

李炬,程志刚,张京江,等,2020.小海坨山冬奥赛场气象观测试验及初步结果分析[J].气象,46(9):1178-1188. Li J, Cheng Z G, Zhang J J, et al, 2020. Meteorological field experiment and preliminary analysis result in the Winter Olympic Venue in Xiaohaituo Mountain[J]. Meteor Mon, 46(9):1178-1188(in Chinese).

小海坨山冬奥赛场气象观测试验及初步结果分析*

李 炬 程志刚 张京江 窦有俊

北京城市气象研究院,北京 100089

提 要: 2017 年 1—3 月,在北京延庆小海坨冬奥赛场周边开展了复杂地形综合气象观测试验,建立了由 7 个自动气象站、17 个便携温湿度观测仪(HOBO)和 2 个综合观测站组成的观测网,开展了为期 7 d 的 GPS 探空加密观测。基于加密观测资料,对比了不同海拔高度的地面观测站获取的温度廓线与探空观测的温度廓线之间的差异,捕捉到了对冬奥赛事有重要影响的半山腰云,并对其特征进行了初步分析。有半山腰云的时段,地面风向日变化特征明显,半山腰云主要出现在海拔 1 100~1 700 m 高度,在探空观测上表现为饱和水汽层。一般而言,半山腰云的云顶对应于逆温层底,云顶上方有逆温层覆盖,夜间,受下坡风和向下谷风影响,云层下方多为西北风或偏西风,云层内全天多为弱偏东风或东南风。在半山腰云顶及逆温层顶之上,有明显的偏西风或西北风。初步分析结果表明,背风坡下沉气流形成的逆温层以及大范围偏东风水汽输送可能是半山腰云产生的主要原因。

关键词: 小海坨山,冬奥会,半山腰云,自动气象站

中图分类号: P437

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.005

Meteorological Field Experiment and Preliminary Analysis Result in the Winter Olympic Venue in Xiaohaituo Mountain

LI Ju CHENG Zhigang ZHANG Jingjiang DOU Youjun

Institute of Urban Meteorology, Beijing 100089

Abstract: From January to March 2017, we carried out an integrated field experiment in complex terrain of Winter Olympic Venue in Xiaohaituo Mountain of Beijing. The observation network consisted of 7 automatic weather stations (AWSs), 17 HOBO temperature and humidity data-loggers and 2 comprehensive super stations. During the 7 d intensive observing period (IOP), GPS radiosondes were launched every three hours. In this paper, the temperature profiles based on AWSs and HOBOs are compared with radio sounding temperature profiles. Based on the data of IOP, the characteristics of mid-mountain clouds (MMC) that have critical negative effects on alpine skiing are preliminarily analyzed. The results show that when MMC occurs, there are diurnal variations in surface wind direction. MMC tends to occur between 1 100 m and 1 700 m above ASL, shown up as a saturated moisture layer by radio soundings. In general, the top of MMC is at same height of the bottom of inversion layer, below which MMC exists. During nighttime, affected by downslope winds and down-valley winds, wind directions are more northwesterly or westerly below MMC. Inside MMC, winds blow more easterly or southeasterly at lower speeds through the day. Above MMC and inversions, westerly or northwesterly winds are obvious. Leeward subsidence-induced inversions and easterly moisture transportation in large scope could be the main causes for the MMC in Xiaohaituo Mountain.

* 国家自然科学基金项目(41875123)、国家重点研发计划(2018YFF0300101)和北京市科技计划项目(D171100000717003)共同资助

2019 年 9 月 25 日收稿; 2020 年 5 月 28 日收修定稿

第一作者:李炬,主要从事城市气象大气边界层研究. E-mail: jli@ium. cn

Key words: Xiaohaituo Mountain, Winter Olympic Games, mid-mountain clouds, automatic weather station (AWS)

引 言

气象条件对能否成功举办冬奥会和冬残奥会至关重要。气温、湿度、能见度、风等气象要素对赛事活动、日程安排、造雪和储雪以及运动员发挥会产生不利影响。一些极端气象条件甚至可能威胁到运动员、工作人员、观众及相关人员的安全(Chen et al, 2018)。因此,历届冬奥会主办国都非常重视与冬奥会相关的气象观测、预报和服务保障工作(Horel et al, 2002; Doyle et al, 2006; Kiktev et al, 2017)。我国成功获得了2022年冬奥会和冬残奥会的举办资格,冬奥气象服务和保障面临着巨大的挑战(李元寿等, 2017)。小海坨山位于北京市延庆区张山营镇与河北省赤城县交界处,是北京2022年冬奥会延庆赛区所在地,正在建设国家高山滑雪中心、国家雪车雪橇中心两个竞赛场馆和延庆冬奥村、山地新闻中心两个非竞赛场馆。小海坨山地形地貌复杂,海拔高度差大,国家高山滑雪中心的雪道将在此依山而建。雪道起点位于山顶,终点在山谷,落差高达900 m。复杂的山地、地形环境,往往会形成局地山地小气候、特殊的山地天气现象(Whiteman, 2000; 李国平, 2016)和局地地形环流(郑祚芳等, 2018),给位于山区的冬奥赛场带来不利于赛事活动的“高影响天气”。因此需要建立有针对性的观测网,提高天气预报水平,为冬奥赛事提供精准的气象服务和保障(Pigol' tsina and Zinov' eva, 2015; Kiktev et al, 2017; Sarychev et al, 2015)。

我国已经在青藏高原开展了大量复杂地形科学试验和山地气象学研究,另外在祁连山、贺兰山、西南山地、南岭等地也开展了山地气象观测试验(李国平, 2016),但尚未在2022年冬奥会张家口和延庆赛区的山地开展复杂地形气象观测试验。针对小海坨冬奥赛场气象保障和服务需求,北京市气象局于2014年在小海坨山建立了由4个自动气象站组成的梯度观测系统。张治国等(2017)利用该系统获取的观测资料分析了2014年、2015年冬季小海坨山近地面风场特征。贾春晖等(2019)利用张家口—延

庆地区的地面自动气象站资料(包括部分冬奥自动气象站),根据风的持续性特征对测站进行了分类,分析了该地区冬季山谷风特征。上述工作,在一定程度上填补了该地区山地气象观测和研究的空白。但是由于观测站点稀少,特别是缺少气象要素的垂直观测,还无法很好地认识该地区的山地气象特征及复杂地形对当地天气的影响。在北京市科学技术委员会支持下,北京城市气象研究院联合中国科学院大气物理研究所和北京市人工影响天气办公室,于2017年和2018年的1—3月期间在小海坨山赛场及周边开展了2次复杂地形气象综合观测试验。其主要目标是获取小海坨山不同天气条件下气象要素的垂直分布,特别是对冬奥赛事有高影响的天气过程加密观测资料,增进对该地区风场、温度场基本特征的认识。本文介绍了2017年1—3月期间的气象综合观测试验的情况,对加密观测期的数据进行了分析,比较了基于地面观测站与探空获取的温度廓线的差异,对捕捉到的半山腰地形云的特征和形成机理进行了初步分析。

1 外场观测试验

根据小海坨山地形地貌特点,综合考虑冬奥高山滑雪赛道分布,对观测站点和仪器进行了综合布设(图1)。各站点采用的仪器信息详见表1。北京市气象局在该区域建有5个自动站,分别是:小海坨站(海拔为2108 m),位于小海坨山主峰西侧山脊上;二海坨站(海拔为1805 m),位于主峰东侧山脊;长虫沟站(海拔为1316 m),位于高山滑雪赛道终点附近;西大庄科站(海拔为928 m),位于山谷西大庄科村东北方向高地上;松山站(海拔为745 m),位于峡谷中。此外,在小海坨山西北方向山坡上,新建了大气所1号站(IAP1),用于上游天气背景的观测。在小海坨主峰西侧山脊,新建了大气所2号站(IAP2)。在延庆盆地与小海坨山谷交界处的佛峪口水库附近,新建了大气所3号站(IAP3)。IAP1和IAP2于2017年1月6日建成并开始观测,IAP3因场地协调导致建站计划延误,于1月23日建成运行。

表 1 主要观测站点和仪器

Table 1 Instrumentation of the main observation sites

站名	站名缩写	仪器名称	仪器型号	数量
西大庄科	XDZK	风廓线雷达	CFL-06	1
		多普勒激光雷达	WINDCUBE 100S	1
		微脉冲激光雷达	Min-MPL	1
		微波辐射计	TP/WVP-3000	1
		GPS 探空	GPS-BL	1
		自动气象站	CAWS600	1
阎家坪	YJP	风廓线雷达(车载)	AIRDA-3000	1
		云雷达	HBM-KST	1
		云高仪	CL31	1
		自动气象站	MAWS201	1
小海坨	XHT	自动气象站	MAWS301	1
二海坨	EHT	自动气象站	MAWS301	1
长虫沟	CCG	自动气象站	MAWS301	1
松山	SS	自动气象站	CAWS600	1
大气所 1 号站	IAP1	自动气象站	VAISALA MAWS201	1
大气所 2 号站	IAP2	自动气象站	VAISALA MAWS201	1
大气所 3 号站	IAP3	自动气象站	VAISALA MAWS201	1
便携温湿度观测站	HOBO01~HOBO17	自动气象站	U23-002	17

以北京市人工影响天气办公室阎家坪站和北京市气象局西大庄科站为依托,建立了两个综合超级观测站。西大庄科站配备了风廓线雷达、地基微波辐射计、多普勒激光雷达、微脉冲激光雷达各 1 台。其中,多普勒激光雷达采用 DBS(Doppler beam swing)(即用 1 个垂直波束和多个斜波束交替扫描来获取风廓线)与 RHI(range height indicator)(即固定方位角改变仰角方式进行扫描以获取径向速度)两种观测模式进行交替观测,以获取垂直风廓线及指向山谷的 RHI 扫描的径向风场。阎家坪站位于 X012 公路北京与河北交界的垭口处,海拔为 1344 m。该站配有车载风廓线雷达、云雷达、云高仪和自动气象站等设备。

加密探空观测设在西大庄科站附近的村庄内。探空仪器设备采用南京信息工程大学研发的边界层小球 GPS 探空系统和 GPS-BL 探空仪(韩彦霞等,2017;朱莘等,2018),其探测高度在 4 km 左右。根据中短期天气预报,确定 1 月 10—17 日为加密观测期。在加密观测期间,每 3 h 施放 1 次探空,每天探空时间分别为 02、05、08、11、14、17、20、23 时(北京时间)。便携温湿度记录仪(HOBO)体积小,耐用性高,且价格便宜,可以长时间在野外自动观测和记录气温、湿度数据,是山地气象研究学者经常使用的观测设备。我国学者(郑成洋和方精云,2004;田杰等,

2013;Wang et al,2017)以及国外学者(Lundquist and Cayan,2007;Lehner et al,2016)利用架设在不同海拔高度的 HOBO,来获得山区气温垂直变化。在此次观测试验中,从西大庄科站向小海坨主峰方向,沿山谷、山坡、赛道和山脊依次布设了 17 个 HOBO。仪器架设在离地 1.5 m 左右的树干上,并安装了厂家提供的防辐射罩。在布设 HOBO 之前,将其架设在西大庄科观测场,并与观测场内自动气象站观测的温度湿度进行了为期 1 周的平行对比观测。两种仪器观测的气温和相对湿度的均方根误差分别小于 0.5℃和 2.5%,观测结果之间有很好的的一致性和可比性。

2 加密观测期数据初步分析

2.1 天气过程分析

在加密观测期,进行了每 3 h 一次的加密探空观测,7 d 总计开展了 54 次探空观测。加密观测期间包含了晴朗大风、多云小风和霾等天气过程。图 2 为西大庄科站加密观测期不同气象要素的时间演变。以 1 月 14 日为界,前期地面以西风和西北风为主,风速较大。其间 12 日受到补充冷空气对应的副冷锋过境影响,气压明显下降气温降低。14 日,

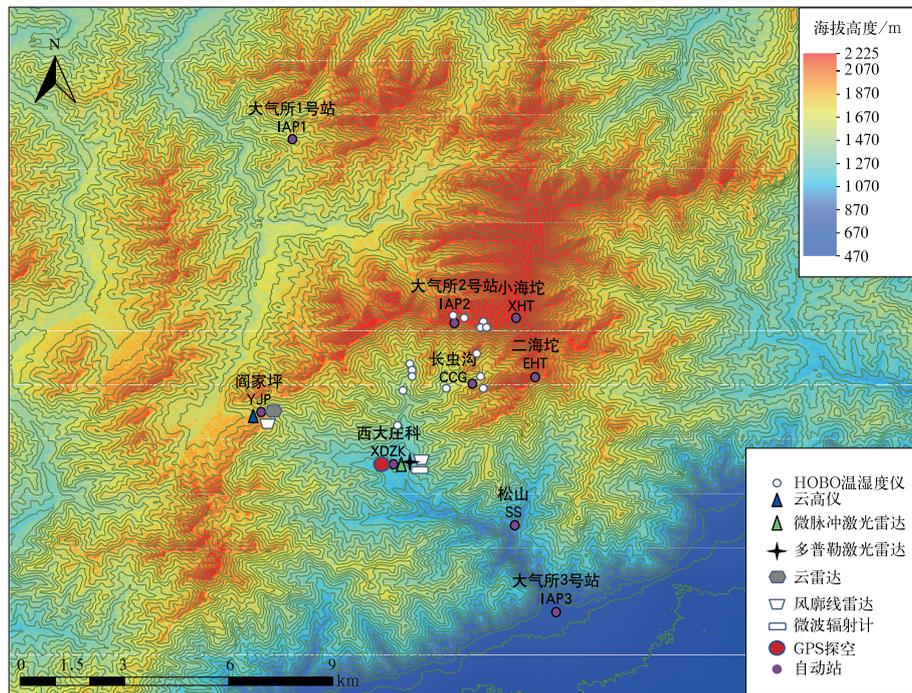


图1 小海坨奥运赛场周边观测站点和仪器分布

Fig. 1 Instrumentation and sites in and around Xiaohaituo Winter Olympic Venue

地面受高压控制,地面风向呈现出明显的日变化,风速减弱,相对湿度逐渐升高。17日上午,风速增大,同时伴有气温的快速升高和相对湿度的快速降低。图3为加密观测期大气所铁塔140 m高度(IAP140 m)、IAP1和IAP2观测的太阳向下短波辐射(DSR)和向上短波辐射(USR)。14日及之前,城区(大气所铁塔)和山区(IAP1和IAP2)的DSR差异较小,DSR日最大值在 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。自15日开始,天空云量增多,IAP1和IAP2的DSR较前期略有减小。15日云以低云为主,且云顶高度低于IAP2所在位置高度,结合卫星云图可以判定低云未能越过小海坨山脊进而影响到IAP1所在北部地区(见2.3节)。这期间,城区受到大范围雾-霾影响。城区DSR日最大值仅为山区的一半左右,在16日出现了整个过程的最低值 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。IAP2的USR较IAP1和城区明显偏高,主要是由于IAP2所在山脊存在积雪反射了更多的短波辐射所致。

2.2 地面与探空观测的温度廓线对比

利用地面不同海拔高度自动气象站和便携温湿度观测站的气温观测数据可以近似地反映出大气温度垂直分布(田杰等,2013;Wang et al,2017;Lehner et al,2016)。借助于本试验开展的加密探空观

测,通过比较相同或相近高度上探空与地面观测的气温数据,可以检验基于地面不同高度测温数据获取大气温度廓线方法在该地区的适用性。挑选了不同海拔高度的3个自动气象观测站和5个便携温湿度观测站作为地面代表站(表2),计算了地面代表站与39次探空观测的气温差值并绘制了箱线图(图4)。总的来说,相同高度上地面观测的气温较探空观测的气温偏低。由于不能排除两种设备采用不同温度传感器可能会导致系统性观测偏差,因此今后还需要对两种设备的测温传感器做进一步的平行对比观测。地面与探空观测的温度偏差其平均值和中值均在 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ 范围波动。在海拔较高的测站(如长虫沟、小海坨站),两种设备观测的温度偏差离散度一般较大。在海拔较低的测站,温度偏差的离散度一般也较小。这与探空仪在初始上升阶段与地面站之间的水平偏移量较小有关。随着探空仪不断升高,在逐渐增强的高空风作用下探空仪在水平方向会有较大偏移,更有可能造成与海拔较高测站之间更大的水平位置差异,从而导致在较高海拔高度上的温度偏差离散度较大。

对1月16日的观测数据做进一步分析,发现在探空和地面观测的温度廓线上都有存在着明显的逆温层(图5)。不同时刻的探空观测结果显示逆温层

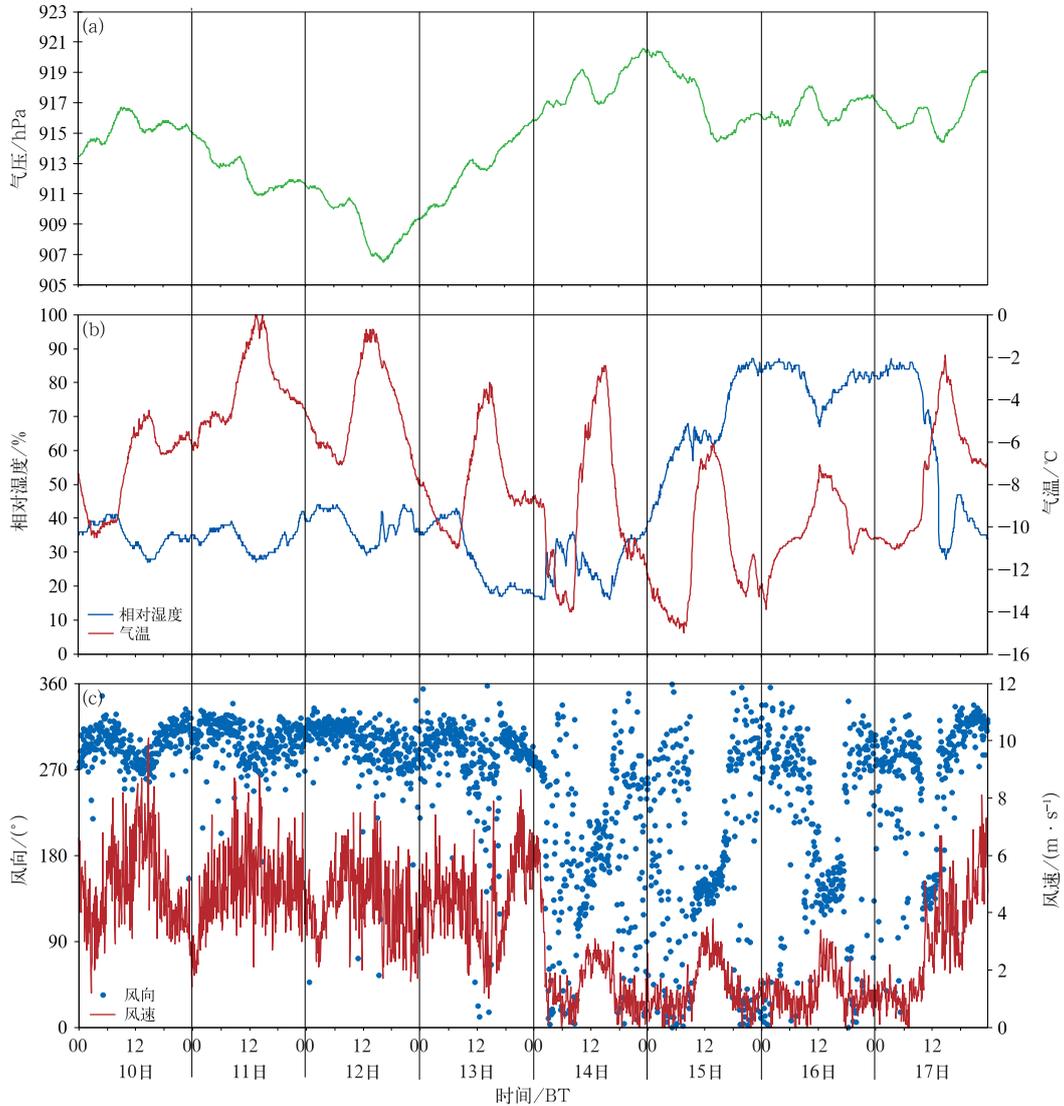


图 2 2017 年 1 月 10—17 日加密观测期西大庄科观测站气象要素时间演变

(a)气压,(b)气温(红线)和相对湿度(蓝线),(c)风向(蓝点)和风速(红线)

Fig. 2 (a) Pressure, (b) temperature (red line) and relative humidity (blue line), (c) wind direction (blue dots) and wind speed (red line) at XDZK Station during the intensive observing period (IOP) in 10—17 January 2017

表 2 与探空观测温度廓线进行对比所选择的
不同高度地面代表站

Table 2 Selected surface AWSs and HOBs for
temperature profile comparison with radiosonde

测站	海拔高度/m	仪器型号
XDZK(西大庄科)	928	CAWS600
HB03	1014	U23-002
CCG(长虫沟)	1316	MAWS301
HB01	1400	U23-002
HB02	1470	U23-002
HB15	1710	U23-002
HB05	1900	U23-002
XHT(小海坨)	2108	MAWS301

底在海拔1300~1600 m。基于地面代表站的温度观测构建的温度廓线(红色点划线)其起始点位于西大庄科站,而探空观测的起始点在该站附近200 m之外的村庄上空。探空仪在上升过程中不仅相对于施放地点的水平偏移会增加,而且与相同海拔高度的地面观测站的实际位置之间也存在着水平位置差。受同一高度上两种观测实际水平位置差异影响,造成地面观测温度廓线的起始点温度要高于相同高度的探空观测值。分析探空仪的GPS地理位置坐标,发现在上升过程中如海拔低于1600 m探空仪较地面施放点附近的水平漂移较小,可以近似认为1600 m

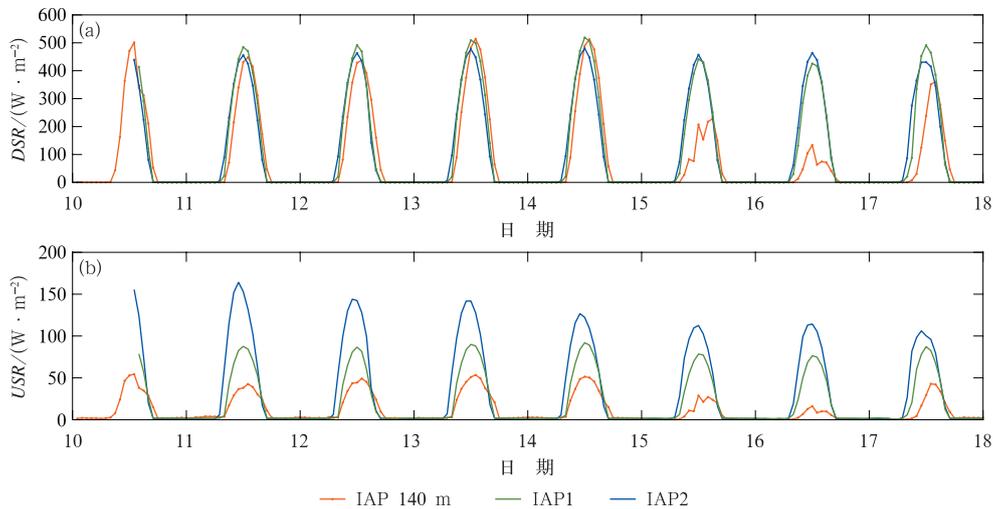


图 3 2017 年 1 月 10—18 日加密观测期 140 m、IAP1 和 IAP2 观测的太阳短波辐射比较

(a) 向下短波辐射(DSR), (b) 向上短波辐射(USR)

Fig. 3 (a) Downward short radiation (DSR) and (b) upward short radiation (USR) at 140 m at IAP tower, IAP1 and IAP2 stations during IOP in 10—18 January 2017

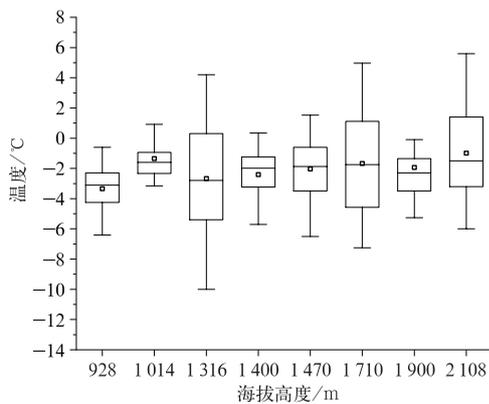


图 4 加密观测期地面观测站与探空仪在相同高度上观测的气温差值

(图中每一根箱线代表不同海拔高度的地面与探空温度观测差。箱线图内, 横线代表中值, 中间小四方形代表平均值, 盒子上下边分别表示 75% 和 25% 的值, 盒子上下延伸线顶端分别表示最大和最小值)

Fig. 4 Temperature differences between surface observations and radio sounding observations at the same elevation during the IOP

(Each box represents temperature differences at a different elevation; in the boxes, the horizontal line in the box: median. □: hourly average. Over and under lines of box: 75% and 25% of values respectively. Top and bottom of vertical extending lines: maximum and minimum values respectively)

以下探空观测的温度廓线代表了探空气球投放地点附近的气温垂直分布。超过 1 600 m, 受高空西北风

影响探空仪向东偏南方向快速漂移(探空观测轨迹图略)。由于实际观测位置的水平差异以及地面测站受到周边局地小环境影响等原因, 会导致相同高度上的地面与探空观测之间的温度偏差。即便如此, 不同海拔高度地面观测站获取的温度廓线能够捕捉到与探空温度观测近似的逆温层变化特征。两种观测结果在夜间较白天更为接近。这可能是由于在白天高海拔测站接收了更多的太阳辐射引起地表增温明显, 造成地面观测的温度要高于探空在同高度的气温观测值(图 5d、5e 和 5f)。夜间则相反, 高海拔站点受地表辐射冷却作用影响, 会导致地面观测气温要低于同高度的探空观测气温值。还需要更多的观测数据来进一步分析两种观测手段获取的温度廓线差异的原因。

2.3 半山腰云特征的初步分析

在加密观测期间, 小海坨山山谷出现了半山腰云的现象。由于冬奥高山滑雪赛道起点与终点之间的落差很大, 一旦出现半山腰云, 就会引起低能见度现象, 对赛事造成严重干扰和影响, 甚至导致比赛的终止或者取消。Mo et al(2014)观测和研究了 2010 年温哥华冬奥会的半山腰云, 认为其成因与高空背风坡下沉气流增温以及爬坡气流形成的悬浮逆温有关。当潮湿的空气沿山谷向上爬升, 与背风坡下沉

气流相互作用,可形成半山腰云。图 6 为 15—16 日加密探空观测到的温度廓线(图 6a)、相对湿度(RH)廓线(图 6b)和风廓线(图 6c)。在 15 日的探空温度廓线上已经出现明显的逆温层,其中在 05 时和 11 时逆温层顶高度超过了海拔 2 000 m。11 时 RH 廓线显示 1 500 m 以下相对湿度显著增大,逆温层底高度约为 1 500 m,在此高度以下风速小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风向在 1 200 m 以下主要为东南风,在 1 200 ~ 1 600 m 以偏西风为主,在 1 600 m 以上为西北风。至 17 时,逆温加强,逆温层底仍维持在 1 500 m 左右。从逆温层底至 1 200 m 范围内的 RH 接近饱和,表明有半山腰云出现。

15 日 MODIS AQUA(地方时下午过境)卫星影像图(图 7a)显示云层已经进入观测区域(红色方框所示)。对应时刻 1 400 m 以下为弱的东南风,1 500 m 以上为西北风(图略)。至 23 时,逆温层底的高度下降至 1 200 m 左右,在此高度附近出现了一层薄的饱和水汽层,逆温层顶高度接近 1 700 m。逆温层以下(1 200 m 以下)为弱西北风,与夜间的下坡风和向下谷风有关。1 200 ~ 1 400 m 左右为弱南风 and 东南风,1 400 m 高度向上为西风和西北风所控制。16 日 05 时,逆温层底抬升至 1 400 m,其下至

1 100 m 空间有饱和水汽层(低云层),逆温层顶高约为 1 800 m。在逆温层下风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1 100 m 以下为西风,之上为偏东风。11 时,逆温层底抬高至 1 600 m,之下至 1 350 m 为饱和水汽层(低云层)。云层以下为偏东风,风速很小,云层之上为偏西风 and 西北风,风速较大。此刻的 MODIS TERRA 卫星影像图(图 7b)显示,低云已将山谷覆盖,但未能越过山脊和主峰,影响山脉北侧迎风坡。这表明半山腰云的云顶高度要小于山脊高度(约 1 600 ~ 2 000 m),与探空观测到的云顶高度一致。17 时,逆温层底已降至 1 500 m 左右,其上至 1 300 m 为云层,逆温层顶位于 1 600 m 左右。1 400 m 高度以上为西北风,以下多为偏东风,风速较小。稍早过境的 MODIS AQUA 卫星影像图(图 7c)显示,半山腰云仍未能越过山脊、遮盖小海坨山主峰。至夜间 23 时,逆温层底继续下降至 1 350 m 左右,逆温层顶高度变化不大,约在 1 600 m。云底高下降至 1 100 m。云层之下为西北风,与夜间下坡风和向下谷风有关,云层之上至 1 500 m 左右为偏东风,逆温层之上为西风。至 17 日上午(图 7d),该地区的低云已消散,出现中高云,小海坨主峰、迎风坡和背风坡均有云遮盖。

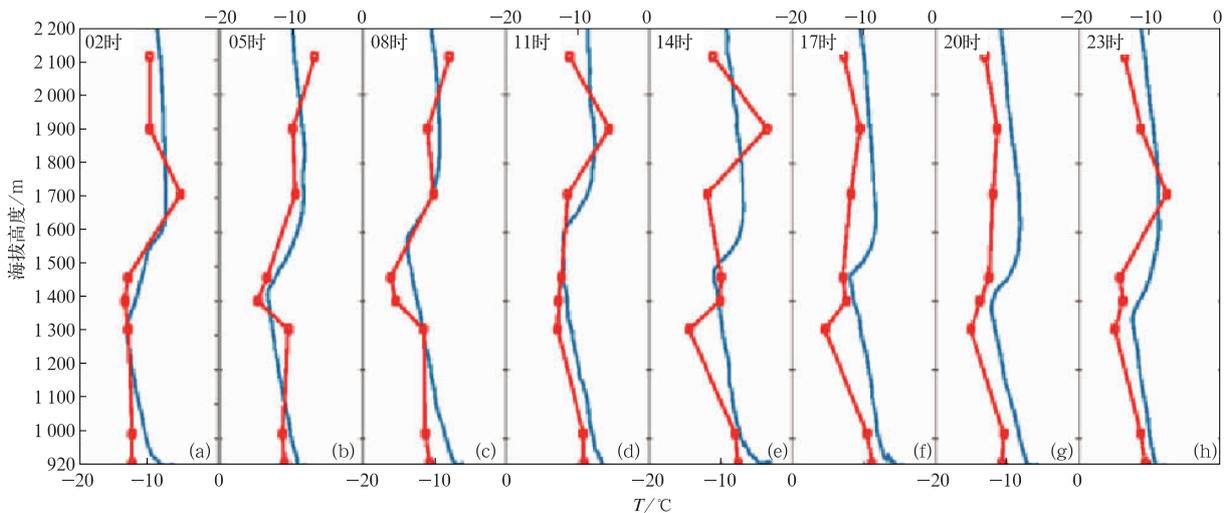


图 5 2017 年 1 月 16 日不同海拔高度地面代表站(表 2)观测的温度廓线(红色点划线)与同时刻西大庄科站探空观测的温度廓线(蓝线)比较

(a)02 时,(b)05 时,(c)08 时,(d)11 时,(e)14 时,(f)17 时,(g)20 时和(h)23 时

Fig. 5 Comparison between temperature profiles combined with observation of selected surface stations (Table 2) at different elevations (red dot line) and radio sounding temperature profiles (blue line) at XDZK Station at (a) 02:00 BT, (b) 05:00 BT, (c) 08:00 BT, (d) 11:00 BT, (e) 14:00 BT, (f) 17:00 BT, (g) 20:00 BT, and (h) 23:00 BT 16 January 2017

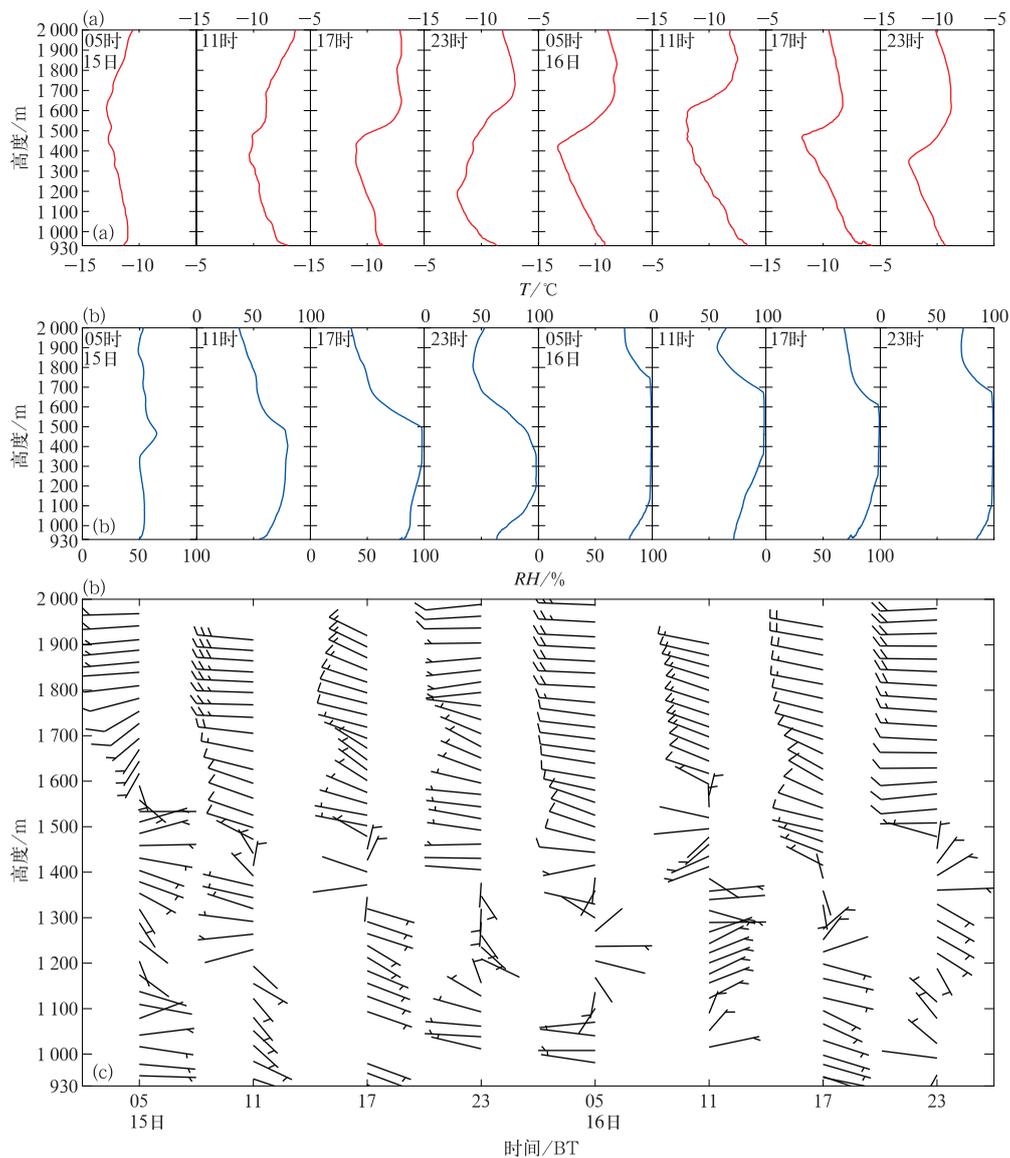


图 6 2017 年 1 月 15 日和 16 日加密探空获取的(a)温度廓线,(b)相对湿度廓线)和(c)风廓线

Fig. 6 Temperature profiles (a), relative humidity profiles (b) and wind profiles (c) by intensive radio-soundings on 15 and 16 January 2017

利用西大庄科站多普激光雷达获取的气溶胶相对衰减系数(ARB),也可以间接地观察云层的时间演变。从图 8 上可以看到,15 日中午前多普勒激光雷达探测到了由南部输送而来的气溶胶。午后,低云开始出现,云底高约在 1200 m 以下,造成了强烈的气溶胶衰减信号。探空观测的相对湿度廓线显示,云层厚度最小约为 200 m,最大约为 600 m。由于云层对激光信号衰减作用很强,造成激光无法穿透云层和获取云层之上的观测数据。从 15 日 12 时至 16 日 23 时,ARB 强信号带在 1100~1400 m 范围波动,与对应时刻的加密探空观测到的云底高度

大致相当。

2.4 半山腰云成因讨论

焚风是由于空气沿背风坡下降时产生干绝热压缩导致的干而暖的下坡风(Li et al,2015)。在太行山东麓的河北中南部以及北京地区,冬季焚风发生的频率在四季中最高(杨晓亮等,2018)。与焚风的形成机制比较类似,当西北气流翻越小海坨山西南—东北走向山脉时,空气在背风坡下沉可以导致气温升高。不同于焚风可以沿山坡一直向下传播,当近地面出现沿山谷、山坡向上的偏东风或者东南

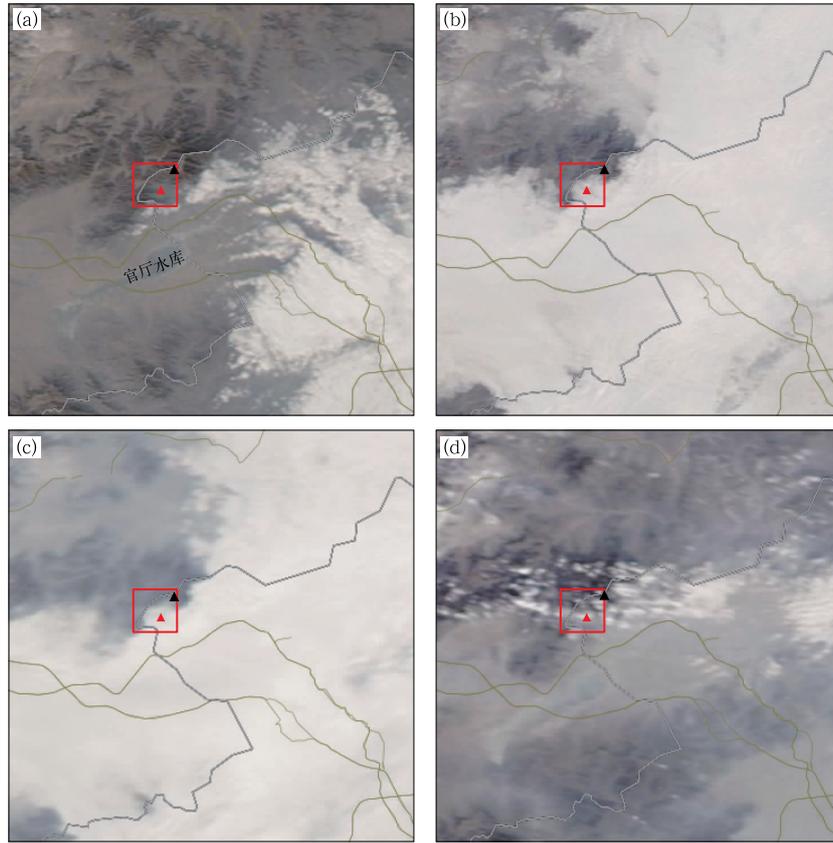


图 7 2017 年 1 月 15—17 日 MODIS 卫星可见光影像图
 (a)15 日 AQUA 卫星,(b)16 日 TERRA 卫星,(c)16 日 AQUA 卫星,(d)17 日 TERRA 卫星
 (小海坨赛场及观测区域位于红色方框内,小海坨山主峰、
 西大庄科站所在位置分别用黑色和红色三角形表示)

Fig. 7 MODIS satellite visible images in 15–17 January 2017

(a) AQUA Satellite on 15 January, (b) TERRA Satellite on 16 January,
 (c) AQUA Satellite on 16 January, and (d) TERRA Satellite on 17 January

(The observational area and Xiaohaituo Venue are in the red square;
 peak of Xiaohaituo Mountain and XDZK Station are indicated by black and red triangles, respectively)

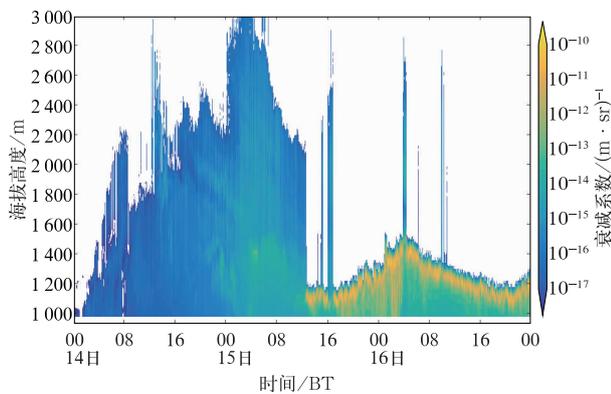


图 8 2017 年 1 月 14—16 日 Windcube 100 s
 多普勒激光雷达观测的气溶胶相对衰减系数
 Fig. 8 Observed attenuated relative beta (ARB) by
 Doppler lidar Windcube 100 s in 14–16 January 2017

风时,会抑制沿山坡向下运动的干暖空气,从而在背风坡上空形成悬浮逆温。在图 6a 中,15 日随着偏西风的影响高度不断下移,逆温层底从 1 600 m 左右(05 时)下降至约 1 500 m(11 时)。夜间下坡风和向下谷风的影响高度约距地 100 m 左右(图 6c)。从此高度向上至逆温层底为云层,云层内为偏东风。在白天,受到云和霾的共同影响,到达地面的太阳辐射显著减小(图 3a),使得由于热力作用产生的上坡风和向上谷风并不明显。近地面沿着山谷、山坡向上的偏南和偏东气流主要是受大范围的偏东风、东南风影响所导致。综合分析卫星云图和天气图,15 日和 16 日在小海坨山东南方向出现了大范围的偏东风水汽输送。进入山谷的气流携带相对潮湿的空气,在爬坡抬升过程中形成地形云。受背风坡悬浮

逆温层的压制,云层无法越过山脊和遮盖山峰。同时,近地面夜间干冷的下坡风和向下谷风抑制了地面雾的生成。因此,受上述多种因素共同影响,最终在小海坨山谷形成了“陷”在山谷中的半山腰云。这种半山腰云的成因与 Mo et al(2014)的解释相近,但又有所不同,还需要在今后开展更多细致的研究分析工作。

3 结论与讨论

2017年1—3月,针对北京2022年奥运气象服务和保障需求,在北京延庆小海坨冬奥赛场周边开展了复杂地形综合气象观测试验。在原有自动气象站基础上,新增了综合自动气象观测站,布设了便携温湿度观测站,并在阎家坪、西大庄科站建成了以地基遥感观测仪器为主的综合观测站。1月10—17日期间(加密观测期),在西大庄科站附近开展了GPS小球探空加密观测。利用在不同海拔高度地面便携温湿度观测站和自动气象站,获取了该地区大气温度廓线。与加密探空的温度廓线相比,地面观测获取的温度廓线与探空观测的温度廓线有较好的一致性,能够捕捉该地区逆温层结构及演变特征。对加密观测期的观测资料进行了初步分析,重点研究了半山腰云的演变特征和形成原因。在半山腰云出现期间,地面风向呈现出明显日变化。半山腰云主要出现在海拔高度1100~1700 m,在探空观测结果上表现为饱和水汽层。一般而言,云顶高度对应于逆温层底,云顶上方有逆温覆盖。夜间,云层下方受到下坡风、向下谷风影响,多为西北风或偏西风。云层内多为弱偏东风或东南风。从云顶以及逆温层顶向上,为明显的偏西风或西北风控制。对于半山腰云观测而言,探空观测、地面观测、卫星观测和激光雷达观测结果之间都能够较好的相互验证。针对小海坨半山腰云的形成机制进行了初步分析和讨论,认为背风坡下沉气流形成的悬浮逆温层以及大范围偏东风水汽输送可能是产生半山腰云的主要原因。

此次观测试验获得了小海坨山冬奥赛场周边大量地面和高空气象观测数据,为开展冬奥百米分辨率气象预报技术研发提供了重要的数据(刘郁珏等,2018)。由于观测地点环境条件恶劣,部分观测仪器和项目未能如期顺利进行,需要在后续观测试验中加以完善和改进。加密观测期间获取了对高山滑雪

赛事有重要影响的半山腰云的宝贵资料,可以为今后开展针对性的专项研究提供重要数据和经验。虽然探空观测可以获得半山腰云垂直分布特征,但探空观测对人力、物力消耗大,不适合长期连续观测。因此,今后将研究如何利用不同高度地面自动气象观测数据来获取小海坨山高山滑雪赛道周边的半山腰云特征。同时,针对该地区半山腰云以及可能产生的低能见度天气,不断改进观测方案,增加其他观测手段(如云雷达),再结合数值模拟和机理分析,深入探讨半山腰云的形成机制以及地形对其的作用和影响,为冬季奥运会气象服务和保障提供科学依据。

参考文献

- 韩彦霞,王成刚,严家德,等,2017. 新型边界层气象探空系统的开发与应用[J]. 气象科技,45(5):804-810. Han Y X, Wang C G, Yan J D, et al, 2017. Development and application of new boundary layer meteorological sounding system[J]. Meteor Sci Technol, 45(5):804-810(in Chinese).
- 贾春晖,窦晶晶,苗世光,等,2019. 延庆-张家口地区复杂地形冬季山谷风特征分析[J]. 气象学报,77(3):475-488. Jia C H, Dou J J, Miao S G, et al, 2019. Analysis of characteristics of mountain-valley winds in the complex terrain area over Yanqing-Zhangjiakou in the winter[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):475-488(in Chinese).
- 李国平,2016. 近25年来中国山地气象研究进展[J]. 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[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3):115-122(in Chinese).
- 李元寿,贾晓红,李强,等,2017. 冬奥会气象服务保障面临的机遇、挑战和应对策略[J]. 中国软科学,(S1):305-313. Li Y S, Jia X H, Li Q, et al, 2017. Olympic winter games bring opportunities and challenges and coping strategies of meteorological service and safeguard[J]. China Soft Sci, (S1):305-313(in Chinese).
- 刘郁珏,苗世光,胡非,等,2018. 冬奥会小海坨山赛区边界层风场大涡模拟研究[J]. 高原气象,37(5):1388-1401. Liu Y J, Miao S G, Hu F, et al, 2018. Large eddy simulation of flow field over the Xiaohaituo Mountain division for the 24th Winter Olympic Games[J]. Plateau Meteor, 37(5):1388-1401(in Chinese).
- 田杰,王庆伟,于大炮,等,2013. 长白山北坡气温的垂直变化[J]. 干旱区资源与环境,27(4):65-69. Tian J, Wang Q W, Yu D P, et al, 2013. Air temperature variation along altitudinal gradient on the northern slope of Mt. Changbai, China[J]. J Arid Land Resour Environ, 27(4):65-69(in Chinese).
- 杨晓亮,杨敏,李江波,等,2018. 一次太行山焚风对霾强度的影响分析[J]. 气象,44(2):313-319. Yang X L, Yang M, Li J B, et al, 2018. Impact analysis of a Taihang Mountain foehn on haze intensity[J]. Meteor Mon, 44(2):313-319(in Chinese).
- 张治国,崔炜,白雪涛,等,2017. 第24届冬奥会海坨山赛区近两年冬季地面风场特征[J]. 干旱气象,35(3):433-438. Zhang Z G, Cui

- W, Bai X T, et al, 2017. Winter ground wind field characteristic in the Haituo Mountain division for the 24th Winter Olympic Games[J]. *J Arid Meteor*, 35(3): 433-438 (in Chinese).
- 郑成洋, 方精云, 2004. 福建黄岗山东南坡气温的垂直变化[J]. *气象学报*, 62(2): 251-255. Zheng C Y, Fang J Y, 2004. Changes in air temperature variables along altitudinal gradient in Mt. Huanggang, China[J]. *Acta Meteor Sin*, 62(2): 251-255 (in Chinese).
- 郑祚芳, 任国玉, 高华, 2018. 北京地区局地环流观测分析[J]. *气象*, 44(3): 425-433. Zheng Z F, Ren G Y, Gao H, 2018. Analysis of the local circulation in Beijing Area[J]. *Meteor Mon*, 44(3): 425-433 (in Chinese).
- 朱苹, 王成刚, 严家德, 等, 2018. 北京城市复杂下垫面条件下三种边界层测风资料对比[J]. *干旱气象*, 36(5): 794-801. Zhu P, Wang C G, Yan J D, et al, 2018. Comparison of three kinds of wind data in boundary layers under complex surface conditions in Beijing[J]. *J Arid Meteor*, 36(5): 794-801 (in Chinese).
- Chen M X, Quan J N, Miao S G, et al, 2018. Enhanced weather research and forecasting in support of the Beijing 2022 Winter Olympic and Paralympic Games[J]. *WMO Bull*, 67(2): 58-61.
- Doyle C, Scott B, Gravel S, et al, 2006. Meteorological preparations for the 2010 Winter Olympic and Paralympic Games[C]// *Proceedings of the 12th Conference on Mountain Meteorology*. Santa Fe: American Meteor Society.
- Horel J, Potter T, Dunn L, et al, 2002. Weather support for the 2002 Winter Olympic and Paralympic Games[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(2): 227-240.
- Kiktev D, Joe P, Isaac G A, et al, 2017. FROST-2014: the Sochi Winter Olympics International Project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(9): 1908-1929.
- Lehner M, Whiteman C D, Hoch S W, et al, 2016. The METCRAX II field experiment: a study of downslope windstorm-type flows in arizona's meteor crater[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 97(2): 217-235.
- Li X, Xia X, Wang L, et al, 2015. The role of foehn in the formation of heavy air pollution events in Urumqi, China[J]. *J Geophys Res*, 120(11): 5371-5384.
- Lundquist J D, Cayan D R, 2007. Surface temperature patterns in complex terrain: daily variations and long-term change in the central Sierra Nevada, California[J]. *J Geophys Res*, 112(D11): D11124.
- Mo R P, Joe P, Isaac G A, et al, 2014. Mid-mountain clouds at whistler during the vancouver 2010 Winter Olympics and Paralympics [J]. *Pure Appl Geophys*, 171(1): 157-183.
- Pigol'tsina G B, Zinov'eva N A, 2015. Assessment of microclimatic conditions in the Krasnaya Polyana mountain cluster for providing the Olympic Venues with detailed weather and climate information[J]. *Russ Meteor Hydrol*, 40(8): 553-560.
- Sarychev S A, Dudina L I, Zapevalov M A, 2015. Sochi-2014 integrated environmental monitoring system[J]. *Russ Meteor Hydrol*, 40(8): 546-552.
- Wang G Y, Zhao M F, Kang M Y, et al, 2017. Diurnal and seasonal variation of the elevation gradient of air temperature in the northern flank of the western Qinling Mountain Range, China [J]. *J Mt Sci*, 14(1): 94-105.
- Whiteman C D, 2000. *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*[M]. New York: Oxford University Press: 355.