射和风的影响而具有显著日变化特征^[12]。铜川站受山谷风和近地面气象要素日变化(图5和图4)影响, $PM_{2.5}$ 浓度也存在显著的日变化特征。可见,铜川站大气混合层高度与 $PM_{2.5}$ 浓度变化都与辐射和风速有关,因此相关性最大。这与京津冀地区细颗粒物浓度与大气混合层高度相关性的地区差异一致^[12],靠近山区的城市细颗粒物浓度与大气混合层高度的相关性更高。

从混合层高度和 $PM_{2.5}$ 浓度逐时演变(图5和图4)可看出,17日关中 $PM_{2.5}$ 浓度剧增阶段,渭南和西

安混合层高度日最大值下降到 900 m 左右,铜川和宝鸡下降到 1 200 m 左右,混合层高度降低,大气垂直方向的扩散能力减弱,污染物浓度升高;18—25 日高污染阶段,关中各站混合层高度大都降至 800 m 以下,且日变化幅度显著减小,西安、渭南和宝鸡混合层高度平均在 400 m 左右,大气垂直扩散能力很差,PM_{2.5}维持高浓度且振荡上扬。然而,宝鸡站 20 日受地面弱冷空气东移南下影响出现雨雪天气,大气湍流作用加强,20 日 13:00 宝鸡混合层高度骤然升至 1 497 m,PM_{2.5}浓度迅速降至 137 μg · m⁻³,可见二者具有高度负相关;26 日受地面冷高压系统南下影响,大气湍流加强,关中各站混合层高度迅速抬升至 1 500 ~ 1 600 m,污染物在垂直方向上得以稀释扩散,PM_{2.5}浓度迅速降低,持续长时间的霾污染过程清除。

表 3 2013 年 12 月 16—26 日关中各站
大气混合层厚度与 PM_{2.5}浓度的相关系数
Tab. 3 Correlation coefficients between MLH
and PM_{2.5} concentration in Guangzhong
from 16 to 26 Dember 2013

	西安	宝鸡	渭南	铜川
相关系数	-0.831*	-0.754*	-0.795*	-0.950*

注: * 表示通过 0.01 的显著性检验

逆温层结是边界层大气的重要特征之一。近地层逆温对污染物的扩散起抑制作用,按空间分布可分

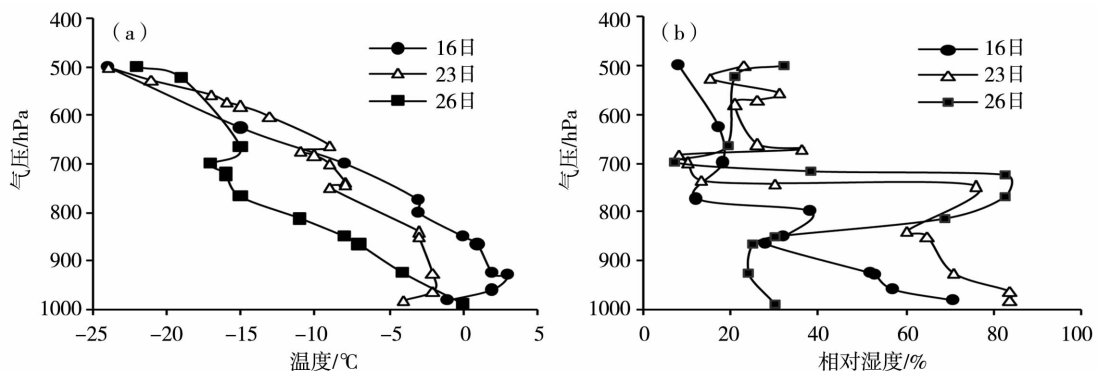


图 7 2013 年 12 月 16—26 日污染开始、严重、清除时段西安站 08:00 温度(a)和相对湿度(b)探空曲线
Fig. 7 Profiles of temperature (a) and relative humidity (b) during the beginning, severity and ending stages of pollution at 08:00 BST from 16 to 26 December 2013 in Xi'an station of Shaanxi

3 结论

(1)此次关中地区重霾污染过程是在一次不利气象条件下形成的高浓度颗粒物污染事件。空气污

染主要是由 PM_{2.5}细颗粒物造成,PM_{2.5}浓度日均值有 8 d 超过国家空气质量二级标准,区域最高日均值达 437 μg · m⁻³,污染非常严重;关中多站 PM_{2.5}浓度的演变特征具有区域一致性;在排放源基本稳

为贴地逆温和悬浮(脱地)逆温^[25]。图 7 是西安站在污染开始、严重、清除阶段的温度和相对湿度探空曲线。可以看出,16—17 日污染开始阶段,900 hPa 以下存在贴地逆温,逆温强度在 0.4 °C · (100 m)⁻¹左右,较成都、河北省的逆温强度小^[26-27],且相对湿度在 60% 左右。贴地逆温的存在使得近地层大气层结稳定,空气污染物的稀释扩散能力减弱,本地排放的污染物开始积累,PM_{2.5}浓度开始升高;17 日日出后西安偏北风逐渐增强(图 5),近地层大气湍流交换加强,使得 18 日贴地逆温消失。然而,17 日 08:00—23:00 三门峡—潼关—渭南一带维持一致的强偏东风(表 2),使得区域污染传输叠加本地污染排放循环积累,造成西安 PM_{2.5}浓度剧增,可见水平方向上的区域污染输送是影响 PM_{2.5}浓度的主要因素;污染严重阶段(21—25 日),700 hPa 上转为较弱的西南风(图略),对流层中低层的暖湿平流引起 700 hPa 附近出现悬浮逆温,悬浮逆温的强度约在 0.1 °C · (100 m)⁻¹左右,明显小于贴地逆温,这种多层逆温结构也在其他地区空气污染过程中出现^[25-27]。同时,700 hPa 以下相对湿度较高,900 hPa 以下相对湿度平均达 80% 以上,可见由于逆温的存在,低空水汽聚集使得近地面形成高湿层,为细粒子的吸湿增长提供较好的条件;26 日地面高压系统南下,西安近地层受偏北气流控制(图略),贴地逆温层消失,温度廓线梯度加大。同时,近地层 850 hPa 以下相对湿度迅速减小到 30% 左右,持续多日的霾污染得到清除。

定的情况下,气象条件是这次关中地区大气重污染事件形成的主因。

(2)关中盆地特殊的喇叭口地形和三门峡—潼关—渭南一带持续一致的强偏东风,使得区域污染传输叠加本地污染循环累积,是17日关中 $PM_{2.5}$ 浓度出现剧增的主要原因。污染严重阶段,西安和渭南持续的弱风和静风使得污染物在水平方向上难以向外扩散或流动,污染循环累积, $PM_{2.5}$ 浓度振荡上扬;宝鸡站21日 $PM_{2.5}$ 浓度的爆发式增长则是由储备在西安和渭南高浓度 $PM_{2.5}$ 在持续偏东风作用下区域远程传输所致;而铜川站受山谷风影响, $PM_{2.5}$ 浓度具有显著日变化特征。可见,风速和风向对关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度的影响显著,且累积风速比即时风速对 $PM_{2.5}$ 的影响更明显。

(3)大气混合层高度和污染物 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著负相关关系,持续贴地、悬浮逆温的多层逆温和低混合层高度的存在,抑制了近地层大气垂直方向的湍流交换,致使污染物不易在垂直方向扩散,同时也引起低空水汽在近地层聚集,高湿易于粒子吸湿增长,是 $PM_{2.5}$ 浓度持续累积增长的重要原因。

参考文献

- [1] 王跃思,张军科,王莉莉,等. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J]. 地球科学进展,2014,29(3):388-396.
- [2] 吴兑,廖碧婷,陈慧忠,等. 珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展[J]. 气候与环境研究,2014,19(2):248-264.
- [3] 童尧青,银燕,钱凌,等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学,2007,27(5):584-588.
- [4] 史军,崔林丽. 长江三角洲城市群霾的演变特征及影响因素研究[J]. 中国环境科学,2013,33(12):2113-2122.
- [5] 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.
- [6] Giorgi F, Meleux F. Modelling the regional effects of climate change on air quality[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2007,339(11):721-733.
- [7] Ziomas I C, Melas D, Zerefos C S, et al. Forecasting peak pollutant levels from meteorological variables[J]. Atmospheric Environment, 1995,29(24):3703-3711.
- [8] 胡琳,曹红利,张文静,等. 西安市环境空气质量变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报,2013,29(6):150-153.
- [9] 王珊,廖婷婷,王莉莉,等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学学报,2015,35(11):3452-3462.
- [10] 金丽娜,曲静,张雅斌,等. 西安霾天气时空分布特征与影响因素分析[J]. 气象科技,2015,43(2):314-319.
- [11] Nozaki K Y. Mixing depth model using hourly surface observations[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1974,57:867.
- [12] 李梦,唐贵谦,黄俊,等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学,2015,36(6):1935-1943.
- [13] 田伟,唐贵谦,王莉莉,等. 北京秋季一次典型大气污染过程多站点分析[J]. 气候与环境研究,2013,18(5):595-606.
- [14] 王莉莉,王跃思,王迎红,等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J]. 中国环境科学,2010,30(7):924-930.
- [15] 张强. 地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响[J]. 中国环境科学,2001,21(3):230-234.
- [16] 张强,吕世华,张广庶. 山谷城市大气边界层结构和输送能力[J]. 高原气象,2003,22(4):346-353.
- [17] 张强,吕世华. 兰州市污染物越山输送与局地地理和小气候特征的关系[J]. 高原气象,2001,20(增刊):1-9.
- [18] 张强. 兰州市的大气污染物浓度与局地气候环境因子的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2003,39(1):99-106.
- [19] 周宁芳,李峰,饶晓琴,等. 2006年冬半年我国霾天气特征分析[J]. 气象,2008,34(6):81-88.
- [20] 尚可,杨晓亮,张叶,等. 河北省边界层气象要素与 $PM_{2.5}$ 关系的统计特征[J]. 环境科学研究,2016,29(3):323-333.
- [21] Wang L, Zhang N, Liu Z, et al. The influence of climate factors, meteorological conditions, and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region during January 2013[J]. Advances in Meteorology, 2014(7):1-14.
- [22] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change[J]. Atmospheric Environment, 2010,44(32):3976-3984.
- [23] 苗爱梅,李苗,王洪霞. 一次持续性雾霾天气过程的阶段性特征及影响因素分析[J]. 干旱气象,2014,32(6):947-953.
- [24] 张宏,刘子锐,胡波,等. 北京能见度变化趋势及冬季一次典型污染过程分析[J]. 气候与环境研究,2011,16(5):620-628.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 周书华,倪长健,刘培川. 成都地区大气边界层逆温特征分析[J]. 气象与环境学报,2015,31(2):108-111.

Characteristics of a Severe Haze Pollution Process in Winter of 2013 and Meteorological Cause in Guanzhong of Shaanxi

HUANG Shaoni¹, YUAN Yuan², JING Yu¹, CHEN Xiaoting¹, LIU Ruifang¹

(1. Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014, China,
2. Nanjing Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210019, China)

Abstract: Based on the meteorological data and particulate matter concentration monitoring data in Xi'an, Baoji, Weinan and Tongchuan of Guanzhong, the evolution characteristics of particulate matter concentration and meteorological condition of a severe haze pollution occurred from 16 to 26 December 2013 in Guanzhong were analyzed. The results showed that the severe haze pollution episode was mainly caused by fine particulate matter ($PM_{2.5}$). The variations of $PM_{2.5}$ concentration at 4 stations of Guanzhong during the haze pollution process showed regional synchronicity characteristics, the correlation coefficients of daily $PM_{2.5}$ concentrations each other were 0.71–0.96, and $PM_{2.5}$ concentrations seriously exceeded the national standard, the maximum of hourly regional mean in Guanzhong was $508 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, which indicated the pollution was very serious. Under the influence of the special topography of Guanzhong basin and persistent strong easterly wind in eastern Guanzhong, the endemic pollutants were transferred to Guanzhong, and circularly accumulated, which brought the dramatic increase of $PM_{2.5}$ concentration on 17 December 2013. During the severe stage of pollution, the persistent weak easterly winds and calm winds in Weinan and Xi'an caused the gathering of pollutants, and then $PM_{2.5}$ concentration increased with a fluctuating way. And $PM_{2.5}$ concentration explosively increased on 21 December 2013 in Baoji due to the endemic long-distance transport of $PM_{2.5}$ with high concentration in Xi'an and Weinan by the easterly winds. However, the diurnal variation of $PM_{2.5}$ concentration in Tongchuan was significant due to mountain-valley wind. The multi-layer temperature inversion for a long time and lower mixing layer height restrained the vertical diffusion of pollutants and gathered vapors in the near surface layer, which induced the accumulation of $PM_{2.5}$ pollutants. The strengthening and moving of cold high pressure to south removed quickly and effectively the pollutants in the process of severe haze finally.

Key words: Guanzhong; haze weather; $PM_{2.5}$ pollution; meteorological factors

(上接第 994 页)

Temporal Variation Characteristics of Precipitable Water Vapor Based on GPS and Their Relation with Precipitation in Eastern Section of the Northern Slope of Tianshan Mountains

MIAO Yunling¹, LI Ruqi², ZHUO Shixin¹

(1. Hami Meteorological Bureau of Xinjiang, Hami 839000, China;
2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China)

Abstract: Based on the hourly precipitation and precipitable water vapor (P_{wv}) of GPS at Barkol station of Xinjiang from March 2012 to February 2013, the temporal variation characteristics of P_{wv} and their relation with precipitation were analyzed. The results showed that P_{wv} could well reflect the change of water vapor content in the atmosphere. P_{wv} had an obvious seasonal variation from March 2012 to February 2013 in Barkol of Xinjiang, and the monthly varying curve acted as a single peak distribution, the maximum P_{wv} appeared in July and the minimum P_{wv} appeared in January. The diurnal change of P_{wv} was obvious, the maximum appeared at 10:00 BST and the minimum appeared at 04:00 BST and 20:00 BST. Precipitation was later than the occurrence time of the maximum P_{wv} . The precipitation in spring and summer occurred usually in the first 1–3 hours of the maximum P_{wv} appearing, while that in autumn and winter occurred in the first 2–4 hours of the maximum P_{wv} appearing. The maximum P_{wv} was closely related to hourly precipitation, and the precipitation appeared 39 times when P_{wv} reached the maximum, which accounted for 62.9% of the total number of precipitation, but only 18 times its maximum P_{wv} was corresponded to the maximum hourly precipitation.

Key words: eastern section of the northern slope of Tianshan mountains; GPS inversion; precipitable water vapor; precipitation