

孔凡超,李江波,王颖,2021.北京冬奥会云顶赛场微波辐射计反演大气温湿廓线分析[J].气象,47(9):1062-1072. Kong F C, Li J B, Wang Y, 2021. Analysis on atmospheric profiles retrieved by microwave radiometer at Genting Venue of Beijing Olympic Winter Games[J]. Meteor Mon, 47(9):1062-1072(in Chinese).

# 北京冬奥会云顶赛场微波辐射计反演 大气温湿廓线分析<sup>\*</sup>

孔凡超<sup>1</sup> 李江波<sup>1</sup> 王 颖<sup>2</sup>

1 河北省气象台,石家庄 050021

2 内蒙古呼伦贝尔市气象台,呼伦贝尔 021000

**提 要:** 利用冬奥会云顶赛场 2019 年 1 月 22 日至 3 月 30 日自动站以及张家口探空资料,对微波辐射计反演温湿廓线的精度进行了分析,并结合 NCEP/NCAR 逐 6 h 再分析资料探讨了赛场夜间热力、水汽特征及其成因。结果表明:总体上微波辐射计反演温度和水汽密度与自动站、探空观测之间一致性较好,相对湿度略差。微波辐射计反演温度平均误差在各个层次相对不大,可用性较强;水汽密度均方根误差表现为近地面较大,随高度升高而减小;相对湿度平均误差在多数层次上均较大,最大平均误差达到 25%。云和降水均会导致温度和水汽密度在大部分高度上误差加大,但降水天气相对湿度误差较晴空和有云天气条件明显减小。进一步研究赛场夜间热力、水汽特征发现,夜间逆温层结构在云顶赛场十分常见,出现概率达到 50%,逆温层顶一般在山顶附近或以下,当配合暖平流时,逆温层厚度和温差将大大加强。锋区移过后中低层下沉运动以及中低层暖平流都可能给赛场带来明显的夜间增温。下沉运动主导的增温过程中,微波辐射计参数廓线表现为中低层温度整体升高,低层水汽密度在下沉辐散作用下明显减小。在中低层暖平流主导的增温过程中,增温强度随高度升高而减小,且增温过程表现出明显的增湿现象。

**关键词:** 微波辐射计,逆温层,夜间升温

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.09.003

## Analysis on Atmospheric Profiles Retrieved by Microwave Radiometer at Genting Venue of Beijing Olympic Winter Games

KONG Fanchao<sup>1</sup> LI Jiangbo<sup>1</sup> WANG Ying<sup>2</sup>

1 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

2 Hulunbuir Meteorological Observatory of Inner Mongolia, Hulunbuir 021000

**Abstract:** Based on the data of microwave radiometer, automatic station and Zhangjiakou Radiosonde from 22 January to 30 March 2019 in the Genting Venue of Winter Olympic Games, the accuracy of retrieved temperature and humidity profile was analyzed, and the characteristics and causes of night heat and water vapor were discussed in combination with the 6 h reanalysis data of NCEP/NCAR. The results show that the temperature and water vapor density retrieved by microwave radiometer have a good correlation with the observations by radiosonde and automatic stations, but that of the relative humidity is slightly poor. The mean error (ME) of temperature retrieved by microwave radiometer is relatively small at all levels, and the availability is strong; the root mean squared error of water vapor density are relatively large near the ground, and decrease with the increase of height; the ME of relative humidity at all levels is large, and

\* 河北省技术创新引导计划项目(19975414D)资助

2020 年 3 月 24 日收稿; 2021 年 6 月 7 日收修定稿

第一作者:孔凡超,主要从事冬奥天气预报和决策气象服务工作. E-mail: fanchaok@163.com

the maximum reaches 25%. In addition, cloud and precipitation cause the error of temperature and water vapor density to increase at most heights, but the error of relative humidity with precipitation, at most altitudes, is obviously smaller than that under conditions of clear sky and cloud. Further study on the characteristics of heat and water vapor at night shows that the inversion layer structure at night is very common in the Genting Venue, with a probability of 50%. The inversion layer top is generally near or below the mountain top. When combined with warm advection, the thickness and temperature difference of inversion layer will be greatly enhanced. The warm advection and the subsidence movement in the middle and lower layers behind the cold front may bring obvious night temperature increasing to the venue. In the process of temperature increasing dominated by subsidence movement, the profile of microwave radiometer shows that the temperature in the middle and lower layers increases as a whole, and the water vapor density in the lower layers decreases obviously under the effect of subsidence and divergence. In the warming process dominated by warm advection, the warming intensity decreases with height, and the warming process shows obvious humidification phenomenon.

**Key words:** microwave radiometer, inversion layer, night temperature increasing

## 引言

张家口市崇礼区将承担2022年第24届北京冬季奥运会(以下简称冬奥会)单板滑雪、自由式滑雪、越野滑雪、跳台滑雪、北欧两项、冬季两项等共6个大项51个小项的比赛。这是冬奥会首次在大陆性季风气候地区举行,而往届的举办地均属海洋性气候。气象条件不仅对运动员成绩有较大影响,对赛事组织,甚至安全运行也有较大影响,可以说天气是冬奥会能否顺利成功举办的关键因素。崇礼区山峰林立、沟壑相连,地形较为复杂,同时气象资料积累少,因此气象预报具有极大的挑战性。在这种情况下,为了能获得高时空分辨率的气象观测资料,当地气象部门从2016年开始在赛区及周边部署地面及探空设备。考虑到地基微波辐射计具有全天候连续观测的优势,可以弥补探空中探测时间间隔长和探测信息不全的缺点,2019年1月,赛区布设了4部微波辐射计,用以监测赛场上空大气温度、湿度、水汽密度以及云液态水廓线。这些连续的大气廓线为捕捉中小尺度系统的精细热力结构提供了可能。

近些年,许多学者对微波辐射计的测量精度进行了研究,探讨了微波辐射计的优势与不足。刘红燕(2011)用北京南郊三年的地基微波辐射计资料,对温度廓线数据进行了分析,发现测量误差随高度逐渐增大。张秋晨等(2017)通过比较微波辐射计反演数据与探空测值的差异,发现温度、水汽密度与常

规探空资料有比较好的线性相关性。丁虹鑫等(2018)探讨了微波辐射计联合云雷达提高相对湿度廓线反演精度的方法。郑飒飒(2019)经过评估发现微波辐射计反演的温度和水汽密度可信度较高,能弥补探空在时空上分布不足的问题。随着微波辐射计应用越来越广泛,不少学者已将微波辐射计观测获得的大气热力和水汽信息应用于强对流、暴雪等灾害天气的潜势预报以及边界层结构演变过程的研究中。李睿劼和李宏宇(2008)、Chan(2009)利用微波辐射计温湿廓线计算的K指数监测大气稳定度,并探讨了其在降水临近预报中的作用。许皓琳等(2020)研究表明微波辐射计水汽资料对雷暴降水有较好的预警和识别作用。韩珏靖等(2015)分析了不同天气下微波辐射计的探测特征,发现相对湿度和液态水含量的垂直变化与降水、强对流和大雾的发生有良好对应。唐仁茂等(2012)、黄治勇等(2014)对发生在咸宁的冰雹天气过程进行监测分析,发现微波辐射计探测资料对冰雹天气有一定的临近预警潜力。刘思波等(2015)探讨了地基微波辐射计资料直接反演大气边界层高度的方法。杨富燕等(2016)使用温度梯度法估算了大气混合层高度。

本文利用2019年1—3月自动气象站资料、张家口L波段探空资料对崇礼区云顶赛场MWP967KV型地基微波辐射计反演温湿廓线的精度进行分析,评估微波辐射计反演数据在云顶赛场的适用性,并尝试利用微波辐射计反演的大气廓线资料,探讨云顶赛场大气热力和水汽变化特征。

## 1 数据与方法

### 1.1 资料

地基微波辐射计是西安北方天穹生产的 MWP967KV 型。该设备可实现多通道连续探测水汽和氧气的大气微波辐射,并利用辐射传输方程,辅以神经网络建模技术,实时自动反演得到 0~10 km 的大气温度、湿度、水汽以及液态水含量等多种大气参数。设备探测时间间隔为 2 min;输出廓线垂直方向为 58 层,其中 0~0.5 km 高度分辨率为 0.05 km,0.5~2 km 分辨率为 0.1 km,2~10 km 分辨率为 0.25 km。设备运行时间为 2019 年 1 月 22 日到 3 月 30 日(其中 1 月 22 日 00—12 时,25 日 15 时至 28 日 11 时设备维护)。

云顶赛场所处山谷海拔落差较大,谷底海拔高度为 1733 m,山顶超过 2000 m。其中云顶 1 号站(海拔高度为 1923.4 m)和 2 号站(海拔高度为 1853.9 m)位于微波辐射计(海拔高度为 1839.2 m)所在的山谷北坡上,与微波辐射计的水平距离均在 50 m 以内,垂直方向分别位于微波辐射计上方 84.2 m 和 14.7 m 的位置(图 1)。两个自动站均可监测温度、湿度、风、固态降水等气象要素,观测时间间隔为 5 min。

张家口探空站位于张家口主城区东部,海拔高度为 774 m,距离云顶赛场的直线距离为 49 km。其使用的是 L 波段无线电探空系统,通过传感器直接探测大气温度、湿度、压强的垂直变化,同时 L 波段雷达可定位推算水平风廓线,廓线垂直采样时间间隔为 1 s。该系统在每天 08 时和 20 时(北京时间,下同)进行观测。

此外,在赛场热力和水汽特征分析中还使用了 NCEP/NCAR 逐 6 h 再分析资料,水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,主要气象要素包括:位势高度、温度、风、相对湿度、垂直速度。

### 1.2 分析方法

利用张家口探空站的 L 波段探空资料(资料时段为 2018 年、2019 年两年的 1—3 月,共计 180 d)计算总 Richardson 数来判别张家口及其周边地区的边界层高度。总 Richardson 数的计算方案参照 Sicard et al(2006)。

$$Ri(z) = g \frac{(z - z_0) [\theta(z) - \theta(z_0)]}{\theta(z) [u(z)^2 + v(z)^2]}$$

式中: $g$  为重力加速度, $z_0$  为地面海拔高度, $\theta$  为位温, $u$  和  $v$  分别为纬向、经向风分量。总 Richardson 数是衡量湍流运动的重要参数,而边界层高度是湍流运动转变为层流运动的分界线,本文依据 Sicard et al(2006)、徐桂荣等(2014)将边界层高度设定为总 Richardson 数首次大于临界值(0.25)的高度。

08 时和 20 时两个观测时刻分别接近于张家口地区的日出、日落时刻,边界层绝大多数为稳定边界层,从计算结果来看,边界层高度最大值为 1.3 km,最小值为 0.05 km,80% 的高度值集中在 0.15~0.7 km,平均值为 0.486 km。微波辐射计位置距其所在山坡顶为 0.15 km,加上平均边界层高度(0.486 km),因此设定微波辐射计上方 0.6 km 以内的数据会受到局地地形的影响,0.6 km 以上为自由大气。

选取 08 时和 20 时两个观测时刻的自动站资料、探空资料与最临近这两个时刻的微波辐射计反演数据进行匹配。此外,考虑到自动站海拔高度,将 2 号站、1 号站观测数据分别与微波辐射计 0 km 和 0.1 km 高度资料进行比较,同时采用线性插值法将探空廓线插值到微波辐射计 0.6~3 km 廓线上的 19 个高度层,然后以此为参考,对相应层次上匹配的微波辐射计廓线精度进行评估。本文考察了云顶 1 号站、2 号站观测数据,L 波段探空数据与微波辐射计反演的温度、水汽密度和相对湿度之间的相关系数、平均误差以及均方根误差。并在此基础上,进一步分析了云顶赛场上空夜间逆温以及夜间升温过程中的大气热力和水汽特征,以期为做好冬奥会期间最低气温和湿度预报提供科学依据。

## 2 对比结果分析

### 2.1 总体评价

云顶 1 号站、2 号站和张家口探空站均为中国气象局业务准入设备。设备所观测到的数据经河北省气象信息中心进行了质量控制,符合业务规范和准入要求,能够反映大气的真实状态。将微波辐射计反演数据与对应层次的自动站资料、探空资料对比,可视为与大气真实状态的对比。对 2019 年 1 月 22 日到 3 月 30 日期间,3 km 以下全部 21 个层次上

的共计 2882 组大气温度、水汽密度以及相对湿度数据进行整体对比分析,结果如图 2。微波辐射计

反演温度与自动站、探空站两种数据的相关系数分别为 0.98 和 0.88,平均误差为 0.18°C 和 0.33°C,均

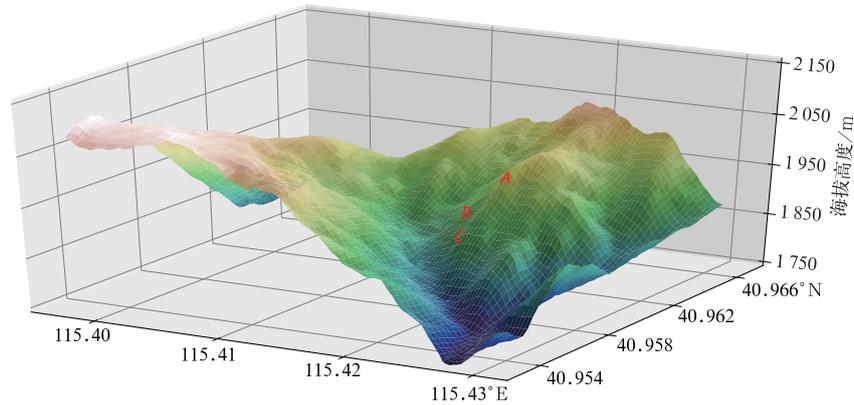


图 1 云顶赛场周边地形及云顶 1 号站(A 点)、2 号站(B 点)和微波辐射计位置(C 点)

Fig. 1 Surrounding topography of Genting Venue and positions of Genting Station 1 (Point A), Station 2 (Point B) and microwave radiometer (Point C)

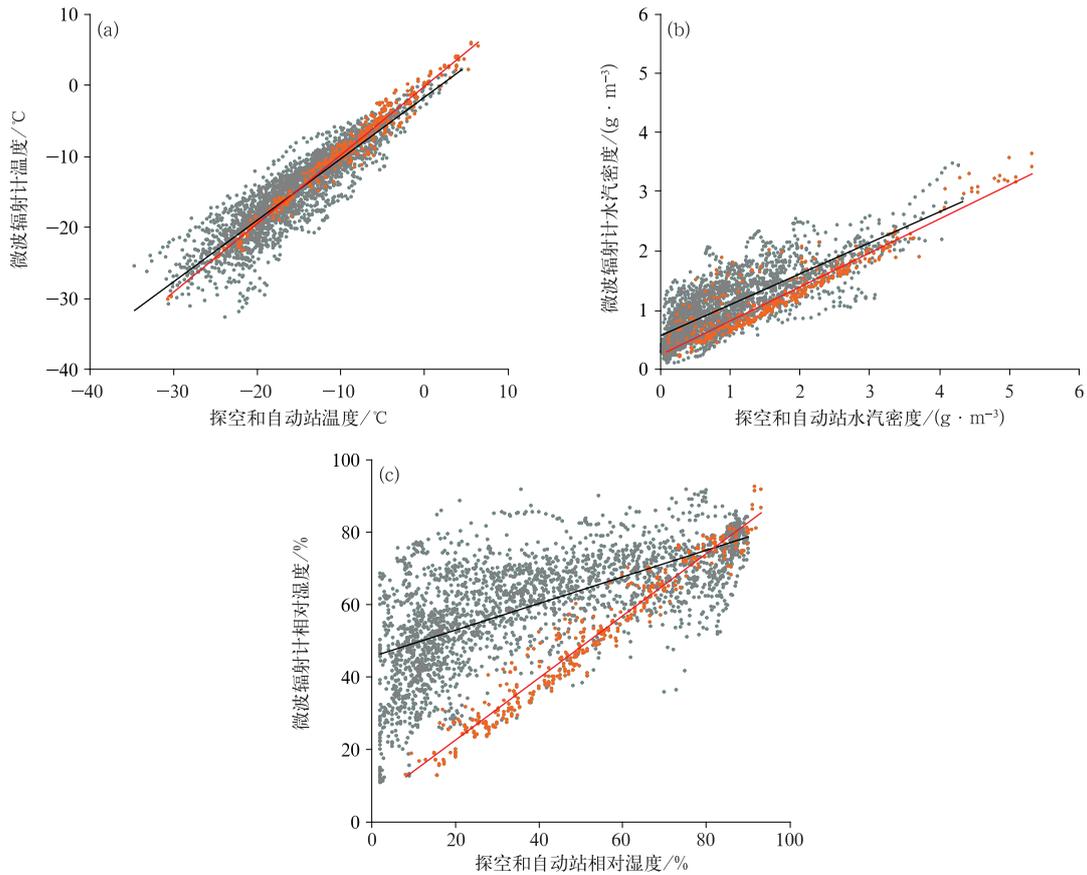


图 2 2019 年 1 月 22 日至 3 月 30 日微波辐射计反演温度(a)、水汽密度(b)和相对湿度(c)与张家口探空(灰色点)、自动站(黄色点)比较(黑线为与张家口探空对比趋势线,红线为与自动站对比趋势线)

Fig. 2 Comparison of temperature (a), water vapor density (b) and relative humidity (c) retrieved by microwave radiometer with Zhangjiakou Radiosonde (gray dots) and automatic stations (yellow dots) observed from 22 January to 30 March 2019 (black trend line: Zhangjiakou Radiosonde, red trend line: automatic stations)

方根误差为  $1.2^{\circ}\text{C}$  和  $3^{\circ}\text{C}$ , 这表明在近地面层, 反演温度误差较小, 而在平均边界层上方误差增大, 且温度越低离散度越大(图 2a)。由于大气的环境温度随高度增加而降低, 这也反映出反演温度的精度随高度增加而降低。总体来看, 微波辐射计与自动站、探空站温度的整体相关系数为 0.91, 平均误差为  $0.3^{\circ}\text{C}$ , 均方根误差为  $2.8^{\circ}\text{C}$ , 且通过了  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验, 说明反演温度在 3 km 以下与实况的误差不大, 可用性较好。水汽密度方面, 反演值与自动站、探空站两种数据的相关系数分别为 0.93 和 0.78, 平均误差为  $-0.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.12\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均方根误差为  $0.65\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.46\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 表明反演水汽密度与实况的一致性在近地面层好于平均边界层上方, 但误差较大(图 2b)。反演水汽密度与自动站、探空站的整体相关系数为 0.81, 平均误差为  $0.04\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均方根误差为  $0.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 说明反演水汽密度可以表征水汽的变化趋势。与温度和水汽密度相似, 在近地面层微波辐射计相对湿度与自动站数据也有较好的一致性, 相关系数为 0.97, 平均误差为  $-1.7\%$ , 均方根误差为  $5.4\%$ , 但微波辐射计相对湿度与探空站数据相关系数仅有 0.64, 表明微波辐射计相对湿度在平均边界层高度上方表征相对湿度变化趋势的能力不足(图 2c)。微波辐射计相对湿度与自动站、探空站数据的整体相关系数为 0.72, 平均误差为  $15\%$ , 均方根误差较大, 为  $25\%$ , 可用性总体较差。许多有关微波辐射计的研究也有类似的结论(徐桂荣等, 2019; 张秋晨等, 2017)。

微波辐射计温度、水汽密度反演值与自动站数据、探空站数据的对比结果表明, 无论在近地面层还是在平均边界层上方, 其与实际观测均存在明显的正相关和相对较小的均方根误差。可见, 温度、水汽密度反演值能够反映实际大气中温湿状态的升降变化, 且与实际大气有较高的吻合度, 其在云顶赛场实际观测业务中可用性较强, 可以弥补其他设备观测数据时空分辨率不高的不足。但微波辐射计相对湿度在平均边界层上方与实际观测相关性较差, 偏差较大, 准确性不高, 反映实际大气相对湿度垂直廓线的能力不足。其原因主要是微波辐射计相对湿度是由反演得到的大气温度、水汽密度实时计算得来, 因此相对湿度误差结合了反演温度和水汽密度两方面的误差。

## 2.2 垂直方向对比

赛区微波辐射计观测资料主要用于分析低层大气温湿特征演变, 因此本文着重分析微波辐射计反演的 0~3 km 共 21 个高度层数据。从对比结果来看, 微波辐射计反演温度在多数高度层上的平均误差表现为正值, 最大值为  $1.5^{\circ}\text{C}$ , 出现在 3 km 高度(图 3a)。反演温度的均方根误差在 0.1 km 以下小于  $1.5^{\circ}\text{C}$ , 但随高度增加逐渐增大, 1~1.6 km 约为  $2.5^{\circ}\text{C}$ , 2.75 km 达到最大, 为  $3.5^{\circ}\text{C}$ (图 3d)。反演水汽密度的平均误差在 1 km 以下为负值, 且地面附近最为明显, 而 1~3 km 平均误差转为正值, 且先增大后减小。但其均方根误差随高度增加表现为一致性的减小(图 3e)。微波辐射计相对湿度在地面附近平均误差仅有  $-2.8\%$ , 0.6~3 km 平均误差则明显表现为正值, 且先增大后减小, 最大值为  $25\%$ , 出现在 2.25 km 高度(图 3c)。相对湿度的均方根误差随高度也表现出先增加后减小, 最大值为  $33\%$ , 也出现在 2.25 km 高度(图 3f)。以上对比结果表明, 微波辐射计反演温度在 3 km 以下平均误差不大, 可用性较强。反演的水汽密度均方根误差随高度减小。而相对湿度反演值除在近地面误差较小外, 其他高度误差均较大。

云会造成云高度甚至云层以上高度的反演误差增大(车云飞等, 2015), 此外降水时产生的水膜也会对微波辐射计的观测质量造成一定影响, 因此对比降水、有云(无降水)和晴空条件下微波辐射计反演数据的误差情况对业务应用具有重要的参考价值。从温度平均误差垂直廓线的对比情况来看(图 3a), 降水天气情况下, 各高度上温度平均误差表现为一致的正值, 同时有云条件下, 除 0.1~0.7 km 高度外, 其他高度也表现为正值, 两种天气条件下最大平均误差均出现在 3 km 高度, 分别为  $2.4^{\circ}\text{C}$  和  $2.1^{\circ}\text{C}$ , 且在多数高度上的温度平均误差要大于晴空条件。此外, 温度均方根误差垂直廓线显示(图 3d), 虽然三种天气条件均方根误差垂直变化特征基本一致, 随高度增加而增大, 但晴空条件温度均方根误差更小, 其中 0.8~3 km, 晴空条件较降水条件小  $0.6^{\circ}\text{C}$  左右, 而有云条件温度均方根误差处于晴空条件和降水条件之间。由此可见, 有云和降水天气条件均会降低微波辐射计反演温度的准确度, 降水带来的偏离程度更大。三种天气条件下水汽密度对比情况表明(图 3b), 降水天气条件下, 水汽密度平均误差

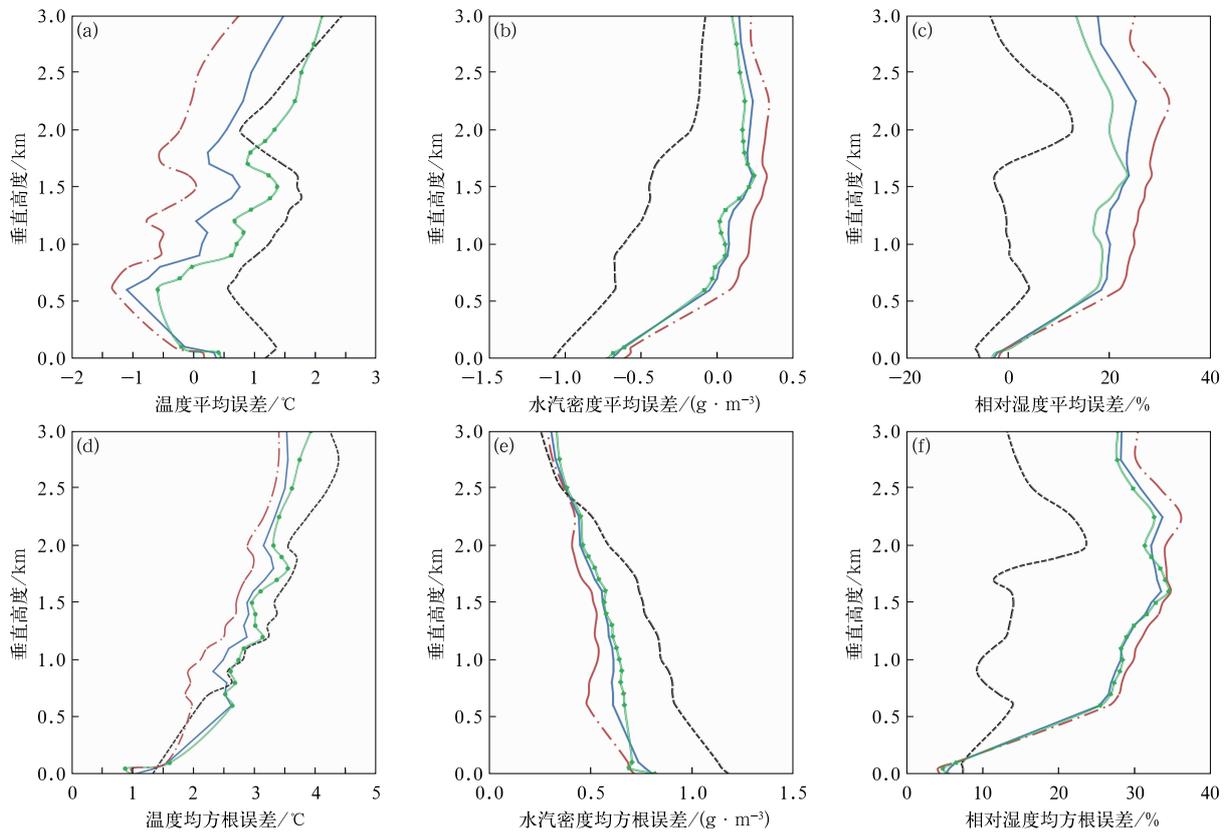


图 3 2019 年 1 月 22 日至 3 月 30 日微波辐射计与自动站以及张家口探空温度(a,d)、水汽密度(b,e)、相对湿度(c,f)的平均误差(a,b,c)、均方根误差(d,e,f)廓线

(蓝实线为总体样本,黑点线为降水样本,红点划线为晴空样本,绿点线为无降水有云样本)

Fig. 3 ME (a, b, c), RMSE (d, e, f) profiles of temperature (a, d), water vapor density (b, e) and relative humidity (c, f) of microwave radiometer, Zhangjiakou Radiosonde and automatic stations from 22 January to 30 March 2019

(blue solid line: overall sample, black dotted line: precipitation sample, red dotted line: sample without cloud, green dotted line: sample without precipitation with cloud)

表现为明显的负值,且平均误差绝对值随高度增加而减小;有云天气条件下,0.7 km 以上平均误差转为正值;晴空天气条件下 0.6 km 以上平均误差转为正值。三种天气条件水汽密度均方根误差均表现为随高度增加而减小,降水天气下,水汽密度的均方根误差更大,晴空条件下的均方根误差较小(图 3e)。相对湿度对比结果显示(图 3c),三种天气条件下,相对湿度在多数层次上平均误差均表现为正值,但晴空天气下,相对湿度平均误差更大,最大值为 31.7%(2.25 km 处),而降水天气下相对湿度最大平均误差仅有 12%(2 km),有云条件下相对湿度平均误差处于晴空和降水之间。相对湿度均方根误差垂直廓线显示(图 3f),晴空和有云天气相对湿度均方根误差相差不大,但降水天气相对湿度均方根误差明显小于晴空和有云天气。上述分析结果表明,云和降水均会降低微波辐射计温度、水汽密度的准确度,其中降水的影响程度更大。此外降水天气

下相对湿度的误差明显小于晴空和有云天气。

### 3 大气边界层温、湿变化特征

云顶赛场海拔高、地势陡峭,大气低层温湿结构与平原地区有较大区别,从前期冬训过程中微波辐射计反演数据和自动气象观测站的监测数据显示,夜间常出现山顶气温高于山底的逆温结构,且易产生明显的夜间大幅升温。

#### 3.1 逆温层特征

经统计,在 66 d 的观测记录中,有 33 d 出现逆温层,逆温层高度多在 50~200 m,逆温层顶多位于山顶附近或低于山顶。从微波辐射计记录的逆温层温差来看,33 个过程中仅有 3 个逆温层温差超过 1℃,其中 1 月 23 日受暖平流影响,顶高比较高,达 900 m,逆温层最大温差为 4.7℃。观测试验期间,

逆温层开始建立的时间多在 19 时前后,部分过程受天气系统影响消失;部分过程出现消除又重新建立的情况,造成这种现象的原因可能是微波辐射计并未位于谷底,其记录的逆温层处于谷中逆温层靠近顶部的部分,受逆温层上部湍流影响较大。

2019 年 1 月 23 日温度廓线的日变化显示(图 4),23 日 00 时开始,低层 500 m 以下气温持续降低,04 时低层逆温层开始建立,逆温层厚度为 900 m,逆温层温差为 2.1℃。800~1800 m 在暖平流的作用下明显增温,04—07 时逆温层顶增温 2℃左右,此时逆温层温差达到最大 4.7℃。暖平流影响过程中水汽含量也有小幅增加,04—07 时,900 m 以下水汽密度的平均增幅约为  $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图略)。日出后,在太阳辐射增温作用下,近地层温度迅速增加,09 时逆温层消失。白天 1000 m 以下,太阳辐射增温作用明显,14 时  $-3^\circ\text{C}$  线伸展到 700 m。17 时低层降温作用明显,逆温层再次建立。

受地形影响,夜间云顶赛场山谷两侧山坡辐射降温,产生下坡气流,从而造成冷空气在谷中堆积,易出现谷底低于山顶的逆温结构,特别是在山谷上空配合暖平流时,逆温层厚度和逆温层温差将大大加强。

### 3.2 夜间升温特征

观测试验期间,微波辐射计和云顶 1 号站、2 号

站共记录到 10 次明显夜间增温过程。其判别标准如下:增温持续时间超过 3 h(增温过程温度最高值时间与增温起始时间的差值,且两时间点之间任一气温值不低于起始时刻气温。);升温幅度在  $2^\circ\text{C}$  以上;增温前后三小时内无降水;太阳辐射  $\leq 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (夜间的判别标准依据, Nallapareddy et al, 2011)。由于云顶 1 号站(海拔高度为 1923.4 m)接近山顶,造成其升温的原因可以排除地形造成的焚风作用。此外,湍流造成的气温脉动,一般持续时间较短,所以这类增温事件的主要原因也可以排除湍流。10 次明显夜间增温过程中增温幅度多在  $2\sim 5^\circ\text{C}$ ,最大值为  $7.3^\circ\text{C}$ ,增温持续时长多为  $3\sim 7 \text{ h}$ ,最长为 11 h 45 min(2019 年 1 月 25 日 18:40 到 26 日 06:25),几乎持续整夜。

根据天气学原理,温度局地变化主要取决于温度平流项、垂直运动项和非绝热加热项。上述明显增温事件发生在夜间,无太阳辐射或其他非绝热加热作用,因此温度局地变化的非绝热加热项主要是长波辐射降温,那么增温作用则由温度平流项或垂直运动项决定。云顶赛场山顶海拔高度超过 2000 m,因此中低层大气下沉运动和暖平流都会造成赛场出现明显升温过程。在 10 次明显增温过程中,共有 6 次过程是由锋区后的中低层大气下沉增温所造成的,4 次过程是由低层暖平流造成的(表 1)。

#### 3.2.1 下沉增温过程

2019 年 2 月 19 日夜间,云顶赛场出现一次下

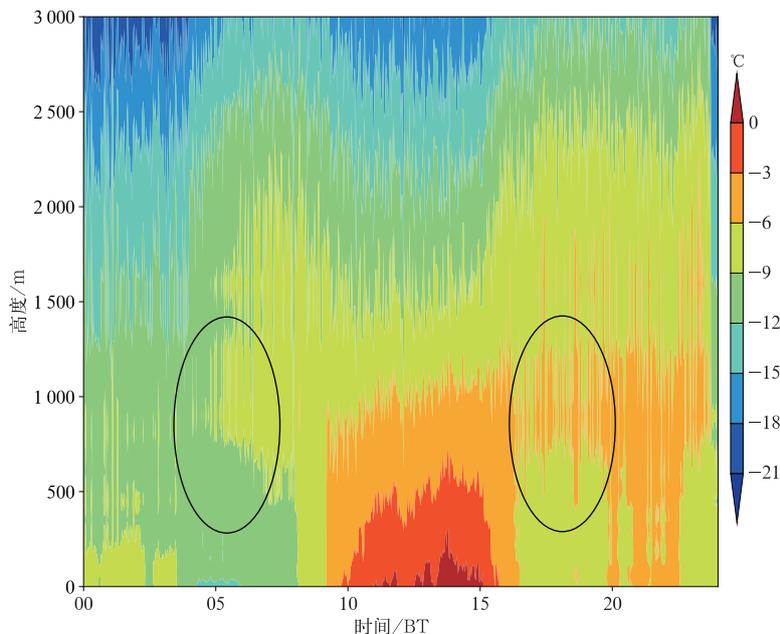


图 4 2019 年 1 月 23 日微波辐射计反演温度廓线演变

Fig. 4 Temperature profile evolution retrieved from microwave radiometer on 23 January 2019

沉增温天气过程。云顶 1 号站(图 5e)气温趋势显示,气温总体呈现出明显上升趋势,19 日 22:15 至 20 日 06:00 升温幅度为 3.2°C,但在升温过程中仍然伴有湍流造成的短时波动。微波辐射计温度廓线图表明(图 5a),0~3 000 m 均出现明显的升温特征,升温幅度在 2°C 左右。此外垂直方向 1 200 m 以下,水汽密度在增温过程中整体呈现明显减小的趋势,且越接近地面减小幅度越大。过程前后,1 000~1 200 m 处平均减小幅度为 0.1 g·m<sup>-3</sup>,而 0~200 m 平均减小幅度达到 0.6 g·m<sup>-3</sup>,说明越接近地面越干(图 5b)。

表 1 2019 年 1 月 22 日至 3 月 30 日观测试验期间 10 次增温过程  
Table 1 The 10 warming processes during the observation experiment from 22 January to 30 March 2019

过程日期	天气过程	增温幅度/°C	增温时长
1 月 25 日	下沉	7.3	11 h 45 min
2 月 1 日	暖平流	5.6	8 h
2 月 3 日	暖平流	6.0	8 h 25 min
2 月 4 日	暖平流	3.2	4 h 50 min
2 月 16 日	下沉	2.0	7 h 30 min
2 月 17 日	下沉	2.2	3 h 40 min
2 月 19 日	下沉	3.2	7 h 45 min
2 月 20 日	下沉	4.1	5 h 35 min
3 月 6 日	下沉	4.7	3 h 35 min
3 月 25 日	暖平流	2.3	6 h 15 min

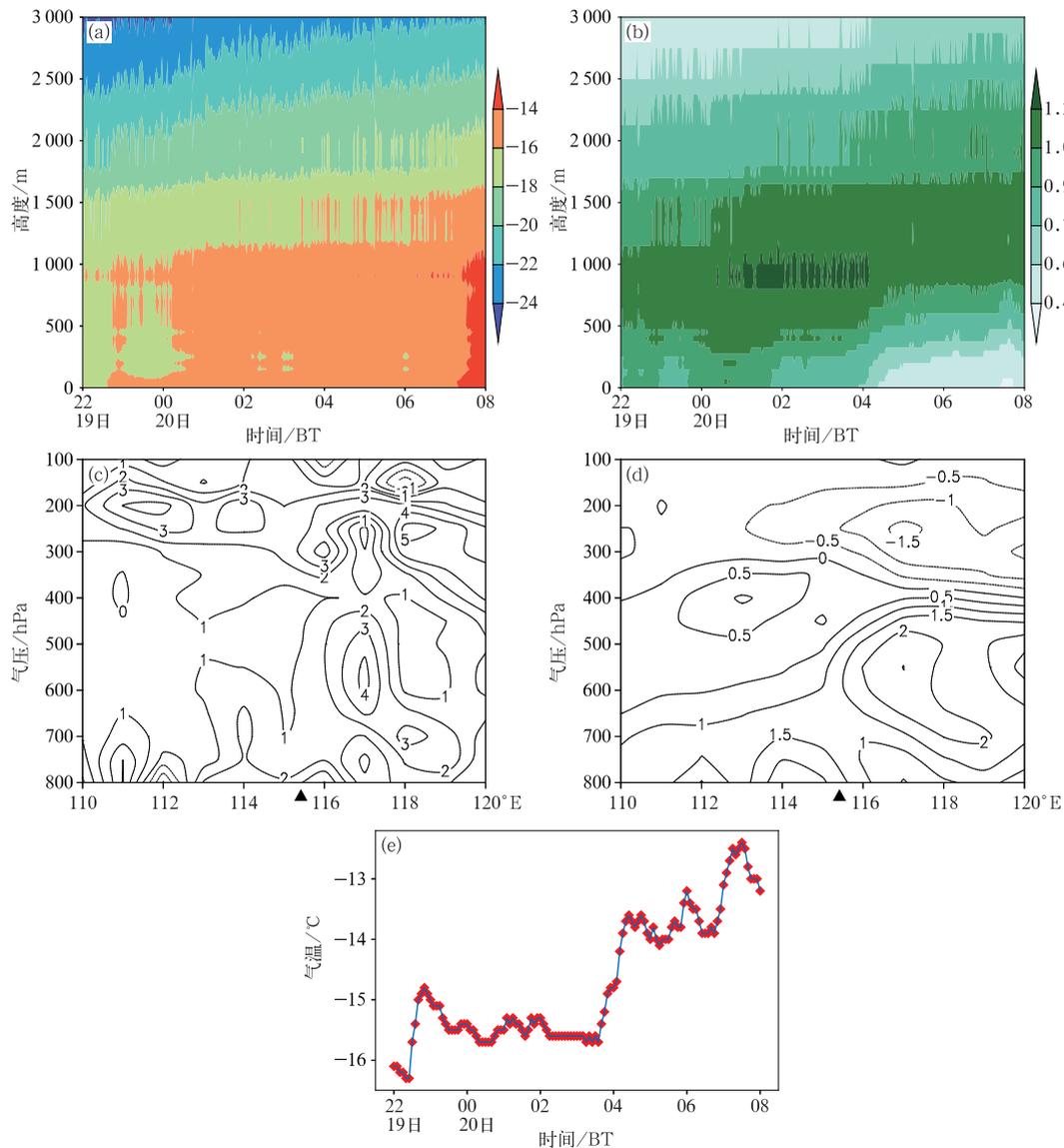


图 5 2019 年 2 月 19 日夜间微波辐射计(a)温度演变(单位:°C),(b)水汽密度演变(单位:g·m<sup>-3</sup>); 20 日 02 时(c)温度局地变化垂直运动项(单位:10<sup>-4</sup> K·s<sup>-1</sup>),(d)温度平流项与垂直运动项之和(单位:10<sup>-4</sup> K·s<sup>-1</sup>);(e)19 日夜间云顶 1 号站气温变化

Fig. 5 (a) Temperature evolution (unit: °C) and (b) water vapor density evolution (unit: g·m<sup>-3</sup>) of microwave radiometer at night on 19 February; (c) vertical motion term (unit: 10<sup>-4</sup> K·s<sup>-1</sup>), (d) sum of temperature advection term and vertical motion term (unit: 10<sup>-4</sup> K·s<sup>-1</sup>) at 02:00 BT 20 February; (e) temperature evolution at Genting Station 1 at night on 19 February 2019

分析当天天气形势发现,在增温过程中,500 hPa 以下,云顶赛场上空处于一致的脊前西北气流中,冷平流层次较为深厚,空气下沉运动明显。从 20 日 02 时温度局地变化的垂直运动项剖面来看(图 5c),云顶赛场上方由于下沉运动造成的温度变化均表现为正值,中低层(500 hPa 以下)的增温率在  $1 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,大值区处于 750~800 hPa (山顶附近高度),最大值为  $3 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 5d 显示,垂直运动项和温度平流项两项的和也表明,垂直运动的增温作用强于冷平流带来的降温作用,两项合计增温率,600 hPa 以下仍然大于  $1 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

最大值为  $1.5 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  (800 hPa 附近),总的增温作用仍很明显。下沉运动带来增温的同时,也致使低层出现明显的水汽辐散,从而造成微波辐射计水汽密度明显减小。

低层伴有冷平流的夜间增温过程在冬奥服务团队冬季驻训早期,确实给预报员带来了较大挑战,但在应用了包含下沉增温作用的客观预报方法后,夜间气温的预报质量已经有了明显提升。

### 3.2.2 暖平流增温过程

2019 年 2 月 3 日夜间,云顶赛场在暖平流作用下出现一次明显增温天气过程。由云顶 1 号站(图 6e)

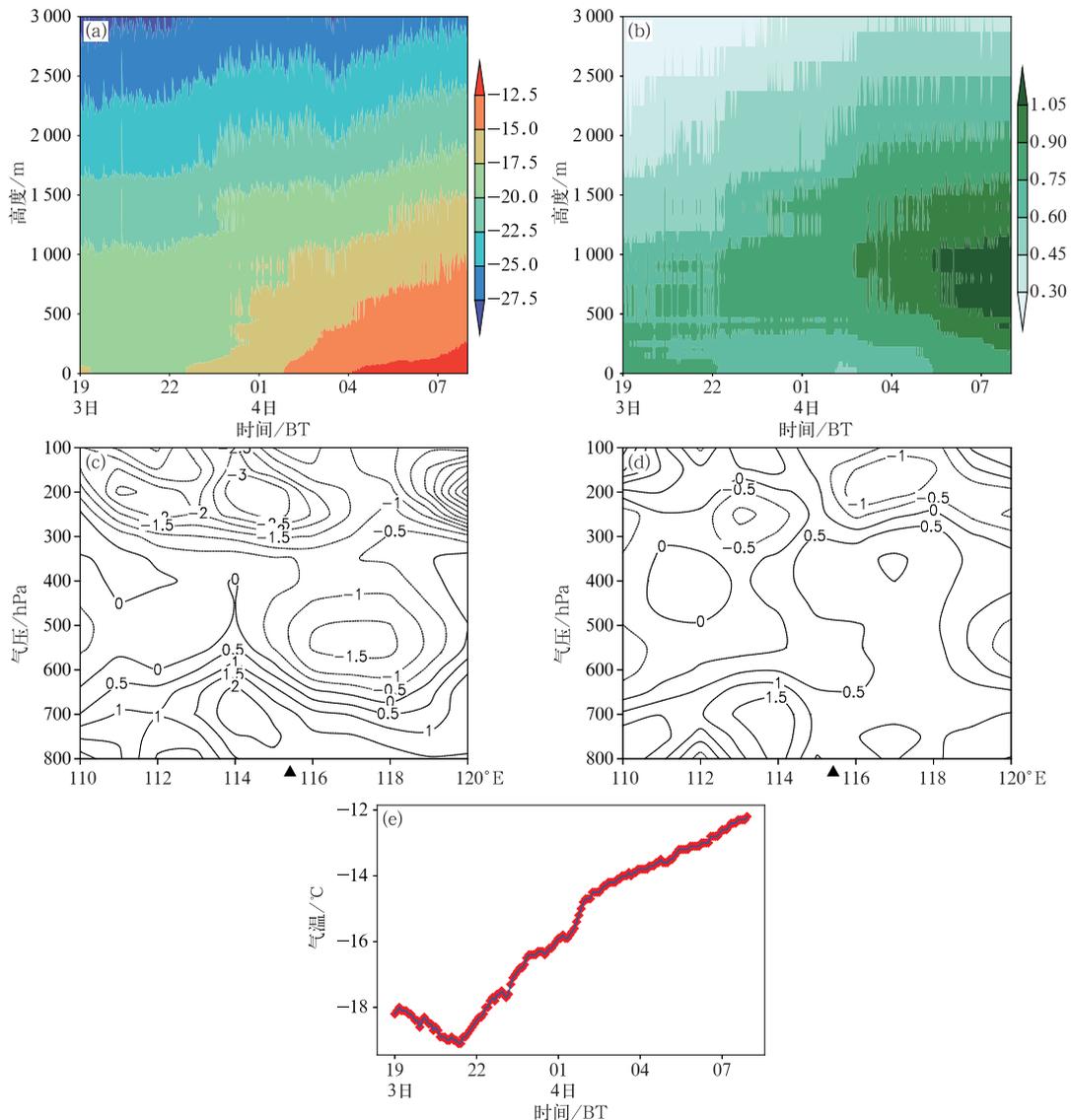


图 6 2019 年 2 月 3 日夜间微波辐射计(a)温度演变(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ), (b)水汽密度演变(单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ); 4 日 02 时(c)温度局地变化温度平流项(单位:  $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (d)温度平流项与垂直运动项之和(单位:  $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (e)3 日夜间云顶 1 号站气温变化

Fig. 6 (a) Temperature evolution (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and (b) water vapor density evolution (unit:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) of microwave radiometer at night on 3 February; (c) temperature advection term (unit:  $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (d) sum of temperature advection term and vertical motion term (unit:  $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 02:00 BT 4 February; (e) temperature evolution at Genting Station 1 at night on 3 February 2019

气温变化可以看出,3日21:30至4日06:40气温稳步升高,升温幅度为 $6.2^{\circ}\text{C}$ 。微波辐射计温度廓线显示(图6a), $0\sim 3000\text{ m}$ 均出现明显升温,且越靠近地面升温越明显,其中 $0\sim 200\text{ m}$ ,平均升幅达 $6^{\circ}\text{C}$ 。同时微波辐射计水汽密度(图6b),在3日22:00之后, $3000\text{ m}$ 以下整层增湿, $0.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的水汽密度等值线由 $400\sim 1100\text{ m}$ 高度扩展到 $0\sim 2000\text{ m}$ 高度,中心数值增强至 $1.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,所处高度为 $500\sim 1000\text{ m}$ 。

增温过程中,赛场上空 $600\text{ hPa}$ 以下处于温度脊前,在偏西风作用下,出现明显的暖平流。从4日02时温度平流的垂直分布看(图6c), $500\text{ hPa}$ 以下均表现为暖平流,平流最大强度为 $2\times 10^{-4}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ,处于 $800\sim 650\text{ hPa}$ 高度。同时暖平流给赛场低层带来了弱的上升运动,但上升运动对温度的局地变化表现为降温。综合温度平流项和垂直运动项两项(图6d),增温率大值区分布在 $800\sim 700\text{ hPa}$ ,赛场上方两项合计增温率约为 $1\times 10^{-4}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且随高度向上增温率逐渐减小,这也是微波辐射计温度廓线上近地层增温强度大于其上方的原因。此外由于暖湿输送和弱上升运动的影响,云量较多,致使夜间长波辐射降温作用大大减弱,这也为气温的大幅增加创造了有利条件。

## 4 结论与讨论

本文对微波辐射计反演大气温湿廓线与自动站、探空观测的误差进行了分析,并利用包括微波辐射计反演数据在内的多种数据,对云顶赛场逆温层特征以及夜间明显升温过程的大气温湿演变特征及其产生的原因进行了分析,得到如下结论。

(1)总体上微波辐射计温度、水汽密度与自动站、探空观测之间一致性较好,相对湿度略差。微波辐射计温度、水汽密度和相对湿度的平均误差分别为 $0.3^{\circ}\text{C}$ 、 $0.04\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $15\%$ ,对应的均方根误差分别为 $2.8^{\circ}\text{C}$ 、 $0.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $25\%$ 。温度和水汽密度的可用性要强于相对湿度。

(2)微波辐射计反演温度平均误差在各个层次相对不大,可用性较强,水汽密度均方根误差随高度减小,但云和降水均会降低温度和水汽密度的准确性,其中降水的影响程度更大。多数层次上相对湿度平均误差均较大,最大值在 $2.25\text{ km}$ 处,为 $25\%$ ,但降水发生时相对湿度在多数高度上平均误差基本

在 $\pm 10\%$ 以内,明显小于晴空和有云天气。

(3)微波辐射计的温度廓线反映,夜间逆温层结构在云顶赛场十分常见,出现概率达到 $50\%$ 。逆温层顶一般在山顶附近或以下,谷上空配合暖平流时,逆温层厚度和逆温层温差将大大加强。

(4)锋区移过后中低层下沉运动以及低层暖平流都可能给赛场带来明显的夜间增温。由下沉运动主导的增温过程中,微波辐射计参数廓线表现为中低层温度整体升高,低层水汽密度在下沉辐散的作用下明显减小。中低层暖平流主导的增温过程中,增温强度随高度而减小,且增温过程表现出明显的增湿现象。

本文对微波辐射计反演温湿廓线在云顶赛场的可用性进行了分析,并初步探讨了赛场上方逆温层特征以及夜间增温过程中温度、湿度演变特征及其成因,为做好冬奥云顶赛场气象分析和预报提供了参考。但由于微波辐射计所处位置为山坡中部,仅能捕捉谷中逆温中上部的特征,谷中完整逆温结构的产生和消亡机制还需要更加细致的分析,下一步将结合赛场自动站、激光雷达、系留飞艇等设备研究赛场三维热力、动力结构,从而提高赛场温度、湿度以及风场的精细化预报能力。

## 参考文献

- 车云飞,马舒庆,杨玲,等,2015.云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响[J].应用气象学报,26(2):193-202. Che Y F, Ma S Q, Yang L, et al, 2015. Cloud influence on atmospheric humidity profile retrieval by ground-based microwave radiometer[J]. J Appl Meteor Sci, 26(2):193-202(in Chinese).
- 丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等,2018.云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J].气象,44(12):1604-1611. Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12):1604-1611(in Chinese).
- 韩珏靖,陈飞,张臻,等,2015. MP-3000A型地基微波辐射计的资料质量评估和探测特征分析[J].气象,41(2):226-233. Han J J, Chen F, Zhang Z, et al, 2015. Assessment and characteristics of MP-3000A ground-based microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 41(2):226-233(in Chinese).
- 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等,2014.基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J].气象,40(2):216-222. Huang Z Y, Xu G R, Wang X F, et al, 2014. Analysis on two hailstorm events in Xianning based on observations of ground based microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 40(2):216-222(in Chinese).
- 李睿劼,李宏宇,2008.微波辐射计计算准K指数对降水的反应[J].气象,34(S1):185-190. Li R J, Li H Y, 2008. Response of quasi-K

- index to precipitation calculated by microwave radiometer [J]. Meteor Mon, 34(S1): 185-190(in Chinese).
- 刘红燕, 2011. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析[J]. 气象学报, 69(4): 719-728. Liu H Y, 2011. The temperature profile comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years[J]. Acta Meteor Sin, 69(4): 719-728(in Chinese).
- 刘思波, 何文英, 刘红燕, 等, 2015. 地基微波辐射计探测大气边界层高度方法[J]. 应用气象学报, 26(5): 626-635. Liu S B, He W Y, Liu H Y, et al, 2015. Retrieval of atmospheric boundary layer height from ground-based microwave radiometer measurements [J]. J Appl Meteor Sci, 26(5): 626-635(in Chinese).
- 唐仁茂, 李德俊, 向玉春, 等, 2012. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析[J]. 气象学报, 70(4): 806-813. Tang R M, Li D J, Xiang Y C, et al, 2012. Analysis of a hailstorm event in the middle Yangtze River Basin using ground microwave radiometers[J]. Acta Meteor Sin, 70(4): 806-813(in Chinese).
- 徐桂荣, 崔春光, 周志敏, 等, 2014. 利用探空资料估算青藏高原及下游地区大气边界层高度[J]. 暴雨灾害, 33(3): 217-227. Xu G R, Cui C G, Zhou Z M, et al, 2014. Atmospheric boundary layer heights estimated from radiosonde observations in the Qinghai-Tibet Plateau and its downstream areas[J]. Torr Rain Dis, 33(3): 217-227(in Chinese).
- 徐桂荣, 张文刚, 万霞, 等, 2019. 地基微波辐射计反演的青藏高原东侧甘孜大气温湿廓线分析[J]. 暴雨灾害, 38(3): 238-248. Xu G R, Zhang W G, Wan X, et al, 2019. Analysis on atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Torr Rain Dis, 38(3): 238-248(in Chinese).
- 许皓琳, 郑佳锋, 姜涛, 等, 2020. 乌鲁木齐和成都两地机场雷暴降水水汽条件的分析研究[J]. 气象, 46(11): 1440-1449. Xu H L, Zheng J F, Jiang T, et al, 2020. Analysis of water vapor variation and transformation during the two airport thunderstorms in Urumqi and Chengdu[J]. Meteor Mon, 46(11): 1440-1449 (in Chinese).
- 杨富燕, 张宁, 朱莲芳, 等, 2016. 基于激光雷达和微波辐射计观测确定混合层高度方法的比较[J]. 高原气象, 35(4): 1102-1111. Yang F Y, Zhang N, Zhu L F, et al, 2016. Comparison of the mixing layer height determination methods using lidar and microwave radiometer[J]. Plateau Meteor, 35(4): 1102-1111 (in Chinese).
- 张秋晨, 龚佃利, 冯俊杰, 2017. RPG-HATPRO-G3 地基微波辐射计反演产品评估[J]. 海洋气象学报, 37(1): 104-110. Zhang Q C, Gong D L, Feng J J, 2017. Analysis and evaluation of retrieval products of RPG-HATPRO-G3 ground-based microwave radiometers[J]. J Mar Meteor, 37(1): 104-110(in Chinese).
- 郑飒飒, 2019. MWP967KV 型地基微波辐射计反演产品的质量评估[J]. 高原山地气象研究, 39(2): 82-86. Zheng S S, 2019. Quality assessment on inverted products of MWP967KV ground-based microwave radiometer [J]. Plateau Mountain Meteor Res, 39(2): 82-86(in Chinese).
- Chan P W, 2009. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. Meteorol Z, 18(3): 253-265.
- Nallapareddy A, Shapiro A, Gourley J J, 2011. A climatology of nocturnal warming events associated with cold-frontal passages in Oklahoma[J]. J Appl Meteor Climatol, 50(10): 2042-2061.
- Sicard M, Pérez C, Rocadenbosch F, et al, 2006. Mixed-layer depth determination in the Barcelona coastal area from regular lidar measurements; methods, results and limitations[J]. Bound-Layer Meteor, 119: 135-157.