

骆梦洁, 汤杰, 陈叙捷, 等. 台风天气条件下地基微波辐射计反演产品精度分析[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(1): 101-110.
LUO Mengjie, TANG Jie, CHEN Xujie, et al. Accuracy analysis of ground-based microwave radiometer retrieval products under typhoon weather conditions[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(1): 101-110. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.01.011. (in Chinese)

台风天气条件下地基微波辐射计反演产品精度分析

骆梦洁¹, 汤杰², 陈叙捷³, 陈勇航¹, 赵兵科², 史文浩¹, 严嘉明², 刘统强¹, 林立旻², 陈泉¹
(1. 东华大学, 上海 201600; 2. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 3. 霞浦县气象局, 福建 霞浦 355100)

摘要: 利用中国气象局上海台风研究所台风试验获取的4个典型台风个例数据, 对地基微波辐射计反演的温度、水汽密度廓线与同址GPS探空资料得到的廓线进行对比分析, 发现二者的温度、水汽密度相关系数分别为0.988、0.928。微波辐射计的探测精度在不同高度上有很大差异, 整体来说, 在高层温度探测精度较优于低层, 而在低层水汽密度探测精度较优于高层。进一步研究表明, 探测水汽密度精度与降水强度存在显著的正相关, 而与风速及相对台风位置没有明显的关系。经计算, 21组水汽密度廓线均方根误差与对应时段降雨强度的相关系数为0.912。本研究量化地展示了微波辐射计在台风天气条件下对温度的探测精度相对比较高, 且对水汽密度的观测质量有一定的可靠性和可用性, 这一研究为今后将微波辐射计用于观测台风、锋面等强对流天气系统的大气温度湿度结构提供可靠性依据。

关键词: 微波辐射计; GPS探空; 台风; 温湿廓线

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)01-0101-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.01.011

Accuracy analysis of ground-based microwave radiometer retrieval products under typhoon weather conditions

LUO Mengjie¹, TANG Jie², CHEN Xujie³, CHEN Yonghang¹, ZHAO Bingke²,
SHI Wenhao¹, YAN Jiaming², LIU Tongqiang¹, LIN Limin², CHEN Quan¹

(1. Donghua University, Shanghai 201600, China; 2. Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 3. Xiapu Meteorological Bureau, Xiapu 355100, China)

Abstract In this paper, the temperature and water vapor density profiles retrieved by the ground-based microwave radiometer are compared with those obtained by GPS sounding data at the same site, using the data of 4 typical typhoon cases obtained by typhoon experiments of Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration. It is found the correlation coefficients of temperature and water vapor density are 0.988 and 0.928, respectively. The detection accuracy of the microwave radiometer varies greatly at different heights. On the whole, the detection accuracy of temperature in the upper layer is better than that in the lower layer, while the detection accuracy of water vapor density in the lower layer is better than that in the upper layer. Further research shows that the accuracy of detecting water vapor density is significantly positively correlated with precipitation intensity, but it has no obvious relationship

收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-12-20

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2018YFC1506303, 2018YFC1506305); 科技部重点研发计划国际合作专项(2017YFE0107700); 国家自然科学基金项目(41775065, 41475060, 41805088)

第一作者: 骆梦洁, 女, 硕士研究生, 主要从事大气遥感方向研究, 2202106@mail.dhu.edu.cn。

通信作者: 汤杰, 男, 博士, 研究员, 主要从事台风边界层结构和机理研究, tangj@typhoon.org.cn。

with wind speed or relative typhoon position. Through calculation, the correlation coefficient between the root mean square error of 21 sets of water vapor density profiles and the rainfall intensity in the corresponding period is 0.912. This study quantitatively shows the detection accuracy of temperature by the microwave radiometer under typhoon weather conditions is relatively high, and the observation quality of water vapor density has certain reliability and validity. This study will provide a reliable basis for application of ground-based microwave radiometer in the observation of atmospheric temperature and humidity structures of strong convective synoptic systems such as typhoons and fronts in the future.

Key words microwave radiometer; GPS sounding; typhoon; temperature and humidity profiles

引言

台风灾害主要由台风大风、台风暴雨和风暴潮造成^[1],破坏性强,出现频率高,是影响我国东部沿海地区最严重的气象灾害之一^[2-3],造成的财产损失和人员伤亡都是十分巨大的^[4]。因此,台风预警预报受到广泛关注^[5],而大气温湿垂直分布对了解台风演变过程和提高预报精度具有重要意义^[6-10]。相较于其他观测手段,微波辐射计具有操作简便、全自动实时无人值守观测、探测时间分辨率高等优点。

许多研究者开展了对微波辐射计的探测精度的研究。张秋晨等^[11]利用 RPG-HATPRO-G3 地基微波辐射计与 L 波段探空数据作对比,结果表明,微波辐射计反演的大气温度和水汽密度与探空资料均有较好的相关性。刘晓璐等^[12]用近三年无线电探空与微波辐射计数据,分析晴天和有云天气下温湿廓线及物理参量的精度。赵玲等^[13]采用 2008 年 6 月微波辐射计数据和同期探空数据进行对比分析,发现晴空无云天气下二者温湿廓线的相关系数分别为 0.994 和 0.697,都通过了置信度为 0.001 的显著性水平检验。方莎莎等^[14]将武汉地区大雾天气下微波辐射计反演的气温、相对湿度值与探空值进行对比,相关系数分别为 0.96 和 0.72。徐桂荣等^[15]研究发现,虽然 MP-3000 微波辐射计采用纳米天线罩和鼓风机装置使反演的大气温湿廓线在降水环境下达到合理的水平,但不能消除降水的影响,天线罩上的雨水使测得的亮温值升高,而亮温值的偏差又会影响到反演结果,且降水强度越大,误差就越大。

由上可知,微波辐射计在台风天气条件下的应用研究尚很缺乏。赵兵科等^[16]利用上海市气象局 2007 年 9 月进行的台风探测试验资料和地面常规观测资料,对多通道地基微波辐射计在 0713 号台风“韦帕”登陆前后的探测性能及特征进行了分析。

但还需更多台风个例的研究来加深对微波辐射计探测性能的认识,从而为提高反演算法和数据质量控制等环节的改进提供参考依据。本文利用中国气象局上海台风研究所获得的在台风“尼伯特”(1601)、“莫兰蒂”(1614)、“鲑鱼”(1617)、“莎莉嘉”(1621)影响期间微波辐射计和 GPS 探空原位探测的资料,以 GPS 探空资料为“真值”,对比分析台风天气条件下地基微波辐射计反演得到的温度、水汽密度廓线的精度。

1 数据与方法

1.1 微波辐射计数据

本文采用的微波辐射计型号为 MP-3000,是一种多通道地基微波辐射计,通道分为两种:水汽通道和氧气通道。水汽通道在 22~30 GHz 范围内,氧气通道在 51~59 GHz 范围内。微波辐射计根据大气对不同频率辐射吸收的差异,从而选择不同频率探测亮温的变化。微波辐射计 0 级数据包含接收探测器输出电压;1 级数据包含每个通道的实时亮温;2 级数据是反演产品,可提供不同高度上的大气温度、相对湿度、水汽密度、液态水密度、云底高度、水汽积分、液态水积分等多种大气参量,从而可获得 0~10 km 高度的热力学廓线。0~500 m 大气高度的分辨率为 50 m,此区间共 11 个高度层;500~2 000 m 高度的分辨率为 100 m,共 15 个高度层;2 000~10 000 m 高度的分辨率为 250 m,共 32 个高度层。微波辐射计 2~3 min 可获得具有 58 个高度层的温度、湿度、水汽密度、液态水密度廓线。值得说明的是,微波辐射计每 3~6 个月就需要进行一次标定,本文所涉微波辐射计在探测台风“尼伯特”前刚完成标定。

尽管 MP-3000 是一种多通道地基微波辐射计,但仍存在多种因素影响其探测精度^[17],比如外在因素有太阳辐射、电磁波等,内在因素有辐射计的系统误差以及反演算法的选取^[18]。在使用纳米材料

制作天线罩等方法以减小雨水效应的基础上,不少研究者通过改进反演算法获取更高精度的微波辐射计 2 级数据产品^[19-22]。

1.2 GPS 探空数据

GPS 探空气球每 2 s 采集一组数据,包含温度、湿度、高度、风速、风向等,每次采集时间约 1 h。本文采用的 GPS 探空资料共有 21 组,为方便起见,根据台风名称及登陆情况分别给 21 次探测试验编号

(例:编号 N-5 表示台风“尼伯特”登陆前约 5 h 进行的观测试验),详见表 1。

1.3 台风个例介绍

“尼伯特”“莫兰蒂”“鲇鱼”和“莎莉嘉”4 个台风个例信息见表 2。4 个台风最佳路径(来自中国气象局热带气旋资料中心)见图 1。探空释放点到台风中心距离及相对台风中心象限情况详见图 2。

表 1 21 组微波辐射计与 GPS 探空数据详情

Table 1 Details of 21 data sets from microwave radiometer and GPS sounding

台风名称	编号	登陆情况	微波辐射计观测时间	GPS 探空气球观测时间	探空释放点到台风中心距离/km (相对台风中心象限)
尼伯特	N-5	登陆前约 5 h	2016-07-09 00:50	2016-07-09 00:49	306.7(NNE)
	N-3	登陆前约 3 h	2016-07-09 02:56	2016-07-09 02:55	299.4(NNE)
	N	登陆前约 20 min	2016-07-09 05:26	2016-07-09 05:25	289.6(NNE)
	N+3	登陆后约 3 h	2016-07-09 08:17	2016-07-09 08:16	278.6(NNE)
	N+6	登陆后约 6 h	2016-07-09 11:41	2016-07-09 11:41	290.6(ENE)
莫兰蒂	M-13	登陆前约 13 h	2016-09-14 14:34	2016-09-14 14:35	113.0(NNW)
	M-4	登陆前约 4 h	2016-09-14 23:33	2016-09-14 23:34	121.9(ESE)
鲇鱼	Y-17	登陆前约 17 h	2016-09-27 11:15	2016-09-27 11:16	358.8(NNW)
	Y-15	登陆前约 15 h	2016-09-27 13:38	2016-09-27 13:39	350.8(NNE)
	Y-13	登陆前约 13 h	2016-09-27 15:17	2016-09-27 15:17	321.3(NNE)
	Y-11	登陆前约 11 h	2016-09-27 17:10	2016-09-27 17:10	296.5(NNE)
	Y-9	登陆前约 9 h	2016-09-27 20:06	2016-09-27 20:06	265.1(NNE)
	Y-5	登陆前约 5 h	2016-09-27 23:19	2016-09-27 23:19	276.6(NNE)
	Y-3	登陆前约 3 h	2016-09-28 01:53	2016-09-28 01:54	364.8(ENE)
莎莉嘉	S-23	登陆前约 23 h	2016-10-17 11:17	2016-10-17 11:16	256.2(WNW)
	S-21	登陆前约 21 h	2016-10-17 12:24	2016-10-17 12:24	243.1(WNW)
	S-20	登陆前约 20 h	2016-10-17 13:34	2016-10-17 13:34	219.7(WNW)
	S-16	登陆前约 16 h	2016-10-17 17:25	2016-10-17 17:24	154.3(WNW)
	S-13	登陆前约 13 h	2016-10-17 20:44	2016-10-17 20:43	119.0(WNW)
	S-10	登陆前约 10 h	2016-10-17 23:47	2016-10-17 23:48	74.6(WSW)
	S-7	登陆前约 7 h	2016-10-18 02:27	2016-10-18 02:28	19.7(WSW)

注:探空气球释放点到台风中心的距离及相对位置如图 2 所示。

表 2 4 个台风个例信息

Table 2 Information of 4 typhoon cases

中文名	英文名	登陆次数	登陆次序	登陆省份	登陆时强度等级
尼伯特	Nepartak	2	1	台湾	超强台风
			2	福建	热带风暴
莫兰蒂	Meranti	1	1	福建	超强台风
鲇鱼	Megi	2	1	台湾	强台风
			2	福建	台风
莎莉嘉	Sarika	2	1	海南	台风
			2	广西	热带风暴

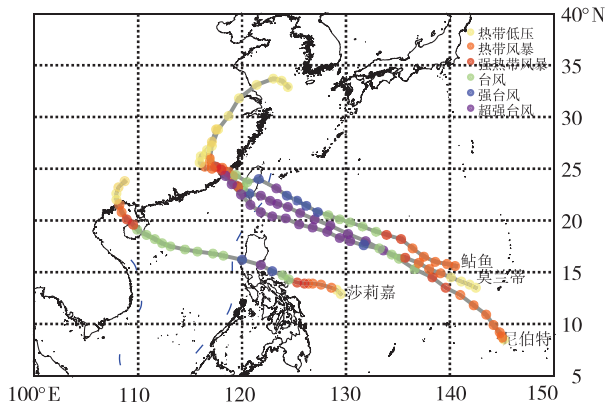


图1 “尼伯特”“莫兰蒂”“鲑鱼”“莎莉嘉”4个台风的最佳路径和强度分布

Fig.1 Best tracks and intensities of Typhoon Nepartak, Meranti, Megi, and Sarika

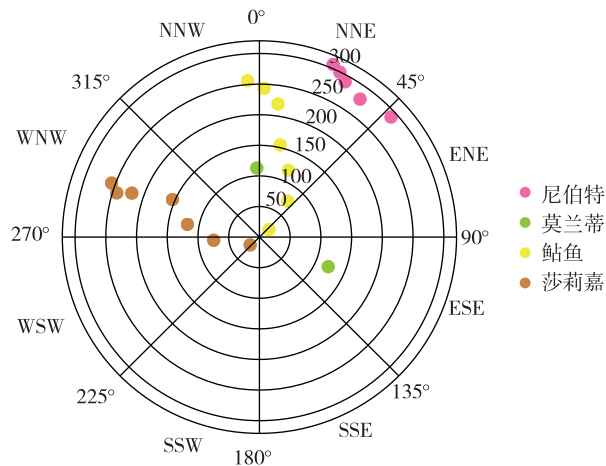


图2 探空气球释放点到台风中心的距离及相对位置(同心圆圆心处为台风中心位置,同心圆每圈间隔50 km)

Fig.2 Distance and relative position from the release point of sounding balloon to the typhoon center (the center of concentric circle is the typhoon center; concentric circles are spaced 50 km apart)

1.4 数据处理

对比微波辐射计与GPS探空资料发现,微波辐射计2~3 min即可得到一条热力学廓线,而GPS探空大概需要30 min,因此廓线对比次数取决于探空气球的释放次数。空间上,探空资料的探测高度并不能与微波辐射计的58个高度层一一对应,因此线性插值得到与之对应的58个高度层及其相应的温度、湿度和风速。时间上,探空资料所取的垂直距离范围已经有对应的探测时间,取相应微波辐射计开始到结束的时间做平均,得到这段时间内的平均热力学廓线。如此下来,得到21组数据(表1)进行

温度、水汽密度廓线的对比分析,探空资料的水汽密度由下列公式算出^[23]。

$$e = 6.1078 \times U \times \exp\left[17.13 \times \frac{T - 273.16}{T - 38}\right] \quad (1)$$

$$\rho = \frac{e \times 216.72474}{T} \quad (2)$$

式中, e 代表水汽压,单位:hPa; U 代表相对湿度,单位:%; T 代表温度,单位:K; ρ 代表水汽密度,单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2 温度廓线精度评估

2.1 温度廓线整体评估

图3分别给出了台风“尼伯特”“莫兰蒂”“鲑鱼”和“莎莉嘉”登陆期间的微波辐射计与GPS探空资料的温度廓线对比图,每一组都标注了这段时间内温度的平均偏差(Bias)、均方根误差(root mean square error, RMSE)以及线性相关系数(R)。计算公式如下:

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中, x_i 表示微波辐射计所测温度, y_i 表示GPS探空所测温度, \bar{x} 表示微波辐射计此时间段所测温度的平均值, \bar{y} 表示GPS探空此时间段所测温度的平均值。

由图3这21组数据来看,微波辐射计与GPS探空资料的温度廓线重合度高,相关性非常好,这与翟晴飞等^[24]、韩珏靖等^[25]研究的结果类似。其中,有8组数据的相关系数达到了0.999,占比38%,台风“尼伯特”个例占4组,其整体温度廓线的相关性是最好的。总体来说,21组数据中有18组的相关性达到了0.990以上,只有3组未达到,相关系数分别为0.893、0.968和0.982。而相关性较差的3组有两种趋势,Y-5和S-13趋势一致,0~2 km偏冷,2~10 km偏暖,另一种趋势是Y-13,与上一种走向唯一不同的是0~2 km段中0~1 km段偏暖,CHAN^[26]的研究结果也表明微波辐射计的温度在边界层存在暖偏差,1~2 km段才偏冷。除去相关性差的这几组数据,大部分GPS探空在高层的所测温

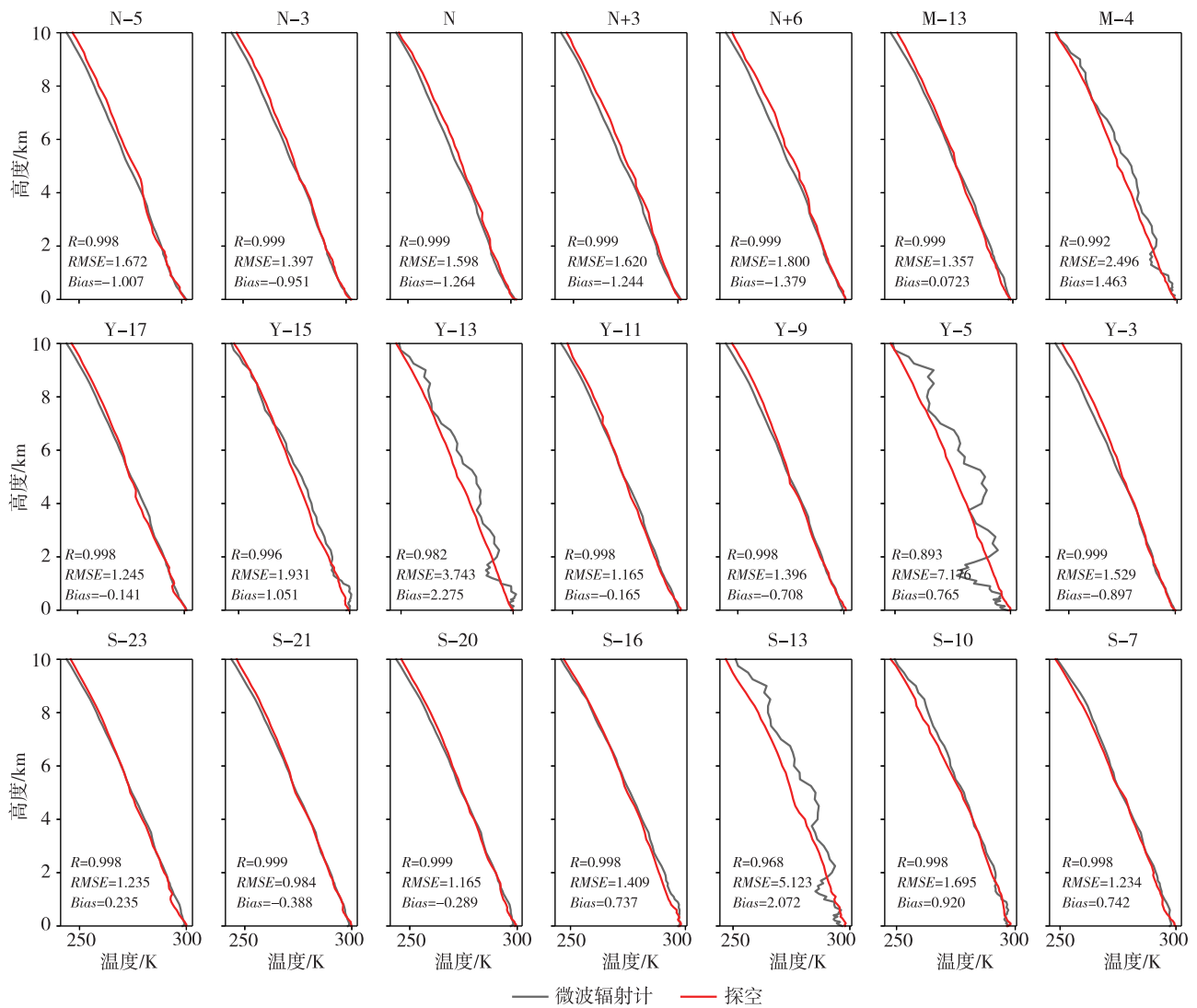


图 3 台风“尼伯特”“莫兰蒂”“鲑鱼”“莎莉嘉”影响期间微波辐射计与探空温度廓线对比

Fig.3 Comparison of temperature profiles between microwave radiometer and GPS sounding during the influence period of Typhoon Nepartak, Meranti, Megi, and Sarika

度值高于微波辐射计,这是因为在晴朗和多云天气条件下,探空仪在高空会接触到更强烈的太阳能^[27]。误差较大的几组数据,比如 Y-13、Y-5、S-15,除去低层高度,其余高度微波辐射计所测温度都比探空高。而 Y-13、Y-5、S-15 三段平均降雨强度分别为 21.26、27.13、13.00 mm · h⁻¹,是 21 个时间段内最强的三段降水,所以可能是降水导致微波辐射计所测温度偏高,这与张文刚等^[28]的研究结果一致。

再将 4 个台风个例的温度数据放在一起比较,绘制成散点图(图 4)。该图中散点的大小表示该数据点距离地面的高低,散点越大,测量的数据距地面越高,即可观察偏离 $y=x$ 理想直线的散点集中在哪个高度层。通过计算,整体的相关系数达到了

0.988,均方根误差为 2.527。划定 $y = 0.99x$ 和 $y = 100/99x$ 两条关于 $y=x$ 对称的直线,计算得出这两条直线包含的散点个数占总体的 82.9%。这些数据都表明在台风影响期间微波辐射计测量温度精度较高。

2.2 温度廓线不同高度层评估

为了揭示不同高度层下微波辐射计在台风天气条件下所测温度的精度,本文将 0~10 km 的高度分为四个高度层:0~1 km 为边界层,1~3 km 为低对流层,3~6 km 为中对流层,6~10 km 为高对流层。将 4 个台风个例微波辐射计与 GPS 探空在对应高度的数据匹配出来,分别计算每个台风个例中不同高度层微波辐射计与 GPS 探空资料所测温度的标准差、均方根误差以及相关系数,计算得到标

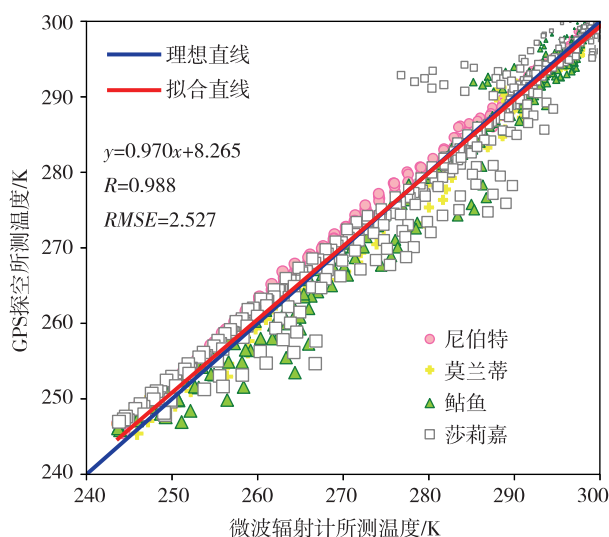


图4 台风天气条件下微波辐射计所测温度与GPS探空所测温度的散点图及线性拟合

Fig.4 Scatter diagram and linear fitting of temperature measured by microwave radiometer and GPS sounding under typhoon weather conditions

准化数据,绘制标准泰勒图(图5)。标准化的标准差为微波辐射计所算标准差与探空资料所算标准差的比值,同理,标准化的均方根误差为微波辐射计所算均方根误差与探空资料所算标准差的比值,而相关系数不做改变。为方便起见,本节和3.2节部分,标准化后的标准差叫归一化标准差,标准化后的均方根误差仍叫均方根误差。图5中,与坐标(0,0)的距离代表归一化标准差的大小,与坐标(0,1)的距离代表均方根误差的大小。所有归一化标准差值均在0.5~1.5之间,总体来说,微波辐射计探测效果较好。直观上看,“尼伯特”的误差最小,而台风“鲑鱼”影响期间较其他三个台风过程误差较大,经计算,归一化标准差最大达到1.3484,相关系数最低为0.3384,均方根误差最大为1.3351。而对于四个高度层的分析来说,高度层4(高对流层)归一化标准差整体最接近1,均方根误差也最小。最大均方根误差在高度层2(中对流层),发生在台风“鲑鱼”影响期间。每个台风影响期间的最大均方根误差都发生在高度层1或者2,最小均方根误差都发生在高度层4,且3~6 km、6~10 km两个高度层的相关系数都在0.8~1.0之间,对高度层3和高度层4的温度来说,微波辐射计与探空的温度相关性更好,说明高层温度偏差比低层温度偏差相对较小,与CANDLISH et al.^[29]的研究结果类似,与刘红燕^[30]、姚作新等^[31]、CIMINI et al.^[32]的研究结果相反,这通常受到下垫面性质的影响^[29]。

SÁNCHEZ et al.^[8]也指出微波辐射计的垂直分辨率从低层到高层为50~500 m,温湿廓线反演精度是由高到低。

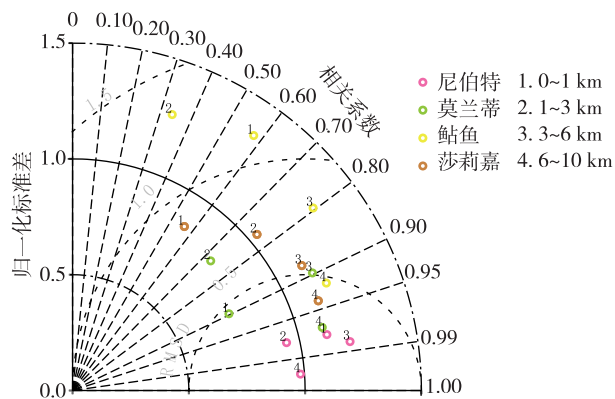


图5 微波辐射计在0~1 km、1~3 km、3~6 km、6~10 km四个高度层的温度与GPS探空温度的相关系数、均方根误差和归一化标准差分布泰勒图

Fig.5 Taylor diagram of correlation coefficient, root mean square error, and normalized standard deviation between GPS sounding temperature and temperature by microwave radiometer at 4 altitude layers of 0-1 km, 1-3 km, 3-6 km, and 6-10 km

3 水汽密度廓线精度评估

3.1 水汽密度廓线整体评估

图6给出了21组台风登陆期间的微波辐射计与GPS探空资料的水汽密度廓线对比图,可以看出两者偏差。同样时间点的测量,由温度换成水汽,变化的趋势较为一致,但水汽密度廓线的误差较温度大,这与白婷等^[33]、MADHULATHA et al.^[34]的研究结果类似。相关系数大于0.99的有15组,占比71.4%,台风“尼伯特”5组数据都达到了0.99,是误差最小的一个台风个例。而M-4、Y-15、Y-13、Y-5、S-13这几组的相关性较差,误差较大,且这几组数据从上到下都偏湿;温度和水汽密度的绝对偏差相差较小,但水汽密度的相对偏差较温度大。最差的是Y-5,相关性只有0.58,均方根误差达到了10.294。GPS探空数据没有给出水汽密度值,只能根据借助温度和相对湿度两个物理量结合公式(1)和公式(2)算出。

图7是微波辐射计所测水汽密度与GPS探空所测水汽密度的散点图,相关系数为0.928,由图看出,部分处于较高高度层处测量的点较为离散。划定 $y=0.99x$ 和 $y=100/99x$ 两条关于 $y=x$ 对称的直线,这两条直线包含的散点个数只占总体的5.41%,很显然微波辐射计所测水汽密度精度没有

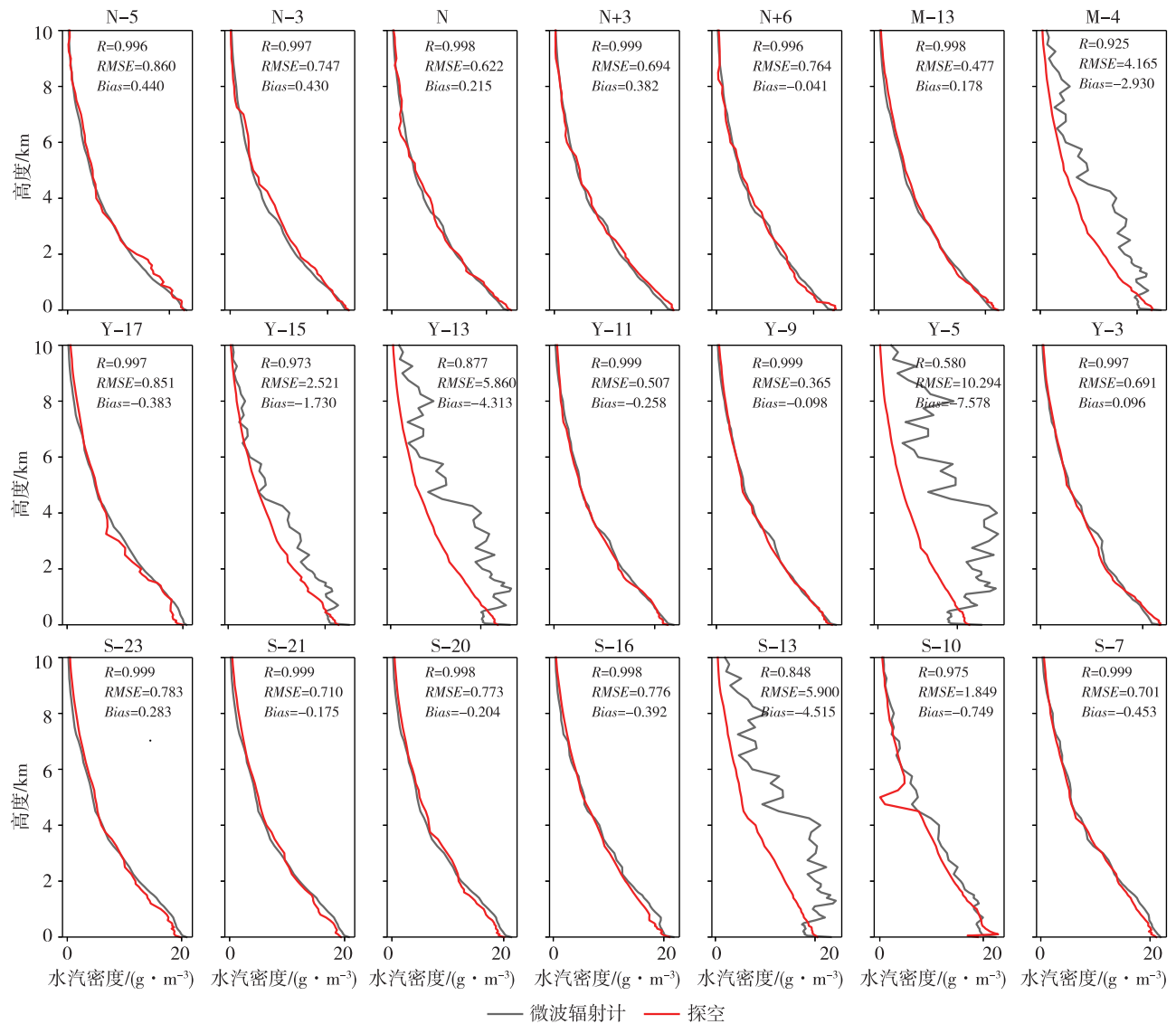


图 6 台风“尼伯特”“莫兰蒂”“鲇鱼”“莎莉嘉”影响期间微波辐射计与探空水汽密度廓线对比

Fig.6 The same as Fig.3, but for water vapor density profiles

温度效果好。将两条对称直线的范围再扩大,改为 $y=0.9x$ 和 $y=10/9x$,通过计算,这两条直线包含的散点个数占总体的 57.4%。

3.2 水汽密度廓线不同高度层评估

图 8 是标准泰勒图,体现 4 个台风个例在不同高度上水汽密度廓线的误差分布。经计算,在高度层 4(高对流层)处微波辐射计和 GPS 探空得到的水汽密度相关性低,为 0.464;高度层 2(低对流层)的水汽密度相关性高,为 0.682;说明水汽密度在低层的拟合度高于高层,这与刘晓璐等^[12]的研究结果“水汽密度的相关系数整体随高度升高而减小”类似。误差最大的发生在高度层 4,这与侯叶叶等^[35]的研究结果有出入。而 4 个台风个例中,仍然是台风“尼伯特”影响期间各组的三项指标都优于其他

组。误差最大的一个组发生在台风“鲇鱼”影响期间,相关系数、归一化标准差以及均方根误差分别为 0.351、3.61、3.755,而三项最好的分别是 0.957、0.939、0.343,相差甚远。

3.3 水汽密度误差因子分析

为了研究影响台风环境中微波辐射计数据质量的误差因子,基于现有数据,引入降水、风速、台风中心相对观测点距离三个误差因子分析。

图 9 为 2016 年 4 个台风影响期间微波辐射计与 GPS 探空气球释放期间降雨强度的时间序列图,降雨强度由雨滴谱原始数据计算得出。图中有 21 条垂直虚线,对应时间分别为该组的探空气球释放时间,研究时间范围为 0.5 h 左右。由图 9 可看出,上述着重分析过的相关性较差且误差稍大的 Y-13、

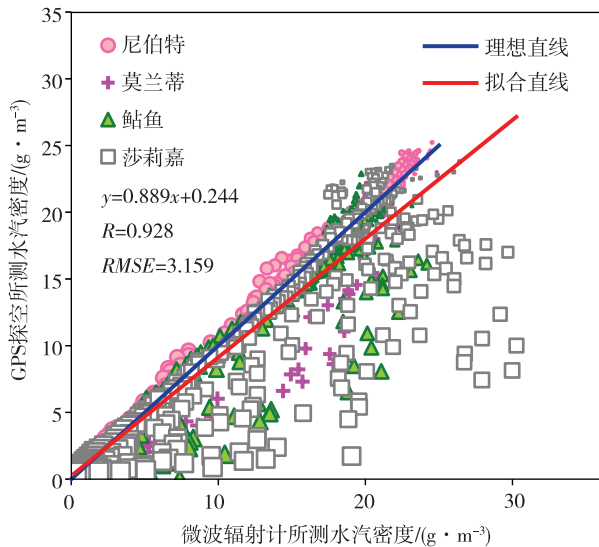


图7 微波辐射计与GPS探空所测水汽密度的线性拟合

Fig.7 Linear fitting of water vapor density measured by microwave radiometer and GPS sounding

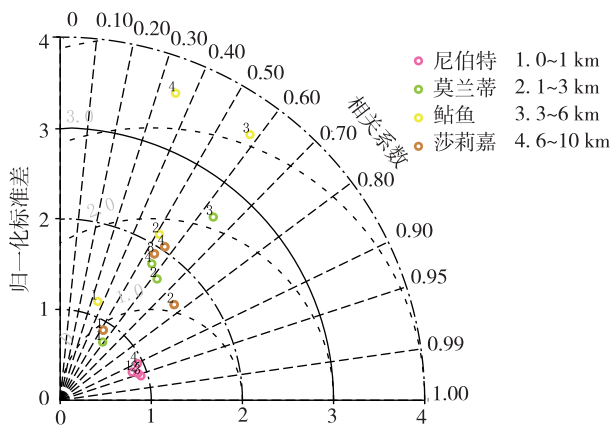


图8 微波辐射计在0~1 km、1~3 km、3~6 km、6~10 km四个高度层的水汽密度与GPS探空水汽密度的相关系数、均方根误差和归一化标准差分布泰勒图

Fig.8 The same as Fig.5, but for water vapor density

Y-5、S-13恰好是降水量大的时间段,说明降水对微波辐射计探测精度有较大影响,这与刘建忠和张菁^[36]“在有强对流云出现时,会对微波辐射计反演产品的使用造成影响”的研究结果类似。

图10为每组平均降雨强度与平均偏差及均方根误差的散点图(图略),体现降雨强度与误差的关系。总体来说,降水时的误差明显比非降水时大。无降水时,水汽密度均方根误差和平均偏差接近0,而当降雨强度最大为 $27.13 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,水汽密度均方根误差达到10.29,平均误差达到-7.578,这与张文刚等^[37]在对比分析微波辐射计资料与探空数

据时发现降水时相关性差的结果类似。由图可知,整体来说,每组的均方根误差和平均偏差有随着降雨强度的增大而增大的趋势,计算得到21组水汽密度均方根误差与降水强度的相关系数为0.912,平均误差与降水强度的相关系数为-0.908,较好地体现了降水强度对微波辐射计探测精度的影响。同时,做了每组最大风速及观测点与台风中心距离分别与平均偏差及均方根误差的散点图(图略),未能体现出相关性。

4 结论与讨论

基于中国气象局上海台风研究所台风试验所收集到的4个典型台风个例数据,对微波辐射计所获取的温度和水汽廓线与同址GPS探空资料进行对比,并获得如下初步结论。

(1)在台风天气条件下,微波辐射计的温度、水汽密度廓线反演资料与GPS探空资料所得结果有较好的正相关性;二者温度的总体相关系数为0.988,均方根误差为2.527;二者水汽密度的总体相关系数为0.928,均方根误差为3.159。温度廓线比水汽密度廓线具有更好的相关性,微波辐射计对温度和湿度的观测均存在误差。台风天气条件下,微波辐射计探测温度的结果具有可信度。

(2)微波辐射计在不同高度上的探测质量差异较大,高层温度偏差比低层温度偏差相对较小,而水汽密度整体来说低层的探测精度要优于高层。

(3)研究影响水汽密度探测精度的三个误差因子(降水、风速、观测点与台风中心距离),降水强度与误差大小有明显的正相关性。整体上,降雨强度越大,均方根误差越大,二者的相关系数达到0.912。风速和观测点与台风中心距离和误差大小并无特别的规律。

(4)探究的4个个例中,台风“尼伯特”影响期间微波辐射计探测的温度、水汽密度精度是最好的,因为对其进行探测的时候少雨、天气比较干燥,且刚刚进行过校准。

参考文献:

- [1] 陈联寿,许映龙.中国台风特大暴雨综述[J].气象与环境科学,2017,40(1):3-10.
- [2] 巩在武,胡丽.台风灾害评估中的影响因子分析[J].自然灾害学报,2015,24(1):203-213.
- [3] SCHMIDT S, KEMFERT C, HÖPPE P. The impact of socio-economics and climate change on tropical cyclone

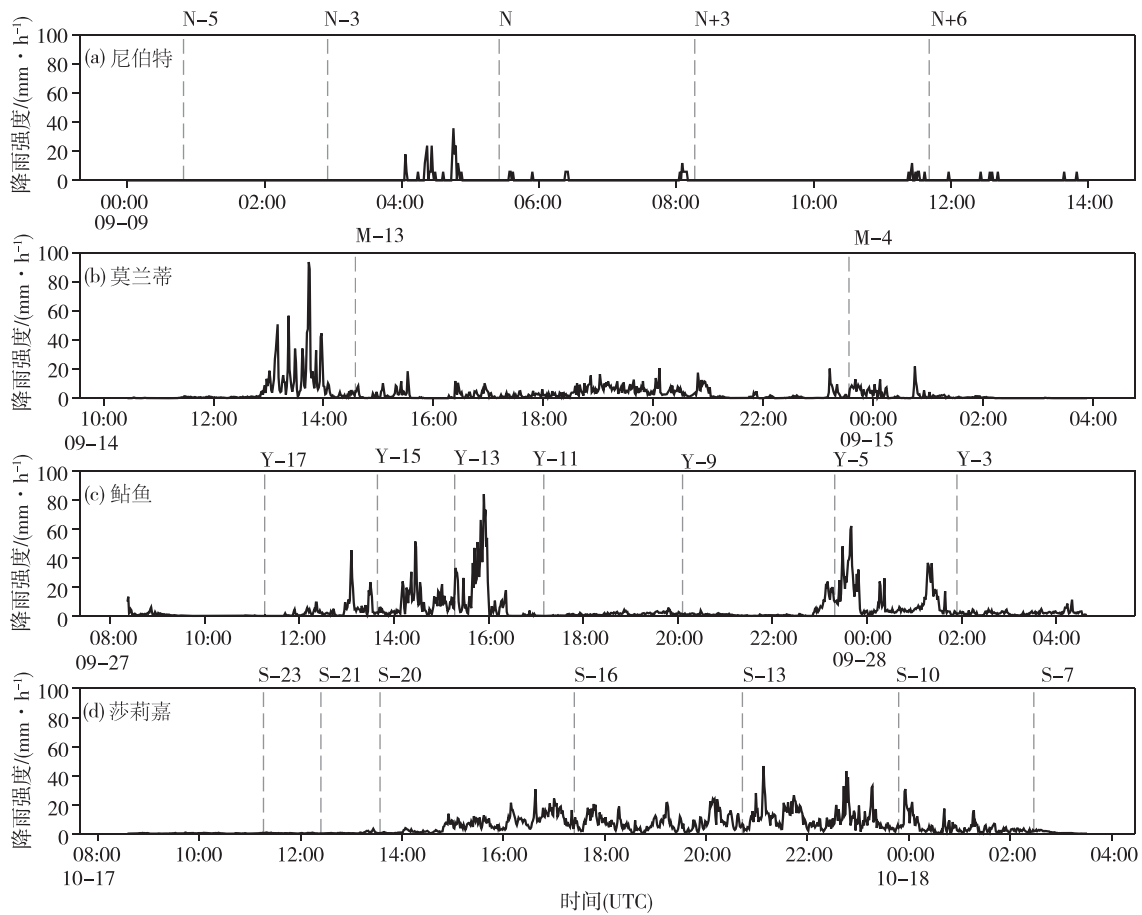


图 9 4 个台风(a.尼伯特,b.莫兰蒂,c.鲑鱼,d.莎莉嘉)影响期间降雨强度的时间序列图

Fig.9 Time series diagram of rainfall intensity during the influence period of 4 typhoons (a. Nepartak, b. Meranti, c. Megi, d. Sarika)

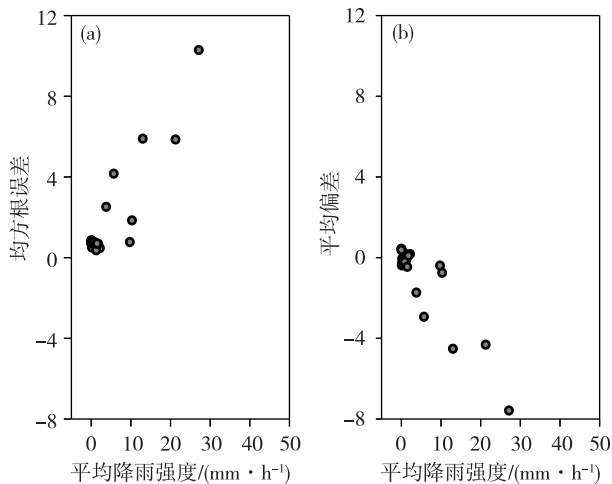


图 10 21 组水汽密度均方根误差(a)和平均偏差(b)与平均降雨强度的变化

Fig.10 Variation of root mean square deviation (a) and average deviation (b) of water vapor density with mean rainfall intensity in each data set

losses in the USA [J]. Reg Environ Change, 2010, 10(1) :13-26.

- [4] 任福民,向纯怡.登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望[J].海洋气象学报,2017,37(4) :8-18.
- [5] 王晴,钱传海,张玲.2017 年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,2018,38(2) :1-11.
- [6] HAN Y, WESTWATER E R. Remote sensing of tropospheric water vapor and cloud liquid water by integrated ground-based sensors [J]. J Atmos Oceanic Technol,1995,12(5) :1050-1059.
- [7] 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.
- [8] SÁNCHEZ J L, POSADA R, GARCÍA-ORTEGA E, et al. A method to improve the accuracy of continuous measuring of vertical profiles of temperature and water vapor density by means of a ground-based microwave radiometer[J].Atmos Res,2013,122:43-54.
- [9] TAN H B, MAO J T, CHEN H H, et al. A study of a retrieval method for temperature and humidity profiles from microwave radiometer observations based on

- principal component analysis and stepwise regression[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2011, 28(3):378-389.
- [10] KNUPP K R, COLEMAN T, PHILLIPS D, et al. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26(6):1057-1073.
- [11] 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.
- [12] 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[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(6):731-744.
- [13] 赵玲, 马玉芬, 张广兴, 等. 地基 35 通道微波辐射计观测资料的初步分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2010, 4(1):56-58.
- [14] 方莎莎, 陆鹏程, 廖可文, 等. 基于微波辐射计资料对武汉市冬季典型大雾个例的探测分析[J]. *气象与环境科学*, 2020, 43(4):81-87.
- [15] 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.
- [16] 赵兵科, 邵德民, 鲁小琴, 等. 多通道地基微波辐射计在 0713 号“韦帕”台风登陆前后探测性能及特征分析[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(9):1001-1008.
- [17] 何玲. 地基微波辐射计的倾斜曲线定标方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
- [18] 吴昌哲, 胡剑秋, 李清华. 微波辐射计 MP3000A 反演误差分析[J]. *自动化应用*, 2019(5):57-58.
- [19] 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.
- [20] 樊旭, 吴肖燕, 曲宗希, 等. 地基微波辐射计反演温/湿度廓线的 BP 神经网络训练方案对比[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5):587-596.
- [21] 张天虎, 鲍艳松, 钱芝颖, 等. 基于 BP 神经网络与遗传算法反演大气温湿廓线[J]. *热带气象学报*, 2020, 36(1):97-107.
- [22] 张雪芬, 王志诚, 茆佳佳, 等. 微波辐射计温湿廓线反演方法改进试验[J]. *应用气象学报*, 2020, 31(4):385-396.
- [23] 盛裴轩, 毛节秦, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 2 版. 北京:北京大学出版社, 2013:19-22.
- [24] 翟晴飞, 张晋广, 王斌飞, 等. 微波辐射计反演大气温湿度廓线与降水相关性分析[J]. *气象与环境学报*, 2020, 36(6):98-107.
- [25] 韩珏靖, 陈飞, 张臻, 等. 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*, 2015, 41(2):226-233.
- [26] CHAN P W. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. *Meteor Z*, 2009, 18(3):253-265.
- [27] XU G R, XI B K, ZHANG W G, et al. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2015, 120(19):10313-10323.
- [28] 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.
- [29] CANDLISH L M, RADDATZ R L, ASPLIN M G, et al. Atmospheric temperature and absolute humidity profiles over the Beaufort Sea and Amundsen Gulf from a microwave radiometer[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2012, 29(9):1182-1201.
- [30] 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.
- [31] 姚作新, 吕鸣, 贺晓东, 等. MP-3000A 型地基微波辐射计在乌鲁木齐探空站的辅助性探测研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2011, 5(1):38-43.
- [32] CIMINI D, HEWISON T J, MARTIN L, et al. Temperature and humidity profile retrievals from ground-based microwave radiometers during TUC[J]. *Meteor Z*, 2006, 15(1):45-56.
- [33] 白婷, 刘艳华, 杨敏. 微波辐射计观测同降水相关性的研究[J]. *气象与环境科学*, 2019, 42(4):111-118.
- [34] MADHULATHA A, RAJEEVAN M, RATNAM M V, et al. Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations[J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(1):1-13.
- [35] 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.
- [36] 刘建忠, 张蔷. 微波辐射计反演产品评价[J]. *气象科技*, 2010, 38(3):325-331.
- [37] 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.