

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.
Zhang Qiuchen, Gong Dianli, Feng Junjie. Analysis and evaluation of retrieval products of RPG-HATPRO-G3 ground-based microwave radiometers[J].Journal of Marine Meteorology,2017,37(1):104-110. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.012. (in Chinese)

RPG-HATPRO-G3 地基微波辐射计反演产品评估

张秋晨¹,龚佃利¹,冯俊杰²

(1. 山东省人民政府人工影响天气办公室,山东 济南 250031; 2. 济南市章丘区气象局,山东 济南 250200)

摘要: RPG-HATPRO-G3 地基微波辐射计采用“多通道并行测量技术”,性能稳定,反演精度高。应用该微波辐射计和常规 L 波段探空数据,比较了微波辐射计反演数据与探空测值的差异。结果表明:温度、水汽密度与常规探空资料比较有很好的线性相关性,对仪器维护后可以提高数据质量;相对湿度数据离散度较高。比较无降水时不同高度下微波辐射计反演数据的精度,温度在 1 000 m 以下低层平均误差和均方根误差较小;水汽密度的平均误差和均方根误差均为近地面较大,随高度而减小;相对湿度的平均误差和均方根误差都明显较大,温度和水汽密度的准确性高于相对湿度。降水时不同高度的温度、水汽密度和相对湿度的平均误差和均方根误差变化趋势均与无降水时相似,但是误差值明显偏大;降水时反演温度在 2 000 m 以下误差较小,水汽密度在 3 000 m 以下反演值较探空测值大,相对湿度在降水时的误差较大。

关键词: 地基微波辐射计;反演产品;L 波段探空

中图分类号: P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0104-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.012

Analysis and evaluation of retrieval products of RPG-HATPRO-G3 ground-based microwave radiometers

ZHANG Qiuchen¹, GONG Dianli¹, FENG Junjie²

(1. Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China; 2. Zhangqiu Meteorological Bureau, Jinan 250200, China)

Abstract A high speed parallel detection of all 14 channels is offered by RPG-HTAPRO-G3 ground-based microwave radiometer (short for RPG) with its two 7-channel-filterbank receivers. Analysis and evaluation of retrieval products of RPG microwave radiometer, such as temperature, water vapor density and relative humidity, are presented in this paper. The results show that there have better correlation and consistency between observations of RPG and radiosonde for temperature and water vapor density than for relative humidity. The quality of RPG observations can be improved by maintenance. By comparing the mean bias (MB) and root-mean-square error (RMSE) of retrieval products from RPG in different height on non-rainy days, it is revealed that temperature below 1 000 m is generally more accurate than in other heights. The value of MB and RMSE of water vapor density are higher close to the ground and decrease with height. Significant errors lie in RPG relative humidity observations, which is less accurate than those of temperature and water vapor density. On rainy days, the variation trends of MB and RMSE of temperature, water vapor density and relative humidity in different heights are similar to those in non-rainy days, but the values of MB and RMSE are larger. The MB and RMSE of temperature below 2 000 m

收稿日期:2016-06-06; 修订日期:2017-03-01

基金项目:山东省气象局重点科研项目(2012sdqxz07);山东省气象局青年科研基金项目(2015SDQN16)

作者简介:张秋晨(1986—),女,硕士,工程师,主要从事人工影响天气工作,zqc0904@163.com。

are less than those in other heights. The MB of water vapor density below 3 000 m are positive, which means retrieval water vapor density are larger than those measured by radiosonde. MB and RMSE of relative humidity are higher than temperature and water vapor density obviously on rainy days as well.

Key words ground-based microwave radiometer; retrieval product; L-band radiosonde

引言

地基微波辐射计是观测不同高度下大气参数的新型设备,可以同时反演高垂直分辨率的大气温度、湿度、液态水廓线和大气垂直积分水汽、云液态水总量等数据,具有可无人值守连续工作、高时间和空间分辨率、操作简洁方便等优点,已逐渐成为遥感大气水汽和云液态水总量的有力工具。利用地基微波辐射计,可以高效、准确观测降水前后云中水汽和液态水含量分布和变化,可为人工增雨作业提供有力的监测手段^[1-5]。

地基微波辐射计作为一种新型探测设备,对其探测性能和反演产品的精度进行评估是一项基础工作。主要分析方法是将其反演数据与其他探测数据进行对比,国内外学者对此进行了一系列研究^[6-10]。刘建忠等^[6]利用北京大型活动期间探空和微波辐射计资料,采用统计方法对反演的不同时段、不同高度下温度和相对湿度进行评价分析,指出降水对微波辐射计观测的准确性有一定影响。徐桂荣等^[7]利用同址 GPS 无线电探空和 GPS/MET 数据对微波辐射计反演的温度、水汽密度和相对湿度进行对比分析,结果表明,微波辐射计反演的温度和水汽密度廓线与 GPS 无线电探空结果对比具有很好的正相关,而相对湿度的正相关系数则受天气影响较明显。高金辉等^[8]利用地基微波辐射计遥感的雨区云层光学厚度来推算降雨量,并将结果与地面翻斗式雨量计数据进行对比,结果表明,微波辐射计反演雨量数据有一定可靠性。张文刚等^[9]利用武汉站高时空分辨率探空资料与同址的 MP-3000A 型地基微波辐射计资料,分析了探测数据的日变化和时间序列变化特征,结果表明,微波辐射计对温度的探测偏差大值区出现在午后,相对湿度和水汽密度的探测偏差大值区则在凌晨,且降水特别是强降水会对微波辐射计的探测准确度产生较明显的影响。Chan^[10]利用微波辐射计反演的温度、大气可降水量和 K 指数,与香港探空资料和 GPS 数据分别进行对比分析,并利用微波辐射计资料分析了两个强对流天气过程,结果表明,微波辐射计与探空观测资料数据存在一定差异,但其仍可

为天气预报提供有用信息。

目前,国内应用较多的是以美国 MP-3000A 为代表、以“串行常规合成器变频技术”为基础的地基微波辐射计^[7,9,11],而德国 RPG 公司研制的 RPG-HATPRO-G3 地基多通道微波辐射计(以下简称“RPG”)采用“多通道并行测量技术”,有一定的技术特点。此文对该微波辐射计资料和探空数据进行对比分析,定量分析不同高度上反演产品的误差分布特征,了解设备性能和产品特点,为业务应用奠定基础。

1 RPG 地基微波辐射计简介

RPG 为 14 通道地基微波辐射计,主要由微波扫描镜、分光镜、微波接收器组、微波窗口、红外辐射计、方位定位仪、内置定标黑体、鼓风机、加热器、降雨传感器、地面气象传感器、GPS 时钟、电源系统、数据通信光纤和稳固支架等构成。仪器扫描镜接收到的大气微波信号被分光镜分为两束,其中一束是频率为 22~32 GHz 的 7 个微波信号,该频率段的大气衰减主要特征是水汽衰减,用于反演大气湿度特征;另一束为 51~59 GHz 的 7 个微波信号,其大气衰减主要特征是氧气衰减,用于反演大气温度特征。两束微波信号分别被 7 通道并行湿度接收器和 7 通道并行温度接收器接收,即“多通道并行测量技术”。

RPG 微波辐射计根据接收到不同频率下的辐射信息,产生电压信号(0 级数据),由定标结果将电压数据转换为亮温数据(1 级数据)。根据亮温数据,利用当地多年探空资料正向模拟大气微波辐射,并结合 RPG 自带的红外仪和地面微型气象站,通过神经网络算法反演 0~10 km 的温度、湿度、液态水廓线、综合水汽含量(IWV,即单位面积上的整层水汽积分量)和液态水路径(LWP,即单位面积垂直气柱内积分的液态水含量)等 2 级数据。RPG 可以获得的数据产品见表 1,0~2 级数据均可以同时保存。

RPG 主要有 3 种扫描方式:

1) 天顶扫描:适合于在较低垂直分辨率情况下获取 0~10 km 对流层不同高度大气温度、湿度、液

态水和气态水等数据,2 min 左右形成 0~10 km 温、湿度廓线,1~2 s 可以完成 LWP 和 IWV 的采集。

表 1 RPG 的数据产品

Table 1 Data products of RPG microwave radiometer

0 级数据	1 级数据	2 级数据	其他数据
		边界层温度廓线	
		对流层温度廓线	地面气象参数
检测器	亮温	对流层湿度廓线	降水状况
电压数据	边界层亮温	液态水廓线	云底高度
	红外仪数据	液态水路径	对流稳定指数
		综合水汽含量	内务数据
		大气消光	

2) 边界层扫描:针对 0~1.2 km 大气边界层温度廓线,使用“边界层扫描模式”可以提高垂直分辨率和准确性。辐射计扫描天线在 5~90°之间进行仰角扫描,以便获取更多的相关信息,所利用的频率为 54.9~58.0 GHz。RPG 可在 2 min 左右完成对边界层温度的扫描并形成边界层温度廓线,能够清晰捕捉边界层逆温过程。

3) 全天空 2D 扫描:针对 IWV 和 LWP 数据,RPG 配有可 360°旋转的方位仪,同时扫描天线的仰角也可以在 0~90°移动,用户可以通过软件设置方位角和扫描天线仰角的起始、间隔和终止角度,可以获得大气不同高度、不同方位的 LWP 和 IWV 数据。

根据观测需要对软件进行设置,以上 3 种扫描方式可以交替进行,也可以单独使用某一种扫描方式。

2 RPG 地基微波辐射计反演产品评估

2.1 数据资料 and 评价方法

为了比较 RPG 反演大气温度、水汽密度和相对湿度的准确性,选取在天顶和边界层观测模式下反演数据与济南章丘站同时刻同高度探空数据进行对比。

章丘探空站每天两次施放探空球,时间为 07:15 和 19:15,使用的探空仪为 GTS1 型数字式探空仪。由于探空球上升至 10 km 高度需要大约 27 min,所以选取 07:15—07:42 和 19:15—19:42 微波辐射计温度、水汽密度和相对湿度数据平均值,与对应时间的探空数据对比。探空数据利用“L 波段(1 型)高空气象观测系统软件(V3.31)”转换为等 50 m 间隔数据。RPG 产品资料从地面至 10 km 内共有 93

层,考虑到不同高度资料的日常业务使用,选择二者的对比高度为 50 m、100 m、150 m、200 m、250 m、400 m、550 m、700 m、800 m、900 m、1 000 m、1 150 m、1 300 m、1 600 m、2 000 m、2 500 m、3 100 m、3 900 m、5 000 m、7 000 m 和 9 000 m,共 21 层。微波辐射计的数据均为反演数据,L 波段探空中温度(t)和相对湿度(RH)数据为实测数据,而水汽密度(ρ_v)是根据 t 和 RH 的计算数据^[12]。

为了表明仪器的日常维护对反演数据稳定性的影响,将对比时间分为 A、B、C 三个时段,其中 A 时段仪器安装于章丘市气象局,紧靠 L 波段探空站,仪器运行处于调试阶段,数据测量和保存正常,但是该时段内仪器运行较不稳定,出现过两次中断;B 时段仪器刚安装于山东省气象局院内“人影楼”顶,距离章丘探空站约 50 km,该时期为新更换了微波窗口且经过一系列调试基本运行稳定的时期;C 时段仪器位置同 B 时段,该时段为清洁微波窗口、进行液氮定标后,仪器稳定运行的时期。每个时段的时间和数据量见表 2,其中每个时段包含 21 个高度层、两种方式获得的温度、水汽密度和相对湿度数据。

表 2 对比时段和数据量

Table 2 Comparing periods and data quantities

时段	起止时间	数据量
A	2014 年 1 月 16 日—3 月 24 日	125 个时段、15 750 个数据
B	2014 年 8 月 22 日—10 月 7 日	91 个时段、11 466 个数据
C	2014 年 10 月 24 日—11 月 4 日	22 个时段、7 062 个数据

为了比较 RPG 地基微波辐射计反演数据的精度,计算了相同高度层上微波辐射计与探空仪获得的温度、水汽密度和相对湿度数据的平均误差(MB)和均方根误差(RMSE),MB 和 RMSE 计算公式如下:

$$MB = \frac{1}{n} \sum (X - Y) \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum (X - Y)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

(1)(2)两式中, X 为地基微波辐射计探测值, Y 为 L 波段探空值, n 为探测样本数。

由于地基微波辐射计在晴天、有云无雨和降水时的探测原理和反演方法不同,出现降水时的大气微波特征与雨滴的散射有关,因此要同时考虑雨滴谱特征,不能简单沿用有云无雨时的反演方法。在降水持续时间长或者降水量较大时,雨水附着在

RPG 微波窗口上,会影响天线的测量精度^[6,13-16],此时 RPG 反演数据会有失真现象,主要表现为反演数据不随时间和高度变化,直至降水减小、结束后,数据会恢复正常。因此在处理降水 RPG 数据时均将失真数据剔除,仅保留了 B、C 时段中 11 组降水较小时段且没有失真的数据。微波辐射计自带降

水传感器,对降水比较敏感,因此降水时间以微波辐射计观测为主。

2.2 同高度下产品对比

图 1 所示为 A、B、C 共 3 个时段无降水时 RPG 地基微波辐射计所测温度、水汽密度和相对湿度与章丘 L 波段探空同时刻同高度所测数据散点图。

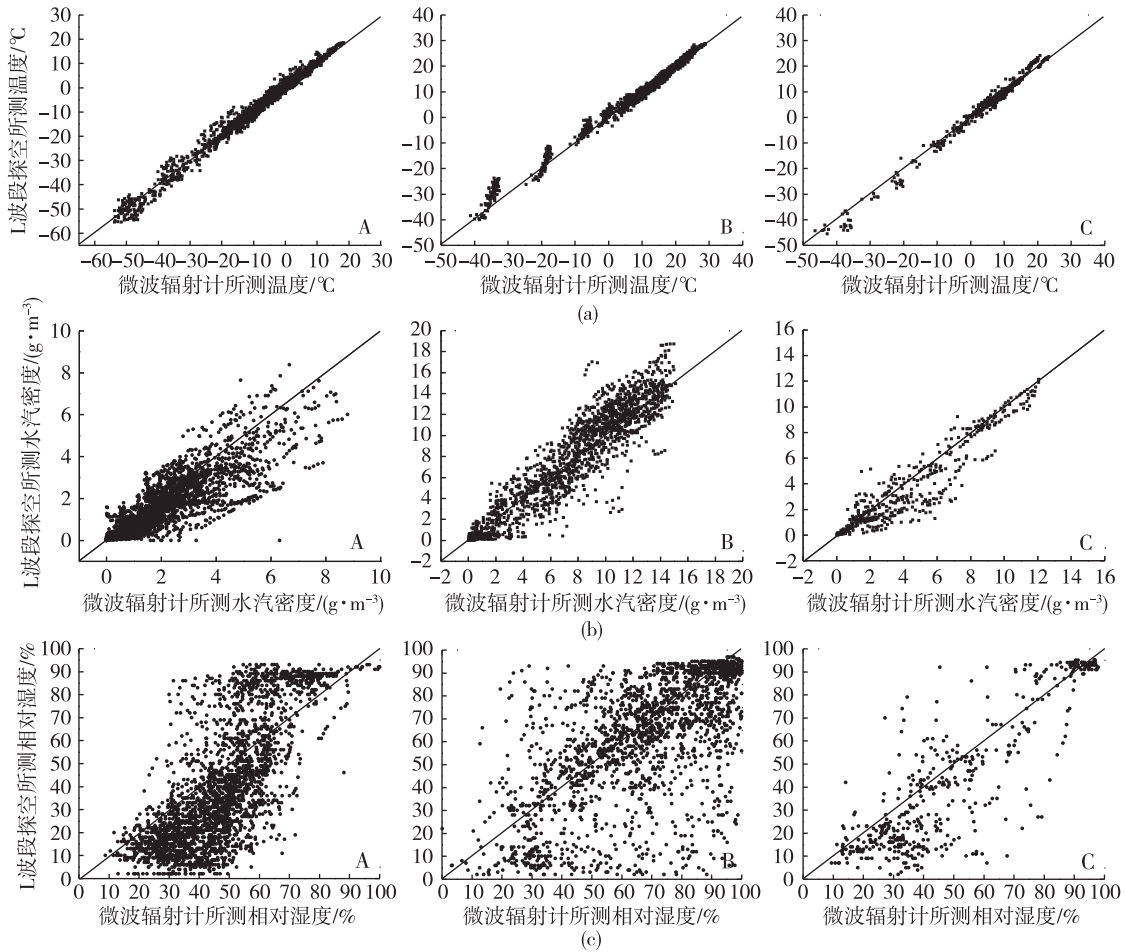


图 1 RPG 地基微波辐射计所测温度(a)、水汽密度(b)和相对湿度(c)与章丘 L 波段探空雷达比较

Fig.1 Temperature (a), water vapor density (b) and relative humidity (c) measured by RPG microwave radiometer and radiosonde in Zhangqiu station

由图 1a 可见,二者所测温度在 A 和 C 时段线性关系均较好,具有较高的一致性,相关系数均为 0.99,且通过了置信度为 0.001 的显著性水平检验。A 时段二者探测温度相对误差(微波辐射计测值和探空测值的差值与微波辐射计测值之比)为 11%,C 时段为-3%。B 时段散点图上看,线性关系较 A、C 时段差,特别是小于 0℃ 大部分数据分布在 Y=X 线以上,说明在大气高层温度小于 0℃ 时,RPG 反演温度较探空略低,而 B 时段所有温度数据的相对误差为 6%,说明整体来看在 B 时段 RPG 反演温度较高。

图 1b 所示水汽密度一致性与温度相比稍差,但总体趋势一致,A、B、C 三个时段的相关系数分别为 0.84、0.93 和 0.94;相对误差分别为 -42.44%、19.27%和-6.28%。

B、C 时段虽然微波辐射计距离探空站较远,但温度和水汽密度数据相关性和误差均较 A 时段好,说明仪器安装运行后的调试、更换微波窗口和液氮定标等维护工作,对提高探测准确性有一定促进作用。地基微波辐射计反演大气温度、水汽密度与常规探空资料比较有很好的相关性,国内不同地区的对比分析也得出相似结论^[13-14,17],这说明地基微波

辐射计可以弥补常规高空探测时空密度的不足,具有很好的应用价值。

从图 1c 可以看到,相对湿度数据质量明显不如前两者高,离散度较大,没有一定的相关性,大部分数据在 $Y=X$ 线以下,说明 RPG 反演相对湿度数据偏高,因此在日常应用 RPG 反演的相对湿度数据时,应与其他探测设备结合分析。

2.3 不同高度下产品对比

为了比较不同高度下 RPG 地基微波辐射计反

演数据的精度,由于 B、C 时段微波辐射计位于同一地址,选取这两个时期内无降水时 21 个高度层 RPG 和探空所测得温度、水汽密度和相对湿度,并计算平均误差和均方根误差,其中 07:15—07:42 数据代表白天,19:15—19:42 数据代表夜间。结果如图 2 所示。

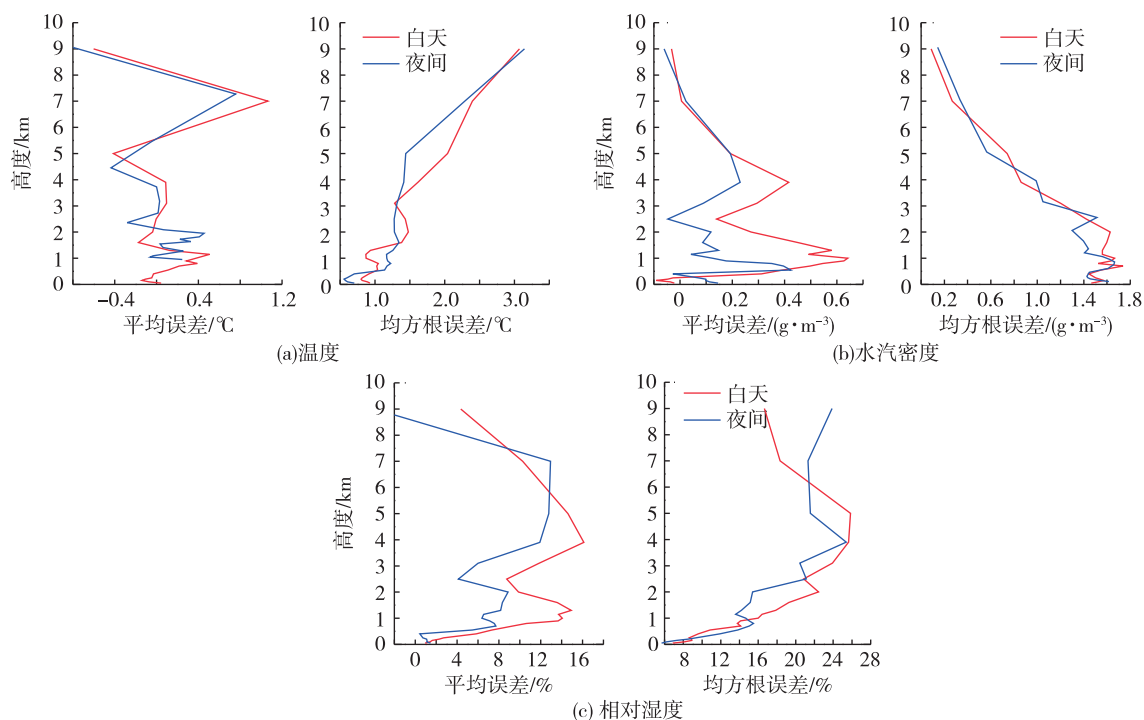


图 2 不同高度层温度(a)、水汽密度(b)和相对湿度(c)的平均误差和均方根误差

Fig.2 Comparison of mean errors and root-mean-square errors of temperature (a), water vapor density (b) and relative humidity (c) in different heights

由图 2a 可以看出,1 000 m 以下白天和夜间温度平均误差在 $-0.2 \sim 0.4$ °C 之间,即两种方式获得的温度在低层比较接近;1 500~5 000 m 白天平均误差在 $-0.4 \sim 0$ °C 之间,变化较小;夜间在 1 000~4 500 m 平均误差在 $-0.4 \sim 0.4$ °C 之间,波动较白天大;5 000 m 以上白天和夜间平均误差均较大,变化趋势为随高度增高,至 7 000 m 达到最大值后又随高度增加而减小。均方根误差白天和夜间均随高度增加而增大,与白天相比 3 000~7 000 m 夜间均方根误差较小。

图 2b 所示不同高度水汽密度的平均误差和均方根误差均为近地面较大,随高度而减小。5 000 m 以下平均误差数值变化较剧烈,且平均误差基本为

正值,说明 RPG 反演水汽密度数据偏大;白天较夜间波动大,特别在 1 000 m 左右,白天平均误差最大,达 0.7 g/m^3 。平均误差和均方根误差均随高度减小与大气高层水汽含量较低有关。此外,由于探空资料中并没有水汽测量值,在计算过程中也会带来一定的误差,使得仪器观测结果与探空水汽的差异变大。

与温度、水汽密度相比,图 2c 所示的相对湿度平均误差和均方根误差都明显较大,这反映出微波辐射计在反演相对湿度上准确性稍差。平均误差白天和夜间基本均为正值,说明微波辐射计反演相对湿度数据偏大,但是夜间平均误差数值比白天小,说明微波辐射计夜间反演相对湿度误差较小;

白天和夜间均在1 000 m、4 000 m 和7 000 m 比其他高度误差大。均方根误差白天为先增大后减小的趋势,夜间在4 000 m 以下随高度增加,至5 000 m 略有减小后又增加;白天和夜间均在4 000~5 000 m 左右达到最大值,6 000 m 以下夜间误差比白天小。

3 降水对反演产品的影响

与第 2.3 节相同,计算 B、C 时期内 11 个降水时段两种方式所测得不同高度下温度、水汽密度和相对湿度的平均误差、均方根误差,结果如图 3 所示。

温度、水汽密度和相对湿度的平均误差、均方根误差与图 2 所示的无降水时的数据变化趋势基本一致,但误差范围均有所增加,说明弱降水对 RPG 反演精度的准确性有一定影响。图 3a 所示温度的

平均误差在2 000 m 以下大于 0,变化较小,2 000 m 以上随高度增加而减小;均方根误差在 0.8~3.5 °C 之间,2 000 m 以下在 1 °C 附近波动,总体变化趋势随高度增加。图 3b 所示降水天气中不同高度水汽密度的平均误差和均方根误差与无降水时相似,为近地面较大,随高度而减小;3 000 m 以下,平均误差在 0.5~1.5 g/m³,说明 RPG 反演值偏大;均方根误差在 1~2.7 g/m³之间。相对湿度与无降水时的分析相比(图 3c),变化趋势一致,误差值均为先增大后减小,但是误差的绝对值明显偏大;平均误差在3 000 m 以下为正值,特别在1 000 m 附近最大,说明在此高度范围内 RPG 反演值偏大,均方根误差在1 000 m 以下数值在 10%附近波动,其他高度误差均较大。

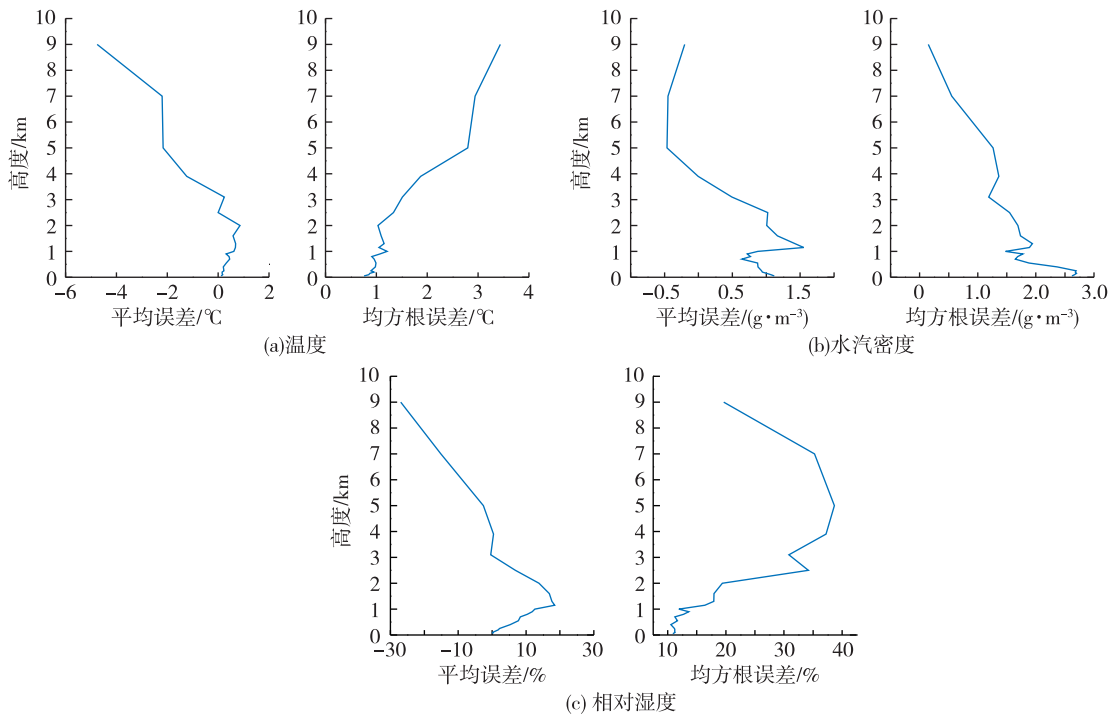


图 3 降水时不同高度层温度(a)、水汽密度(b)和相对湿度(c)的平均误差和均方根误差
Fig.3 Comparison of mean errors and root-mean-square errors of temperature (a), water vapor density (b) and relative humidity (c) in different heights on rainy days

4 结论

1)RPG 反演大气温度与常规探空资料有很好的相关性;反演的水汽密度相关性较好,仪器安装运行后的调试、清洁和更换微波窗口及液氮定标等维护工作,对水汽密度准确性的提高有促进作用;反演相对湿度数据离散度较高。

2)通过比较无降水时不同高度下 RPG 反演温度的平均误差和均方根误差可知,温度在1 000 m 以下低层准确性较好,平均误差和均方根误差均随高度增加而增大;水汽密度的平均误差和均方根误差均为近地面较大,随高度而减小,这与大气高层水汽含量较低有关;相对湿度的平均误差和均方根误差都明显较温度和水汽密度大,这反映出微波辐

射计在反演相对湿度上准确性稍差。

3)对11个降水时次内不同高度下温度、水汽密度和相对湿度的平均误差和均方根误差进行计算,结果表明其变化趋势均与无降水时相似,但是误差值明显偏大。温度在2 000 m以下误差较小,水汽密度在3 000 m以下反演值较探空测值大,相对湿度在降水天气下的平均误差和均方根误差同样明显较温度和水汽密度大。

参考文献:

- [1] 朱元竞,胡成达,甄进明,等.微波辐射计在人工影响天气研究中的应用[J].北京大学学报(自然科学版),1994,30(5):597-606.
- [2] 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[J].应用气象学报,2001,12(增刊):73-79.
- [3] 张建新,廖飞佳,王文新.中天山山区大气总水汽量和云液水量的遥感研究[J].中国沙漠,2003,23(5):565-568.
- [4] 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.地基微波辐射计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.
- [5] 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[J].干旱气象,2015,33(2):340-343.
- [6] 刘建忠,何晖,张蕾.不同时次地基微波辐射计反演产品评估[J].气象科技,2012,40(3):332-339.
- [7] 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.
- [8] 高金辉,贾利锋,顾学俊.利用地基微波辐射计探测降雨强度的方法研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),37(5):47-50.
- [9] 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[J].气象科技,2014,42(5):737-741.
- [10] Chan P W. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. Meteorol Z,2009,18(3):253-265.
- [11] 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.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,2014,40(2):216-222.
- [12] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003:19-22.
- [13] 刘建忠,张蕾.微波辐射计反演产品评价[J].气象科技,2010,38(3):325-331.
- [14] 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.
- [15] Ware R, Cimini D, Herzegh P, et al. Ground-based microwave radiometer measurements during precipitation [C]. 8th Specialst Meeting on Microwave Radiometry, 24-27 February, 2004, Rome, Italy.
- [16] 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.
- [17] 雷连发,卢建平,朱磊,等.多通道地基微波辐射计大气遥感[J].遥感学报,2014,18(1):180-191.