

杨晓亮,杨敏,李江波,等,2018.一次太行山焚风对霾强度的影响分析[J].气象,44(2):313-319.

一次太行山焚风对霾强度的影响分析^{*}

杨晓亮¹ 杨敏² 李江波¹ 张珊¹

¹ 河北省气象台,石家庄 050021

² 河北省气象行政技术服务中心,石家庄 050021

提 要: 利用 NCEP 再分析资料、逐 5 min 地面自动气象站、激光雷达、风廓线仪和微波辐射计等资料,对 2015 年石家庄冬季一次典型焚风过程中霾强度的变化进行了分析。结果表明,在静稳天气形势下,华北地形槽使太行山东麓发生了明显的焚风现象,焚风带来湿度的快速下降,进而引起水平能见度迅速上升、PM_{2.5} 浓度迅速下降,霾强度明显减弱。激光雷达可以直观地反映焚风发生前后边界层结构特征和污染物浓度的变化。风廓线仪分析表明,焚风过程 300 m 以下风向、风速的变化明显,表现为风速的加大和风向的多变,说明风场有强的脉动。焚风现象向平原水平推进的距离大概为 25 km,垂直影响的高度在 1 km 以下。

关键词: 焚风,霾,能见度,PM_{2.5} 质量浓度

中图分类号: P458, X511

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.02.011

Impact Analysis of a Taihang Mountain Fohn on Haze Intensity

YANG Xiaoliang¹ YANG Min² LI Jiangbo¹ ZHANG Shan¹

¹ Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

² Hebei Provincial Meteorological Administrative and Technical Service Center, Shijiazhuang 050021

Abstract: Utilizing the NCEP reanalysis data, and the every 5 minute data of ground automatic weather station, laser radar, wind profiler and microwave radiometer, we analyzed the changes of haze intensity in a typical fohn process in Shijiazhuang during the winter of 2015. The results show that the east of Taihang Mountain experienced obvious fohn due to the topographic trough over North China with static and stable weather situation. The fohn led to a rapid decline in humidity, which might cause the rapid rising of horizontal visibility, the decline of PM_{2.5} concentration and the weakening of haze intensity. Laser radar could visually reflect the changes of boundary layer structure and the concentration of pollutants before and after the fohn. By using the wind profile, we learned that the changes of wind direction (may vary a lot) and speed (may be larger) are obvious below 300 m, which proves the strong pulsation of wind. The horizontal and vertical scales of fohn are 25 km and 1 km, respectively.

Key words: fohn, haze, visibility, PM_{2.5} mass concentration

引 言

焚风是出现在山脉背风坡,由山地引发的一种局部范围内的空气运动形式——过山气流在背风坡

下沉而变得干热的一种地方性风。当气流越过山脉时,在迎风坡上升冷却,起初按干绝热递减率降温,当空气湿度达到饱和时水汽凝结,气温就按湿绝热递减率降低,大部分水分在山前降落。过山顶后,空气沿坡下降,基本上按干绝热递减率增温,这样过山

^{*} 国家科技支撑计划项目(2014BAC16B04、2014BAC23B01)和河北省气象局预报员专项(16ky24)共同资助

2016 年 12 月 8 日收稿; 2017 年 9 月 20 日收修定稿

第一作者:杨晓亮,主要从事灾害性天气预报工作. Email: Hbsqxt087@sina.com

后的空气温度比山前同高度的温度高很多,湿度也小得多(李爱贞和刘厚凤,2004)。焚风在世界各地山区都曾出现,以欧洲的阿尔卑斯山、美洲的落基山、俄罗斯的高加索最为有名,一般带来局地气温和湿度的快速变化。焚风在冬末春初可使积雪融化、土壤解冻、物候提前,夏季常常引起干热风使小麦减产,干旱季节提高了森林、草原火险等级,易使大火蔓延。位于我国黄土高原东部的太行山,海拔在1500~2000 m,东侧坡度很大,直接下降到海拔不足100 m的华北平原。因此,位于太行山东麓的河北中南部地区,一年四季均会出现焚风,尤以冬季发生的频率最高(赵世林等,1993;王宗敏等,2012a;2012b),经常造成沿山地区气温预报较大的偏差(孙云等,2012)。焚风对夏季高温的出现和持续起到推波助澜的作用(贺哲等,2007;连志鸾等,2008),此方面开展的技术研究较多(张国华等,2012)。长期的预报实践发现,冬半年雾-霾持续期间,焚风现象的出现亦对雾-霾带来影响,引起霾强度减弱、能见度上升、污染物浓度下降等。赵玉广等(2015)认为太行山地形对华北平原大雾的影响主要是削弱西来冷空气的强度,偏西路径的弱冷空气越过近似南北走向的太行山,下沉增温,有利于平原地区近地面逆温层的维持或加强。受制于垂直探测资料的时空分辨率,焚风对霾强度影响的研究工作开展得不多。本文对2015年冬季河北一次焚风过程及其对霾强度的变化进行分析,为今后此种预报提供参考和依据。

1 过程概述

2015年12月25日凌晨,河北中南部地区出现了明显的焚风天气,位于太行山中段的石家庄地区最为明显。从逐5 min风场分析(图1),石家庄从25日05时开始逐渐转为偏西风,风速相应增大,从 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 加大到 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,最大可达 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。05—06时,气温从 -5°C 上升到 3.9°C ,小时增温达 8.9°C ,露点温度从 -5.5°C 下降到 -9.1°C ,相对湿度从96%下降至38%,焚风现象特征明显。对应焚风出现的时段,地面能见度发生明显好转,05时之前不足0.4 km,07时已经上升到15 km; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在24日夜间最高可达 $313 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,焚风现象出现后, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度缓慢下降,25日08时最低降至 $51 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可见,焚风

对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的下降(即霾的消散)起到了明显的作用。

从气象要素的水平分布来看(图2a),石家庄市区中轴线往西的区域一直到山区,风向以偏西风为主,气温在凌晨以后均有所上升,在08时均升至 0°C 以上,最高为 6.5°C ,较市区东部明显偏高。对比 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的水平分布(图2b), $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显下降的区域位于石家庄市区以西的区域,与焚风出现区域一致,说明焚风作用从山前向平原地区扩展,扩展的水平距离大致在山前25 km左右。

从图1中发现,山前吹偏西风的时间持续到08:30,之后转为偏北风,焚风作用随之消失,09时气温迅速降至 -3.3°C ,1 h降温达 8.2°C ;露点温度从 -10.7°C 升至 -5.9°C ,相对湿度从32%上升至82%,能见度从13.3 km降至1 km以下,最低0.7 km, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度亦呈缓慢增加趋势,至14时已经上升到 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。可见,太行山区特有的焚风现象对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和水平能见度具有明显的影响,出现焚风现象时,随着温度的迅速上升和相对湿度的快速下降, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度会缓慢下降,能见度明显好转。根据焚风的形成机理,焚风出现时的下沉气流导致霾粒子尘降到地面可能是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降、能见度转好的物理原因;但由于焚风一般只改变局地的气象条件,一旦焚风现象消失,地面温度、相

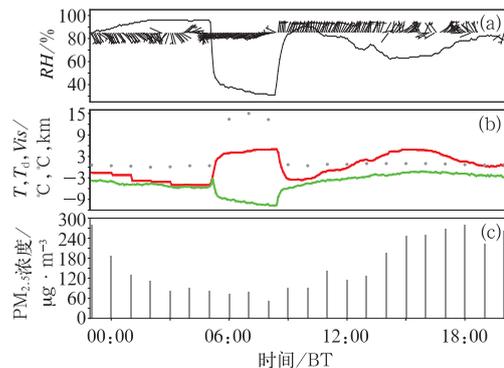


图1 2015年12月25日气象要素(a)相对湿度(实线)、风(风向杆,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b)温度(红线)、露点温度(绿线)、水平能见度(圆点)和(c) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(柱形)的演变

Fig. 1 Meteorological factors (a) relative humidity (solid line), wind (wind barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) temperature (red line), dew point temperature (green line), horizontal visibility (dots); (c) $\text{PM}_{2.5}$ concentrations (bar) on 25 December 2015

对湿度、PM_{2.5}浓度和水平能见度均会回到焚风之前的水平,因此焚风对 PM_{2.5}一般不能起到彻底的减小作用,霾天气在受焚风影响的区域短暂消失,焚风结束后霾将重新出现。

2 天气背景分析

天气形势分析(图3)表明,2015年12月25日

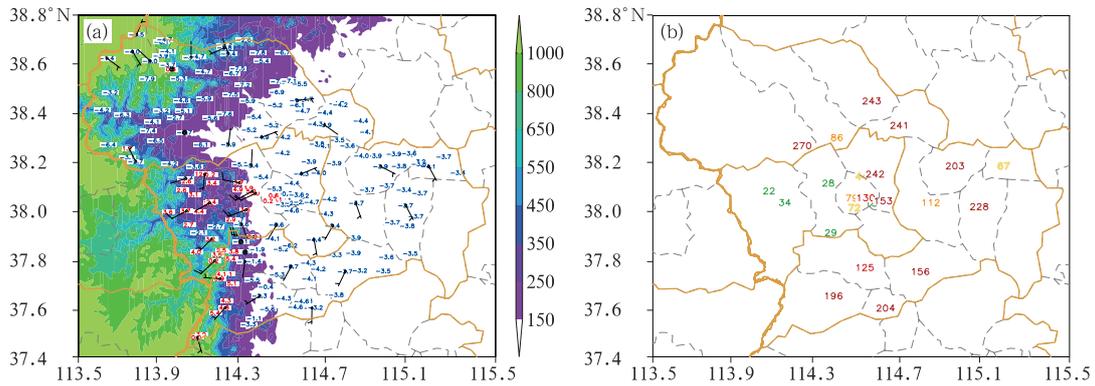


图 2 2015 年 12 月 25 日 08 时(a)气温(单位: °C,蓝色<0 °C,红色≥0 °C)、风(风向杆,单位: m · s⁻¹)、地形高度(填色,单位: m)和(b) PM_{2.5}浓度(单位: μg · m⁻³)的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of meteorological factors; (a) temperature (unit: °C, blue values < 0 °C, red values ≥ 0 °C), wind (wind barb, unit: m · s⁻¹), terrain height (shaded, unit: m) and (b) PM_{2.5} concentrations (unit: μg · m⁻³) at 08:00 BT 25 December 2015

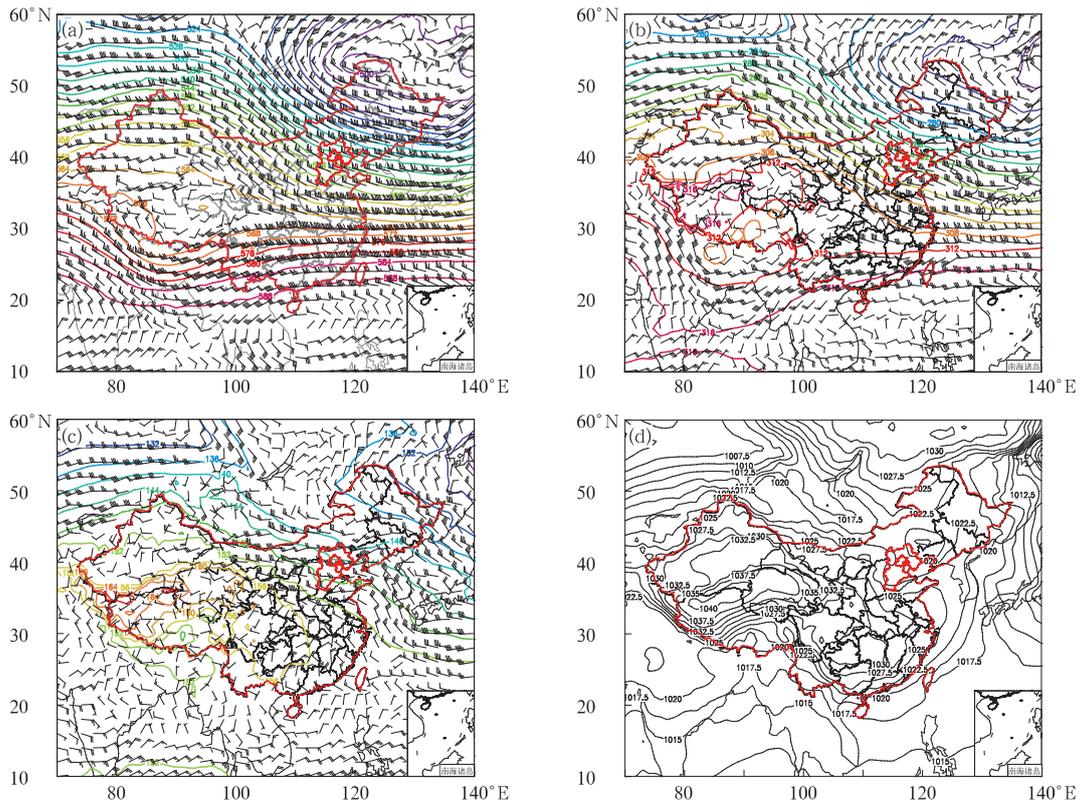


图 3 2015 年 12 月 25 日 08 时(a) 500 hPa、(b) 700 hPa 和(c) 850 hPa 的高度场(实线,单位: dagpm)、风场(风向杆,单位: m · s⁻¹)和(d)海平面气压场(实线,单位: hPa)

Fig. 3 Geopotential height (solid lines, unit: dagpm), wind (wind barb, unit: m · s⁻¹) and sea level pressure (solid lines, unit: hPa) at 08:00 BT 25 December 2015

(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) sea level pressure

08 时,500 hPa 东亚中高纬度为一脊一槽的形势,河北省为脊前西北偏西气流控制,700 hPa 河北上空风场存在弱的气旋性切变,但整体相对湿度较小,850 hPa 为偏西风控制。地面冷高压中心位于西北地区西部,冷空气经西北地区、西南地区到达江南和华南地区,河北处于高压北侧,形成了华北地形槽,河北中南部地区地面吹偏西风,此种地面形势为太行山东麓发生焚风的有利形势。石家庄在西高东低的地面气压场作用下,地面出现偏西风,这样从 850 hPa 到地面一致为与太行山脉走向相垂直的气流,由于湿度较小,气流从山西高原下到位于华北平原的石家庄地区时,空气按干绝热递减率增温,由于地形落差大,造成石家庄地面气温上升、湿度下降,出现“焚风”现象。从邢台当日 08 时探空分析(图略),990 hPa 到地面存在明显的逆温层,说明大气

层结稳定,有利于平原地区雾和霾的维持。

3 激光雷达特征

由于受过去监测手段的限制,对边界层中气溶胶粒子的垂直分布结构和演变特征知之甚少,发展光学探测手段是目前大气环境探测研究领域的重要工作(王耀庭等,2014;毛卓成等,2015;杜传耀等,2015;黄瑜等,2015;张雅斌等,2016),激光雷达可以直观地反映焚风发生前后污染物的垂直结构变化情况。

利用经过距离校正后的回波信号,采用拐点法(王耀庭等,2014)可以大致确定大气边界层的高度,其 24 h 的变化特征如下(图 4),24 日 20 时至 25 日 00 时,回波信号扩张的高度一般不足 1 km,高度在

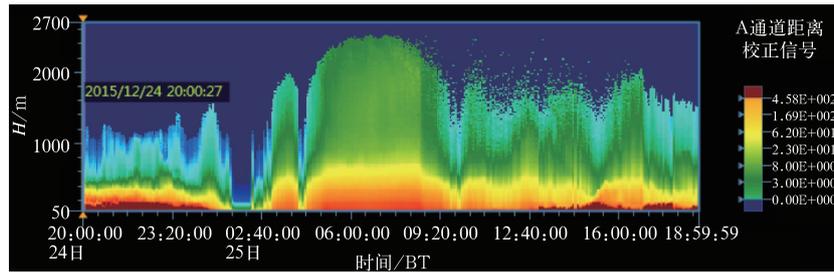


图 4 2015 年 12 月 24—25 日石家庄激光雷达距离校正信号

Fig. 4 Distance correction signal of Shijiazhuang Lidar in 24—25 December 2015

200 m 上下的距离平方订正回波信号强度梯度最大,说明边界层在此高度附近,最大回波信号强度达 1000 以上,回波信号强度随着高度的升高而减弱,说明颗粒物在近地面层最集中,随着高度的升高颗粒物浓度降低。25 日凌晨之后,尤其是 05—08 时,回波信号的垂直分布发生了明显变化,信号垂直扩展到 2 km 高度以上,近地面的回波信号强度最大不超 400,整个边界层内信号的垂直梯度明显减弱,表明近地层颗粒物浓度明显减小,边界层高度升高,且整个边界层内回波信号分布较均匀,反映了边界层内混合作用的增强。随着焚风作用的消失,回波信号扩张的高度逐渐下降到 1 km 左右,近地面的最大回波信号强度逐渐增大到 1000 以上,说明边界层高度再次下降,污染物再次集中在近地面 200 m 高度以下,浓度迅速增加。

选取 24 日 22 时、25 日 07 和 15 时分别代表焚风前、焚风时和焚风后,3 个时次距离平方订正回波信号强度的垂直分布可直观地反映上述特征

(图 5),焚风发生前和发生后,75 m 回波信号强度

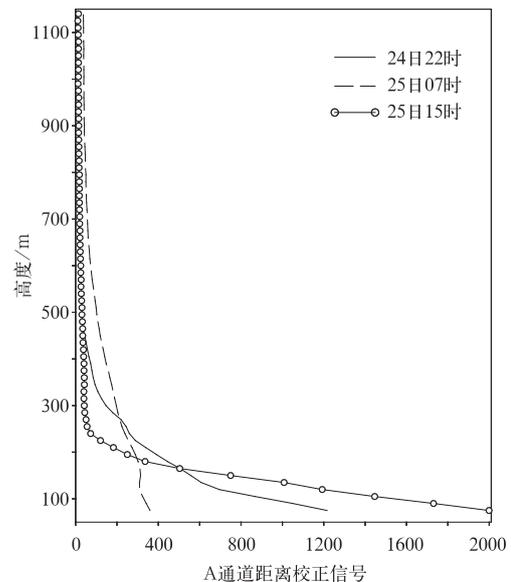


图 5 石家庄激光雷达距离校正信号

Fig. 5 Distance correction signal of Shijiazhuang Lidar

分别达到了 1200 和 2000, 225 m 以下具有大的强度梯度, 225 m 以上回波信号强度很弱, 说明混合层高度较低, 焚风发生时 75 m 回波信号强度为 360, 远小于前后 2 个时次, 同时 800 m 以下的回波信号强度分布均匀, 反映了混合层高度大幅升高。

利用激光雷达的回波强度信号可以反演垂直方向上的消光系数, 分析整个过程消光系数的演变(图 6a), 24 日夜间, 300 m 高度以下消光系数始终较高, 最高出现在 22:30 前后, 可达 9 km^{-1} , 由于近地面粒子浓度大, 1 km 以上的激光雷达信号消失, 因此消光系数值缺失。25 日 02 时以后消光系数呈下降趋势, 焚风发生时消光系数降至最低, 在 1 km^{-1} 以下, 最低 0.7 km^{-1} 左右, 消光系数反演的高度达到 2.5 km 上下。08 时以后消光系数上升到 1 km^{-1} 以上, 近地面层逐渐出现消光系数的大值, 14 时以后 300 m 以下的消光系数迅速上升到较高水平。气溶胶光学厚度定义为介质的消光系数在垂直方向上的积分, 描述的是气溶胶对光的衰减作用。25 日之前, 气溶胶光学厚度始终在 1 以上(图 6b), 最高达 1.85。25 日 00 时开始气溶胶光学厚度降至

1 以下, 其中焚风发生时最低在 0.6 上下, 说明在焚风作用之下, 垂直累计的粒子消光系数减小, 反映的是污染物浓度的下降。25 日 08 时前后气溶胶光学厚度回到 1 以上, 呈波动式上升, 最高甚至达到了 2.16, 表明垂直累计污染物浓度迅速增强, 霾天气加重。

4 风场和湿度场特征

风廓线仪是监测大气水平风垂直分布的有效工具。与传统的无线电探空设备相比, 其主要优点表现在: 一是可对测站上空水平风的垂直分布进行不间断连续探测, 时间分辨率可达 6 min; 二是风廓线仪测量的是观测站上空水平风的垂直分布情况, 避免了常规探空气球随风飘离的情况, 反映的风是测站上空的实际情况。

利用石家庄鹿泉低对流层风廓线雷达, 对焚风发生时段前后的风廓线资料进行分析。从逐 6 min 的风廓线水平风场分布来看, 25 日 04 时开始, 对流层中下层 4 km 上下以西北气流为主, 风速在 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

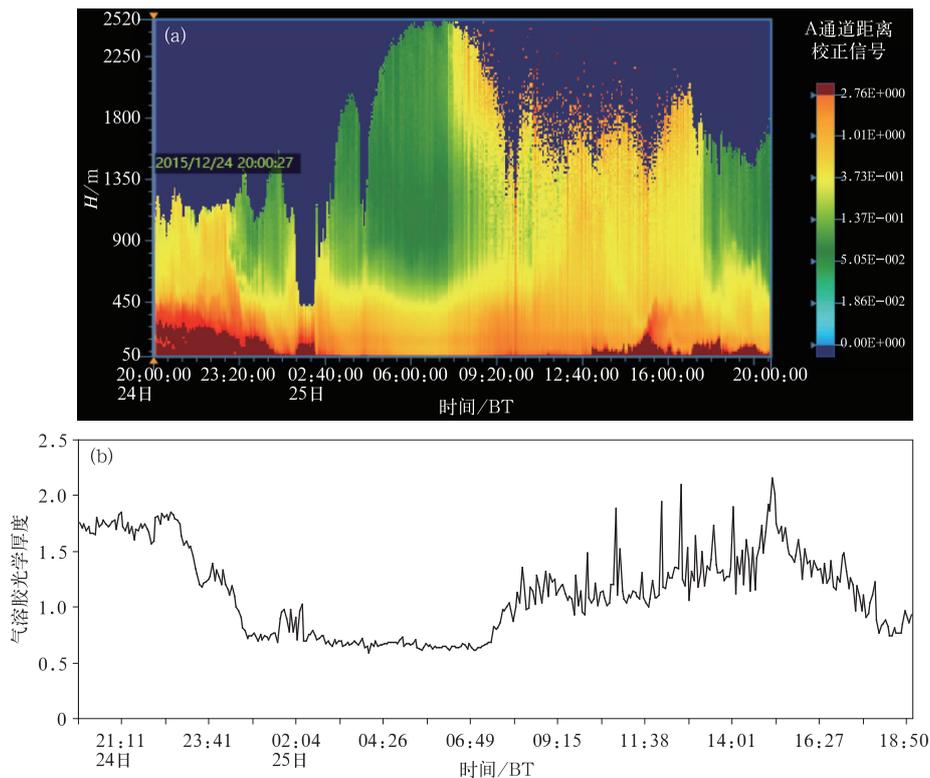


图 6 2015 年 12 月 24—25 日石家庄激光雷达消光系数(a, 单位: km^{-1})和气溶胶光学厚度(b)

Fig. 6 The 150 meter aerosol extinction coefficient (a, unit: km^{-1}) and aerosol optical depth (b) detected by Shijiazhuang Lidar in 24—25 December 2015

以上,这和天气系统的演变相符。随着高度的降低风速逐渐减小,1.5 km 高度上空风速普遍在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,风向偏西的分量加大,500 m 以下,以西到西南风为主,04:54 开始,150 m 高度上开始出现西北风,风速在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。05:30 起,西北风逐渐转为偏北风,风速减小。06 时开始,300 m 以下风场变得不一致,开始出现偏东风,风速不大,06:36 东北风加大到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上(图 7),270 m 出现东南风,这种情况一直维持到 08:30,之后风向先后转为北、东北、偏南风,风速迅速下降。整个时段 500 m 以上无论风向、风速变化均不大。可见,焚风过程前后 500 m 以上风场无明显变化,以西北和偏西风为主,风向、风速的主要变化发生在 300 m 以下,始于西北风的加大,之后风向多变,上下层出现不一致现象,说明风场的脉动很强,随着风速的迅速下降,风场的脉动减弱,焚风过程结束。

微波辐射计反演的相对湿度廓线可清晰地反映焚风对相对湿度垂直分布的影响(图 8)。25 日 00 时前后,1 km 以下相对湿度随高度下降而明显增大,最高接近 80%,05 时开始,1 km 以下的相对湿度迅速下降至 40% 以下,近地面接近 30%,此时,地面污染物浓度下降,水平能见度迅速升至 10 km 以上,霾消散。近地层低相对湿度一直维持到 08:40 前后,随着焚风现象的消失,近地面相对湿度迅速上升至 60% 以上,地面污染物浓度上涨,能见度降至 3 km 以下,霾迅速增强。对比微波辐射计反演的温度分布,05 时前后开始,500 m 以下出现 4°C 以上的暖中心,温度随高度的下降而升高,最强暖中心可以

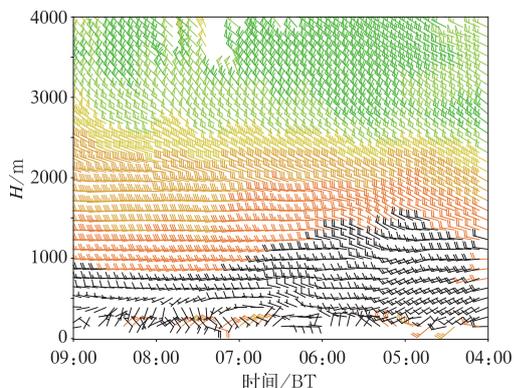


图 7 2015 年 12 月 25 日石家庄风廓线特征(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Characteristics of wind profiles in Shijiazhuang on 25 December 2015 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

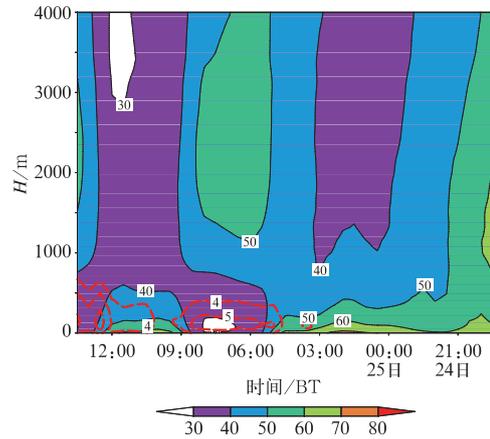


图 8 2015 年 12 月 24—25 日石家庄微波辐射计反演的相对湿度廓线(阴影,单位:%) 和温度廓线(等值线,单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 8 Relative humidity (shaded area, unit: %) and temperature (isoline, unit: $^\circ\text{C}$) profile detected by the microwave radiometer of Shijiazhuang in 24—25 December 2015

达到 5°C ,09 时开始 4°C 以上的暖中心消失。以上分析发现,微波辐射计反演的相对湿度、温度的变化与焚风的影响时段高度吻合,垂直方向上,焚风效应的影响最高可达 1 km 高度,但对 500 m 以下的近地层影响最显著。正是焚风的出现和消失带来地面的温度、相对湿度等气象要素的剧烈变化,从而引起了霾的强度在短时间内的变化。

5 结 论

利用 NCEP 再分析资料、自动气象站、激光雷达、风廓线仪和微波辐射计资料对一次典型焚风过程中霾强度的变化进行了分析,得出以下结论:

(1) 在大的环流背景未发生明显改变的情况下,华北地形槽造成的局地焚风现象对霾天气的减弱和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变小有明显作用,影响的范围在山前 50 km 范围内。

(2) 焚风发生前,颗粒物在近地面聚集,激光雷达回波信号强、垂直梯度大,焚风发生时激光雷达回波信号强度减弱,垂直方向变得均匀。气溶胶消光系数和光学厚度均在焚风发生前后有明显变化。

(3) 焚风过程前后风场的垂直分布特征是:500 m 以上风场无明显变化,风向、风速的主要变化发生在 300 m 以下,表现为风向多变,上下层出现不一致现象,说明风场的脉动很强,焚风过程随着风

场脉动的减弱而结束。

(4) 焚风效应在垂直方向的影响最高可达1 km 高度,但对 500 m 以下的近地层影响最明显。

参考文献

- 杜传耀,于丽萍,王玺,等,2015.对雾-霾过程的综合探测[J].气象,41(12):1525-1530.
- 贺哲,李平,乔春贵,等,2007.郑州极端高温天气成因分析[J].气象,33(3):68-75.
- 黄瑜,夏俊荣,韩永翔,等,2015.无霾和有霾情况下大气混合层高度的日变化及其特征——基于河北香河站激光雷达的观测[J].科学技术与工程,15(24):126-131,137.
- 李爱贞,刘厚凤,2004.气象学与气候学基础:第2版[M].北京:气象出版社:216-217.
- 连志鸾,高连山,赵彦厂,等,2008.石家庄夏季持续高温灾害的气候特征及形成机理[J].中国农业气象,29(4):387-391.
- 毛卓成,马井会,许建明,等,2015.上海地区持续东风系统控制下污染扩散条件分析[J].气象,41(7):890-898.
- 孙云,王丽荣,匡顺四,等,2012.石家庄春季一次气温预报失误原因探讨[J].气象与环境科学,35(增刊):19-23.
- 王耀庭,苗世光,张小玲,2014.北京秋季一次降雪前污染天气的激光雷达观测研究[J].气候与环境研究,19(6):659-669.
- 王宗敏,丁一汇,张迎新,等,2012a.太行山东麓焚风天气的统计特征和机理分析 I:统计特征[J].高原气象,31(2):547-554.
- 王宗敏,丁一汇,张迎新,等,2012b.太行山东麓焚风天气的统计特征和机理分析 II:背风波对焚风产生和传播影响的个例分析[J].高原气象,31(2):555-561.
- 张国华,关彦华,孔凡超,2012.太行山东麓焚风增温的天气学特征和预报方法[J].吉林气象,(4):8-11,33.
- 张雅斌,林琳,吴其重,等,2016.“13·12”西安重污染气象条件及影响因素[J].应用气象学报,27(1):35-46.
- 赵世林,王荣科,郭彦波,等,1993.太行山中段的焚风[J].气象,19(2):3-6,29.
- 赵玉广,李江波,李青春,2015.华北平原3次持续性大雾过程的特征及成因分析[J].气象,41(4):427-437.