

李嘉睿,符娇兰,陶亦为,等,2022. 冬奥会张家口赛区气温与风的特征分析[J]. 气象,48(2):149-161. Li J R, Fu J L, Tao Y W, et al, 2022. Temperature and wind characteristic analysis in Zhangjiakou Olympic Area for the Winter Olympic Games[J]. Meteor Mon, 48(2):149-161(in Chinese).

冬奥会张家口赛区气温与风的特征分析^{*}

李嘉睿¹ 符娇兰¹ 陶亦为¹ 张恒德¹ 李 蓉² 董 全¹ 胡 艺¹

¹ 国家气象中心,北京 100081

² 兰州中心气象台,兰州 730020

提 要: 利用 2019 年 1—3 月多源观测资料对北京冬奥会张家口赛区气温与风时空分布特征进行统计分析,并对不同环流背景下温度和风的特征进行了对比研究。结果表明:张家口赛区气温分布受太阳辐射差异与海拔高度的共同制约,盆地或山谷温度日较差大,且逆温现象明显。环境风和日变温影响逆温强度,风速越小,逆温强度越大。赛区风速具有明显日变化特征,中午前后最大,夜间最小。均压场下,古杨树赛场昼夜风向转换明显,而云顶赛场无明显昼夜风向变化;日落后赛区温度开始建立逆温结构,在日出前达到最强,日出后逆温迅速减弱消失,云顶赛场逆温强度弱于古杨树赛场。有较强冷空气活动时,气温随海拔高度增加而降低,两赛场风向均无明显昼夜变化。

关键词: 复杂地形,气温,风,特征分析,逆温,地形风

中图分类号: P416, P423, P425

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.010301

Temperature and Wind Characteristic Analysis in Zhangjiakou Olympic Area for the Winter Olympic Games

LI Jiarui¹ FU Jiaolan¹ TAO Yiwei¹ ZHANG Hengde¹ LI Rong² DONG Quan¹ HU Yi¹

¹ National Meteorological Centre, Beijing 100081

² Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020

Abstract: Based on multi-source observation data during January—March in 2019, the spatio-temporal distribution characteristics of temperature and wind in Zhangjiakou Olympic Area for the Beijing 2022 Olympic and Paralympic Winter Games are analyzed, especially for their diurnal variations under different synoptic backgrounds. It is shown that the characteristics of temperature and wind are affected both by differences in solar radiation and topographic altitudes. Additionally, the diurnal temperature range in the basin or valley, where temperature inversion phenomena are frequently observed, is significantly larger than that on the mountain top. Meanwhile, temperature inversion intensity is closely related to daily temperature changes and background winds, and the extent of temperature inversion tends to be deeper as environmental wind speed decreases. On the other hand, diurnal variations of wind speed can be clearly seen in the studied area. Winds tend to strengthen in the daytime and reach their peaks in the afternoon, and minimum winds appear at night on average. Local and thermally-driven circulations are dominant under weak synoptic patterns. An obvious shift in wind direction between day and night can be seen in Guyangshu Basin but not in Genting Snow Park. At the same time, cold air tends to accumulate at the basin bottom on nightfall

^{*} 国家重点研发计划(2018YFF0300104)资助

2021 年 4 月 7 日收稿; 2021 年 9 月 22 日收修定稿

第一作者:李嘉睿,主要从事天气预报技术研究与分析工作. E-mail: jiarui_li@163.com

通讯作者:符娇兰,主要从事灾害性天气机理及预报技术研究. E-mail: bluelilyfly@163.com

and bring temperature inversion phenomena in the basin, which usually reach their peaks before sunrise and weaken or disappear rapidly after sunrise under weak synoptic circumstances. It is observed that the extent of temperature inversion in Guyangshu Basin is much greater than that in Genting Snow Park. However, there seems to be no diurnal changes in wind direction in both Guyangshu Basin and Genting Snow Park under the influence of cold air, and temperature also decreases monotonously with the increase of altitudes in such a condition.

Key words: complex terrain, temperature, wind, characteristic analysis, temperature inversion, orographic wind

引 言

在冬季奥运会气象服务保障中,气温与风等要素的准确预报对户外比赛项目能否顺利举行起到至关重要的作用(张玉涛等,2020)。冬奥会张家口赛区位于内蒙古高原和华北平原过渡带,属于坝上坝下的过渡型山区,山谷沟壑纵横,地形复杂。张家口赛区包含云顶、古杨树 2 个赛场,共承担 2 个大项、6 个分项(单板滑雪、自由式滑雪、越野滑雪、跳台滑雪、北欧两项、冬季两项)和 50 个小项的比赛。

在山谷或盆地中,气温与风的变化通常密切相关,周围山脉造成的焚风在冬末春初会使积雪融化(杨晓亮等,2018)。此外当没有明显冷空气影响时,背景风速较小,白天受热差异影响,山谷两侧存在上坡风,局地环流下谷底出现补偿性下沉气流,进而造成谷底气温上升。在日落时刻,山顶的初始气温低于山谷,山顶冷空气在热力驱动作用下流向谷底,形成下坡风。山谷两侧山坡的冷空气在谷底相遇辐合,产生上升气流将谷底存在的暖空气抬升,造成地形逆温,也有学者称之为“冷池”,地形逆温在傍晚时具有较高稳定性(Businger et al, 1971)。

静稳天气下的夜间,盆地可伴随强烈逆温现象,垂直方向上有强温度梯度,同时盆地上空盛行风的强度是影响冷池演化的关键因素(Clements et al, 2003)。Leukauf et al(2015)还指出在理想化的山谷地形中,白天冷池消失的时间与太阳辐射有关。

近地面风向风速的变化受地形的制约(Mahrt et al, 2001; 宋丽莉等, 2009; Jin et al, 2016; 曾佩生等, 2019),郑祚芳等(2018)认为山谷风环流会影响局地风场,造成风速主要沿地形梯度分布。在冬奥会张家口赛区,地形对风的影响十分明显,在延庆—张家口地区,山风比谷风持续时间长且风速较小,高海拔山顶处受环境风影响显著,风向没有明显

日变化(贾春晖等,2019)。阵风对户外比赛项目的影响更大,国内外学者对阵风特征开展了一系列研究,例如通过引入阵风系数等物理量分析阵风的影响因子(董双林,2001),有学者指出阵风系数的时空分布变化存在较大不确定性,不仅与天气系统、地理位置密切相关(周福等,2017),还受到测风平均时距、稳定风速、距地面高度、地面粗糙度、湍流稳定度等因素的影响(Yu and Chowdhury, 2009; 刘炳荣等,2019),此外,风速变化还与大气边界层高度密切相关(孟丹等,2019; 刘敬乐等,2020)。

在冬奥赛区的天气预报中,目前主要存在以下难题:(1)对风变化规律及其变化机制认识不够,数值模式预报能力有限,因此对风尤其是阵风的预报难度高;(2)目前对赛区复杂地形下气温时空分布特征认知存在不足,主要表现在赛区的地形逆温和夜间增温两方面,使得夜间温度预报难度大。前期,冬奥赛场已建立地面多要素自动气象站观测网、赛场三维立体观测体系。本研究旨在使用赛区气象观测数据,揭示对冬奥体育赛事有关键影响的气温与风的特征及其变化规律,为冬奥赛区天气预报提供参考。

1 观测站点与数据资料介绍

1.1 赛区观测站点位置

研究共选取 7 个赛事保障观测站的 1 h 观测数据(数据来源于河北省气象局)用于特征分析,其中云顶赛场 4 个,站号为 G1, G2, G4 和 G6,具体位置如图 1 所示。云顶滑雪场位于一个半封闭式山谷中,三面环山,西北侧有缺口,东南侧为相对低洼的沟壑。其西南侧山脊海拔高于 2100 m,山顶与山脚垂直落差约为 200 m。G4 站点位于山顶偏下位置,海拔高度为 2012.1 m,云顶赛场 4 个观测站点在垂

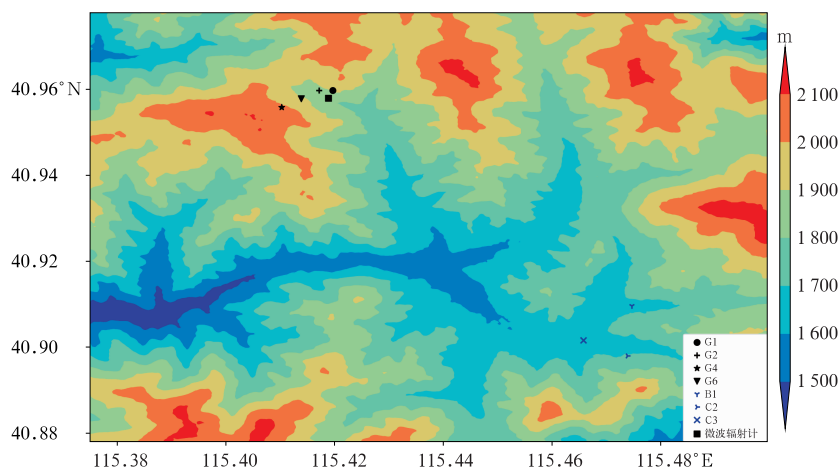


图1 张家口赛区 30 m 分辨率地形与自动观测站位置
(填色:海拔高度)

Fig. 1 Distribution of automatic weather stations in Zhangjiakou Olympic Area
with a 30 m resolution map
(colored: topographic altitudes)

直方向上的最大高度差仅为 158.2 m,水平距离不超过 100 m,其中 G1 与 G2 站水平距离相距约 56 m。云顶赛场终点区附近设有微波辐射计,可获取山谷上空温度特征。古杨树赛场位于云顶东南方向,为盆地地形,海拔高度介于 1500~1700 m,盆地边缘与底部垂直落差约为 65 m。这里选取赛事保障站点 B1、C2 和 C3。

1.2 数据资料

研究所用资料来自河北省气象局,数据包含:(1)2019 年 1—3 月赛场自动气象站 1 h 气温、2 min 平均风、极大风等观测数据;(2)2019 年 1—3 月微波辐射计气温廓线数据,时间分辨率为 2 min,在地面至 500 m 高度区间,垂直分辨率为 50 m;(3)地形文件为张家口市崇礼区域的高程数据,水平分辨率为 30 m。

2 赛场气温与风的统计特征

2.1 气温

在复杂地形下,赛场气温与风的变化特征错综复杂,地形和太阳辐射对局地气温影响显著。图 2 展示了在 2019 年 1—3 月期间,7 个站点温度的平均日变化特征。总体而言,赛场气温的日变化存在一定规律:(1)各站平均最低气温出现在日出前的

06—07 时(北京时,下同),平均最高气温出现在午后(14—15 时),且在日出后(08—10 时)及日落后(16—18 时)平均温度变化剧烈。太阳辐射差异造成的温度变化明显,向阳山坡升温早且快,同一时刻不同站点的平均温差可达 5℃ 以上。(2)古杨树赛场平均气温日较差明显大于云顶赛场,这是由于古杨树盆地地势较低,白天平均气温高,而夜间在地形作用下常出现冷空气堆积,造成盆地底部气温最低,平均气温日较差可达 12℃ 以上。高海拔且位于背阴山坡的站点昼夜温差最小,气温日较差仅为 5℃ 左右,比如云顶赛场 G4、G6 站。(3)夜间气温变化

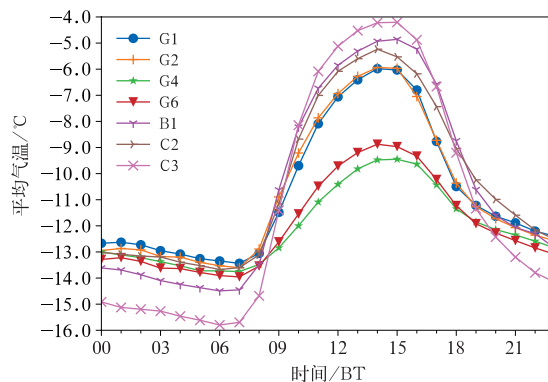


图2 2019 年 1—3 月张家口赛区
不同站点平均气温的日变化

Fig. 2 Diurnal variations of average temperatures
at different weather stations in Zhangjiakou Olympic
Area from January to March 2019

缓慢且各站差异不大,同一时次不同高度站点的平均气温相差 3°C 以内。(4)海拔高度是影响赛区气温的主要因素之一。例如,C3 站位于古杨树盆地底部(海拔高度为 1622.8 m),在白天平均气温最高,夜间平均气温最低,气温日较差为各站之首(图 2)。(5)太阳辐射差异是造成赛场气温分布差异的另一重要因素。例如,白天在太阳辐射的影响下,云顶赛场向阳山坡气温升高明显快于北向山坡,南侧山脊遮挡造成 G4、G6 站的日照时长缩短,导致这两个站在白天的平均气温明显低于向阳山坡的 G1、G2 站。

另一方面,可以得到赛场平均气温与海拔高度的关系。如图 3 所示,平均气温并非随海拔高度的升高而单调降低,太阳辐射差异是影响云顶气温分布的主要因素。在云顶赛场同一朝向的山坡,平均气温依旧遵循随海拔高度升高而降低的规律。在古杨树盆地,随海拔高度增加,平均温度反而增加。这与冬季盆地经常出现的逆温有关,逆温现象的频发,导致海拔最低的 C3 站平均气温最低,海拔最高的 C2 站平均气温最高。为便于分析古杨树盆地的逆温程度,本文将古杨树盆地海拔较高的 B1 站(1650.2 m)与海拔最低的 C3 站(1622.8 m)的温差作为判定逆温层是否存在的指标,并定义逆温强度为同一时刻 B1 站气温(T_{B1})与 C3 站气温(T_{C3})之差,即 $T_{\text{B1}} - T_{\text{C3}}$,下同。若逆温强度大于 0°C ,则存在逆温现象。这里选用 B1 站而不是 C2 站作为指标站的原因在于,使用海拔略低的 B1 站能够在逆温发展初期甄别出垂直厚度较小的逆温,具有一定“灵敏性”优势。

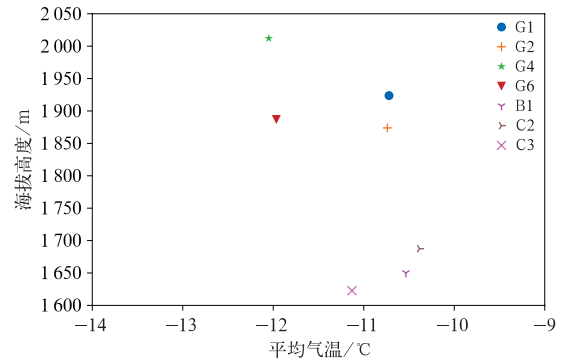


图 3 2019 年 1—3 月张家口赛区
平均气温与海拔高度的关系

Fig. 3 Relationship between average temperatures and geographic altitudes at different weather stations in Zhangjiakou Olympic Area from January to March 2019

下面结合 2019 年 1—3 月的 1 h 观测数据,分析古杨树盆地逆温次数的日变化。若某时次存在逆温,则计入该时次的逆温次数,统计结果见图 4a。结果显示,古杨树盆地逆温出现的时刻集中在夜间,其次是上午与傍晚,中午前后(10—17 时)逆温现象稀少,与图 2 的分析一致。白天盆地底部接收太阳辐射,配合上坡风、湍流等因子作用,盆地底部升温明显,逆温层基本消失。图 4b 为逆温强度($T_{\text{B1}} - T_{\text{C3}}$)的频数分布情况,古杨树盆地 39.4%的逆温现象对应较小的逆温强度($0 \sim 0.71^{\circ}\text{C}$),逆温强度介于 $0.71 \sim 2.84^{\circ}\text{C}$ 的样本占 48.7%,大于 3.55°C 的样本数较少,仅有 5.2%。观测显示,逆温强度大于 6°C 的时刻有 8 次,均发生于弱气压场条件下,其中 1 月 14 日 07 时观测到 7.1°C 逆温,此时 B1 站气温

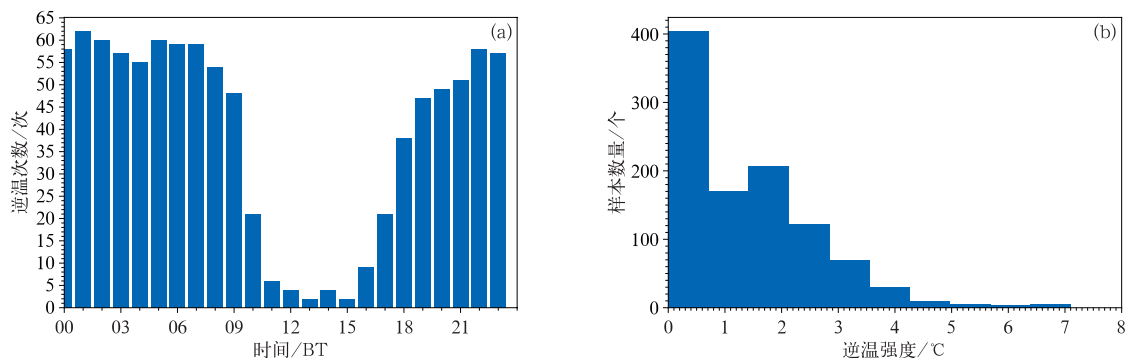


图 4 2019 年 1—3 月古杨树盆地的逆温特征

(a)逆温次数的日变化,(b)逆温强度(B1 与 C3 站温度差)的频数分布

Fig. 4 Characteristics of temperature inversions over Guyangshu Basin from January to March 2019

(a) diurnal variations of temperature inversions, (b) frequency variations of the temperature difference between stations B1 and C3

为 -9.5°C , C3站气温为 -16.6°C 。

夜间(18时至次日07时)古杨树盆地的平均逆温强度与风速变化及变温有关,如图5所示。统计显示,当平均风速小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,逆温现象较明显,随着平均风速的增大,平均逆温强度逐渐减弱,当平均风速大于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,逆温现象趋于消失(图5a),风速对赛场逆温影响较大。环境温度变化同样对逆温强度产生影响,山顶附近温度变化在赛区冷暖平流方面具有一定指示意义,这里使用高海拔G4站的温度变化近似代替环境温度变化。如图5b所示,当G4站平均日变温为负时,古杨树盆地的逆温强度总体较弱甚至消失;而当G4站平均日变温为正,古杨树盆地的逆温强度趋于更强。太阳辐射与冷空气活动是制约逆温发展的关键因素。

2.2 赛场风速特征

大部分站点风的日变化特征较为相似。如图6所示,不同站点平均风速(图6a)和极大风风速(图6b)均表现为在中午前后增大,日落至夜间减小且变化相对平稳,在日出和日落前后风速变化最大,这种特征可能与太阳辐射增强导致的局地湍流有关(乌日柴胡等,2019)。云顶赛场风速整体高于古杨树且风速日变化较小,海拔最高的G4站风速日变化最小。与其他站不同的是,其平均风速在中午前后有一定程度的减小,可能与中午前后山区边界层的变化(Whiteman et al, 1999)及越山气流绕流有关(Kaufmann and Whiteman, 1999)。云顶赛场在冬季盛行偏北风,山脊遮挡造成位于背风坡的G2站观测风速较小,平均风速为云顶赛区各站最小,如

图6a与6b所示。

阵风系数定义为同一时刻极大风风速与平均风速的比值。在张家口赛区,阵风系数极大值出现在17时前后(图6c)。除C3站外,各站阵风系数的值介于 $1.8\sim 2.8$, C3阵风系数在 $3.0\sim 4.1$ 。究其原因,观测实况显示C3站的极大平均风速不超过 $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,夜间平均风速小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,明显低于其余各站,如图6a所示。尤其当环境风微弱时,位于盆地底部的C3站甚至呈静风状态,但其极大风风速在 $3\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在较高极大风风速和低平均风速的情况下, C3站的阵风系数明显高于其他站。

总体而言,赛场风速随海拔高度升高而增大,如图7所示,盆地底部风速最小。需要说明的是, C2站处于树林中,风速受一定程度遮挡,尽管其高度为古杨树盆地最高,但风速不大。另外,前面提到G2站位于背风坡位置,山脊遮挡导致风速较小。将此两个站剔除后,张家口赛区风速表现为随海拔高度增加而增大。

2.3 赛场风向变化特征

赛区风向的转变与地形走向息息相关,同时存在昼夜差别。为便于分析,下面分析中使用“N”“N—E”“E”“S—E”“S”“S—W”“W”“N—W”分别代表“北”“东北”“东”“东南”“南”“西南”“西”和“西北”八个方位,在图8所示中,数字为相应方位的样本数。白天为08—18时,夜间时段为19时至次日07时。

统计显示,无论白天还是夜间,云顶赛场均以西北风为主,与“西北—东南”向的山谷地形走向一致,

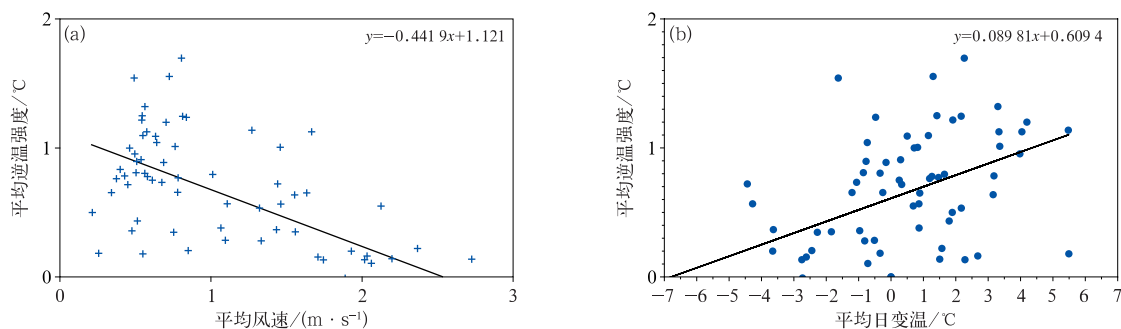


图5 2019年1—3月夜间古杨树赛场平均逆温强度($T_{\text{BI}} - T_{\text{C3}}$)与
(a)平均风速, (b)平均日变温的关系

Fig. 5 Relationships between the temperature inversion ($T_{\text{BI}} - T_{\text{C3}}$) at night and the averaged (a) wind speed, and (b) temperature change over Guyangshu Basin from January to March 2019

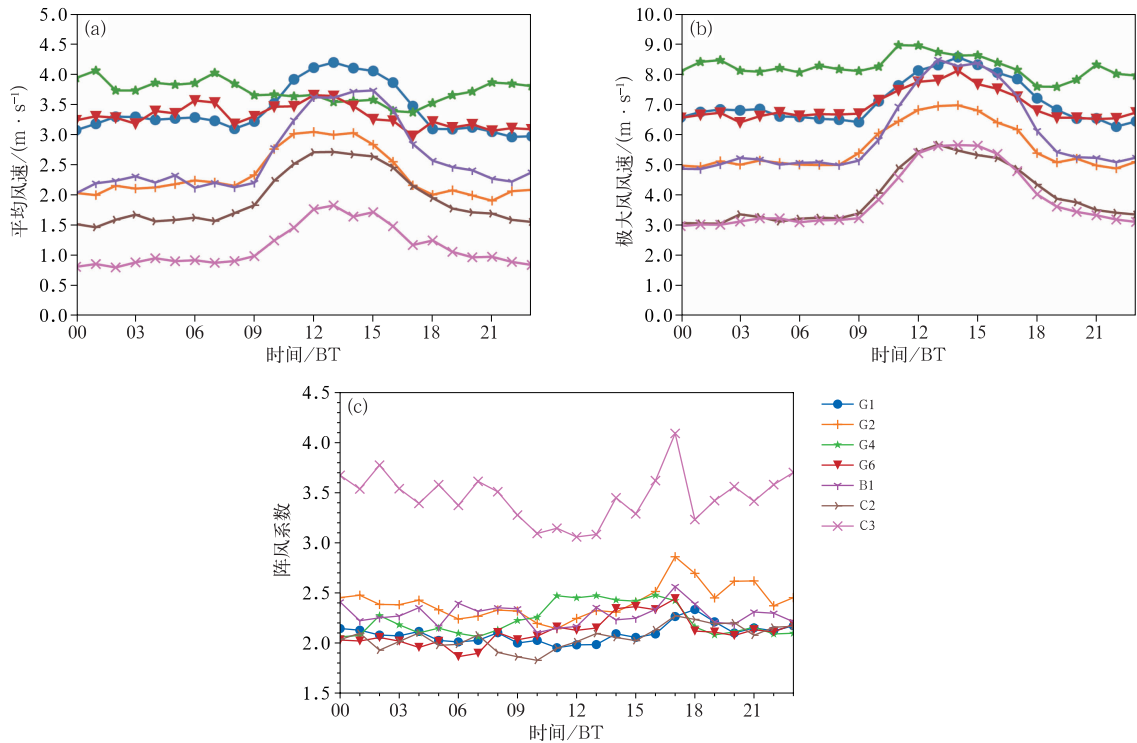


图 6 2019 年 1—3 月张家口赛区不同站点风特征的日变化

(a) 平均风速, (b) 极大风风速, (c) 阵风系数

Fig. 6 Diurnal variations of wind characteristics at different weather stations in Zhangjiakou Olympic Area from January to March 2019

(a) average wind speed, (b) peak wind speed, (c) gust factor

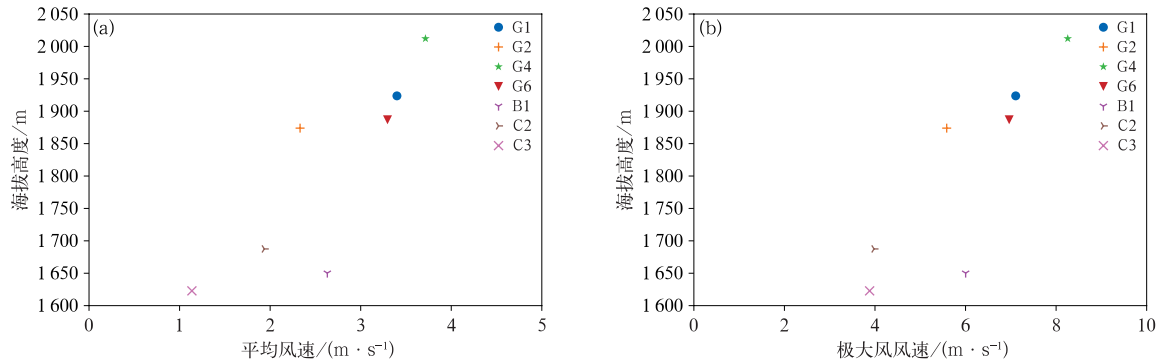


图 7 2019 年 1—3 月期间张家口赛区 (a) 平均风速、(b) 极大风风速与海拔高度的关系

Fig. 7 Relationships between (a) average wind speed, and (b) peak wind speed and geographic altitudes at different weather stations in Zhangjiakou Olympic Area from January to March 2019

同时也与高海拔地区更容易受冬季偏西或偏北环境影响有关。

古杨树盆地的风向相对分散,结合地形来看,B1 站东北侧存在较高山地,遮挡了东北方向的来风,其主导风向亦与东西向山谷走向一致,表现为白天盛行偏西风,夜间偏东风明显增多,对应东南侧山

坡的下坡风。C2 站位于东西向山谷另一坡面,西北侧为盆地,其盛行风向以西南风或偏南风为主,夜间下坡南风明显增多。C3 站位于小盆地底部,周围相对开阔,白天主导风向为西北风,在夜间受到更多来自北侧与东南方向山坡流向盆地底部下沉气流的影响,夜间盛行风既有西北或偏北风,也有东南风。

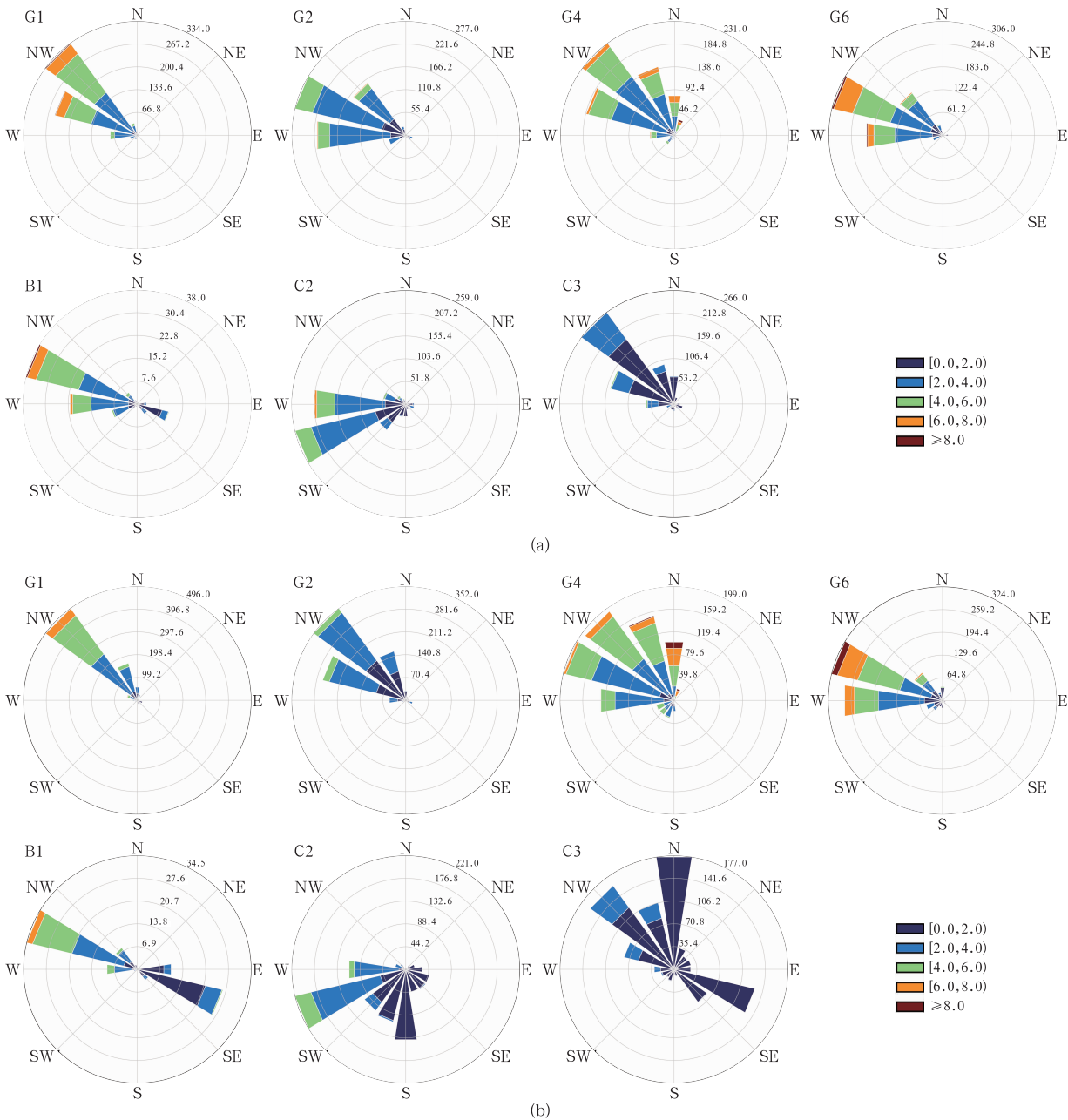


图 8 2019 年 1—3 月张家口赛区不同站点白天(a,08—18 时)与夜间(b,19 时至次日 07 时)的平均风玫瑰图
(填色:风速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Wind roses in daytime (a, 08:00 BT to 18:00 BT) and at night (b, 19:00 BT to 07:00 BT the next day) at different weather stations in Zhangjiakou Olympic Area from January to March 2019
(colored: wind speed, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

3 不同环境条件下温度和风的分布特征

赛区预报实践表明,温度和风的分布不仅与复杂地形有关,也受环境条件的影响。下面分析不同

环流背景下温度和风的统计特征,以及通过典型个例分析均压场及冷空气影响下赛区温度和风的分布特征。

3.1 均压场控制

研究表明:当无明显冷空气活动时,山谷或盆地

容易出现逆温现象(Clements et al, 2003)。根据观测资料统计,在 2019 年 1—3 月期间,张家口赛区逆温存在的频次高达 54.34%。

这里选取弱高压脊控制下两赛场日变温均小于 3°C 且平均风速小于 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的四次天气过程(分别为 2019 年 1 月 5—6 日、1 月 13 日、2 月 2 日、3 月 2—5 日)进行说明,统计时间从起始日 00 时至结束日 23 时。在上述日期,赛场上空 500、700 和 850 hPa 等高线稀疏,地面风力微弱(各站平均风速基本在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下)。

均压场下,赛场有典型逆温特征,夜间盆地底部气温最低,高海拔的 G1 站夜间平均气温最高,云顶赛场四站气温相差不大,白天盆地底部气温最高(图 9a)。同时,盆地底部风速昼夜均最弱,古杨树各站在日出前及日落后平均风速基本小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

s^{-1} ,除 G4 站外,其余各站有“中午前后高而夜间低”的风速日变化特征。

为了进一步了解不同环流背景下温度和风的演变特征,选取典型均压场个例进行分析。3 月 2—5 日为连续均压场形势,白天在太阳辐射作用下,盆地底部最高气温在 6°C 以上。2 日凌晨,逆温建立,古杨树赛场逆温强度接近 3°C (图 10a),云顶赛场地形在东南方向存在开口,夜间冷空气难以像盆地一样聚集,但同样观测到逆温(图 10b)。4 日凌晨 05 时,盆地底部 C3 站在冷空气堆积影响下,气温降至 -13.4°C ,为各站最低,08—09 时,日出后逆温层被破坏,18 时日落后重新建立。5 日夜间,在弱冷空气影响下,夜间连续逆温状态被打破。为便于揭示均压场下气温与风场特点,现选取盆地底部气温最低的 3 日夜间至 4 日凌晨时段为例,从天气形势、

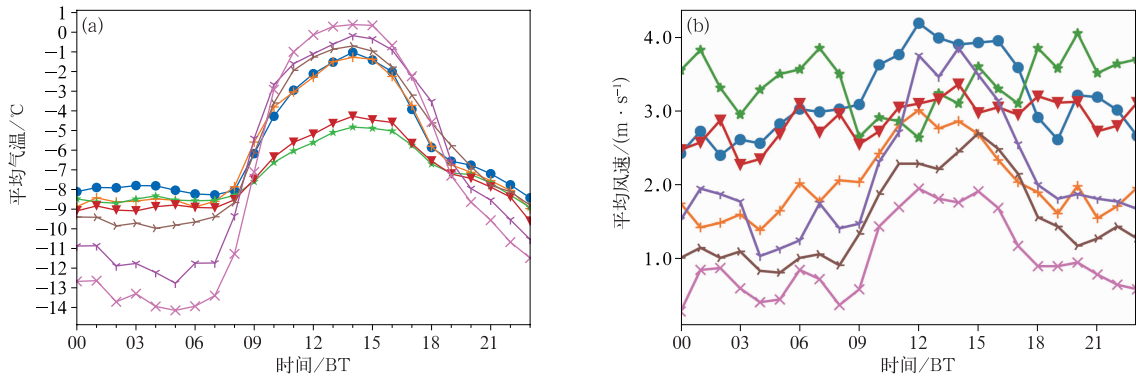


图 9 2019 年 1—3 月四次典型均压场过程(a)气温与(b)平均风速的日变化特征

Fig. 9 Average diurnal variations of (a) temperatures and (b) winds in the four selected cases under weak pressures from January to March 2019

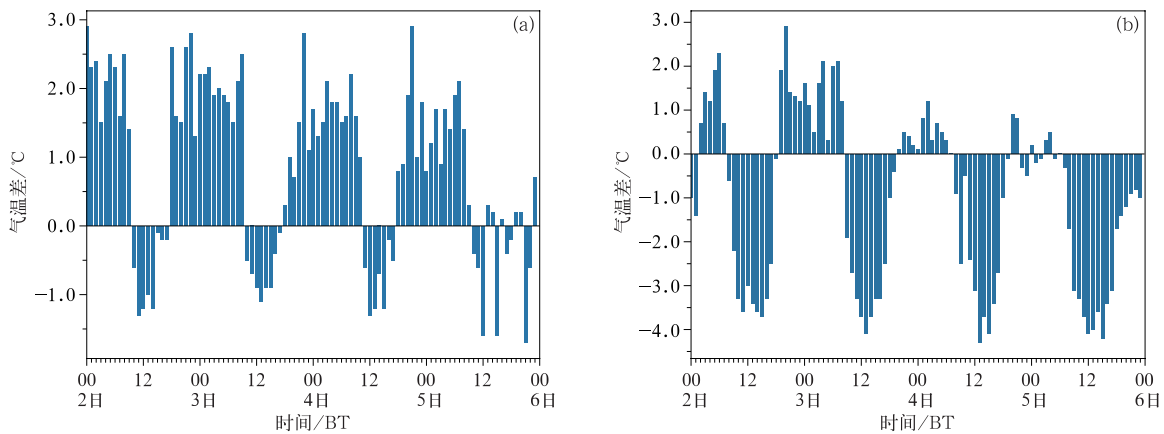


图 10 2019 年 3 月 2—6 日(a)古杨树赛场 B1 与 C3 站和(b)云顶赛场 G4 与 G2 站的温度差变化时序

Fig. 10 Variations of temperature differences between (a) B1 and C3 in Guyangshu Venue and (b) G4 and G2 in Genting Venue with time from 2 to 6 March 2019

自动观测站及微波辐射计数据分析等方面入手,展开均压场下赛场气温与风特征的分析。

3日夜間,赛场所处张家口崇礼区处于500 hPa脊前(图 11a),海平面气压场等值线稀疏(图 11b),赛场(图 11 红色圆点)附近地面风力微弱,为均压场控制下的静稳天气形势。

观测显示,3日夜間至4日凌晨,C3站(海拔高度为1622.8 m)比C2站(海拔高度为1687.5 m)气温低 5°C (图 12a)。均压场下,夜间冷空气不断向低洼处堆积,古杨树盆地逆温层持续加深,在05—06时达到最强,高度最低的C3站气温明显低于其余各站。4日日出后,随着太阳辐射的增强,盆地底部升温迅速,08—09时温度层结反转,逆温现象迅速消失。4日凌晨逆温发展到最强时刻,G4站(海拔高度为2012.1 m)比G2站(海拔高度为1873.9 m)气温高 1°C 以上。云顶赛场微波辐射计(位置见图 1)显示,4日凌晨,在距地面0~300 m的高度区间,不同高度气温均较高($>-9^{\circ}\text{C}$)且垂直方向温度梯度小,从地面至50 m高度近似等温层(图 12d),并存在浅薄逆温层。图 12d显示云顶赛场的逆温情况并非持续存在,而是不连续出现,这是由于云顶海拔较高且微波辐射计位于沟壑下游缺口,附近地形相对开阔,不利于冷空气聚集。

均压场背景下,云顶和古杨树平均风速与极大风速均较低(图 12b,12c),大部时段平均风速低于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (极大风低于 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),其中古杨树赛区平

均风速基本在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(极大风风速小于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。这时热力驱动的局地风环流处于主导地位,古杨树赛场的风向转变存在明显的地形风特征。如图 12b所示,均压场下B1站在白天维持偏西或西北风,夜间维持东南或偏东风,日出后又转为偏西或西北风;C2站同样在白天为一致的偏西或西北风,在日落后风向转为东南或偏南风,日出后恢复偏西风;C3站白天为偏西风,18时风向转为东南风。同时,风速具有较明显日变化特征,午后至傍晚前后风力增大,其他时段风力非常小。与古杨树赛场不同,云顶赛区风向风速均无明显昼夜变化特征,如图 12b所示,G1、G2、G3、G4站始终以偏西风或西北风为主,与沟壑走向及高层风向一致。

综上所述,均压场下,云顶赛场与古杨树盆地气温和风的特征存在明显区别,后者风和温度的时空分布更多受局地热力环流影响。

3.2 较强冷空气影响

冷空气作为冬季常见的天气过程,对气温与风的分布影响显著。选取2019年1—3月期间,两赛场降温幅度均大于 5°C 、最低气温低于 -20°C 且极大风速超过 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的三次冷空气过程(2019年1月15日、2月7日和15日)进行分析。冷空气活动时,古杨树盆地逆温现象消失,气温表现为随海拔高度增加而减小。在云顶赛场,无论是阴坡还是阳坡,平均气温同样与海拔高度成反比(图 13a)。冷

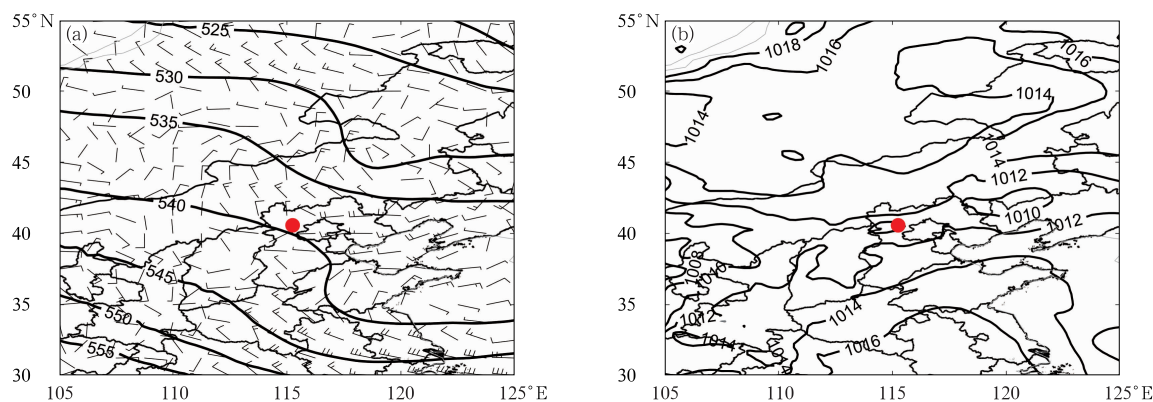


图 11 2019年3月3日20时(a)500 hPa形势场(黑色实线,单位:dagpm)

与850 hPa风场(风羽),(b)海平面气压场(黑色实线,单位:hPa)

(红色圆点:赛场位置,下同)

Fig. 11 Synoptic chart at 20:00 BT 3 March 2019

(a) geopotential height field at 500 hPa (black line, unit: dagpm) and wind field

at 850 hPa (barbs), (b) sea level pressure field (black line, unit: hPa)

(red dot: position of the Olympic Area, the same below)

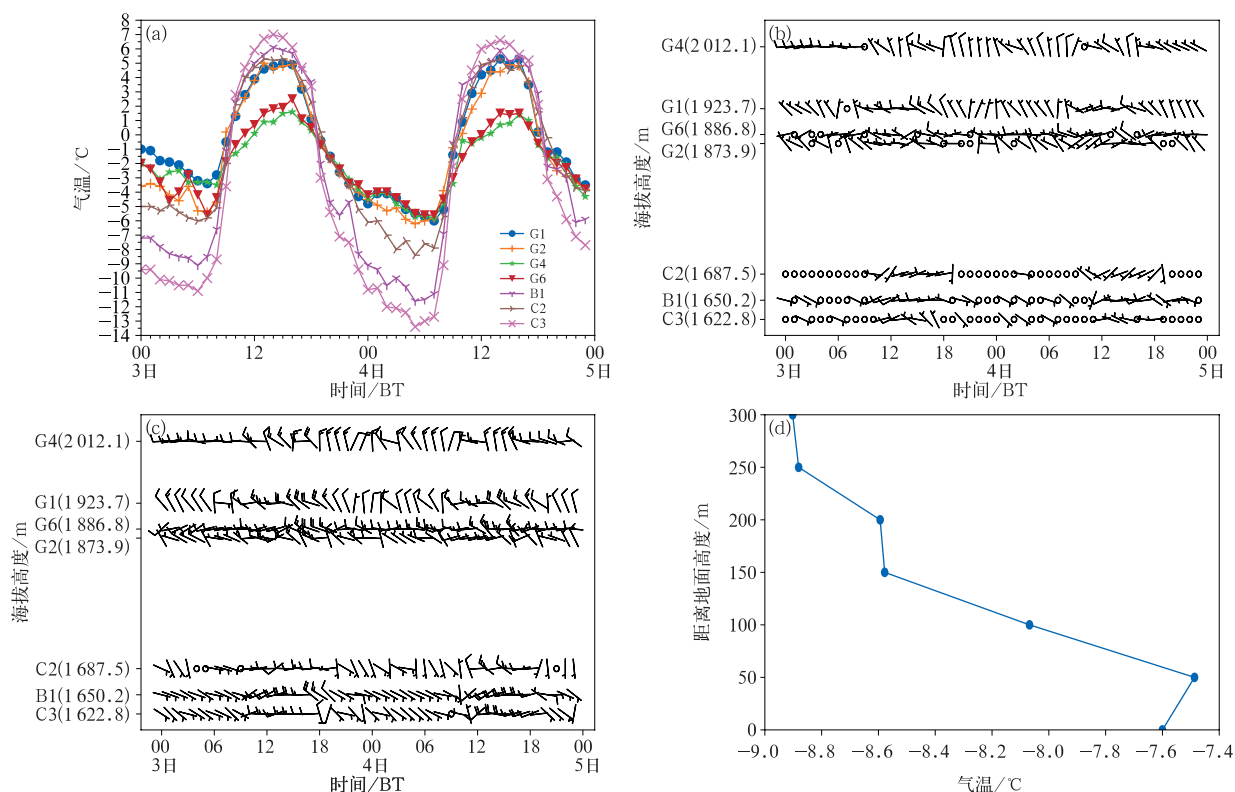


图 12 2019 年 3 月 3—4 日张家口赛区不同站点 (a) 气温、(b) 平均风、
(c) 极大风随时间的变化, (d) 4 日 01:45 微波辐射计测得的温度廓线

(图 12b, 12c 中 “o” 表示风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 下同)

Fig. 12 Time-variations of (a) temperature, (b) average wind and (c) peak wind at different weather stations in Zhangjiakou Olympic Area from 3 to 4 March, and (d) vertical profile of temperatures observed by radiometer at 01:45 BT 4 March 2019

(In Figs. 12b, 12c, “o” indicates wind speed $< 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the same below)

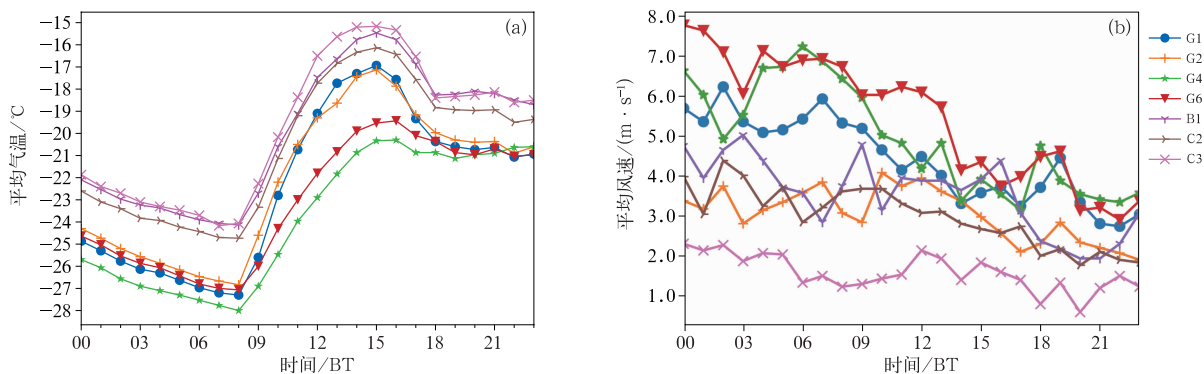


图 13 2019 年 1—3 月三次典型冷空气过程 (a) 平均气温与 (b) 平均风速的平均日变化

Fig. 13 Averaged diurnal variations of (a) temperatures and (b) winds in the three selected cold air cases under strong winds from January to March 2019

空气影响期间, 各站风速主要表现为随着环境风速 (使用海拔最高的 G4 站风速近似代替) 的减弱而同步降低, 环境风速影响占主导地位 (图 13b)。

以 3 月 11—12 日冷空气过程为例展开说明。在冷空气到来之前的 10 日凌晨, 赛场风力较小, 逆温现象明显, 3 月 10 日夜间, 500 hPa 高空槽系统影

响张家口崇礼区,低层存在切变系统,并伴有降水,其中G1站累计降水量为3.7 mm。11日,在槽后冷空气的影响下,高低层为较一致偏北气流(图14a),海平面气压场等压线密集(图14b),赛场附近(图14中红色圆点)地面风速较大。

11日凌晨,冷空气影响下两赛场气温垂直分布均出现反转,表现为上冷下暖,逆温特征消失,古杨树盆地底部不存在局地冷空气堆积,最低气温反而高于冷空气到来前的10日凌晨(图15a)。11日晚间,随着冷空气主体推进,所有站点气温进一步下

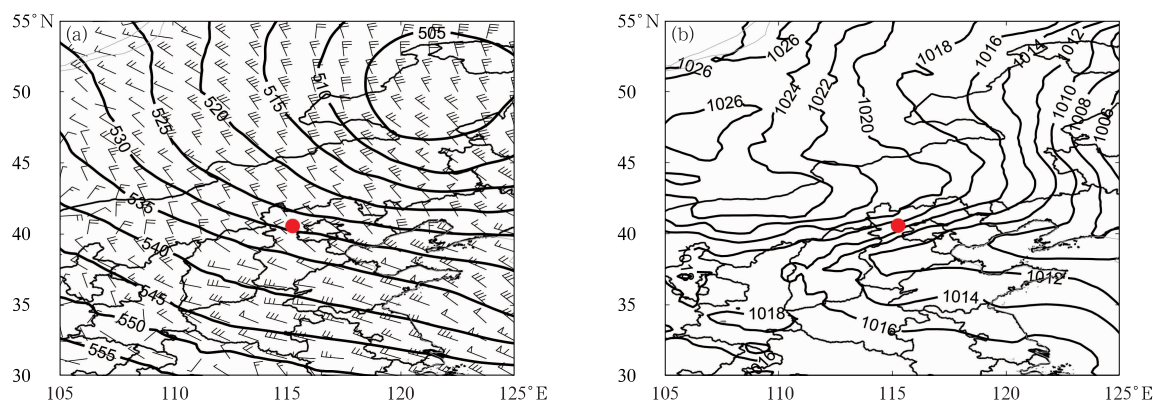


图14 同图11,但为2019年3月11日20时

Fig. 14 Same as Fig. 11, but for 20:00 BT 11 March 2019

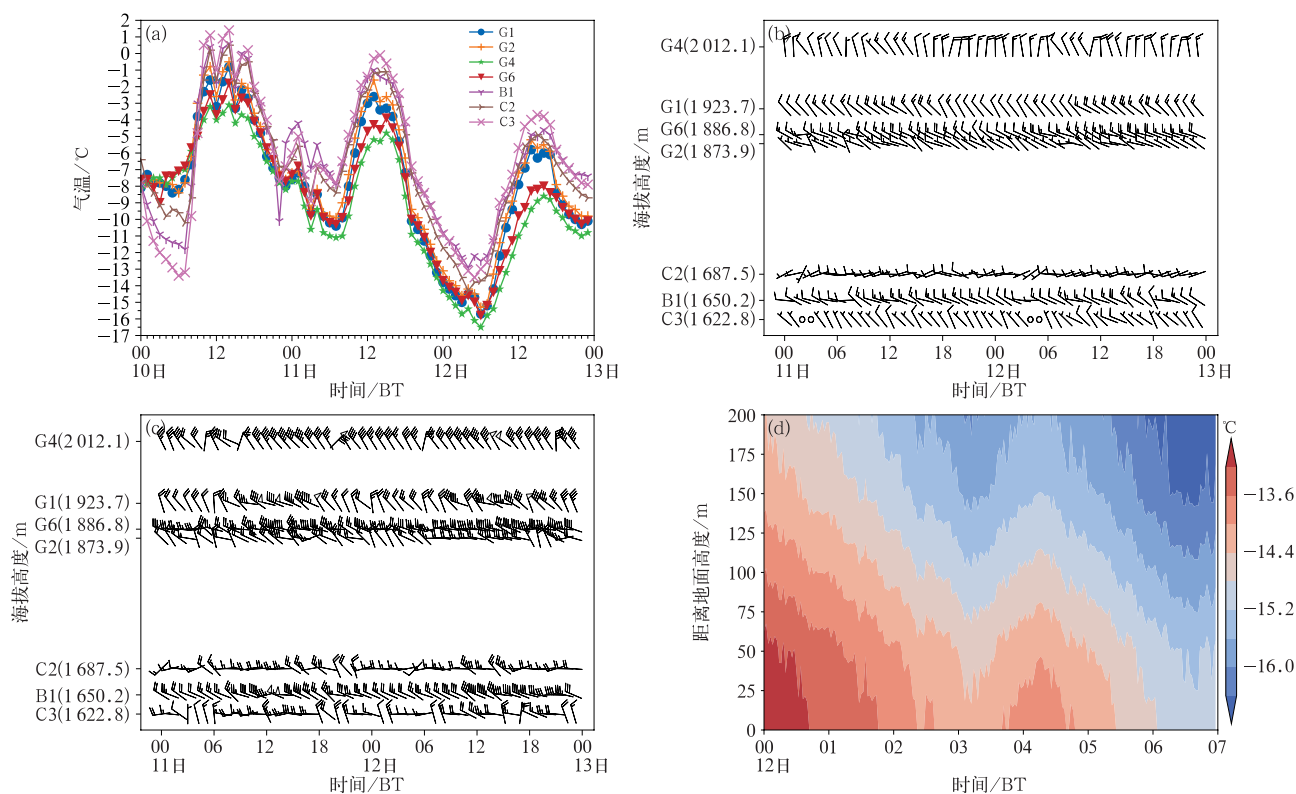


图15 2019年3月10—12日张家口赛区不同站点(a)气温、(b)平均风、
(c)极大风随时间的变化,(d)12日凌晨时段微波辐射计测得的温度

Fig. 15 Time-variations of (a) temperature, (b) average wind and (c) peak wind at different weather stations in Zhangjiakou Olympic Area from 10 to 12 March, and (d) vertical temperature observed by radiometer in the early morning of 12 March 2019

降,最低气温降低 5°C 以上。微波辐射计显示,冷空气影响下,云顶赛场温度层结始终为上冷下暖,垂直方向温度梯度大,在凌晨等逆温易发时段,均未观测到逆温层(图15d)。此外,云顶和古杨树赛场存在夜间增温现象,在10日22时至11日01时,B1站3h升温接近 6°C (图15a),微波辐射计资料亦能看到12日凌晨的升温现象(图15d)。夜间增温的机制较复杂,可能来源于气流过山后的下沉增温、冷锋过境时风速加大导致湍流混合增强等因素(White, 2009; 罗然等, 2020),本文不对此现象进行更多阐述。当赛区出现夜间风速加大、有较强过山气流等情况时,需关注可能出现的增温现象。

冷空气活动时,自身风力微弱的山谷局地环流特征消失,冷空气影响占据绝对主导地位。例如,当11日凌晨冷空气到达赛区后,所有站点风向均无明显日变化特征,无论平均风还是极大风,昼夜风向基本相同(图15b, 15c)。11—13日,云顶赛场G1、G2、G6站始终保持西北风,高海拔的G4站保持偏北风,古杨树盆地C2站保持偏西风,B1站和C3站维持西北风,表现为偏北冷空气在地形作用下的转向。在风速方面,两赛场地面风速显著增加并维持在较高区间,其中云顶赛场G1、G4、B1站均观测到超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风。

在较强冷空气影响下,赛区温度和风分布主要受环境条件控制,但需注意冷空气影响初期可能会出现夜间增温现象,在古杨树赛场由于逆温层被破坏,最低温度有可能比逆温控制时还高。

4 结论与讨论

基于2019年1—3月张家口赛区历史观测数据,对赛区气温与风的分布特征进行了统计分析,并对不同环流背景下气温及风特征进行了对比研究,结论如下:

(1)张家口赛区平均最高气温出现在14—15时,平均最低气温出现在06—07时,日出后(08—10时)及日落后(16—18时)平均温度变化剧烈。盆地或山谷温度日较差大于山顶,古杨树赛场平均气温日较差可达 12°C 以上。太阳辐射差异和海拔高度是影响赛区气温分布的主要因素。

(2)在2019年1—3月期间,夜间在地形热力作用下冷空气堆积造成古杨树盆地逆温频发,但大多数情况下,逆温强度较小($0\sim 0.5^{\circ}\text{C}$),逆温强度大

于 3.55°C 的样本占5.2%。逆温主要出现在夜间,白天受太阳辐射影响,逆温出现的概率极低。环境风和温度的变化影响逆温强度,一般而言,风速越小,逆温强度越大,日变温为正且越大时,逆温越强。

(3)云顶赛场风向日变化小,昼夜均以西北风为主,与“西北—东南”向沟壑的走向一致。古杨树盆地风向相对分散,风向昼夜转变有明显的地形风特征。在张家口赛区,风速总体随海拔高度升高而增大,大部分站点风速具有明显日变化特征,中午前后会明显增大,在日落前减弱,夜间最小。赛区阵风系数大多介于1.8~2.8,局地可达3.0~4.1。高海拔山区的风速高于盆地。

(4)均压场下,昼夜风力小。古杨树赛场风向有明显昼夜转换,而云顶赛场不明显。逆温是均压场下古杨树赛场的典型特征,逆温层在日落后18时左右建立,在日出前05—06时达到最强。日出后09—10时,在太阳辐射的作用下,逆温现象消失或减弱迅速。在海拔较高的云顶山区,地形相对开阔,冷空气难以堆积,逆温强度明显弱于古杨树盆地,逆温层浅薄且在时间上不连续。

(5)冷空气活动时,昼夜风力大,环境风占据绝对主导地位,局地热力环流造成的地形风特征消失。无论云顶还是古杨树赛场,温度层结始终为上冷下暖,两赛场风向均无明显日变化,云顶赛场以西北或偏北风为主,古杨树赛场以西北或偏西风为主。

本文对张家口赛区风、温度进行了分析,所得结论为认识赛区复杂气象要素特征提供了有价值的参考。但对弱气压场下山谷风环流、逆温、夜间升温等现象发生发展的机制并不清楚,未来需要对此进行更深入的观测以及模拟研究。此外,复杂地形下,气温与风的预报难度较大,现有数值预报模式具有较大预报误差。在下一步工作中,将结合赛区气温与风的特征,开展针对气温与风等气象要素的客观预报技术研究,为业务预报提供有力技术支撑。

致谢:感谢河北省气象台王宗敏、李江波、朱刚、陈子健,石家庄市气象台李禧亮等专家在天气个例挑选、数据资料获取与处理方面提供的指导与帮助。

参考文献

- 董双林, 2001. 中国的阵风极值及其统计研究[J]. 气象学报, 59(3): 327-333. Dong S L, 2001. Gust extremes in China and its statistical study[J]. Acta Meteor Sin, 59(3): 327-333 (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).
- 刘炳荣, 李晴岚, 杨琳, 等, 2019. 深圳地区季节风特征研究[J]. *气象*, 45(2): 263-273. Liu B R, Li Q L, Yang L, et al, 2019. Seasonal wind characteristics in Shenzhen Area[J]. *Meteor Mon*, 45(2): 263-273(in Chinese).
- 刘敬乐, 姚青, 蔡子颖, 等, 2020. 基于天津 255 m 气象塔对近年天津近地面风和气温变化特征的研究[J]. *气象*, 46(9): 1235-1244. Liu J L, Yao Q, Cai Z Y, et al, 2020. Analysis of temperature and wind variation characteristics based on the 255 m meteorological tower in Tianjin[J]. *Meteor Mon*, 46(9): 1235-1244(in Chinese).
- 罗然, 郑永光, 陈敏, 2020. 北京一次罕见夜间突发性强增温事件成因分析[J]. *气象*, 46(4): 478-489. Luo R, Zheng Y G, Chen M, 2020. Mechanism of a rare night sudden intense warming event in Beijing and surrounding area[J]. *Meteor Mon*, 46(4): 478-489(in Chinese).
- 孟丹, 陈正洪, 陈城, 等, 2019. 基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J]. *气象*, 45(12): 1756-1761. Meng D, Chen Z H, Chen C, et al, 2019. Research on wind changes at different heights in atmospheric boundary layer based on sounding wind data[J]. *Meteor Mon*, 45(12): 1756-1761(in Chinese).
- 宋丽莉, 吴战平, 秦鹏, 等, 2009. 复杂山地近地层强风特性分析[J]. *气象学报*, 67(3): 452-460. Song L L, Wu Z P, Qin P, et al, 2009. An analysis of the characteristics of strong winds in the surface layer over a complex terrain[J]. *Acta Meteor Sin*, 67(3): 452-460(in Chinese).
- 乌日柴胡, 王建捷, 孙靖, 等, 2019. 北京山区与平原冬季近地面风的精细观测特征[J]. *气象学报*, 77(6): 1107-1123. Wu R C H, Wang J J, Sun J, et al, 2019. An observational investigation of fine features of near surface winds in winter over Beijing Area[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(6): 1107-1123(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).
- 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).
- 张玉涛, 佟华, 孙健, 2020. 一种偏差订正方法在平昌冬奥会气象预报的应用[J]. *应用气象学报*, 31(1): 27-41. Zhang Y T, Tong H, Sun J, 2020. Application of a bias correction method to meteorological forecast for the Pyeongchang Winter Olympic Games[J]. *J Appl Meteor Sci*, 31(1): 27-41(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).
- 周福, 蒋璐璐, 涂小萍, 等, 2017. 浙江省几种灾害性大风近地面阵风系数特征[J]. *应用气象学报*, 28(1): 119-128. Zhou F, Jiang L L, Tu X P, et al, 2017. Near-surface gust factor characteristics in several disastrous winds over Zhejiang Province[J]. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 119-128(in Chinese).
- Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al, 1971. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer[J]. *J Atmos Sci*, 28(2): 181-189.
- Clements C B, Whiteman C D, Horel J D, 2003. Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin: Peter Sinks, Utah[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 42(6): 752-768.
- 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]. *J Meteor Res*, 30(6): 961-982.
- Kaufmann P, Whiteman C D, 1999. Cluster-analysis classification of wintertime wind patterns in the Grand Canyon Region[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 38(8): 1131-1147.
- Leukauf D, Gohm A, Rotach M W, et al, 2015. The impact of the temperature inversion breakup on the exchange of heat and mass in an idealized valley: sensitivity to the radiative forcing[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 54(11): 2199-2216.
- Mahrt L, Vickers D, Nakamura R, et al, 2001. Shallow drainage flows[J]. *Bound-Lay Meteor*, 101(2): 243-260.
- White L D, 2009. Sudden nocturnal warming events in Mississippi[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(4): 758-775.
- Whiteman C D, Zhong S Y, Bian X D, 1999. Wintertime boundary layer structure in the Grand Canyon[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 38(8): 1084-1102.
- Yu B, Chowdhury A G, 2009. Gust factors and turbulence intensities for the tropical cyclone environment[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(3): 534-552.

(本文责编:戴洋)