

延庆-张家口地区复杂地形冬季山谷风特征分析^{*}

贾春晖^{1,2} 窦晶晶² 苗世光² 王迎春³

JIA Chunhui^{1,2} DOU Jingjing² MIAO Shiguang² WANG Yingchun³

1. 中国气象科学研究院,北京,100081
2. 北京城市气象研究院,北京,100089
3. 北京市气象局,北京,100089

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China*

3. *Beijing Meteorological Administration, Beijing 100089, China*

2018-07-02 收稿,2018-12-11 改回.

贾春晖, 窦晶晶, 苗世光, 王迎春. 2019. 延庆-张家口地区复杂地形冬季山谷风特征分析. 气象学报, 77(3):475-488

Jia Chunhui, Dou Jingjing, Miao Shiguang, Wang Yingchun. 2019. Analysis of characteristics of mountain-valley winds in the complex terrain area over Yanqing-Zhangjiakou in the winter. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(3):475-488

Abstract Based on fine-scale hourly data collected at surface automatic weather stations (AWS) within the study area and sounding data at Zhangjiakou during two winters (from December 2016 to February 2017 and from December 2017 to February 2018), spatial and temporal characteristics of wind field in the complex terrain area over Yanqing-Zhangjiakou (including Chongli, Chicheng, Xiaowutai Mountain, Yuxian, Zhuolu, Huailai Basin, and Beijing Yanqing, Changping, Huairou District) are analyzed. This study reveals the temporal and spatial variations of local wind field over various complex terrain areas, and helps us to better understand the dynamic and thermal effects of complex terrain on the near-surface wind field. Results of the present study provide references for the forecast of wintertime mountain wind field and will be helpful for improvements of numerical models performance over complex terrain areas. It is found that in fair weather days, wind persistence, which is defined as the ratio of vector average of wind speed to scalar average of wind speed, can be used as an important variable to study the variation of wind field. According to the significant diurnal variations in wind persistence during fair weather days, the stations in the study region can be divided into 10 distinctive patterns, representing different influences of local topographic features, and the correlation between diurnal variation of wind persistence and wind direction is quite large. There are three types of topography-induced wind in the study region: slope wind, valley wind and mountain-plain circulation. The spatial scale of the mountain-plain circulation is larger than that of the former two. The diurnal characteristics of the wind field and wind persistence vary significantly with different topographical features, and the mutual transition time between mountain and valley winds is also different. In the mountains, the mutual transition time is the earliest, followed by that in the basins, and the transition time in plain areas is the latest. The duration of mountain wind period is longer than that of valley wind while the mountain wind speed is smaller than the valley wind speed. While the measured winds during fair weather days reflect the characteristics of the actual wind field, the theoretical valley wind that excludes the environmental background wind field and weakens the dynamic effect of topography during the wintertime can better reflect characteristics of thermally driven mountain-valley winds.

Key words Mountain-valley wind, Complex terrain, Wind persistence, Fair weather day in the winter, Local wind

^{*} 资助课题:北京市科技计划课题(D171100000717003)、国家自然科学基金项目(41605012)。

作者简介:贾春晖,主要从事中尺度气象学、边界层气象学研究。E-mail: chjia@ium.cn

通信作者:窦晶晶,主要从事边界层观测与模拟研究。E-mail: jjdou@ium.cn

摘要 基于2016年12月—2017年2月和2017年12月—2018年2月两年冬季的近地面自动气象站逐时观测数据以及张家口探空数据分析延庆-张家口一带(包括张家口崇礼、赤城、海坨、小五台山区,延怀、怀涿、洋河、蔚县盆地以及北京延庆、昌平、怀柔部分平原地区)复杂地形的风场精细化时、空分布特征,揭示不同复杂地形下局地风场的时、空变化规律,加深对复杂地形动力、热力作用对近地面风场影响的认识,为冬季山区风场预报以及复杂地形数值模式改进提供参考。结果表明:晴朗小风天风持续性作为矢量平均风速和标量平均风速的比值,可以作为研究风场变化规律的重要参数。根据风持续性的日变化特征,可以将研究区域内所有站点分为10种类型,分别代表不同局地地形特征的影响,风持续与风向变化的相关也很强。研究区域主要有3种类型的地形风:斜坡风、峡谷风以及较大尺度的山区平原风。不同地形特征下的风场、风持续性存在明显的日变化特征,山风和谷风相互转化的时间也不同,山区最早,盆地次之,平原区最晚;山风时段持续时间较谷风时段长,风速小;晴朗小风天实测风反映了实际风场的特征,而排除环境背景风场,弱化地形动力作用后整个冬季的局地风作为理论山谷风,更能反映热力作用下的山谷风特征。

关键词 山谷风, 复杂地形, 风持续性, 冬季小风天, 局地风

中图法分类号 P425

1 引言

热力、动力驱动的中小尺度局地流场和区域环流耦合是复杂地形的一个显著特征。一方面,因复杂地形造成地表接受的太阳辐射不均匀而导致气流的局地上升和下沉;另一方面,由于地形的高低起伏、坡度大小改变了近地面气流的方向和流速(李国平,2016)。这种环流具有明显的日变化特征,昼夜风向、风速也有显著差异,白天山坡升温比山谷快,不稳定暖空气沿坡向上爬升;夜间山坡降温快,冷空气沿坡下滑。当系统风较弱时,这种局地环流容易被观测到。山谷风环流作为中尺度环流的重要组成部分,在复杂地形背景下,其强度变化会对局地天气甚至大尺度天气产生影响(王瑾等,2012)。

目前,已有不少学者对山谷风环流形成的物理机制、分类、起止时间、强度及其影响因素等方面进行了研究。早些年对山谷风形成机制的研究集中在形成山谷风沿坡和沿山谷轴的温度结构上,并提出地形放大系数和山谷上方热量收支两种机制。地形放大系数(TAF)量化了地形在山谷风形成中的作用(McKee, et al, 1989),山谷中热传递过程产生的热量收支是导致山谷中温度结构变化的关键物理过程(Haiden, et al, 2005)。山谷风形成的主要原因是山坡与山谷中同高度上的空气存在着温差,不同垂直温度结构的空气柱产生的水平气压梯度驱动山谷风发展(Whiteman, 1990; Zardi, et al, 2013)。

按照山谷风产生地的局地地形和空间尺度可将其分为斜坡风、峡谷风、横跨山谷的风、山区-平原环流等。其中,山区平原环流的空间尺度比其他几种

大,白天由平原吹向山区,夜间由山区吹向平原(杨洋等,2015)。斜坡风是由斜坡附近的空气与斜坡外的环境空气的温差产生的,风向通常平行于斜坡,白天沿斜坡向上,晚上沿斜坡向下。许多学者(Hawkes, 1947; Whiteman, et al, 1986)认为,峡谷风是由于沿山谷轴线形成的温差或山谷中的空气与相邻平原上相同高度的空气形成的温差产生的,这种沿山谷走向白天和夜间方向相异的气流,通常是闭合的环流。此外,地形复杂的峡谷对流入峡谷的气流有压缩作用,产生狭管效应,受相对谷深、气流与峡谷轴线夹角等因素的影响,风速水平分布不均匀,狭管效应产生的梯度风会与峡谷风叠加或抵消,对风场产生显著影响(陈万隆, 1979; 谢祖镇, 1981; 汤浩等, 2011)。

山谷风主要发生在系统风较弱的晴天(Whiteman, 2000; Jin, et al, 2016)。在复杂地形下,需要根据观测站的位置来判断山风和谷风的风向。山谷风环流不仅受热影响,其起止时间和风速大小还受山谷逆温、复杂地形、植被覆盖、土壤湿度以及太阳辐射等因素的影响(林之光, 1981; 张耀存, 1995; 席世平等, 2007; Doran, 1991; 刘敏等, 2010),在特定的地形条件下会与海陆风环流、城市热岛环流相互耦合,共同影响局地环流(刘树华等, 2009; 王腾蛟等, 2013)。当复杂地形内存在湖泊或水库时,山谷风也会和湖陆风叠加,对局地天气产生更加复杂的影响(郑祚芳等, 2017; 麦子等, 2017)。山谷风与其上方的风(地转风和环境风)有密切关系,垂直湍流混合作用和重力波造成高空风水平动量向下输送,使山谷风方向趋向高空地转风方向(Whiteman, et

al,1993)。山谷风等局地环流受环境背景风影响较大,具有周期性变化特征,将局地风从实测风中分离出来,是一种利用自动气象站观测资料分析局地环流的较好方法。局地风与理论山谷风的变化特征非常一致(张人文等,2012;邱晓暖等,2013)。山风和谷风的持续时间、转化期以及风速的相对大小等特征在不同季节、不同地点均有不同,在转换期风向紊乱,风速较小,甚至为0(窦晶晶等,2014;覃军等,2001;傅抱璞,1997;霍文等,2005;董群等,2017;游春华等,2006)。不同季节水平压力梯度的变化幅度是驱动山谷风季节变化的一个重要因素(Cogliati, et al,2006)。

使用观测资料可以得到气象要素的真实状况,在复杂地形下,地面和高空观测资料缺乏,以往针对复杂山地风场的精细研究较少,而冬季受系统风的影响显著(蔡旭晖等,2002),对冬季复杂地形下的热力驱动环流的分析研究更少。随着近年来自动气象站的扩建,观测资料有了一定程度的积累,若高空风场的风速较小,可以将自动气象站测得的风场体现出的环流特征近似认为是山谷风环流(Whiteman, et al,1999)。本研究运用高密度自动气象站资料对冬季弱背景风场下复杂地形的风场环流特征进行精

细分析,并与整个冬季局地风环流特征进行了对比,以期加深对复杂地形动力、热力作用的理解。

2 研究区域、数据和方法

2.1 研究区域概况

文中选定的主要研究区域是河北张家口-北京延庆一带(图1),包括崇礼、赤城、海陀、涿鹿小五台4个山区;延怀、怀涿、洋河以及蔚县4个盆地;官厅水库以及延庆、昌平、怀柔的部分平原地区,经度范围114.65°—116.7°E(约225 km),纬度范围40°—41.3°N(约143 km)。其中崇礼赤城一带属于阴山山脉东段至大马山群山支系和燕山余脉交界地带,多为东北—西南及东—西走向。海陀山主峰海拔2242 m,为北京第二高峰。小五台山地处太行山、燕山和恒山三山交汇地带。官厅水库主要水流为河北怀来永定河,东西长40多千米,总面积253 km²。首先,研究区域内下垫面地形复杂,山脉、沟壑、盆地、水库以及平原的相互影响会产生多尺度局地环流,十分具有典型性;其次,该区域影响范围较大,包括北京、张家口在内的华北大范围地区;此外,风场是天气预报关注的重点。因此,有必要利用该地区时间及空间连续性较强的自动气象站观测数据

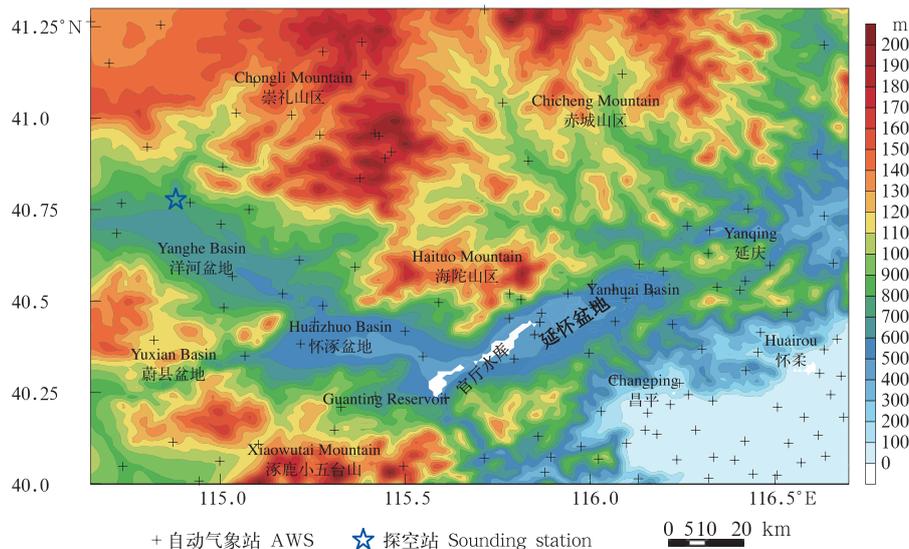


图1 研究区域情况与站点分布

(十字符号为本文选取的自动气象站,空心五角星为探空站,色阶为海拔高度)

Fig.1 Study area and distributions of topography and meteorological stations

(cross symbols denote automatic stations, hollow pentagram indicates the sounding station, shaded indicate topography height)

和探空观测资料对该地区冬季风场特征进行研究,同时为下一步数值模拟研究打下良好基础。但由于官厅水库在冬季的作用不甚显著(刘欣等,2013;曹渐华等,2015),因此,在文中不做主要分析。

2.2 数据说明

研究区域地形起伏大,山脉盆地交错分布,山谷坡度差异大,地势很复杂,2015年以前的建站较少。为了保证观测资料的完整性、连续性以及区域站点分布的代表性,选取2016年12月—2017年2月和2017年12月—2018年2月两年冬季的逐时自动气象站观测资料以及位于研究区域偏西北的张家口站(图1)的探空资料进行分析。自动气象站观测的数据精度高、时效性强,但也存在缺测、误测等问题,因此,文中对所用的观测资料按照窦以文等(2008)和杨萍等(2011)的方法进行了质量控制和筛选。资料质量控制所用的方法是:极值检查,剔除超出历史极值(2 min 平均风速大于 75 m/s)的观测值;时间序列检查,剔除连续性较差(相邻两个时刻风速差大于 10 m/s,小于 0.5 m/s;风向变化小于 10°)的观测值;内部一致性检查,剔除同一测站同时测得的参数不一致(风速为 0,风向必须为静风;风向为静风时,风速必须为 0)的观测值(王伯明等,2004);缺测检查,剔除缺测率超过 15%的所有站点和缺测时刻超过 6 h 的天数。资料筛选要结合所用的研究方法和进行试验所需的条件进行,文中剔除了所有降水日。在保证剔除的站点和数据不影响区域内风场分布的整体特征的前提下,经过质量控制、筛选,有 151 个站点资料的完整性和代表性较好。排除这些客观原因,进一步进行空间一致性检查,要保证站点的选择具有典型性,站点分布有明显的区域特征,风场日变化特征明显,能够代表局地特征,剔除 29 个站点后最终得到 2 个冬季中 151 d,123 个站点的风场资料。

2.3 研究方法

2.3.1 小风天的选取

局地热力驱动环流主要形成于山体侧壁、山谷之中以及其他倾斜表面上,在山谷上空环境风较弱,晴朗或者多云并且没有降雪的天气最明显(Whiteman, et al, 1999)。

Nicholls(1973)研究表明,当风速超过 7 m/s(较低山脊)和 14 m/s(较高山脊)时,背风波形成于山脊迎风面。即使环境背景风很弱,对山谷风系统

也存在扰动,扰动在脊顶高度处最强,随着海拔高度降低,扰动的作用也减小(Barr, et al, 1989; Doran, 1991)。为了研究局地热驱动环流,排除冬季较强盛行季风的影响,文中选出研究时段内的小风天进行分析。小风天定义为张家口站 1 天 2 次(08 和 20 时)(北京时,下同)探空测得的 700 hPa 风速均小于 14 m/s 的日期,研究时段内小风天共有 29 d(约占 19.2%)。

2.3.2 风持续性的定义

将每个时刻矢量平均风速和标量平均风速的比值定义为该时刻的风持续性(Whiteman, et al, 1999)。设某个站点第 j 个时刻的风持续性为 PER_j ,在第 i 天(共有 M 天)第 j 个时刻的实测风速为 S_{ij} ,风向为 D_{ij} ,风分量分别为 U_{ij} 、 V_{ij} ,风持续性计算方法为

$$U_{ij} = -S_{ij} \times \sin(D_{ij} \times \frac{\pi}{180}) \quad (1)$$

$$V_{ij} = -S_{ij} \times \cos(D_{ij} \times \frac{\pi}{180}) \quad (2)$$

$$\bar{U}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_{ij} \quad (3)$$

$$\bar{V}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{ij} \quad (4)$$

$$\bar{S}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_{ij} \quad (5)$$

$$PER_j = \frac{\sqrt{\bar{U}_j^2 + \bar{V}_j^2}}{\bar{S}_j} \quad (6)$$

风持续性值越大说明逐日风向越一致。在指定的时段内,每天的风均具有相同的风向时,该比率为 1;风向每天变化时,该比率小于 1;风从各个方向吹来的可能性相等或者当风从一个方向吹来的时间和从相反方向吹来的时间各为一半时,该比率为 0。风持续性可以作为研究风场变化规律的重要参数。

2.3.3 局地风的分离方法

冬季盛行季风影响较强,还有其他一些因素的影响,如下垫面差异、地形动力作用、山脉背风波等,因此很难直接观测到纯热力作用造成的山谷风。在研究山谷风特征时,将局地山谷风从实测风中分离出来,近似认为是理论山谷风,根据局地风情况判断复杂地形下的山谷风环流特征是一种较好的方法(张人文等,2012;邱晓暖等,2013)。

将实测风作为背景风和局地风的叠加,其中自动气象站测得的风称为实测风,山谷风为局地风,日

平均风为背景风。将每个站点逐时的实测风减去该站点日平均背景风得到每个站点逐时的局地风。设某一个站点第 i 天第 j 个时刻(共有 24 个时刻)实测风分量分别为 U_{ij} 、 V_{ij} , 则

$$\bar{U}_i = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} U_{ij} \quad (7)$$

$$U'_{ij} = U_{ij} - \bar{U}_i \quad (8)$$

$$\bar{V}_i = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} V_{ij} \quad (9)$$

$$V'_{ij} = V_{ij} - \bar{V}_i \quad (10)$$

$$\bar{S}_i = \sqrt{\bar{U}_i^2 + \bar{V}_i^2} \quad (11)$$

式中, U'_{ij} 、 V'_{ij} 分别为东西向和南北向的局地风分量, 将 \bar{S}_i 作为第 i 天的系统背景风。

3 结果与讨论

3.1 风持续性特征分析

位于山体不同位置的站点, 地形和背景风场对站点的影响大小不同, 风持续性和平均风速日变化有显著的差异。晴朗小风天受环境背景风场的影响相对较小, 地形的动力以及热力作用对不同位置风场的影响能够体现出显著的风持续性的日变化差异, 根据所有小风天不同站点的风持续性日变化特

征, 将所有站点分为以下 10 种类型(表 1)。其中, 峡谷斜坡与过渡型站点最多, 约占 40.7%, 平原型次之, 约占 15.4%。

站点类型分布见图 2。对风持续性和风速具有显著变化特征的 8 种类型(除峡谷盆地出入口型和混合型两类)站点求平均, 得到每类代表站的平均曲线(图 3)。小峡谷型主要分布在两座相对山脉或高地间的峡谷和沟壑中(图 3a), 风持续性呈单峰分布, 夜间小, 白天大, 下午值最大, 平均风速与风持续性分布一致; 峡谷盆地入口型主要分布在小峡谷和中部盆地的入口和出口处, 典型代表站为官厅水库站和辛庄子站(图 3b、c), 风持续性值日变化大, 没有显著的相似特征, 因此不能将此类站点做平均, 且平均风速与风持续性变化相关性较小, 中午和下午风速较大; 高海拔山顶型主要分布在海拔较高的山顶上(图 3d), 风持续性值整体较大, 平均风速呈双峰分布, 峰值出现在中午与凌晨, 中午值最大。

山谷深处型主要分布在山谷和沟壑较深处(图 3e); 山顶沟壑型主要分布在海拔较高的山顶沟壑中(图 3f); 山前坡地型主要分布在高海拔山脉迎风坡地上(图 3g)。这 3 类站点, 平均风速均呈单峰分布, 中午和午后达到峰值, 白天大于夜间。这 3 类站

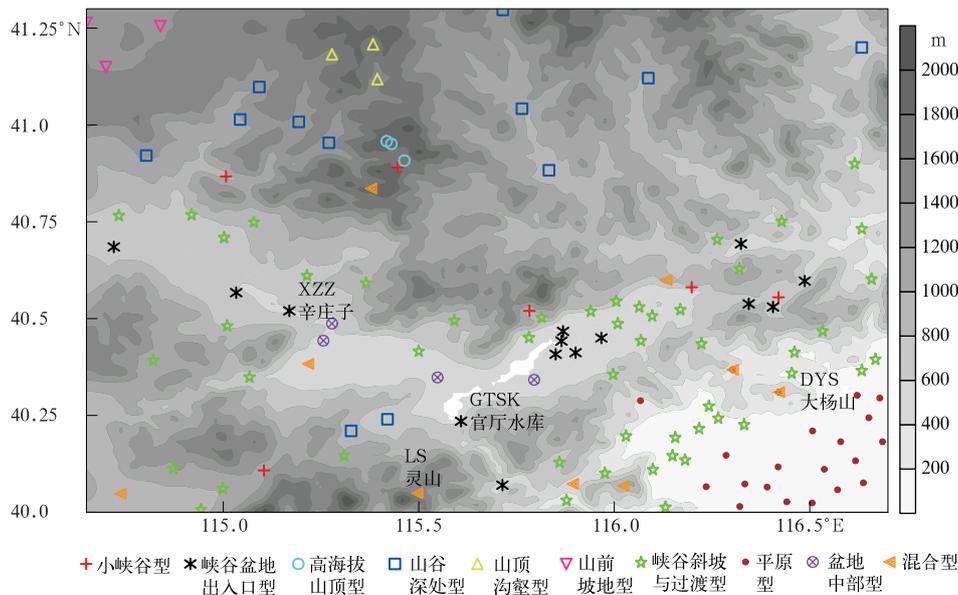


图 2 研究区域 10 种风持续性类型站点分布

(不同颜色代表不同类型, 色阶为海拔高度)

Fig.2 Station distributions of ten wind persistence types in the study area (different colors represent different types, shaded indicate topography height)

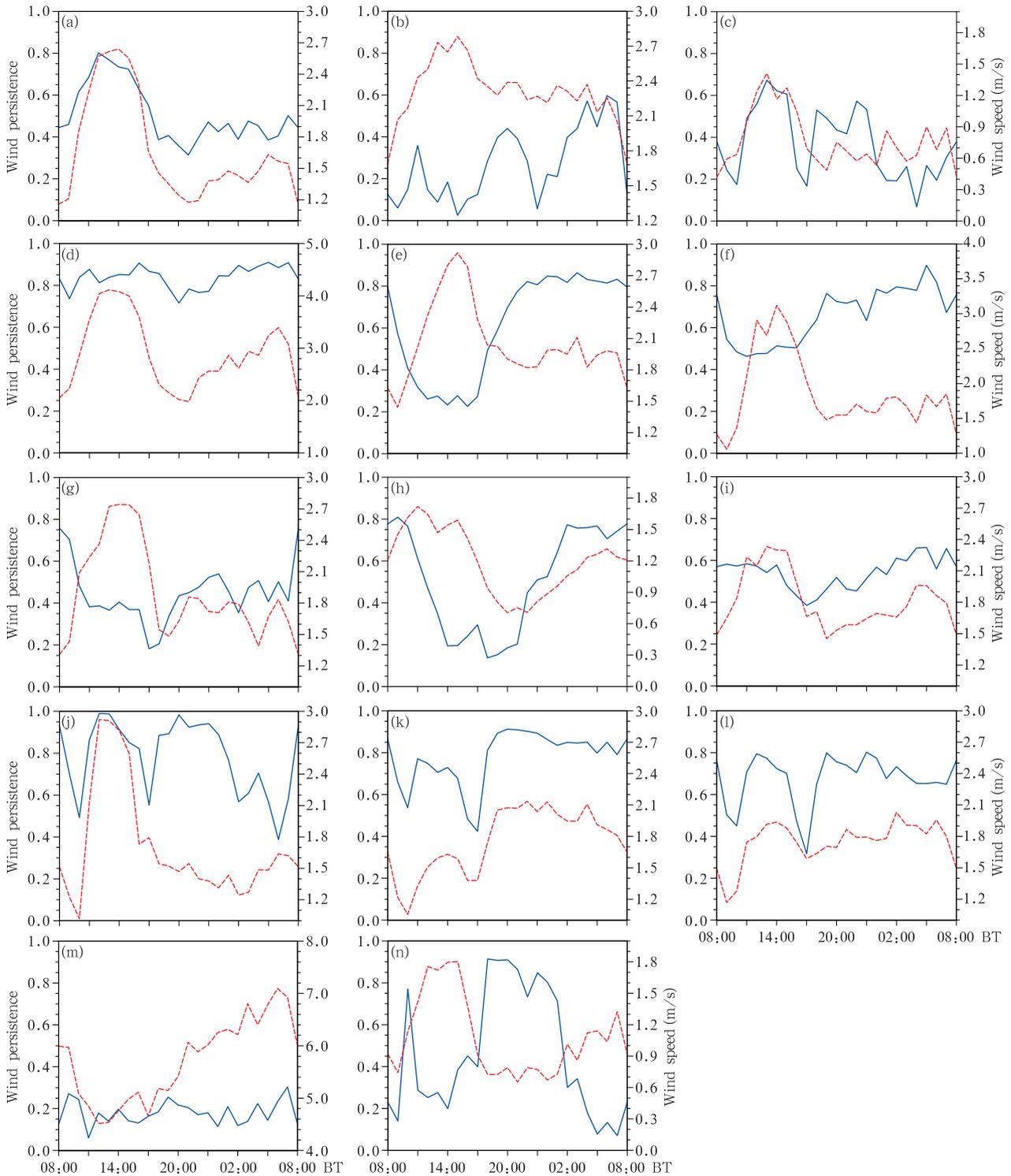


图3 每种类型代表站点风持续性(蓝色实线)和平均风速(红色虚线)的日变化

(a. 小峡谷型, b. 峡谷盆地出入口型: 辛庄子站, c. 峡谷盆地出入口型: 官厅水库站, d. 高海拔山顶型, e. 山谷深处理型, f. 山顶沟壑型, g. 山前坡地型, h. 平原型, i. 盆地中部型, j. 峡谷斜坡与过渡型: 风速单峰, k. 峡谷斜坡与过渡型: 风速白天小, l. 峡谷斜坡与过渡型: 风速平稳, m. 混合型: 灵山站, n. 混合型: 大杨山站)

Fig. 3 Diurnal variations of wind persistence (solid blue lines) and mean wind speed (red dashed lines) at representative stations for each individual types

(a. Small valley type, b. Entrance and exit of valley and basin type: XZZ, c. Entrance and exit of valley and basin type: GTSK, d. High altitude hilltop type, e. Deep valley type, f. Hilltop ravine type, g. Piedmont slope type, h. Plain type, i. Central basin type, j. Valley slope and transition type: a bimodal distribution, k. Valley slope and transition type: small during day time, l. Valley slope and transition type: the change is gentle, m. Miscellaneous type: LS, n. Miscellaneous type: DYS)

表 1 站点风持续性分类
Table 1 Wind persistence classification of stations

类别	站点个数	主要分布位置	风持续性日变化特征	平均风速日变化特征	影响因素
小峡谷型	6	相对两座山脉或高地之间较小的峡谷和沟壑中	呈单峰分布,夜间小,白天大,下午值最大	与风持续性分布一致,风速较大与风向一致的时段对应	峡谷中夜间空气收缩形成的冷池
峡谷盆地出入口型	14	小峡谷和中部盆地的入口和出口处	日变化较大,逐日风向多变	与风持续性变化相关较小,中午和下午值较大	地形的动力作用
高海拔山顶型	3	海拔较高的山顶上	一整天风持续性值均较大,变化平缓	整体较大,呈双峰分布,峰值出现在中午与凌晨,中午最大	环境背景风场
山谷深处型	12	山谷和沟壑较深处	白天小,夜间大,中午和午后的值在一天中最小	与风持续性变化相反,呈单峰分布,下午最大	白天山坡受热产生不稳定层结,与山谷温差大
山顶沟壑型	3	海拔较高的山顶沟壑中	白天小,夜间大,与山谷深处型类似,但昼夜差异小	呈单峰分布,午后值较大,但比高海拔山顶型小	白天受太阳辐射较早,但温差不显著,转化时间短
山前坡地型	3	高海拔山脉迎风坡地上	太阳加热斜坡时(08—09时)会达到最大值,夜间值大于白天	呈单峰分布,中午值最大,白天大于夜间。	山脉迎风坡上,空气层结更不稳定
峡谷斜坡与过渡型	50	峡谷和山脉的斜坡上以及与山区平原过渡区	在山风和谷风盛行时段值很大,在转换期间值较小	不同位置变化趋势不同	斜坡热力驱动的作用
平原型	19	离山区较远的平原地区	午后到夜间值较小,凌晨到上午值较大	整体较小,中午值减小,之后又增大,夜间到凌晨风达到最小值	下垫面差异,白天平原升温慢,夜间山区冷却快
盆地中部型	4	大盆地中部	风持续性值较小,变化较平缓	呈双峰分布,午后和凌晨达到两个峰值,白天值较大	动力作用(狭管效应)、峡谷热力作用
混合型	9	位置特殊、分布在各处	日变化复杂多变	日变化复杂多变	动力、热力、地形以及环境风场共同作用

点中,山顶沟壑型海拔最高,谷风时段风速的极大值也最大,山前坡地型谷风时段风速的极大值最小。风持续性的变化趋势也有一定的联系,均是白天值小夜间值大,但山顶沟壑型白天和夜间的差异没有前者大,主要原因可能是山顶处受太阳辐射时间早,空气不稳定层结发展的高度较低,转化的时间短。山前坡地型整体的风持续性比前两类站点小,主要原因可能是山脉群之前斜坡上的空气层结更不稳定。

海拔均较高的两类站点:高海拔山顶型(图 3d)和山顶沟壑型(图 3f),风持续性和平均风速演变特征也存在着显著不同。位于山顶的地方易受到背景风场的影响,风向与背景风场基本一致,因此,高海拔山顶型的风持续性值一整天均较大,不存在明显的日变化;而山顶沟壑型会受到周围山峰的阻挡,受热动力作用,存在明显日变化,白天,风向多变,风持续

性较差,而夜间边界层稳定,风向一致,风持续性较强。平均风速虽然都呈单峰分布,但是高海拔山顶型的整体平均风速特别是在夜间比山顶沟壑型大。

峡谷斜坡与过渡型主要分布在峡谷和山脉斜坡之上以及山区平原的过渡区(图 3j—l)。风持续性值在山谷风盛行时段都很大,但在转换期间值较小,平均风速受地形影响很大,风速的变化趋势在不同位置表现出不同的变化规律,共有 3 种变化特征:单峰分布,谷风时段风速大,山风风速小;谷风时段风速小,山风时段风速大;一整天风速变化都很平稳。

平原型主要分布在山区东南的平原地区(图 3h)。风持续性值在午后到夜间较小,凌晨到上午较大。由于距离山区较远,海拔较低,平均风速整体较小,中午减小,之后又增大,风速极大值不超过 2 m/s,夜间到凌晨风速达到最小值。平原型和山谷

深处型的风持续性变化趋势类似,但平原型风持续性低值出现的时间比山谷深处型晚 3—4 h。盆地中部型主要分布在大盆地中部(图 3i),风持续性值较小,变化较平缓,受周围山脉阻挡,平均风速较小,呈双峰分布,谷风时段和凌晨达到两个峰值。

混合型位置比较特殊,分布在各处,典型代表站为灵山站和大杨山站(图 3m,n),风持续性日变化特征复杂,这可能是由动力、热力、地形以及背景风场共同作用的结果。灵山站海拔较高,一整天的风持续性值都很小,平均风速非常大,中午到午后谷风盛行阶段风速相对较小;大杨山站风持续性值在深夜较大,上午到午后以及凌晨时较小,平均风速呈双峰分布,在谷风阶段最大,凌晨次之。

3.2 小风天实测风的环流特征分析

把某一时段内某站频率最大的风向(八方位计算方法)定义为该时段该站的盛行风向,该风频下的平均风速作为该时段的风速,这种方法相较风向平均,能够更加真实地反映风场的实际特征(窦晶晶等,2014)。为了更好地了解研究区域在弱环境背景风场下风向变化特征,计算了所有小风天盛行风向的水平分布(图 4)。

在两座相对山脉或高地之间的峡谷和沟壑中(小峡谷型),12—17 时(图 4c,d)有明显的上谷风,与狭管效应产生的梯度风叠加,风速增大,与风持续性高值时段相对应;夜间,下谷风与梯度风抵消风速减小,风持续性较差,逐日风向多变。这是因为峡谷中的空气在太阳落山之后迅速降温收缩,形成冷空气池,夜间冷空气池不断堆积,风向多变、风速较小;白天,空气沿上山谷方向流出冷池,风向持久稳定,风速较大(Arduini, et al, 2016; Whiteman, et al, 2001)。在这些沟壑的出入口处(峡谷盆地出入口型),风向多变,风持续性值较小。在中部盆地入口处的地方,23—08 时(图 4f,g,h,a)有从南北两侧流入盆地的冷空气,在盆地内堆积,风向较为稳定;11—14 时(图 4b,c),受太阳辐射影响,堆积的冷空气开始流出盆地,有较明显的上谷风。在盆地出口处,受狭管效应影响略弱,11—14 时(图 4b,c)大部分站点有明显的上谷风,风速也较大,20 时一次日 05 时(图 4e-h)有明显下谷风,风持续性变化较大且值较小,山谷出口处逐日风向多变。

盆地中部地区(盆地中部型)受狭管效应影响最为显著,一天大多为自西向东的上谷风,与峡谷走向

一致,风向稳定。在 08—11 时(图 4a,b)和 17—20 时(图 4d,e)风向会出现小幅度紊乱,风持续性一整天变化较小,狭管效应产生的梯度风与上谷风叠加造成风速在谷风时段(图 4b,c)很大。

即使是小风天,海拔较高的山顶处(高海拔山顶型)也会受环境背景风的影响,风向少变,白天风速明显比夜间大。海拔最高的站点基本保持偏西、偏北、偏西北风;海拔略低一些的站点,山风时段为偏西风(图 4e-h),谷风时段(图 4b,c)为偏西南风。

山谷深处靠近山体的地方(山谷深处型),风向沿着山谷轴线的方向,白天沿山谷向上吹谷风,夜间向下吹山风。白天,随着太阳加热斜坡,大约从 09 时开始不稳定边界层向上发展,风向多变(图 4b-d),风持续性值较小(Whiteman, et al, 2000),而夜间边界层稳定,风向一致,风持续性值较大。海拔较高山脉沟壑之中(山顶沟壑型),夜间(图 4e-h)沿沟壑吹向山顶,风持续性值较大,风向稳定,白天(图 4b,c)吹下山谷,持续性值略小。崇礼山区迎风坡(山前坡地型),风向有明显的日变化特征,14—17 时(图 4c,d)为西北风和东北风,沿坡向上,夜间(图 4e-h)为偏南和偏西南风,沿坡向下。

峡谷和山脉的斜坡上以及山区和平原的过渡区(峡谷斜坡与过渡型),白天有沿坡向上的谷风(图 4b,c),夜间(图 4e-h)有沿坡向下的山风。白天和夜间的风向较稳定,与风持续性的高值时段相对应,在山谷风早晚的转换时段内风向多变,风持续性值较小。风向逆转发生在 08—09 时(图 4a)和 17—18 时(图 4d)。

远离山区的平原地区(平原型),谷风阶段(图 4c,d)为偏东南、偏南风,风向多变,风速较小,与白天持续性低值时段相对应;山风时段(图 4f-h,a)多为偏西北和偏北、偏东北风,风向稳定,风速较大,与风持续性高值时段对应。谷风开始的时间为 13—14 时(图 4c),比山区开始晚且谷风持续时间也较短。

3.3 小风天实测风山谷风盛行时段特征分析

小风天实测风能较好地反映出实际山谷风的特征,对山风和谷风盛行时段的风场进行分析,能明确地对比出山风和谷风的差异。不同地形下山谷风转换时刻不同,不同山体位置风向变化也不同,根据不同地形特征以及山谷风转化时刻的差异可以将整个研究区域划分为 5 个,分别为西南涿鹿小五台山和

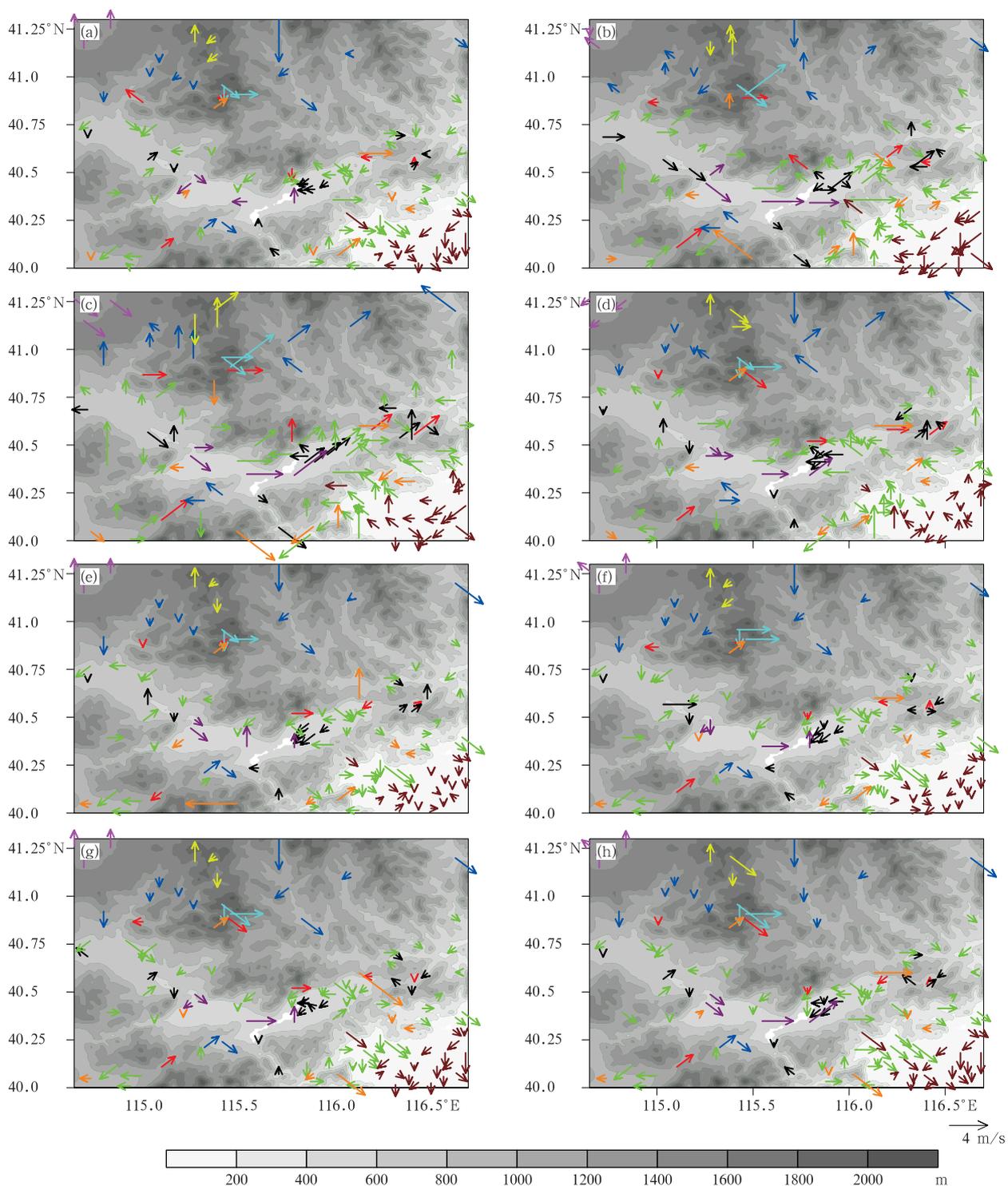


图4 研究区域小风天盛行风向逐3 h分布

(a. 08时, b. 11时, c. 14时, d. 17时, e. 20时, f. 23时, g. 02时, h. 05时;
不同颜色分别代表不同类型的站点, 与图2颜色相对应; 色阶为海拔高度)

Fig. 4 Distributions of prevailing wind directions in fair weather days in the study area at 3 hour intervals

(a. 08:00 BT, b. 11:00 BT, c. 14:00 BT, d. 17:00 BT, e. 20:00 BT, f. 23:00 BT, g. 02:00 BT, h. 05:00 BT;
different colors respectively represent different types of station, which are the same as in Fig. 2; shaded indicate topography height)

蔚县盆地区,西北崇礼山区,东北赤城、海坨以及延庆部分山区,中部洋河、怀涿、延怀盆地以及延庆、怀柔和平原区。其中,涿鹿小五台山和蔚县盆地共有 14 个站点,崇礼山区有 20 个站点,赤城海坨山区有 19 个站点,中部盆地有 28 个站点,平原地区有 42 个站点。

对研究区域内小风天盛行风向的逐时水平分布的分析可以得出,平原、山区以及盆地山风和谷风开始和结束的时间均不同(表 2)。平原地区,山风向谷风转化的时间比山区晚 2—3 h,盆地部分转化时间也比山区晚 1 h,从山区到盆地再到平原,山谷风的转化有明显渐次推进的过程。原因可能是平原地区的山谷风是尺度较大的山区平原环流,达到驱动山谷风的温差需要的时间较长;盆地升温比山区慢,地形造成的狭管效应影响显著,因此谷风出现的时间比山区晚。从整体来看,谷风的持续时间为 6—7 h,山风持续时间为 8—10 h,谷风持续时间比山风持续时间短。将山区、盆地以及平原共同的谷风和山风盛行时段:13—15 时和 03—06 时分别作为谷风和山风的代表时段,计算小风天实测风这两个时段内盛行风向的水平分布,对比分析小风天山谷风的特征(图 5)。从图 5 可以看出小风天山谷风时段的特征差异很明显,整个区域谷风时段的风速大于山风时段的风速。

表 2 各区域山风、谷风开始和结束的时刻

Table 2 Starting and ending time of mountain winds and valley winds in individual regions

	山风时段		谷风时段	
	起始	结束	起始	结束
涿鹿蔚县	22 时	07 时	10 时	16 时
崇礼山区	22 时	07 时	10 时	16 时
赤城海坨	22 时	07 时	10 时	16 时
中部盆地	23 时	08 时	11 时	16 时
平原地区	01 时	09 时	13 时	17 时

崇礼山区整体海拔较高,地形特征复杂,山脉之中的沟壑较多。在山脉和整个山前的斜坡之上符合斜坡风的特征,谷风时段为上坡风,山风时段为下坡风;在山谷沟壑之中,沿着沟壑方向,受地形作用,符合峡谷风的特征,沿沟壑谷风时段向上,山风时段向下;在海拔较高的山顶受环境风影响较大,山谷风时段均为偏西、偏北、偏西北风,风向变化不大。

赤城、海坨以及延庆山区,山脉、盆地、沟壑交错环绕。沟壑之中,受局地动力作用和沿山、谷轴线热力作用影响,峡谷风沿着山谷轴线山风时段向下,谷风时段向上;受海坨山和延怀盆地的影响,山脉和盆地相接的斜坡之上,山风时段由山脉吹向盆地,谷风时段由盆地吹向山脉。

洋河、怀涿以及延怀盆地位于南北的山脉之间,峡谷风日变化特征非常明显。地形的狭管效应会产

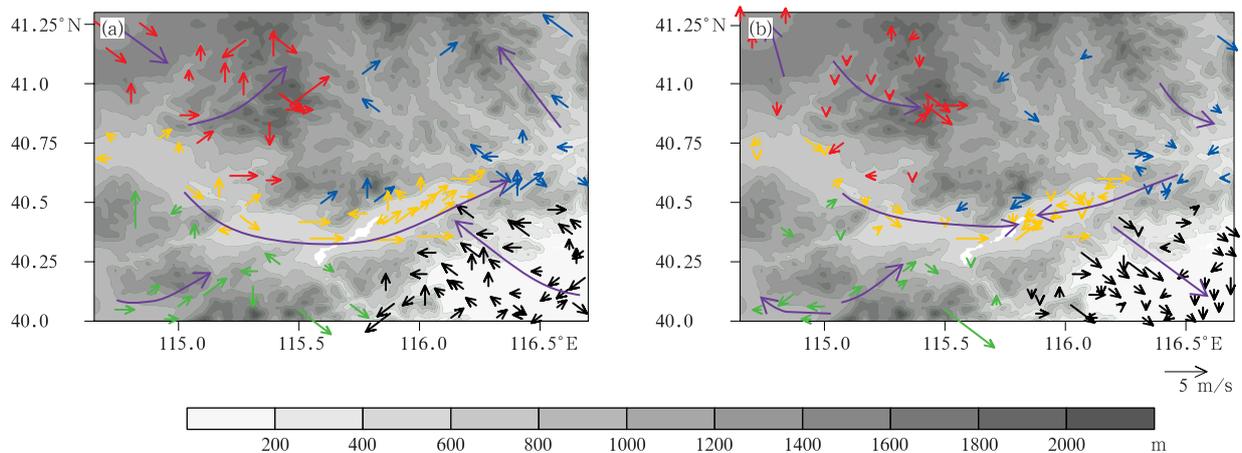


图 5 研究区域内小风天实测风水平分布

(a. 谷风时段, b. 山风时段; 红色: 崇礼山区; 蓝色: 赤城海坨;
黄色: 中部盆地; 绿色: 涿鹿蔚县; 黑色: 平原地区; 色阶为海拔高度)

Fig. 5 Horizontal distribution of measured winds in fair weather days over the study area
(a. valley wind period, b. mountain wind period; red: Chongli mountain area; blue: Chicheng Haituo;
yellow: central basin; green: Zhuolu Yuxian; black: plain area; shaded indicate topography height)

生由西向东的梯度风,沿山谷轴线的温度差异会产生白天自西向东,夜间自东向西的峡谷风,风向与盆地纵轴平行。白天梯度风和上峡谷风叠加,自西向东吹上山谷,风速较大,整个盆地中风向一致;夜间梯度风和下谷风抵消,在盆地中部梯度风较大,因此仍然是自西向东的风,但风速较小,而盆地出口处,热力作用更强,有自东向西的下峡谷风,风速较小。

涿鹿小五台地势比较高,与蔚县盆地之间的热力差异形成的山谷风日变化特征明显,谷风时段由盆地吹向山脉,山风时段由山脉吹向盆地,在山脉迎风坡和背风坡,夜间沿坡向下,白天沿坡向上;在高地之间的峡谷中,风向沿着峡谷纵轴。

延庆、怀柔 and 昌平城镇平原区,受西北、西部山区以及周围盆地的影响,构成了山区平原环流风,尺度较大,日变化环流特征明显。山风时段由周围山区从各个方向吹向平原,谷风时段从平原吹向山区。

3.4 小风天实测风与整个冬季局地风山谷风时段特征对比分析

通过以上对小风天山谷风特征的分析表明,环境风场对海拔较高的山体影响很大,复杂地形下的盆地、沟壑和峡谷等的动力作用对风场影响也很大。为了排除环境背景风场、弱化地形动力作用的影响,利用局地风分离的方法将两个冬季期间的局地山谷风从实测风中分离出来,分析区域内整个冬季局地风的山谷风特征(图6)。局地风可以近似地认为是

理论山谷风,山区、盆地、平原山谷风转化时间的差异更加明显,从山区到盆地再到平原,山风向谷风的转化有明显渐次推进的过程。整个冬季局地风的特征比小风天实测风的特征更能反映热力作用的影响,主要有以下几方面联系和差别:

(1) 在大部分的山脉斜坡上、山谷沟壑之中,小风天实测风和局地风均能体现出明显的日变化特征,山风时段沿坡、沟壑向下;谷风时段沿坡、沟壑向上;山区平原环流,风向均是山风时段由山区吹向平原,谷风时段由平原吹向山区。但局地风在山风时段和谷风时段的风速对比更加明显,谷风时段的风速明显大于山风时段的风速。

(2) 在靠近山顶处的地方,去除背景风场后,不再一直是偏西和偏西北方向的风,局地风体现出明显的日变化特征,山风时段从山顶沿坡向下,谷风时段沿坡向上。

(3) 在洋河、怀涿以及延怀盆地之中,两种方法的山谷风特征对比显著,排除环境背景风和地形狭管效应的主要影响后,整个盆地局地风日变化特征非常明显,沿着盆地轴线白天吹上盆地,夜间吹下盆地;而小风天时,盆地中部受到较强的狭管效应的影响,一整天风向基本都是西风,盆地入口处风向变化复杂,而在盆地出口处,受热力作用较显著也表现出明显的日变化。

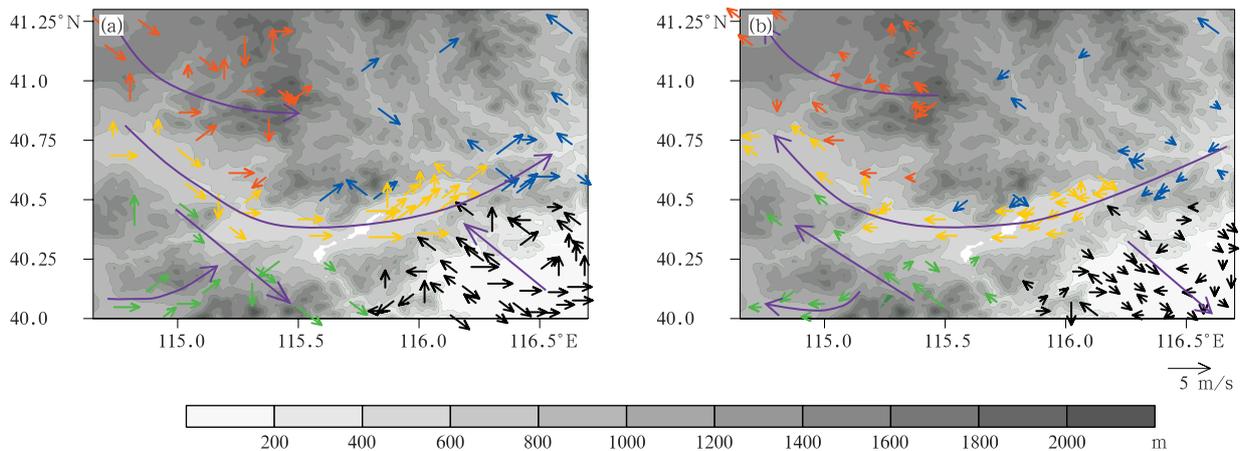


图6 研究区域内冬季局地风水平分布

(a. 谷风时段, b. 山风时段; 红色:崇礼山区; 蓝色:赤城海坨;
黄色:中部盆地; 绿色:涿鹿蔚县; 黑色:平原地区; 色阶为海拔高度)

Fig. 6 Horizontal distributions of local winds during the entire wintertime over the study area

(a. valley wind period, b. mountain wind period; red: Chongli mountain area; blue: Chicheng Haituo; yellow: central basin; green: Zhuolu Yuxian; black: plain area; shaded indicate topography height)

4 结论与讨论

基于2016—2017年两年冬季自动气象站的逐时观测资料以及探空数据分析了京津冀地区复杂地形下小风天风持续性和平均风速的日变化特征以及风场环流特征,并用整个冬季的局地风与小风天实测风的山谷风时段的特征进行对比,主要结论如下:

(1) 复杂地形下不同位置受环境风场、地形动力、热力作用的影响不同,根据小风天风持续性日变化特征差异,可将区域内所有站点分为10种类型。不同类型分布不同,分别代表不同局地地形的影响。

(2) 小风天实测风能反映山谷风的实际特征,不同地形对山谷风转化时间以及盛行风向的影响不同,研究区域内山谷风主要包括斜坡风、峡谷风以及山区平原环流。

山风比谷风持续时间长,风速小;山谷风相互转化的时间是山区最早,盆地次之,平原最晚;在高海拔的山顶处,受环境风场影响显著,风向没有明显日变化;在山脉和山谷的斜坡主要是斜坡风,谷风时段上坡风,山风时段下坡风;在沟壑、盆地和峡谷之中主要是峡谷风,风向与山谷的纵轴平行,夜间吹下山谷,白天吹上山谷;在较大的盆地之中,地形狭管作用产生梯度风,白天与谷风叠加,增强上峡谷风,夜间与山风抵消,削弱下峡谷风;平原区受周围山脉和盆地的影响,构成尺度较大的山区平原环流,山风时段由周围山区从各个方向吹向城区,谷风时段从城区吹向山区。

(3) 排除环境背景风场以及弱化部分地形动力作用的影响得到整个冬季的局地风,可以作为热力作用为主导产生的理论山谷风,其特征比小风天实测风更明显。即使在高海拔山顶,以及较大的峡谷盆地也表现出明显的日变化,也更体现出山谷风由山地向平原渐次推进的过程。

综上所述,对不同地形特征下冬季晴朗小风天实测风场变化规律做了分析,并与排除背景风后的局地风环流特征做对比,揭示了复杂地形下山谷风的变化规律,对冬季风场的预报具有参考价值。但是,文中仅讨论了冬季近地面复杂地形风场精细化时、空分布特征以及山谷风演变特征,没有考虑温度和湿度等其他气象要素的时、空演变;另外,由于观测资料有限,高空风场的时空变化特征、风场对局地天气的影响等方面还有待结合数值模拟的方法做进

一步的探究。

参考文献

- 蔡旭晖, 郭昱, 刘辉志等. 2002. 北京地区低层大气流动模态研究. 北京大学学报(自然科学版), 38(3): 387-392. Cai X H, Guo Y, Liu H Z, et al. 2002. Flow patterns of lower atmosphere over Beijing area. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 38(3): 387-392 (in Chinese)
- 曹渐华, 刘熙明, 李国平等. 2015. 鄱阳湖地区湖陆风特征及成因分析. 高原气象, 34(2): 426-435. Cao J H, Liu X M, Li G P, et al. 2015. Analysis of the phenomenon of lake-land breeze in Poyang Lake area. Plateau Meteor, 34(2): 426-435 (in Chinese)
- 陈万隆. 1979. 峡谷中风状况的分析. 南京气象学院学报, (S1): 28-33. Chen W L. 1979. Analysis of the condition of wind in valley. J Nanjing Inst Meteor, (S1): 28-33 (in Chinese)
- 董群, 赵普生, 王迎春等. 2017. 北京山谷风环流特征分析及其对PM_{2.5}浓度的影响. 环境科学, 38(6): 2218-2230. Dong Q, Zhao P S, Wang Y C, et al. 2017. Impact of mountain-valley wind circulation on typical cases of air pollution in Beijing. Environ Sci, 38(6): 2218-2230 (in Chinese)
- 窦晶晶, 王迎春, 苗世光. 2014. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征. 应用气象学报, 25(5): 559-569. Dou J J, Wang Y C, Miao S G. 2014. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area. J Appl Meteor Sci, 25(5): 559-569 (in Chinese)
- 窦以文, 屈玉贵, 陶士伟等. 2008. 北京自动气象站实时数据质量控制应用. 气象, 34(8): 77-81. Dou Y W, Qu Y G, Tao S W, et al. 2008. The application of quality control procedures for real-time data from automatic weather stations. Meteor Mon, 34(8): 77-81 (in Chinese)
- 傅抱璞. 1997. 由测风资料推算局地环流速度的方法. 气象科学, 17(3): 258-267. Fu B P. 1997. A method of calculating the velocity of local circulation by wind observational data. Sci Meteor Sinica, 17(3): 258-267 (in Chinese)
- 霍文, 杨青, 艾力·买买提明等. 2005. 天山北坡四工河流域6月山谷风特征分析. 新疆气象, 28(6): 17-19. Huo W, Yang Q, AlioMamtimin, et al. 2005. The characteristic of mountain and valley breezes in June in Tianshan mountains four work river areas. Bimonthly Xinjiang Meteor, 28(6): 17-19 (in Chinese)
- 李国平. 2016. 近25年来中国山地气象研究进展. 气象科技进展, 6(3): 115-122. Li G P. 2016. Progress and prospects in research of mountain meteorology in China during the past 25 years. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 115-122 (in Chinese)
- 林之光. 1981. 我国山区气候的研究. 气象, (1): 27-28. Lin Z G. 1981. The study on the mountain climate in China. Meteor Mon, (1): 27-28 (in Chinese)
- 刘敏, 孙杰, 杨宏青等. 2010. 湖北省不同地形条件下风随高度变化研究. 气象, 36(4): 63-67. Liu M, Sun J, Yang H Q, et al.

2010. The study on wind speed change with height under different terrain conditions in Hubei Province. *Meteor Mon*, 36(4): 63-67 (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. *中国科学 D 辑: 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. *Sci China Ser D Earth Sci*, 52(3): 382-392
- 刘欣, 隆霄, 张文煜等. 2013. 青海湖对局地降雪过程中大气特征影响的数值模拟. *兰州大学学报(自然科学版)*, 49(3): 347-353. Liu X, Long X, Zhang W Y, et al. 2013. Numerical simulation research into atmospheric characteristics influenced by Qinghai Lake in the process of local snowfall. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 49(3): 347-353 (in Chinese)
- 麦子, 李英, 魏娜. 2017. 登陆热带气旋在鄱阳湖区的活动特征及原因分析. *大气科学*, 41(2): 385-394. Mai Z, Li Y, Wei N. 2017. Characteristics of landfalling tropical cyclone activities over the Poyang Lake basin and mechanisms analysis. *Chinese J Atmos Sci*, 41(2): 385-394 (in Chinese)
- 邱晓暖, 范绍佳. 2013. 自动气象站资料在海陆风等局地环流研究中的应用. *中山大学学报(自然科学版)*, 52(2): 133-136. Qiu X N, Fan S J. 2013. Study on the application of auto-meteorological station data in local circulations analysis such as the sea-land breeze. *Acta Sci Nat Univ Sunyats*, 52(2): 133-136 (in Chinese)
- 覃军, 袁业畅, 李燕等. 2001. 山区复杂地形条件下的风场分析. *气候与环境研究*, 6(4): 493-497. Qin J, Yuan Y C, Li Y, et al. 2001. A study of wind system in a sophisticated relief in mountain area. *Clim Environ Res*, 6(4): 493-497 (in Chinese)
- 汤浩, 李如琦, 贾丽红. 2011. 新疆“2.28”大风的中尺度数值模拟. *气象*, 37(11): 1365-1371. Tang H, Li R Q, Jia L H. 2011. Mesoscale numerical simulation of the 28 February 2007 gale in Xinjiang. *Meteor Mon*, 37(11): 1365-1371 (in Chinese)
- 王伯明. 2004. 基本气象资料质量控制综合判别法的研究. *应用气象学报*, 15(S1): 50-59. Wang B M. 2004. A study on synthetic differentiation method for basic meteorological data quality control. *J Appl Meteor Sci*, 15(S1): 50-59 (in Chinese)
- 王瑾, 张镭, 王腾蛟等. 2012. 兰州附近山谷典型日环流特征对比分析. *干旱气象*, 30(2): 169-177. Wang J, Zhang L, Wang T J, et al. 2012. Comparative analysis of mountain-valley wind circulation characteristics over semi-arid areas nearby Lanzhou. *J Arid Meteor*, 30(2): 169-177 (in Chinese)
- 王腾蛟, 张镭, 张博凯等. 2013. 城市下垫面对河谷城市兰州冬季热岛效应及边界层结构的影响. *气象学报*, 71(6): 1115-1129. Wang T J, Zhang L, Zhang B K, et al. 2013. The impacts of urban underlying surface on the winter urban heat island effect and the boundary layer structure over the valley city Lanzhou. *Acta Meteor Sinica*, 71(6): 1115-1129 (in Chinese)
- 席世平, 寿绍文, 郑世林等. 2007. 复杂地形下山谷风的数值模拟. *气象与环境科学*, 30(3): 41-44. Xi S P, Shou S W, Zheng S L, et al. 2007. Numerical simulation of mountain-valley wind in the complex terrain. *Meteor Environ Sci*, 30(3): 41-44 (in Chinese)
- 谢祖镇. 1981. 山谷谷口大风的形成条件及形成机制. *新疆大学学报(自然科学版)*, (2): 29-40. Xie Z Z. 1981. A formation theory of the windstorm at the mouth of a mountain valley. *J Xinjiang Univ (Nat Sci Ed)*, (2): 29-40 (in Chinese)
- 杨萍, 刘伟东, 仲跻芹等. 2011. 北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估. *应用气象学报*, 22(6): 706-715. Yang P, Liu W D, Zhong J Q, et al. 2011. Evaluating the quality of temperature measured at automatic weather stations in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 22(6): 706-715 (in Chinese)
- 杨洋, 唐贵谦, 吉东生等. 2015. 夏季局地环流对京津冀区域大气污染影响. *环境工程学报*, 9(5): 2359-2367. Yang Y, Tang G Q, Ji D S, et al. 2015. Effects of local circulation on atmospheric pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei region during summer. *Chinese J Environ Eng*, 9(5): 2359-2367 (in Chinese)
- 游春华, 蔡旭晖, 宋宇等. 2006. 京津地区夏季大气局地环流背景研究. *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. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 42(6): 779-783 (in Chinese)
- 张人文, 范绍佳, 李颖敏. 2012. 2008年秋季从化山谷风观测研究. *热带气象学报*, 28(1): 134-139. Zhang R W, Fan S J, Li Y M. 2012. Observational study of mountain-valley breeze over Conghua in 2008 Fall. *J Trop Meteor*, 28(1): 134-139 (in Chinese)
- 张耀存. 1995. 植被对山谷风环流形成与演变过程影响的数值试验. *气象科学*, 15(3): 245-253. Zhang Y C. 1995. Numerical experiments of the effects of vegetation of mountain-valley wind circulation. *Sci Meteor Sinica*, 15(3): 245-253 (in Chinese)
- 郑祚芳, 任国玉, 王耀庭等. 2017. 大型人工湖气候效应观测研究: 以密云水库为例. *地理科学*, 37(12): 1933-1941. Zheng Z F, Ren G Y, Wang Y T, et al. 2017. Observational study on climate effect of large artificial lake: Taking Miyun reservoir as an example. *Sci Geogra Sinica*, 37(12): 1933-1941 (in Chinese)
- Arduini G, Staquet C, Chemel C. 2016. Interactions between the nighttime valley-wind system and a developing cold-air pool. *Bound Layer Meteor*, 161(1): 49-72
- Barr S, Orgill M M. 1989. Influence of external meteorology on nocturnal valley drainage winds. *J Appl Meteor*, 28(6): 497-517
- Cogliati M G, Mazzeo N A. 2006. Air flow analysis in the upper Rio Negro Valley (Argentina). *Atmos Res*, 80(4): 263-279
- Doran J C. 1991. The effects of ambient winds on valley drainage flows. *Bound Layer Meteor*, 55(1-2): 177-189
- Haiden T, Whiteman C D. 2005. Katabatic flow mechanisms on a low-angle slope. *J Appl Meteor*, 44(1): 113-126
- Hawkes H B. 1947. Mountain and valley winds with special refer-

- ence to the diurnal mountain winds of the Great Salt Lake region [D]. Ohio: Ohio State University
- Jin L L, Li Z J, He Q, et al. 2016. Observation and simulation of near-surface wind and its variation with topography in Urumqi, West China. *J Meteor Res*, 30(6): 961-982
- McKee T B, O'Neal R D. 1989. The role of valley geometry and energy budget in the formation of nocturnal valley winds. *J Appl Meteor*, 28(6): 445-456
- Nicholls J M. 1973. *The Airflow over Mountains: Research 1958 - 1972*. WMO Tech. Note 127, Geneva; World Meteorological Organization, 72
- Whiteman C D, Barr S. 1986. Atmospheric mass transport by a long-valley wind systems in a deep Colorado valley. *J Climate Appl Meteor*, 25(9): 1205-1212.
- Whiteman C D. 1990. Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain//Banta R M, Berri G, Blumen W, et al. *Atmospheric Processes over Complex Terrain*. Boston, MA: American Meteorological Society
- Whiteman C D, Doran J C. 1993. The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley. *J Appl Meteor*, 32(11): 1669-1682
- Whiteman C D, Bian X D, Sutherland J L. 1999. Wintertime surface wind patterns in the Colorado River valley. *J Appl Meteor*, 38(8): 1118-1130
- Whiteman C D, Zhong S, Bian X, et al. 2000. Boundary layer evolution and regional-scale diurnal circulations over the Mexico Basin and Mexican Plateau. *J Geophys Res*, 105(D8): 10081-10102
- Whiteman C D. 2000. *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. New York: Oxford University Press, 355pp
- Whiteman C D, Zhong S, Shaw W J, et al. 2001. Cold pools in the Columbia Basin. *Wea Forecasting*, 16(4): 432-447
- Zardi D, Whiteman C D. 2013. Diurnal mountain wind systems//Chow F K, De Wekker S F J, Snyder B J. *Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenges*. Dordrecht: Springer