

刘晓璐, 刘东升, 郭丽君, 等. 国产 MWP967KV 型地基微波辐射计探测精度. 应用气象学报, 2019, 30(6): 731-744.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20190609

# 国产 MWP967KV 型地基微波辐射计探测精度

刘晓璐<sup>1)2)</sup> 刘东升<sup>1)\*</sup> 郭丽君<sup>2)</sup> 雷连发<sup>3)</sup> 冯金燕<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072)

<sup>2)</sup>(中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081)

<sup>3)</sup>(西安电子工程研究所, 西安 710100)

<sup>4)</sup>(四川省宜宾市气象局, 宜宾 644000)

## 摘 要

MWP967KV 型地基微波辐射计是我国自主研发, 拥有完整自主知识产权的新型大气微波遥感探测设备, 为了实现国产设备在气象业务中的应用, 需对设备的探测精度进行对比分析。利用 2015 年 8 月—2018 年 3 月四川盆地南部山区的无线电探空数据和地基微波辐射计数据, 分析晴空和有云天气条件下温度廓线、相对湿度廓线和水汽密度廓线及相关物理参数的精度。结果表明: 晴空、层积云和高积云的微波辐射计与探空仪的温度、水汽密度和相对湿度相关系数整体上分别在 0.9890, 0.9665, 0.5868 以上, 均达到 0.01 显著性水平。3 种参数廓线的相关系数整体均呈地面大于高空, 仅温度廓线相关系数达到 0.01 显著性水平, 相对湿度廓线和水汽密度廓线在高空的相关系数未达到 0.01 显著性水平。3 种参数的相关性整体上温度最高, 水汽密度次之, 相对湿度最低。温度、相对湿度和水汽密度的均方根误差平均值分别为 2.8℃, 22% 和 1.38 g·m<sup>-3</sup>, 温度廓线和相对湿度廓线在层积云和高积云的云中及云上的精度明显降低, 均方根误差较云层下温度升高 1℃~2℃, 相对湿度增大 10%~20%。逆温层会影响廓线及物理参数的精度。晴天或云天等大范围相似天气条件下, 探空气球飘移距离与温度廓线、相对湿度廓线和水汽密度廓线偏差的相关性较弱。

**关键词:** 地基微波辐射计; 无线电探空; 廓线; 精度

## 引 言

微波辐射计通过被动遥感方式, 测量大气中氧气、水汽和液态水的多频率通道微波辐射强度, 通过大气亮温(即一级数据)和反演计算地面至 10 km 高度的大气温度、相对湿度、水汽密度、液态水含量的廓线及云与降水信息等二级数据<sup>[1-2]</sup>。

常规业务的探空气球可直接探测大气的温湿廓线, 但是每日 2 次的观测频率、施放探空气球的人工操作方式、探空气球飘移等诸多问题, 影响了数据的精度与时效。地基微波辐射计可在无人值守的情况下对固定点上空实现时间分辨率为分钟级别的全天

候连续观测, 弥补常规探空气球观测时间间隔较长、获取大气信息不足的缺点。地基微波辐射计通过大气温湿垂直廓线及水汽、液态水含量的连续信息, 了解云和降水的形成, 识别人工影响天气作业条件、评价人工增雨潜力<sup>[3-7]</sup>, 完善天气预报预警产品指标, 在中小尺度灾害性天气过程精细化研究<sup>[8-10]</sup>等方面有重要的应用价值。

国内外已研制出多种型号地基微波辐射计<sup>[11]</sup>, 针对国外不同型号的微波辐射计精度的评估结果表明: 天线罩上附着的水滴会降低微波辐射计的反演精度<sup>[12-16]</sup>, 有云时微波辐射计温湿廓线精度降低<sup>[17-20]</sup>, 温度和水汽密度廓线的反演精度较高, 相对湿度廓线反演精度较低<sup>[21-26]</sup>。国内的微波辐射计虽

2019-08-05 收到, 2019-10-09 收到再改稿。

资助项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406032), 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2017Z016), 国家自然科学基金项目(41605111), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2019Z013)

\* 通信作者, 邮箱: 93957604@qq.com

然也有类似研究<sup>[27]</sup>,但是在样本筛选、数据处理、误差分析等方面分析不足。

本文采用的 MWP967KV 型地基多通道微波辐射计由西安电子工程研究所自主研发,掌握了双频段组合低副瓣毫米波天线、双频段宽带毫米波接收机、高稳定固态噪声源、多传感器集成一体化设计、大气温湿廓线实时反演算法等关键技术,系统具备实时遥感大气温湿廓线的能力,整机国产化率达到 90% 以上。该设备拥有完整的自主知识产权,实现了高度国产化,是我国自主研制的首台自动化、智能化、多功能、高精度新型大气微波遥感探测设备,填补了我国高端微波辐射计装备技术领域的空白。该仪器系统设置了 35 个大气探测频率点,其中在 K 频段(22~30 GHz)有 21 个探测频点,在 V 频段(51~59 GHz)有 14 个探测频点。系统具备内部黑体定标、噪声源定标、天空倾斜定标和液氮定标等多种定标方式,实现了多通道连续探测水汽和氧气的大气微波辐射信号,获取大气辐射亮温,利用人工神经网络算法并结合历史探空数据,实时自动反演顶空大气温度、湿度、云水分布以及水汽、液态水含量等多种大气参数<sup>[28-31]</sup>。

本文利用历史探空秒数据作为微波辐射计的训练样本,以无线电探空数据为参考,结合地面降水数据,云量云属等观测数据,在四川盆地南部山区开展了对比试验,分析评估了晴空和有云时的温湿廓线及相关物理参数的精度,为国产微波辐射计的应用推广提供参考。

## 1 数据与处理方法

### 1.1 数据

微波辐射计数据:由布设在四川省宜宾市宜宾县(56491, 28.7°N, 104.57°E, 海拔 287 m)的 MWP967KV 型地基多通道微波辐射计反演的大气温度、相对湿度、水汽密度、液水含量廓线数据。廓线的垂直覆盖范围为地表至顶空 10 km 高度,共划分为 58 层,其中地面~0.5 km, 0.5~2 km, 2~10 km 的分辨率分别为 50 m, 100 m, 250 m, 时间分辨率为 2 min, 长度为 2015 年 8 月—2018 年 3 月。微波辐射计每年进行液氮标定,日常实时进行黑体定标和天空倾斜定标确保观测精度,标定精度为 1 K。

无线电探空数据:2015 年 8 月—2018 年 3 月宜宾探空站(59492, 28.77°N, 104.6°E, 海拔 341 m)

(包括 02:00, 08:00, 14:00, 20:00(北京时,下同)的探测数据)的 GTS1 型数字式探空仪,探测数据包括温度、相对湿度、气压、风向、风速、高度、云状等;宜宾探空站与宜宾县微波辐射计的水平直线距离为 8.3 km,垂直高度差为 54 m。中国气象局对高空气象观测仪器体测量准确度要求<sup>[32]</sup>在测量范围为地面至 100 hPa 时,温度误差不超过 0.5℃,在测量范围为第 1 个对流层顶及其以下时,相对湿度的误差不超过 5%。

降水量数据:国家基本气象站宜宾站(56492)与国家一般气象站宜宾县站(56491)的逐小时降水量。

云量数据:国家基本气象站宜宾站(56492)在 08:00, 14:00, 20:00 的总云量和低云量。

### 1.2 数据筛选原则

为了避免人工增雨、人工防雹作业对天气和云的影响,剔除人工影响天气作业时段内及之后 24 h 的作业区和作业区下风方的样本。

为了避免探空气球升空后降水环境对探测的影响,剔除探空气球飘移的时间对应地面气象站有降水的样本。

为了避免微波辐射计天线罩受水滴的影响,将样本筛选条件规定为探空气球在探测前 1 h 到探测后 1 h 的时段内,微波辐射计所在气象站无降水。

为了避免因探空气球飘移导致探测环境差异的影响,选取晴空、层积云和高积云 3 类大范围天气条件一致的样本。根据云量与云状的观测记录数据,本文将总云量为 0 记为晴空,总云量和低云量均为 10 且云状为层积云的记为层积云,总云量为 10 和低云量为 0 且云状为高积云的记为高积云。

依据以上原则,筛选出 34 组晴空样本、65 组层积云样本和 33 组高积云样本。

### 1.3 数据处理

由于微波辐射计与无线电探空数据的时间及空间分辨率不一致,需要对两种数据进行处理。第 1 步提取微波辐射计所在站点垂直高度上 58 层的高度为 58 个微波参照高度,第 2 步提取探空气球升空后最接近这 58 个微波参照高度的 58 个探空高度,该高度上的时间作为 58 个探空参照时间,第 3 步提取微波辐射计最接近 58 个探空参照时间的观测时间,提取相应高度上的微波辐射计数据。不同于在探空时段内对数据进行平滑处理的方法,本文采用时间点与空间点一一对应的分析方法,达到探空数据与微波辐射计数据在时间与高度上的一致性,能够消除平滑处理对数据的影响。

本文选取微波辐射计的 3 种反演产品进行精度分析,包括温度、相对湿度和水汽密度。由于无线电探空观测无水汽密度数据,本文利用直接探测到的温度、气压、相对湿度等数据计算水汽密度。

本文采用相关系数、偏差和均方根误差评估微波辐射计与无线电探空的精度。

## 2 结果分析

### 2.1 观测数据对比检验

表 1 为晴空、层积云、高积云的微波辐射计与无线电探空的温度、相对湿度、水汽密度廓线的相关系数、平均偏差与均方根误差对比。不同天气条件下

3 个参数相关系数均为温度最大,水汽密度次之,相对湿度最小。温度的相关系数高积云最大为 0.9914,晴空最小为 0.9890,平均偏差和均方根误差均为晴空最大,分别为  $-1.5^{\circ}\text{C}$ ,  $3.3^{\circ}\text{C}$ ,高积云最小,分别为  $-0.3^{\circ}\text{C}$ ,  $2.5^{\circ}\text{C}$ 。相对湿度相关系数晴空最大为 0.7646,高积云最小仅为 0.5868,晴空的平均偏差大于层积云和高积云,而其均方根误差小于层积云和高积云,但均超过 20%。水汽密度的相关系数晴空最大为 0.9770,高积云最小为 0.9665,平均偏差在晴空时最小为  $0.09\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,高积云最大为  $0.30\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,而均方根误差在层积云最小为  $1.23\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,高积云最大为  $1.55\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

图 1 为不同天气条件下微波辐射计与无线电探

表 1 晴空、层积云、高积云天气条件下,微波辐射计与探空的温度、相对湿度、水汽密度的相关系数、平均偏差和均方根误差

Table 1 Correlation coefficient, mean deviation, root mean square error between radiometer and radiosonde for temperature, relative humidity and vapor density in clear-sky, stratocumulus-sky and altocumulus-sky

参数	天气类型	相关系数	平均偏差	均方根误差
温度	晴空	0.9890	$-1.5^{\circ}\text{C}$	$3.3^{\circ}\text{C}$
	层积云	0.9909	$-0.6^{\circ}\text{C}$	$2.6^{\circ}\text{C}$
	高积云	0.9914	$-0.3^{\circ}\text{C}$	$2.5^{\circ}\text{C}$
相对湿度	晴空	0.7646	12%	21%
	层积云	0.7203	5%	22%
	高积云	0.5868	2%	22%
水汽密度	晴空	0.9770	$0.09\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$	$1.37\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$
	层积云	0.9749	$0.16\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$	$1.23\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$
	高积云	0.9665	$0.30\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$	$1.55\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$

空的温度廓线、相对湿度廓线和水汽密度廓线的相关系数。

晴空天气条件下温度、相对湿度和水汽密度的相关系数分别为 0.7694~0.9942,  $-0.2466\sim 0.9083$  和  $-0.3462\sim 0.9771$ ,温度的相关系数在地面~10 km 整层均达到 0.01 显著性水平,相对湿度相关系数在 1.1~1.6 km 和 6.75~10 km 未达到 0.01 显著性水平,水汽密度的相关系数在 7.25~7.5 km, 8.5~9.25 km 和 10 km 未达到 0.01 显著性水平。温度的相关系数整体随高度升高而减小,最大值在地面,最小值在 7.75 km,地面~3.75 km 相关性极高,相关系数均超过 0.9,7.25 km 以下的相关系数均超过 0.8。相对湿度相关系数随高度升高而振荡减小,最大值在 0.15 km,最小值在 10 km,地面~0.4 km 保持 0.8 的高相关系数,8.75 km 以上均为负相关,在 1.5 km 相对湿度的相关系数降至 0.3816,到 3.75 km 处时相关系数增

加到 0.8334,之后随高度升高而减小。水汽密度的相关系数整体随高度升高而减小,最大值在地面,最小值在 10 km,地面~4.25 km 相关系数均超过 0.8,4 km 以上相关系数随高度升高显著减小。

层积云天气条件下温度、相对湿度和水汽密度的相关系数分别为 0.8320~0.9970,  $-0.2045\sim 0.9104$  和 0.0386~0.9793,温度的相关系数在地面~10 km 均达到 0.01 显著性水平,相对湿度相关系数在 7.75~10 km 未达到 0.01 显著性水平,水汽密度的相关系数在 9.5~10 km 未达到 0.01 显著性水平。温度的相关系数整体随高度升高而减小,最大值在地面,最小值在 10 km,地面~3 km 相关系数均超过 0.9,特别是 2.25 km 以下相关系数均超过 0.98。相对湿度相关系数随高度升高振荡减小,最大值在 0.1 km,9 km 以上为负相关,地面~0.25 km 相关系数均超过 0.8,在 0.8~2 km 相对湿度的相关系数在 0.5 附近振荡,之后随高度

升高而减小。水汽密度的相关系数整体随高度升高而减小,最大值在 0.1 km,最小值在 10 km,地面~5.25 km 相关系数均超过 0.8,5 km 以上相关系数随高度升高显著减小。

高积云天气条件下温度、相对湿度和水汽密度的相关系数分别为 0.7885~0.9963, -0.2387~0.9453 和 0.1775~0.9555,温度的相关系数在地面~10 km 均达到 0.01 显著性水平,相对湿度的相关系数在 5~10 km 未达到 0.01 显著性水平,水汽密

度的相关系数在 9.75~10 km 未达到 0.01 显著性水平。温度的相关系数整体随高度升高而减小,最大值在地面,最小值在 10 km,地面~3.25 km 相关系数均超过 0.9。相对湿度相关系数最大值在 0.1 km,9 km 以上为负相关,地面~0.5 km 相关系数均超过 0.8,湿度的相关系数随高度升高振荡减小。水汽密度相关系数最大值在 0.35 km,最小值在 10 km,地面~2 km 相关系数均超过 0.8。

图2为晴空天气条件下温度廓线、相对湿度廓线

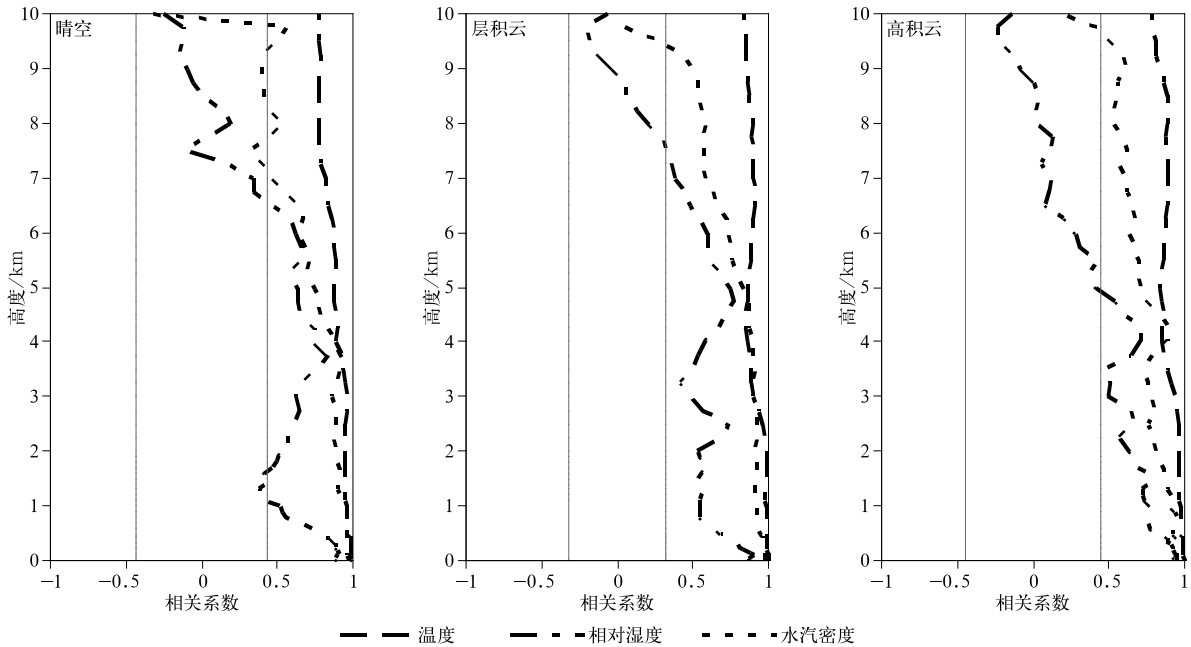


图1 晴空、层积云、高积云天气条件下,微波辐射计与探空的温度、相对湿度、水汽密度廓线相关系数(细实线表示 0.01 显著性水平)

Fig.1 The correlation coefficient between radiometer and radiosonde for temperature, relative humidity and vapor density profiles in clear-sky, stratocumulus-sky and altocumulus-sky(the thin solid lines denote 0.01 significant level)

和水汽密度廓线的偏差与均方根误差。

温度廓线在地面~9 km 均为负偏差,4.25 km 负偏差最大达 -2.4℃。0.3~8.5 km 的负偏差均超过 -1℃,地面~1.3 km 负偏差随高度升高而增大,1.3~8 km 维持在 -2℃左右,从 8 km 开始负偏差随高度升高逐渐转为正偏差,正偏差在 10 km 达到最大,为 1.1℃;均方根误差在地面最小为 1.0℃,7.75 km 最大为 4.8℃,地面~1.5 km 随高度升高增加到 3.6℃,到 3 km 减小为 2.1℃,随高度升高整体增大。

相对湿度廓线偏差随高度升高振荡增大,除了地面~0.05 km 为负偏差,其余高度均为正偏差,

0.4~1 km 正偏差为 3%左右,8 km 处正偏差最大,为 26%,1.5~6.5 km 正偏差约为 10%~20%,8~10 km 正偏差逐步减小到 12%;均方根误差在地面~0.7 km 约为 10%,之后随高度升高而增加,在 2.25 km 处约为 27%,随高度升高到 10 km 维持在 20%~30%范围内。

水汽密度廓线在地面~1.3 km 为负偏差,其余高度为正偏差,地面~0.15 km 偏差范围为 -0.05~ -1.26 g·m<sup>-3</sup>,0.2~1.2 km 负偏差约为 -0.5 g·m<sup>-3</sup>,随高度升高转为正偏差,3.5 km 正偏差最大达 0.81 g·m<sup>-3</sup>,其后偏差随高度升高趋近于 0;均方根误差在地面~2.25 km 范围内维持在 1.54~

2.11  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 2.25 km 开始随高度逐步趋近于 0。

温度廓线在地面~3 km 内偏差维持在 0 左右, 3 km 以上均为负偏差且随高度升高呈单峰型, 6.25 km 负偏差最大达  $-2.5^\circ\text{C}$ 。均方根误差在地面

图 3 为层积云天气条件下温度廓线、相对湿度廓线和水汽密度廓线的偏差与均方根误差。

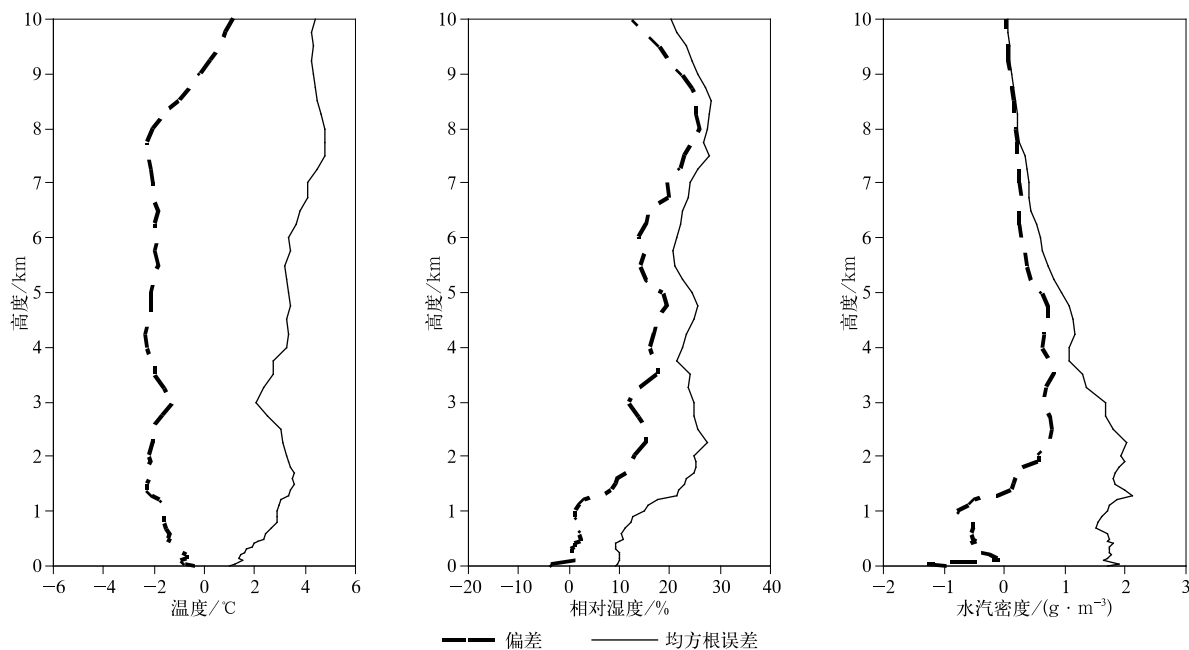


图 2 晴空天气条件下,微波辐射计与探空的温度、相对湿度和水汽密度的偏差与均方根误差  
Fig.2 The deviation, root mean square error between radiometer and radiosonde for temperature, relative humidity and vapor density in clear-sky

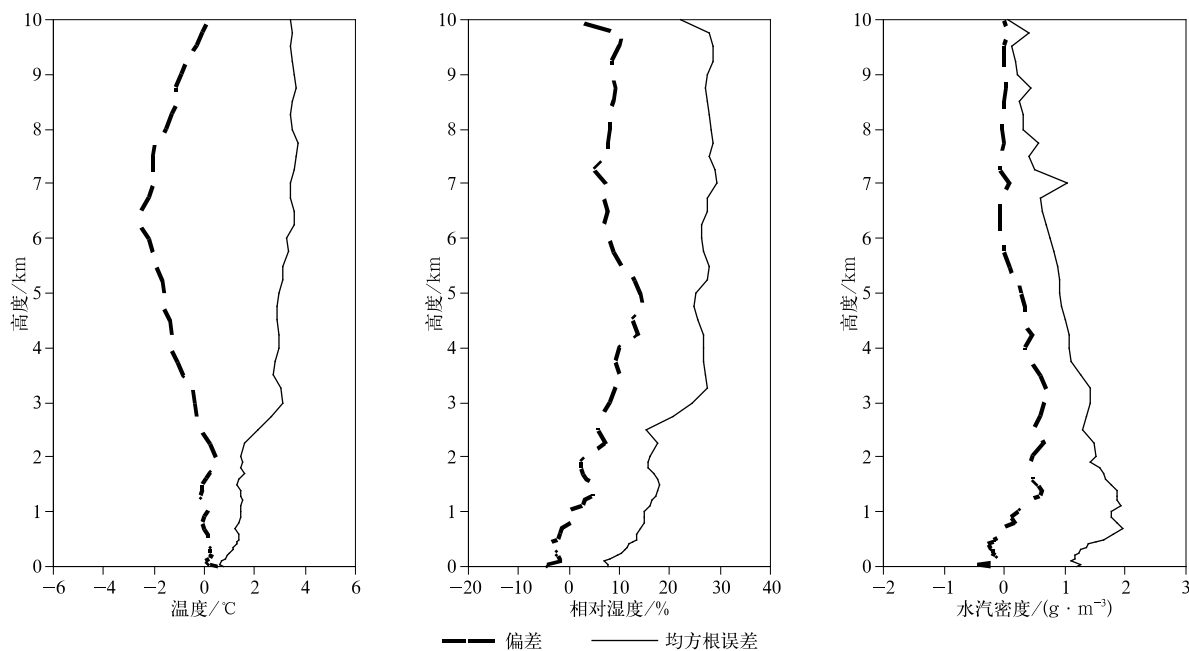


图 3 层积云天气条件下,微波辐射计与探空的温度、相对湿度和水汽密度的偏差与均方根误差  
Fig.3 The same as in Fig. 2, but for stratocumulus-sky

~0.6 km 从 0.6℃ 逐步增大到 1.4℃, 2 km 均方根误差为 1.4℃ 左右, 3 km 增加到 3.1℃, 之后随高度升高振荡, 10 km 高度维持在 3.5℃ 左右。

相对湿度廓线除地面~1 km 和 10 km 为负偏差, 其余高度为正偏差, 从地面的 -4% 随高度升高转为正偏差, 4.75 km 正偏差最大达 15%, 再随高度升高正偏差减小, 在 6~9.75 km 维持在 8% 左右。均方根误差在地面~2.5 km 由 8% 随高度升高缓慢增长到 18%, 到 3.25 km 急速增长到 28%,

并维持到 9.75 km, 10 km 减小到 22%。

水汽密度廓线在地面~0.5 km 均为负偏差, 在近地层负偏差剧烈振荡, 0.5 km 开始随高度升高逐渐转为正偏差, 1.4 km 处正偏差最大达  $0.63 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 再随高度升高减小, 偏差逐步趋近于 0; 均方根误差从地面随高度增加到 0.7 km 处的  $1.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 之后随高度升高逐渐趋近于 0。

图 4 为高积云天气条件下温度、相对湿度、水汽密度偏差与均方根误差。

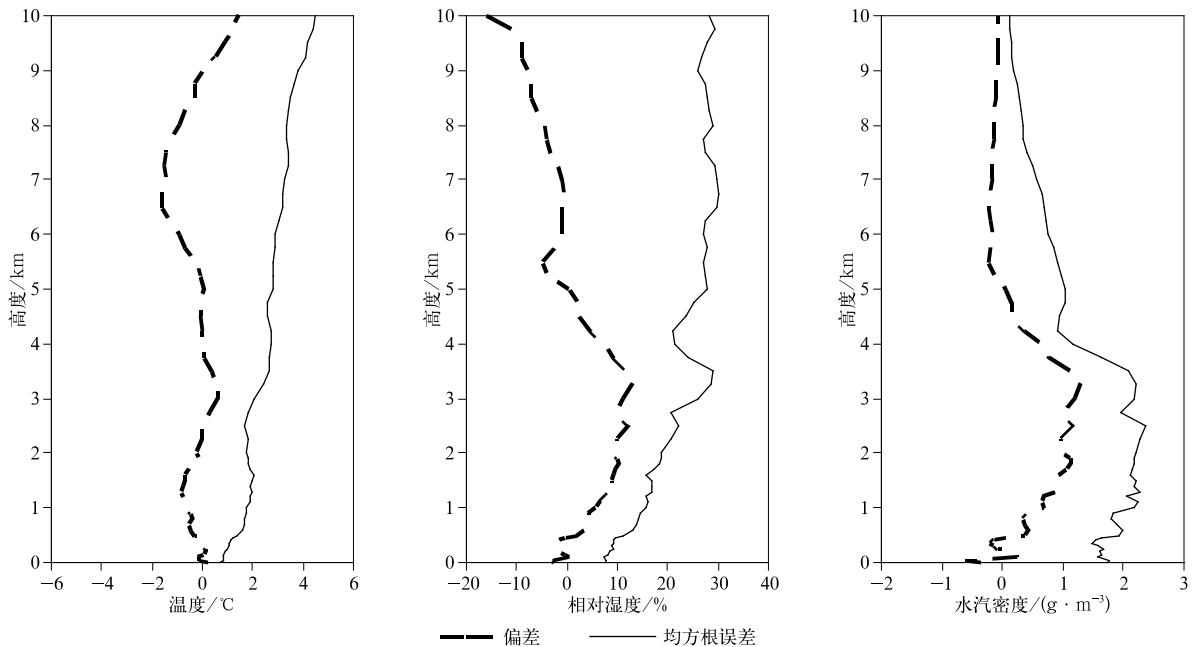


图 4 高积云天气条件下,微波辐射计与探空的温度、相对湿度和水汽密度的偏差与均方根误差

Fig. 4 The same as in Fig. 2, but for altostratus-sky

温度廓线在地面~5 km 内偏差值为 0 左右, 5 km 以上偏差振幅变大, 6.75 km 负偏差最大达  $-1.57^\circ\text{C}$ , 后随高度升高转为正偏差, 10 km 处正偏差最大达  $1.47^\circ\text{C}$ ; 均方根误差在地面~1.1 km 缓慢增加到  $1.9^\circ\text{C}$ , 且一直维持到 3 km, 随高度升高增加, 10 km 处约为  $4.45^\circ\text{C}$ 。

相对湿度廓线偏差从地面的 -3% 随高度升高转为正偏差, 3.25 km 正偏差最大达 13%, 再随高度升高逐步转为负偏差, 10 km 负偏差最大达 -16%; 均方根误差在地面~2.75 km 由 8% 增长到 20%, 3~5 km 在 20%~30% 波动增长, 10 km 为 29% 左右。

水汽密度廓线在地面~0.7 km 内在  $-0.61 \sim 0.43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  范围内振荡, 3.25 km 处正偏差最大为

$1.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 再随高度升高正偏差减小, 偏差逐渐趋近于 0; 均方根误差在地面~3.5 km 维持在  $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  左右, 4 km 减小到  $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 之后随高度升高逐渐趋近于 0。

整体上, 温度、相对湿度、水汽密度 3 种廓线越接近地面, 相关性越大。3 种参数的相关性, 温度最高, 水汽密度次之, 相对湿度最低。云层下的温度廓线精度高于云层上。晴空时的太阳辐射使 GTS1 电子探空仪加热, 云层的存在抑制了对流层中下层的辐射加热<sup>[33]</sup>, 从而导致云层以下的温度精度高于晴空, 晴空的负偏差甚于层积云与高积云。云层的出现造成温度和相对湿度精度下降明显, 层积云和高积云分别属于低云和中云, 精度陡降的高度在层积云时为 3 km 左右, 而高积云则在 5 km 左右。

GTS1 电子探空仪在云中高湿条件下的探测值会出现相对湿度负偏差,这是普遍存在的现象,且入云和出云还会出现相对湿度探测滞后的现象<sup>[34-37]</sup>。水汽密度偏差极大值出现在地面,在 5 km 以上偏差接近 0,可能是由于水汽密度廓线随高度升高呈指数式降低,水汽主要集中在 5 km 以下,上层水汽减少造成的。探空数据的水汽密度是由温度与相对湿度的公式计算,误差的累积使水汽密度廓线融合了温度廓线和相对湿度廓线的复杂精度特征。

王志诚<sup>[18]</sup>对晴空与有云天气条件下国内外 3 种地基微波辐射计的探测性能进行了对比分析,晴空天气条件下温度与相对湿度的均方根误差为 2.2

~3.8℃ 和 15%~25%,而有云天气条件下则为 2.7~4.3℃ 和 26%左右。结合本文的研究结果,从温度和相对湿度整体平均和垂直分层两方面比较,国产微波辐射计的精度均达到中等水平。虽然与探空数据相比,地基微波辐射计观测的大气温湿度分布存在不同程度的差异,但是两者的变化倾向具有较好的一致性。

## 2.2 间接参数对比检验

利用温度、相对湿度、水汽密度等进一步计算间接参数,对微波辐射计和无线电探空数据的计算参数精度分析,结果见表 2。

除对流抑制有效位能外,其他参数均具有良好

表 2 晴空、层积云和高积云天气条件下,微波辐射计与探空的不同参数的相关系数、平均偏差和均方根误差

Table 2 Correlation coefficient, mean deviation, root mean square error between radiometer and radiosonde for different parameters in clear-sky, stratocumulus-sky and altocumulus-sky

间接参数	天气类型	相关系数	平均偏差	均方根误差
K 指数	晴空	0.90	7.0℃	11.7℃
	层积云	0.85	5.1℃	9.5℃
	高积云	0.87	4.0℃	7.4℃
沙式指数	晴空	0.87	-0.1℃	3.7℃
	层积云	0.89	-2.5℃	4.3℃
	高积云	0.83	-0.8℃	3.6℃
抬升凝结温度	晴空	0.98	-1.1℃	2.1℃
	层积云	0.97	-0.6℃	1.9℃
	高积云	0.94	-0.4℃	2.2℃
0℃层高度	晴空	0.95	-452 m	600 m
	层积云	0.95	-182 m	521 m
	高积云	0.92	-43 m	447 m
-20℃层高度	晴空	0.82	-302 m	634 m
	层积云	0.90	-358 m	557 m
	高积云	0.90	-190 m	456 m
对流抑制有效位能	晴空	-0.14	-15 J·kg <sup>-1</sup>	286 J·kg <sup>-1</sup>
	层积云	0.12	4 J·kg <sup>-1</sup>	110 J·kg <sup>-1</sup>
	高积云	-0.07	62 J·kg <sup>-1</sup>	160 J·kg <sup>-1</sup>
湿对流有效位能	晴空	0.68	-82 J·kg <sup>-1</sup>	401 J·kg <sup>-1</sup>
	层积云	0.68	15 J·kg <sup>-1</sup>	203 J·kg <sup>-1</sup>
	高积云	0.61	-115 J·kg <sup>-1</sup>	387 J·kg <sup>-1</sup>
整层积分水汽含量	晴空	0.98	2.7 kg·m <sup>-2</sup>	4.6 kg·m <sup>-2</sup>
	层积云	0.99	2.4 kg·m <sup>-2</sup>	3.9 kg·m <sup>-2</sup>
	高积云	0.97	2.8 kg·m <sup>-2</sup>	4.6 kg·m <sup>-2</sup>

的相关性,相关系数在 0.5 以上,达到 0.01 显著性水平。抬升凝结温度、0℃层高度和整层积分水汽含量在 3 种天气条件下相关性高,相关系数均大于 0.9,除抬升凝结温度和湿对流有效位能外,其余物理参数的相关性均表现为有云高于晴空。层积云的整层积分水汽含量的相关性最好,为 0.99,均方根

误差比晴空和高积云小。抬升凝结温度在层积云的均方根误差小于晴空和高积云。

0℃层高度和-20℃层高度的偏差均为负值,且为均方根误差高积云最小,晴空最大的特征。结合表 1、图 2、图 3 和图 4 的温度偏差可推测,实际大气中逆温层的出现将低温层整体抬升,导致在同一高

度层上微波辐射计反演的温度与实际大气温度相比多为负偏差。

### 2.3 微波辐射计与无线电探空的数据误差

#### 2.3.1 逆温层影响

从34组晴空样本、65组层积云样本和33组高积云样本(以下称原始样本)中筛选出无逆温层存在的晴空、层积云和高积云样本分别为4组、6组和3组(以下称无逆温层样本)。

图5~图7为晴空、层积云和高积云天气条件下微波辐射计与无线电探空数据的散点图,温度拟合度最高,水汽密度次之,相对湿度最差。温度在高温区拟合度高于低温区,水汽密度在低值区拟合度高于高值区,相对湿度在高湿区拟合度高于低湿区。

晴空天气条件下,微波辐射计温度整体被低估,无逆温层样本较原始样本的拟合度更高;相对湿度主要集中在低湿区,原始样本和无逆温层样本在低

湿区整体被高估,高湿区整体被低估,无逆温层样本在相对湿度为60%的区域拟合度高;水汽密度集中在低密度区,高密度区整体被低估,无逆温层样本在小于 $2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的低密度区整体被高估, $5\sim 15\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围整体被低估,大于 $15\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高密度区拟合度高。

层积云天气条件下,微波辐射计温度整体被低估,无逆温层样本的拟合度高;相对湿度主要集中在高湿区,在低湿区整体被高估,相对湿度达60%的样本被低估,无逆温层样本主要集中在高湿区,拟合度较差;水汽密度集中在低密度区,高密度区整体被低估,无逆温层样本拟合度高。

高积云天气条件下,微波辐射计温度拟合度整体高于晴空和层积云,无逆温层样本的拟合度更高;相对湿度主要集中在高湿区,在低湿区整体被高估,相对湿度达60%的样本被低估,无逆温层样本主要集

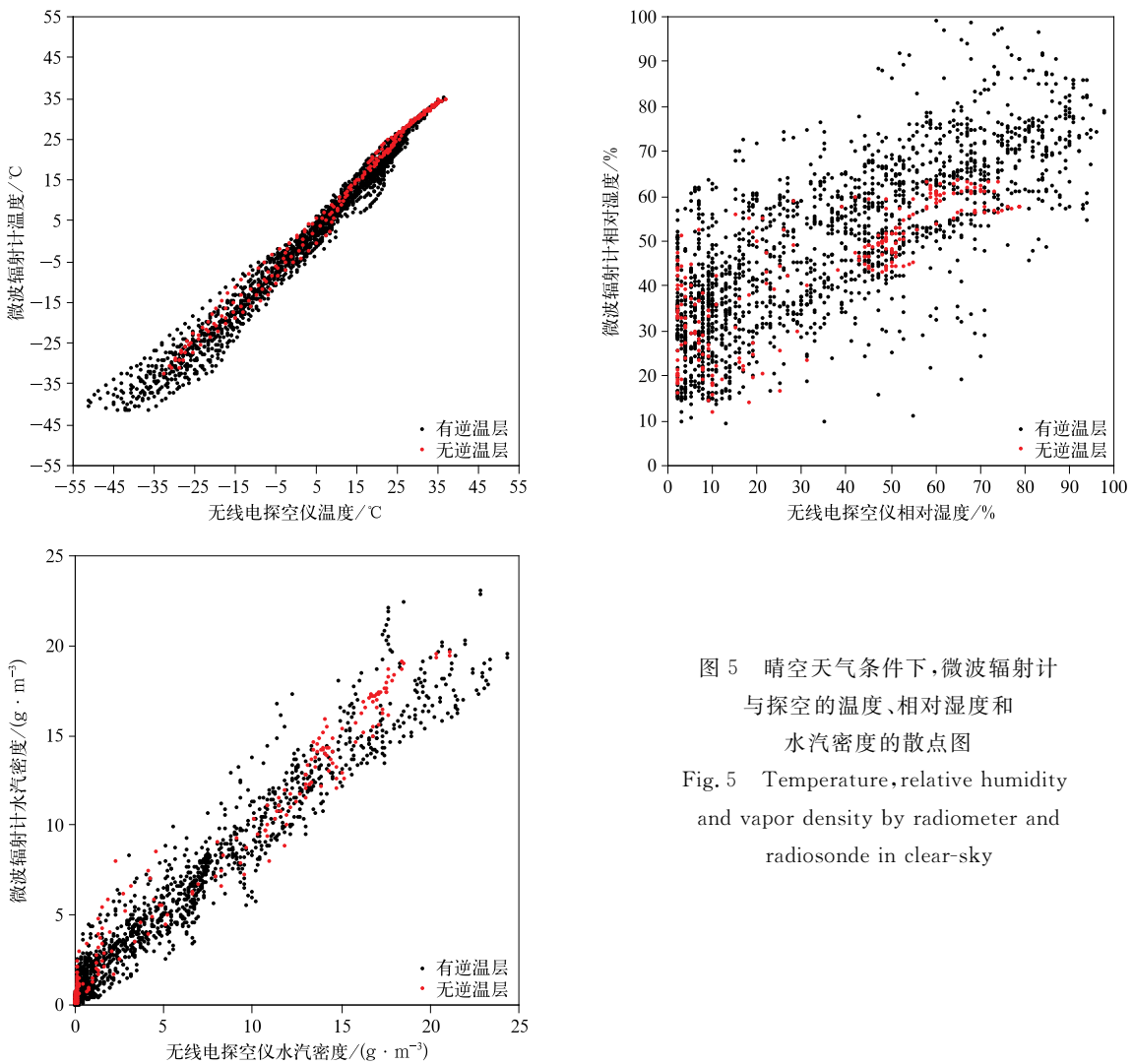


图5 晴空天气条件下,微波辐射计与探空的温度、相对湿度和水汽密度的散点图  
Fig. 5 Temperature, relative humidity and vapor density by radiometer and radiosonde in clear-sky



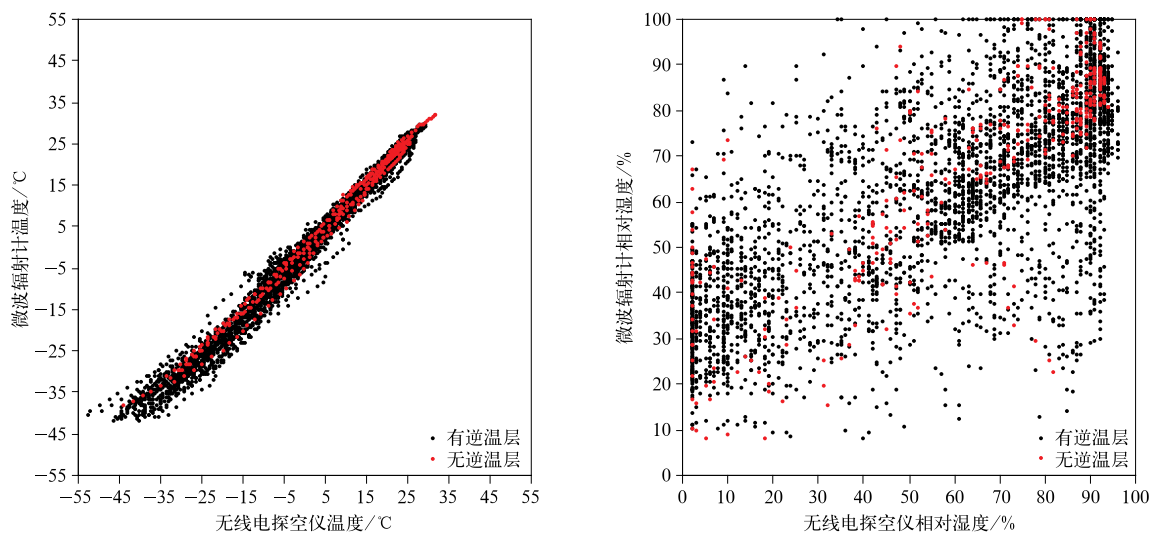


图 6 层积云天气条件下,微波辐射计与探空的温度、相对湿度和水汽密度的散点图

Fig. 6 The same as in Fig. 5, but for stratocumulus-sky

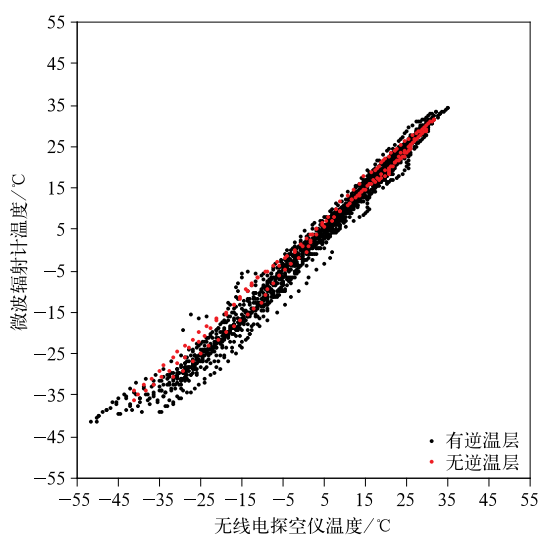
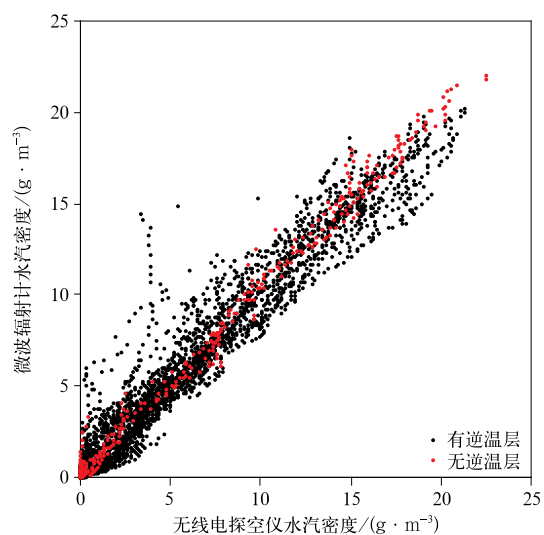
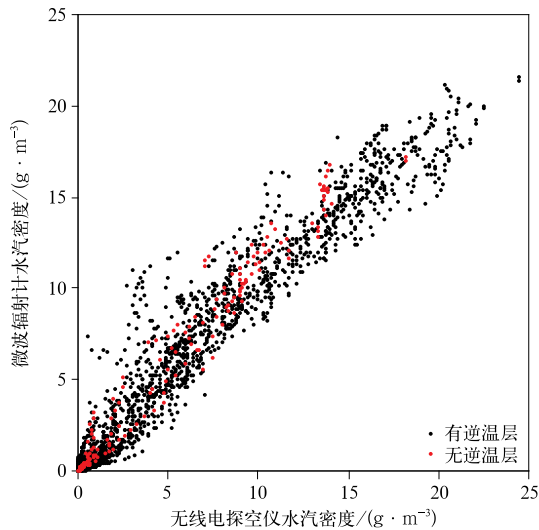


图 7 高积云天气条件下,微波辐射计与探空的温度、相对湿度和水汽密度的散点图

Fig. 7 The same as in Fig. 5, but for altocumulus-sky



续图 7

中在高湿区,拟合度较差;水汽密度集中在低密度区,高密度区整体被低估,无逆温层样本拟合度高。

由于无逆温层样本少,未进行相关分析,仅计算平均偏差与均方根误差,结果见表 3。

对比表 1,温度的平均偏差在原始样本中均为负偏差,而在无逆温层样本(表 3)在晴空、层积云和高积云 3 种天气条件下分别增加 0.9℃,0.7℃和 1.5℃,层积云和高积云转为正偏差。相对湿度和水汽密度的平均偏差在原始样本中均为正偏差,在无逆温层样本中高积云转为负偏差,相对湿度分别减小 2%,1%和 3%。水汽密度则分别增加 0.19 g·m<sup>-3</sup>,0.14 g·m<sup>-3</sup>和 0.47 g·m<sup>-3</sup>。表 3 与表 1 相比,温度、相对湿度和水汽密度在 3 种天气条件下的均方根误差均减小,温度在晴空、层积云和高积云的均方根误差分别减小 1.4℃,0.8℃和 0.01℃,相对

表 3 晴空、层积云和高积云天气条件下,无逆温层样本微波辐射计与探空的温度、相对湿度和水汽密度的平均偏差和均方根误差

Table 3 Mean deviation, root mean square error between radiometer and radiosonde for temperature, relative humidity and vapor density in clear-sky, stratocumulus-sky and altocumulus-sky without thermal inversion layer

参数	天气类型	平均偏差	均方根误差
温度	晴空	-0.4℃	1.9℃
	层积云	0.1℃	1.8℃
	高积云	1.2℃	2.5℃
相对湿度	晴空	10%	18%
	层积云	4%	18%
	高积云	-1%	18%
水汽密度	晴空	0.28 g·m <sup>-3</sup>	1.25 g·m <sup>-3</sup>
	层积云	0.30 g·m <sup>-3</sup>	0.73 g·m <sup>-3</sup>
	高积云	0.77 g·m <sup>-3</sup>	1.36 g·m <sup>-3</sup>

湿度分别减小 3%,4%和 4%,水汽密度分别减小 0.12 g·m<sup>-3</sup>,0.50 g·m<sup>-3</sup>和 0.19 g·m<sup>-3</sup>。温度和水汽密度均方根误差最小值出现在层积云天气下条件下。由此可见,无逆温层样本精度高于原始样本。

对比表 2,表 4 中层积云天气条件下,所有间接参数的均方根误差均减小。晴空天气条件下,对流抑制有效位能、湿对流有效位能、整层积分水汽含量的均方根误差均增大,而高积云除了包括上述增大的参数以外,-20℃层高度的均方根误差也增大。依据层积云和高积云的高度推断,在云层作用干扰小的情况下,逆温层对微波辐射计的温度探测精度影响大。

### 2.3.2 气球飘移影响

根据无线电探空数据得到的气球飘移的经纬度,计算气球飘移位置与微波辐射计所在位置的水平距离,分析其与廓线偏差的相关性。

根据图 8 温度廓线、相对湿度廓线和水汽密度廓线的偏差绝对值与气球飘移距离的相关系数,可见晴空和有云天气条件下,3 种参数的相关性均较弱,极少相关系数超过 0.5,且大部分未达到 0.01 显著性水平,相关系数随高度升高在正负值之间振荡变化。

本文筛选云量分别为 0,10 和 10 的晴空、层积云和高积云的天气作为样本,实现大范围天气条件一致,即便探空气球因飘移远离微波辐射计的天顶

表 4 晴空、层积云和高积云天气条件下无逆温层样本的微波辐射计与探空的不同参数的平均偏差和均方根误差

**Table 4 Mean deviation, root mean square error between radiometer and radiosonde for different parameters in clear-sky, stratocumulus-sky and altocumulus-sky without thermal inversion layer**

间接参数	天气类型	平均偏差	均方根误差
K 指数	晴空	0.2℃	2.9℃
	层积云	3.1℃	4.9℃
	高积云	0.6℃	1.2℃
沙式指数	晴空	-0.6℃	2.3℃
	层积云	-1.8℃	3.0℃
	高积云	1.3℃	2.8℃
抬升凝结温度	晴空	-1.1℃	1.1℃
	层积云	-0.7℃	1.6℃
	高积云	-0.2℃	0.7℃
0℃层高度	晴空	-186 m	451 m
	层积云	-234 m	450 m
	高积云	127 m	259 m
-20℃层高度	晴空	-2 m	330 m
	层积云	-66 m	342 m
	高积云	345 m	500 m
对流抑制有效位能	晴空	274 J · kg <sup>-1</sup>	293 J · kg <sup>-1</sup>
	层积云	55 J · kg <sup>-1</sup>	78 J · kg <sup>-1</sup>
	高积云	67 J · kg <sup>-1</sup>	182 J · kg <sup>-1</sup>
湿对流有效位能	晴空	-314 J · kg <sup>-1</sup>	588 J · kg <sup>-1</sup>
	层积云	-27 J · kg <sup>-1</sup>	183 J · kg <sup>-1</sup>
	高积云	-404 J · kg <sup>-1</sup>	477 J · kg <sup>-1</sup>
整层积分水汽含量	晴空	4.1 kg · m <sup>-2</sup>	4.8 kg · m <sup>-2</sup>
	层积云	3.0 kg · m <sup>-2</sup>	3.1 kg · m <sup>-2</sup>
	高积云	4.5 kg · m <sup>-2</sup>	4.7 kg · m <sup>-2</sup>

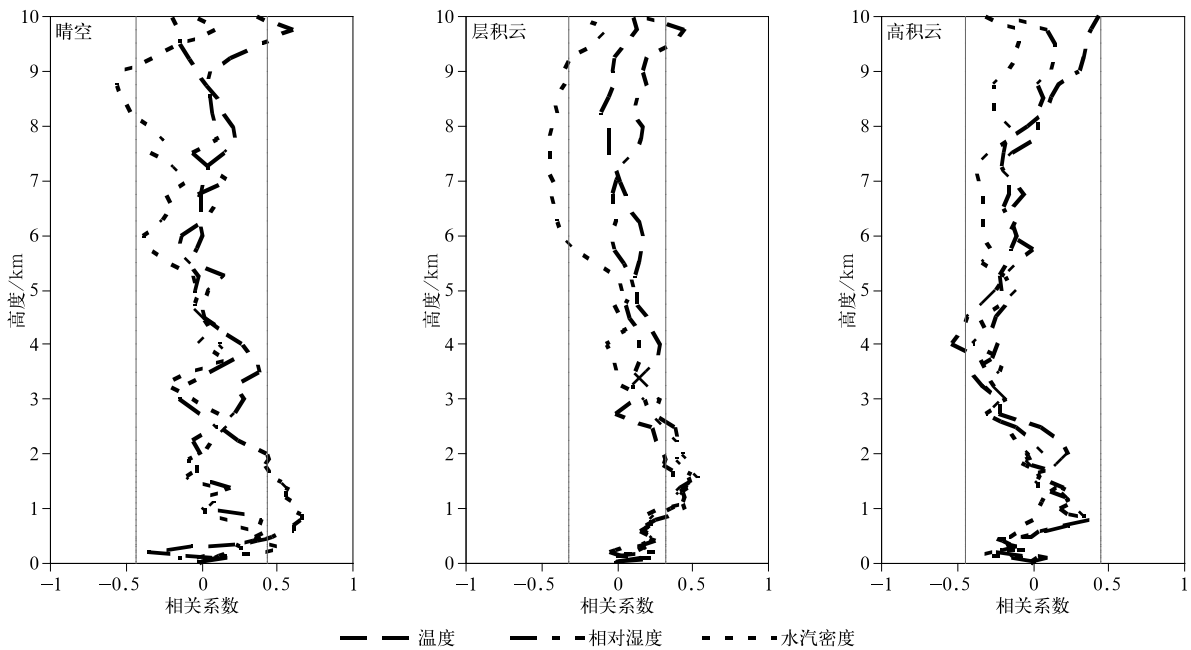


图 8 晴空、层积云和高积云天气条件下,气球飘移距离与温度、相对湿度和水汽密度偏差的相关系数(细实线表示 0.01 显著性水平)

Fig. 8 The correlation coefficient of the balloon drift distance to the deviation between radiometer and radiosonde for temperature, relative humidity and vapor density in clear-sky, stratocumulus-sky and altocumulus-sky(the thin solid lines denote 0.01 significant level)

位置,观测偏差仍在可接受的范围。

### 3 结论与讨论

1) 晴空、层积云和高积云天气条件下,微波辐射计与探空仪的温度、水汽密度和相对湿度相关系数整体上分别在 0.9890, 0.9665 和 0.5868 以上,均达到 0.01 显著性水平。3 种参数的相关性中,温度最高,水汽密度次之,相对湿度最低。晴空、层积云和高积云天气条件下,温度廓线的相关系数分别为 0.7694 ~ 0.9942, 0.8320 ~ 0.9970, 0.7885 ~ 0.9963, 均达到 0.01 显著性水平;相对湿度廓线的相关系数分别为 -0.2466 ~ 0.9083, -0.2045 ~ 0.9104, -0.2387 ~ 0.9453, 未达到 0.01 显著性水平的高度分别为晴空 1.1 ~ 1.6 km 和 6.75 km 以上、层积云 7.75 km 以上、高积云 5 km 以上;水汽密度廓线的相关系数分别为 -0.3462 ~ 0.9771, 0.0386 ~ 0.9793, 0.1775 ~ 0.9555, 未达到 0.01 显著性水平的高度分别为晴空 7.25 km 以上、层积云 9.5 km 以上、高积云 9.75 km 以上。温度廓线、相对湿度廓线、水汽密度廓线均呈现整体上越接近地面,相关性越大。

2) 晴空、层积云和高积云的温度平均偏差分别为 -1.5℃, -0.6℃ 和 -0.3℃。晴空的温度廓线从地面至 9 km 均为负偏差,层积云和高积云的温度廓线偏差分别在 3 km 以下和 5 km 以下为 0 左右,该高度以上的负偏差增至 -2℃,云层能抑制太阳辐射对探空仪的加热,云层下温度廓线的精度高于云层上。晴空、层积云和高积云的相对湿度的平均偏差在 12%, 5% 和 2%。层积云和高积云的相对湿度廓线均方根误差分别在 3 km 和 5 km 高度以上维持在 28% 左右,该高度下从地面的 10% 逐步增大,云中及出云后探空仪的相对湿度精度降低。晴空、层积云和高积云天气条件下水汽密度的平均偏差为  $0.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $0.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $0.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。水汽密度在地面均存在偏差的极大值,在 5 km 以上随高度升高偏差接近 0,可能是由于水汽密度廓线地面随高度升高呈指数式降低,水汽主要集中在 5 km 以下,越到上层水汽越少造成的。

3) 温度廓线拟合度最高,水汽密度廓线次之,相对湿度廓线最差。温度在高温区拟合度高于低温区,水汽密度在低值区拟合度高于高值区,相对湿度在高湿区拟合度高于低湿区。无逆温层存在的样

本,温度、相对湿度和水汽密度廓线的精度更高,相关物理参数精度也普遍提高。建议使用微波辐射计的低层数据或者由低层数据间接计算得到的物理参量。

4) 晴空或云天等大范围相似天气条件下,探空气球飘移距离与温度、相对湿度和水汽密度偏差的相关性较弱。

地基微波辐射计温湿廓线的精度受到设备工艺、反演算法、天气背景、观测定标等诸多条件的影响,本研究将无线电探空数据作为参考,评估分析了国产地基微波辐射计温湿廓线及相关物理参数的精度,为提升国产设备工艺、改进反演算法、完善数据质控等方面提供依据。虽然与探空数据对比,地基微波辐射计观测的大气温湿度分布存在不同程度的差异,但是两者的变化倾向具有较好的一致性。由于观测设备与样本数量的局限,本文仅对晴空、层积云和高积云天气条件下的温度、相对湿度和水汽密度进行了分析,随着观测能力的提升与观测样本数量的增加,将在以后的研究中补充液态含水量及不同天气条件下的对比分析。随着遥感探测技术的发展,微波辐射计将在大气探测系统中体现出更大的价值。

### 参考文献

- [1] 张培昌,王振会. 大气微波遥感基础. 北京:气象出版社,1995: 330-335.
- [2] 李青,胡方超,楚艳丽,等. 北京一地基微波辐射计的观测数据一致性分析和订正实验. 遥感技术与应用,2014,29(4):547-556.
- [3] 段英,吴志会. 利用地基遥感方法监测大气中气态、液态水含量分布特征的分析. 应用气象学报,1999,10(1):34-40.
- [4] 刘红燕,王迎春,王京丽,等. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析. 大气科学,2009,33(2):388-396.
- [5] 刘建忠,何晖,张蓄. 不同时次地基微波辐射计反演产品评估. 气象科技,2012,40(3):332-339.
- [6] 雷恒池,魏重,沈志来,等. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水. 应用气象学报,2001,12(增刊D):73-79.
- [7] 陈添宇,陈乾,丁瑞津. 地基微波辐射计监测的张掖大气水汽含量与雨强的关系. 干旱区地理,2007,30(4):501-506.
- [8] Madhulatha A, Rajeevan M, Ratnam M V, et al. Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(1):1-13.
- [9] Ratnam M V, Santhi Y D, Rajeevan M, et al. Diurnal variability of stability indices observed using radiosonde observations

- over a tropical station: Comparison with microwave radiometer measurements. *Atmos Res*, 2013, 124: 21-33.
- [10] 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. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 576-584.
- [11] 刘红燕. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析. *气象学报*, 2011, 69(4): 719-728.
- [12] 魏重,雷恒池,沈志来. 地基微波辐射计的雨天探测. *应用气象学报*, 2001, 12(增刊 I): 65-72.
- [13] 张泽娇,牛生杰,丁辉. 利用亮温资料建立降水临近预报方法的研究. *大气科学学报*, 2015, 38(2): 241-248.
- [14] 党张利,张京朋,曲宗希,等. 微波辐射计观测数据在降水预报中的应用. *干旱气象*, 2015, 33(2): 340-343.
- [15] 张文刚,徐桂荣,廖可文,等. 降水对地基微波辐射计反演误差的影响. *暴雨灾害*, 2013, 32(1): 70-76.
- [16] 杨莲梅,李霞,赵玲,等. MP-3000A 型地基微波辐射计探测性能及其在乌鲁木齐降水天气中的初步应用. *干旱气象*, 2013, 31(3): 570-578.
- [17] 茆佳佳,张雪芬,王志诚,等. 多型号地基微波辐射计亮温准确性比对. *应用气象学报*, 2018, 29(6): 724-736.
- [18] 王志诚,张雪芬,茆佳佳,等. 不同天气条件下地基微波辐射计探测性能比对. *应用气象学报*, 2018, 29(3): 282-295.
- [19] 侯叶叶,刘红燕,鲍艳松. 地基微波辐射计反演水汽密度廓线精度分析. *气象科技*, 2016, 44(5): 702-709; 721.
- [20] 车云飞,马舒庆,杨玲,等. 云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响. *应用气象学报*, 2015, 26(2): 193-202.
- [21] 郭丽君,郭学良. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究. *气象学报*, 2015, 73(2): 368-381.
- [22] 张文刚,徐桂荣,颜国跑,等. 微波辐射计与探空仪测值对比分析. *气象科技*, 2014, 42(5): 737-741.
- [23] Ware R, Cimini D, Campos E, et al. Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics. *Atmos Res*, 2013, 132-133(10): 278-290.
- [24] 傅新姝,谈建国. 地基微波辐射计探测资料质量控制方法. *应用气象学报*, 2017, 28(2): 209-217.
- [25] 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. *热带气象学报*, 2016, 32(2): 163-171.
- [26] 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. *应用气象学报*, 2015, 26(5): 626-635.
- [27] 王旗,王周翔,于翠红. MWP967KV 型地基微波辐射计与探空观测数据对比分析. *现代农业科技*, 2017(7): 211-213.
- [28] 雷连发,马若飞,朱磊,等. 地基多通道微波辐射计在大气遥感中的应用. *火控雷达技术*, 2018, 47(1): 11-16.
- [29] 卢建平,黄建平,郭学良,等. 探测大气温湿廓线的 35 通道微波辐射计设计原理与特点. *气象科技*, 2014, 42(2): 193-197.
- [30] 雷连发,卢建平,朱磊,等. 多通道地基微波辐射计大气遥感. *遥感学报*, 2014, 18(1): 180-191.
- [31] 朱磊,卢建平,雷连发,等. 新型多通道微波辐射计及大气观测分析. *火控雷达技术*, 2014, 43(1): 84-88.
- [32] 中国气象局. 常规高空气象观测业务规范. 北京: 气象出版社, 2010.
- [33] 王英,熊安元 L 波段探空仪器换型对高空湿度资料的影响. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 76-86.
- [34] Bian J C, Vömel H, Duan Y J, et al. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(1): 139-146.
- [35] 蔡森,欧建军,周毓荃,等. L 波段探空判别云区方法的研究. *大气科学*, 2014, 38(2): 213-222.
- [36] 姚雯,马颖,徐文静. L 波段电子探空仪相对湿度误差研究及其应用. *应用气象学报*, 2008, 19(3): 356-361.
- [37] 郝民,龚建东,王瑞文,等. 中国 L 波段探空湿度观测资料的质量评估及偏差订正. *气象学报*, 2015, 73(1): 187-199.

## The Observational Precision of Domestic MWP967KV Ground-based Microwave Radiometer

Liu Xiaolu<sup>1)2)</sup> Liu Dongsheng<sup>1)</sup> Guo Lijun<sup>2)</sup> Lei Lianfa<sup>3)</sup> Feng Jinyan<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (Heavy Rain and Drought-flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100)

<sup>4)</sup> (Yibin Meteorological Bureau of Sichuan Province, Yibin 644000)

### Abstract

MWP967KV ground-based microwave radiometer is an atmospheric microwave remote sensing equipment, which is jointly developed by institutes and universities in China with complete independent intellec-

tual property rights. The microwave profiler includes 21 K-band (22—30 GHz) and 14 V-band (51—59 GHz) microwave channels. The radiometer receives radiation emitted by atmospheric oxygen, water vapor molecules and liquid water in multiple channels. The microwave, infrared and surface meteorological observations are automatically converted into continuous temperature, humidity and liquid profiles using radiative transfer equations and neural networks.

In order to apply ground-based microwave radiometer MWP967KV in meteorological services, it is necessary to make comparative test analysis on its detection accuracy. The comparative test is carried out in the southern mountainous area of the Sichuan Basin from August 2015 to March 2018. The ground-based microwave radiometer MWP967KV is located at Yibin County station (28.7°N, 104.57°E) and radiosonde is located at Yibin Station (28.77°N, 104.6°E). The precision of microwave profilers and physical indexes in clear-sky, stratocumulus-sky and altocumulus-sky are analyzed and evaluated using radiosonde data as reference data and combining with ground precipitation data and cloud amount data.

Results show that correlation coefficients of temperature, vapor density and relative humidity between radiometer and radiosonde in clear-sky, stratocumulus-sky and altocumulus-sky are 0.9890, 0.9665 and 0.5868, respectively, all passing 0.01 significant test. The correlation is more significant at the bottom than that in the upper air.

The detection precision of temperature and relative humidity profile is obviously higher below clouds. The maximum deviation of water vapor density is on the ground and the deviation above 5 km height is close to 0.

The fitted temperature profile is good, especially for high temperature. The fitted vapor density profile is also good, especially for low vapor density. However, the fitted relative humidity profile is not satisfying. For samples without temperature inversion layer, the precision of microwave profilers is higher and physical indexes are more accurate.

There is no significant difference in correlation coefficient of the balloon drift distance to the deviation between radiometer and radiosonde for temperature, relative humidity and vapor density profiles under a wide range similar weather background, such as clear-sky and cloudy-sky.

**Key words:** ground-based microwave radiometer; radiosondes; profile; precision