

成都地基微波辐射计 反演大气温湿性能的分析^①

孙 磊, 张 涛

成都市气象局, 成都 611130

摘要: 利用 3 年 RPG HATPRO-G4 地基微波辐射计和 L 波段探空数据, 比较微波辐射计反演和探空观测的气温、相对湿度差异. 结果表明: 气温的相关性较相对湿度的相关性更好. 3 年气温不同高度平均误差在 1 °C 以内, 相对湿度平均误差最大可达 19%. 四季中, 冬季气温和相对湿度数据, 春、夏季的气温数据均可直接使用, 其他季节的气温或相对湿度数据需订正后才能使用. 在 4 km 以下, 降雨发生时, 微波辐射计反演的气温较探空数据偏高 3 °C 以上, 数据必须订正后才能使用. 相对湿度除非晴空(特指多云/阴天等无雨状况)和冬季以外, 其他时段均需要订正. 相对湿度数据主要订正高度位于 4~8 km 处; 晴空时, 还需对 300 m 以下进行 10%~20% 的正订正.

关键词: 微波辐射计; L 波段探空; 气温; 相对湿度

中图分类号: P407.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)01-0125-08

在大气环流形势的准确分析下, 连续跟踪局地大气的温湿度变化, 对认识各种天气尺度的天气演变过程和做好灾害性天气临近预报具有重要意义^[1-4]. 常规探空资料虽能获得可靠的温湿参数, 但时间分辨率较低, 很难满足精细化预报的发展要求. 而地基微波辐射计可以连续获取地面至 10 km 高度范围内的大气温湿廓线等数据, 随着技术的进步, 逐渐成为遥感大气廓线的重要设备. 近年来, 有学者利用微波辐射计数据与对流层风廓线雷达资料相结合成为短时临近预报的重要参考资料^[5-6]. 因此, 研究分析微波辐射计资料反演的大气温湿廓线数据质量具有潜在的实用价值.

地基微波辐射计作为一种较新型的大气探测设备, 对其探测性能和反演产品精度进行评估分析是一项基础而又十分必要的工作. 利用外场试验数据, 国外学者研究表明: 微波辐射计的温度较探空相比, 误差会在 1.5 °C 左右^[7]. 在有云的情况下, 特别是低云和厚云存在时, 湿度廓线反演误差增大; 在降水天气下, 反演得到的热力学廓线的准确度也能达到可运用程度^[8]. 降水时, 天线罩上附着的水将严重影响辐射计的反演精度, 但利用纳米材料制作天线罩, 并配备鼓风机向天线罩表面吹气等方法可有效减小水膜效应.

目前, 国内学者主要是对探空资料和 GPS/MET 等进行对比分析, 如刘红燕^[9]分季节研究了 3 年微波辐射计反演的温度数据, 指出夏季辐射计温度与探空差异最小, 冬季最大. 徐桂荣等^[10]利用 GPS 无线电探空、GPS/MET 数据与微波辐射计进行对比, 发现两设备的气温、水汽密度有很好的正相关性, 但相对湿度的正相关系数受天气影响较大. 侯叶叶等^[11]利用北京观象台观测资料, 分析了水汽密度廓线数据, 在冬季时辐射计与探空水汽密度平均误差较小, 而夏季较大. 王志诚等^[12]结合探空数据、云雷达数据, 对同址观测的国内外 3 种型号地基微波辐射计资料进行比对分析, 指出温度均方根误差随高度递增, 相对湿度的

① 收稿日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41705008); 中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(KLAS201713); 成都市气象局自立课题.

作者简介: 孙 磊, 硕士, 工程师, 主要从事卫星遥感应用的研究.

误差较温度整体偏大,且云量的存在会较大程度地影响到相对湿度的观测.

2015 年底,成都市气象局在温江安置了 1 台 RPG HATPRO-G4 型地基微波辐射计,该仪器从 2015 年 10 月开始,采用固定点连续观测已达 3 年,但目前还未进行数据质量分析,为更好地将该数据运用在短时临近预报业务中,以期能发挥更大的潜在价值,笔者将 3 年温江地基微波辐射计测量的温湿度廓线与同时同地的探空温湿度廓线进行对比分析,探讨各种因子(如高度、季节、降水和云)对 2 种设备测量的温湿度廓线差别的影响.

1 观测仪器简介和评价方法

1.1 仪器简介

RPG HATPRO-G4 地基大气微波辐射计,采用多通道并行测量技术,一级亮温数据时间分辨率可达秒级^[12],反演产品数据最高分辨率可达 1 min. 仪器接收频率分为两段:一段为 22.24~31.40 GHz 的 7 个微波通道,该频段主要观测水汽衰减特性,用于反演大气湿度特征;另一段为 51.26~58.00 GHz 的 7 个微波通道,该频段主要观测氧气衰减特性,用于反演大气温度特征. 扫描方式分为天顶扫描、边界层扫描和全天空 2D 扫描 3 种^[13],根据软件设置的 3 种扫描方式可以交替进行,也可以单独使用. 本文所选数据均采用天顶扫描模式观测获得,垂直获取高度为 0~10 km,获取层数高达 93 层. 该仪器反演大气温湿廓线主要采用神经网络技术,为保障数据的可靠性和正确性,微波辐射计与温江探空数据进行了同址神经网络训练,确保反演算法本地化的实现.

1.2 评价方法

利用微波辐射计反演得到的气温、相对湿度数据和温江 L 波段秒级探空实测的气温、相对湿度进行对比分析,两仪器水平间距不到 100 m. 温江探空站每日固定 2 次释放探空气球,开始时间分别为 07:15 和 19:15,探空气球从地面升空至 10 km 高度的时间大约在 07:45 和 19:45,所以本文选择 07:30 和 19:30 的微波辐射计数据和探空数据进行 93 层高度的逐一对比. 本次选用的数据从 2015 年 12 月开始至 2018 年 10 月止,日数据样本量为 726 个.

为评估地基微波辐射计反演气温和相对湿度的精度,利用 L 波段探空实测的气温和相对湿度减去对应高度上的微波辐射计反演值,从而获得各高度上两要素的平均误差(ME)和均方根误差(RMSE),计算公式分别为

$$ME = \frac{1}{n} \sum (x - y) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum (x - y)^2} \quad (2)$$

(1)(2) 式子中, x 为 L 波段探空实测值, y 为地基微波辐射计反演值, n 为探测样本数.

1.3 样本分类

文中对样本进行了四季、有无降水、晴空和非晴空分类,以便分析不同天气条件下的观测性能. 1) 有无降水:利用地基微波辐射计配有的降雨传感器,若数据为 0 时判断为无降雨,若数据为 1 时判断为有雨. 2) 晴空和非晴空:选择温江观测站每日 08 时和 20 时的云量人工观测记录判断,若观测云量在 2 成以下,判断为晴空,其余无降水形成时均为非晴空.

2 辐射计温湿探测性能

2.1 总体评价

如图 1a 所示,3 年微波辐射计反演的气温平均垂直廓线和探空气温平均垂直廓线,两者十分相近,相关系数高达 0.999 8(显著水平达到 0.01). 从探空和微波辐射计获取的气温平均廓线的误差来看,其平均误差范围在 $-0.89\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,最小平均误差位于 4.8 km 高度上,仅为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$. 4.8 km 高度向上,为正平均误差($<0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),即探空观测的平均气温高于微波辐射计,正平均误差最大位于 7.5 km 高度上,值为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$. 4.8 km 高度向下,为负平均误差,即微波辐射计反演的平均气温高于探空,且误差值较高空

更大, 负平均误差最大位于 2.3 km 高度, 值为 $-0.83\text{ }^{\circ}\text{C}$. 若将气温平均误差分为 08 时和 20 时(图 1c), 两时次在 4.8 km 以下表现为微波辐射计反演的平均气温高于探空(08 时近地面除外), 4.8 km 以上 20 时探空观测的平均气温和微波辐射计十分接近. 总体来讲, 无论是低层还是高层, 08 时的平均误差较 20 时更甚.

两种设备的相对湿度平均垂直廓线(图 2b)趋势总体一致, 相关系数为 0.926 3(显著水平达 0.05); 但 2 km 以上, 探空观测的相对湿度随高度持续下降, 而微波辐射计反演的相对湿度随高度呈波动式下降. 两种设备的相对湿度平均误差范围为 $-19.1\%\sim 6.5\%$, 最大平均误差位于 6.6 km 处, 为 19.1%. 除 300 m 以下, 微波辐射计反演的相对湿度低于探空外, 其余高度上, 均较探空获得大气相对湿度更大, 特别是 4~9 km 高度内微波辐射计反演的相对湿度明显大于探空(平均误差 $>10\%$), 这将导致微波辐射计反演的整层大气水汽含量较实际偏高. 在中高层, 微波辐射计反演相对湿度明显偏高的现象将在一定程度上影响对干空气侵入强度的判断. 从 08 时和 20 时分别来看(图 1d), 6 km 以下 20 时的平均误差较 08 时更大, 而 6 km 以上, 则相反; 近地面 300 m 以下, 08 时微波辐射计反演相对湿度较探空数据偏小可达 10%, 这将对近地面的大气观测带来影响.

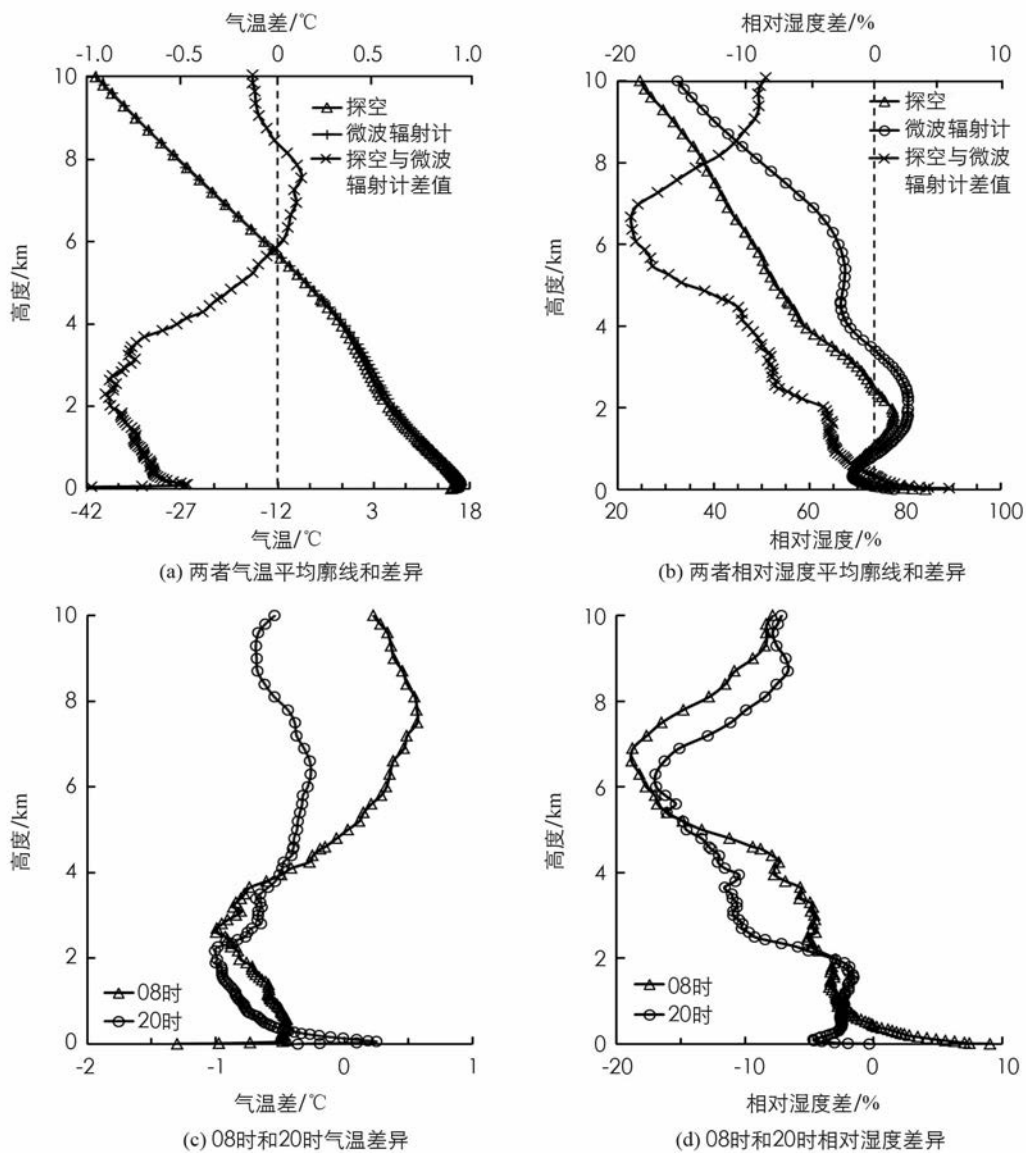


图 1 2016—2018 年微波辐射计与探空资料的平均垂直廓线对比

2.2 四季变化的影响

2.2.1 温 度

从四季的气温来看,探空与微波辐射计的平均误差和均方根误差值分别如图 2a 和 2b 所示. 平均误差方面,不同高度上秋季平均误差为负,范围为 $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬季平均误差以正值为主,范围为 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;春、夏两季在 4.2 km 以下平均误差为负值,4.2 km 以上多为正值. 若将平均误差所有高度整体平均,误差绝对值从小到大分别为春($-0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$)、夏($-0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$)、冬($0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$)、秋($-1.18\text{ }^{\circ}\text{C}$),由此可见,秋季微波辐射计反演的气温可信度较低. 春、夏两季,在 4 km 以下,探空观测的气温更低;4~6 km 内探空气温和微波辐射计相近;6 km 以上,微波辐射计反演的气温更低. 在均方根误差方面,6 km 高度以下,以秋季的均方根误差最大,最大值为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3.2 km 高度),6 km 以上以冬季的均方根误差最大,最大值为 $4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (9.3 km 高度),而春、夏两季的均方根误差大多 $<2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

将各个季节的平均误差和均方根误差分为 08 时、20 时,图 2c 和 2d 分别代表夏季和冬季. 08 时和 20 时,夏季平均误差和均方根误差随高度的变化趋势一致,且平均误差值以 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内为主,均方根误差 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. 而秋季平均误差和均方根误差随高度变化趋势一致且变化小(图略),平均误差均为负偏差,偏差值较夏季偏大 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右. 冬季 08 时和 20 时,在 4 km 以下,平均误差具有相反的正负偏差值,而均方根误差随高度均增加;4 km 以上,08 时平均误差和均方根误差均大于 20 时,春季特征和冬季相似,但误差绝对值春季更小.

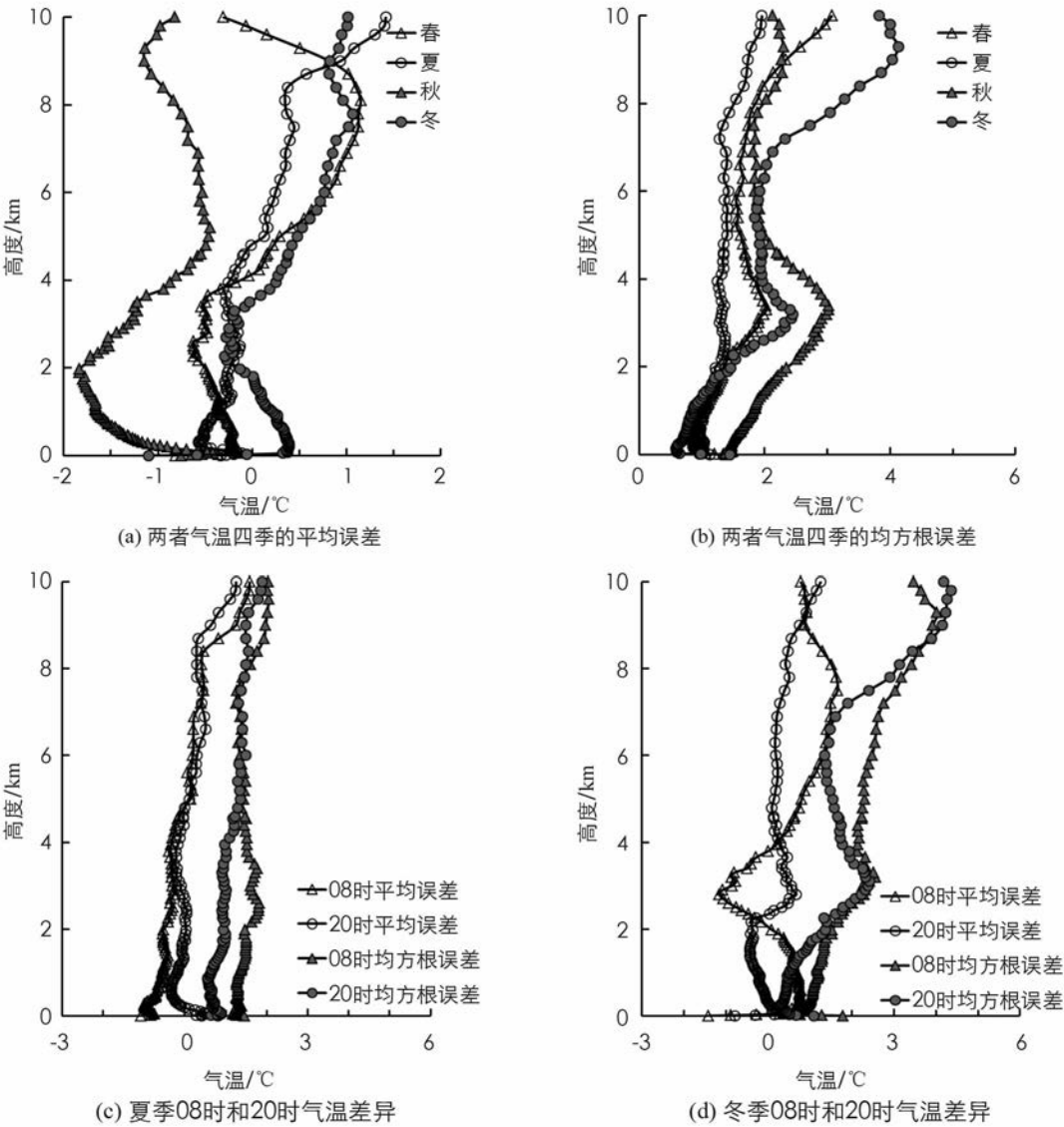


图 2 微波辐射计反演的气温与探空在四季的误差垂直廓线

2.2.2 相对湿度

分四季统计计算得到的相对湿度平均误差和均方根误差值分别如图 3a 和 3b 所示. 除近地面以外, 四季平均误差均为负数, 表明探空获得的相对湿度均小于微波辐射计反演的相对湿度值, 平均误差范围为 $-30\% \sim 11\%$, 最大值平均误差出现在春季的 6.3 km 高度处. 春、夏、冬 3 季, 仅在近地面 100 m 以下平均误差为正值, 且误差值不超过 6%, 即探空的相对湿度大于微波辐射计相对湿度的高度层非常薄; 而秋季在 1 040 m 以下平均误差为正值, 其厚度远远大于其他 3 个季节, 最大平均误差可达 11%, 其原因, 一方面可能和成都秋季多连阴雨, 且云层很低, 故低层相对湿度较大; 另一方面, 成都秋季辐射降温明显, 强的辐射降温使得边界层内的气温迅速降低, 空气接近饱和, 使微波辐射计反演的相对湿度低于实际值. 从相对湿度的整体平均误差值绝对值来看, 由小到大依次为秋 (-2.5%)、冬 (-6.7%)、夏 (-8.7%)、春 (-9.8%). 在均方根误差方面, 四季均方根误差范围为 $7.6\% \sim 35.1\%$, 冬季为四季中均方根误差最小的, 其他 3 季节趋势变化一致且大小接近. 从高度分布来讲, 冬季最大均方根误差出现在 3.3 km (为 27.7%), 春、夏、秋 3 季最大均方根误差出现在 7 km 左右.

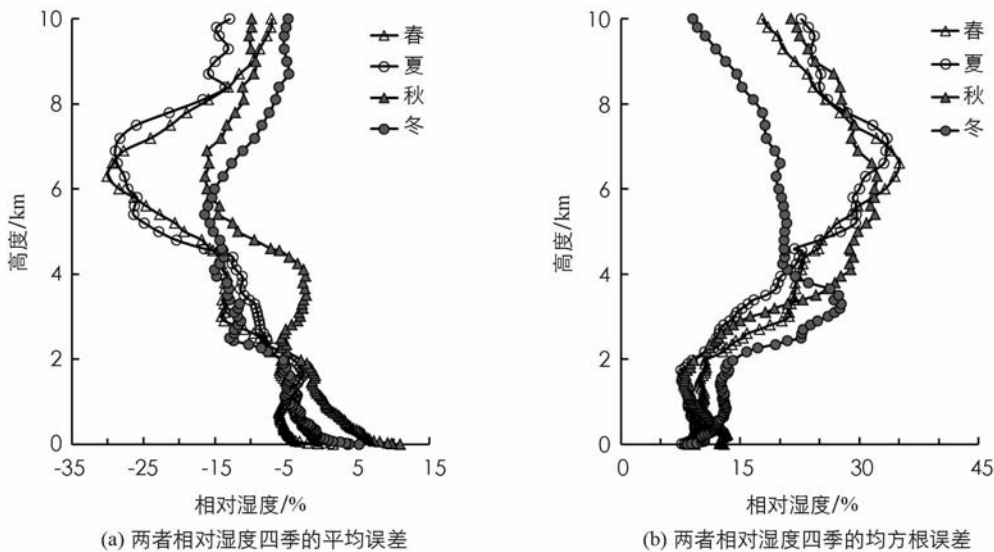


图 3 微波辐射计反演的相对湿度与探空在四季的误差垂直廓线

2.3 降水对反演产品的影响

微波辐射计通过微波通道对水汽衰减特性来反演大气湿度廓线, 利用氧气通道的衰减特征反演大气温度廓线, 因此, 降雨的产生将对微波辐射计通道的衰减信号产生明显的干扰. 图 4 反映了降雨对微波辐射计反演的温湿度影响. 从图 4a 中可以看出, 在没有降雨产生时, 微波辐射计和探空曲线的气温十分相近; 降雨时, 地面向上到 3.5 km, 负误差不断增大, 即微波辐射计气温较探空气温随高度偏高更明显, 最大偏差为 $-5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其原因来源于天线罩上降雨的附着使亮温异常升高^[14]; 3.5~6.3 km, 两者误差逐步减小至零. 相比之下, 降雨对水汽反演影响更复杂(图 4b), 在无降雨产生时, 探空获得的湿度较微波辐射计更低, 即微波辐射计反演所得大气环境湿度常常偏大; 两者差异最明显的高度位于 6.6 km 高度, 为 -21.7% . 在有降雨时, 在 3 km 以下, 平均误差为负, 此时微波辐射计反演的相对湿度大多在 98% 以上, 较探空获得的湿度明显偏大; 在 3 km 以上, 平均误差为正值, 特别是在 5 km 附近, 探空湿度较微波辐射计湿度偏大. 其原因一方面是降雨蒸发使得湿层增厚; 另一方面, 当降水持续时间较长或降水量较大时, 雨水附着在天线罩上, 而鼓风机无法使得天线罩迅速变干, 使得反演数据失真, 主要表现为反演数据不随时间或高度变化而变化^[15-17], 也就是说, 随降雨的持续, 微波辐射计反演的中高层数据在各个高度上保持不变或完全一致, 其值的大小为降水刚开始的湿度.

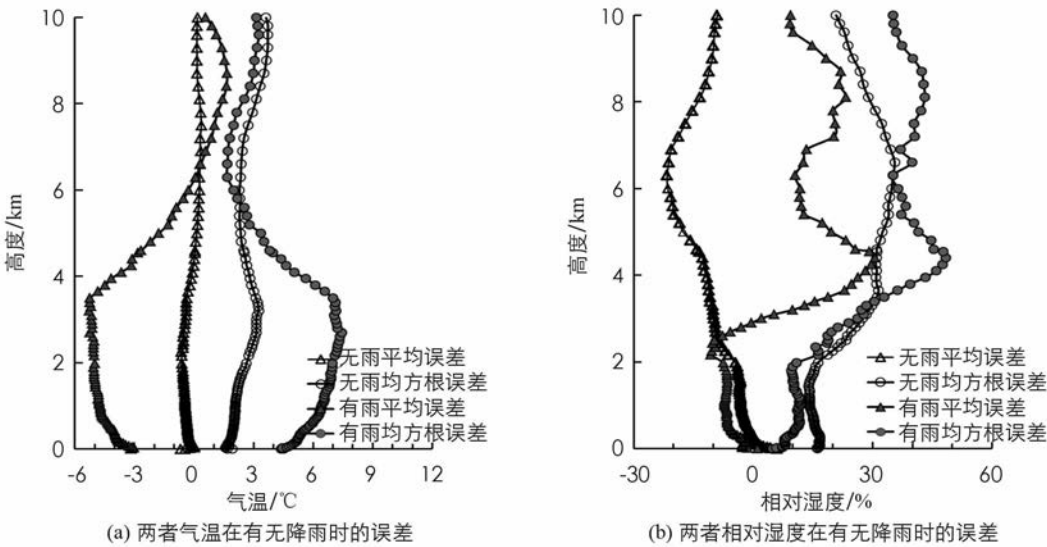


图 4 微波辐射计与探空在有无降雨下的误差垂直廓线

2.4 非晴空条件的影响

云量不同,水汽通道和臭氧通道的衰减特性会有所不同,本文分非晴空和晴空两种条件下,分析云量对微波辐射计反演的气温和相对湿度的影响.气温的误差廓线如图 5a 所示,晴空条件下,微波辐射计气温的平均误差的绝对值随高度不断增大,且以负偏差为主,最大平均误差可达 -2.35°C ;非晴空条件下,气温的平均误差均在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 内,4 km 以下为负偏差,4 km 以上为正偏差.虽然两种云天状况下,气温平均误差的差异明显,但两者的均方根误差随高度变化趋势一致,且大小相近,在 8 km 以上和 2~4 km 之间存在两个较大的均方根误差大值区.在 5 km 以上,晴空和非晴空条件下的均方根误差相近,但晴空下的气温平均误差为显著的负值,而非晴空条件下平均误差接近零值,可见,非晴空条件下,微波辐射计反演的气温值正负偏差大小相当.

相对湿度的误差廓线特点如图 5b 所示.平均误差在晴空条件下值分布在 $-20\%\sim 20\%$ 之间,最大差异值在 2.4 km 高度;非晴空条件下值分布在 $-20\%\sim 10\%$ 之间,最大差异位于 6.6 km 高度处.均方根误差,无论是在非晴空和晴空条件下,1.5 km 高度以下在 15%附近,差异很小;在 2~4 km 内有误差值从 15%陡升至 40%;高度继续向上,均方根误差保持或逐步减小.相比之下,2~4 km 内,晴空条件下的误差更大,高度向上,非晴空条件下的误差更大.

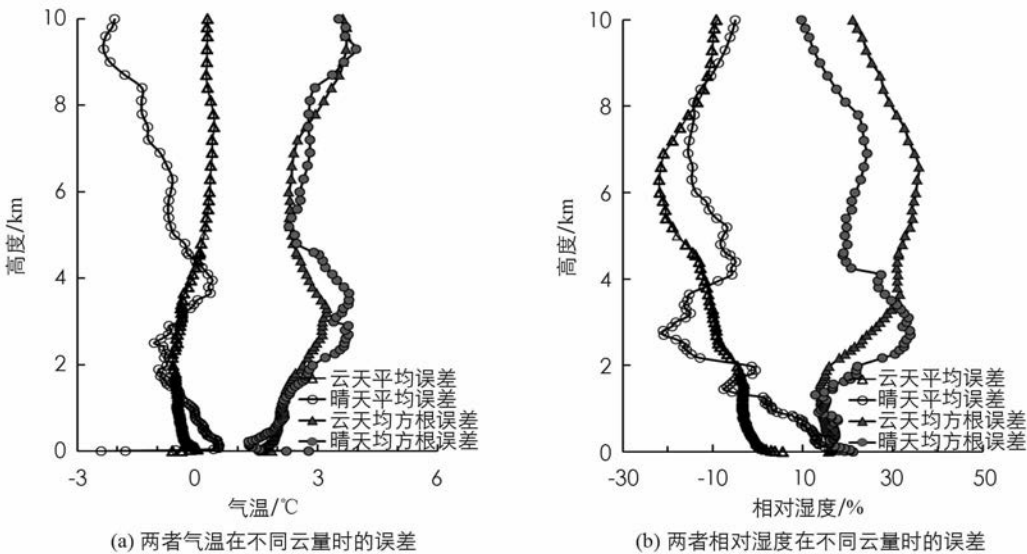


图 5 微波辐射计与探空在非晴空和晴空条件下的误差垂直廓线

3 结 论

1) 总体而言, 与探空数据相比, 微波辐射计反演气温较相对湿度更好. 3 年对比数据显示, 气温平均差异在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内, 相对湿度差异最大偏湿 19%. 微波辐射计反演的气温较探空在 4.8 km 以下偏高, 4.8 km 以上偏低. 微波辐射计反演的大气湿度较探空更湿, 仅在近地面 300 m 以下, 较探空略干.

2) 四季中, 气温平均误差的绝对值从小到大依次为春、夏、冬、秋; 均方根误差秋、冬两季较春、夏两季更大, 在对流层的中低层以秋季均方根误差最大, 对流层的中高层以冬季误差最大. 气温平均误差随高度变化趋势为冬、春季相似, 秋与夏相似. 相对湿度平均误差的绝对值从小到大依次为秋、冬、夏、春; 均方根误差以冬季最小, 其余 3 季节随高度变化趋势相同且大小接近. 相比总体误差而言, 冬季气温和相对湿度数据, 春、夏季的气温数据均可直接使用, 其他季节的气温或相对湿度数据需订正后才能使用.

3) 4 km 以下, 降雨使得微波辐射计反演的气温较探空偏高, 偏差可达 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 可用性低. 无降雨时, 微波辐射计反演的整层相对湿度常常偏高; 有降雨时, 对流层低层微波辐射计反演的相对湿度较探空偏湿, 而对流层中上层却偏干 10%~30%.

4) 在晴空条件下, 微波辐射计反演的气温常常较探空观测更低, 且随高度增加, 偏低越明显. 在对流层中上层, 云量的增多引起对水汽通道的衰减差异, 使非晴空条件下的相对湿度的误差较晴空下更大.

5) 微波辐射计反演的相对湿度, 除非晴空和冬季以外, 其他时段均需要订正. 主要订正高度位于 4~8 km 处; 晴空时, 还需对 300 m 以下的数据进行 10%~20% 的正订正. 受地形复杂影响, 成都四季非晴空状况变化十分复杂, 除上述总结的情况下需要进行修订外, 此外还需要从神经网络算法出发, 从根本上改善数据的质量.

参考文献:

- [1] 李 俊, 曾庆存. 晴空时大气红外遥感及其反演问题研究: II. 反演试验研究 [J]. 大气科学, 1997, 21(2): 214-222.
- [2] HAN Y, WESTWATER E R. Remote Sensing of Tropospheric Water Vapor and Cloud Liquid Water by Integrated Ground-Based Sensors [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, 12(5): 1050-1059.
- [3] 刘红燕, 李 炬, 曹晓彦, 等. 遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计测量结果分析 [J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(2): 222-229.
- [4] 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.
- [5] 黄治勇, 周志敏, 徐桂荣, 等. 风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用 [J]. 高原气象, 2015, 34(1): 269-278.
- [6] 魏 东, 孙继松, 雷 蕾, 等. 用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析 [J]. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 697-706.
- [7] CIMINI D, CAMPOS E, WARE R, et al. Thermodynamic Atmospheric Profiling during the 2010 Winter Olympics Using Ground-Based Microwave Radiometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(12): 4959-4969.
- [8] CHAN P W. Performance and Application of a Multi-wavelength, Ground-based Microwave Radiometer in Intense Convective Weather [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2009, 18(3): 253-265.
- [9] 刘红燕. 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, 2011, 69(4): 719-728.
- [10] 徐桂荣, 孙振添, 李武阶, 等. 地基微波辐射计与 GPS 无线电探空和 GPS/MET 的观测对比分析 [J]. 暴雨灾害, 2010, 29(4): 315-321.
- [11] 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 [J]. 气象科技, 2016, 44(5): 702-709.
- [12] 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 [J]. 应用气象学报, 2018, 29(3): 282-295.
- [13] 张秋晨, 龚佃利, 冯俊杰. RPG-HATPRO-G3 地基微波辐射计反演产品评估 [J]. 海洋气象学报, 2017, 37(1): 104-110.

- [14] 樊 旭, 毛文茜, 吴肖燕, 等. 基于伪逆学习算法的地基微波辐射计反演算法研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(1): 114-122.
- [15] 刘建忠, 张 蓓. 微波辐射计反演产品评价 [J]. 气象科技, 2010, 38(3): 325-331.
- [16] 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 [J]. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 70-76.
- [17] 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 77-86.

Preliminary Analysis of Atmospheric Temperature and Humidity Retrieval from Chengdu Ground-Based Microwave Radiometer

SUN Lei, ZHANG Tao

Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 611130, China

Abstract: Using three years RPG HATPRO-G4 ground-based microwave radiometer and L-band sounding data, analysis of retrieval products of the microwave radiometer, such as air temperature and relative humidity, are presented in this paper. The results are as follows: the correlation of air temperature is better than that of relative humidity. In three years, the value of mean error (ME) of air temperature is within 1°C , and ME of relative humidity is up to 19% at different altitudes. In the four seasons, air temperature data and relative humidity data in winter and air temperature data in spring and summer can be used directly. The data of air temperature and relative humidity in other seasons can only be used after correction. Under 4 km, when rainfall occurs, air temperature retrieved by microwave radiometer is 3°C higher than sounding, and the data must be used after correction. For relative humidity, except cloudy / cloudy or winter, other periods need to be corrected. The main correction height of the relative humidity data is 4—8 km. For clear skies, a positive correction of 10%—20% below 300 m is required.

Key words: microwave radiometer; L-band sounding; air temperature; relative humidity

责任编辑 周仁惠