ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

中国期刊方阵

中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第6期
2017年6月15日

目 次

北京山谷风环流特征分析及其对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响

董群[1,2], 赵普生[2,3*], 王迎春[4*], 苗世光[2], 高健[5]

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 3. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 4. 北京市气象局, 北京 100089; 5. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 利用北京地区 2013 ~ 2015 年秋冬季各自动站气象要素数据、大气所铁塔资料以及海淀气象站风廓线数据和该地区 $PM_{2.5}$ 浓度数据,挑选典型个例分析山谷风环流特征及其对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响. 经过分析发现,谷风(山风)平均风速为 0.55 $m \cdot s^{-1}$ (0.31 $m \cdot s^{-1}$). 秋季(冬季)谷风平均持续时间为 9h(6h),秋季(冬季)谷风开始时刻为 11:00(13:00);秋季(冬季)山风持续时间为 13 h(16 h),秋季(冬季)山风开始时刻为 21:00(20:00);受北京地区地形等的影响,山谷风转化的风向分界线为东北-西南向,秋季山风前沿压到南二环,冬季山风前沿压到南三环;山、谷风在形成及发展变化的过程中,其厚度有着明显的变化,谷风(山风)秋冬季的平均厚度为 700 ~ 1 000 m(300 ~ 600 m);无论是秋季还是冬季,一天中平均 $PM_{2.5}$ 浓度开始上升的时刻南部早于北部,秋季 $PM_{2.5}$ 浓度开始上升的时刻要早于冬季,而开始下降的时刻秋季会晚于冬季. 北京地区秋(冬)季空气污染南北差异较大的过渡区处于南二环(南三环),并会随着时间的推移向南移动. 秋(冬)季该现象的持续时间为 4 h(2 h). 并且,在研究中发现,$PM_{2.5}$ 与山谷风之间可能存在着一定的正负反馈作用.

关键词: 山谷风环流; 大气污染; $PM_{2.5}$; 厚度; 正负反馈

中图分类号: X51 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)06-2218-13 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201609231

Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing

DONG Qun[1,2], ZHAO Pu-sheng[2,3*], WANG Ying-chun[4*], MIAO Shi-guang[2], GAO Jian[5]

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 3. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 4. Beijing Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 5. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The impact of mountain-valley wind circulation on the typical examples of pollution was analyzed through the selected pollution process, combining with the hourly $PM_{2.5}$ concentrations and meteorological data in Haidian, Shangdianzi and Lishuiqiao in Autumn and Winter from 2013 to 2015, and also the data of Tower of atmospheric, wind profile of Haidian and automatic meteorological stations in the same period. The analysis showed that the average wind speed of valley wind was greater than that of the mountain wind, and they both would be "broken" during the conversion time in the mountain-valley wind days. In contrast with the mountain wind, the average duration of valley wind in autumn was longer than that in winter, and the start time of valley wind in autumn was earlier than the same wind in winter; influenced by the topography of Beijing area, the direction boundary of the transformation between mountain-valley wind was northeast-southwest. The frontier of mountain wind in autumn could fall down to the South Second Ring Road, and it could be pressed to the South Third Ring Road in winter; the average thickness of valley wind was greater than the mountain wind. Whether the moment was in autumn or winter, in the south, the average time when the $PM_{2.5}$ concentration began to rise, was earlier than in the north in a day; the time when concentration of pollutants began to rise in the fall was earlier than in the winter, but the time when the concentration began to decline showed the opposite trend. The transition zone of different $PM_{2.5}$ concentration in Beijing in autumn or winter located in South Second Ring Road (South Third Ring Road), and it would move to south over time. Duration autumn and winter seasons, this phenomenon lasted about 4 and 2 hours, respectively. Furthermore, the positive and negative feedback effects may exist between pollutant concentrations and mountain-valley wind.

Key words: mountain-valley wind circulation; air pollution; $PM_{2.5}$; thickness; positive and negative feedback

环境空气质量是衡量城市可持续发展能力和宜居程度的重要指标,因此,了解一个地区空气污染的变化特征并做出正确预报,是非常重要的. 近年来,随着我国经济快速发展,大量污染物被排放到城市

收稿日期: 2016-09-28; **修订日期**: 2016-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41675131);北京市自然科学基金项目(8131003);北京市优秀人才培养资助项目(2014000021223ZK49);北京市科技计划项目(Z131100006113013)

作者简介: 董群(1991 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为中小尺度城市气象和气溶胶理化特征,E-mail: daqidongq@163.com

* 通信作者,E-mail: pszhao@ium.cn; ycwang@bjmb.gov.cn

中,以细颗粒物($PM_{2.5}$)为代表的气溶胶污染严重,对人体健康及区域能见度等造成了巨大危害. 其中,京津冀区域是我国气溶胶污染最严重的地区,且多种污染物均以高浓度同时存在,进而发生复杂的相互作用,形成大气复合污染,频繁发生的大气污染事件已经引起政府和公众的广泛关注[1,2]. 空气污染与气象条件关系非常密切,气象要素中的风对空气中 $PM_{2.5}$的稀释、扩散、沉降均起着至关重要的作用.

在山地地区,由于山体表面与其对应高度上大气的热容量不同,它们之间的受热存在差异, 白天较高的地势是一个相对的热源,而夜间则相反变成一个相对的热汇,这是山谷风形成的机制. 在山区,白天由于谷地和坡地的空气比同高度自由大气增温多、温度高,使空气沿坡上升成为谷风,夜间由于下垫面辐射冷却,邻近的空气迅速变冷,密度增大,因而沿坡流泻,成为山风[3,7]. 一般认为,如果山风、谷风在山谷风发生的理论时段内持续出现 4 个及以上时次,则认为该日为山谷风日[8].

北京位于华北平原北端, 城区范围地势平坦,但其周围地形极为复杂. 其南、东南方向地势平坦,东临天津、塘沽沿海城市;西部和北部是高达数百米到一千米的山区,北部主要为东西走向的燕山山脉和东北至西南走向的太行山脉, 二者相连组成弧形山地,山地中高峰林立,沟谷盆地交错. 作为上述二山系余脉或其一部分的军都山和西山山地与北京的高度差约为 500 ~1 500 m, 距北京城区只有 30 ~40 km. 北京地区最主要的局地环流为山谷风[9,10]. 当背景风不大,天气晴朗,辐射起主要作用时,在无云或少云的弱天气系统控制下(地面风速 <3 级),在北京地区经常形成山谷风,白天是偏南的谷风,夜间是偏北的山风. 对北京地区而言,若某日日间局地风为偏南风且持续时间为 4 h 或以上,夜间局地风为偏北风且持续时间为 4 h 或以上,则该日为一个山谷风日.

前人对各地区各季节山谷风的起止时间等已经有了很深入的研究. 在不同地方和不同季节,山风、谷风转化所需的时间均不尽相同[11]. 不同地方,山风、谷风所对应的风向、周期有所不同,而且在不同季节山风、谷风风速的相对大小也不同[12,13]. 山谷风风速的大小,决定于大气层结情况和山坡的陡缓及谷地的深度. 一般来说,谷风的速度是随着大气不稳定度增加而加强,山风的速度则随着大气稳定度增加而增大,同时地形相对高差愈大,山谷风的风速愈强. 如北京地区是谷风风速大于山风,而在天山地区却是山风大于谷风,因此不同地方的山风风速和谷风风速大小不一,需要进行对比研究. 同时,山风、谷风的厚度也不尽相同. 有较多学者用 RBLM[14]、MM5[6,15~17]、RAMS[18]等模式对各地区局地环流或者气象环境特征进行了数值模拟,研究得出北京地区的气象环境很复杂, 其主要特点之一是会受到昼夜循环的山谷风气流影响.

近几年来,北京地区出现的环境问题引起了众多学者的关注. 在一定的地形与天气条件下, 山区出现的山谷风环流,是影响山区大气污染的主要气象因素之一[19],对北京地区 $PM_{2.5}$的输送、扩散起着极为重要的作用[20~22]. 山谷风影响区域存在着沿山地平原交接地带的辐合气流区[6],很多污染过程都是向山前输送并累积的过程[23,24]. 除山风和谷风可以决定 $PM_{2.5}$的空间分布外[25~29],在两者转换期所形成特殊的气象条件对 $PM_{2.5}$浓度也具有重要影响[30].

通常情况下,在本地污染源及其排放量相对稳定的情况下,$PM_{2.5}$浓度的高低,主要取决于外地污染源的输送影响和本地大气的扩散能力, 而扩散能力又与天气背景、局地地形条件有密切关系[31~35]. 北京的地理条件不利于 $PM_{2.5}$扩散;同时北京市城市规模巨大,人口众多,能源消耗密集,大气 $PM_{2.5}$排放强度相对集中;另外北京市还可能受到周边区域特别是南部地区较高的污染水平的影响. 因此一旦遇到持续性的不利气象条件,北京市空气质量随之变差,并可能出现大气重污染过程. 北京地区的东南气流相对暖湿,使地面之上的低层大气增温,大气层结稳定, 更加不利于 $PM_{2.5}$的垂直输送, 从而使 $PM_{2.5}$持续累积.

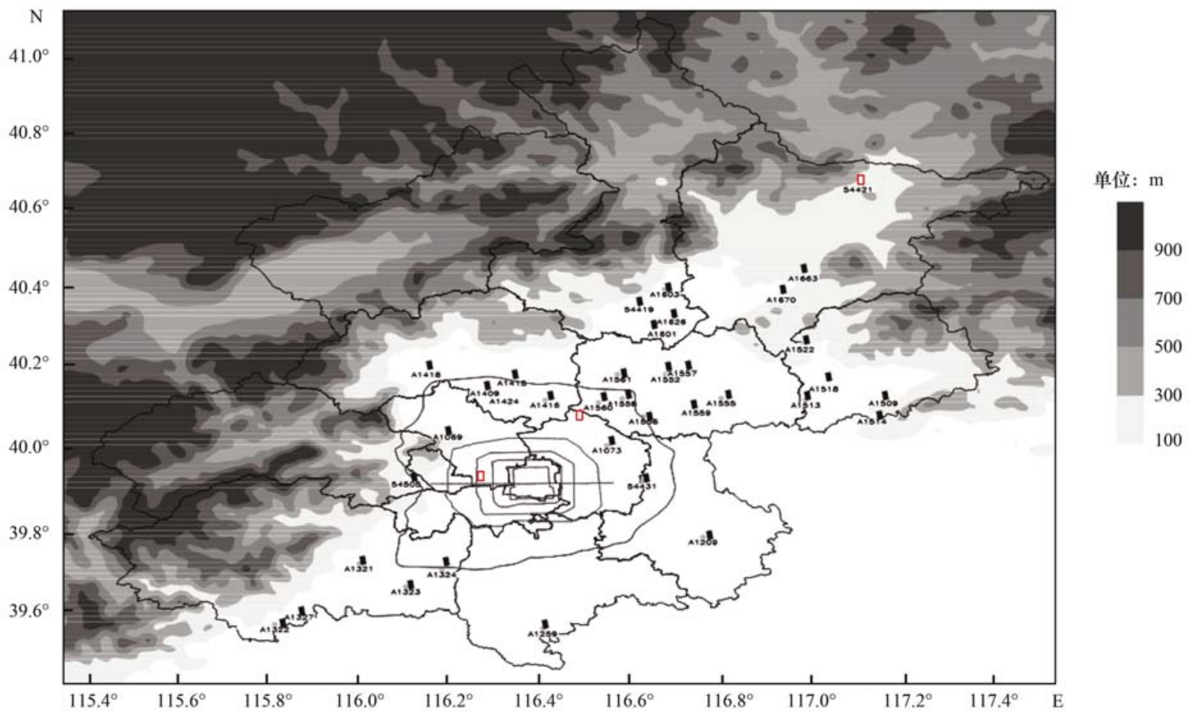
综上,目前对于北京地区山谷风环流的研究大多数停留在大尺度、长时间序列的气象研究层面,缺少小尺度、精细化的细致研究,与环境污染共同分析的研究也很少;空气污染研究方面多聚焦于颗粒物作用机制以及化学机制研究和典型污染过程的气象成因(多为大尺度环流)分析,污染统计特征的研究也多为污染时空分布特征的分析,缺少更全面、更精细的污染过程特征的统计分析. 现阶段,对山谷风和颗粒物关系的研究很少,更小空间尺度和时间尺度的个例研究更少. 近几年,在北京地区秋冬季节出现了较多次南北污染差异较大的现象,却很少有学者去关注和研究. 因此,本文针对北京地区秋冬季节所出现的“南北两重天”现象,对北京地区

近3年秋冬季所出现的受山谷风影响的污染过程的山谷风特征进行系统性地研究,细致分析山谷风环流对 $PM_{2.5}$扩散的影响,以期得到北京地区空气污染南北差异较大的过渡区,并对该现象的持续时间、影响范围及变化规律等进行统计分析.

1 材料与方法

已有研究表明,北京地区秋冬季的气象环境特征受大尺度系统的影响较大,而受城市热岛环流影响较小,在远离市区的山区,山谷风环流表现明显[36,37]. 市区地面风的日变化很小,基本上都是偏北风. 而春季和夏季的气象环境,由于其大尺度系统较弱,受局地山谷风环流和城市热岛环流共同影响,市区地面风向在一天之内变化较大. 在秋冬季,若没有大型天气形势影响,地面自动站所测得的环流可以近似认为是山谷风环流[11]. 同时,在4个季节中,空气污染问题较严重的主要是秋冬季. 因此,本文重点研究分析北京地区2013~2015年秋冬季对 $PM_{2.5}$有较明显传输作用的山谷风环流.

文中所使用的数据资料主要为海淀宝联大气成分观测站、上甸子本底站和中国环境科学研究院立水桥观测站2013~2015年这3年秋冬季的 $PM_{2.5}$浓度数据,对应时刻的中科院大气所铁塔资料以及海淀站的风廓线数据和北京地区各自动站的气象要素数据. 在人们对自动气象站数据质量评估[38~40]基础上,本文对所用的自动站数据进行了质量控制,按照窦以文等[41]的方法进行检验,剔除超出历史极限值的数据. 对于10 m风场数据,为了排除地势对风场的影响,而且有利于分析讨论,本文剔除了高度大于100 m及缺测率高于5%的站点. 剔除后,10 m风场数据来自35个站点,平均海拔为49 m,纬度范围为:39.541 ~ 40.435° N,经度范围为:115.821° ~117.168°E,所选站点及其所在的位置见图1,阴影区为位势高度填色. 从中可以看出,位势高度偏低的站点大部分位于北京地区的东南部,绝大部分位于六环之内. 由于数据有限,在挑选个例时,用海淀宝联大气成分站代表市内站,上甸子观测站代表郊区站,中国环境科学研究院立水桥站的 $PM_{2.5}$浓度数据用来进行对比验证. 同时,假设本地污染源及其排放量和周围地区的排放源相对稳定,忽略其它复杂因素的影响,主要考虑风场对 $PM_{2.5}$浓度的影响.



空心方框为城郊代表站,黑色实心方框为本文选取的代表站,图例颜色为位势高度填色

图1 研究区域情况

Fig. 1 Study area with topographic-heights and locations of meteorological stations

$PM_{2.5}$的浓度会随着区域内风场的变化而变化. 北京的地方性山谷风对城郊浓度日变化有明显影响,当谷风加强时,郊区的浓度会接近城区并有可能高于城区浓度,即谷风有对城区重污染向郊区输送

的作用,一般情况下,区域内 $PM_{2.5}$的浓度会在谷风的影响下逐渐上升,而在山风的影响下逐渐下降[42]. 北京地区山谷风日不会出现降水,一般以晴朗、中等云量的天气为主,持续时间为 1 ~5 d,城区风力均小于 4 $m \cdot s^{-1}$;该类山谷风日,北京地区在 500 hPa 主要位于槽后脊前,天气图无明显冷暖平流,低空 850 hPa 多处于槽后、高压或者偏南气流控制中,地面气压线分布均匀,多为均压场和高压后部或者底部. 本文利用海淀站和上甸子站 2013 ~2015 年秋冬季的风场数据和对应时刻的 $PM_{2.5}$浓度数据,以及环科院立水桥观测站的 $PM_{2.5}$浓度数据,初步选取了对 $PM_{2.5}$有明显传输影响的山谷风日,并利用大气所铁塔和地面自动站的风场数据进行进一步的筛选验证,最终确定了 19 个对 $PM_{2.5}$浓度有明显影响的秋冬季山谷风日典型个例. 其中冬季有 5 个,秋季有 14 个. 3 年来冬季比秋季的个例少,主要是因为北京地区冬季受大型天气系统影响的几率比秋季偏大,会对北京地区山地与平原之间的热力场产生影响,从而不利于山谷风的形成[37]. 各年的个例以及具体时间见表 1. 从中可以看出,2013 年个例数有 7 个,2014 年个例数有 8 个,2015 年个例数为 4 个.

经过对该个例样本集进行统计分析发现:该类山谷风日平均持续时间为 2 ~3 d. 下沉气流和稳定的垂直结构背景下,局地风场主要受地形等局地因子的热力和动力强迫作用,有利于研究局地环流的发展变化.

表 1　山谷风过程个例

Table 1　Samples list of the days of mountain-valley wind

编号	时间
1	2013-02-12 ~2013-02-13
2	2013-09-27 ~2013-09-28
3	2013-10-04 ~2013-10-06
4	2013-10-16 ~2013-10-17
5	2013-10-30 ~2013-11-02
6	2013-11-19 ~2013-11-23
7	2013-12-21 ~2013-12-23
8	2014-02-11 ~2014-02-13
9	2014-09-05 ~2014-09-07
10	2014-10-07 ~2014-10-09
11	2014-10-13 ~2014-10-14
12	2014-10-24 ~2014-10-25
13	2014-11-03 ~2014-11-04
14	2014-11-22 ~2014-11-25
15	2014-12-13
16	2015-02-23 ~2015-02-24
17	2015-09-14 ~2015-09-17
18	2015-09-20 ~2015-09-22
19	2015-10-04 ~2015-10-07

2　结果与分析

2.1　秋、冬季山谷风时空变化特征

2.1.1　秋、冬季山谷风时间变化特征

为了划分山谷风的时段,笔者定义 50% 以上的站点观测为偏南(北)风的时段为谷(山)风时段. 通过对所选取的自动站进行统计分析,得到个例中山谷风的平均起止时间,具体时间见表 2. 同时,本研究对所选个例秋冬季 24 h 的平均风场进行计算,得到图 2. 从中可知,秋冬季山谷风日变化比较明显且有规律,不同季节山、谷风时段分布略有不同. 秋季(冬季)谷风平均持续时间为 9 h(6 h),山风的平均持续时间为 13 h(16 h). 结合图 2 可以发现,山谷风日中,谷风比山风平均风速大. 平均山风风速为 0.31 $m \cdot s^{-1}$,平均最小(最大)山风出现在 20:00(09:00),约为 0.14 $m \cdot s^{-1}$(0.43 $m \cdot s^{-1}$);平

表 2　各季节山风、谷风开始和结束时间

Table 2　Beginning and ending time of valley and mountain breeze in Autumn and Winter

季节	山风		谷风	
	开始时刻	结束时刻	开始时刻	结束时刻
秋季	21:00	10:00	11:00	20:00
冬季	20:00	12:00	13:00	19:00

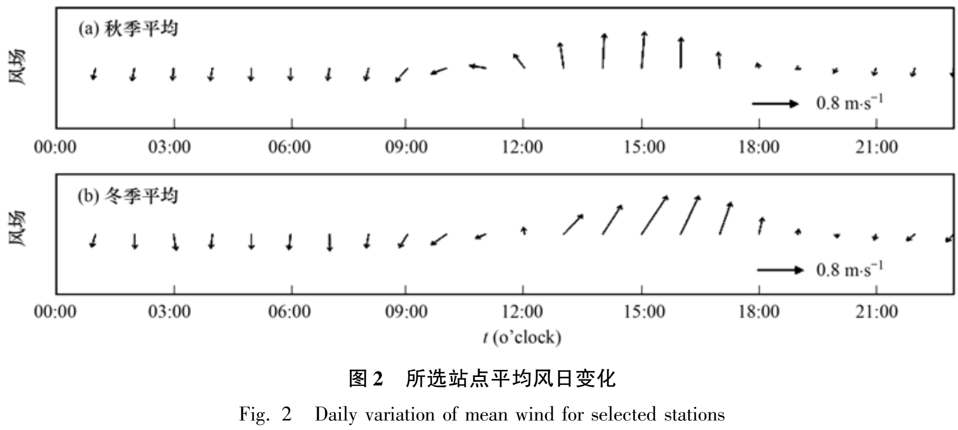


图 2　所选站点平均风日变化

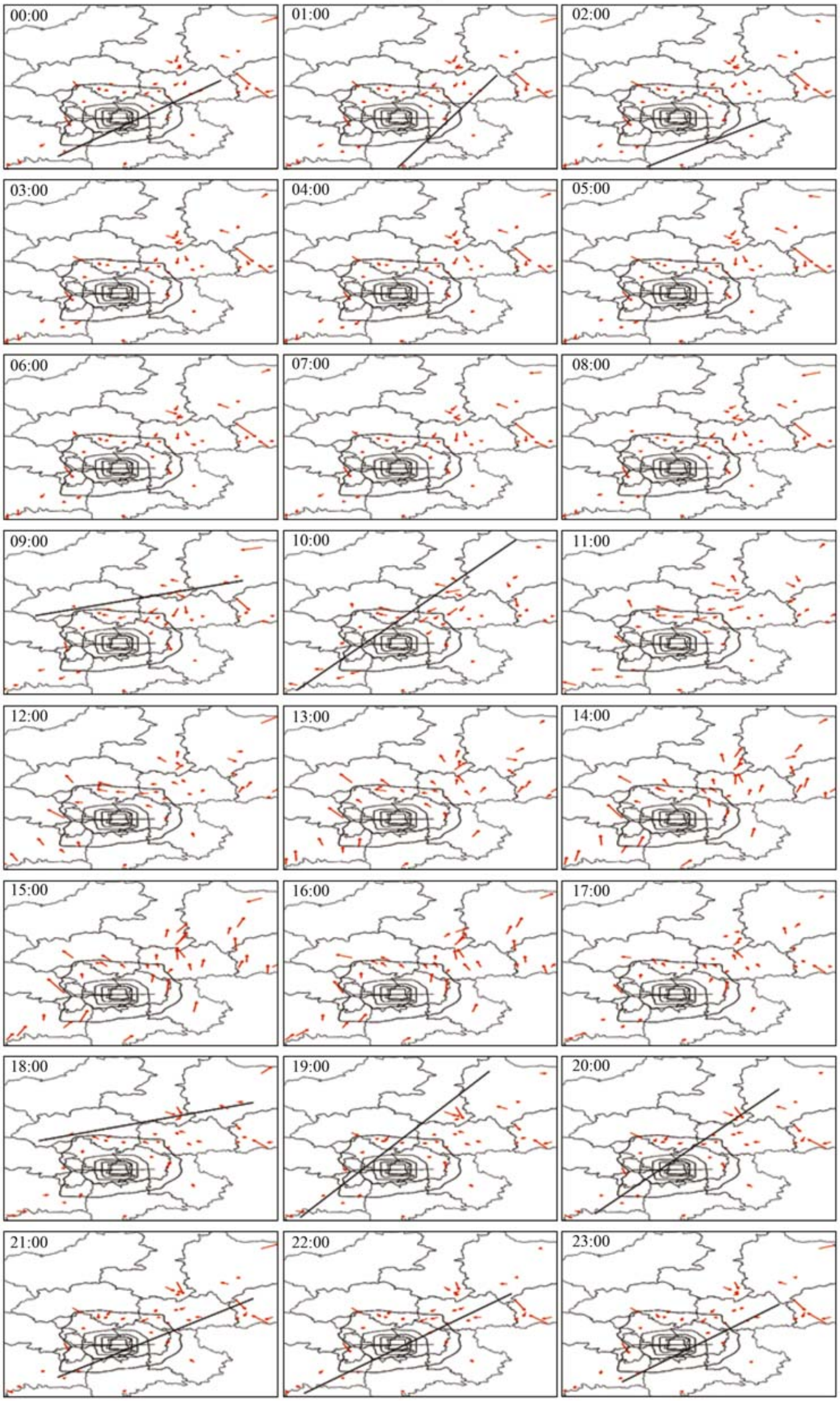
Fig. 2　Daily variation of mean wind for selected stations

均谷风风速为 0.55 $m\cdot s^{-1}$，平均最小(最大)谷风出现在 19:00(15:00)，约为 0.03 $m\cdot s^{-1}$(1.0 $m\cdot s^{-1}$)；山风时段的风速较谷风时段偏小，且在山、谷风转化期间，风速一般较小. 与窦晶晶等[11]研究的山谷风多年的风速均值相比，该类山谷风风速相对偏小，山、谷风持续时间差别不大.

2.1.2 秋、冬季山谷风空间变化特征

为了研究北京地区山、谷风风场的空间平均日变化情况，本文对所选站点秋、冬季的山谷风风场进行了日平均，并对其发展变化进行了研究，如图 3

(a) 秋季



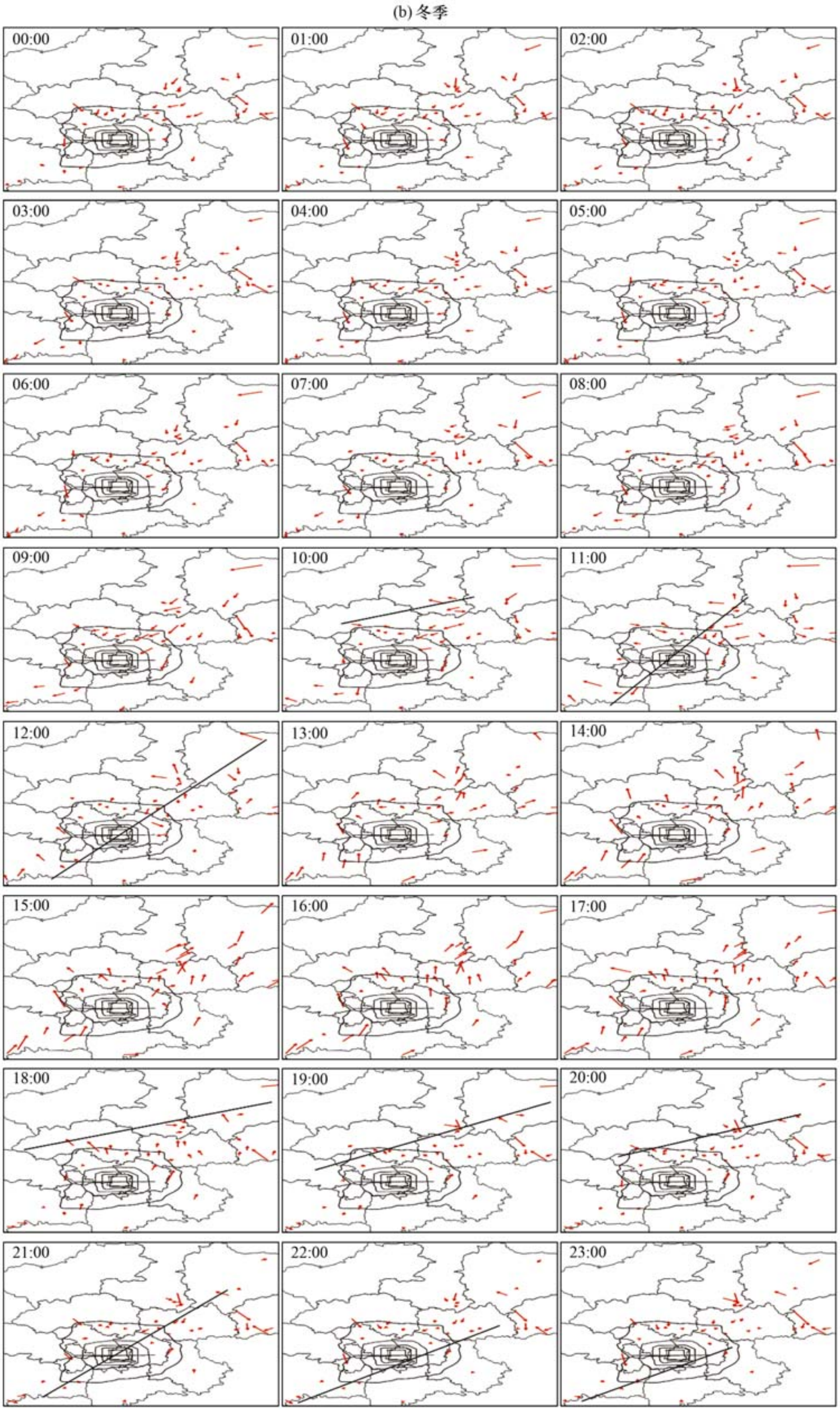


图 3　北京地区所选站点秋、冬季山谷风风场日平均分布情况

Fig. 3　Daily mean of wind field distribution of selected stations in Beijing area

所示. 其中所标出的黑色线段为山、谷风的分界线. 不同季节山、谷风的发展、转化有较多异同. 秋、冬季的山风时段,北京地区位势偏低地带的东部地区主要受东北风控制,西部地区主要受西北风的控制. 山风在发展变化期间,西部和北部部分站点的风场逐渐从西北风转为东北风,期间,其它站点

的风场变化不大. 随着气温的升高, 风场转为偏南、东南和西南,并逐渐转变为谷风风场. 谷风时段,北京地区位势偏低地带的中部主要受东南风影响,而距离山地比较近的偏北部和西部表现为西南风,整个风场呈现从位势偏低的平原向高地形爬坡的形式. 谷风向山风转化的过程期间,西北部会先转为偏北风,南部地区的较多站点仍受谷风控制. 在谷风逐渐转为成熟山风之后,北京地区位势偏低的地区逐渐发展为主要受东北风影响的情况.

受北京地区地形等的影响,山谷风转化的风向分界线为东北-西南向. 秋季,上午 9:00,北部地区开始出现谷风,随着时间的发展逐渐向南推移,到 11:00 谷风发展成熟,山风完全转化为谷风所需要的时间为 2 h. 11:00 ~ 17:00,风场基本为南风风场. 下午 18:00,北部、西部地区开始出现山风,直至夜间 21:00,山风基本发展成熟,此时分界线的中心位于南二环. 随着时间的发展,直至凌晨 01:00,风场基本全为偏北风场. 凌晨 03:00 ~ 08:00,风场基本为北风风场.

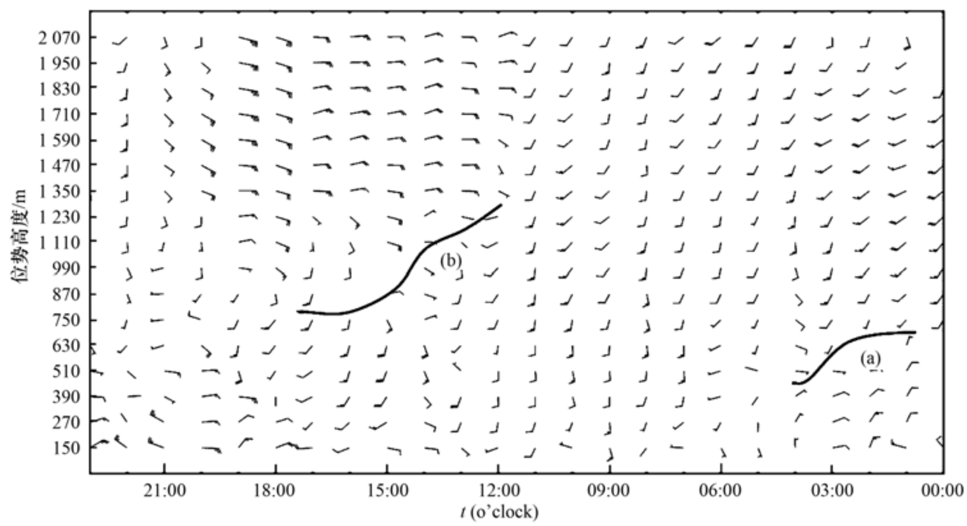
冬季,上午 10:00 北部少数地区开始出现谷风,随着时间的发展逐渐向南推移,到 12:00 谷风发展成熟. 13:00 为谷风时段,整个风场为南风风场. 山风完全转化为谷风所需要的时间为 3 h. 13:00 ~ 17:00 风场为南风风场. 下午 18:00 北部、西部地区开始出现山风,直至夜间 21:00,山风基本发展成熟,此时分界线的中心位于南三环. 随着时间的发展,直至凌晨 23:00,风场基本全为偏北风场. 凌晨 00:00 ~ 09:00,风场基本为北风风场.

利用海淀风廓线资料对个例样本集的山谷风的厚度进行了分析. 通过个例分析可以清晰的判断出:山、谷风在形成以及发展变化的过程中厚度有着明显的变化,且谷风的平均厚度大于山风的平均厚度. 其中,山风的平均厚度为 300 ~ 600 m,谷风平均厚度为 700 ~ 1 000 m. 谷风平均厚度高于山风平均厚度,主要原因是在谷风期间,温度偏高,气层不稳定程度偏重. 图 4 展示的是利用 2015-09-14 的风廓线资料绘制的山谷风日的垂直风场. 从中可以很清晰地得出:在该山谷风日,山风(谷风)在午夜 01:00(中午 12:00)厚度达到最大,为 600 m(1 200 m)左右.

2.2 山谷风对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响

2.2.1 城乡 $PM_{2.5}$ 浓度日变化特征

为了研究北京地区 $PM_{2.5}$ 浓度的变化特征,本文对表 1 所选出的山谷风典型个例的宝联站、立水桥站以及上甸子站的 $PM_{2.5}$ 浓度的平均日变化情况进行分析研究. 利用 z-score 标准化方法对北京地区秋、冬季 $PM_{2.5}$ 浓度的变化进行分析,如图 5 所示. 从中可以明显看出秋冬季 $PM_{2.5}$ 浓度的 24 h 平均变化情况和 $PM_{2.5}$ 南北变化差异. 上甸子站秋季 $PM_{2.5}$ 的 24 h 平均浓度最低时刻为 7:00,最高时刻为 19:00;冬季浓度最低时刻为 07:00,最高时刻为 23:00. 立水桥站秋季 $PM_{2.5}$ 的 24 h 平均浓度最低时刻为 07:00,最高时刻为 23:00;冬季浓度最低时刻为 13:00,最高时刻为 23:00. 宝联站秋季 $PM_{2.5}$ 24 h 平均浓度最低时刻为 3:00,最高时刻为 23:00;冬季浓度最低时刻为 07:00,最高时刻为 22:00. 以上



(a)山风高度, (b)谷风高度

图 4 个例的风场垂直分布情况

Fig. 4 Vertical distribution of wind field for one sample

3 个站点的位置自北向南是上甸子站、立水桥站和宝联站. 根据 3 个站点所选个例对 $PM_{2.5}$ 浓度的平均值及标准差计算得到，自南向北 $PM_{2.5}$ 浓度平均值越高、变化幅度更大. 秋季 $PM_{2.5}$ 浓度开始上升的时候要早于冬季，而开始下降的时刻秋季会晚于冬季. $PM_{2.5}$ 浓度上升的总时长秋季长于冬季. 各个站点无论是秋季还是冬季，一天中 $PM_{2.5}$ 浓度最低时刻均为上午，为山风向谷风转化的时候（或稍有滞后），而浓度最高的时刻均为晚上，为谷风向山风转化的时候（或稍有滞后）.

2.2.2　单站风与 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征的关系

经过对个例样本集进行统计分析发现，风向对 $PM_{2.5}$ 的浓度变化影响很大. 在此，选取 2013-10-30 ~ 2013-11-02、2014-10-07 ~ 2014-10-09 两个过程作为秋季代表性个例，2015-02-23 ~ 2015-02-24 为冬季代表性个例. 图 6 为 3 个站点的 3 个个例 $PM_{2.5}$ 浓度及风场的变化情况，其中，3 个站点所利用的气象资料数据分别来自海淀站、奥林匹克公园站和上甸子站. 每个站点的 3 个图，从左到右依次对应的是以上 3 个个例. 在谷风发展变化的过程中，偏南风将北京南边的 $PM_{2.5}$ 逐渐输送到北边，$PM_{2.5}$ 的浓度逐渐上升. 从图 6 中发现，3 个站点中谷风开始最早的是上甸子站，然后是立水桥站、宝联站，位于 3 个站中最南部的宝联站 $PM_{2.5}$ 的浓度开始上升的时间会比其北部的上甸子站和立水桥站提前，然后是立水桥站，最后是上甸子站，并且随着谷风的发展成熟，3 个站点 $PM_{2.5}$ 的浓度上升. 在山风发展的过程中，偏北风将北边的 $PM_{2.5}$ 又输送到南边，$PM_{2.5}$

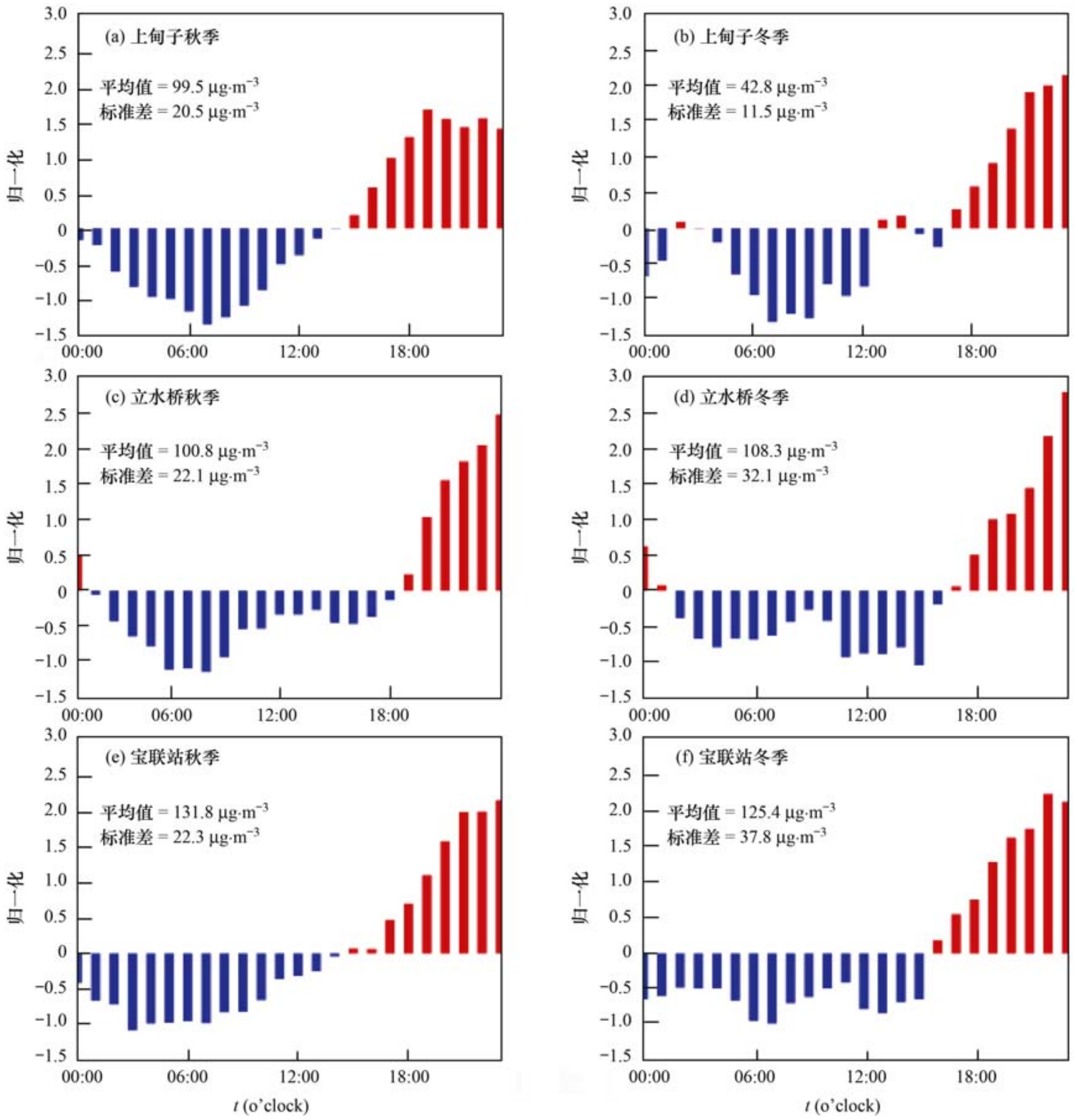
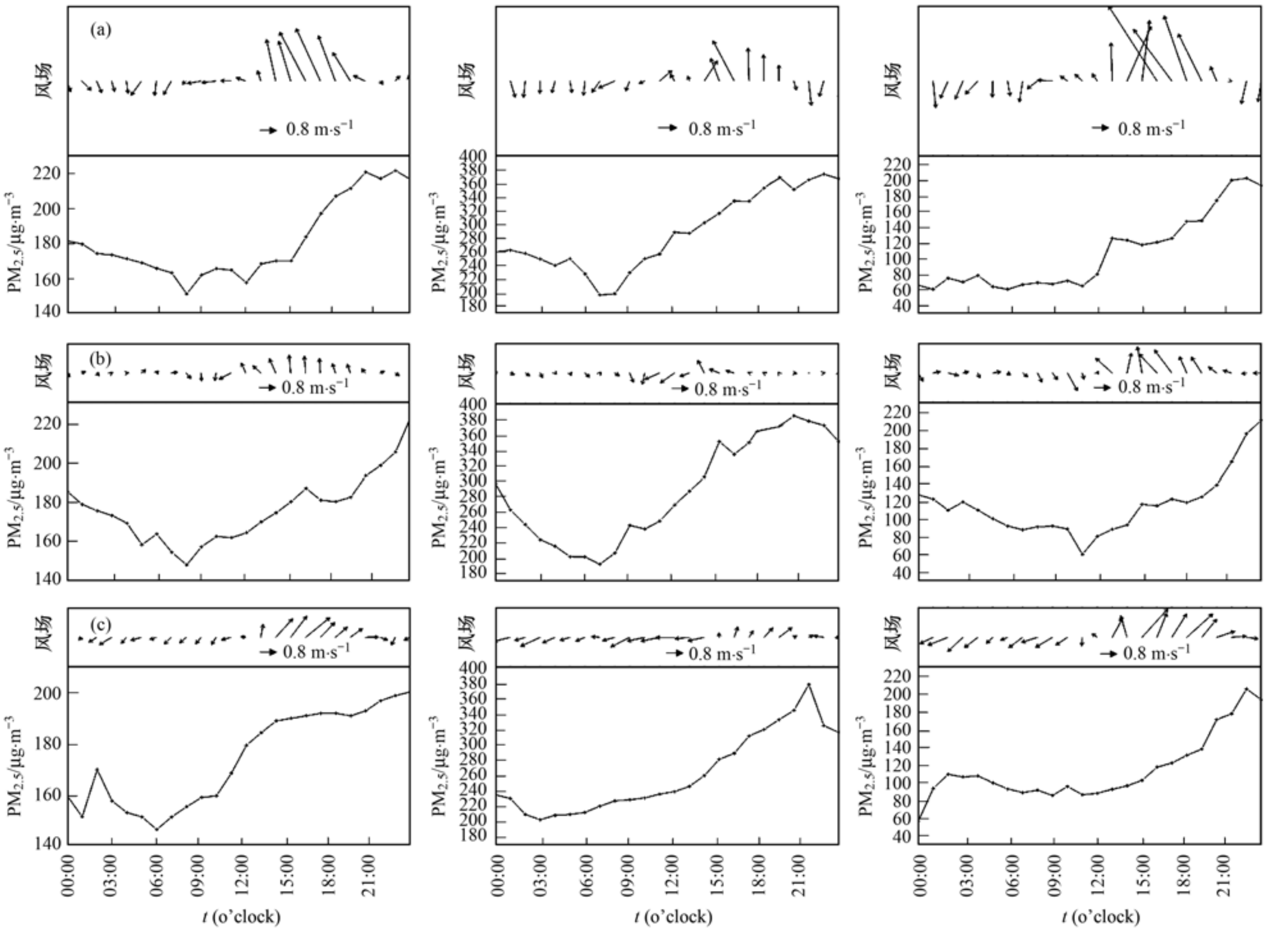


图 5　归一化后 $PM_{2.5}$ 浓度随时间变化序列图

Fig. 5　Time series of $PM_{2.5}$ concentration change after normalization

的浓度逐渐下降,而在山风(谷风)向谷风(山风)转化的过程中,$PM_{2.5}$的浓度变化不大. 风向的变化会对 $PM_{2.5}$的浓度有所影响,易导致南北 $PM_{2.5}$浓度差异较大的现象.



(a)上甸子站,(b)立水桥站,(c)宝联站

图6 3个站点两季节代表个例 $PM_{2.5}$浓度及对应风场的24 h平均变化情况

Fig. 6 24-hour average change of $PM_{2.5}$ concentrations and wind field for three stations and two seasons

2.3 负反馈机制初探

在选以上研究个例的过程中笔者发现,该类山谷风日多出现在持续性污染过程的前几天,在持续性污染过程中,风场特征会发生显著的变化. 选取2013年10月16~19日一次污染过程,宝联站 $PM_{2.5}$浓度及风向风速变化. 该过程的前两天,为明显的山谷风日,$PM_{2.5}$浓度也随着有规律的变化. 10月18日已经明显不是山谷风日,该地全日受弱北风风场的控制,$PM_{2.5}$浓度稳定且略有上升. 10月19日,在大北风的影响下,$PM_{2.5}$消散,$PM_{2.5}$浓度迅速下降,该次污染过程结束(图7).

针对10月18日所出现的风场的变化,初步分析得到,一般情况下,污染天气出现后,形成山谷风所需要的热力差异会有所减弱,平原和山区的温度梯度减小,甚至接近消失. 这也说明山谷风不但会影响污染天气的污染程度,污染天气也可能会在一定程度上影响山谷风的强度,即污染天气和山谷风之间可能会存在一定的反馈效应.

3 讨论

在本研究中,首先利用海淀宝联大气成分观测站、上甸子自动观测站和北京环科院立水桥观测站2013~2015年这3年秋冬季的 $PM_{2.5}$浓度数据,以及对应时刻的大气所铁塔资料以及海淀站的风廓线数据和北京地区各自动站的气象要素数据挑选典型个例,对其山谷风环流的特征进行分析. 对于不同的季节和地域,对 $PM_{2.5}$浓度有较大影响的山谷风环流的特征会有所差异. 山、谷风在形成以及发展变化的过程中,其厚度有着明显的变化,且谷风的平均厚度大于山风的平均厚度,其中,山风的平均厚度为300~600 m,谷风平均厚度为700~1 000 m. 经过分析发现,山谷风日中,谷风会比山风的平均风速

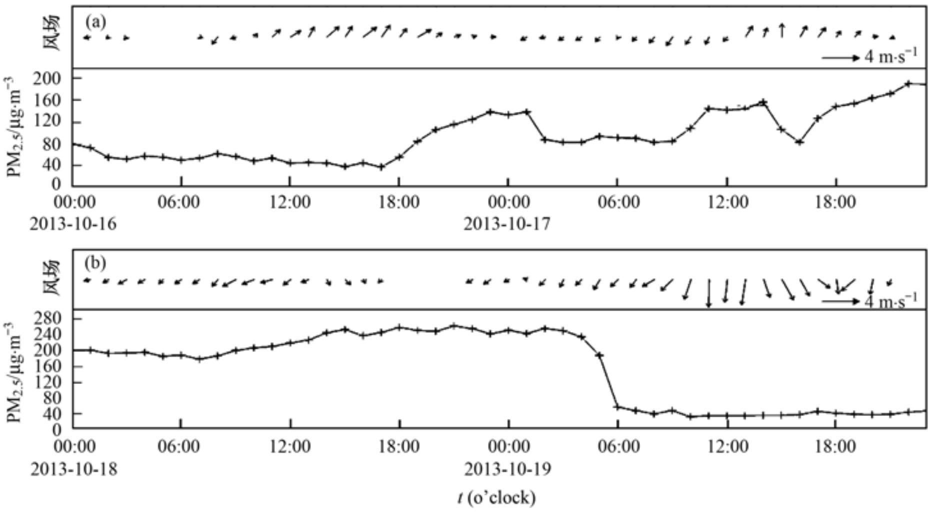


图 7　$PM_{2.5}$浓度及对应风场随时间变化情况

Fig. 7　Change of $PM_{2.5}$ concentration and wind field over time

大,且在山、谷风转化期间会出现风场“破碎”的紊乱现象. 秋季谷风平均持续时间长于冬季,且秋季谷风开始时刻早于冬季;冬季山风持续时间长于秋季,且冬季山风开始时刻早于秋季;受北京地区地形等的影响,山、谷风转化的风向分界线为东北-西南向,秋季山风前沿能压到南二环,冬季山风前沿能压到南三环.

$PM_{2.5}$浓度的变化与山谷风的转化以及发展变化具有很大的相关性. 秋季 $PM_{2.5}$浓度开始上升的时刻要早于冬季,而开始下降的时刻秋季会晚于冬季,一天中 $PM_{2.5}$浓度最低时刻均为上午,为山风向谷风转化的时候(或稍有滞后),而浓度最高的时刻均为晚上,为谷风向山风转化的时候(或稍有滞后),同时,南部 $PM_{2.5}$平均浓度会高于北部,并且浓度值会更加离散. 无论是秋季还是冬季,一天中 $PM_{2.5}$浓度最低的时刻南部会早于北部,即平均 $PM_{2.5}$浓度开始上升的时候南部早于北部. $PM_{2.5}$浓度最高的时刻南部会晚于北部的主要原因是谷风发展成熟时,南风会将北京南部(主要是河北)地区的 $PM_{2.5}$向其北部输送,从而使得南部 $PM_{2.5}$浓度开始上升的时刻要早于北部;山风在发展成熟过程中,$PM_{2.5}$是由北到南消散的,在北部受北风影响时,北京南部依然为南风,因此,在北京地区北部受山风影响 $PM_{2.5}$浓度降低时,依然会有 $PM_{2.5}$向南部输送,这便会造成 $PM_{2.5}$南北浓度差异较大.

以上研究结果可以解释北京秋冬季污染南北差异较大的观测事实. 同时,可以得到北京地区秋(冬)季空气污染南北差异较大的过渡区处于南二环(南三环),并会随着时间的推移向南移动. 秋(冬)季该现象的持续时间约为 4 h(2 h). 同时,笔者也发现,山谷风与 $PM_{2.5}$之间可能存在一定的正负反馈作用. 山谷风的发展变化会对 $PM_{2.5}$的传输分布产生影响,在其发展的前段时间,山谷风有利于 $PM_{2.5}$的传输扩散,并影响其分布,此为山谷风环流对 $PM_{2.5}$的正反馈效应. 在 $PM_{2.5}$浓度增长到一定程度之后,气溶胶的直接辐射效应显著改变了边界层气象要素,地面接收的太阳短波辐射减少,2 m 高度的温度会下降,从而影响到山地与平原之间的热力差异;湍流动能也会下降,10 m 高度的风速降低明显,边界层高度下降,使得边界层大气更加静稳,进而造成了污染地区污染进一步加剧,并造成山谷风的减弱或者消失,此为 $PM_{2.5}$对山谷风环流的负反馈效应,而这又会对 $PM_{2.5}$的传输分布等产生一定的影响[43~45].

4　结论

(1)山谷风日中,谷风比山风平均风速大. 秋季谷风平均持续时间长于冬季,且秋季谷风开始时刻早于冬季;冬季山风持续时间长于秋季,且冬季山风开始时刻早于秋季.

(2)受北京地区地形等的影响,山谷风转化的风向分界线为东北—西南向,秋季山风前沿能压到南二环,冬季山风前沿能压到南三环.

(3)山、谷风在形成以及发展变化的过程中,其厚度有着明显的变化,且谷风的平均厚度大于山风的平均厚度.

(4)无论是秋季还是冬季,一天中平均 $PM_{2.5}$浓度开始上升的时刻南部早于北部,秋季 $PM_{2.5}$浓度开

始上升的时刻要早于冬季,而开始下降的时刻秋季会晚于冬季.

(5)北京地区秋(冬)季空气污染南北差异较大的过渡区处于南二环(南三环),并会随着时间的推移向南移动,秋(冬)季该现象的持续时间约为4(2)h.

(6)山谷风和 $PM_{2.5}$ 之间可能存在一定的正负反馈效应.

参考文献:

[1] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 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, 2014, **34**(1): 1-11.
Wu D, Liao B T, Wu M, *et al*. 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, 2014, **34**(1): 1-11.

[2] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布"避风港"效应及其"气候调节"影响下的年代际变异[J]. 科学通报, 2015, **60**(12): 1132-1143.
Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, *et al*. "Harbor" effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(12): 1132-1143.

[3] 蒋维楣, 徐玉貌, 于洪彬. 边界层气象学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 1994.

[4] 傅抱璞. 由测风资料推算局地环流速度的方法[J]. 气象科学, 1997, **17**(3): 258-267.
Fu B P. A method of calculating the velocity of local circulation by wind observational data[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1997, **17**(3): 258-267.

[5] 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. BECAPEX 科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响[J]. 气象学报, 2004, **62**(5): 663-671.
Xu X D, Ding G A, Bian L Y, *et al*. Characteristics of atmospheric environment of boundary layer structure of city community in BECAPEX and integrate influence[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, **62**(5): 663-671.

[6] 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 等. 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 D 辑: 地球科学, 2009, **39**(1): 88-98.
Liu S H, Liu Z X, Li J, *et al*. Numerical simulation for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei Province[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, **52**(3): 382-392.

[7] Zardi D. MOUNTAIN METEOROLOGY | valley winds[A]. In: North G, Pyle J, Zhang F Q (Eds.). Encyclopedia of Atmospheric Sciences (2nd ed.)[M]. Amsterdam: Academic Press, 2015. 114-134.

[8] 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.
Zhang R W, Fan S J, Li Y M. Observational study of mountain-valley breeze over Conghua in 2008 Fall[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, **28**(1): 134-139.

[9] 北京市气象局. 北京气候志[M]. 北京: 北京出版社, 1987.

[10] 北京市地方志编纂委员会. 北京志——地质矿产水利气象卷, 气象志[M]. 北京: 北京出版社, 1999.

[11] 窦晶晶, 王迎春, 苗世光. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J]. 应用气象学报, 2014, **25**(5): 559-569.
Dou J J, Wang Y C, Miao S G. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, **25**(5): 559-569.

[12] 覃军, 袁业畅, 李燕, 等. 山区复杂地形条件下的风场分析[J]. 气候与环境研究, 2001, **6**(4): 493-497.
Qin J, Yuan Y C, Li Y, *et al*. A study of wind system in a sophisticated relief in mountain area[J]. Climatic and Environmental Research, 2001, **6**(4): 493-497.

[13] 霍文, 杨青, 艾力·买买提明, 等. 天山北坡四工河流域 6 月山谷风特征分析[J]. 新疆气象, 2005, **28**(6): 17-19.
Huo W, Yang Q, Mamtimin A, *et al*. The characteristic of mountain and valley breezes in June in Tianshan mountains four work river areas[J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology, 2005, **28**(6): 17-19.

[14] 徐敏, 蒋维楣, 季崇萍, 等. 北京地区气象环境数值模拟试验[J]. 应用气象学报, 2002, **13**(S1): 61-68.
Xu M, Jiang W M, Ji C P, *et al*. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, **13**(S1): 61-68.

[15] 高艳红, 吕世华. 非均匀下垫面局地气候效应的数值模拟[J]. 高原气象, 2001, **20**(4): 354-361.
Gao Y H, Lü S H. Numerical simulation of local climatic effect of heterogeneous underlying surface[J]. Plateau Meteorology, 2001, **20**(4): 354-361.

[16] 安兴琴, 陈玉春, 吕世华. 中尺度模式对冬季兰州市低空风场和温度场的数值模拟[J]. 高原气象, 2002, **21**(2): 186-192.
An X Q, Chen Y C, Lü S H. Mesoscale simulations of winter low-level wind and temperature fields in Lanzhou city[J]. Plateau Meteorology, 2002, **21**(2): 186-192.

[17] 席世平, 寿绍文, 郑世林, 等. 复杂地形下山谷风的数值模拟[J]. 气象与环境科学, 2007, **30**(3): 41-44.
Xi S P, Shou S W, Zheng S L, *et al*. Numerical simulation of mountain-valley wind in the complex terrain[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2007, **30**(3): 41-44.

[18] 鞠丽霞, 王勤耕, 张美根, 等. 济南市城市热岛和山谷风环流的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2003, **8**(4): 467-474.
Ju L X, Wang Q G, Zhang M G, *et al*. A simulation of heat island circulation and mountain-valley breeze in Jinan[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, **8**(4): 467-474.

[19] 邓家铨, 朱赛霞, 郑敏. 不同地形边界层风场特性及山谷风污染气象个例分析[J]. 热带地理, 1989, **9**(4): 346-353.
Deng J Q, Zhu S X, Zheng M. The characteristics of wind field within boundary layer of different topography and case analysis on pollution meteorology. Related to mountain-valley wind[J]. Tropical Geography, 1989, **9**(4): 346-353.

[20] 邱崇践, 蒲朝霞. 山谷风环流控制下的大气污染物输送和扩散过程: 二维数值模拟研究[J]. 高原气象, 1991, **10**(4): 362-370.
Qiu C J, Pu Z X. The transportation and dispersion of air pollutants controlled by mountain-valley circulation: two-

dimensional numerical simulation [J]. Plateau Meteorology, 1991, **10**(4): 362-370.

[21] 邓玉珍, 雷孝恩, 田瑞明. 一个考虑地形影响的三维中尺度 Monte-Carlo 多源模式[J]. 气象学报, 1993, **51**(2): 139-147.
Deng Y Z, Lei X E, Tian R M. A three-dimensional mesoscale Monte-Carlo multiple-sources model involving orographic influence[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1993, **51**(2): 139-147.

[22] 马志强, 王跃思, 张小玲, 等. 北京城区与下游地区臭氧对比研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 924-929.
Ma Z Q, Wang Y S, Zhang X L, *et al*. Comparison of ozone between Beijing and downstream area [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 924-929.

[23] 康娜, 辛金元, 蔺永耀, 等. 北京山前典型细粒子污染过程的气象条件分析[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(9): 1013-1020.
Kang N, Xin J Y, Lin Y Y, *et al*. Meteorological condition analysis of a typical fine particle pollution event in the piedmont region of Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, **22**(9): 1013-1020.

[24] 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 北京冬季 $PM_{2.5}$重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 173-184.
Wang Y, Wang L L, Zhao G N, *et al*. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of $PM_{2.5}$ heavy pollutions in Beijing during winter [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, **19**(2): 173-184.

[25] Whiteman C D, Zhong S, Shaw W J, *et al*. Cold pools in the Columbia basin[J]. Weather and Forecasting, 2001, **16**(4): 432-447.

[26] Oanh N T K, Chutimon P W, Ekbordin W, *et al*. Meteorological pattern classification and application for forecasting air pollution episode potential in a mountain-valley area [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(7): 1211-1225.

[27] Reeves H D, Stensrud D J. Synoptic-scale flow and valley cold pool evolution in the Western United States[J]. Weather and Forecasting, 2009, **24**(6): 1625-1643.

[28] Silcox G D, Kelly K E, Crosman E T, *et al*. Wintertime $PM_{2.5}$ concentrations during persistent, multi-day cold-air pools in a mountain valley[J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 17-24.

[29] Curci G, Cinque G, Tuccella P, *et al*. Modelling air quality impact of a biomass energy power plant in a mountain valley in Central Italy [J]. Atmospheric Environment, 2012, **62**: 248-255.

[30] 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, **44**(4): 433-439.
Li Z K, Pan Y X, Zhou C F, *et al*. A diffusion model for fumigation with mountain-valley wind shift [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1986, **44**(4): 433-439.

[31] 王淑英. 北京地区 PM_{10}污染特征及其与气象条件的相关分析[A]. 见: 第八届全国大气环境学术会议论文集[C]. 昆明: 中国环境科学学会大气环境分会, 2000. 13-18.

[32] 宋艳玲, 郑水红, 柳艳菊, 等. 2000 ~ 2002 年北京市城市大气污染特征分析[J]. 应用气象学报, 2005, **16**(S1): 116-122.
Song Y L, Zheng S H, Liu Y J, *et al*. Research on characteristics of air pollution in Beijing[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, **16**(S1): 116-122.

[33] 王开燕, 王雪梅, 张仁健, 等. 北京市冬季气象要素对气溶胶浓度日变化的影响[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(4): 132-135.
Wang K Y, Wang X M, Zhang R J, *et al*. Impact of meteorological factors on aerosol concentration diurnal variation in Beijing Winter[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, **21**(4): 132-135.

[34] 李军, 孙春宝, 刘咸德, 等. 气象因素对北京市大气颗粒物浓度影响的非参数分析[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(6): 663-669.
Li J, Sun C B, Liu X D, *et al*. Non-parameter statistical analysis of impacts of meteorological conditions on PM concentration in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, **22**(6): 663-669.

[35] 孙俊玲, 刘大锰, 扬雪. 北京市海淀区大气颗粒物污染水平及其影响因素[J]. 资源与产业, 2009, **11**(1): 96-100.
Sun J L, Liu D M, Yang X. Atmospheric particle pollution and its factors in Beijing[J]. Resources & Industries, 2009, **11**(1): 96-100.

[36] 蔡旭晖, 郭昱, 刘辉志, 等. 北京地区低层大气流动模态研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002, **38**(3): 387-392.
Cai X H, Guo Y, Liu H Z, *et al*. Flow patterns of lower atmosphere over Beijing area[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2002, **38**(3): 387-392.

[37] 王喜全, 王自发, 龚晏邦, 等. 北京城区热岛环流对山地-平原风的调节作用[J]. 气候与环境研究, 2008, **13**(5): 639-644.
Wang X Q, Wang Z F, Gong Y B, *et al*. Modulation of urban heat island circulation on mountain-plain wind in the Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research, 2008, **13**(5): 639-644.

[38] 胡玉峰. 自动与人工观测数据的差异[J]. 应用气象学报, 2004, **15**(6): 719-726.
Hu Y F. Differences between data of automatic and manual observation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, **15**(6): 719-726.

[39] 李雁, 梁海河, 孟昭林, 等. 自动气象站运行效能统计[J]. 应用气象学报, 2009, **20**(4): 504-509.
Li Y, Liang H H, Meng Z L, *et al*. The statistic of automatic weather station's efficiency[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, **20**(4): 504-509.

[40] 杨萍, 刘伟东, 仲跻芹, 等. 北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估[J]. 应用气象学报, 2011, **22**(6): 706-715.
Yang P, Liu W D, Zhong J Q, *et al*. Evaluating the quality of temperature measured at automatic weather stations in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, **22**(6): 706-715.

[41] 窦以文, 屈玉贵, 陶士伟, 等. 北京自动气象站实时数据质量控制应用[J]. 气象, 2008, **34**(8): 77-81.
Dou Y W, Qu Y G, Tao S W, *et al*. The application of quality control procedures for real-time data from automatic weather stations[J]. Meteorological Monthly, 2008, **34**(8): 77-81.

[42] 吴庆梅, 张胜军. 一次雾霾天气过程的污染影响因子分析[J]. 气象与环境科学, 2010, **33**(1): 12-16.
Wu Q M, Zhang S J. The pollution influencing cause analysis of a fog-haze process [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2010, **33**(1): 12-16.

[43] 王哲, 王自发, 李杰, 等. 气象-化学双向耦合模式(WRF-NAQPMS)研制及其在京津冀秋季重霾模拟中的应用[J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 153-163.
Wang Z, Wang Z F, Li J, *et al*. Development of a meteorology-chemistry two-way coupled numerical model (WRF-NAQPMS) and its application in a severe autumn haze simulation over the Beijing-Tianjin-Hebei area, China [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, **19**(2): 153-163.

[44] 郑飞, 张镭, 朱江. 复杂地形城市冬季边界层对气溶胶辐射效应的响应[J]. 大气科学, 2006, **30**(1): 171-179.
Zheng F, Zhang L, Zhu J. Responses of urban atmospheric boundary layer to aerosol radiative effect over complex terrains in Winter[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, **30**(1): 171-179.

[45] 胡向军, 张镭, 郑飞, 等. 基于激光雷达资料的气溶胶辐射效应研究[J]. 干旱气象, 2014, **32**(2): 248-255.
Hu X J, Zhang L, Zheng F, *et al*. Study on aerosol radiative effect based on Lidar data [J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, **32**(2): 248-255.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016 年 10 月 12 日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续 15 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

HUANJING KEXUE Vol. 38 No. 6
Environmental Science (monthly) Jun. 15, 2017

CONTENTS