

文章编号: 2096-1618(2019)04-0443-06

高原和盆地间山谷风对四川霾日变化的影响分析

陈玉蓉¹, 宋美洋², 侯劭禹³, 顾建峰⁴, 刘海文¹

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 北京东润环能科技股份有限公司, 北京 100192; 3. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 4. 重庆市气象局, 重庆 401147)

摘要:为研究高原与盆地间山谷风对四川霾日变化的影响,利用 NCEP 提供的 1 日 4 次的 FNL 再分析资料,使用天气分析和数值模拟等方法,研究了山谷风对 2015 年 1 月 21 日严重霾天气的日变化影响,得到如下结论:2015 年 1 月 21 日四川盆地空气质量指数 AQI 和污染物 PM₁₀、PM_{2.5} 的浓度具有明显的日变化特征,污染物峰值由 21 日凌晨 2 时一直持续到上午 11 时,到 15 时污染物浓度最低;高原和盆地间的山谷风对该日霾的日变化有明显影响。1 月 21 日 8 时至 11 时,携带冷空气的山风从盆地两侧吹向盆地,冷空气下沉凝结,在相对湿度高于 80% 的条件下,有利于霾的生成和维持;同时山风在四川盆地形成的辐合线,有利于污染物聚积,造成此时的污染物浓度达到峰值。14 时后,地面风由山风变为谷风,相对湿度也降低到 80% 以下;谷风导致了污染物浓度迅速扩散,使污染物浓度处于谷值。中尺度数值模式 WRF 对高原与盆地间山谷风有较好的模拟能力。

关键词:气象学;数值模拟;山谷风;霾;日变化;四川盆地

中图分类号:P461

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2019.04.018

0 引言

山谷风是山坡和谷地由于受热不均而形成的局地性热力环流,白天由谷地吹向山坡称谷风,夜间由山坡吹向谷地称山风^[1]。研究发现,山谷风组成的中尺度环流及其垂直结构控制着 10 公里到几百公里污染的日变化规律及复杂的垂直分布^[2]。早在 1960 年代,就有观测发现夏半年在山谷风和海陆风的作用下会形成抬升的污染层,这个污染层通常在对流层 1~2 km 高度,称之为“山烟囱效应”^[3]。Lu 等^[4-5]通过 2 维和 3 维模式,分析了洛杉矶地区山谷风和海陆风之间的关系,结果表明在山谷风和海陆风的共同作用下,污染物会被输送到逆温层以上,夜晚边界层稳定后,污染物会停留逆温层,最终导致未来几天高污染事件的发生。Kimura^[6]通过数值实验,模拟研究了山谷风携带污染物从东京地区到达佐久(Saku)盆地的过程。李宗恺等^[7]根据渡口市空气污染监测资料,首次鉴别山谷风转换期的漫烟过程,并发展了山谷风转换期的漫烟扩散模式。张强等^[8]研究表明,作为山谷城市的兰州,大气湍流活动很弱,污染物的湍流扩散不强,使山谷城市兰州的大气污染物一般不可能越过周围山地而扩散

出去。Weissmann 等^[9]利用数值模式以及其他探空资料,研究了德国南部山谷风气流的结构和传输过程。山谷风从中尺度区域到行星尺度范围,它不仅引起各种各样的天气现象^[10-11],而且由于山谷风日变化产生的上坡气流和下坡气流会对污染物的传送有着极其重要的影响,还会把污染物移动到海拔更高或者海拔更低的区域^[12]。除此之外,山谷风系统对当地天气和空气中污染物的运输和扩散都有着重要的实际意义^[13]。

大量文献研究表明,山谷风对大气污染物的输送和扩散有着重要影响。青藏高原的东部地区和四川盆地区域尽管经常受山谷风的影响^[14],但是针对青藏高原和其东侧四川盆地之间的山谷风的研究则相对较少。而且四川盆地由于其特殊的地形,秋季和冬季多雾霾天气发生,也是中国四大霾天气较为严重的区域之一^[15],对发生在该地霾的研究也相对较少。文中试图通过研究青藏高原和四川盆地之间由于热力差异造成的山谷风,从环流形势、气象要素等方面来尝试解释产生山谷风对霾天气的影响。这无疑对深化认识高原-盆地间山谷风影响四川盆地霾的机制,具有十分重要意义。

1 资料与方法

污染物浓度和空气质量数据由成都、内江、德阳、达州等所在城市的所有大气环境观测站提供。天气形势

收稿日期:2018-12-25

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(91337215);四川省科技计划应用基础研究计划资助项目(2015JY0109)

均由美国国家环境预报中心(national center for environment prediction,NCEP)提供的 FNL(final operational analysis)再分析资料,其水平分辨率是 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 经纬度,垂直方向上共有 26 层等压面,时间间隔为每 6 h 1 次。

WRF(weather research and forecast)模式系统由美国国家大气研究中心(NCAR)和美国环境预报中心等单位联合开发的高分辨中尺度模式。WRF 模式被广泛地应用于天气研究和分析中,比如,Catalano 等^[16]利用 WRF 对山谷中上坡流进行大涡模拟;王颖等^[17]检验了 WRF 在不同边界层方案下对山谷城市边界层模拟能力;刘瑞婷等^[18]利用观测的气象要素和 $PM_{2.5}$ 浓度资料,并结合 WRF 模式对北京地区雾霾污染期间天气条件和边界层气象特征进行了分析,模拟与观测对比表明 WRF 模式可以较好地反映北京-天津-河北地区地面和高空主要气象要素的时空分布。

图 1 给出了此次模拟的嵌套区域设置。第一层嵌套区域的中心位置是 $32.76^{\circ}N,104.5^{\circ}E$,其包含了东亚地区的大部分地区和青藏高原整体,其网格点分布是 86×73 ,水平分辨率是 27 km;四川盆地主要位于第

二层嵌套区域,它的格点分布是 130×127 ,水平分辨率是 9 km;最内层区域格点分布是 115×112 ,水平分辨率是 3 km;三层嵌套区域的垂直分辨率都为 30 层。模式的初始场和边界场由再分析资料 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 FNL 资料提供。模式积分初始时间为 2015 年 1 月 21 日 02 时(北京时),总共 24 h,每 1 h 输出 1 次模拟结果。表 1 给出了此次模拟使用的参数化方案,并对方案进行了简单说明,其中第三层嵌套区域由于分辨率较高,未采用对流参数化方案。

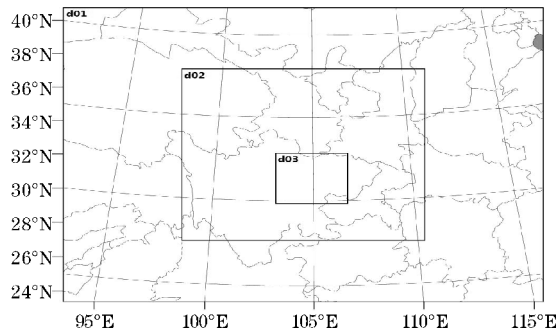


图 1 模式嵌套区域

表 1 WRF 模式主要特征参数

	嵌套区域 1 (D01)	嵌套区域 2 (D02)	嵌套区域 3 (D03)
格点步长/km	27	9	3
时间步长/s	108	36	12
边界层	YSU	YSU	YSU
短波辐射	Dudhia	Dudhia	Dudhia
长波辐射	RRTM	RRTM	RRTM
微物理过程	Lin	Lin	Lin
对流参数化	KF	KF	——
陆面过程	Five-layer soil model	Five-layer soil model	Five-layer soil model

2 2015 年 1 月 21 日重度霾事件

2015 年 1 月 21 日成都及其周边地区持续出现重度污染天气,该次重度污染受到媒体的广泛关注。由于资料的限制,文中用成都、内江、德阳、达州 4 个城市的空气质量数据的算术平均来代表四川盆地的空气质量。图 2 给出了四川盆地污染物随时间的演变图。由图 2 可见,四川盆地的空气质量指数 AQI 有明显的日

变化。根据 2012 年中华人民共和国环境保护部发布的《环境空气质量标准》(GB3095-2012),颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 是计算 AQI 指数的两项重要的基础指标,也是衡量霾污染程度最重要的指标^[19]。图 2 中的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 随时间同位相变化,和 AQI 一样也有明显的日变化。3 种污染数据在凌晨 2 时和中午 11 时存在峰值,污染物浓度值最高;而在 15 时污染物都降低到轻度污染的水平。因此,可以认为, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 是导致该次重度霾事件的主要因素。

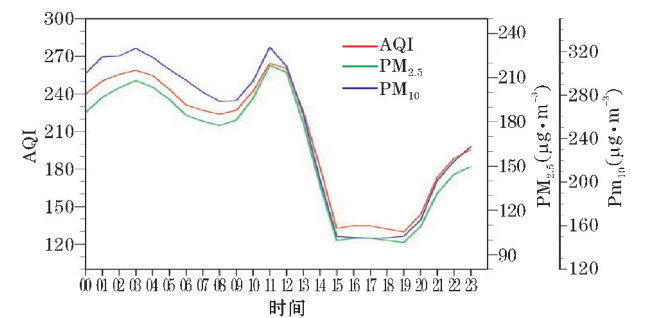


图2 2015年1月21日00时至1月22日00时
污染物浓度随时间变化趋势图

3 2015年1月21日重度霾天气的天气形势

为分析影响该次霾事件的天气形势,图3为2015年1月21日08时和14时的500 hPa天气形势图。21日08时,整个中高纬度地区主要表现为两槽一脊形势,其中一个槽位于巴尔喀什湖及其以南地区,另一个槽则从中国东北东部延伸到山东半岛附近,在蒙古则为一个脊,中国的四川盆地地区主要受到高压脊前的西北气流影响。到了14时,整个中高纬度地区环流稳定少变,四川盆地仍受西北气流影响。

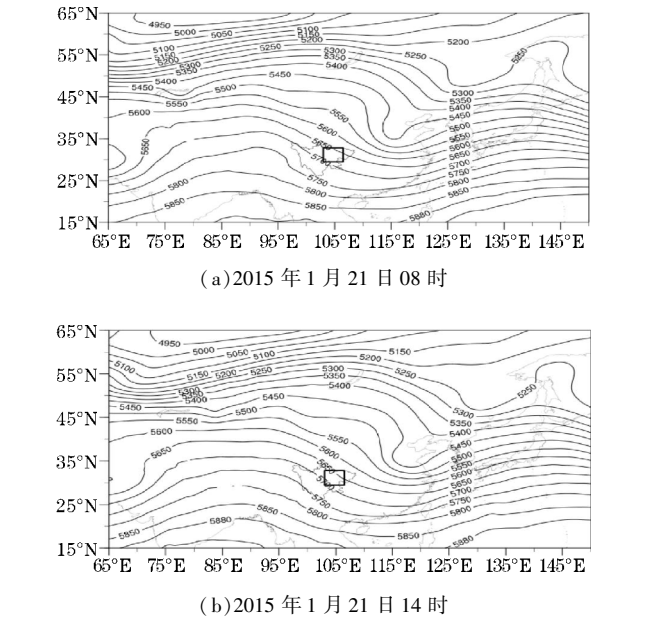
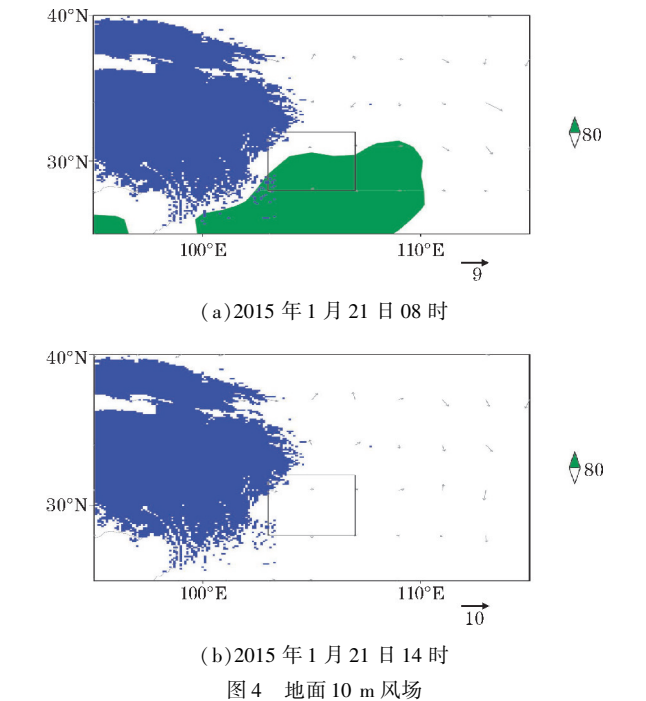


图3 500 hPa 位势高度场(矩形方框代表盆地区域)

吴兑等^[20]、丁一汇等^[21]研究表明,当水平能见度小于10 km,且大气相对湿度小于80%时,大气浑浊视野模糊导致的能见度变化主要是霾造成的。因此,图4中以相对湿度80%为阈值,给出了地面风场和相对湿度场。尽管高空天气形势稳定少变(图3),但是近地面风和相对湿度却有明显的日变化特征(图4),绿

色阴影区域表示地面2 m相对湿度(%),蓝色阴影区域表示地形高度大于3000 m。1月21日08时,四川盆地风速较小,大于80%的相对湿度主要位于四川盆地的东部和南部,相对较小的地面风速和相对高的相对湿度,非常有利于污染物在四川盆地堆积^[21];到了14时,四川盆地及其附近大气的地面风和相对湿度发生了明显的改变,08时存在弱辐合的地面风在14时改为弱辐散,而地面的弱辐散气流有利于高空冷空气的下沉,高空干冷的空气下沉到地面,不利于四川盆地及其附近的地面较大相对湿度的维持,因此在14时四川及其以东和以南地区相对湿度都低于80%,而较低的相对湿度不利于污染物浓度的增加^[21]。



4 WRF 模式对2015年1月21日气象要素的模拟

稳定少变的500 hPa天气形势(图3)显然不利于四川盆地近地面相对湿度的日变化,而相对湿度是影响霾生成的重要气象要素^[19]。为进一步验证WRF模式对大气相对湿度的模拟能力,图5给出了WRF模式模拟的相对湿度空间分布图(D03),可见WRF模式能够较好地模拟出相对湿度的日变化。1月21日上午08时,盆地区域地面层相对湿度达到了90%,高原主体部分的相对湿度较小。3 h以后,盆地的大气相对湿度处于70%左右,此时为污染物浓度高峰值时间。研究表明,较低的相对湿度不利于污染物的维持^[21]。到了14时,盆地区域地面层相对湿度全部低

于 70%, 此时盆地的污染物浓度也在该日表现为低值。因此,盆地近地面相对湿度的日变化对盆地的污染物浓度的日变化具有重要影响。

微风是形成霾的一个必要条件,为进一步验证 WRF 模式对四川盆地地面风的模拟能力,图 6 给出了 WRF 模式模拟的嵌套区域 3 的地面 10 m 风场分布图,可见 WRF 模式能够较好地模拟出山谷风的日变化。21 日 08 时,盆地两侧的山风吹向盆地,盆地内有一条明显的辐合线,有利于污染物浓度在四川盆地的堆积。到了 11 时,盆地内的辐合线明显的南压,且范围要比 08 时的辐合线要大,这表明来自川北部的冷空气开始南侵。14 时,盆地的局地环流发生了明显的改变,11 时以前的山风改变为由盆地吹向高原的谷风,08 时和 11 时以南北风为主的风向改变为以东风为主的特征,且谷风的风速要大于山风,较大的风速和较小的相对湿度(图 5)显然不利于污染物的堆积,因此此时的污染物浓度降低到低值。

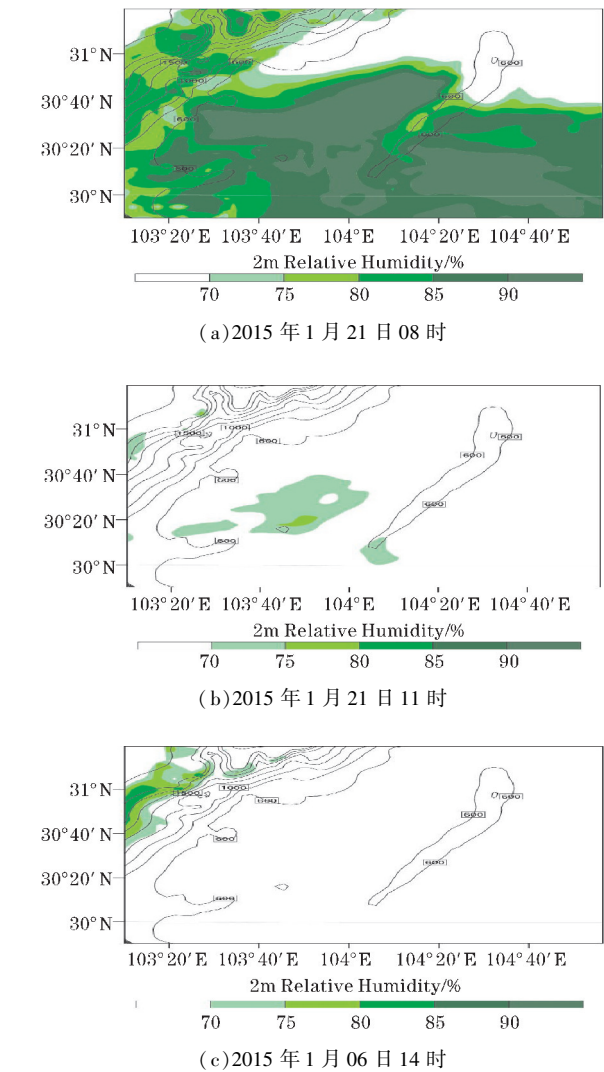


图 5 WRF 模式模拟的地面 2 m 相对湿度空间分布图
(等值线为地形高度,阴影为地面 2 m 相对湿度)

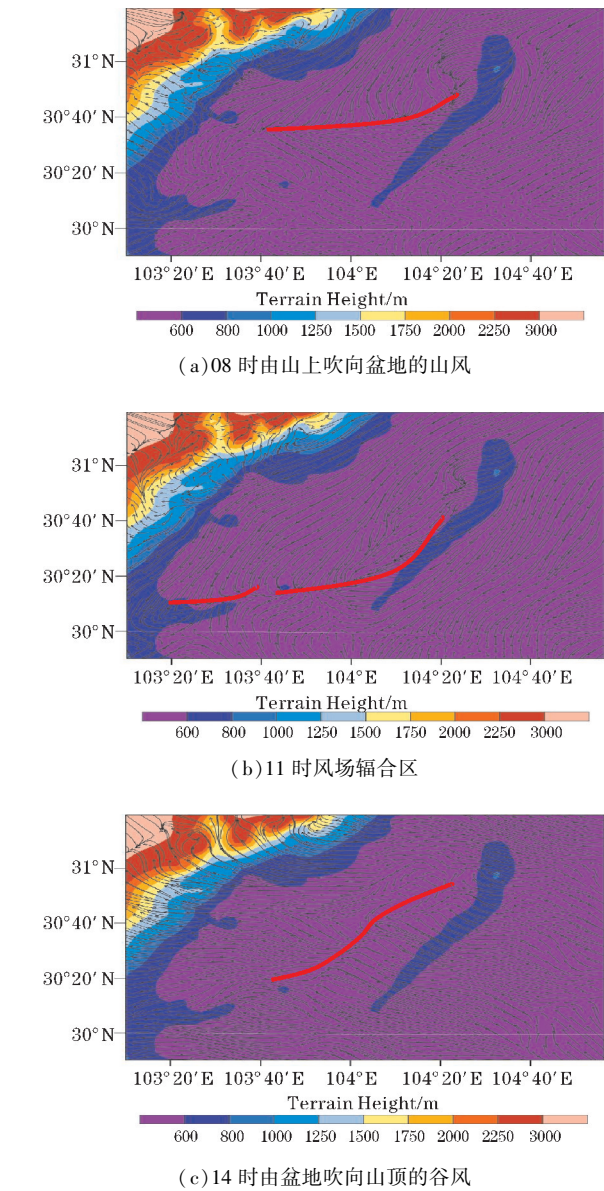


图 6 2015 年 1 月 21 日 D03 地面风场图
(彩色色标为地形高度,红色线条大致表示地面辐合线)

5 结论和讨论

利用中国大气环境观测站提供的成都、内江、德阳、达州等地区的污染物浓度、空气质量数据和 NCEP 提供的 FNL 再分析资料,采用 WRF 数值模式等方法,对 2015 年 1 月 21 日发生在四川盆地的一次霾事件进行了数值模拟,结论如下:

- (1)2015 年 1 月 21 日,四川盆地发生了一次明显的霾事件,该次霾事件具有明显的日变化,污染物峰值由 21 日凌晨 2 时一直持续到上午 11 时,到 15 时污染物浓度最低。
- (2)四川盆地近地面相对湿度的日变化对该次霾的日变化具有重要影响,WRF 模式能够较好地模拟影

响该次霾事件中的相对湿度的日变化。

(3) WRF 模式能够较好地模拟高原与四川盆地之间的山谷风的日变化,高原盆地间的山谷风对该日霾的日变化有着重要的影响。1月21日08时至11时,携带冷空气的山风从盆地两侧吹向盆地,冷空气下沉凝结,在相对湿度高于80%的条件下,有利于霾的生成和维持;而且在四川盆地山风形成的辐合线,有利于污染物聚积,造成此时的污染物浓度达到峰值。14时后,地面风由山风变为谷风,相对湿度也降低到80%以下;谷风导致了污染物浓度迅速扩散,使污染物浓度处于谷值。

对于南方地区,如何客观地区分雾和霾,是一个非常重要的科学问题^[22]。文中仅使用空气质量指数来对霾事件进行了分析和探讨,对大气相对湿度大于90%的情况下,该日08时是否也存在雾霾共存的现象,这需要更翔实的数据进一步验证和分析。

参考文献:

- [1] 张人文,范绍佳,李颖敏. 2008年秋季从化山谷风观测研究[J]. 热带气象学报,2012,28(1): 134-139.
- [2] 雷孝恩. 污染气象学[J]. 地球科学进展,1994,9(1):71-72.
- [3] Neiburger M. The role of meteorology in the study and control of air pollution[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1969,50(12):957-965.
- [4] Lu R, Turco R P. Air pollution transport in a coastal environment. Part I: Two-dimensional simulations of sea-breeze and mountain effects[J]. Atmospheric Environment,1994,51(15):2285-2308.
- [5] Lu R, Turco R P. Air pollution transport in a coastal environment. Part II: Three-dimensional simulations over Los Angeles Basin[J]. Atmospheric Environment,1995,29(13):1499-1518.
- [6] Kimura F. Thermally induced wind passing from plain to basin over a mountain range[J]. Journal of Applied Meteorology,1993,32(9):1538-1547.
- [7] 李宗恺,潘云仙,周朝辅,等. 山谷风转换期的漫烟扩散模式[J]. 气象学报,1986(4):433-439.
- [8] 张强,吕世华,张广庶. 山谷城市大气边界层结构及输送能力[J]. 高原气象,2003,22(4):346-35.
- [9] Weissmann, Braun F J, Gantner L, et al. The Alpine Mountain-Plain Circulation: Airborne Doppler Lidar Measurements and Numerical Simulations [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(11): 3095-3109.
- [10] Reiter ER, Tang M. Plateau effects on diurnal circulation patterns[J]. Monthly Weather Review, 1984, 112(112): 638-651.
- [11] Kuo Y H, Anthes R A. Mesoscale budgets of heat and moisture in a convective system over the central United States[J]. Monthly Weather Review, 2009, 4(8): 1-32.
- [12] Moore GE, Daly C, Liu M K, et al. Modeling of mountain-valley wind fields in the southern San Joaquin valley, California[J]. Journal of Applied Meteorology, 1987, 26(9): 1230-1242.
- [13] Wekker, Stephan F J De, et al. A numerical study of the thermally driven plain-to-basin wind over idealized basin topographies[J]. Journal of Applied Meteorology, 1998, 37(6): 606-622.
- [14] Huang HL, Wang C C, Chen T J, et al. The Role of Diurnal Solenoidal Circulation on Propagating Rainfall Episodes near the Eastern Tibetan Plateau [J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(7): 2975-2989.
- [15] 张保安, 钱公望. 中国灰霾历史渊源和现状分析[J]. 环境与可持续发展, 2007(1): 56-58.
- [16] Catalano F, Moeng C H. Large-Eddy Simulation of the Daytime Boundary Layer in an Idealized Valley Using the Weather Research and Forecasting Numerical Model[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2010, 137(1): 49-75.
- [17] 王颖, 张镭, 胡菊, 等. WRF 模式对山谷城市边界层模拟能力的检验及地面气象特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1397-1407.
- [18] 刘瑞婷, 韩志伟, 李嘉伟. 北京冬季雾霾事件的气象特征分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 164-172.
- [19] 侯梦玲, 王宏, 赵天良, 等. 京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究[J]. 大气科学, 2017, 41(6): 1177-1190.
- [20] 吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 雾和霾[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 198.
- [21] 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.
- [22] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005(4): 3-7.

Analysis of the Influence of Mountain-basin Wind between Plateau and Basin on the Diurnal Variations of Haze in Sichuan Province

CHEN Yurong¹, SONG Meiyang², HOU Shaoyu³, GU Jianfeng⁴, LIU Haiwen¹

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Beijing East Environment Energy Science and Technology Co. Ltd., Beijing 100192, China; 3. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4. Chongqing Meteorological Administration, Chongqing 401147, China)

Abstract: In order to study the impacts of the mountain-basin wind between plateau and basin on the diurnal variation of haze in Sichuan, based on FNL reanalysis data four times a day which are provided by NCEP, the impacts of the mountain-basin wind on the diurnal variation of severe haze weather on January 21, 2015 was studied by using weather analysis and mesoscale numerical model WRF, etc. The following conclusions were obtained. On January 21, 2015, Air quality index (AQI) and the concentration of pollutant PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Sichuan Basin showed obvious diurnal variation. The peak value of pollutants lasted from 2:00 a. m. to 11:00 a. m. on the 21st, and the concentration of pollutants was the lowest at 15:00. The mountain-basin wind between plateau and basin has a significant impact on the diurnal variation of haze on that day. From 8 a. m. to 11 a. m. on January 21, mountain wind carrying cold air blows from both sides of the basin to the basin, and the cold air sinks and condenses. When the relative humidity is above 80%, it is conducive to the generation and maintenance of haze. At the same time, the convergence line formed by mountain wind in Sichuan basin is conducive to pollutant accumulation, causing the concentration of pollutants to reach the peak at this time. After 14:00, the ground wind changed from mountain wind to valley wind, and the relative humidity also dropped below 80%. Valley wind leads to the rapid diffusion of pollutant concentration, which makes the pollutant concentration in the valley value. The mesoscale numerical model WRF has a good ability to simulate the mountain-basin wind between plateau and basin.

Keywords: meteorology; numerical simulation; mountain-basin wind; haze; diurnal variations; Sichuan Basin