

# 地基微波辐射计探测质量综合分析

傅新姝<sup>1</sup> 彭杰<sup>1</sup> 王晓峰<sup>1</sup> 张燕燕<sup>2</sup> 陈哲<sup>2</sup> 吴峻石<sup>2</sup>

薛昊<sup>3</sup> 陈浩君<sup>3</sup>

(1. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200000;

2. 上海市宝山区气象局, 上海 200000;

3. 上海市气象信息与技术支持中心, 上海 200000)

**摘要:** 利用上海宝山站地基微波辐射计亮温数据和探空资料(2018.07-2019.07), 评估微波辐射计的探测质量, 并讨论定标、天线罩性能等对探测质量的影响。结果表明: 晴空条件下, 微波辐射计实测亮温与模拟亮温一致性高, 所有通道相关系数均超过 0.96, 均方根误差 0.15~2.68K, 其中氧气通道的探测准确性高于水汽通道。各通道偏差主要包括随机偏差、系统性偏差和季节性偏差三类, 液氮定标能明显减少大部分水汽通道的系统性偏差, 但对氧气通道的影响相对较小。更换新型材质天线罩有助于明显降低降水天气各通道的亮温偏差, 明显缩短受降水影响后的亮温恢复时长, 效果维持 4 个月左右。

**关键词:** 地基微波辐射计; 亮温; 评估; 定标

## Comprehensive analysis on accuracy of ground-based microwave radiometer measurements

Fu Xinshu<sup>1</sup> Peng Jie<sup>1</sup> Wang Xiaofeng<sup>1</sup> Zhang Yanyan<sup>2</sup> Chen Zhe<sup>2</sup> Wu Junshi<sup>2</sup> Xue Hao<sup>3</sup>

Chen Haojun<sup>3</sup>

(1. Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200000;

2. Shanghai Baoshan Meteorological Service, Shanghai 201901;

3. Shanghai Meteorological Information and Technological Support Center, Shanghai 200000)

**Abstract:** The accuracy of MWR measurements obtained at Baoshan Station of Shanghai from July 2018 to July 2019 are evaluated by comparing brightness temperature of MWR against those calculated from radiosonde soundings at the same site with radiative transfer model. Beyond that, the performances of the MWR calibration techniques and the effects of radome replacement are estimated. Results show that the observed brightness temperature from MWR agrees well with the simulated ones from radiosonde soundings in clear-sky conditions. The correlation coefficients between two datasets are over 0.96 in all channels, with root mean square errors 0.15-2.68 K. The performances of the V band channels are better than those of K

band channels. Moreover, the features of brightness temperature bias vary with channels, including random deviations, systematic biases and biases with significant seasonal variations. The LN2 calibration could significantly reduce the systematic drifts in most of K-band channels. But the brightness temperature from V-band channels do not change obviously after LN2 calibration. By replacing the radome periodically, brightness temperature biases in rainy conditions might be reduced significantly. And the recovery time of brightness temperature in rainy conditions might also be shortened. Results also indicate that the radome made of new material used in this study is more efficient than the original one in reducing the negative impacts of precipitation in MWR accuracy. It works for about 4 months.

**Keywords:** ground-based microwave radiometer; brightness temperature; evaluation; calibration

资助项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1501902); 上海市青年科技英才扬帆计划 (20YF1443400); 国家自然科学基金项目 (41905007); 国家重点研发计划 (2017YFC1501701)

作者简介: 傅新姝, 主要从事城市观测资料质量控制与综合应用研究. E-mail: fxshu366@163.com

通信作者: 彭杰, 主要从事城市观测资料质量分析与综合应用研究. E-mail: pjay163@163.com

## 引言

地基微波辐射计能够 24 小时持续观测、获得分钟级的温湿度廓线, 是对常规探空的有益补充, 在高影响天气过程监测及研究、人工影响天气、数值预报等方面有重要的应用价值 (Cimini et al, 2014; Jiang et al, 2018; Madhulatha et al, 2013; Matrosov and Turner, 2018; Caumont et al, 2016; 李金辉等, 2022; 丁虹鑫等, 2018; 刘思波等, 2015; 黄治勇等, 2014)。但是, 受仪器自身及周围环境等多种因素的影响, 地基微波辐射计资料的质量不稳定 (Xu et al, 2015; 李青等, 2014; 王振会等, 2014a), 极大地限制了其在业务科研工作中的应用。对微波辐射计加强维护, 并针对其探测资料开展系统质量评估与质量控制 (傅新姝和谈建国, 2017; 刘红燕, 2011; 马丽娜等, 2018), 提高资料的可用性, 是提高其应用能力的关键环节。

国内外学者对微波辐射计探测资料的精度、偏差产生原因等开展了很多研究 (Sánchez et al, 2013; Bao et al, 2018; 茆佳佳等, 2018; 王志诚等, 2018; 邹荣士等, 2021)。一些研究指出, 天气条件是影响探测精度的重要因素 (Xu et al, 2015; Zhang et al, 2017; 车云飞等, 2015; 茆佳佳等, 2018; 王志诚等, 2018; 孔凡超等, 2021): 降水条件下天线罩附着水层或雨滴粒子对微波信号的影响导致降水天气探测资料偏差较大 (Ware et al, 2004)。但是, 即使是晴空条件, 微波辐射计观测精度仍会受到工作环境温度变化、硬件性能下降等其他因素的影响 (Li et al, 2019; 李青等, 2014; 王振会等, 2014b), 导致资料质量波动以及数据不连续的问题。加强设

65 备维护，可以提高微波辐射计探测质量及其稳定性。

66 定标、更换天线罩是目前主要维护手段，定期开展定标是获得高精度亮温数据的基础，  
67 而提高天线罩性能有助于提高降水前后探测资料的质量。但是，已有研究指出(Küchler et al,  
68 2016; Löhnert and Maier, 2012)，定标时标定靶表面或辐射计天线罩上水汽凝结、周围环境等  
69 多种因素的影响，导致液氮定标本身也会带来较大不确定性，使得探测资料出现不连续现象。  
70 王振会等(2014b)指出，即使定标时误差较小，后期仍然会因为工作环境变化产生偏差。因  
71 此，为获得质量稳定的长期探测资料，在开展定期维护的基础上，仍需要开展亮温质量系统  
72 性评估，深入分析数据不连续、偏差变化等现象及其成因，并探讨定标、天线罩更换等操作  
73 的影响及其改进措施。

74 上海市气象局经过多年发展，特别是参与超大城市垂直综合气象观测技术研究及试验  
75 (下文均简称为超大城市试验)以来，逐步布设了多台地基微波辐射计。微波辐射计探测质  
76 量如何，如何获得质量稳定的探测资料，也是此次超大城市试验的研究目标之一。因此，本  
77 文以上海宝山站的微波辐射计为例，针对超大城市试验期间获得的亮温资料(一级数据)开  
78 展系统质量评估，深入分析偏差的分布特征及产生原因，并结合定期维护以及淋水试验资料，  
79 探讨定标、天线罩选材及其更换等对各通道探测准确性的影响。

## 80 1 资料和方法

### 81 1.1 资料

82 本评估试验选用安装在上海宝山站的 RPG-HATPRO-G5 型 42 通道微波辐射计(通道信  
83 息如表 1 所示)，其中第 1~21 通道位于水汽主要吸收波段(K 波段 22.235GHz 附近)，第 22~42  
84 通道位于氧气主要吸收波段(V 波段 60GHz 附近)。接收机技术方面，该设备采用多路直接  
85 检波体制。为充分认识该设备的性能和探测精度，于 2018 年 7 月至 2019 年 7 月(2018 年 7  
86 月 7-10 日、26-29 日缺测)超大城市试验期间开展了设备评估试验。评估试验期间数据获取  
87 率如图 1 所示。除 2018 年 7 月外，绝大部分月份数据获取率超过 90%，设备运行稳定。与  
88 同站点探空资料对比时，选用 08:00~08:30 和 20:00~20:30 的平均亮温分别代表 08 时和 20  
89 时的观测。

90 表 1 微波辐射计各通道中心频率

91 (单位: GHz)

92 Table 1 The central frequency of 42 channels of microwave radiometer used in this study

93 (Unit: GHz)

通道序号	中心频率	通道序号	中心频率	通道序号	中心频率	通道序号	中心频率
1	22.24	12	25.98	23	51.51	34	54.94
2	22.51	13	26.24	24	51.76	35	55.44
3	22.78	14	26.77	25	52.01	36	55.84
4	23.04	15	27.3	26	52.28	37	56.66
5	23.31	16	27.84	27	52.53	38	56.91
6	23.58	17	28.37	28	52.78	39	57.16

7	23.84	18	28.9	29	53.03	40	57.3
8	24.37	19	30	30	53.28	41	57.55
9	24.9	20	31.4	31	53.86	42	58
10	25.44	21	31.93	32	54.26		
11	25.71	22	51.26	33	54.66		

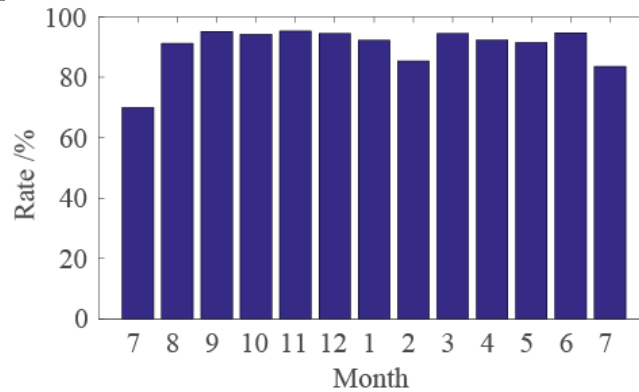


图1 评估试验期间（2018年7月-2019年7月）各月份数据获取率

Fig. 1 Number of data obtained by microwave radiometer at Baoshan Station in each month during July 2018 and July 2019

为确保资料可靠性, 试验期间定期开展天线罩更换、外部液氮定标等工作, 如表 2 所示。评估试验期间, 液氮定标 2 次, 更换天线罩共 3 次 (更换天线罩材质一次)。液氮定标即外置一个注入液氮的定标靶作为冷辐射源, 与机箱内部的热辐射源配合完成绝对定标。通过对比两次定标前后的亮温偏差, 定量评估定标效果。此外, 通过对比原有材质和新型材质的天线罩更换效果, 探讨天线罩材质对微波辐射计探测精度的影响。

表 2 2018 年 7 月-2019 年 7 月微波辐射计定标及维护记录

Table 2 LN2 calibration and maintenance times of microwave radiometer at Baoshan Station during July 2018 and July 2019

序号	日期	液氮定标及维护记录	开始时间	结束时间
1	2018/08/28	更换天线罩 液氮定标	9:00:00	15:00:00
2	2019/01/03	更换天线罩 (选用新型材质: 白膜) 加装鼓风机导风塑料条	9:00:00	12:00:00
3	2019/04/17	液氮定标	9:30:00	12:30:00
4	2019/07/24	更换天线罩 (白膜)	13:30:00	16:00:00

参考资料为同站点同期每日两次 (08:00 和 20:00, 北京时) 的探空数据, 上述资料已完成台站级质量控制。为挑选降水样本, 采用同址同期的地面雨量计资料, 时间分辨率 1min。

## 1.2 评估方法

首先, 基于探空资料, 利用 MonoRTM 辐射传输模型 (Boukabara et al, 2001; Clough et al, 2005), 获得微波辐射计 42 个通道的模拟亮温。MonoRTM 辐射传输模型由美国 AER 公司开发, 采用 Voigt 线型, 相关参数 (水汽的压力加宽系数、温度加宽系数、自加宽系数等)

112 来自 HITRAN 数据库(Liljegren et al, 2005), 水汽吸收谱采用 MTCKD 模型 (Mlawer  
113 Tobin\_Clough Kneizys Davis), 包括 22GHz, 183GHz, 325GHz 和 380GHz 等 4 条强水汽吸  
114 收谱线, 模型同时考虑了氧气、氮、二氧化碳和臭氧的压力加宽和自加宽效应, 对氧气吸收  
115 线在微波频段的重叠情况进行了处理(Clough et al, 2005)。

116 然后, 利用晴空无云和降水条件下的资料, 深入分析微波辐射计实测亮温与模拟亮温的  
117 偏差及其分布特征, 评估微波辐射计探测质量。参考前人的工作(车云飞等, 2015), 基于探  
118 空资料的相对湿度廓线数据, 区分有云和无云条件, 基于雨量计资料, 挑选降水样本。若无  
119 降水, 且整层大气相对湿度均低于 85%, 判定为晴空无云样本; 若探空施放时段降水量  
120  $\geq 0.1\text{mm}$ , 则定义为降水样本。评估试验期间, 晴空和降水天气的样本数分别为 105 组和 227  
121 组。

122 最后, 通过分析试验期间亮温恢复时长的变化, 探讨天线罩性能对探测质量的影响。天  
123 线罩被水污染后, 亮温偏差异常增大, 天线罩变干后, 亮温恢复正常值。亮温恢复时长的定  
124 义即为降水结束至亮温恢复正常的时间。参考前人研究(Cadeddu et al, 2013), 计算降水开始  
125 之前 1h 测得的亮温平均值及标准差, 降水之后, 当亮温数值回到降水之前平均亮温的 1 倍  
126 标准差之内, 则认为亮温观测恢复正常。试验期间共挑选到两次相似的降水过程开展对比分  
127 析, 2018 年 11 月 3 日(更换天线罩之前)和 2019 年 2 月 3 日(更换天线罩之后)均发生  
128 了过程累积降水量 0.1mm 的弱降水, 降水强度和持续时间十分接近。考虑到降水天气探测  
129 结果受雨滴粒子影响较大, 在无降水天气另外开展了四次淋水试验(表 3), 模拟雨水沾湿  
130 天线罩对探测结果的影响。对应的亮温恢复时长为淋水试验结束至亮温恢复正常的时间。为  
131 减少试验结果的不确定性, 淋水试验之前人工检查天线罩清洁状态。

132 表 3 评估试验期间淋水试验记录

133 Table 3 Records of water pouring tests

序号	试验日期	淋水试验开始时间	淋水试验结束时间
1	2018/11/19	9:25	9:32
2	2018/11/23	11:45	11:51
3	2018/11/27	9:35	9:42
4	2018/11/28	9:40	9:47

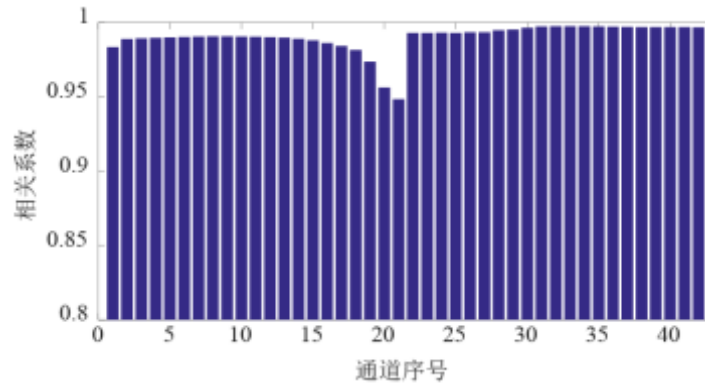
## 134 2 评估结果与分析

135 晴空条件下亮温资料的质量主要反映设备本身的探测精度, 而其他条件下受云和降水的  
136 影响较大, 为区分设备本身探测精度及其雨雾防护性能对探测质量的影响, 针对晴空无云和  
137 降水条件分别开展评估分析。

### 138 2.1 亮温准确性评估

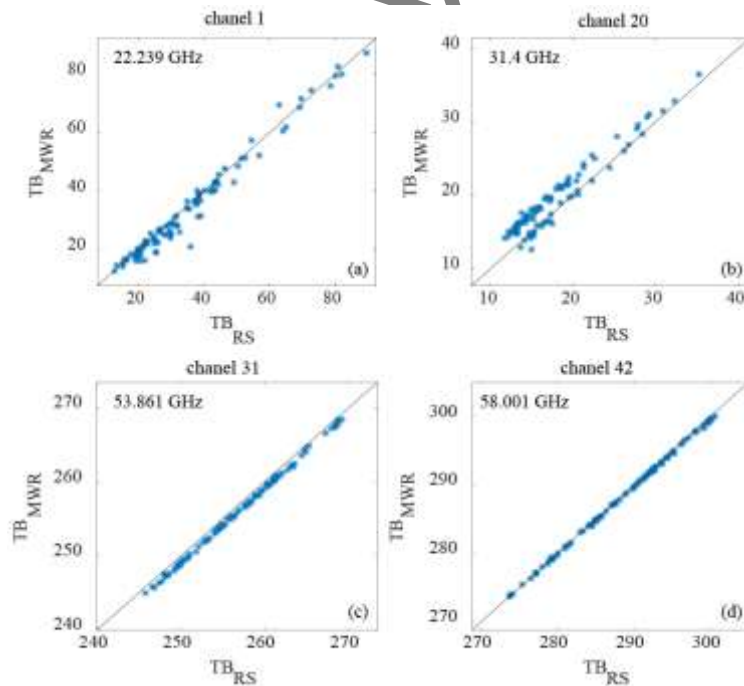
139 晴空条件下, 微波辐射计实测亮温与模拟亮温一致性高, 其中氧气通道一致性明显高于  
140 水汽通道。各通道实测亮温 ( $TB_{MWR}$ ) 与模拟亮温 ( $TB_{RS}$ ) 的相关系数均超过 0.96 (达到  
141 0.01 显著性水平), 氧气通道的相关系数略高于水汽通道(图 2)。对比分析同波段的各通道  
142 差异, V 波段(氧气通道)频率较高的通道实测亮温与模拟亮温的相关系数更高(接近 1),

143 与此类通道位于氧气的吸收峰附近有关，同理，K 波段（水汽通道）频率较低通道的相关系  
144 数也相对更高。



145  
146 图 2 2018 年 7 月-2019 年 7 月晴空无云条件，各通道实测亮温 ( $TB_{MWR}$ ) 与模拟亮温 ( $TB_{RS}$ ) 的相关系数  
147 Fig. 2 The correlation coefficients between observed and simulated brightness temperature in clear-sky condition  
148 during July 2018 and July 2019

149 分别选取两个波段频率较低的通道（第 1 和第 31 通道）和频率较高的通道（第 20 和  
150 42 通道），进一步分析微波辐射计实测亮温与模拟亮温的对应关系。如图 3 所示，虽然样本  
151 基本集中分布在参考线 ( $y=x$ ) 附近，但仍存在一定偏差。第 1 通道样本分布比较离散，第  
152 20 通道有部分样本的实测亮温略偏高，而第 31 通道的实测亮温略偏低。因此，下文对所有  
153 通道的亮温偏差进行统计分析。

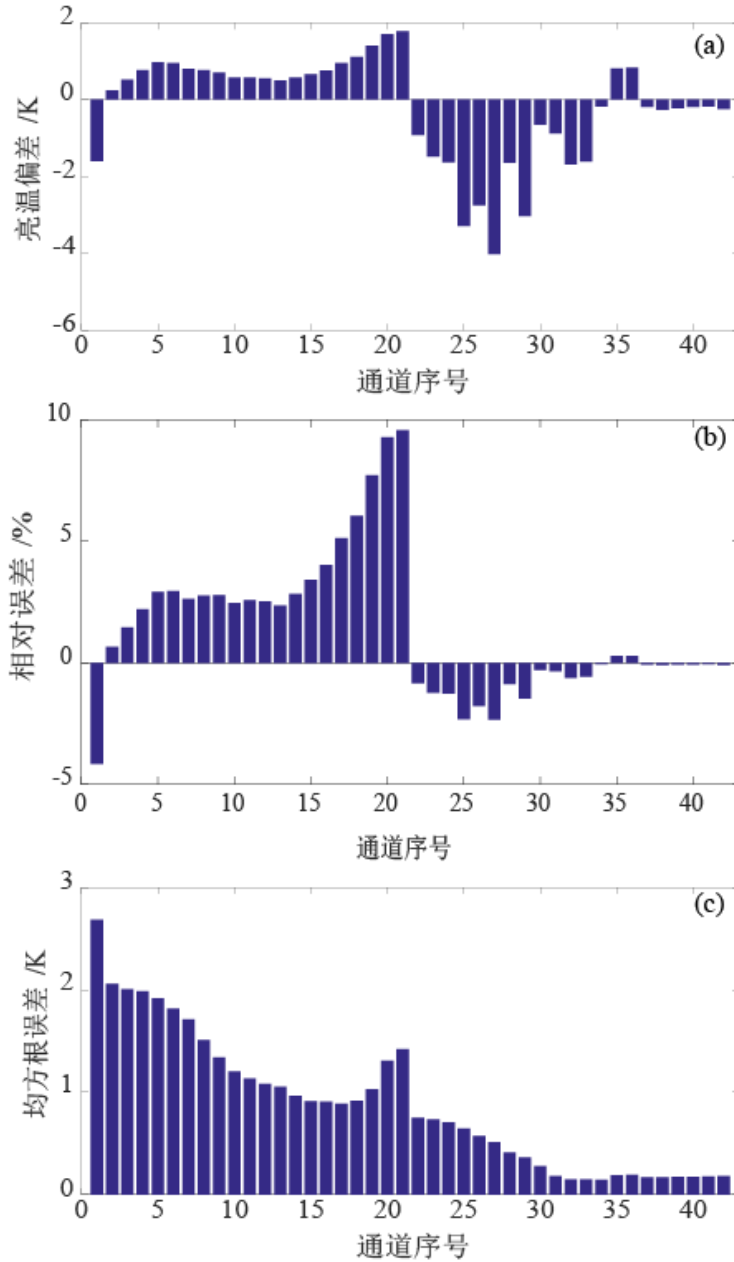


154  
155 图 3 2018 年 7 月-2019 年 7 月晴空无云条件下，观测亮温 ( $TB_{MWR}$ ) 与模拟亮温 ( $TB_{RS}$ ) 对比，第 1、20、  
156 31、42 通道中心频率为 22.239GHz、31.4GHz、53.861GHz 和 58.001GHz。黑色实线为  $y=x$  参考线。  $TB_{MWR}$   
157 为微波辐射计观测亮温，  $TB_{RS}$  为模拟亮温

158 Fig. 3 Brightness temperature measured and modeled at 22.239 GHz, 31.4 GHz, 53.861 GHz and 58.001 GHz in  
159 clear-sky condition during July 2018 and July 2019. The black solid line shows  $y=x$  for reference.  $TB_{MWR}$  is short

160 for brightness temperature obtained by microwave radiometer, and  $TB_{RS}$  short for brightness temperature modeled  
161 from radiosonde

162 总体而言,水汽通道的相对误差和均方根误差均明显高于氧气通道,氧气通道的均方根  
163 误差随通道频率增加而降低,水汽通道的均方根误差先减小后增大。图 4a 显示, K 波段绝  
164 大部分通道的实测亮温偏高,平均偏差 2K 以内(图 4a),除少部分通道(第 18~21 通道)  
165 外,各通道的相对误差基本低于 5%(图 4b),相对误差整体呈现随频率增加而增大的特征。  
166 而 V 波段绝大部分通道实测亮温偏低,相对误差以随频率减少的分布特征为主,基本低于  
167 2%,甚至接近 0。图 4c 显示,水汽通道均方根误差为 0.89~2.68K,高于所有氧气通道  
168 (0.15~0.75K)。进一步分析发现, K 波段均方根误差呈现两头高中间低的特征,其中第 1~10  
169 通道亮温均方根误差较大,可能与低层大气较高的水汽含量导致亮温观测误差偏大有关系,  
170 而第 19~21 通道的均方根误差较大,可能与其中心频率离水汽吸收峰较远、接收到的辐射较  
171 弱有关(图 5a); V 波段均方根误差随频率增加单调降低,可能是中心频率越高的通道离氧  
172 气吸收峰越近、接收到的辐射越强导致(图 5b)。



173

174 图4 2018年7月-2019年7月晴空无云条件下,微波辐射计各通道亮温偏差:(a)平均偏差( $TB_{MWR}-TB_{RS}$ );

175

(b) 相对误差; (c) 均方根误差

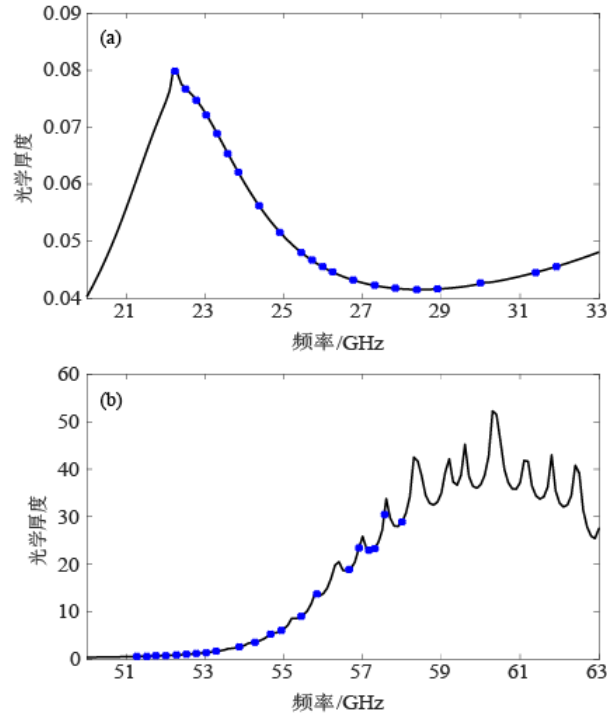
176 Fig. 4 Errors of brightness temperature in 42 channels of microwave radiometer during July 2018 and July 2019: (a)

177

mean error; (b) relative error; (c) root mean square error

178





179  
180 图5 模拟的(a)20~33 GHz; (b)50~63 GHz 大气光学厚度分布。采用中纬度冬季的大气参数廓线(Anderson  
181 et al, 1986), 利用 MonoRTM 模拟。图中蓝色实心点对应微波辐射计 42 个通道  
182 Fig. 5 The simulated total optical depth at (a) 20~33 GHz and (b) 50~63 GHz. MonoRTM is employed to simulate  
183 with the AFGL reference atmospheric model profiles (0-120km) of midlatitude winter. The blue solid circles mark  
184 the 42 channels of RPG.

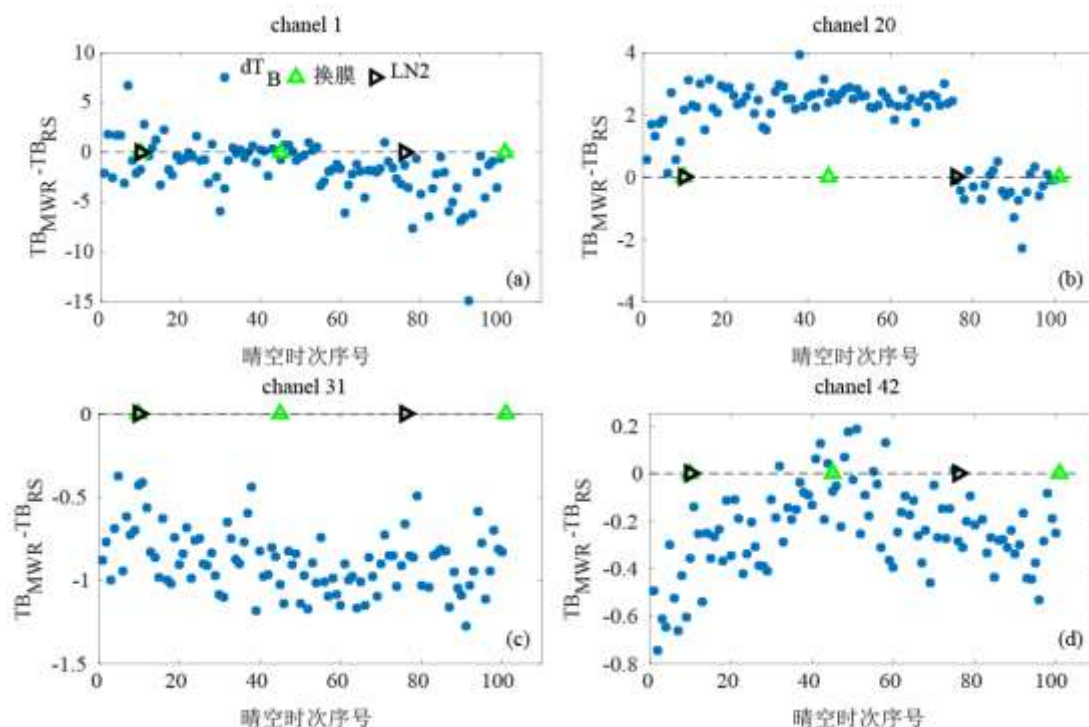
## 185 2.2 亮温偏差分布及定标效果分析

186 下文将分析晴空条件下亮温偏差的分布特征(以第 1、20、31 和 42 通道为代表), 并探  
187 讨定标对亮温准确性的影响。

188 各通道亮温偏差分布特征存在较大差异, 包括随机偏差、系统性偏差和季节性偏差等几  
189 种类型。如图 6 所示, 第 1 通道以随机偏差为主; 第 20 通道呈现系统性正偏差, 且数值变  
190 化较大, 定标前后存在明显的突变点; 第 31 通道以系统性负偏差为主, 数值比较稳定; 第  
191 42 通道亮温的偏差较小, 但有明显的季节变化特征, 冬季偏差低于夏季。其余通道的偏差  
192 分布与上述 4 种情况类似(图略)。

193 开展液氮定标能明显降低大部分水汽通道的偏差, 但对氧气通道的影响较小, 更换天线  
194 罩对晴空条件下各通道亮温偏差的影响不明显。图 6 显示, 两次液氮定标(黑色三角形标示)  
195 前后, 第 20 通道的亮温偏差均明显改变, 第一次定标后, 平均偏差增大至 2.47K, 此后维  
196 持该系统性正偏差, 与图 4a 显示的较大正偏差一致, 第二次定标后, 上述系统性偏差得到  
197 明显改善, 平均亮温偏差降低至-0.35K, 此后亮温偏差集中在 0 附近, 第 19~22 通道也有类  
198 似现象。定标前后各通道平均偏差如表 4 所示, 由表可知, 定标对 K 波段其他通道也有明  
199 显影响, 大部分通道(第 4~18 通道)的平均偏差第一次定标后均明显减小, 第二次定标后  
200 进一步减小。相比之下, 定标对氧气通道的影响相对较小(如图 6c~图 6d 和表 4)。更换天

201 线罩（图 6 绿色三角形标示）前后，亮温无明显变化，说明更换天线罩对晴空条件下亮温观  
 202 测准确性的影响相对较小。上述结果表明，定标对绝大部分水汽通道的亮温偏差影响较大，  
 203 规范定标能明显降低此类通道的偏差。



204  
 205 图 6 2018 年 7 月-2019 年 7 月晴空无云条件下，微波辐射计实测亮温偏差 ( $TB_{MWR}-TB_{RS}$ ) 的时间序列：(a)  
 206 第 1 通道；(b) 第 20 通道；(c) 第 31 通道；(d) 第 42 通道。绿色三角形标示更换天线罩的日期，黑  
 207 色三角形标示液氮定标日期（更换天线罩和定标记录详见表 2）

208 Fig. 6 Differences of brightness temperature obtained by microwave radiometer and radiosonde at 22.239 GHz,  
 209 31.4 GHz, 53.861 GHz and 58.001 GHz in clear-sky condition during July 2018 and July 2019. The black open  
 210 triangles mark the times of LN2 calibration, and the green open triangles mark the times of radome replacement  
 211 (more details could be found in Table 2)

212 表 4 定标前后各通道亮温平均偏差

213 Table 4 Mean errors of brightness temperature in 42 channels before and after LN2 calibration

通道序号	第一次定标前	第一次定标后	第二次定标后
1	-0.06	-0.99	-4.04
2	1.74	0.53	-1.44
3	2.18	0.75	-1.06
4	2.82	0.98	-0.73
5	3.17	1.07	-0.42
6	3.16	1.01	-0.38
7	3.01	0.92	-0.49
8	2.81	0.80	-0.40
9	2.56	0.74	-0.37
10	2.23	0.68	-0.45
11	2.08	0.64	-0.39

12	1.96	0.62	-0.38
13	1.85	0.62	-0.43
14	1.68	0.68	-0.35
15	1.58	0.82	-0.31
16	1.55	1.02	-0.32
17	1.57	1.22	-0.24
18	1.61	1.43	-0.22
19	1.67	1.86	-0.24
20	1.39	2.47	-0.35
21	0.95	2.61	-0.53
22	0.40	-1.10	-0.99
23	-0.23	-1.64	-1.56
24	-0.46	-1.78	-1.73
25	-2.30	-3.38	-3.49
26	-1.92	-2.81	-2.95
27	-3.42	-4.03	-4.30
28	-1.22	-1.66	-1.80
29	-2.74	-3.02	-3.23
30	-0.45	-0.66	-0.73
31	-0.71	-0.90	-0.91
32	-1.60	-1.69	-1.73
33	-1.69	-1.58	-1.69
34	-0.41	-0.13	-0.20
35	0.44	0.87	0.80
36	0.45	0.89	0.83
37	-0.49	-0.13	-0.23
38	-0.54	-0.21	-0.32
39	-0.49	-0.16	-0.29
40	-0.46	-0.13	-0.25
41	-0.45	-0.12	-0.24
42	-0.54	-0.18	-0.29

214

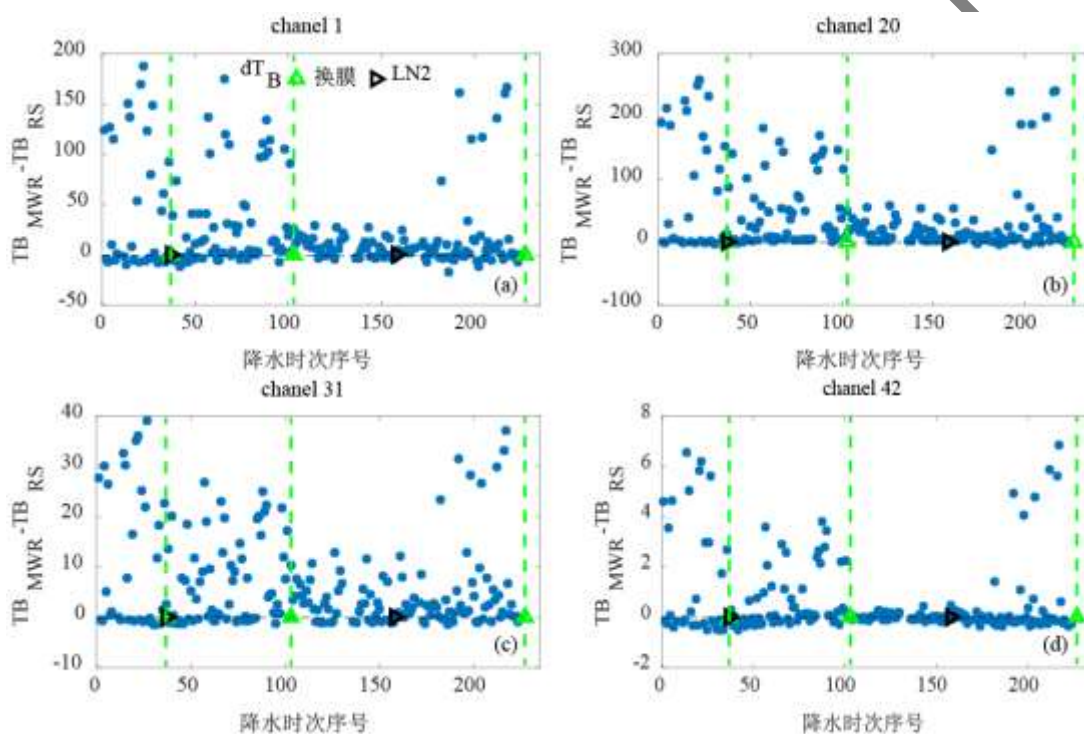
### 215 2.3 天线罩性能对亮温准确性的影响

216 降水天气，天线罩上的水层、水滴等物质会导致各通道实测亮温出现较大的正偏差。因  
 217 此，下文通过分析降水条件以及淋水试验前后的亮温偏差分布，探讨天线罩性能对探测准确  
 218 性的影响。

219 降水条件下，微波辐射计实测亮温偏差明显大于晴空条件，且偏差波动范围较大。水汽  
 220 通道的亮温偏差受降水影响较大，通道 1 的平均偏差超过 40K，最大偏差接近 200K(图 7a)，  
 221 通道 20 平均亮温偏差更大，最大亮温偏差甚至超过 250K(图 7b)。虽然氧气通道偏差相对  
 222 较小，但仍然大幅超过晴空条件对应的偏差。

223 更换合适材质的天线罩有助于降低降水天气各通道的亮温偏差，效果持续 4 个月左右。

224 更换天线罩后，天线罩疏水性能提升，有助于减少天线罩上水层、水滴等物质的影响，进而  
 225 降低偏差。试验期间更换天线罩共 3 次，分别为 2018 年 8 月 28 日，2019 年 1 月 3 日和 2019  
 226 年 7 月 24 日（图 7 绿色虚线标示）。由图 7 可知，第一次更换天线罩之后，降水天气各通道  
 227 亮温偏差有小幅降低，但仍维持在较高水平，部分通道（图 7a 和图 7b）最大偏差仍超过 150K。  
 228 第二次选用了新型材质的天线罩，更换之后，各通道亮温偏差明显降低，通道 1 的最大亮温  
 229 偏差由 150K 以上降低至 30K 以内，通道 42 的亮温偏差全部降低至 0.5K 以内，其他通道也  
 230 可观察到类似现象。约 4 个月后，各通道的最大亮温偏差又重新增大至较高水平，与首次更  
 231 换天线罩之前的偏差相当。可能是天线罩使用时间太长、性能下降导致，即更换天线罩的间  
 232 隔时间（6 个月）太长。



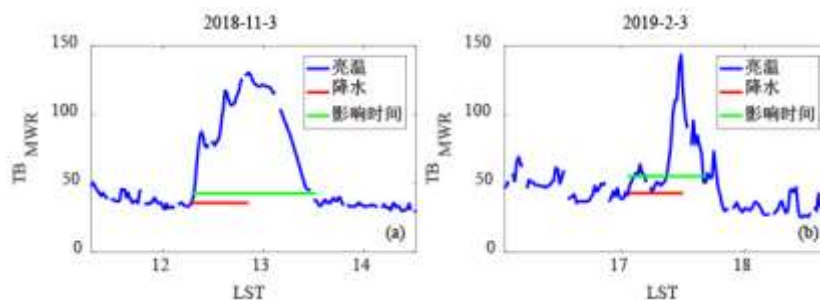
233  
 234 图 7 2018 年 7 月-2019 年 7 月降水条件下，微波辐射计实测亮温偏差 ( $TB_{MWR}-TB_{RS}$ ) 的时间序列：(a)  
 235 第 1 通道；(b) 第 20 通道；(c) 第 31 通道；(d) 第 42 通道。绿色三角形和绿色虚线标示更换天线罩  
 236 的日期，黑色三角形标示液氮定标日期（更换天线罩和定标记录详见表 2）

237 Fig. 7 Differences of brightness temperature at 22.239 GHz, 31.4 GHz, 53.861 GHz and 58.001 GHz obtained by  
 238 microwave radiometer and radiosonde in precipitation condition during July 2018 and July 2019. The black open  
 239 triangles mark the times of LN2 calibration, and the green open triangles and green dashed lines mark the times of  
 240 radome replacement (more details could be found in Table 2)

241 提高天线罩性能还可能加快微波辐射计受降水影响后的恢复速度。两次降水过程前后，  
 242 亮温变化情况（以通道 20 为例）如图 8 所示。2018 年 11 月 3 日 12~13 时发生降水，微波  
 243 辐射计实测亮温由降水前的 50K 左右异常增大至 120K 以上，降水结束后，亮温逐渐恢复正  
 244 常，亮温恢复时长为 40 分钟。更换天线罩之后，受强度和持续时间相近的降水过程（2019  
 245 年 2 月 3 日 17~18 时）影响后，亮温快速恢复至降水前水平，亮温恢复时长缩短至 11 分钟。

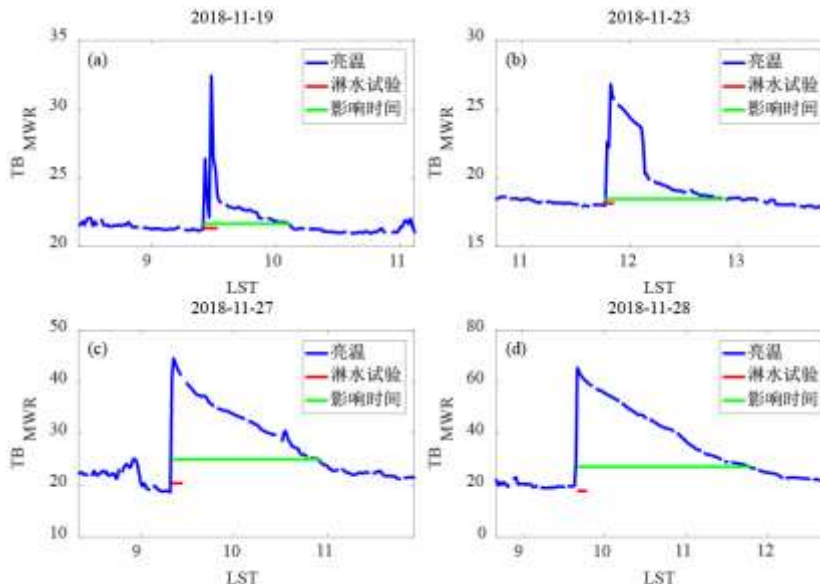
246 淋水试验的初步分析也显示类似结果（图 9）。淋水开始时，亮温快速、大幅度增加，4

247 次淋水试验亮温异常幅度逐渐增大，分别为 11.18K、8.68K、26.01K 和 45.9K。淋水结束后，  
 248 亮温小幅降低，然后慢慢恢复至正常水平。第 1~4 次淋水试验亮温恢复时长依次延长，分别  
 249 为 36min、62min、90min 和 121min。考虑到四次淋水试验对应的大气温湿风条件较为接近，  
 250 即认为水膜蒸发速率的差异较小，上述亮温异常幅度以及亮温恢复时长逐渐增大的现象，可  
 251 能与天线罩上的水膜增厚有关。而天线罩疏水性能下降是导致水膜增厚的重要原因之一。



252  
 253 图 8 (a) 2018 年 11 月 3 日和 (b) 2019 年 2 月 3 日降水前后微波辐射计第 20 通道实测亮温时间序列，  
 254 横坐标是北京时，纵坐标为亮温，红色实线标示降水持续时间，绿色实线标示亮温异常状态持续时间。亮  
 255 温恢复时长为亮温异常状态持续时间与降水持续时间之差

256 Fig. 8 Brightness temperature (the 20<sup>th</sup> channel, 31.4GHz) observed during two rain events: (a) November 3 in  
 257 2018; (b) February 3 in 2019. In the x axis is Beijing Time (LST), and in the y axis is brightness temperature. Red  
 258 solid line represents the times when rain occur, and the green solid line indicate the time between the start of the  
 259 rain and the return of brightness temperatures to pre-rain levels. The recovery time is difference between the green  
 260 solid line and the red solid line



261  
 262 图 9 4 次淋水试验前后微波辐射计第 20 通道实测亮温时间序列，横坐标是北京时，纵坐标为亮温，红色实  
 263 线标示淋水持续时间，绿色实线标示亮温异常状态持续时间。亮温恢复时长为亮温异常状态持续时间与淋  
 264 水持续时间之差

265 Fig. 9 Brightness temperature (the 20<sup>th</sup> channel, 31.4GHz) observed during four water pouring tests. In the x axis is  
 266 Beijing Time (LST), and in the y axis is brightness temperature. Red solid line represents the times when the test  
 267 starts, and the green solid line indicate the time between the start of test and the return of brightness temperatures  
 268 to pre-test levels. The recovery time is difference between the green solid line and the red solid line

### 269 3 结论与讨论

270 利用上海宝山气象站 RPG-HATPRO-G5 微波辐射计探测资料（2018 年 7 月至 2019 年 7  
271 月）和设备元数据，以同站同期的探空资料模拟亮温为参考，通过分析晴空和降水条件的亮  
272 温偏差，评估亮温资料质量，并探讨设备性能、定标、天线罩更换等的影响，主要结论如下：

273 1) 晴空条件下，地基微波辐射计实测亮温分布与模拟亮温一致性高。各通道相关系数  
274 均超过 0.96。其中水汽通道实测亮温总体偏高，均方根误差为 0.89~2.68K，且随频率增加先  
275 减小后增大；而氧气通道实测亮温总体偏低，均方根误差 0.15~0.75K，随频率增加而降低。

276 2) 各通道的亮温偏差分布主要包括随机偏差，系统性偏差以及季节性偏差三类，液氮  
277 定标能明显降低部分通道的系统性偏差，更换天线罩对晴空条件下各通道偏差的影响不明显。  
278 K 波段大部分通道（第 4~18 通道）的平均偏差第一次定标后明显减少，第二次定标后进一步  
279 减小，而 V 波段各通道对定标的响应相对较弱。更换天线罩前后，晴空条件下各通道亮  
280 温无明显变化。

281 3) 降水条件下，亮温偏差及其波动范围均明显增大，更换新型材质的天线罩有助于较  
282 大幅度降低降水条件下的亮温偏差，明显缩短受降水影响后的亮温恢复时长，增加降水天气  
283 的可用资料。更换新材质的天线罩之后，亮温恢复时长由原来的 40 分钟降至 11 分钟。亮温  
284 偏差明显减少，最大可减少 100K 以上，效果维持 4 个月左右。

285 上述结果表明，上海宝山气象站的微波辐射计实测亮温准确性较高，与其他地区同类设  
286 备相当(茆佳佳等, 2018)。结果显示定标对水汽通道的改善效果比氧气通道更明显，与李青  
287 等（2014）的结果一致。需要注意的是，第一次定标后，一些通道的亮温偏差未减小，反而  
288 有增加的现象，可能与定标精度的不确定性(Küchler et al, 2016)有关，及时评估定标效果并  
289 开展重复定标有助于改善上述不确定性。本研究结果还表明，更换天线罩的效果维持 4 个月  
290 左右，说明当前选用的 6 个月更换周期需要进一步缩短。上述可为微波辐射计维护、数据质  
291 量改进及应用提供参考。另外，本研究开展淋水试验对天线罩性能的影响分析为初步结果，  
292 可能包含蒸发速率差异等其他因素的影响，后续仍需开展更深入的试验研究。

293

294 **致谢** 感谢华东师范大学束炯教授、刘延安教授对本研究的地基微波辐射计数据支持。

## 参考文献

- 295  
296 车云飞, 马舒庆, 杨玲, 等, 2015. 云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响[J]. 应用气象学报, 26(2): 193-202. Che Y F, Ma S Q,  
297 Yang L, et al, 2015. Cloud influence on atmospheric humidity profile retrieval by ground-based microwave radiometer[J]. J Appl  
298 Meteor Sci, 26(2): 193-202 (in Chinese).
- 299 丁虹鑫, 马舒庆, 杨玲, 等, 2018. 云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J]. 气象, 44(12): 1604-1611. Ding H X,  
300 Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12):  
301 1604-1611 (in Chinese).
- 302 傅新姝, 谈建国, 2017. 地基微波辐射计探测资料质量控制方法[J]. 应用气象学报, 28(2): 209-217. Fu X S, Tan J G, 2017. Quality  
303 control of temperature and humidity profile retrievals from ground-based microwave radiometer[J]. J Appl Meteor Sci, 28(2):  
304 209-217 (in Chinese).
- 305 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等, 2014. 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, 40(2): 216-222. Huang Z  
306 Y, Xu G R, Wang X F, et al, 2014. Analysis on two hailstorm events in Xianning based on observations of ground-based microwave  
307 radiometer[J]. Meteor Mon, 40(2): 216-222 (in Chinese).
- 308 孔凡超, 李江波, 王颖, 2021. 北京冬奥会云顶赛场微波辐射计反演大气温湿廓线分析[J]. 气象, 47(9): 1062-1072. Kong F C, Li J  
309 B, Wang Y, 2021. Analysis on atmospheric profiles retrieved by microwave radiometer at genting venue of Beijing olympic winter  
310 games[J]. Meteor Mon, 47(9): 1062-1072 (in Chinese).
- 311 李金辉, 周毓荃, 岳治国, 等, 2022. 基于微波辐射计数据的秦岭南北水汽和云底高度等参量的差异[J]. 气象, 48(4): 452-458. Li J  
312 H, Zhou Y Q, Yue Z G, et al, 2022. Water vapor and cloud base height difference between the north and south of Qinling mountains  
313 based on microwave radiometer measurements[J]. Meteor Mon, 48(4): 452-458 (in Chinese).
- 314 李青, 胡方超, 楚艳丽, 等, 2014. 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[J]. 遥感技术与应用, 29(4): 547-556.  
315 Li Q, Hu F C, Chu Y L, et al, 2014. A consistency analysis and correction of the brightness temperature data observed with a ground  
316 based microwave radiometer in Beijing[J]. Remote Sens Technol Appl, 29(4): 547-556 (in Chinese).
- 317 刘红燕, 2011. 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, 69(4): 719-728. Liu H Y, 2011. The temperature profile  
318 comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years[J]. Acta Meteor Sin,  
319 69(4): 719-728 (in Chinese).
- 320 刘思波, 何文英, 刘红燕, 等, 2015. 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, 26(5): 626-635. Liu S B, He W Y,  
321 Liu H Y, et al, 2015. Retrieval of atmospheric boundary layer height from ground-based microwave radiometer measurements[J]. J  
322 Appl Meteor Sci, 26(5): 626-635 (in Chinese).
- 323 马丽娜, 李青, 姜苏麟, 等, 2018. 地基微波辐射计的亮温观测与模拟数据的一致性分析和云检测[J]. 遥感技术与应用, 33(1):  
324 68-77. Ma L N, Li Q, Jiang S L, et al, 2018. Consistency analysis of experimental and simulated brightness temperature based on  
325 ground-based microwave radiometer and cloud detection[J]. Remote Sens Technol Appl, 33(1): 68-77 (in Chinese).
- 326 茆佳佳, 张雪芬, 王志诚, 等, 2018. 多型号地基微波辐射计亮温准确性比对[J]. 应用气象学报, 29(6): 724-736. Mao J J, Zhang X F,  
327 Wang Z C, et al, 2018. Comparison of brightness temperature of multi-type ground-based microwave radiometers[J]. J Appl Meteor  
328 Sci, 29(6): 724-736 (in Chinese).
- 329 王志诚, 张雪芬, 茆佳佳, 等, 2018. 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, 29(3): 282-295. Wang Z C,  
330 Zhang X F, Mao J J, et al, 2018. Comparison analysis on detection performance of ground-based microwave radiometers under  
331 different weather conditions[J]. J Appl Meteor Sci, 29(3): 282-295 (in Chinese).
- 332 王振会, 曹雪芬, 黄建松, 等, 2014a. 基于气象资料变化特征和辐射传输模式的微波辐射计工作状态分析[J]. 大气科学学报,  
333 37(1): 1-8. Wang Z H, Cao X F, Huang J S, et al, 2014a. Analysis on the working state of a ground-based microwave radiometer  
334 based on radiative transfer model and meteorological data variation features[J]. Trans Atmos Sci, 37(1): 1-8 (in Chinese).
- 335 王振会, 李青, 楚艳丽, 等, 2014b. 地基微波辐射计工作环境对 K 波段亮温观测影响[J]. 应用气象学报, 25(6): 711-721. Wang Z H,  
336 Li Q, Chu Y L, et al, 2014. Environmental thermal radiation interference on atmospheric brightness temperature measurement with  
337 ground-based K-band microwave radiometer[J]. J Appl Meteor Sci, 25(6): 711-721 (in Chinese).
- 338 邹荣士, 何文英, 王普才, 等, 2021. 辐射传输模式对地基微波辐射计观测亮温的模拟能力分析[J]. 大气科学, 45(3): 605-616. Zou

339 R S, He W Y, Wang P C, et al, 2021. Assessment of radiative transfer models based on observed brightness temperature from  
340 ground-based microwave radiometer[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(3): 605–616 (in Chinese).

341 Anderson G P, Clough S A, Kneizys F X, et al, 1986. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (-120km)[R]. Hanscom AFB, MA: Air  
342 Force Geophysics Laboratory (OPI): 46.

343 Bao Y S, Cai X, Qian C, et al, 2018. 0-10 km temperature and humidity profiles retrieval from ground-based microwave radiometer[J]. *J*  
344 *Trop Meteor*, 24(2): 243-252.

345 Boukabara S A, Clough S A, Hoffman R N, 2001. Monortm: A monochromatic radiative transfer model for microwave and laser  
346 calculation[C]. *Specialist Meeting on Microwave Remote Sensing*.

347 Cadeddu M P, Liljegren J C, Turner D D, 2013. The Atmospheric radiation measurement (ARM) program network of microwave  
348 radiometers: instrumentation, data, and retrievals[J]. *Atmos Meas Tech*, 6(9): 2359-2372.

349 Caumont O, Cimini D, Löhnert U, et al, 2016. Assimilation of humidity and temperature observations retrieved from ground-based  
350 microwave radiometers into a convective-scale NWP model[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 142(700): 2692-2704.

351 Cimini D, Nelson M, Guldner J, et al, 2014. Forecast indices from ground-based microwave radiometer for operational meteorology[J].  
352 *Atmos Meas Tech Discuss*, 7(7): 6971-7011.

353 Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al, 2005. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the aer codes[J]. *J Quant*  
354 *Spectrosc Radiat Transf*, 91(2): 233-244.

355 Jiang S L, Pan Y, Lei L F, et al, 2018. Remote sensing of the lightning heating effect duration with ground-based microwave  
356 radiometer[J]. *Atmos Res*, 205: 26-32.

357 Küchler N, Turner D D, Löhnert U, et al, 2016. Calibrating ground-based microwave radiometers: Uncertainty and drifts[J]. *Radio Sci*,  
358 51(4): 311-327.

359 Li Q, Wei M, Wang Z H, et al, 2019. Evaluation and correction of ground-based microwave radiometer observations based on NCEP-FNL  
360 data[J]. *Atmospheric and Climate Sciences*, 9(2): 229-242.

361 Liljegren J C, Boukabara S A, Cady-Pereira K, et al, 2005. The effect of the half-width of the 22-GHz water vapor line on retrievals of  
362 temperature and water vapor profiles with a 12-channel microwave radiometer[J]. *IEEE Trans Geosci Remot Sen*, 43(5): 1102-1108.

363 Löhnert U, Maier O, 2012. Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry at Payerne: prospects and  
364 challenges[J]. *Atmos Meas Tech*, 5(5): 1121-1134.

365 Madhulatha A, Rajeevan M, Venkat Ramam M, et al, 2013. Nowcasting severe convective activity over southeast India using  
366 ground-based microwave radiometer observations[J]. *J Geophys Res Atmos*, 118(1): 1-13.

367 Matrosov S Y, Turner D D, 2018. Retrieving mean temperature of atmospheric liquid water layers using microwave radiometer  
368 measurements[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 35(5): 1091-1102.

369 Sánchez J L, Posada R, García-Ortega E, et al, 2013. A method to improve the accuracy of continuous measuring of vertical profiles of  
370 temperature and water vapor density by means of a ground-based microwave radiometer[J]. *Atmos Res*, 122: 43-54.

371 Ware R, Cimini D, Herzegh P, et al, 2004. Ground-based microwave radiometer measurements during precipitation[C]//The 8<sup>th</sup> Specialist  
372 Meeting on Microwave Radiometry. Rome.

373 Xu G R, Xi B K, Zhang W G, et al, 2015. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde  
374 soundings[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(19): 10313-10323.

375 Zhang W G, Xu G R, Liu Y Y, et al, 2017. Uncertainties of ground-based microwave radiometer retrievals in zenith and off-zenith  
376 observations under snow conditions[J]. *Atmos Measur Technol*, 10(1): 155-165.

377  
378