

曾佩生,朱蓉,范广洲,等,2019. 京津冀地区低层局地大气环流的气候特征研究[J]. 气象,45(3):381-394. Zeng P S, Zhu R, Fan G Z, et al, 2019. Study on climatic characteristics of local circulation in the lower atmosphere in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Meteor Mon, 45(3):381-394(in Chinese).

京津冀地区低层局地大气环流的气候特征研究^{*}

曾佩生^{1,2} 朱 蓉³ 范广洲¹ 李泽椿² 王月冬²

¹ 成都信息工程大学, 成都 610225

² 国家气象中心, 北京 100081

³ 国家气候中心, 北京 100081

提 要: 本文采用 2007—2016 年的中尺度数值模拟结果和 15 个地面气象站观测资料, 定义了局地风场表征风速, 研究京津冀平原地区局地大气环流日变化的气候特征, 并对区域大气污染及其输送的影响进行分析。此外, 对 2016 年 12 月 30 日至 2017 年 1 月 7 日北京地区跨年大气重污染过程进行了个例分析。得到结论: 京津冀平原地区低空风场变化是天气系统与局地大气环流共同作用的结果, 山谷风环流致使太行山和燕山沿线平原地区大气边界层内的长年主导风向为偏北和偏南; 太行山和燕山沿线地区山谷风环流本身呈顺时针旋转的日变化特征, 夜间至早晨谷风转向山风, 午后至夜间山风转向谷风; 在午后谷风向山风转向期间, 容易形成沿太行山东麓和燕山南麓、自南向东北的“弓形”气流输送通道, 此气流输送通道在 1 月于 21 时左右形成, 持续时间大约 3 h, 在 7 月于 18 时左右形成, 持续时间可达 9 h; 冬季午后至晚间盛行谷风时, 受山体的阻挡, 污染物容易在山前累积, 导致污染浓度增高; 夏季同样的情况会发生在后半夜。

关键词: 局地风场表征风速, 山谷风环流, 中尺度数值模拟, 大气污染输送

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.008

Study on Climatic Characteristics of Local Circulation in the Lower Atmosphere in Beijing-Tianjin-Hebei Region

ZENG Peisheng^{1,2} ZHU Rong³ FAN Guangzhou¹ LI Zechun² WANG Yuedong²

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² National Meteorological Centre, Beijing 100081

³ National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on mesoscale numerical simulation data and 15 surface meteorological observation data from 2007 to 2016, characterizing wind speed of local wind field is defined and the climatic characteristics of the diurnal variation of the local circulation in the Beijing-Tianjin-Hebei Region are analyzed. Also, the influence of air pollution and transportation in this area are analyzed. In addition, the atmospheric heavy pollution process in Beijing Area from 30 December 2016 to 7 January 2017 is studied. The conclusions are as follows. The change of the lower wind field in the Beijing-Tianjin-Hebei Region is the consequence of the interaction between the atmospheric circulation and the diurnal variation of the local wind fields. The mountain-valley breeze causes the prevailing wind in the atmospheric boundary layer along the plains of Taihang Mountain and Yanshan Mountain to blow by north and south. The daily variation of the mountain-valley breeze of the Beijing-Tianjin-Hebei Region has the characteristics of clockwise changes, which

^{*} 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0302)资助

2018 年 1 月 22 日收稿; 2018 年 5 月 16 日收修定稿

第一作者: 曾佩生, 主要从事风能资源的数值模拟研究. Email: 250205219@qq.com

通信作者: 朱蓉, 主要从事风能资源数值模拟与预报和城市空气污染数值预报的研究. Email: rongzhu@cma.gov.cn

means that valley wind turns to mountain wind over night to morning and mountain wind turns to valley wind from afternoon to night. During the turning in the afternoon from valley wind to mountain wind, the “bow” airflow passage from southwest to northeast along east side of the Taihang Mountain and southern side of the Yanshan Mountain is easy to form. This airflow channel is formed at about 21:00 BT January, lasting about 3 h, and in July, it forms at about 18:00 BT lasting about 9 h. During the winter afternoon to the evening, valley wind is very strong, making pollutants accumulate easily in front of mountains by the barrier of the mountain and causing the pollution concentration to increase. The same situation occurs in summer after midnight.

Key words: characterizing wind speed of local wind field, mountain-valley breeze circulation, mesoscale numerical simulation, air pollutant transport

引 言

认清京津冀及周边地区大气重污染的天气气候成因,是制定大气污染防治措施、确保完成《大气污染防治行动计划》预期目标的关键。京津冀地区地形复杂,北面有燕山,西面有太行山,其山顶海拔高度均达 1000~1500 m,且地势陡峭,成为京津冀平原地区的天然屏障,使京津冀平原地区具有独特的局地大气环流特征。近几年,京津冀地区秋冬季频频出现持续时间较长的重污染天气过程,地处太行山沿线的邯郸、邢台、石家庄和保定尤为严重。已有很多观测表明,在京津冀大气重污染发生期间,会出现一条沿太行山东麓和燕山南麓、自南向东北的“弓形”大气污染物输送通道。因此,为了提高对京津冀地区大气污染气象条件的预报能力,有必要对京津冀地区与大气污染扩散紧密相关的低空局地风场特征和变化规律进行深入的研究。

本世纪初以来,有关京津冀地区城市大气污染与低空风场变化关系的研究在不断增加。任阵海等(2004)根据 3 台激光雷达阵观测和地面同步粒子观测数据,对北京地区一次重污染过程进行了情景分析,指出京津冀地区存在两条大气输送带:一条位于燕山南麓,另一条位于河北太行山东麓;由此推断,要改善北京市空气质量,必须治理两条输送汇所涉及地区的大气污染排放。徐祥德等(2004;2005)综合分析北京城市大气环境现场观测试验资料和 MODIS 卫星探测资料,发现北京城市重污染过程与南部周边城市群排放源的相关显著,北京周边向南开口的“马蹄型”地形可能导致周边远距离输送污染物“滞留”效应,形成北京与南部周边排放源近似南北向带状影响域。杨旭等(2017)利用 T-mode 主

成分分析法建立了 2013—2015 年京津冀地区冬季 9 种天气类型,其中以高压场、高压后部、鞍型场和冷锋前部等为代表的污染天气类型,多表现出高湿小风,稳定能量大,最大混合层厚度低等特点,因而不利于污染物扩散;污染过程期间的偏南风输送使得北部城市污染物浓度迅速升高。刘树华等(2008;2009)使用非静力中尺度模式 MM5 对京津冀地区复杂的山谷风、海陆风环流和城市热岛环流的耦合作用进行模拟研究分析,从 2006 年下半年和 2007 年上半年的 4 个季节中各自选取一段时间进行模拟,对京津冀地区的海陆风和山谷—平原风场的变化规律进行了讨论。结果表明,在弱天气系统控制下,京津冀地区大气边界层中可同时存在海陆风、山谷风和“城市热岛”环流,并具有明显的日变化特征,这三种环流的耦合在该地区西北部山地与平原交接地带形成一条大致沿地形等高线走向的风场辐合带,这条水平辐合带几乎长年存在。王自发等(2008)利用空气质量预报模式系统(NAQPMS)模拟了 2006 年 8 月北京及周边地区臭氧污染情况,并采用质量追踪法计算得到:来自保定的污染输送对北京影响最大,对北京市区和远郊的最大贡献率分别达到 28.1%和 59.5%。Miao et al(2015a;2015b;2015c;2016;2017a;2017b)应用数值模拟和观测资料分析的方法,对京津冀地区重污染天气的形成机理,及其与污染源排放、天气系统、季节、地理环境和地形作用下的局地大气环流以及大气边界层过程的关系进行了系统研究。游春华等(2006)通过分析 ARPS 模式数值模拟结果和京津冀地区 50 个地面气象站的观测资料,获得了 2004 年 8 月逐时低层大气流场,分析了京津冀地区夏季大气局地环流背景,表明京津冀地区夏季受海陆风、山谷风影响明显,山谷风的影响可覆盖到区域内的平原地区;在这两个

环流的影响下,研究区域主导风向出现更替。董芬等(2013)研究发现,大气污染受风向的转换的影响,有时可造成北京地区污染的“南北两重天”现象。马小会等(2017)采用北京的地面和高空观测资料,以及逐日大气成分监测数据,对2008年1月至2014年12月的重污染天气个例进行了统计分析,发现北京地区出现重污染天气时,500 hPa多为纬向环流,850 hPa为偏南暖平流,底层风速小且湿度大。

已有文献在研究近地层风矢量变化与大气污染的关系时,比较多的是采用对大气污染个例的气象站观测和雷达探测资料的分析(任阵海等,2004;苏福庆等,2004);也有研究采用气象站观测资料对一定范围和一段时间内的风矢量求和,以表示当地空气流动的累积效应(吴兑等,2014);随着数值模拟技术的发展,采用对大气污染个例的数值模拟分析也比较多(刘振鑫等,2012;孙兆彬等,2017; Miao et al, 2015d;何心河等,2016;刘香娥等,2016);刘树华等(2009)采用全年4个季节中各取一天数值模拟结果进行分析,得到京津冀水平风场的季节变化规律,指出京津冀风场辐合带的长年存在。还有研究采用HYSPLIT和CAMx模式直接通过数值模拟分析区域间大气污染物相互输送的贡献量(安俊岭等,2012,王喜全等,2011)。

迄今为止,已有的研究基本是采用对典型天气过程或典型时段的观测资料分析或数值模拟,更关注京津冀的环渤海经济区。本文考虑到京津冀南部大气重污染出现频率更高的特点,拟采用2007—2016年中尺度数值模拟数据和京津冀及周边地区的15个地面气象站观测资料,定义局地风场表征风速,分析局地大气环流的长期变化规律,重新认识京津冀平原地区局地风场的气候特征,尤其是太行山东麓和燕山南麓的“弓形”气流辐合带的成因,及其在大气重污染过程中的作用。

1 资料选取和研究方法

本文使用中国气象局风能资源数据库中的中尺度数值模式WRF(Weather Research and Forecast Model)近10年(2007—2016年)数值模拟数据,该数据由全球大气环流模式再分析资料CFSR提供初始场和边界条件,WRF模式设置及物理过程参数化方案选项如表1。WRF模式的数值模拟采用两重网络嵌套,网格距分别为45、15 km(图1)。其

中,第一重网格覆盖东亚大陆和周围海域;第二重网格覆盖整个中国。模式垂直方向分为36层,模式顶高50 hPa。数值模拟计算结果逐小时输出。

此外,本文选用了2007—2016年华北平原上北京、天津、唐山、石家庄、保定、邢台、邯郸、南宫(代表衡水)、沧州、以及河南安阳、濮阳、新乡、山东德州、济南、东营共15个地面气象站(图2)的逐小时观测资料和中国环境监测总站的逐小时空气质量指数(AQI)监测值,统计分析京津冀平原及周边地区的低空局地大气环流特征,并对大气重污染个例进行分析。

为了研究京津冀平原地区低空局地大气环流的气候特征,本文对近10年(2007—2016年)WRF的数值模拟数据进行如下处理:第一步,计算选定高度层上每个网格点的水平风速日平均值 $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$;第二

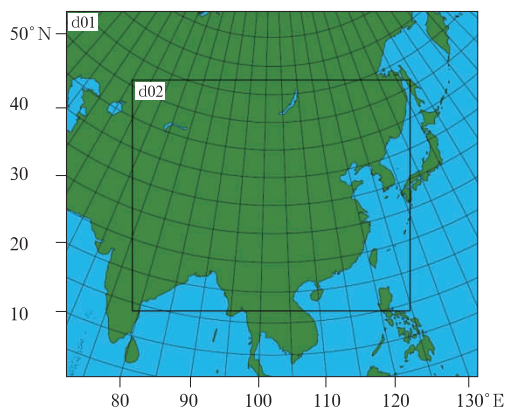


图1 WRF数值模拟的计算区域

Fig. 1 The domains used in WRF

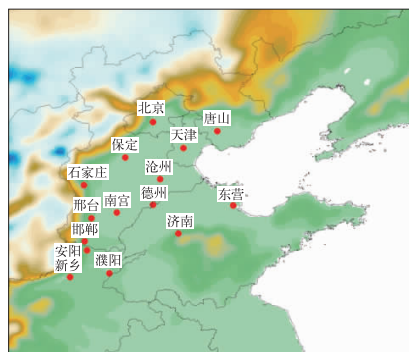


图2 京津冀平原及周边地区
15个气象站分布

Fig. 2 Distribution of 15 meteorological
stations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region
and surrounding areas

表 1 WRF 模式设置及物理过程参数化选项

Table 1 Settings and selection of physics options in WRF model

模式嵌套层	分辨率/km	网格数	微物理过程	陆面过程	行星边界层	积云对流	长波辐射	短波辐射
1	45	180×160	Thompson	Noah	MYJ	Fain-Kitsch	RRTM	Ludhiana
2	15	361×301	WSM6	Noah	ACM2	Fain-Kitsch	RRTM	Ludhiana

步,用逐小时水平风速 u 和 v 减去对应的日平均风速 $\bar{u}, \bar{v}$, 得到可以体现日变化的逐小时风速距平值 u', v' ; 第三步, 逐一求出全天 24 h 的逐小时风速距平的 10 年平均值 $\bar{u}'$ 和 $\bar{v}'$ 。逐小时风速距平的 10 年平均值 $\bar{u}'$ 和 $\bar{v}'$ 可以体现低空局地风场的日变化特征。本文为论述方便起见, 将逐小时风速距平的 10 年平均值 $\bar{u}'$ 和 $\bar{v}'$ 合成后的矢量风速, 称为局地风场表征风速。采用气象站观测资料分析低空局地风场气候特征时, 也采用同样的分析方法。

2 低层局地大气环流的气候特征

2.1 低层风场的气候特征

为了解京津冀平原地区低空局地风场的气候特征, 首先采用京津冀及周边地区 15 个气象站的近

10 年(2007—2016 年)地面观测资料进行分析, 图 3 分别为北京、天津、保定、石家庄、邢台和南宫(代表衡水市)全年和秋冬季(当年 10 月至次年 2 月)风向玫瑰图(其他站点略)。可以看出, 北京和保定位于太行山与燕山的连接处, 太行山北段和燕山山脉均为西南—东北走向, 北京和保定气象站长年观测的主导风向为偏西南风和偏北风, 与山脉走向基本一致, 秋冬季西北风向频率有所增加; 天津的主导风向为偏西风 and 偏东风, 这可能是山谷环流与海陆风环流综合作用的结果, 秋冬季西北风向频率也明显增加; 沿太行山南段沿线城市石家庄、邢台和衡水(南宫)的主导风向为偏北风和偏南风, 与太行山南段的山脉走向基本一致, 石家庄市秋冬季西北风向频率明显增加。由此可见, 除天津以外, 所有气象站全年和秋冬季的主导风向均与山脉走向一直; 除南宫以外, 秋冬季西北风向频率均有所增加。可以初

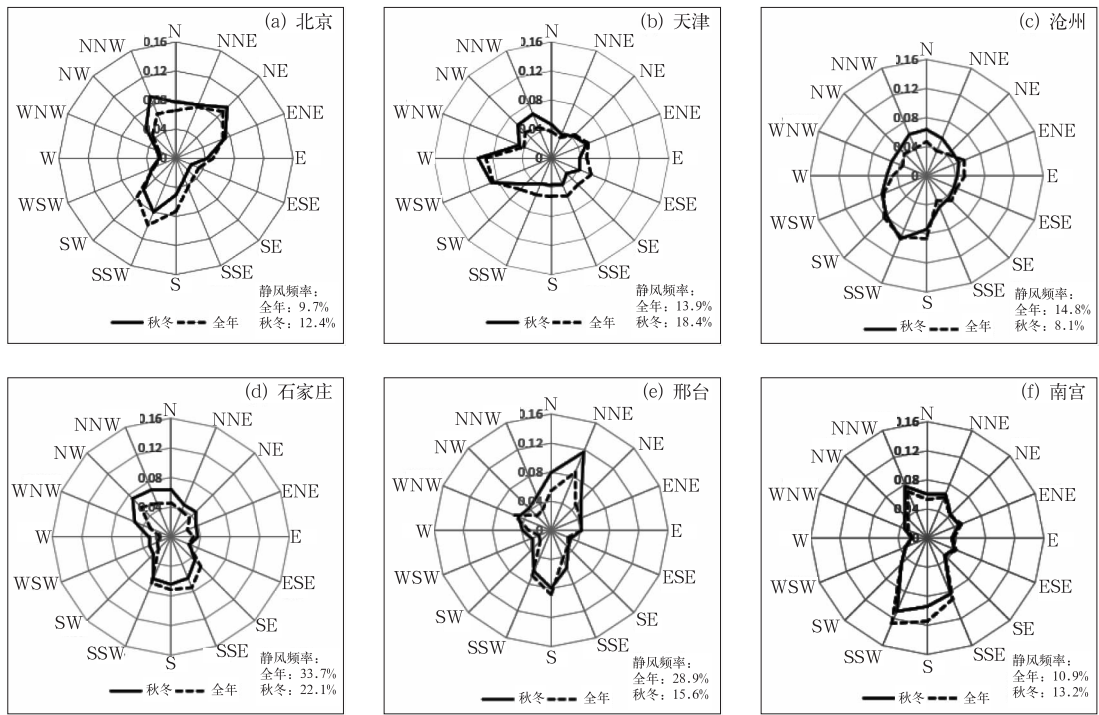


图 3 2007—2016 年基于气象站(a~f)观测资料的 10 年秋冬季(实线)和全年(虚线)10 m 高度风向玫瑰图

Fig. 3 Wind rose diagram of autumn and winter wind and annual wind at 10 m height based on observational data in meteorological stations (a—f) from 2007 to 2016

步判断,京津冀平原上北京及以南地区主要受山谷风局地风场影响,秋冬季的冷空气活动造成了西北风向频率增加。

太行山东麓和燕山南麓的山体坡度较大,容易形成背风“死水”区,北京、保定、石家庄、邢台等燕山、太行山沿线城市的地面风速会因此而偏小。石家庄和邢台的全年静风频率达到9%和3%,风速小于或等于 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的小风风速频率分别为25%和26%。为了深入了解京津冀南部平原地区地面大气污染输送的气候特征,在近10年的风速地面观测资料中,剔除风速 $<1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据后,绘制全年和秋冬季的风向玫瑰图(图4)。可以看出,无论是在全年还是秋冬季,太行山北段与燕山连接处的北京和保定地区的主导风向依然是西南和东北,与山脉走向一致;太行山南段沿线的石家庄、邢台、南宫、安阳、新乡和濮阳的主导风向依然是偏南和偏北、与山脉走向一致。

在大气重污染频发的采暖季(11月至次年2月),小风和静风出现频率最高的是石家庄,达到42%;最低的是河南新乡,达到20%。保定气象站小风和静风出现频率34%;偏南风频率12%、平均风速为 $1.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;偏北风频率为12%、平均风速为 $2.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。邢台气象站小风和静风出现频率34%;偏南风频率为13%、平均风速为 $2.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;偏北风频率为18%、平均风速为 $3.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。燕山和太行山沿线城市的静风和小风频率高,说明这一地区采暖季的大气通风扩散条件较差,如果大气污染物过度排放,容易引起污染物局地累积、导致重

污染过程发生。此外,主导风向与山脉走向一致,太行山和燕山沿线城市之间就具有相互输送大气污染物的条件。

为了解太行山和燕山沿线地区不同高度上的风速空间分布规律,本文采用WRF模式近10年(2007—2016年)数值模拟数据,分析了燕山和太行山沿线城市北京、保定、石家庄、邢台以及衡水的风向频率分布(图5)。从图5不难发现,100 m高度上各城市的风向频率分布与山脉走向高度相关,如保定主导风向西南和东北、石家庄主导风向西北西和东南,都是沿着其左侧的山脉走向;邢台和衡水除了太行山走向的主风向以外,偏西风频率也较高,推断是山谷风的作用;北京被燕山包围成一个向东南开口的“马蹄型”,因此100 m高度上主导风向是南风 and 东北风。在达到太行山和燕山顶部左右的1500 m高度上,除石家庄以外,其他城市的风向频率分布都非常相似,东南、东和东北的风向频率明显增加,不再与地形走向相关。此外,从10、500和1500 m不同高度层的年平均风速分布(图6)可以看出,在100和500 m高度上,太行山北段东侧的平原地区存在明显的低风速区,这里正好处于西北冷空气经过太行山后形成的背风“死水”区;高度上升到1500 m时,太行山南段东侧和南侧平原上空的风速相对较低,就是说太行山对西北冷空气活动的影响也还存在。综上所述,太行山和燕山的地形阻挡作用,使京津冀平原1500 m以下的风场分布特征较其上层有很大的差别。

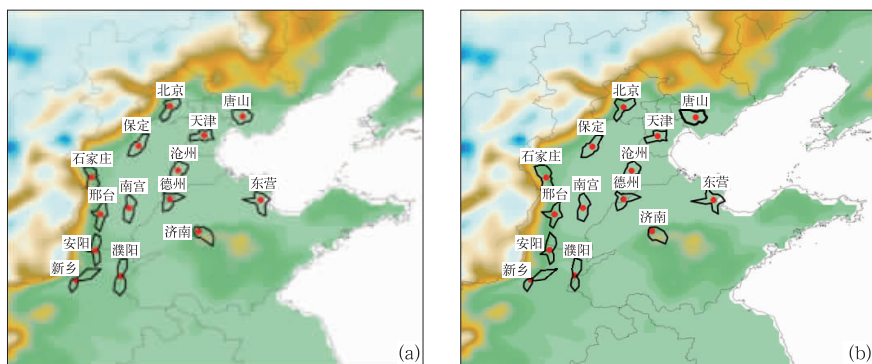


图4 15个站点风速 $>1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风向玫瑰图

(a)全年平均,(b)秋冬季

Fig. 4 Wind roses of wind speeds $>1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 15 stations

(a) annual, (b) autumn and winter

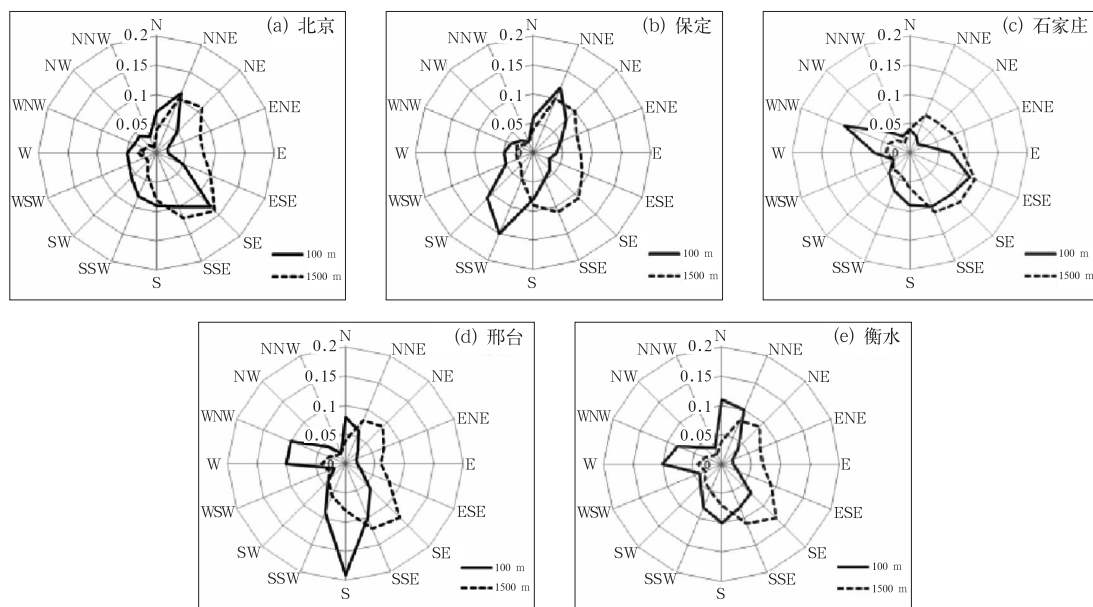


图 5 2007—2016 年 WRF 数值模拟的不同城市(a~e)100 和 1500 m 高度上风向频率分布

Fig. 5 Wind roses at 100 m and 1500 m heights in different cities (a—e) by WRF simulation from 2007 to 2016

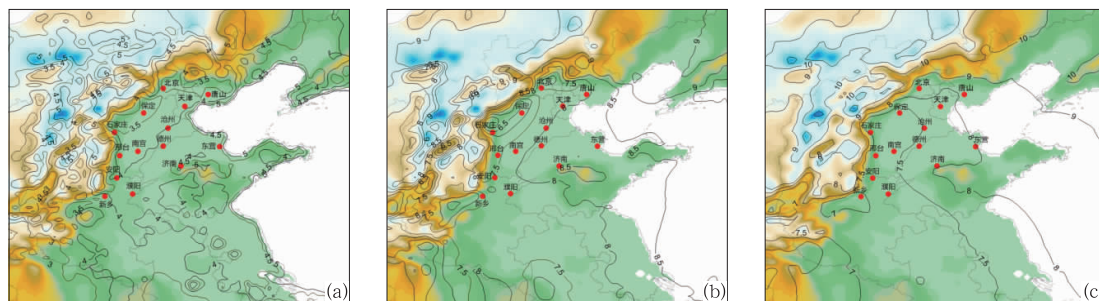


图 6 WRF 数值模拟的不同高度上 10 年平均风速分布

(a)10 m, (b)500 m, (c)1500 m

Fig. 6 The 10 year mean wind distribution at different heights based on WRF simulation

(a) 10 m, (b) 500 m, (c) 1500 m

从图 6c 还可以看出,山东西部地区 1500 m 高度上的年平均风速低于 500 m 高度上的年平均风速。为此,分别对邢台和衡水两地 10 年平均风速和温度的垂直分布日变化进行分析(图 7,图 8)。可以看出,白天,温度随高度单调下降,风速随高度单调增加;夜间存在明显的逆温层,在稳定的边界层内平均风速随高度迅速增加,风速最大值出现高度在 300~400 m,之后风速随高度呈减小的变化趋势,在达到大约 1500 m 高度以后,风速随高度呈线性增加;总体平均后的风速仍然在 300~400 m 高度出现最大值。因此,由于大气边界层高度的日变化存在,1500 m 高度上的长年平均风速就有可能比

500 m 高度上的长年平均风速低。

2.2 局地山谷风环流特征

从上述基于气象站观测资料的统计分析可以推断,太行山沿线的局地山谷风环流作用比较明显。为此,以下采用 WRF 近 10 年中尺度数值模拟数据,进一步分析京津冀平原及周边地区的逐小时局地风场表征风速的变化特征。

图 9 是距地面 100 m 高度上 2007—2016 年 1 月间隔 3 h 的平均局地风场表征风速分布。从图中可以看出,京津冀平原地区在山谷风和海陆风的共同作用下,风向呈顺时针旋转的日变化特征。00—

09时,燕山南麓和太行山东麓一直维持着由山体吹向平原的山风,受其影响,京津冀平原地区局地风场表征风速总体是北风,有利于大气污染的扩散;09—12时,太行山东麓迅速转变为由平原吹向山体的谷

风,燕山南麓尚处于山风向谷风的转换中,主要是东南风;15时燕山南麓完全转为谷风;18时,太行山和燕山沿线的平原地区均呈现出非常明显的谷风;21时,太行山和燕山沿线的平原地区出现了一

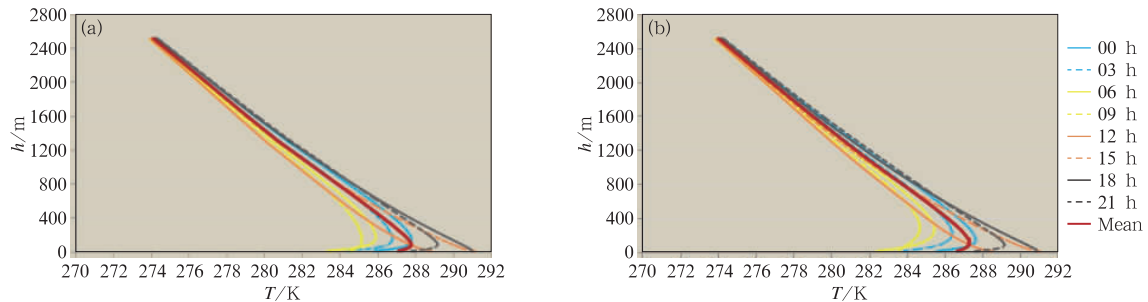


图7 邢台(a)和衡水(b)年平均温度的垂直分布日变化

Fig. 7 Diurnal variation of annual mean temperature in vertical distribution in Xingtai (a) and Hengshui (b)

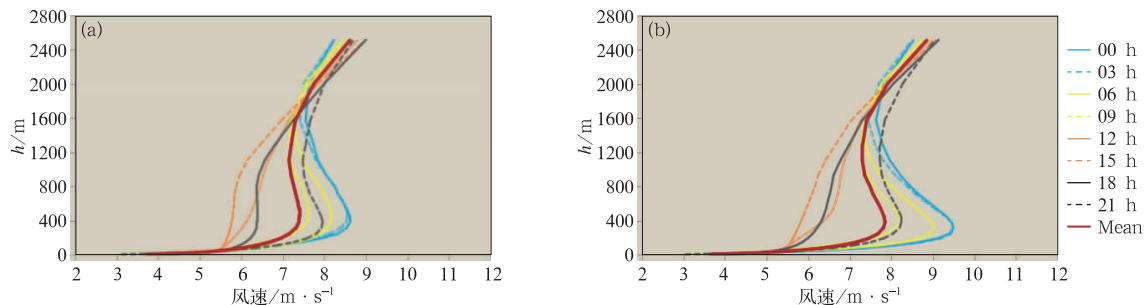


图8 同图7,但为风速

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for wind speed

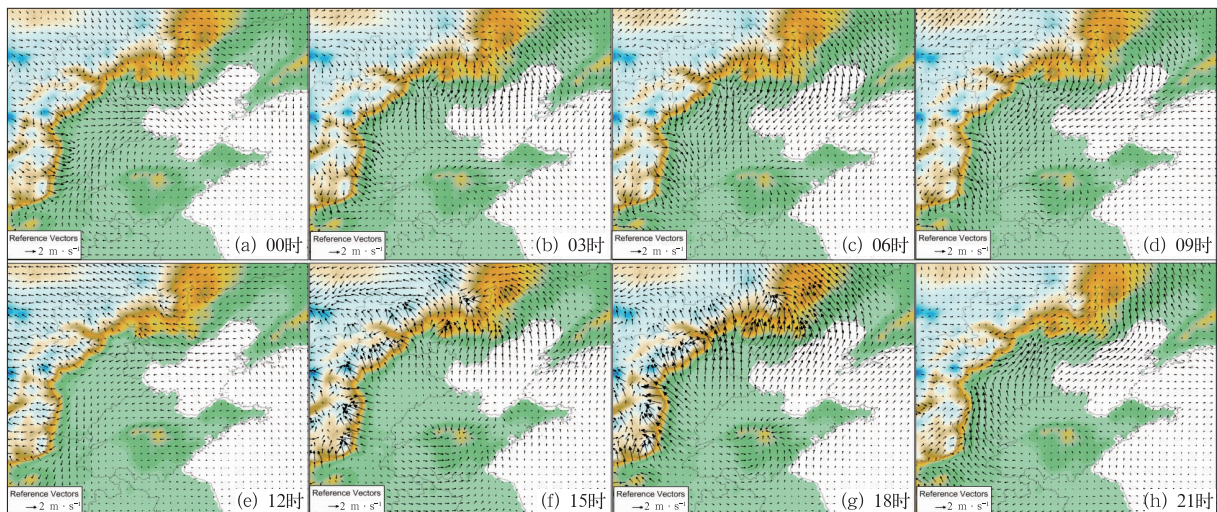


图9 100 m高度上1月不同时刻(00—21时,a~h)的局地风场

表征风速分布的数值模拟分析结果

Fig. 9 Distribution of reference wind of local winds at 100 m height changed every 3 hours (a—h) based on WRF simulation in January

条南起河南安阳、北至唐山的气流输送通道;次日 00 时,谷风又开始顺时针向山风转变。从局地风场表征风速的日变化特征可以得到,冬季 15 时到夜间,由于太行山和燕山顶部的海拔达到 1000~1500 m,且燕山南麓和太行山北麓的坡度均较大,从平原吹向山体的谷风遇山后转向,形成了沿太行山和燕山、从南到东北的“弓形”气流输送通道。因此,京津冀南部城市的大气污染物具有被向北输送的条件。

图 10a~10c 分别是北京、保定和邢台 2000 m 以下 2007—2016 年 1 月逐小时平均局地风场表征风速的变化,可以看出,在 1000 m 以下的各个高度层上都存在明显的山谷风环流,且表现出顺时针转向的变化规律。12 时前后、也是混合层高度达到一天中最高时段,山风向谷风转换,风速相对较小;午后到日落前,混合层高度维持在最高的高度,1000

m 以下各层都是南或东南向的谷风,风速相对较大;日落后到半夜,稳定边界层形成,高度较低,风速变小,风向渐渐由谷风顺时针向山风转变;后半夜至次日 10 时左右,基本上维持北或西北向的山风。由此说明,太行山和燕山沿线平原地区的山谷风环流的影响范围在距地面 1000 m 以内的大气边界层内。

从距地面 100 m 高度上 2007—2016 年 7 月的局地风场表征风速逐小时分布变化(图 11)可以看出,夏季京津冀平原地区近地层的风向变化同样是顺时针旋转的日变化特征;由于夏季海陆风作用加强,局地风场明显表现出山谷风与海陆风的综合作用,整个京津冀及周边平原地区的局地风场表征风速变化同步性非常高;气流输送通道的维持时间与冬季差别较大。03 时(图 11b)太行山东麓和燕山南麓都呈现出明显的山风,与京津冀及周边平原地区

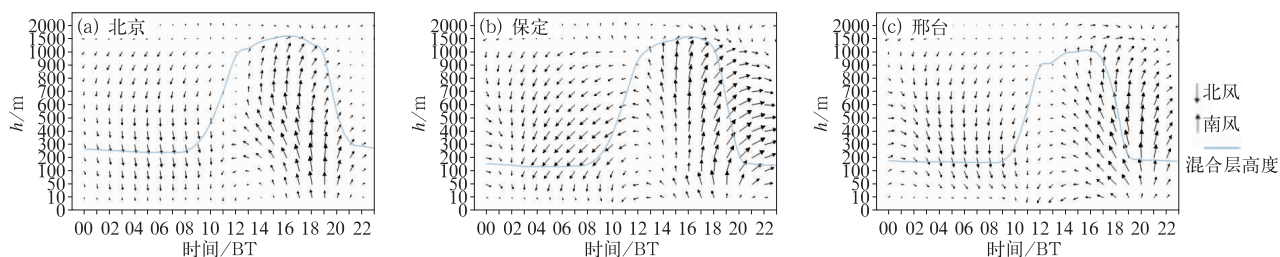


图 10 2007—2016 年 1 月逐小时局地风场表征风速的垂直分布和混合层高度的数值模拟结果

Fig. 10 Vertical distribution of reference wind of local winds and the mixing height changed every hour based on WRF simulation in January from 2007 to 2016

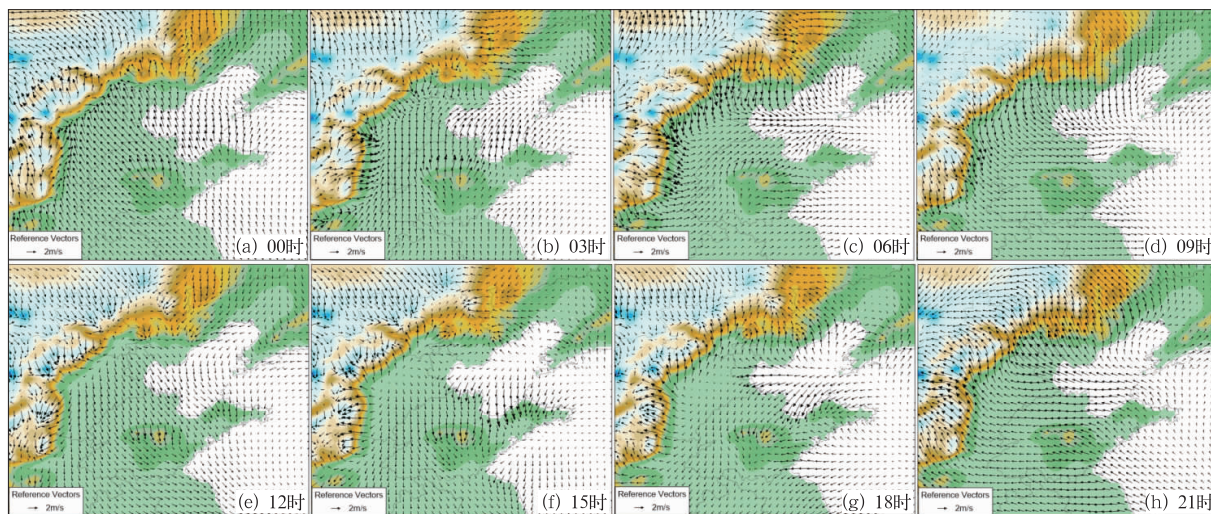


图 11 同图 9, 但为 7 月

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for July

盛行的南风汇聚出一条南起河南安阳、北至河北唐山的一条沿太行山和燕山山脉走向的气流输送通道;之后,风向顺时针逐渐转动,直到15时(图11f)完全转换成谷风;18时(图11g)沿太行山和燕山山脉走向、自南向东北的气流输送通道再次形成,这条通道一直维持到次日03时。

为了验证京津冀平原地区存在的局地风场顺时针转向变化特征的合理性,本文采用2007—2016年地面气象站的观测数据统计分析1月和7月逐小时局地风场表征风速(图12)。从图12可以明显地看出,1月除石家庄以外,北京、保定、邢台、邯郸和河南安阳的局地风场表征风速都具有呈顺时针转向的日变化特征,山谷风变换的时间与数值模拟结果基本一致。石家庄位于太行山南段与北段交界处向西伸进的凹槽中,午后的山风与谷风的转换突然,其他时间的局地风场表征风速变化基本是逆时针转向的,这与图9中相应位置上的风速变化也是一致的。7月,图12中所有气象站的局地风场表征风速的变化非常一致,都具有顺时针转向的日变化特征。

事实上,京津冀地区低空大气环流运动是天气背景与局地风场叠加的结果。在高压或均压场等大气稳定天气条件下,山谷风环流就会起主导作用,虽然风向转换的时间与具体天气背景条件有关,但由于太行山和燕山沿线地区山谷风环流本身所具有的顺时针转向的内在动力,很容易形成自南向东北的“弓形”气流输送通道,这条气流输送通道在冬季大约持续3 h左右,而在夏季可持续达9 h。此外,冬季午后至晚间盛行谷风时,如果有较高的大气污染排放,由于山体的阻挡,污染物容易在山前累积,因

此污染浓度会增高;夏季同样的情况会发生在后半夜。

2.3 大气重污染过程中局地大气环流作用的个例分析

为了分析太行山和燕山沿线地区局地山谷风环流在大气重污染天气过程中的作用,本文选取了2016年12月30日至2017年1月7日北京地区的跨年度大气重污染个例进行研究。造成此次大气重污染的天气形势主要是:京津冀地区500 hPa高空图上一直维持着纬向的平直等压线;850 hPa上华东地区有一个高压稳定少动,京津冀地区处于高压的西北部,受均压场控制,高压后部的南风气流可伸展到河北南部,因此河北南部一直有较弱的偏南风;京津冀地区北部850 hPa上有时有浅低压槽活动,势力较弱且持续时间短,不足以彻底清除大气污染物;直到1月7日,500 hPa上有一个低压槽自西向东移动,并不断加强,使北京地区的大气污染物在8日03时得以彻底清除(图13)。

在北京地区大气重污染过程开始之前的12月29日00时,太行山沿线城市邯郸、邢台、石家庄和保定的空气质量均为重度污染,空气质量指数(air quality index, AQI)分别为259、248、299和269;北京和天津空气质量均为优, AQI分别是24和39。29日08时850 hPa上一个高压系统自西北向东南移动,是京津冀南部地区的风向由北风转为南风,造成南部的大气污染物向北输送到保定,成为此次重污染过程的前奏。从03—15时的地面气象站观测风速和城市空气质量监测数据来看,邯郸地面平

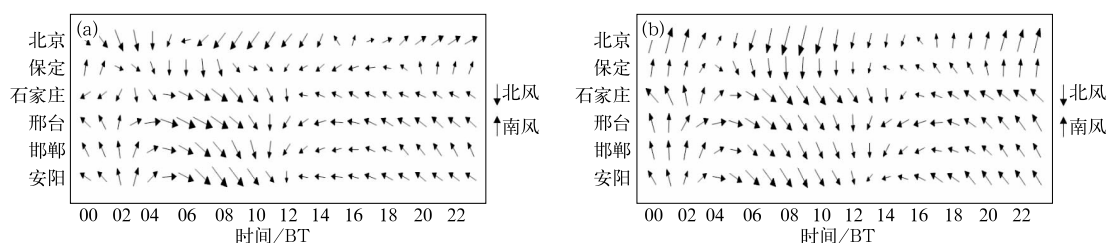


图12 2007—2016年地面气象站观测资料分析得到的1月(a)和7月(b)10 m高度局地风场表征风速的日变化

Fig. 12 Diurnal variation of reference wind of local hourly winds changed at 10 m height in January (a) and July (b) based on the observational data from 2007 to 2016

均风速达 $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, AQI 下降 246, 大气污染物向北输送到邢台; 邢台此时段内的地面平均风速为 $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, AQI 仅下降 77, 因为来自邯郸的污染输送; 保定的 AQI 增加了 130, 空气质量由重污染转差为严重污染, 此时地面平均风速 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 向外输送污染物的能力不强; 北京和天津的 AQI 分别增加 43 和 50, 空气质量由优转为良; 石家庄位于太行山南段与北段的交接处、且向西凹进, 因此偏离了沿太行山从南向北的气流输送通道, 风向

略向西偏转, 因此 AQI 变化不大(图 14, 图 15)。

29 日 17 时至 30 日 00 时, 西北方向 850 hPa 上又一个小高压形成, 京津冀南部平原处于鞍形气压场的控制下, 南风减弱到 $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 邢台和邯郸 AQI 开始增加; 保定由于不再有南来的污染物输送, 但仍然有西南—东北向的局地山谷风环流将本地污染物送出, 尤其是 17—19 时地面风速在 $1.4 \sim 2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 对大气污染物有一定的输送作用, 因此 8 个小时之内 AQI 大幅度降低了 322, 空气质量

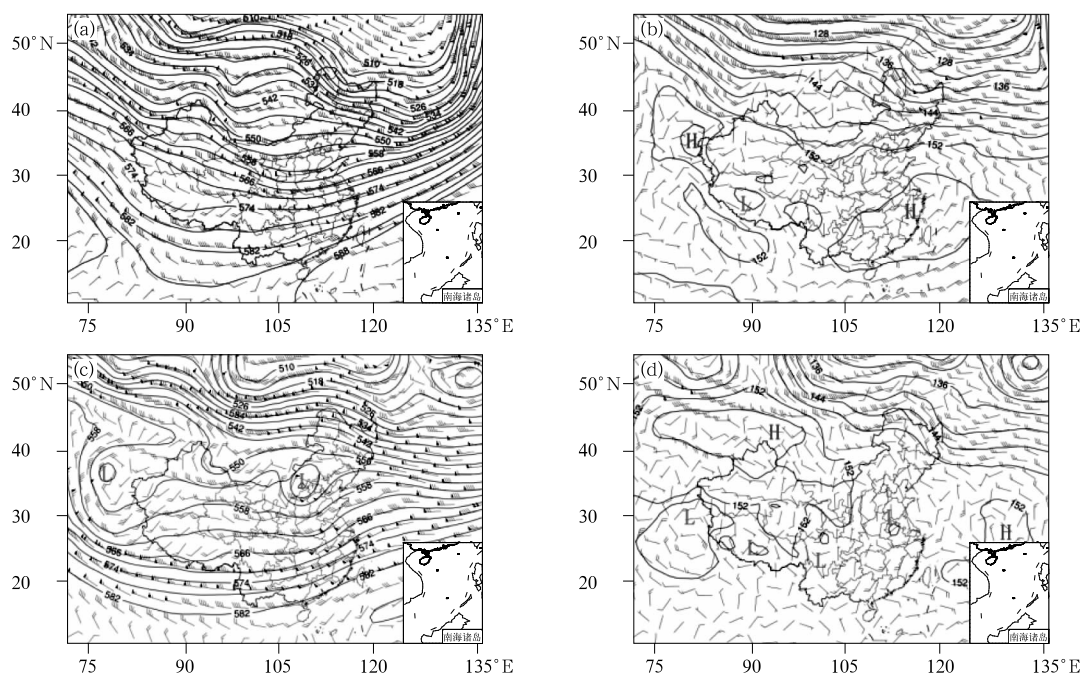


图 13 2016 年 12 月 30 日 08 时(a, b)和 2017 年 1 月 7 日 08 时(c, d)500 hPa(a, c)和 850 hPa(b, d)位势高度场

Fig. 13 The 500 hPa (a, c) and 850 hPa (b, d) geopotential height fields at 08:00 BT 30 December 2016 (a, b) and 08:00 BT 7 January 2017 (c, d)

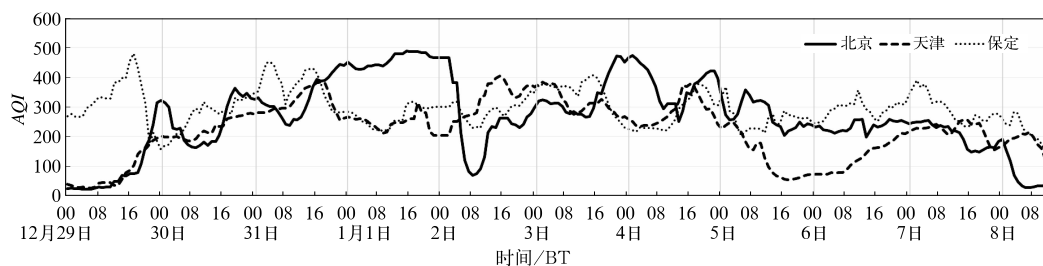


图 14 2016 年 12 月 29 日至 2017 年 1 月 8 日京津冀地区大气重污染过程中北京、天津和保定的逐小时空气质量指数变化

Fig. 14 Hourly variation of AQI in Beijing, Tianjin and Baoding during the process of air heavy pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 29 December 2016 to 8 January 2017

由严重污染缓解到中度污染;北京在此期间由于来自保定的污染物输送和谷风转为山风,使大气污染物在燕山南侧汇集,加之日落后大气稳定边界层形成、混合层高度较低,导致了不利扩散条件,最终AQI由75迅速升至322,空气质量由良好跃变为严重污染,北京地区跨年度大气重污染过程由此开始。

在此次京津冀地区大气重污染过程中,12月30—31日和1月3—4日明显地表现出高压控制下大气稳定的天气背景条件与局地山谷风环流的综合效应(图16)。12月30—31日和1月3日的局地环流特征类似,受850 hPa华东地区高压后部向北输送的气流影响,河北南部和中部一直维持着较弱的南风。夜间到早晨大约08时,太行山北段沿线西北风向的山风与京津冀平原上的南风气流形成对势,在河北中部平原造成空气停滞区,使大气污染物在

山前平原聚集,保定和石家庄AQI增加;北京地区周边顺“马蹄型”山地而下的山风,在北京与天津的交界地带形成空气滞留区,因此北京地区AQI下降,天津AQI上升。午后至夜间,山风转为谷风,与河北中部和南部原有南风气流汇合,使京津冀平原全部盛行偏南风;如此造成了大气污染物在山前堆积,沿太行山和燕山的城市北京、保定、石家庄、邢台的AQI均呈上升的变化趋势。1月4日夜间到早晨,850 hPa上京津冀地区受均压场控制,平原地区以静风为主,北京、保定、邢台和邯郸在山风的作用下,空气质量均有好转;午后受东北方向低压槽的影响,京津冀平原地区以东风和东北风为主,加上沿太行山和燕山的山风顺时针转向谷风,形成了自东北向西南沿山脉走向的气流通道,北京和石家庄均由于周边“马蹄型”地形使气流灌入,因此AQI增加,

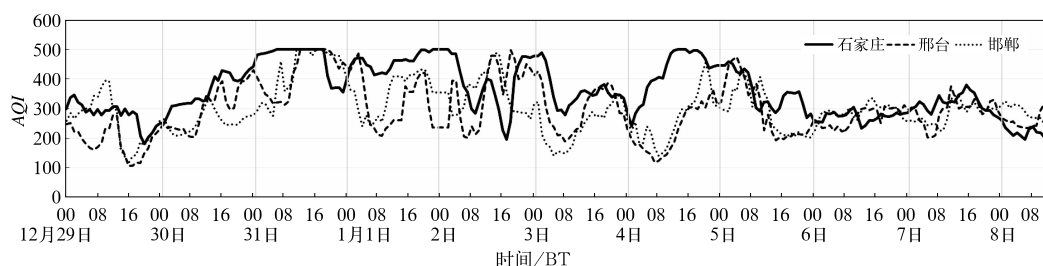


图15 同图14,但为石家庄、邢台和邯郸

Fig. 15 Same as Fig. 14, but for Shijiazhuang, Xingtai and Handan

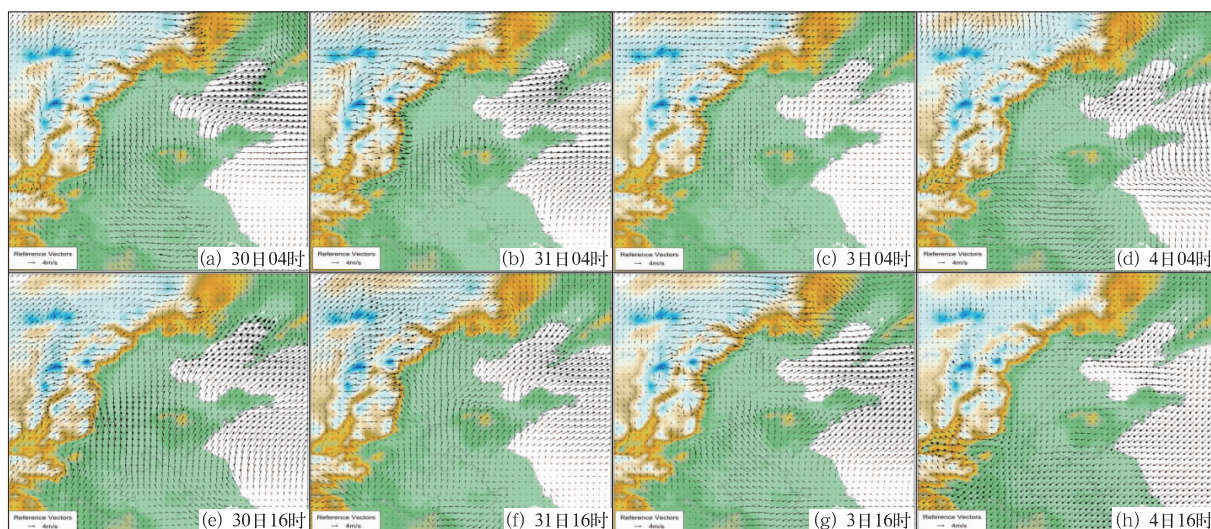


图16 2016年12月30日04时至2017年1月4日16时(a~h)100 m高度上数值模拟风场

Fig. 16 Simulated wind fields at 100 m height from 04:00 BT 30 December 2016 to 16:00 BT 4 January 2017 (a—h)

而保定和天津 AQI 都有小幅降低,邯郸 AQI 由于邢台大气污染物随气流的输入而有所增加。综上所述,12 月 30—31 日和 1 月 3—4 日,北京地区在山谷环流和混合层高度日变化的共同作用下,夜间到早上 AQI 下降,午后到晚上 AQI 增加,这个变化幅度可以达到 150~200。事实上,这其中还包括排放源强的变化,凌晨以及傍晚至夜间供暖污染排放会增加,日间供暖会降低,上下班时间交通污染排放增加等等。

通过对 2016 年 12 月 30 日至 2017 年 1 月 7 日北京地区跨年重污染个例的分析表明,在均压场控制的天气形势下,北京地区的山谷风环流作用使空气质量在夜间到早晨有所好转、午后又重新转差。此外,午后在山风转向谷风的过程中,容易在太行山南段的东麓处形成南北向的气流辐合带,在太行山北段和燕山东南侧形成西南—东北走向的气流辐合带。在这样的局地山谷风环流作用下,发现保定向北京、北京向天津有大气污染输送,邢台与邯郸之间有大气污染输送。

3 结论与讨论

本文采用 2007—2016 年中国气象局风能资源数据库中的中尺度数值模拟数据和京津冀及周边地区 15 个地面气象站的观测资料,定义了局地风场表征风速,用以研究在太行山和燕山山谷风环流日变化影响下的京津冀地区局地风场的气候特征,分析其可能对区域内大气污染输送的影响。通过对

2016 年 12 月 30 日至 2017 年 1 月 7 日北京地区跨年大气重污染个例的分析,研究京津冀地区天气系统与局地山谷风环流的综合作用对城市大气污染的影响。得到结论如下:

(1) 京津冀平原地区的低层大气运动取决于天气系统和局地大气环流的共同作用。太行山和燕山沿线地区受山谷风环流的影响,地面至 1 km 高度的大气边界层内长年盛行偏北风和偏南风。

(2) 太行山和燕山沿线局地山谷风环流本身呈顺时针转动的日变化特征(图 17),夜间至早晨谷风转向山风,午后至夜间山风转向谷风;冬季午后至晚间盛行谷风时,受山体的阻挡,污染物容易在山前累积,导致污染浓度增高;夏季同样的情况会发生在后半夜。

(3) 在谷风转为山风的阶段,容易形成沿太行山东麓和燕山南麓、自南向东北的“弓形”气流输送通道。1 月“弓形”气流通道于 21 时左右形成,持续时间约 3 h(图 17),12 时虽然从太行山和燕山沿线的风向上看有一致的偏南风,但是风速很小,不足以构成气流通道;7 月“弓形”气流通道于 18 时左右形成,持续时间约 9 h。

由于太行山和燕山沿线平原地区经常有气流辐合带和自南向东北的“弓形”气流输送通道出现,容易使大气污染物在山前堆积,或将河北南部的大气污染物向北输送。因此,加强太行山和燕山沿线城市的大气污染治理和排放源监测、合理规划大气污染源布局,是京津冀地区大气污染防治的关键措施之一。

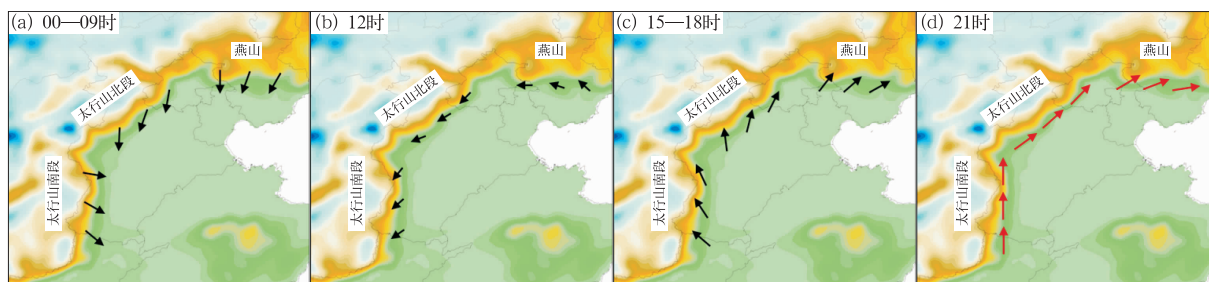


图 17 京津冀山谷风环流顺时针转动日变化和冬季“弓形”气流输送通道形成的概念图

Fig. 17 Conceptual map of clockwise rotation of the valley wind and the formation of a “bow shaped” airflow channel in winter in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

参考文献

- 安俊岭,李健,张伟,等,2012.京津冀污染物跨界输送通量模拟[J].环境科学学报,32(11):2684-2692. An J L, Li J, Zhang W, et al, 2012. Simulation of transboundary transport fluxes of air pollutants among Beijing, Tianjin, and Hebei Province of China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(11):2684-2692(in Chinese).
- 董芬,王喜全,王自发,等,2013.北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象.气候与环境研究,18(1):63-70. Dong F, Wang X Q, Wang Z F, et al, 2013. A study of the north-south differences of the air quality in Beijing[J]. Climatic Environ Res, 18(1):63-70(in Chinese).
- 何心河,马建中,徐敬,等,2016.2014年10月京津冀地区一次PM_{2.5}污染过程的数值模拟[J].气象,42(7):827-837. He X H, Ma J Z, Xu J, et al, 2016. Simulation of a heavy PM_{2.5} pollution event over Beijing-Tianjin-Hebei Region in October 2014[J]. Meteor Mon, 42(7):827-837(in Chinese).
- 刘树华,刘振鑫,李炬,等,2009.京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟[J].中国科学:地球科学,39(1):88-98. Liu S H, Liu Z X, Li J, et al, 2009. Numerical simulation for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei Province[J]. Sci China: Earth Sci, 39(1):88-98(in Chinese).
- 刘树华,刘振鑫,马雁军,等,2008.京津冀地区局地大气环流耦合效应与区域可持续发展的战略思考[J].前沿科学,2(4):61-74. Liu S H, Liu Z X, Ma Y J, et al, 2008. Strategic thinking of sustainability for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei Province[J]. Frontier Sci, 2(4):61-74(in Chinese).
- 刘香娥,何晖,贾星灿,等,2016.北京一次污染天气过程特征的数值模拟[J].气象,42(9):1096-1104. Liu X E, He H, Jia X C, et al, 2016. Numerical simulation of a pollution event in Beijing[J]. Meteor Mon, 42(9):1096-1104(in Chinese).
- 刘振鑫,刘树华,胡非,等,2012. MM5 和 WRF 对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究[J].中国科学:地球科学,42(2):301-312. Liu Z X, Liu S H, Hu F, et al, 2012. A comparison study of the simulation accuracy between WRF and MM5 in simulating local atmospheric circulations over Greater Beijing[J]. Sci China: Earth Sci, 42(2):301-312(in Chinese).
- 马小会,廖晓农,唐宜西,等,2017.北京地区重空气污染天气分型及个例分析[J].气象与环境学报,33(5):53-60. Ma X H, Liao X N, Tang Y X, et al, 2017. Weather pattern and case analysis of air heavy pollution days in Beijing[J]. J Meteor Environ, 33(5):53-60(in Chinese).
- 任阵海,万本太,虞统,等,2004.不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送[J].环境科学研究,17(1):7-13. Ren Z H, Wan B T, Yu T, et al, 2004. Influence of weather system of different scales on pollution boundary layer and the transport in horizontal current field[J]. Res Environ Sci, 17(1):7-13(in Chinese).
- 苏福庆,高庆先,张志刚,等,2004.北京边界层外来污染物输送通道[J].环境科学研究,17(1):26-29. Su F Q, Gao Q X, Zhang Z G, et al, 2004. Transport pathways of pollutants from outside in atmosphere boundary layer[J]. Res Environ Sci, 17(1):26-29(in Chinese).
- 孙兆彬,李梓铭,廖晓农,等,2017.北京大气热力和动力结构对污染物输送和扩散条件的影响[J].中国环境科学,37(5):1693-1705. Sun Z B, Li Z M, Liao X N, et al, 2017. Influence of Beijing atmospheric thermal and dynamics structure on pollutants transport and diffusion conditions[J]. China Environ Sci, 37(5):1693-1705(in Chinese).
- 吴兑,廖碧婷,吴蒙,等,2014.环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J].环境科学学报,34(1):1-11. Wu D, Liao B T, Wu M, et al, 2014. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(1):1-11(in Chinese).
- 王喜全,杨婷,王自发,2011.灰霾污染的跨控制区影响——一次京津冀与东北区域灰霾污染个案分析[J].气候与环境研究,16(6):690-696. Wang X Q, Yang T, Wang Z F, 2011. Impact of dust-haze episode from one air pollution control region to the other-one case study[J]. Climatic Environ Res, 16(6):690-696(in Chinese).
- 王自发,李丽娜,吴其重,等,2008.区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究[J].自然杂志,30(4):194-198. Wang Z F, Li L N, Wu Q Z, et al, 2008. Simulation of the impacts of regional transport on summer ozone levels over Beijing[J]. Chin J Nat, 30(4):194-198(in Chinese).
- 徐祥德,周丽,周秀骥,2004.城市环境大气重污染过程周边源影响域[J].中国科学:地球科学,34(10):958-966. Xu X D, Zhou L, Zhou X Q, 2004. Influencing domain of peripheral sources in the urban heavy pollution process of Beijing[J]. Sci China: Earth Sci, 34(10):958-966(in Chinese).
- 徐祥德,周秀骥,施晓晖,2005.城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征[J].中国科学:地球科学,35(S1):1-19. Xu X D, Zhou X J, Shi X H, 2005. Spatial structure and scale feature of the atmospheric pollution source impact of city agglomeration[J]. Sci China: Earth Sci, 35(S1):1-19(in Chinese).
- 杨旭,张小玲,康延臻,等,2017.京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J].中国环境科学,37(9):3201-3209. Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, et al, 2017. Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei Region during winter[J]. China Environ Sci, 37(9):3201-3209(in Chinese).
- 游春华,蔡旭辉,宋宇,等,2006.京津地区夏季大气局地环流背景研究[J].北京大学学报(自然科学版),42(6):779-783. You C H, Cai X H, Song Y, et al, 2006. Local atmospheric circulations over Beijing-Tianjin Area in summer[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 42(6):779-783(in Chinese).

- Miao Y C, Hu X M, Liu S H, et al, 2015a. Seasonal variation of local atmospheric circulations and boundary layer structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region and implications for air quality[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 7(4):1602-1626.
- Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al, 2015b. Numerical study of the effects of local atmospheric circulations on a pollution event over Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. *J Environ Sci*, 30(4):9-20.
- Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al, 2015c. Numerical study of the effects of planetary boundary layer structure on the pollutant dispersion within built-up areas[J]. *J Environ Sci*, 32:168-179.
- Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al, 2015d. Numerical study of the effects of topography and urbanization on the local atmospheric circulations over the Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. *Adv Meteor*, 2015:397070, DOI:10.1155/2015/397070.
- Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al, 2016. Modeling the feedback between aerosol and boundary layer processes: a case study in Beijing, China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 23(4):3342-3357.
- Miao Y C, Guo J P, Liu S H, et al, 2017a. Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their association with boundary layer structure affecting aerosol pollution[J]. *Atmos Chem Phys*, 17(4):3097-3110.
- Miao Y C, Guo J P, Liu S H, et al, 2017b. Relay transport of aerosols to Beijing-Tianjin-Hebei Region by multi-scale atmospheric circulations[J]. *Atmos Environ*, 165:35-45.