

青藏高原地区地基微波辐射计的适用性评估研究

朱国辉, 刘 壮, 央 珍, 索朗扎西, 董彦达, 达娃拉姆

民航西藏空管中心, 西藏 拉萨

收稿日期: 2026年8月4日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月22日

摘 要

为评估地基微波辐射计在青藏高原地区的适用性, 本文利用2025年10~12月青海西宁站的辐射计连续观测数据与同期探空资料进行对比, 分析了温度、相对湿度和水汽密度垂直廓线的反演精度及误差特征, 并选取典型雨、雪天气过程进行应用检验。结果表明: TK001辐射计在高原秋、冬季整体性能可靠, 温度反演精度最优($R = 0.91$), 水汽密度次之($R = 0.89$), 均能清晰反映高原近地层逆温结构; 相对湿度精度偏低($RMSE = 13.43\%$), 呈系统性干偏差。三类廓线误差均呈现“近地层最大、随高度递减”的特征, 与高原边界层逆温频发及低层水汽浓度极低密切相关。降雨过程中, 辐射计能有效捕捉水汽的快速积聚与消散; 降雪条件下, 受天线罩积雪及固态粒子散射干扰, 数据可靠性下降。研究证实该设备具备在高原业务化应用的潜力, 可为数值预报同化和边界层监测提供有力支撑, 但需针对高原特殊大气背景开展算法本地化改进。

关键词

地基微波辐射计, 青藏高原, 探空数据, 误差分析, 适用性评估

Suitability Evaluation of a Ground-Based Microwave Radiometer over the Qinghai-Xizang Plateau

Guohui Zhu, Zhuang Liu, Zhen Yang, Suolangzhaxi, Yanda Dong, Dawalamu

Xizang Air Traffic Management Center of CAAC, Lhasa Xizang

Received: August 4, 2026; accepted: September 10, 2026; published: September 22, 2026

Abstract

To evaluate the suitability of the domestic TK001 ground-based microwave radiometer over the

文章引用: 朱国辉, 刘壮, 央珍, 索朗扎西, 董彦达, 达娃拉姆. 青藏高原地区地基微波辐射计的适用性评估研究[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 684-694. DOI: 10.12677/ojns.2026.145072

Qinghai-Xizang Plateau, continuous radiometer observations from October to December 2025 at Xining station in Qinghai Province were compared with concurrent radiosonde data. The retrieval accuracy and error characteristics of vertical profiles of temperature, relative humidity, and water vapor density were analyzed, and typical rain and snow weather events were examined for application validation. Results indicate that the TK001 radiometer performs reliably overall during the plateau autumn and winter seasons. The temperature retrieval exhibits the highest accuracy ($R = 0.91$), followed by water vapor density ($R = 0.89$), both of which clearly capture the near-surface inversion structure characteristic of the plateau. The relative humidity retrieval shows a lower accuracy ($RMSE = 13.43\%$) with a systematic dry bias. The errors in all three profile types exhibit a common feature of being largest near the surface and decreasing with height, which is closely related to the frequent occurrence of boundary-layer inversions and the extremely low water vapor concentration in the lower layers over the plateau. During rainfall events, the radiometer effectively captures the rapid accumulation and dissipation of water vapor; however, under snowfall conditions, data reliability decreases due to snow accumulation on the radome and scattering interference from solid hydrometeors. This study confirms that the TK001 radiometer has the potential for operational application over the Qinghai-Xizang Plateau and can provide valuable profiling data for numerical weather prediction assimilation and boundary-layer monitoring. However, further development of locally adapted retrieval algorithms tailored to the unique atmospheric conditions of the plateau is necessary.

Keywords

Ground-Based Microwave Radiometer, Qinghai-Xizang Plateau, Radiosonde Data, Error Analysis, Suitability Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气温度、相对湿度及水汽密度的垂直分布廓线是描述大气热力与动力状态、理解云降水物理过程以及诊断能量收支平衡的关键参量，对数值天气预报模式的初始化与同化、气候模式验证和极端天气机理研究具有不可替代的支撑作用[1]-[3]。无线电探空仪至今仍是获取这些廓线最为直接的手段，常被视为检验其他遥感设备的“黄金标准”，但其一天两次的定时观测和有限的站点密度，难以捕捉生命史短、演变快的中小尺度天气系统，尤其在高原、海洋等特殊环境下，作业成本高、数据获取率受限[2]。相比之下，地基微波辐射计能够被动接收 22~59 GHz 频段内大气中氧气和水汽分子发射的微波辐射亮温，借助物理反演或神经网络算法，连续反演地面至 10 km 高度的温湿廓线，时间分辨率可达分钟级，且具备全天候、无人值守的工作能力，极大地弥补了常规探空在时空分辨率上的不足[3]-[5]。

随着国产地基微波辐射计技术的逐渐成熟，众多学者不再满足于常规气候区域的简单评估，而是将其应用不断推向非典型区域、极端天气背景和特定业务场景，以考验设备的探测性能与适应性。例如，沈芳等[6]利用廊坊地区的 QFW-6000 型辐射计产品与北京探空资料对比，揭示了该地区温湿廓线反演误差的季节和天气依赖性；李建华等[7]基于黄海北部的 MP-3000A 型辐射计观测，细致划分了不同环流背景下海雾的温湿结构与生消机理；吴友侦等[8]分析了 QFW-6000 型辐射计在福建沿海地区的温度探测能力受降雨强度的影响特征；南博文等[9]则使用西安机场的 MWP967KV 型辐射计资料，成功区分了辐射雾与锋面雾过程中边界层逆温及水汽-液态水转化的差异。这些研究表明，不同下垫面和气象背景下的探

测性能差异显著,有针对性地对特定型号辐射计在特定气候区进行系统评估,是其业务化应用不可或缺的前提。针对青藏高原地区,徐桂荣等[10]利用甘孜站资料分析了辐射计反演温湿廓线的季节变化特征,张海宏等[11]则对青海省东部辐射计产品的适用性进行了初步评估,这些工作为本研究提供了重要参考。

青藏高原平均海拔超过 4000 m,具有极低的空气密度、全年偏低的背景水汽含量、强烈的太阳辐射以及活跃的中小尺度对流活动,其大气边界层结构独特,云内水凝物相态变化复杂[12]。这些极端的气象条件对地基微波辐射计的微波信号衰减和反演算法构成了严峻挑战:低水汽含量使水汽通道探测信噪比降低,而频繁出现的固态降水及混合相态云则通过粒子的非瑞利散射严重干扰反演模型的稳定性。田建兵等[12]的研究已指出,微波辐射计自带的反演算法在高原地区存在较大误差,利用本地多年探空资料重新训练神经网络模型,可明显提升温湿廓线的反演精度,但针对具体型号长时间的业务性能评估,尤其是结合典型天气过程的应用分析,目前仍十分薄弱。

目前,针对国产地基微波辐射计在青藏高原这一特殊气候区的长期、系统性适用性评估研究仍相对薄弱。为此,本文选取 TK001 型国产地基微波辐射计,利用其在青海省西宁市 2025 年 10 月至 12 月的连续观测数据,与同期探空资料进行详尽的对比分析。定量评估该设备在青藏高原秋、冬季对温度、相对湿度和水汽密度廓线的反演精度与误差垂直分布特征,并进一步选取该时段内典型的雨、雪天气过程进行案例剖析,旨在客观评价该设备在高原这一极端气候背景下的适用性和可靠性,为其在高原地区的优化部署、资料同化及天气气候研究提供坚实的科学依据。

2. 研究区域与数据

2.1. 研究区域背景

本研究区域选取青海省西宁市,该市地处青藏高原东北部,是高原腹地向黄土高原过渡的典型区域,具有高原大陆性半干旱气候特征[12]。西宁地区常年气压偏低(年平均地面气压约 770 hPa),空气密度薄,大气柱水汽含量远低于同纬度平原地区,尤其在秋、冬季更为显著;同时,该地区太阳辐射强烈,气温日较差大,边界层内逆温频发。这种极端且多变的局地大气环境,为检验微波辐射计的探测极限和反演算法适应性提供了理想条件。

2.2. 研究数据

本研究使用的微波辐射计数据,来源于布设于西宁二十里铺气象站(36.72°N, 101.75°E, 海拔约 2295 米)的 TK001 型国产地基微波辐射计。该设备采用 16 通道并行测量体制,包括 8 个温度反演通道(探测频率 51~59 GHz)和 8 个水汽反演通道(探测频率 22~32 GHz),可实时反演地面至 10 km 高度共 83 层的大气参数廓线产品,主要包括温度(°C)、相对湿度(%)、水汽密度($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)等,时间分辨率达 2 分钟[4]。关于该型号设备在非高原地区的探测性能,已有研究[13]显示其中纬度平原地区具有较好的反演稳定性,但在高原环境下的表现尚需系统检验。本文选取该设备 2025 年 10 至 12 月的连续观测数据进行分析,该时段涵盖高原秋、冬季的典型气候特征,包括频繁的近地面逆温、低水汽背景以及多次降雪天气过程。

作为微波辐射计性能评估的基准,探空资料采用同址的西宁二十里铺探空观测站(台站号: 52866)的气象探空数据。该探空站每日于北京时间 08:00 和 20:00 各施放一次,提供从地面至对流层顶的标准等压面和特性层上的温度、气压、相对湿度、风向风速等信息。由于微波辐射计与探空站相距近,且下垫面类型一致,二者在无强天气系统过境时大气垂直结构具有良好空间一致性,满足对比分析的代表性要求。

2.3. 数据匹配与处理方法

为使两种观测数据在时空维度上具有可比性,本研究进行了精细匹配。时间匹配方面,考虑到探空

气球自施放至上升至 10 km 高度需一定时长, 且此过程中会随水平风漂移, 而微波辐射计为定点观测, 故选取放球时刻(约 07:15~07:45 和 19:15~19:45, 北京时)前后 30 分钟内的微波辐射计数据进行平均, 以平滑其随机波动, 并部分抵偿气球漂移带来的空间错位[4]。空间匹配方面, 首先将探空数据中的位势高度统一换算为几何高度, 随后利用线性插值方法, 将探空各时次的温度、相对湿度及计算所得的水汽密度插值到微波辐射计 83 个标准高度层上(从地表至 10 km), 确保垂直方向上两种数据的严格对齐[6]。

在剔除仪器定标、故障维护及降水污染(以设备自带雨感器记录为准)的样本后, 最终保留 156 组有效样本用于分析。为量化反演精度, 选用平均偏差(MB)、均方根误差(RMSE)及相关系数(R)三个统计量作为评估指标, 其计算公式为:

$$R = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (1)$$

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

式中, x_i 代表微波辐射计反演值, y_i 为探空观测值, n 为样本数量。相关系数 R 用于衡量两组数据线性相关的密切程度, 平均偏差 MB 反映系统误差的大小与方向, 均方根误差 $RMSE$ 综合表征系统误差与随机误差。

2.4. 辐射计反演算法简介

TK001 型地基微波辐射计出厂时配套的反演算法基于大气辐射传输方程构建, 采用物理统计反演方法。其核心思路为: 首先利用 MonoRTM (Monochromatic Radiative Transfer Model) 单色辐射传输模型, 结合大气廓线数据库(包含温度、湿度、气压的垂直分布)模拟计算不同大气状态下各探测通道的亮温值, 建立涵盖广泛大气条件的亮温-大气参数先验数据集; 然后通过多元线性回归和岭回归(Ridge Regression)算法, 建立从多通道亮温到目标大气参数(温度、湿度、水汽密度)垂直廓线的统计回归模型。该算法的训练样本主要源自中纬度地区历史探空资料库和标准大气模型, 虽然覆盖了一定的参数变化范围, 但并未专门针对青藏高原地区的高海拔、低水汽、强辐射等极端气象条件进行优化设计。因此, 反演算法本身对高原大气状态的先验约束不足, 是导致系统性偏差的重要根源之一。

2.5. 误差评估方法与分组对比策略

为进一步探究误差与高原特定气象条件之间的定量关系, 本研究在总体评估基础上引入分组对比策略。依据探空数据计算的两个关键气象参数, 将 156 组有效样本分别进行分组: (1) 接近地面层(地表至 500 m)温度直减率分组, 当直减率 $< -1.0^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 时定义为“强逆温组”, 介于 $-1.0\sim 0^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 之间为“弱逆温组”, 直减率 $\geq 0^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 则为“无逆温组”, 以此考察逆温强度对温度反演误差的影响; (2) 按整层大气可降水量(PWV)的百分位数分组, $\text{PWV} \geq 75\%$ 分位数的样本归为“高湿组”, 介于 25%~75% 之间为“中湿组”, $\text{PWV} \leq 25\%$ 分位数为“低湿组”, 旨在揭示水汽含量多寡对相对湿度和水汽密度反演精度的调制作用。各分组样本的误差统计结果将在 2.3 节中详细呈现。

3. 结果分析

为确保分析的可靠性, 本研究在数据预处理阶段剔除了仪器定标、故障维护及降水污染的观测样本。

经严格质量控制后，最终保留 156 组有效样本用于分析。

对微波辐射计反演的对流层温度、相对湿度及水汽密度廓线进行了系统性误差评估，总体误差统计结果如表 1 所示。整体而言，TK001 辐射计在青藏高原地区表现出较好的反演能力。温度反演性能最优，相关系数高达 0.91，表明其对温度垂直变化的捕捉能力较强。相对湿度反演的不确定性增大，均方根误差达 13.43%，反映了低水汽含量环境对其反演灵敏度的挑战。

Table 1. Statistics of overall errors between radiometer products and radiosonde data
表 1. 辐射计产品与探空资料的总体误差统计表

廓线产品	相关系数	平均偏差	均方根误差
温度	0.91	1.0℃	1.63℃
相对湿度	0.76	-2.29%	-13.43%
水汽密度	0.89	0.09 g·m ⁻³	0.72 g·m ⁻³

3.1. 误差随高度分布

为了深入研究微波辐射计探测大气要素在不同高度层上的表现，绘制了大气要素的平均偏差(MD)与均方根误差(RMSE)随高度变化(0~10 km)的分布特征图，如图 1 所示。整体而言，微波辐射计的三要素廓线反演在垂直高度上表现出不同的误差结构，且受青藏高原特殊的大气热力与动力条件影响显著。

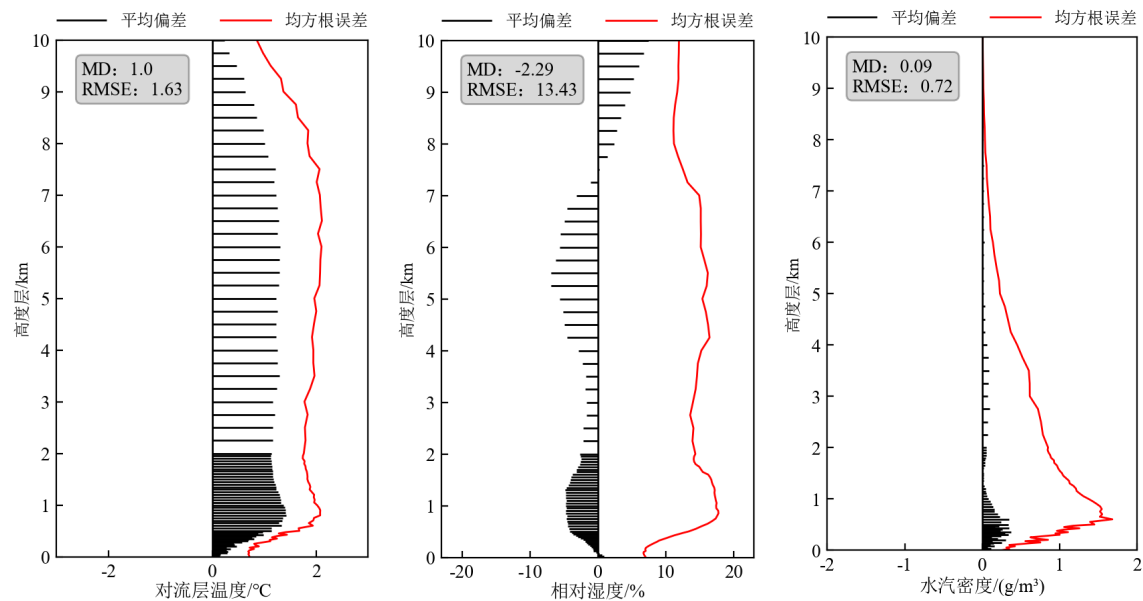


Figure 1. Distribution of three-element profile errors with height
图 1. 三要素廓线误差随高度分布图

温度廓线的平均偏差总体呈现正值，表明微波辐射计在高原环境下存在系统性暖偏差(MD = 1.0℃)。该暖偏差在全高度层分布较为均匀，近地层(0~2 km)的偏差稍大(约为 1.0℃~1.5℃)，中高层变化平缓。均方根误差方面，整体 RMSE 波动较小，近地层(0~2 km) RMSE 达到峰值(约 2.1℃)，随后在 2~10 km 范围内缓慢降低并维持在 1.5℃~2.0℃ 之间。青藏高原西宁地区近地层常见的强逆温层结构以及局地地形引起的复杂热力边界层特征，可能是导致低层 RMSE 偏大且产生系统性暖偏差的主要原因。此外，在高原强太阳辐射与晴空背景下，天线罩温度对背景辐射的贡献误差可能在低温时段放大亮温反演误差。

相对湿度的平均偏差主要表现为干偏差($MD = -2.29\%$), 而均方根误差的最大误差(约 14%~20%)完全集中在 0~2 km 的近地层内, 在 3~10 km 高度上稳定在 10%~15%左右。这种特征与西宁高海拔、低水汽含量的干旱/半干旱气候背景直接相关。在高海拔稀薄大气条件下, 近地层水汽浓度极低, 微波辐射计接收的水汽辐射亮温贡献量级有限, 反演算法若缺乏本地化统计回归, 极易在低层水汽反演中引入较大误差。

与相对湿度不同, 水汽密度的平均偏差极小($MD = 0.09 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), 辐射计在绝对水汽含量的反演上未产生显著的系统性偏差。但在 RMSE 的变化上, 水汽密度依然表现出底层剧烈、高层收敛的特征。在 0~1 km 近地层, RMSE 达到最大值(约 $1.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), 在 1 km 以上迅速收窄, 5 km 以上 RMSE 已接近于 0。这与青藏高原水汽绝大部分集中于对流层中下层的真实物理状态高度吻合, 同时也印证了相对湿度误差来源更多受到低层绝对水汽浓度及其微小波动的影响。

逆温强度与温度反演误差呈显著的正相关关系。强逆温组(近地面温度直减率 $< -1.0^\circ\text{C}/100\text{m}$)的温度 RMSE 高达 2.31°C , MB 为 $+1.42^\circ\text{C}$, 显著高于无逆温组的 1.35°C 和 $+0.61^\circ\text{C}$ 。该定量结果有力地支撑了前文的定性推断: 当近地层出现强逆温时, 大气层结异常稳定, 微波辐射计接收到的低层大气微波辐射亮温与地表发射率之间的耦合更为复杂, 出厂算法基于中纬度标准大气建立的温度-亮温回归关系在强逆温结构下产生较大偏差, 且逆温层顶的强温度梯度会进一步增加辐射计各通道权重函数对温度垂直分布变化的敏感性, 从而放大反演误差[14]。同时, 系统性暖偏差随逆温增强而增大的趋势表明, 算法在逆温条件下倾向于高估近地面温度, 可能与训练样本中缺少此类极端稳定层结的廓线样本有关。

水汽分组结果同样展现出清晰的物理逻辑。随着整层水汽含量的降低, 相对湿度和水汽密度的反演误差均显著增大。此外, 在低水汽背景下, 氧气通道(51~59 GHz)的旁瓣效应对水汽通道的干扰相对增强, 进一步劣化了反演精度。上述统计从定量层面验证了误差垂直分布特征与高原大气物理状态之间的内在关联。

3.2. 垂直廓线对比

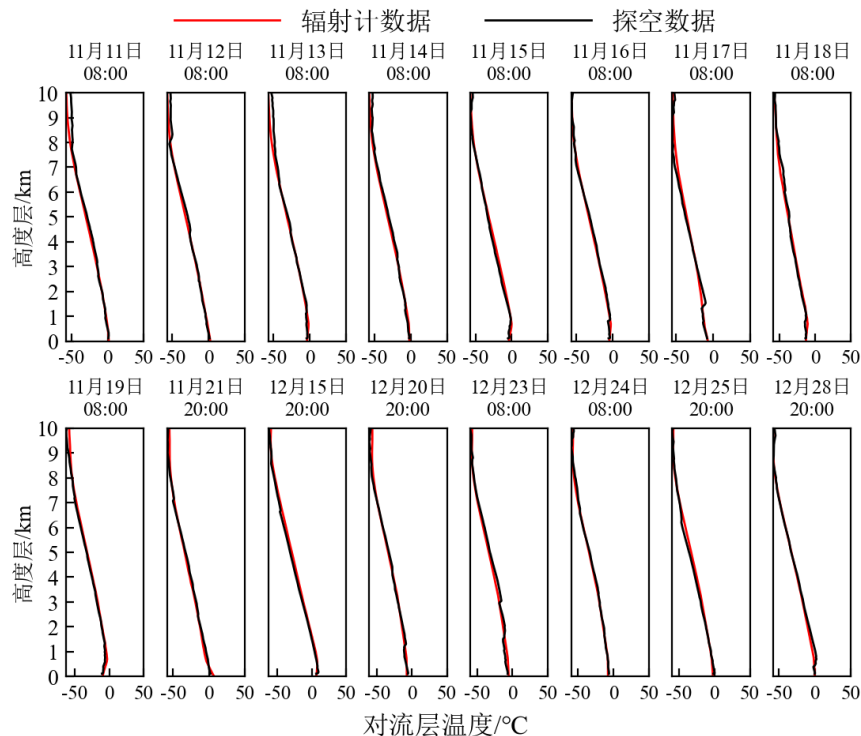


Figure 2. Comparison of temperature profile observations
图 2. 温度廓线观测对比图

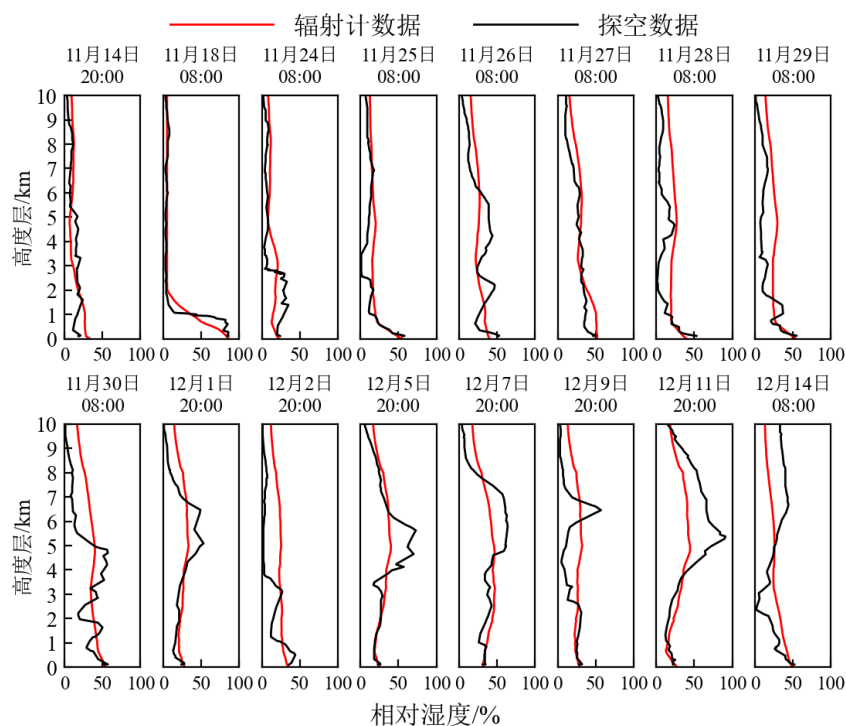


Figure 3. Comparison of relative humidity profile observations

图 3. 相对湿度廓线观测对比图

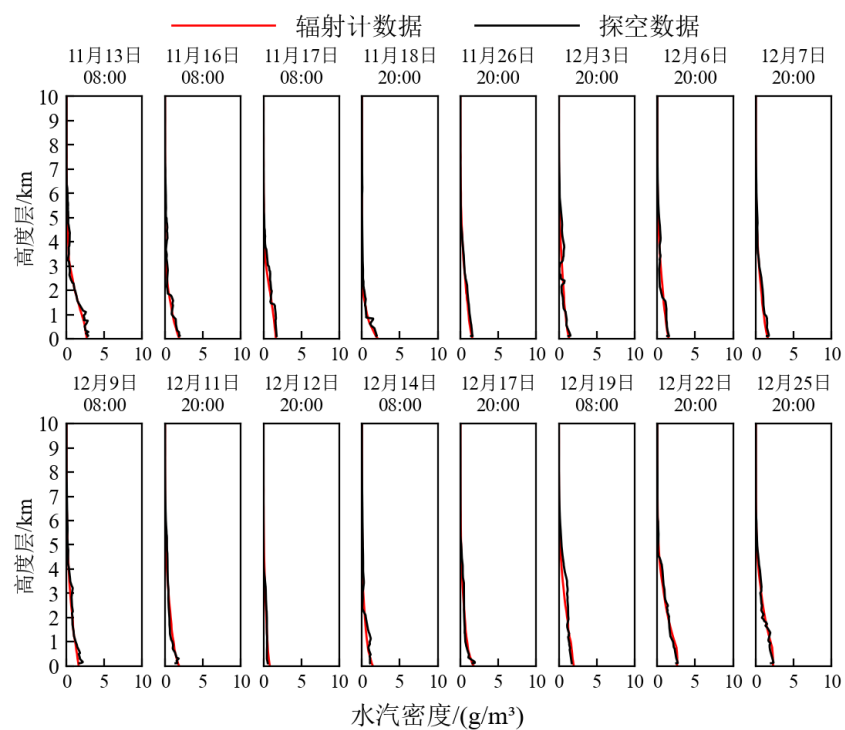


Figure 4. Comparison of water vapor density profile observations

图 4. 水汽密度廓线观测对比图

为进一步检验辐射计对高原实际大气层结的刻画能力,从数据处理后的 156 组数据中随机抽取 16 组,

对比微波辐射计与探空的温度、相对湿度和水汽密度垂直廓线。如图 2~4 所示，图中红色曲线代表微波辐射计观测数据，黑色曲线为探空数据。

在图 2 中，辐射计与探空数据的温度廓线吻合度很高，均清晰地反映了近地层约 1 km 以下存在的贴地逆温结构，辐射计对逆温强度与厚度的捕捉与探空基本一致，表明其对高原冬季辐射逆温具有良好的探测能力[6]。图 3 中，相对湿度廓线整体变化趋势一致，但探空在 4~7 km 高度范围内存在深厚的近饱和湿层，辐射计仅能反演出一个较平坦的高湿区间。这一高度正是高原对流云和水汽垂直输送的关键层，水汽的时空异质性极强，而辐射计缺乏对剧烈变化水汽场的高空间分辨率捕捉能力，导致了较大的反演误差[12]。如图 4 所示，高原地区晴天大气层中水汽含量较低，水汽密度廓线两者在整个垂直层次上贴合紧密，仅在近地面出现微小差异。

4. 典型天气过程应用分析

为考验微波辐射计在复杂天气下的动态监测能力，本研究选取了该地区最具代表性的雨天和雪天过程进行专项分析。

4.1. 降雨

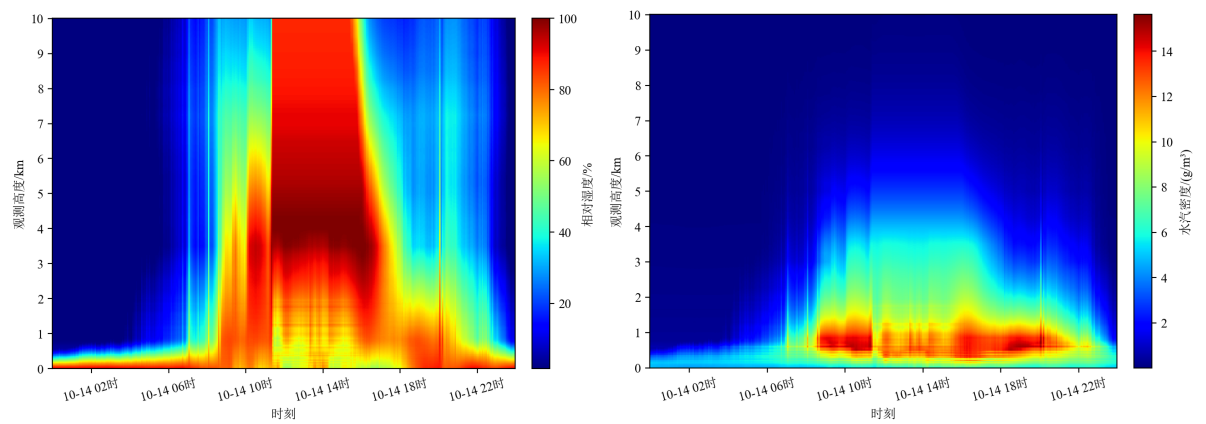


Figure 5. Two-dimensional spatiotemporal distribution of relative humidity and water vapor density during a rainfall event
图 5. 某次降雨过程的相对湿度、水汽密度时空二维分布图

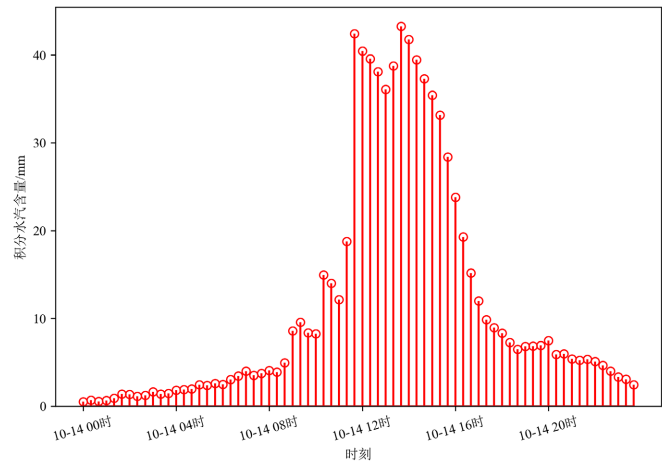


Figure 6. Plot of the integrated water vapor content over time during a rainfall event
图 6. 某次降雨过程的积分水汽含量随时间变化图

以 2025 年 10 月 14 日西宁地区一次典型对流性降水过程为例,图 5、图 6 展示了该过程的相对湿度、水汽密度垂直演变及积分水汽含量特征。降水前(00~08 时), 高湿区($RH > 60\%$)主要局限在 2 km 以下边界层, 积分水汽含量不足 5 mm。自 10 时起, 高湿度层快速向上扩展至 6~8 km 高度; 底层水汽密度升至 $12\sim14\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 并伴随明显的向上输送。积分水汽含量于 12 时左右激增至 40 mm 以上, 维持至 15 时后迅速回落。该演变过程揭示了高原降水系统水汽的迅速累积与消散特征, 反映了短时水汽通量对局地天气的剧烈响应。此外, 降水期间云中液态水及天线罩湿润效应可能导致亮温观测污染, 需留意该时段反演误差的潜在增加。

4.2. 降雪

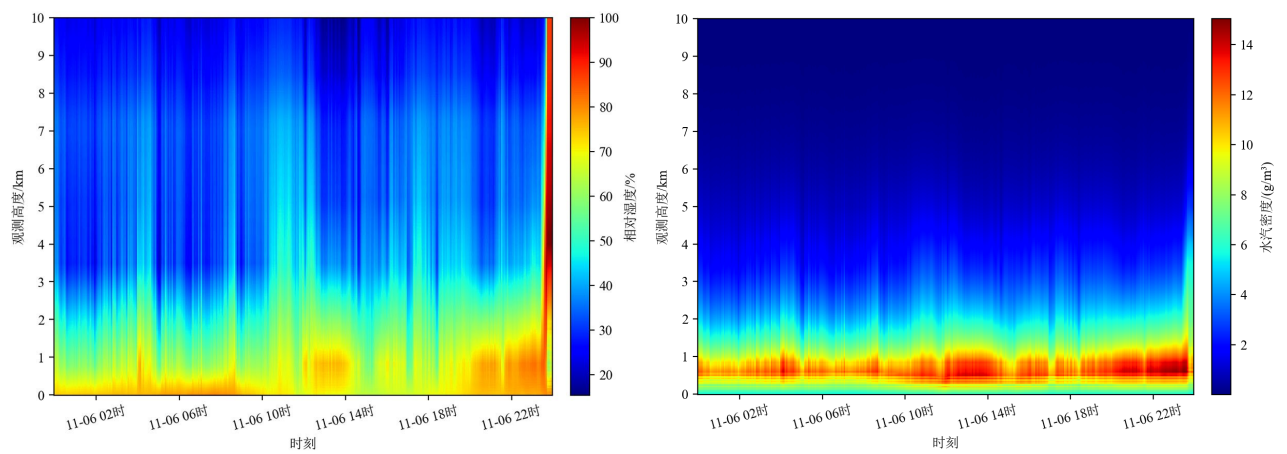


Figure 7. Two-dimensional spatiotemporal distribution of relative humidity and water vapor density during a snowfall event
图 7. 某次降雪过程的相对湿度、水汽密度时空二维分布图

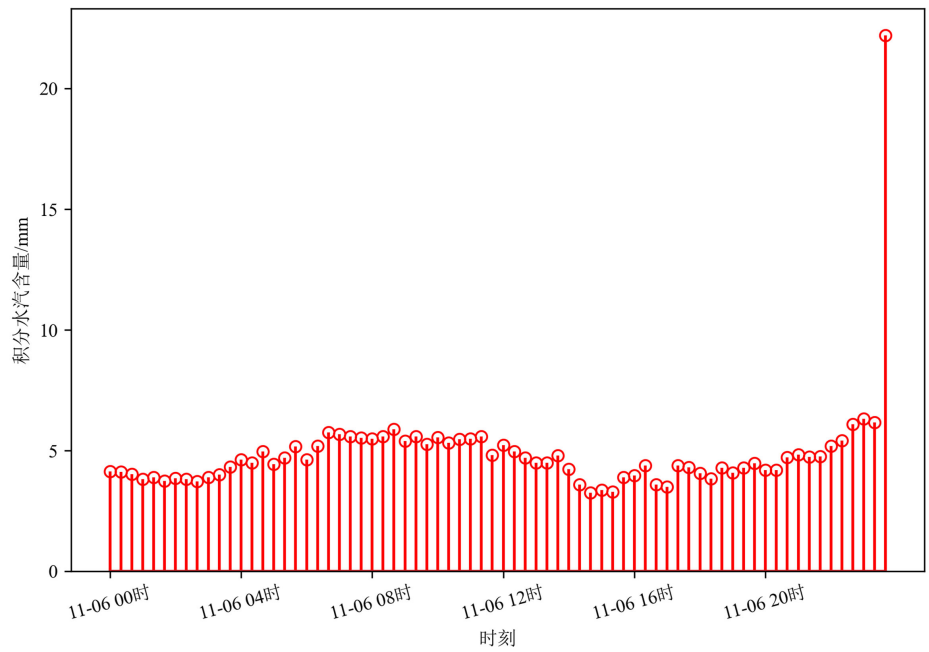


Figure 8. Plot of the integrated water vapor content over time during a snowfall event
图 8. 某次降雪过程的积分水汽含量随时间变化图

以 2025 年 11 月 6 日西宁地区的一次中雪天气过程为例, 图 7、图 8 展示了该过程的相对湿度、水汽密度垂直演变及积分水汽含量特征。

与 10 月 14 日降水个例不同, 此次降雪过程呈现典型的高原冷空气干冷特征。高相对湿度区($RH > 60\%$)与水汽密度峰值在降雪主时段(02~16 时)严格局限在 2 km 以下的边界层内, 3 km 以上高空相对湿度极低($<20\%$), 总体水汽能量极弱。积分水汽含量在 22 时前长期徘徊于 5 mm 左右的极低值区间, 直至 23 时末段出现异常突跃, 数值飙升至 22 mm 以上。结合高原深秋干冷气候背景分析, 该突变并非系统性水汽输送所致, 推测为天线罩表面积雪融化或降水粒子对辐射计物理特性的瞬时污染。此特征表明, 在高原降雪、低水汽含量条件下, 微波辐射计接收信号的信噪比显著偏低, 且物理污染可能导致较大数据偏差, 在对该类天气过程进行反演误差分析时, 需严格进行数据质控与时段屏蔽。

5. 结论

本研究利用 2025 年 10 月至 12 月青海省西宁二十里铺气象站 TK001 型国产地基微波辐射计的连续观测数据, 与同址探空资料进行同步对比, 系统评估了该型辐射计在青藏高原秋、冬季的温度、相对湿度和水汽密度垂直廓线反演性能, 并结合典型降雨、降雪天气过程进行了应用分析。主要结论如下:

(1) TK001 型辐射计在青藏高原地区总体表现出较为可靠的探测能力与稳定性。温度反演精度最高, 能够准确捕捉高原秋、冬季常见的贴地逆温结构; 水汽密度反演次之, 无明显的系统性偏差; 相对湿度反演精度相对偏低, 呈现系统性干偏差, 反映了高原低水汽背景下探测灵敏度的不足。

(2) 误差的垂直分布具有显著的分层特征, 且与高原特殊的大气环境密切相关。温度误差在全高度层分布较均匀, 近地层因强逆温及局地复杂热力边界层影响而略偏大; 相对湿度误差峰值主要集中在 2 km 以下的近地层(RMSE 超 20%), 与高原近地层水汽浓度极低、微波辐射贡献信号微弱直接相关; 水汽密度误差同样集中于 2 km 以下的边界层内, 2 km 以上迅速收敛至接近零, 印证了高原水汽主要集中在大气低层的物理特征。

(3) 典型天气过程应用验证了辐射计在高原的监测潜力, 但也揭示了其局限性。在降雨条件下, 辐射计能够有效捕捉水汽的迅速积聚与消散过程, 积分水汽含量的激增可作为降水短时预报的有效参考指标; 降雪过程中, 设备探测性能受到低水汽浓度及天线罩表面积雪/融水污染等因素制约, 积分水汽含量的异常突跃暗示了物理干扰对数据的潜在影响。

本研究证实了 TK001 型辐射计具备在青藏高原地区业务化应用的潜力, 其高时间分辨率的连续廓线产品可有效弥补高原探空站网稀疏、观测频次低的不足, 为高原数值预报资料同化、边界层过程监测及云水资源评估提供有力的数据支撑。然而, 本研究仍存在以下局限: 首先, 数据采集周期仅为三个月, 因此本文所有结论严格适用于青藏高原秋冬干冷季节, 其在不同季节(尤其是夏季对流活跃期)的探测性能有待进一步验证; 其次, 现有反演算法的本地化程度不足, 在低水汽和固态降水条件下偏差显著。未来计划开展以下工作: (1) 至少进行一个完整年度的连续观测对比, 系统评估该辐射计在高原不同季节(春夏秋冬)的探测性能变化规律; (2) 利用积累的长时间序列本地探空资料, 构建区分季节类型(干季/湿季)和天气背景(晴空/降水/降雪)的本地化 BP 神经网络反演模型[12], 并与出厂物理算法进行系统的交叉验证和精度对比, 最终为 TK001 辐射计在青藏高原的业务化部署提供最优化的反演方案。

参考文献

- [1] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5): 576-584.
- [2] 刘思波, 何文英, 刘红燕, 等. 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, 2015, 26(5): 626-635.

-
- [3] 鲍艳松, 钱程, 闵锦忠, 等. 利用地基微波辐射计资料反演 0-10 km 大气温湿廓线试验研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(2): 163-171.
 - [4] 张伦畅, 欧阳亨利, 李刘. 气象微波辐射计的应用分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2025, 42(2): 19-21.
 - [5] 曹梅, 王斌, 杨珍, 等. 地基微波辐射计与探空数据对比分析[J]. 陕西气象, 2021(5): 47-54.
 - [6] 沈芳, 黄浩杰, 周玉都, 等. 廊坊地基微波辐射计大气温湿廓线反演产品评估分析[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(4): 71-83.
 - [7] 李建华, 肖明静, 万超, 等. 基于微波辐射计观测的黄海北部大雾特征分析[J]. 海洋气象学报, 2026, 46(1): 31-42.
 - [8] 吴友侦, 刘统强, 陈勇航, 等. QFW-6000 型微波辐射计在福建沿海地区探测性能的分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2023, 49(6): 97-103.
 - [9] 南博文, 郑佳锋, 张杰, 等. 基于微波辐射计资料的西安机场两类雾的温湿参量演变特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2026, 41(2): 216-222.
 - [10] 徐桂荣, 张文刚, 万霞, 等. 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, 2019, 38(3): 1-11.
 - [11] 张海宏, 李生辰, 肖宏斌, 等. 地基微波辐射计反演产品在青海省东部适应性研究[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 356-364.
 - [12] 田建兵, 张玉欣, 颜海前, 等. 高原地区基于微波辐射计反演大气廓线的神经网络算法研究[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(2): 125-134.
 - [13] 党瑞, 乔青, 胡佳怡, 等. TK001 型国产地基微波辐射计在西安地区的探测性能评估[J]. 内蒙古气象, 2026(3): 13-17.
 - [14] 张天虎. 基于地基微波辐射计数据的大气温湿廓线反演算法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京信息工程大学, 2020.