张明,徐桂荣,杜裕,等.2024.三峡地基遥感垂直观测系统温湿廓线的误差分析与订正方法探讨[J].暴雨灾害,43(5):587-597. ZHANG Ming, XU Guirong, DU Yu, et al. 2024. Error analysis and correction method of temperature and humidity profile in Ground-based remote sensing vertical observation system of Three Gorges[J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):587-597 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-199

# 三峡地基遥感垂直观测系统温湿廓线的误差分析与订正方法探讨

张明[1,2],徐桂荣[2,3],杜裕[1],叶丹[1,2]

(1. 湖北省宜昌市气象局,宜昌 443000;2. 三峡国家气候观象台,宜昌 443000;3. 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205)

**摘　要:**三峡地基遥感垂直观测系统是中国气象局"补短板工程"的先行试点,用于监测三峡库区大气垂直廓线的精细结构及演变,其中大气温湿廓线通过微波辐射计反演得到,评估大气温湿廓线的反演偏差并提高其精度对发挥好垂直观测系统在三峡库区的精密监测作用具有重要意义。利用2022年11月—2023年6月三峡微波辐射计和同址探空、自动气象站、毫米波测云仪等探测资料,评估了三种天气条件下(晴天、云天、雨天)微波辐射计83个探测高度层温湿度的反演偏差,提出对83个高度层重新分组与探空建立线性回归的微波辐射计温湿度订正方法;评估了订正前后的精度变化并以一次雨雪天气过程的探测结果讨论了订正方法的适用性。结果表明:(1) 三种天气条件下微波辐射计和探空温度一致性均较好,多数高度层平均偏差在2 ℃以内。(2) 晴天所有高度层微波辐射计探测湿度均高于探空探测;云天和雨天6 km以上高度层探测湿度均方根误差达30%。(3) 高度层重新分组后建立的订正关系能明显提升微波辐射计探测的温湿廓线精度。(4) 以一次雨雪天气过程探测为例,订正后的微波辐射计探测的温湿廓线与实况更接近。

**关键词:**微波辐射计;温湿廓线;探空;偏差;订正.

**中图法分类号:** P413.2　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-199

# Error analysis and correction method of temperature and humidity profiles in the Three Gorges ground-based remote sensing vertical observation system

ZHANG Ming[1,2], XU Guirong[2,3], DU Yu1, YE Dan[1,2]

(1. *Hubei Yichang Meteorological Observatory, Yichang* 443000; 2. *Three Gorges National Climatological Observatory, Yichang* 443000; 3. *China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan* 430205)

**Abstract:** The Three Gorges ground-based remote sensing vertical observation system, as the first pilot project of the "short board repair project" by the China Meteorological Administration, can monitor the fine structure and evolution of the atmospheric vertical profile in the Three Gorges Reservoir Region. The atmospheric temperature and humidity profiles are retrieved from the microwave radiometer in the Three Gorges ground-based remote sensing vertical observation system. Evaluating their retrieval bias and improving their accuracy is of great significance for precision monitoring of the vertical observation system in the Three Gorges Reservoir Region. By using microwave radiometer data, radiosonde data, automatic weather station data, and millimeter wave cloud gauge data of Three Gorges from November 2022 to June 2023, this study evaluates the bias of temperature and humidity at 83 height layers retrieved from microwave radiometer under sunny,

**收稿日期:** 2023-09-21;**定稿日期:**2024-03-11

**资助项目:**国家自然科学基金面上项目(42375139);中国气象局城市气象重点开放实验室开放基金项目(LUM-2023-08);湖北省气象局面上项目(2023Y12);湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金项目(2023AFD093)

**第一作者:** 张明,主要从事综合气象观测及数据质控方法研究。E-mail: 475945482@qq.com

**通信作者:** 徐桂荣,主要从事大气探测和云-降水研究。E-mail: grxu@whihr.com.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

cloudy, and rainy days. Then a linear regression correction method based on radiosonde data after the regrouping of the 83 height layers for temperature and humidity profile of the microwave radiometer was proposed. Finally, the applicability of the correction method by using the accuracy changes before and after the correction was evaluated using the observation from a rainy and snowy weather process. The results are as follows: (1) The temperature of the microwave radiometer has good consistency with radiosonde temperature under three weather conditions, and the bias of most height layers is less than 2 ℃. (2) On sunny days, the humidity of the microwave radiometer is higher than that of the radiosonde at all height layers. Above 6 km, the root mean square error (RMSE) of the humidity can reach 30% on cloudy and rainy days. (3) The correction method established after the regrouping of the 83 height layers can improve the temperature and humidity profile accuracy of the microwave radiometer. (4) The corrected temperature and humidity profiles of the microwave radiometer are closer to the reality in the case of a rain and snow event.

**Key words:** microwave radiometer; temperature and humidity profiles; radiosonde; bias; correction

## 引 言

大气温湿廓线资料作为我国的基本气象资料 (吴兴洋等,2015),是天气预报、气候诊断预测、强对流特征识别以及大气环境监测分析等的关键数据来源(刘超等,2017;韩丰等,2021)。目前,我国大气温湿廓线资料主要来源于气象站通过人工施放探空气球所获得的温湿度物理参数,每日两次的探测频率,其时间分辨率较低,很难捕捉大气环境参数的短时变化,气球的漂移也使探测的廓线数据区域代表性变差(稽磊等,2012) ,而观测时间的加密,能显著提高数值天气预报的预报技巧(原榕等,2021)。因此,如何获取高时间分辨率大气温湿廓线的问题越来越受关注,如融合再分析数据与地面自动气象站数据构建模式温湿廓线(尉英华等,2020)以及利用微波辐射计的高时间分辨率数据反演大气温湿廓线(徐桂荣等,2019;林晓萌等,2022)等。

近10多年以来,作为能够连续自动反演大气温湿廓线的微波辐射计(Microwave Radiometer, MWR),由于其高时间分辨率的独特探测优势,陆续在国内布站观测,中国气象局武汉暴雨研究所亦利用在武汉、咸宁等地布设的MP-3000A型微波辐射计开展大气温湿廓线的监测应用,取得了较多的成果(黄治勇等,2013;王丽娟等,2018)。然而,国内学者研究表明各型号微波辐射计存在着不同的探测误差(Xu et al.,2015; 王志诚等,2018),并指出其探测误差不容忽视(Xu et al.,2014; 陈树成等,2021)。

2022年7月,为提升三峡库区的大气垂直观测能力,进一步提升三峡库区及其临近区域极端天气气候事件的监测能力,中国气象局选取三峡国家气候观象台(简称三峡观象台,站号57461,111.36°E,30.74°N,海拔256.5 m)作为“补短板工程”的先行试点,在此建成一套包括风廓线仪、微波辐射计、毫米波测云仪、气溶胶激光观测仪及GNSS/MET共5种设备的地基遥感垂直观测系统。该系统中,MWP967KV型微波辐射计作为我国自主研制的自动化、智能化、高精度新型大气微波遥感探测设备,是反演大气温湿廓线的重要手段。近年来,国内对该型号MWR温湿廓线的反演精度已有一些评估工作(刘晓璐等,2019; 王梧熠等,2022),但较少涉及温、湿度的订正处理。刘晓璐等(2019)指出MWR与探空湿度的相关系数在晴天、云天均存在较多高度层未通过0.01显著性水平检验,对湿度订正有一定影响;吴梦莹等(2023)综合利用探空和ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)再分析数据对MWR进行检验,提出了采用经探空修正后的ERA5再分析数据对MWR温湿资料进行线性拟合订正,取得了一定的效果,订正后温度、湿度均方根误差RMSE分别减小3.6 K、5.9%。

MWR通过接收大气热辐射测定大气亮温数据并反演得到大气温湿廓线,其反演精度不仅受到天气背景如云、雨以及逆温层的影响(周永水等,2022),还受设备工艺、反演算法等的影响(张雪芬等,2020;杨杰波等,2022),同时气球漂移造成探测位置的改变以及太阳辐射等对探空数据有一定的影响(Xu et al.,2015)。因此,MWR与探空温湿度的评估结果在国内各地不尽相同。为更好地本地化应用三峡MWR,本文以同址L波段探空资料为参考,结合同址毫米波测云仪、人工观测的云天状况以及地面自动气象站降水天气现象数据,首先评估了晴天、云天、雨天三种不同天气条件下MWR反演温湿度与探空观测的偏差;然后依据偏差结果建立了不同天气条件下MWR不同高度层的温湿度订正方法;最后评估了订正前后MWR温湿廓线与探空观测的偏差变化,并利用一次雨雪天气过程的监测与订正结果分析了方法的适用性。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

本研究使用资料均来源于三峡国家气候观象台,相应探测设备均布设于三峡国家气候观象台综合气

象观测平台，数据具有较好的地理一致性，包括：(1) MWR反演的温湿廓线资料(时间分辨率2 min，垂直观测范围为地面至顶空10 km高度，共83层，其中0—0.5 km、0.5—2 km、2—10 km的垂直分辨率分别为25 m、50 m、250 m)；(2) 每日08：00和20：00 (北京时，下同)利用L波段雷达及无线电探空仪获取的探空资料(时间分辨率1 s，垂直分辨率5～8 m)以及施放气球前5 min人工观测的总云量资料；(3) YLU2型毫米波测云仪探测的云底、云顶高度资料(时间分辨率1 min，垂直分辨率30 m，有效观测高度15 km)；(4) 地面自动气象站降水现象仪探测的降水天气现象(时间分辨率1 min，可识别毛毛雨、雨、雨夹雪、雪、冰雹等降水类天气现象)。其中探空资料主要用于MWR温湿廓线的精度评估和订正，其余资料主要用于天气类别的判断。

本文使用2022年11月—2023年6月探测资料用于MWR温湿廓线的误差分析与订正方法研究，使用2023年7月探测资料用于订正方法的检验。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据匹配

由于MWR与探空的时间、高度分辨率不同，需要先对相应的数据进行时间与高度的匹配。目前，国内外常用的匹配方法主要有三种。一是使用08：00和20：00 MWR反演的温湿廓线数据与对应高度的探空数据进行比对(Xu et al.，2014)；二是在探空采样时间内(0—10 km，约30 min)，对MWR反演的所有温湿廓线数据按高度进行平滑处理，得到平均温湿廓线资料，再与对应高度的探空数据进行比对(张文刚等，2013)；三是以MWR探测的83个高度层为标准高度，选取最接近这83个高度层的探空数据，即为探空廓线数据；同时以探空气球到达83个高度层的时间作为时间标准，对于每组时间和高度，选取MWR最接近这个时间的观测时间，提取对应高度的MWR数据，即为MWR廓线数据(刘晓璐等，2019)。第三种方法由于充分考虑探空与MWR数据在时间和高度上的一致性，且能够减少MWR平滑处理对数据的影响，是近年来使用较多的处理方法，因此，本文采用该方法进行数据的匹配处理。

由于探空系统采用反应快的感应原件，数据采样频率高，探空气球在上升过程中的摆动会引起探测要素的波动，特别是在对流层的波动较大(姚雯和马颖，2015)。因此，为减少这种波动的影响，本文根据姚雯和马颖(2015)的研究方法以及微波辐射计的标准高度层，对探空秒数据以各标准高度为中心，在2 km以下及以上分别采取10点(约50 m)平滑和20点(约100 m)平滑处理。

#### 1.2.2 天气分类

国内外对MWR反演精度的评估研究表明，降水对MWR的反演精度影响较大(Xu et al.，2014)，有云时其反演精度会降低(王志诚等，2018)。为此，本文将全部样本分为晴天、云天(包括阴天)、雨天三类，以分析不同天气条件下的探测精度。

天气分类中综合考虑探空、测云仪以及人工对云的识别。(1) 晴天：探空、测云仪均未识别到云(探空识别云使用湿度阈值与梯度法相结合的云区边界识别算法(胡树贞等，2022))，且人工总云量不超过2成；(2) 云天：探空、测云仪均识别到云，且人工总云量为3～10成；(3) 雨天：探空从地面至10 km高空采样时间内自动气象站识别到降水天气现象时间达到10 min。对于探空识别到云而测云仪未识别到，或者探空未识别到云，而测云仪识别到的样本，则予以剔除。经数据处理后，从用于评估与订正研究的484组数据中共筛选出与探空匹配的晴天、云天及雨天廓线组分别为34组、200组、74组。

#### 1.2.3 评估与订正方法

本文以探空数据作为真实值，采用相关系数($R$)、平均偏差(MBE)以及均方根误差(RMSE)评估MWR反演的温湿廓线精度，$R$可以反映两者之间的相关程度MBE可以反映MWR温湿廓线偏离探空的情况，正值代表偏高，负值代表偏低，RMSE则反映MWR与探空之间的偏差，值越小则代表MWR与探空越接近。

在评估的基础上，本文订正方法是指以探空数据作为真实值，在三种天气条件下采用统计回归的方法分别构建线性拟合订正方程对微波辐射计反演的温湿度进行订正。

## 2 MWR温湿廓线的误差分析

已有研究指出MWR与探空湿度的相关系数存在较多高度层未通过0.01显著性水平检验(刘晓璐等，2019)，同时各地对MWR的评估结果不尽相同。为充分了解三种天气条件下三峡MWR反演的温湿廓线精度，分别对MWR温度、湿度进行整体误差分析及各高度层误差分析，并统计83个高度层的相关系数显著性水平检验情况，其中，样本数用$N$表示，相关统计参量包括$R$、MBE、RMSE。

### 2.1 总体误差分析

图1为晴天、云天、雨天三种天气条件下MWR与探空的温度、湿度整体对比结果，相关统计参量表示所有散点之间的整体误差，拟合线表示所有散点建立的线性拟合线，$y=x$线表示误差为0的线，拟合线位于$y=x$线上方代表MWR较探空偏小，位于下方则代表

MWR较探空偏大。由图可见，MWR与探空温度相关系数$R$在三种天气条件下均达到0.99，RMSE在云天(图1c)最高，这可能是由于云的分布不均匀导致两者探测结果差异的波动。晴天、云天、雨天MWR与探空湿度的$R$分别为0.8、0.69、0.66，可见晴天湿度吻合性优于云天、雨天；晴天湿度MBE (图1b)达12.84%，明显高于云天、雨天；三种天气条件湿度RMSE均较大，达到16%～20%，这与刘晓璐等(2019)研究四川南部山区得到的“MWP967KV型MWR晴天相对湿度总体MBE为10%，晴天、云天RMSE均达到18%”基本一致。从整体对比结果来看，三种天气条件MWR与探空温度一致性均较好；晴天MWR湿度较探空明显偏大，这可能是因为晴天探空湿度存在系统性偏小导致(Xu et al.，2015)；云天和雨天，湿度偏差有较大的波动，这可能是因为探空获取的湿度波动较大，具有较大不确定性(Xu et al.，2015)；

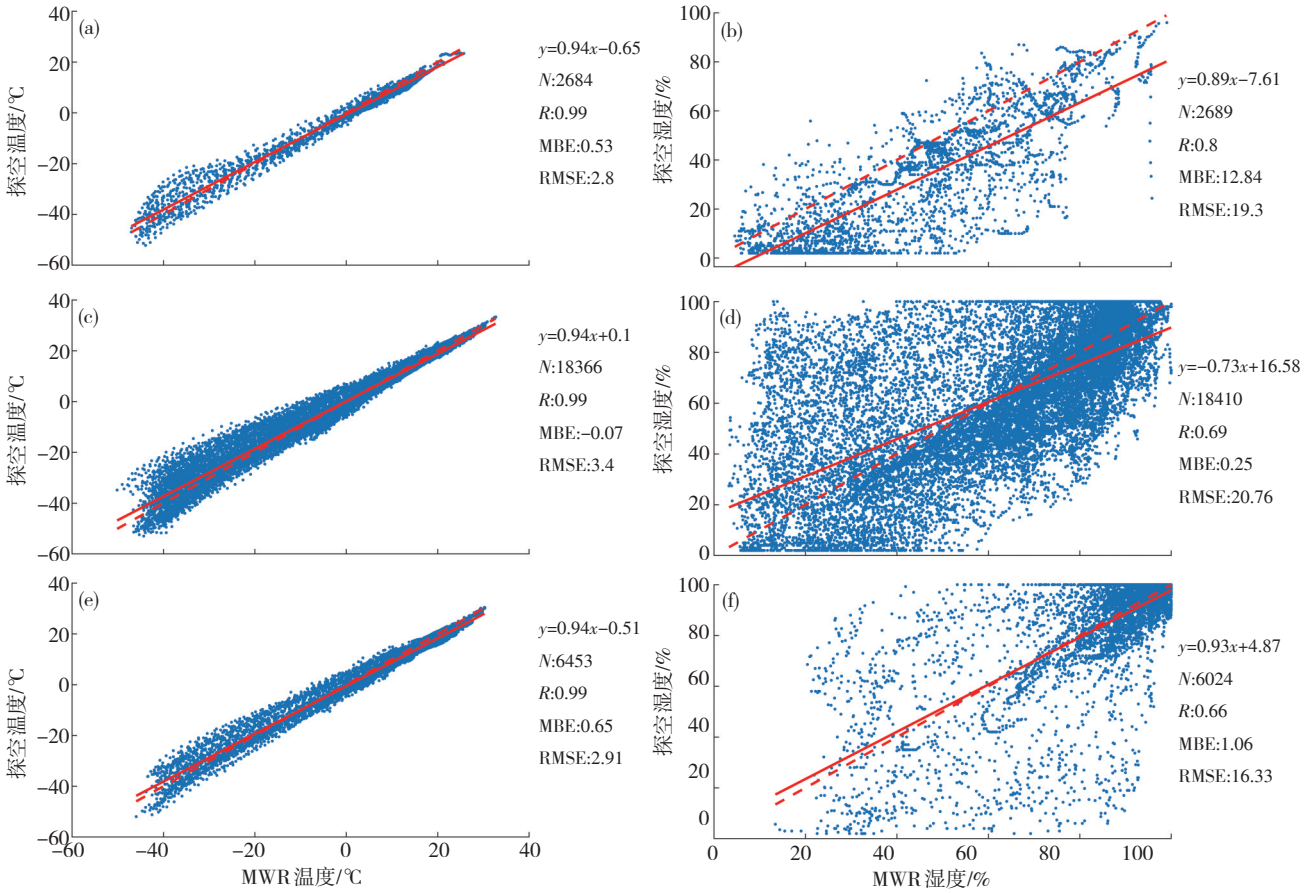



图1 三峡观象台2022年11月—2023年6月晴天(a，b)、云天(c，d)、雨天(e，f)条件下MWR与探空的温度(a，c，e)和湿度(b，d，f)散点图(红实线为拟合线，红虚线为$y=x$线)及相关统计参数

Fig. 1 Scatter plot and statistics of (a, c, e) temperature and (b, d, f) humidity of MWR and radiosonde on (a, b) sunny, (c, d) cloudy, and (e, f) rainy days at Three Gorges observatory from November 2022 to June 2023 (The red solid line and the red dashed line shows the fitting and $y=x$ lines, respectively)

## 2.2 各高度层误差分析

图2为三种天气条件下MWR与探空温度、湿度在83个高度层的对比结果。从中可知云天、雨天温度$R$(图2a)随高度逐渐减小，晴天则先随高度振荡减小至7.5 km高度处的0.4，后随高度逐渐增大，其中7～8 km处未通过显著性检验；三种天气条件下多数高度层温度MBE (图2c)在2 ℃以内，且低层为正偏，高层为负偏，其中晴天在6 km处转负偏，云天、雨天在4 km处转负偏，这可能是因为随着高度的上升，探空温度受太阳辐射的正偏影响逐渐增大(杨荣康等，2013)；三种天气条件下温度RMSE(图2e)总体随高度增大，最大分别为晴天6.1 ℃、云天7.2 ℃、雨天5.6 ℃。

湿度$R$(图2b)波动较大，晴天、云天在高层呈负相关，且晴天1.5 km以上、云天7.0 km以上及雨天1.5—5.0 km和9.0 km以上均未通过显著性检验，这可能是因为：(1) 样本量偏少(不区分天气条件时，各高度层均通过0.01显著性检验，图略)；(2) 大气湿度波动较大；(3) 晴天、云天气球的漂移导致高层探测环境的不同对湿度的影响较大(Xu et al.，2015)。晴天湿度MBE (图2d)在各高度层均为正偏，极大为2.25 km处的25.7%，这与刘晓璐等(2019)得到的“晴天除地面—0.05 km为负偏差，其余高度均为正偏差”基本一致，而云天、雨天湿度MBE在绝大多数高度低于10%；晴天湿度RMSE(图2f)随高度迅速增大至25.7%后

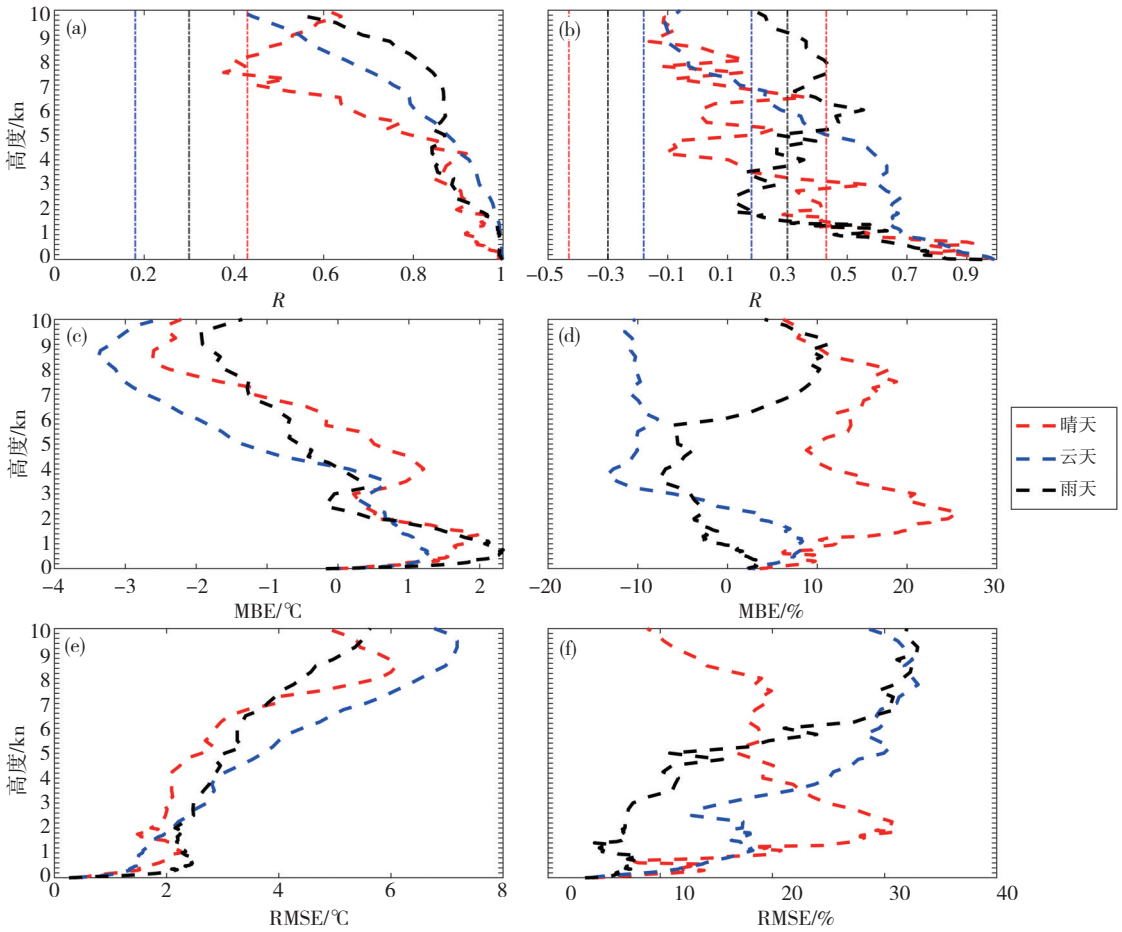



图2 三峡观象台2022年11月—2023年6月晴天、云天、雨天条件下MWR与探空温度(a, c, e)和湿度(b, d, f)的相关系数$R$ (a, b)、平均偏差MBE (c, d)以及均方根误差RMSE (e, f)垂直分布(a, b中红色、蓝色、黑色垂直线分别代表晴天、云天、雨天条件下的0.01显著性水平)

Fig. 2 Vertical distribution of (a, b) correlation coefficients ($R$), (c, d) mean deviations (MBE), and (e, f) root mean square errors (RMSE) for (a, c, e) temperature and (b, d, f) humidity of MWR and radiosonde on sunny, cloudy and rainy days at Three Gorges observatory from November 2022 to June 2023 (The red, blue, and black vertical lines in a, b represents the 0.01 significance level for sunny, cloudy, and rainy days, respectively)

随高度逐渐减小，而云天、雨天总体表现为随高度逐渐增大，且在6 km以上维持30%左右，明显较晴天大。

以上结果表明，三峡MWR与探空湿度$R$在三种天气条件下的绝大部分高度均未通过0.01显著性检验；三种天气条件下温度MBE较为合理，多数高度层在2 ℃以内；晴天湿度MBE明显较云天、雨天大，但云天、雨天条件下高层湿度RMSE明显高于晴天，说明云天、雨天时MWR高层湿度存在较大不确定性，导致与探空湿度偏差的波动较大。

## 3 MWR温湿廓线的订正方法

无线电探空仪随着气球的上升进行探测，探测精度为5～8 m，气球的摆动会造成探测要素的较大波动，湿度波动尤甚(姚雯和马颖，2015)，这可能是造成三峡MWR与探空湿度$R$在较多高度层未通过显著性检验的因素。因此，本文在订正研究中首先将地面—10 km高度分为近地层(0—2 km)、中层(2—6 km)以及高层(6—10 km)，并分别选用不同厚度对MWR的探测高度层重新分组，具体为(以中层为例)：(1) 选取一厚度$D$，则重新分组后的高度(km)区间分别为：(2, 2+$D$], (2+$D$, 2+2*$D$], ...(2+$i$*$D$, 6]；(2) 将各高度区间内所有高度层样本归为一组，最终可得到重新分组后的高度区间共$n$个；然后，针对各高度区间的样本，以探空数据为真实值，对MWR探测数据进行线性拟合，建立线性回归方程

$$Y_{ij}=a_{ij}\times X_{ij}+b_{ij} \tag{1}$$

式中$i$=1, 2, 3, 分别表示晴天、云天和雨天，$j$=1, 2, ……, $n$, 分别表示对83个高度层重新分组后的$n$个高度区间，$X$为MWR观测值，$Y$为探空观测值，斜率$a$和截距$b$为回归系数。

### 3.1 高度分层的厚度确定

图3给出选取的厚度从0.25 km变化至2.0 km时(以2.0 km以上MWR垂直分辨率0.25 km为步长)中层大气分组计算的MWR与探空温度(图3a、c、e)、湿度(图

3b、d、f)的$R$、MBE、RMSE分布情况。从相关系数统计结果(图3a,b)可以看到,晴天条件下随着厚度增加,温度$R$迅速增大,在1 km厚度处均达到0.8以上,而云天呈下降的趋势,雨天则基本维持不变;湿度$R$在晴天随厚度增大有所波动,总体上在1 km厚度时较大,云天、雨天时基本维持不变;从MBE、RMSE统计结果可见,随着厚度的增大,样本平滑程度增大,MBE、RMSE的变化范围随之减小,但总体偏差结果变化较小,仅在厚度达到1 km时云天温度偏差有增大趋势。以上结果表明,中层选取厚度1.0 km时,MWR与探空温度、湿度偏差较未分组变化较小,但吻合性更好,因此采用该方法在低层、高层分别选取厚度0.2 km、1.0 km进行分层。根据统计,除晴天8~10 km及云天9~10 km,分组后湿度$R$均通过0.01显著性水平检验,因此在该层选取厚度1.0 km进行分层。经重新分组,共形成18个高度区间。

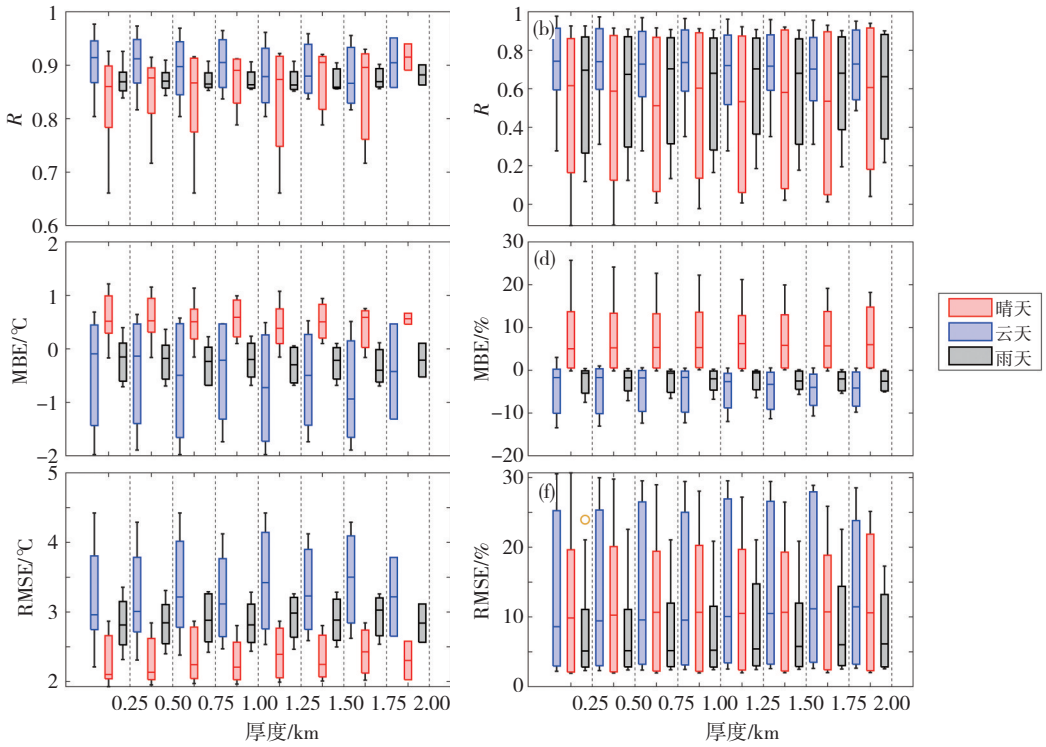



图3 三峡观象台2022年11月—2023年6月晴天、云天、雨天条件下厚度选择从0.25~2 km (步长0.25 km)变动时MWR与探空2~6 km高度的温度(a, c, e)和湿度(b, d, f)相关系数$R$ (a, b)、平均偏差MBE (c, d)、均方误差RMSE (e, f)箱线图

Fig.3 Boxplot of (a, b) correlation coefficients ($R$), (c, d) mean deviations (MBE), and (e, f) root mean square errors (RMSE) for (a, c, e) temperature and (b, d, f) humidity of MWR and radiosonde on sunny, cloudy and rainy days at 2 to 6 km with the thickness change from 0.25 to 2 km (steps is 0.25 km) at Three Gorges observatory from November 2022 to June 2023

### 3.2 各高度分层温、湿度订正关系

使用2022年11月—2023年6月的MWR与探空样本(以下简称建模样本),在重新分组后的18个高度区间分别建立温度、湿度线性回归方程,得到斜率$a$、截距$b$的垂直分布如图4,其中$a$可以表征相关性,越接近1说明相关性越高,$b$可以表征系统偏差,越偏离0说明系统偏差越大。可以看到温度、湿度相关性均在中低层较好,高层较差,但相较于温度订正回归系数斜率$a$随高度逐渐增大(图4a),湿度订正回归系数斜率$a$则随高度逐渐减小(图4c);从截距$b$的变化可以看到,相较于三种天气条件下温度的系统偏差在高层均较大,湿度系统偏差则在云天、雨天的中高层较大。

## 4 订正方法的适用性分析

为检验订正方法的订正效果,使用构建的线性回归方程对MWR反演的温湿廓线进行订正,分别统计不同天气条件下订正前后MWR与探空温度、湿度的RMSE分布情况,并使用一次雨雪过程探测的结果进一步讨论订正方法的适用性。

### 4.1 订正前后MWR温湿度的均方根误差分析

对MWR建模样本使用回归方程进行订正,订正前后的温度、湿度RMSE垂直分布如图5a、b。可见,经过订正,三种天气条件下温度RMSE均减小约1 ℃,湿度RMSE在晴天1.5 km以上订正效果较好,减小幅度达10%~15%,云天、雨天订正效果较差,减小幅度最大为5%左右。

为进一步检验订正的效果,使用2023年7月的数据(未找到晴天样本)作为检验样本,订正前后与探空温度、湿度的RMSE统计如图5c、d。可以看到,温度订正在4 km以上效果较为明显,云天、雨天减小幅度最大分别达4 ℃、2 ℃左右。湿度订正在3~5 km较为明显,减小

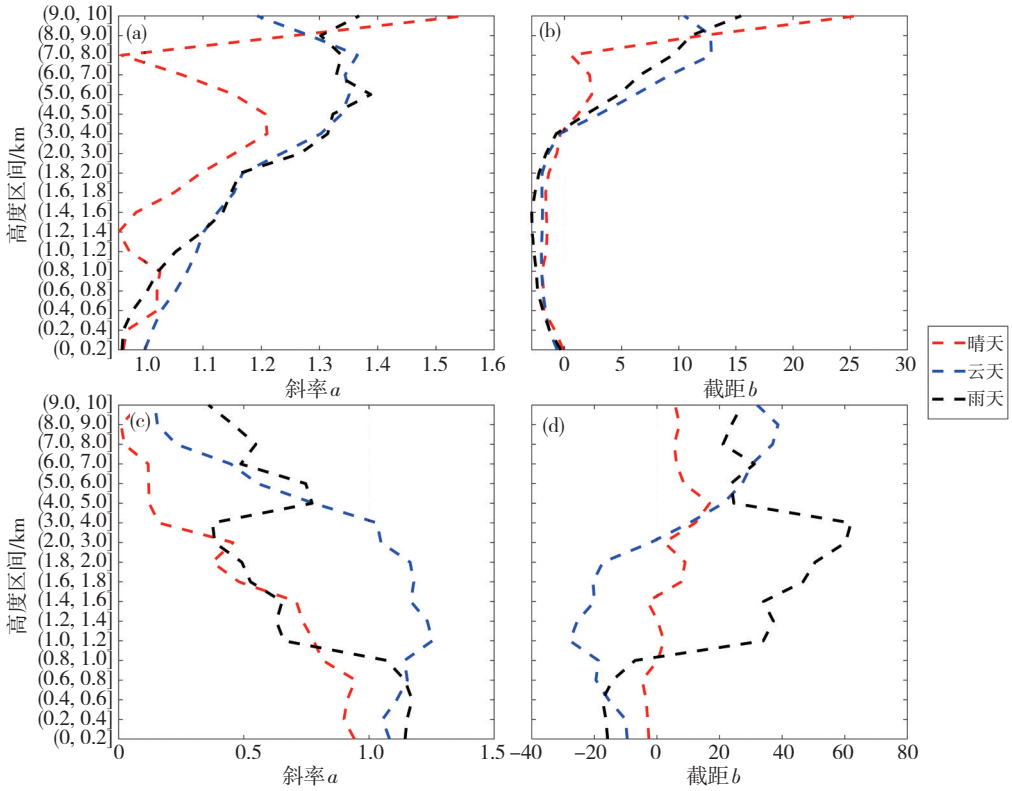



图4 三峡观象台2022年11月—2023年6月晴天、云天、雨天条件下温度(a，b)和湿度(c，d)的订正模型斜率$a$ (a，c)与截距$b$ (b，d)垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of the corrected model (a, c) slope $a$ and (b, d) intercept $b$ for (a, b) temperature and (c, d) humidity on sunny, cloudy and rainy day at Three Gorges observatory from November 2022 to June 2023

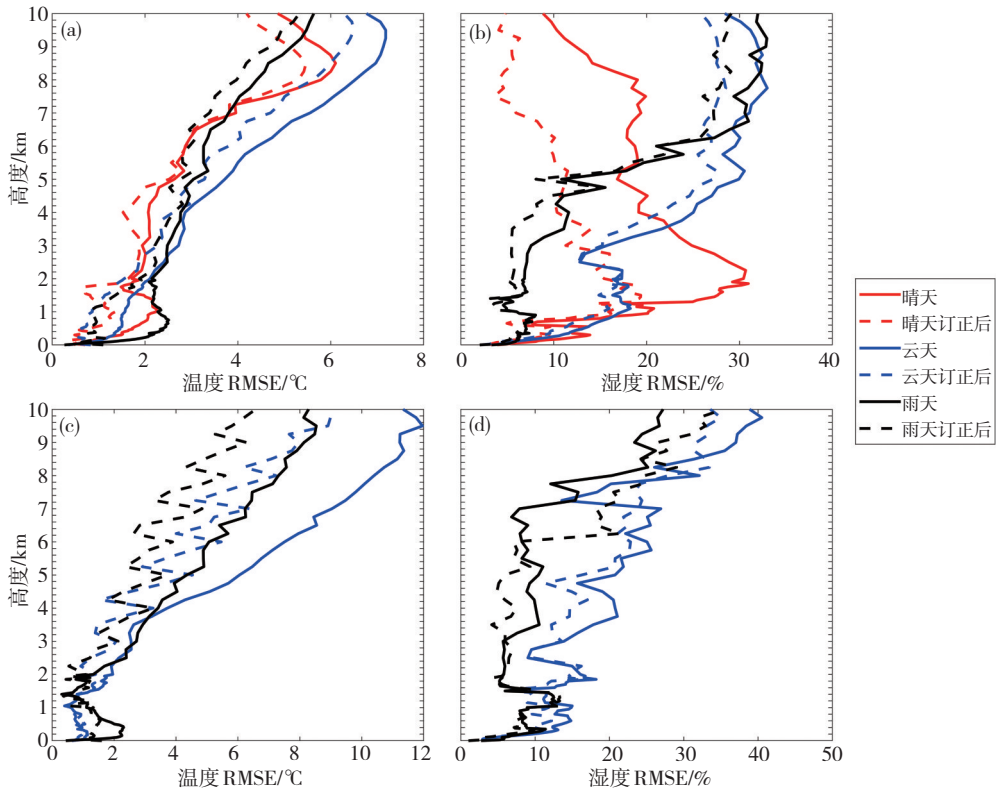



图5 三峡观象台2022年11月—2023年6月(a，b)及2023年07月(c，d)晴天、云天、雨天条件下订正前后MWR与探空温度(a，c)和湿度(b，d)的均方根误差垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of the root mean square error (RMSE) for (a, c) temperature and (b, d) humidity of MWR and radiosonde on sunny, cloudy, and rainy days before and after correction (a, b) at Three Gorges observatory from November 2022 to June 2023 and (c, d) in July 2023

幅度最大为6%左右，但在6 km以上，雨天订正后RMSE有所增大；对比图5b、d可知，雨天6 km以下建模样本与检验样本湿度RMSE均在10%左右，但6 km以上，建模样本湿度RMSE迅速增大至30%左右，而检验样本随高度逐渐增大至28%，这可能是2023年7月雨天云层较建模样本期间雨天云层更厚，根据测云仪统计建模样本与检验样本雨天平均云顶高度分别为6 708 m、10 113 m，导致6 km以上湿度RMSE差异较大，订正效果较差。

### 4.2 一次雨雪天气过程的MWR温湿廓线订正分析

2023年1月14日14:00—15日01:00三峡观象台出现时间较长的雨雪天气，降水持续约10 h。图6为14日08:00、20:00两次的探空温湿廓线以及毫米波测云仪探测的云底、云顶变化情况，其中冰相对湿度线、阈值线根据胡树贞等(2022)提出的探空云区边界识别算法计算求得，若冰相对湿度大于阈值，则代表探空气球处于云区。由图6a、b可知，探空识别的云底/云顶在08:00、20:00分别位于1 km/5 km、0.5 km/6.5 km，毫米波测云仪在同时段识别的云底/云顶分别位于0.5 km/5 km、0.2 km/6 km，两者基本一致，可认为当天毫米波测云仪对云的识别较准确。

图7、8为2023年1月14日11:00—15日01:00订正前后的MWR温湿度剖面图，图9为2023年1月14

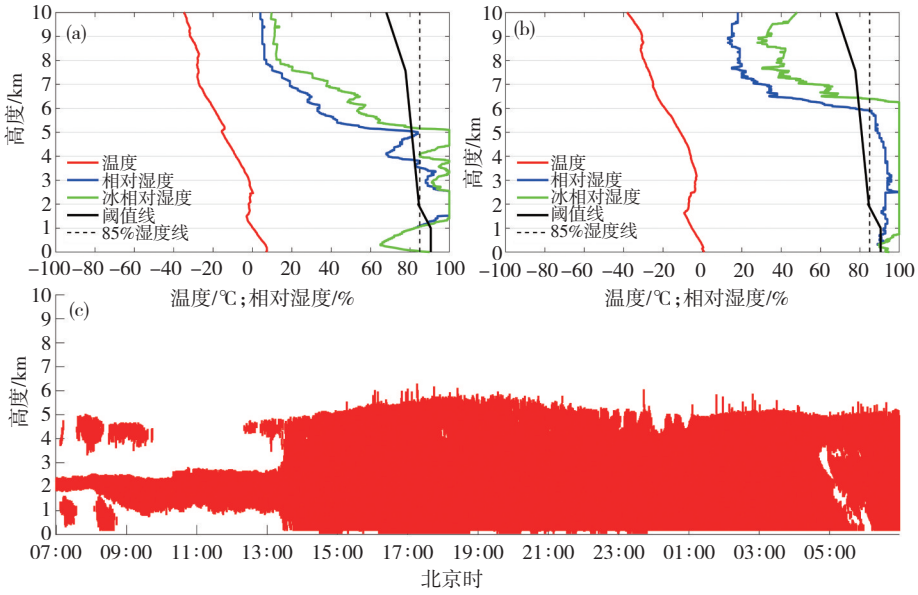



图6 三峡观象台2023年1月14日08:00(a)、20:00(b)探空的温度和湿度廓线及2023年1月14日07:00—15日07:00毫米波测云仪的云底、云顶高度演变(c)

Fig. 6 The temperature and humidity profiles of radiosonde at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT on January 14, 2023, and (c) the evolution of the cloud bottom and top height of millimeter wave cloud instrument at Three Gorges observatory from 07:00 BT on January 14 to 07:00 BT on January 15, 2023

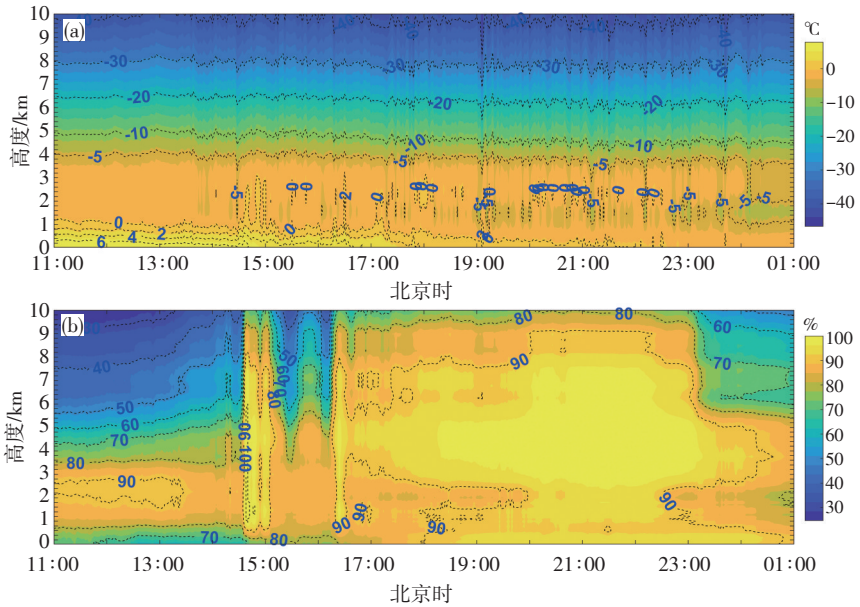



图7 三峡观象台2023年1月14日11:00—15日01:00 MWR的温度(a)和湿度(b)剖面图

Fig. 7 The (a) temperature and (b) humidity profiles of MWR at Three Gorges observatory from 11:00 BT on January 14 to 01:00 BT on January 15, 2023

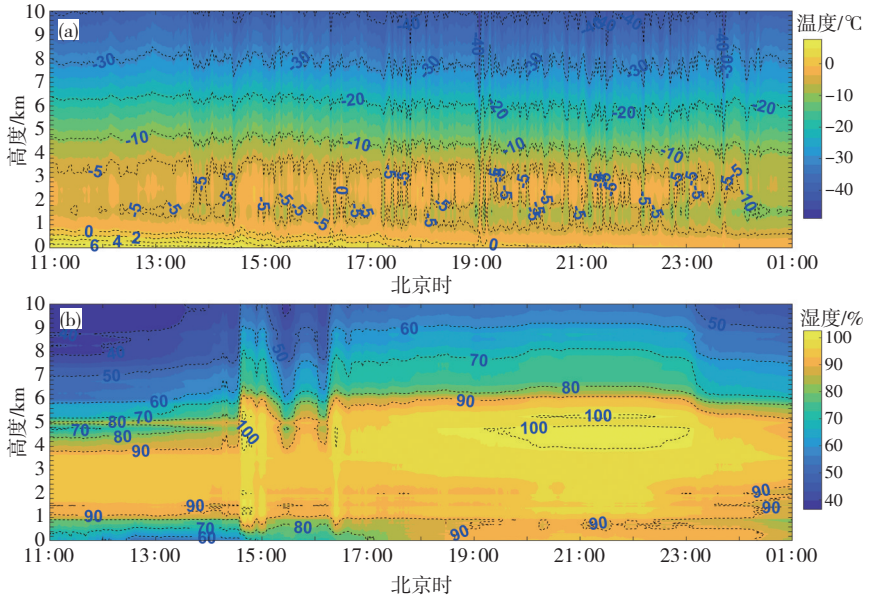



图8 三峡观象台2023年1月14日11:00—15日01:00 MWR订正后的温度(a)和湿度(b)剖面图

Fig. 8 The corrected (a) temperature and (b) humidity profiles of MWR at Three Gorges observatory from 11:00 BT on January 14 to 01:00 BT on January 15, 2023

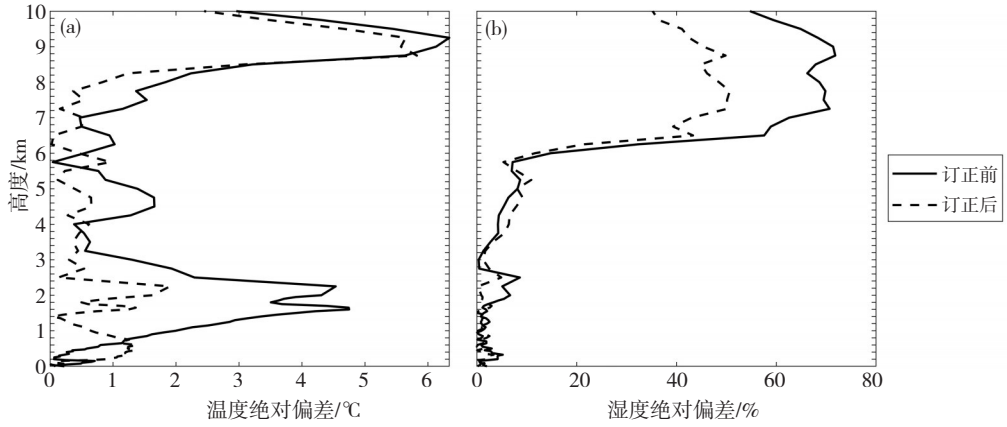



图9 三峡观象台2023年1月14日20:00订正前后MWR与探空温度(a)、湿度(b)的绝对偏差垂直分布

Fig. 9 The vertical distribution of absolute deviations of (a) temperature and (b) humidity of MWR before and after correction at Three Gorges observatory at 20:00 BT on January 14, 2023

日20:00订正前后MWR与探空温湿度的绝对偏差廓线。对比可知，在降水过程中的1～3 km高度，订正前MWR温度(图7a)存在部分0 ℃以上，与当日实况(地面气温自11:00起持续降温至0 ℃以下及20:00探空气温均在0 ℃以下)有所偏差，订正后(图8a)该现象得以消除，且20:00温度廓线订正后绝对偏差减少2 ℃左右(图9a)。订正前后MWR湿度差异较大，降水阶段订正前(图7b)显示整层均为高湿，与毫米波测云仪的云顶6 km及20:00探空湿度在6 km以上逐渐降至40%以下均有明显差异，而订正后(图8b)更符合实况：6 km以下为高湿区，6 km以上湿度逐渐下降至50%，且7 km以上湿度廓线订正后绝对偏差减少20%左右(图9b)。以上结果表明订正对该次雨雪过程温湿廓线的质量均有一定的提升，但需要指出的是，由于目前收集到的雨雪样本有限，该订正方法的效果是否有代表性和普适性，有待收集更多雨雪样本做进一步探讨验证。

## 5 结论与讨论

本文对三种天气条件下(晴天、云天、雨天)三峡MWR反演的温湿度与探空观测的$R$、MBE及RMSE进行了评估，并探讨了各高度层不同天气条件下MWR温度、湿度的订正方法，最后分析了订正方法的有效性。主要结论如下：

(1) 三种天气条件下三峡MWR与探空温度均有较好的一致性，多数高度层MBE在2 ℃以内，且MWR温度较探空在低层偏高，在高层偏低。湿度相关性较差，绝大多数高度未通过显著性检验；MWR湿度在晴天所有高度均高于探空，且多数高度层湿度MBE超过

10%；云天、雨天条件下MWR与探空湿度在6 km以上差异较大，RMSE达到30%左右。

(2) 在低层、中层、高层分别进行高度分组，有利于建立MWR与探空的显著性线性相关关系；采样线性回归方法对MWR进行订正后，温度RMSE减小1 ℃左右，湿度RMSE在晴天1.5 km以上减小10%～15%，云天、雨天最大减小5%左右。

(3) 在一次雨雪天气过程个例中，对MWR温湿廓线订正后，温湿剖面与其它探测资料更匹配，与天气实况更接近。

受设备与样本数量的局限，本文仅以探空为基准建立了三峡MWR的线性订正关系，可能受云层厚度变化的影响，检验样本6 km以上的湿度订正效果较差，如何根据云、降水对MWR的影响建立更完善的订正模型有待进一步研究。此外，三峡MWR安装初期的反演模型中使用探空资料为武汉历史探空资料，至2023年6月改用三峡观象台历史探空资料重新训练了反演模型，并对前期资料进行了更新，根据前后资料的统计，更换反演模型后，MWR反演的温度、湿度RMSE分别减小了2 ℃、15%左右，说明了反演模型的重要性。随着同期探空、微波辐射计、毫米波测云仪等探测数据的积累，后期的研究可从反演模型出发，结合多源资料建立更适用的反演模型，以改进微波辐射计反演性能，进一步提升其本地化使用价值。

## 参考文献(References)：


陈树成,李晓波,崔明,等.2021.不同天气条件下微波辐射计和风廓线雷达数据探测误差特征分析[J].气象与环境学报,37(1):67-72. Chen S C, Li X B, Cui M, et al. 2021. Error analysis of detection data of microwave radiometer and wind profiler radar under different weather conditions [J]. Journal of Meteorology and Environment,37(1):67-72 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2021.01.009

韩丰,杨璐,周楚炫,等.2021.基于探空数据集成学习的短时强降水预报试验[J].应用气象学报,32(2):188-199. Han F, Yang L, Zhou C X, et al. 2021. An experimental study of the short-time heavy rainfall event forecast based on ensemble learning and sounding data [J]. Journal of Applied Meteorological Science,32(2):188-199 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20210205

胡树贞,陶法,王志成,等.2022.基于L波段探空的云区边界识别改进算法[J].沙漠与绿洲气象,16(1):56-61. Hu S Z, Tao F, Wang Z C, et al. 2022. Improved algorithm for cloud boundary recognition based on L-band sounding [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(1):56-61 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.01.008

黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.2013.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,24(5):576-584. Huang Z Y, Xu G R, Wang X F, et al. 2013. Applications of ground-based microwave radiation data to short-term rainstorm and potential forecast [J]. Journal of Applied Meteorological Science,24(5):576-584 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.007

稽磊,黄梦宇,李书严,等.2012.探空气球漂移位置订正对一次大风降温过程的模拟研究[J].气候与环境研究,17(6):848-854. Ji L, Huang M Y, Li S Y, et al. 2012. Positioning of sounding balloon drifting associated with a gale process and temperature drop [J]. Climatic and Environmental Research,17(6):848-854 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.21

林晓萌,尉英华,张楠,等.2022.基于地基遥感设备构建遥感探空廓线[J].应用气象学报,33(5):568-580. Lin X M, Wei Y H, Zhang N, et al. 2022. Construction of air-sounding-profile system based on foundation-remote-sensing equipment [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(5):568-580 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20220505

刘超,花丛,张恒德,等.2017. L波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J].气象,43(5):591-597. Liu C, Hua C, Zhang H D, et al. 2017. Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer [J]. Meteorological Monthly,43(5):591-597 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.05.008

刘晓璐,刘东升,郭丽君,等.2019.国产MWP967KV型地基微波辐射计探测精度[J].应用气象学报,30(6):731-744. Liu X L, Liu D S, Guo L J, et al. 2019. The observational precision of domestic MWP967KV ground-based microwave radiometer [J]. Journal of Applied Meteorological Science,30(6):731-744 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20190609

王梧褚,董晓波,孙玉稳,等.2022.邢台地区微波辐射计与无线电探空仪数据对比分析[J].气象科技,50(3):344-354. Wang W J, Dong X B, Sun Y W, et al. 2022. Comparative analysis of microwave radiometer and radiosonde measurements in Xingtai area [J]. Meteorological Science and Technology,50(3):344-354 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20210364

王丽娟,王俊超,何明琼,等.2018.基于微波辐射资料的一次高速公路段强浓雾过程监测分析[J].暴雨灾害,37(4):330-336. Wang L J, Wang J C, He M Q, et al. 2018. Monitoring and analysis of heavy fog process in expressway section based on the microwave radiometer data [J]. Torrential Rain and Disasters,37(4):330-336 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.005

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, Zhang X F, Mao J J, et al. 2018. Comparison analysis on detection performance of ground-based microwave radiometers under different weather conditions [J]. Journal of Applied Meteorological Science,29(3):282-295 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20180303.

尉英华,王艳春,朱磊磊,等.2020.基于融合资料的天津短时强降水环境物理量可信度及特征分析[J].沙漠与绿洲气象,14(5):84-91. Wei Y H, Wang Y C, Zhu L L, et al. 2020. Confidence and characteristics of short-duration heavy rainfall environmental parameters based on merging data in Tianjin [J]. Desert and Oasis Meteorology,14(5):84-91 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2020.05.011

吴梦莹,鲍艳松,茆佳佳,等.2023.地基微波辐射计温湿资料的误差分析和订正研究[J].暴雨灾害,42(4):467-478. Wu M Y, Bao Y S, Mao J J, et al. 2023. Research on bias analysisand correction of temperature and humidity data with ground-based microwave radiometer [J]. Torrential Rain and Disasters,42(4):467-478 (in Chinese). doi:10.12406/

byzh.2023-005

吴兴洋,潘徐燕,周处强,等.2015.高空全月观测数据文件质控技术[J].气象科技.43(1):43-48. Wu X Y, Pan X Y, Zhou C Q, et al. 2015. Quality control technology of high-altitude all-month observation data files [J]. Meteorological Science and Technology,43(1):43-48 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2015.01.007

徐桂荣,张文刚,万霞,等.2019.地基微波辐射计反演的青藏高原东侧甘孜大气温湿廓线分析[J].暴雨灾害,38(3):238-248. Xu G R, Zhang W G, Wan X, et al. 2019. Analysis on atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,38(3):238-248 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.03.006

杨杰波,陈柯,徐桂荣,等.2022.基于微波辐射计观测亮温数据集的神经网络训练反演研究[J].暴雨灾害,41(4):477-487. Yang J B, Chen K, Xu G R, et al. 2022. Research on neural network training retrieval based on microwave radiometer observed brightness temperature data set [J]. Torrential Rain and Disasters, 41(4):477-487 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.012

杨荣康,戴伟,刘清惓,等.2013.探空温度传感器的太阳辐射误差研究[J].传感器与微系统,32(1):13-16. Yang R K, Dai W, Liu Q W, et al. 2013. Solar radiation error study of sounding temperature sensor [J]. Sensor and microphylogy System,32(1):13-16 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-9787.2013.01.004

姚雯,马颖.2015.秒级探空数据随机误差评估[J].应用气象学报,26(5):600-609. Yao W, Ma Y. 2015. Evaluation on the random error of second level sounding data [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 26(5):600-609 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20150509.

原榕,何佩仪,马旭林,等.2021.时间加密探空观测对分析和预报质量的敏感性研究[J].大气科学学报,44(6):909-917. Yuan R, He P Y, Ma X L, et al. 2021. Study on sensitivity of intensive temporal radiosonde observations to analysis and forecast quality [J]. Transactions Atmospheric Sciences,44(6):909-917 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200219012

张雪芬,王志诚,茆佳佳,等.2020.微波辐射计温湿廓线反演方法改进试验[J].应用气象学报,31(4):385-396. Zhang X F, Wang Z C, Mao J J, et al. 2020. Experiments on improving temperature and humidity profiles retrieval for ground-based microwave radiometer [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(4):385-396 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20200401

张文刚,徐桂荣,廖可文,等.2013.降水对地基微波辐射计反演误差的影响[J].暴雨灾害,32(1):70-76. Zhang W G, Xu G R, Liao K W, et al. 2013. Impact of precipitation on the retrieval deviation of ground-based microwave radiometer [J]. Torrential Rain and Disasters,32(1):70-76 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.01.010

周永水,原野,杨林,等.2022.晴空时微波辐射计温度廓线反演误差分析[J].暴雨灾害,41(6):720-726. Zhou Y S, Yuan Y, Yang L, et al. 2022. Bias analysis of retrieval profile of temperature with microwave radiometer in clear sky [J]. Torrential Rain and Disasters,41(6):720-726 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2020-194

Xu G R, Ware R, Zhang W G. 2014. Effect of off-zenith observations on reducing the impact of precipitation on ground-based microwave radiometer measurement accuracy [J]. Atmospheric Research,85-94. doi:10.1016/j.atmosres.2014.01.021

Xu G R, Xi B K, Zhang W G, et al. 2015. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,120(19):10313-10323. doi:10.1002/2015jd023438.

（责任编辑　张　文）