

张婷, 焦志敏, 茆佳佳, 等. 微波辐射计联合云雷达的相对湿度校正方法. 应用气象学报, 2024, 35(5): 551-563.

DOI: 10.11898/1001-7313.20240504

微波辐射计联合云雷达的相对湿度校正方法

张婷¹⁾ 焦志敏^{2)*} 茆佳佳²⁾ 张雪芬²⁾ 王彦霏¹⁾ 陈沛宇¹⁾ 金龙¹⁾

¹⁾(河北省气象技术装备中心, 石家庄 050000)

²⁾(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要

基于中国气象局大气探测试验基地地基遥感垂直廓线系统中云雷达与微波辐射计同址观测的优势, 使用 2021 年 8 月—2022 年 7 月毫米波云雷达、探空数据, 分析云雷达反射率因子与相对湿度特征关系, 提出联合云雷达的微波辐射计相对湿度分段校正方法, 实现云区微波辐射计相对湿度实时校正, 并利用 2023 年 1—8 月探空和 2023 年 7—8 月 ERA5(ECMWF reanalysis version 5)逐小时再分析数据进行误差分析。结果表明: 入云区的相对湿度与反射率因子间呈正相关关系, 云区中段相对湿度近似饱和状态, 出云区与入云区相对湿度随高度变化近似对称; 层状云条件下校正后微波辐射计与探空和 ERA5 相对湿度的均方根误差比校正前分别减小 7.99% 和 8.91%, 偏差中位数绝对值分别减小 12.62% 和 13.05%, 且连续观测时次经校正后误差均减小, 校正效果较好; 对流云条件下校正效果也较好, 但部分个例存在过度校正。因此, 联合云雷达的相对湿度分段校正方法能够实现微波辐射计相对湿度廓线的连续实时校正, 可提高有云条件下微波辐射计的观测质量。

关键词: 微波辐射计; 毫米波云雷达; 相对湿度; 云

引言

目前微波辐射计是获取大气垂直廓线的主要方式之一, 能够实现全天时探测反演高时空分辨率的温度、湿度廓线^[1-3], 可弥补常规探空因观测时间间隔较长导致的信息不足^[4], 在天气学研究、天气预报、人工影响天气、短期或临近灾害天气监测等方面具有重要意义^[5-7]。

近年国内引进多部地基微波辐射计用于探测大气温湿度廓线, 但受探测原理限制, 天气状况、季节背景和地面环境等均会影响其反演结果^[8-9], 尤其云的影响较大^[10-14], 因为微波辐射计自身配置的红外辐射仪组件仅能获取天空红外辐射亮温^[15], 其测云能力极为有限, 导致有云时微波吸收系数分布存在很大不确定性^[16-18]。同时, 云对湿度廓线的影响比对温度廓线的影响更大^[19]。因此, 提高有云条件下湿

度廓线的反演精度十分必要。为了提高云天反演大气廓线的效果, 人们将其他仪器所测得云信息用于反演。在国外, Frate 等^[20]利用 7 通道的微波辐射计, 通过添加激光云高仪的云底高度信息建立反演大气温度、湿度廓线的多元线性回归方程, 获得更高的反演精度。Löhnert 等^[21]将 95 GHz 云雷达、K 波段微波辐射计和激光云高仪联合持续观测, 结合微波辐射计反演的液态水含量、雷达反射率因子和云模型反演云中液态水廓线, 得到的液态水廓线均方根误差降低 10%~20%。Liljegren 等^[22]在亮温反演云液态水路径时, 使用毫米波云雷达或大气温度廓线测得的云温降低了反演偏差。在国内, 车云飞等^[13]在亮温反演大气湿度廓线时, 添加毫米波云雷达探测的云底高度、云层厚度信息, 建立反演模型, 提高了有云天气下微波辐射计的湿度廓线精度。丁虹鑫等^[23]提出在微波辐射计湿度反演模型中添加毫米波云雷达反射率因子, 得到的均方根误差较未

2024-03-21 收到, 2024-05-27 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2022YFC3004101), 中国气象局气象探测中心青年科技课题(MOCQN202211), 河北省气象局科研开发项目(24ky08)

* 通信作者, 邮箱: jiaozhim@163.com

添加反射率因子的结果减小 4.3%。马丽娜^[24]通过计算系统误差修正了云天亮温降低云辐射对辐射亮温观测的影响。

与近地面相比,微波辐射计在中高层的探测频点偏少,亮温反演过程中添加云信息后中高层的探测精度改进效果有限,仍无法满足业务的精度要求。地基遥感垂直廓线系统(包含毫米波云雷达、微波辐射计、气溶胶激光雷达、风廓线雷达、全球导航卫星系统气象观测设备)国家工程项目建设实现了毫米波云雷达与微波辐射计的同址连续观测,毫米波云雷达测时空分辨率高、探测精度高,结合湿度变化与云形成的关系,探索联合云雷达和微波辐射计开展相对湿度的综合质量控制方法研究,对于提高微波辐射计大气湿度廓线精度具有重要作用。本研究通过分析云雷达反射率因子与探空相对湿度间的关系,提出基于毫米波云雷达的相对湿度分段校正方法,实时校正微波辐射计相对湿度廓线,并以探空数据和 ERA5(ECMWF reanalysis version 5)逐小时再分析数据为参考,验证反演结果,为地基遥感垂直观测系统的效益发挥提供技术支撑。

1 数据

本研究主要使用 2021 年 8 月—2022 年 7 月毫米波云雷达、探空数据进行相对湿度特征分析及校正方法建模,采用 2023 年 1—8 月探空数据和 2023 年 7—8 月 ERA5 逐小时再分析数据对微波辐射计相对湿度校正前后结果进行误差分析。

地基微波辐射计数据来自设置于中国气象局大气探测试验基地的 RPG 型号 14 通道微波辐射计,其采用多路直接检波并行方式同时探测氧气通道(V 波段:50~60 GHz)和水汽通道(K 波段:22~32 GHz)各 7 个通道的亮温^[25],不同频点亮温数据时间一致且时间分辨率较高,一级亮温数据可达秒级,亮温精度为 0.5 K,2 min 获取 1 次垂直方向 83 层的温度、湿度、水汽密度廓线等数据,探测高度为距离地面 0~10 km。地基毫米波云雷达数据来自与微波辐射计同址安装的 YLU1 型全固态 Ka 波段毫米波云雷达,设备运行期间通过对雷达状态监控、机内定标、磁盘容量检查、数据传输检查、天线罩清理等进行日常维护,确保数据可靠性和准确性,该设备为垂直顶空观测模式,每分钟输出天顶方向 509 层的反射率因子、径向速度和速度谱宽等信息,空间

分辨率为 30 m,探测高度为 0~15 km^[26]。其中,云底高度、云顶高度主要通过对含有云层信息的云雷达基数据廓线进行云体识别提取,依据云雷达反射率因子的有无,在垂直方向检测云层,如上升下降沿检测,无云变有云为云底,有云变无云为云顶,并对多层云体进行合理的合并处理,提取每层云体的上边界作为云顶高度,云体的下边界作为云底高度,云体上下边界差值为云厚度。L 波段探空雷达数据来自北京市观象台的 GTS1 型数字探空仪,每日 07:15(北京时,下同)和 19:15 放球,01:15 和 13:15 加密观测,最大探测高度为 30 km,可输出垂直分辨率为 20 m 的温度、湿度、风、气压等数据^[27],具有探测精度高、采样速度快等优点,是目前气象观测业务中的权威数据。ERA5 是第 5 代欧洲中期天气预报中心(ECMWF)大气再分析全球气候数据集^[28-29],该数据集提供每小时大气、陆地和海洋气候变量的估计值,本研究选用与微波辐射计同址的逐小时 25 层的温度、气压、湿度、位势高度数据。

2 相对湿度特征与校正方法

2.1 匹配样本筛选

由于毫米波云雷达为垂直顶空观测模式,而探空观测多是斜升路径,二者观测数据难以在同一空间准确匹配,但对于大范围层状云,二者观测数据可在同一空间近似匹配。因此,利用 2021 年 8 月—2022 年 7 月云雷达、探空数据时,先剔除经纬度偏差大于全国平均值的探空数据(全国基本站平均纬向偏差(漂移量)为 0.617°,平均径向偏差(漂移量)为 0.14°^[30])。

在探空放球前后的 07:00—08:00、13:00—14:00、19:00—20:00 时段通过以下条件严格筛选层状云样本:①任意高度反射率因子大于 -41 dBZ,且小于 30 dBZ。②云底高大于 3 km(考虑毫米波云雷达通常在近地层存在异常回波干扰等问题)。③持续 1 h 连续时段的云,且连续 1 h 内各时次的云底高度与该小时内云底高度平均值的差值小于 1 km,同时,连续 1 h 内各时次的云顶高度与该小时内云顶高度平均值的差值小于 1 km。

对筛选的层状云条件下云雷达与探空数据进行时空匹配,其中云雷达在探空放球时段 07:15—07:45、13:15—13:45、19:15—19:45 内数据的平均值分别对应探空 08:00、14:00、20:00 的数据。在此

基础上,共得到 29 个时次的层状云条件下匹配样本,为云雷达的微波辐射计相对湿度特征分析和校正方法建模提供最优样本基础。

2.2 云区相对湿度特征

图 1 为云区探空相对湿度与云雷达反射率因子的相关性。由图 1 可见,雷达反射率因子与探空相对湿度的相关系数为 0.47(达到 0.05 显著性水平),整体上相关性较低。这可能因为用于垂直观测

的云雷达为 Ka 波段毫米波云雷达,其观测对象主要为水汽凝结成的较小云滴,在云中层,云滴浓度高,反射率因子大,相对湿度基本饱和;在入云部位,水汽开始发生凝结,云滴浓度随高度逐步增加,相对湿度与反射率因子呈正相关;在出云部位,云滴浓度随高度逐步减少,相对湿度与反射率因子呈负相关。因此,综合分析云区相对湿度和反射率因子,可能导致整体上相关性系数偏小。

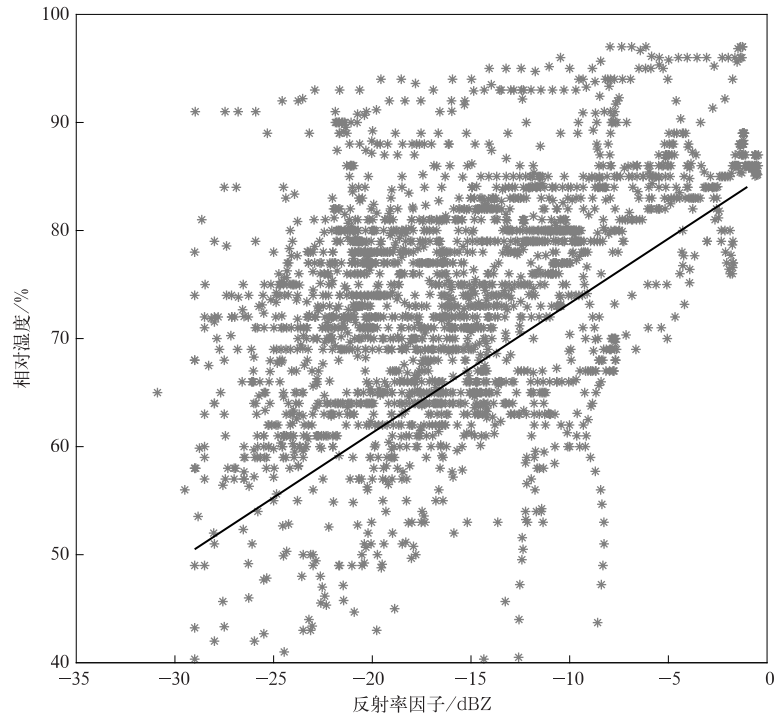


图 1 云区探空相对湿度与云雷达反射率因子关系

Fig. 1 Relationship between relative humidity of radiosonde and reflectivity factor of cloud radar in cloud

分析冰面和液面条件下探空相对湿度和云雷达反射率因子随高度的变化趋势,其中,冰面的相对湿度按照冰面饱和水汽压计算,即当气温低于 0°C 时,利用 Goff-Gratch 公式计算探空的水面和冰面饱和水汽压,二者比值乘实测相对湿度;液面相对湿度为大气相对湿度探空廓线。图 2 为 2021 年 8 月 7 日 08:00 和 2021 年 10 月 14 日 20:00 个例分析。由图 2 可见,云区相对湿度随高度先上升后趋于稳定,最后下降,因此对云区相对湿度分为入云区、云区中段和出云区 3 段进行特征分析。

2.2.1 入云区特征

确定入云区的起始和终止高度。入云区起始高度为云底所在高度。由于选取的云层均在 0°C 以

下,故采用相对湿度(冰面)探空数据统计开始饱和高度与最大反射率因子所在高度的偏差,二者偏差为 $-240\sim 90\text{ m}$,偏差中位数为 -60 m ,偏差相对于云层厚度可忽略不计。由此可见,相对湿度开始饱和高度可认为是反射率因子最大值所在高度,将云雷达反射率因子从云底所在高度到最大值所在高度记为入云区。

图 3 为入云区探空相对湿度与云雷达反射率因子的关系。由图 3 可见,入云区探空相对湿度和云雷达反射率因子均随高度增大而增大,二者相关系数为 0.68(达到 0.05 显著性水平)。

2.2.2 云区中段特征

由于相对湿度开始饱和高度即为反射率因子最

大值所在高度,将反射率因子最大值所在高度至云顶所在高度记为云区中段。统计样本云区中段探空相对湿度(冰面)及温度分布特征,由图 4 可知,云区

中段温度均小于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,中位数为 $-30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,以冰相云为主,相对湿度(冰面)主要分布在 $95\% \sim 100\%$,中位数为 100% ,由此可见,云区中段相对湿

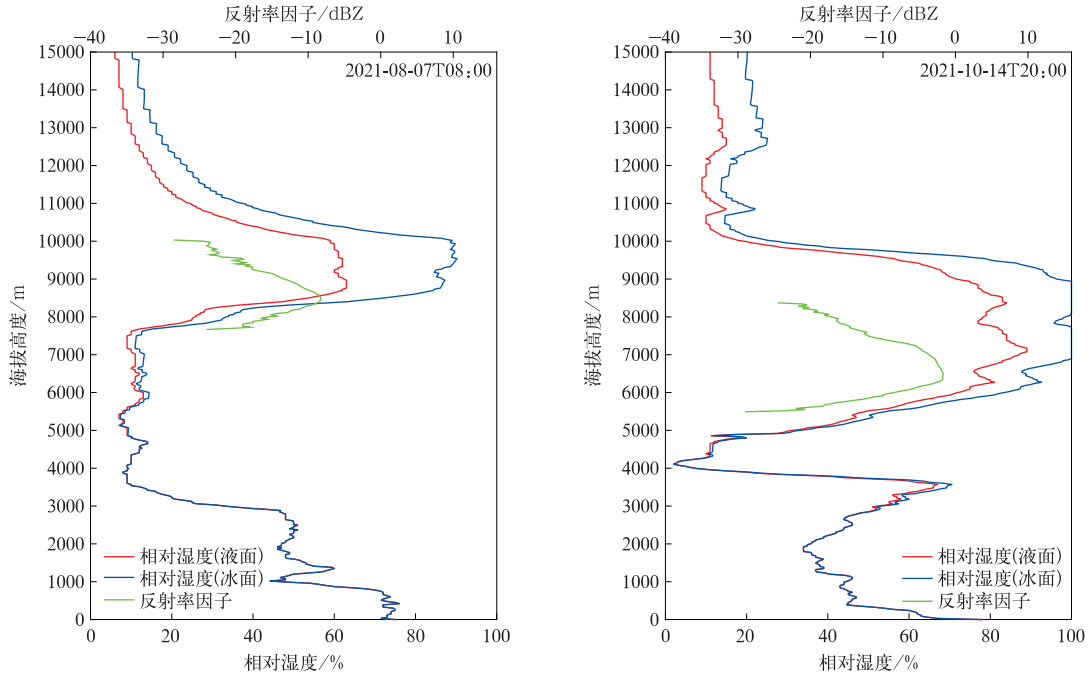


图 2 2021 年 8 月 7 日 08:00 和 10 月 14 日 20:00 探空相对湿度和云雷达反射率因子廓线
 Fig. 2 Relative humidity profiles of radiosonde and reflectivity factor of cloud radar at 0800 BT 7 Aug and 2000 BT 14 Oct in 2021

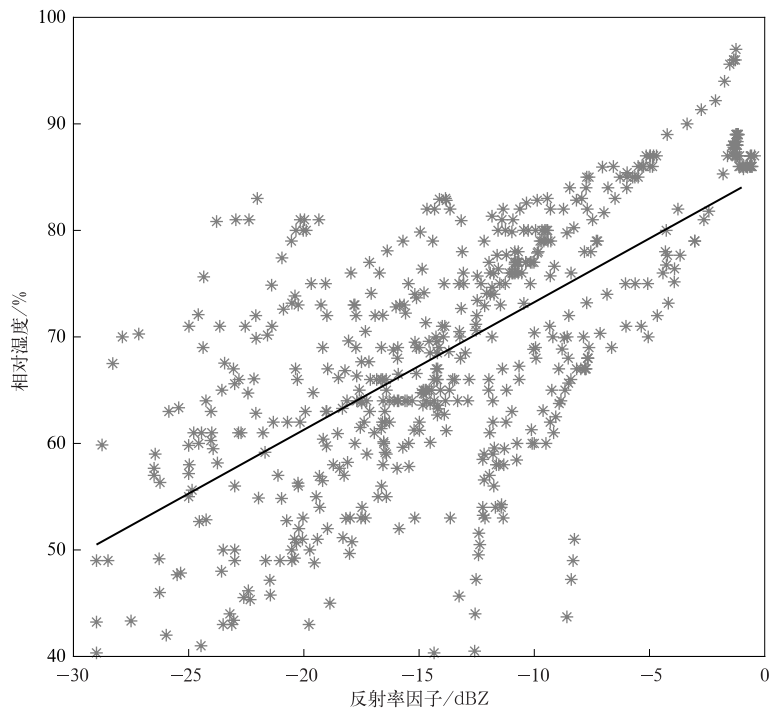


图 3 入云区探空相对湿度与云雷达反射率因子的关系
 Fig. 3 Relationship between relative humidity of radiosonde and reflectivity factor of cloud radar in cloud-entering region

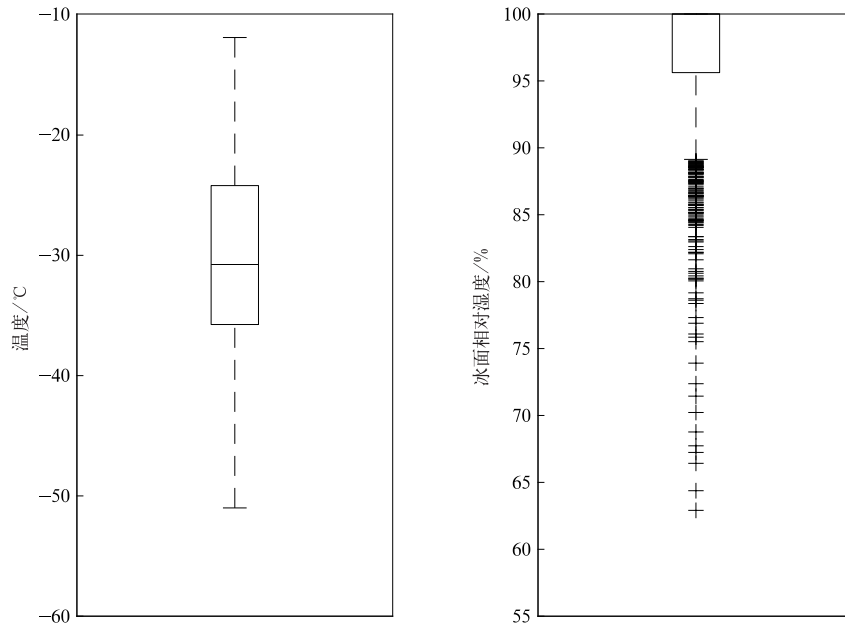


图 4 云区中段探空温度和冰面相对湿度箱线图

Fig. 4 Box plots of temperature and relative humidity on ice surface of radiosonde in middle part of cloud

度近似呈饱和状态。

2.2.3 出云区特征

由图 2 个例分析可以看到,云区相对湿度呈增大-近饱和-减小的变化特征,湿度增大区域(入云区)和湿度减小区域(出云区)可能存在对称关系。因此,首先统计出云区垂直距离与入云区垂直距离是否相等,从而确定出云区高度范围。主要步骤包括:①计算入云时相对湿度 f_1 和高度 H_1 。②计算出云顶后相对湿度首次降低至 $(f_1 - 5\%, f_1 + 5\%)$ 区间内最接近 f_1 时的高度 H_2 ,同时为保证出云区和入云区是同一层云,剔除 H_2 大于 10 km 的样本。③分别计算 H_1 至最大反射率因子所在高度的垂直距离 ΔH_1 ,及云顶至 H_2 的垂直距离 ΔH_2 。④计算

ΔH_1 和 ΔH_2 的差值。统计可知, ΔH_1 和 ΔH_2 差值中位数为 -60 m,二者差值相对于云层厚度可忽略不计。由此可知,出云区与入云区垂直距离近似相等。

对探空出云区和入云区的高度进行归一化处理,对比出云区和入云区相对湿度随归一化后高度的变化情况,从而确定出云区与入云区是否满足对称关系。由图 5 可见,出云区和入云区相对湿度与归一化后高度的相关系数分别为 -0.45461 和 0.48774(均达到 0.05 显著性水平),线性拟合函数斜率分别为 -0.010929 和 0.0093794,绝对值近似相等,由此说明出云区与入云区随高度变化近似呈对称关系。

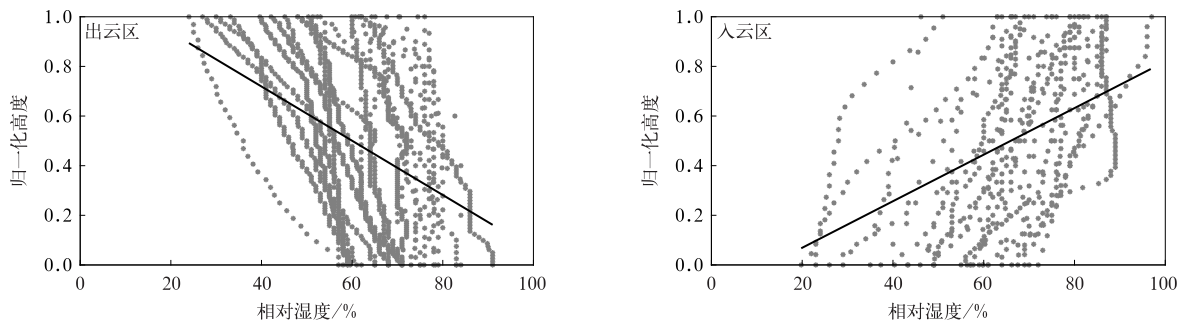


图 5 探空出云区和入云区相对湿度与归一化高度关系

Fig. 5 Relationship between relative humidity of radiosonde and normalized height in cloud-exiting and cloud-entering regions

2.3 相对湿度分段校正方法

基于上述特征分析,提出联合毫米波云雷达的微波辐射计相对湿度分段校正方法,用于提高有云条件下微波相对湿度的观测质量。

2.3.1 数据预处理

将微波辐射计、毫米波云雷达数据进行时空一致性匹配,鉴于毫米波云雷达通常在近地层存在异常回波干扰,多层云情况下存在相对湿度的过度校正等问题,根据云雷达反射率因子廓线,在有云情况下查找云底高度超过3 km且反射率因子最大值所在云层为主层云。

2.3.2 入云区建模

主层云的反射率因子从云底所在高度到最大值所在高度记为入云区,建立入云区相对湿度关于反射率因子的线性函数,拟合公式为

$$f_{in} = a \times Z_{in} + b. \quad (1)$$

式(1)中: f_{in} 、 Z_{in} 分别为入云区微波辐射计相对湿度(单位:%)、云雷达反射率因子(单位:dBZ); $a = 1.1977, b = 85.2344$ 为拟合系数(量纲为1),通过2.1节样本入云区探空相对湿度和云雷达反射率因子拟合得到。

2.3.3 云区中段建模

主层云反射率因子最大值所在高度至云顶所在高度记为云区中段。当该高度区间温度为 0°C 以下时,相对湿度利用冰面饱和相对湿度公式计算得到,见式(2)~(4),当该高度区间温度大于 0°C 时,相对湿度 f_{mid} 记为100%。

$$\begin{aligned} \lg E_w = & 10.79574 \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - \\ & 5.028 \times \lg \frac{T}{T_0} + 1.50475 \times 10^{-4} \times \\ & [1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right)}] + 0.42873 \times 10^{-3} \times \\ & [10^{4.76955 \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)} - 1] + 0.78614, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lg E_i = & -9.09718 \times \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) - 3.56654 \times \\ & \lg \frac{T_0}{T} + 0.876793 \times \left(1 - \frac{T}{T_0} \right) + \lg 6.1071, \quad (3) \end{aligned}$$

$$f_{mid} = \frac{E_i}{E_w}. \quad (4)$$

式(2)~(4)中: E_w 为水面饱和水气压(单位:hPa), T_0 为微波辐射计近地面温度(单位:K), T 为云区中段微波辐射计温度(单位:K), E_i 为冰面饱和水气压(单位:hPa), f_{mid} 为云区中段微波辐射计相对湿度(单位:%)。

2.3.4 出云区建模

建立入云区相对湿度与高度的线性关系(式(5)),求得入云区拟合系数。

$$f_{in} = a_1 \times H_{in} + b_1. \quad (5)$$

式(5)中: f_{in} 为公式(1)中入云区微波辐射计相对湿度(单位:%), H_{in} 为入云区微波辐射计高度(单位:m); a_1, b_1 为入云区拟合系数(量纲为1),通过入云区微波辐射计相对湿度、高度实时数据拟合得到。

由于出云区和入云区的相对湿度随高度的变化趋势关于某一高度对称,则对称轴高度 H_{mid} 为反射率因子最大值所在高度至云顶高度的中值(见式(6))。

$$H_{mid} = \frac{(H_{max} + H_{top})}{2}. \quad (6)$$

式(6)中: $H_{mid}, H_{max}, H_{top}$ 分别为对称轴高度(单位:m)、反射率因子最大值所在高度(单位:m)、云顶高度(单位:m)。

利用入云区拟合公式(5),建立出云区关于对称轴 $H = H_{mid}$ 对称的拟合公式(7)。

$$f_{out} = b_1 - a_1 \times (H_{out} - 2 \times H_{mid}). \quad (7)$$

式(7)中: f_{out}, H_{out} 分别为出云区微波辐射计相对湿度(单位:%)和高度(单位:m)。

2.3.5 数据后处理

非云区采用微波辐射计原始相对湿度,将非云区与云区相对湿度合并,对云区与非云区衔接处上下2个距离库(含入云点和出云点,共5个点)进行滑动平均,得到微波辐射计校正后的整层相对湿度廓线。

3 方法验证及误差分析

基于上述相对湿度分段校正方法,利用2023年1—8月毫米波云雷达反射率因子对微波辐射计云区相对湿度进行校正,并利用2023年1—8月探空数据和2023年7月1日—8月10日ERA5逐小时再分析数据对层状云条件下微波辐射计相对湿度校正前后的结果进行验证及误差分析,并通过人工挑选对流云个例,探讨该方法在对流云条件下的适用性。

3.1 层状云条件下误差分析

3.1.1 统计分析

利用2023年1—8月探空数据对层状云条件下微波辐射计云区相对湿度校正前后结果进行误差分析。由于该时段内微波辐射计数据缺测略多,通过时空匹配共筛选到36个层状云样本。图6为层状云条件下校正前后微波辐射计与探空相对湿度偏

差。由图 6 可见,相对湿度偏差中位数由校正前的 -14.33% 升至校正后的 1.71% ,偏差中位数绝对值减小 12.62% 。均方根误差由校正前的 26.11% 降至校正后的 18.11% ,降低了 7.99% , 72.22% 样本的微波辐射计相对湿度校正后均方根误差较校正前降低(图略)。

利用 2023 年 7 月 1 日—8 月 10 日 ERA5 逐小时数据对层状云情况下云区微波辐射计相对湿度校正前后结果进行验证及差分析。通过时空匹配共筛选得到 128 个层状云样本。图 7 为层状云条件下校正前后微波辐射计与 ERA5 相对湿度偏差。由图 7 可见,相对湿度偏差中位数由校正前的 -26.73% 升

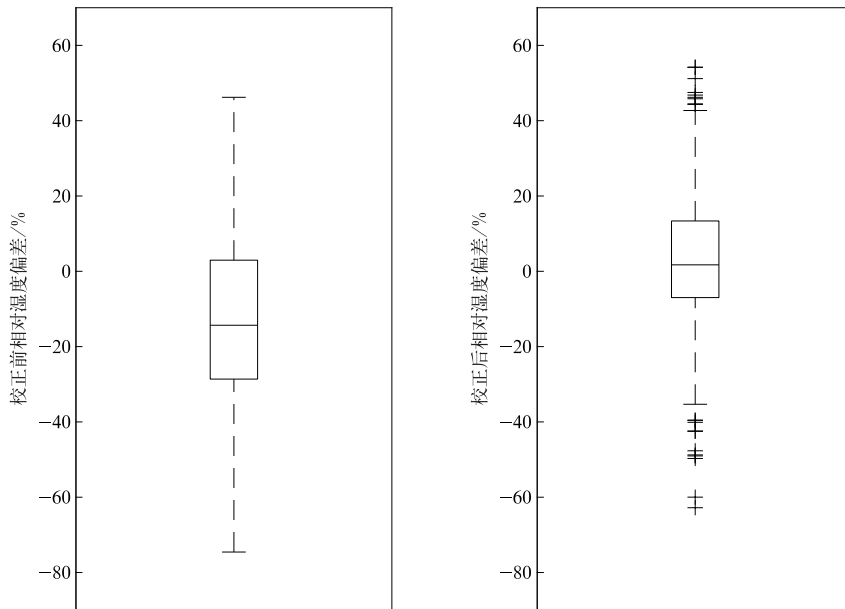


图 6 2023 年 1—8 月层状云条件下校正前后微波辐射计与探空相对湿度偏差箱线图
Fig. 6 Box plots for relative humidity deviation of microwave radiometer before and after correction to radiosonde under stratiform cloud from Jan to Aug in 2023

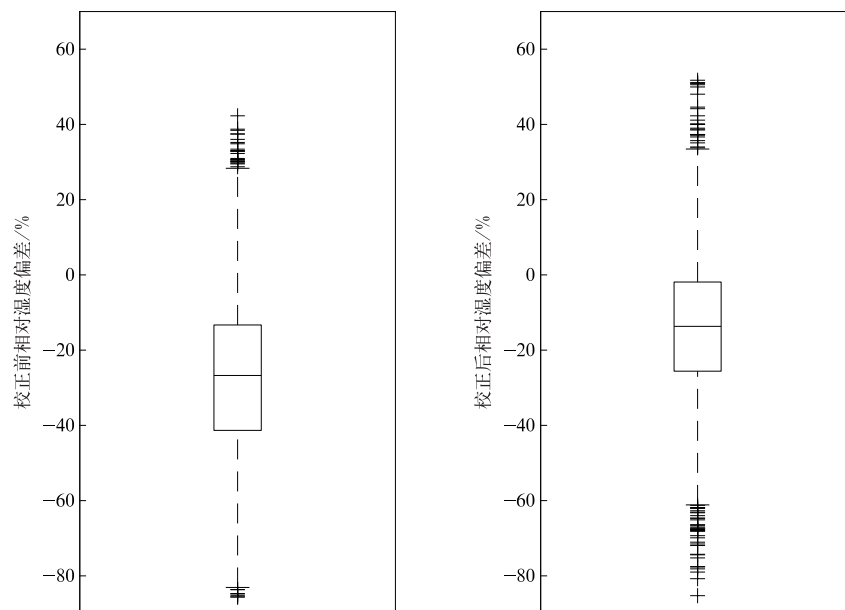


图 7 2023 年 7 月 1 日—8 月 10 日层状云条件下校正前后微波辐射计与 ERA5 相对湿度偏差箱线图
Fig. 7 Box plots for relative humidity deviation of microwave radiometer before and after correction to ERA5 under stratiform cloud from 1 Jul to 10 Aug in 2023

至校正后的 -13.68% , 偏差中位数绝对值减小了 13.05% 。均方根误差由校正前的 35.21% 降至校正后的 26.30% , 降低了 8.91% , 83.60% 样本的微波辐射计相对湿度校正后均方根误差较校正前降低

(图略)。

图 8 为 2023 年 7 月 28 日 08:00—29 日 10:00 连续云天条件下校正前后微波辐射计云区与 ERA5 相对湿度的均方根误差。由图 8 可见, 91.67% 层状

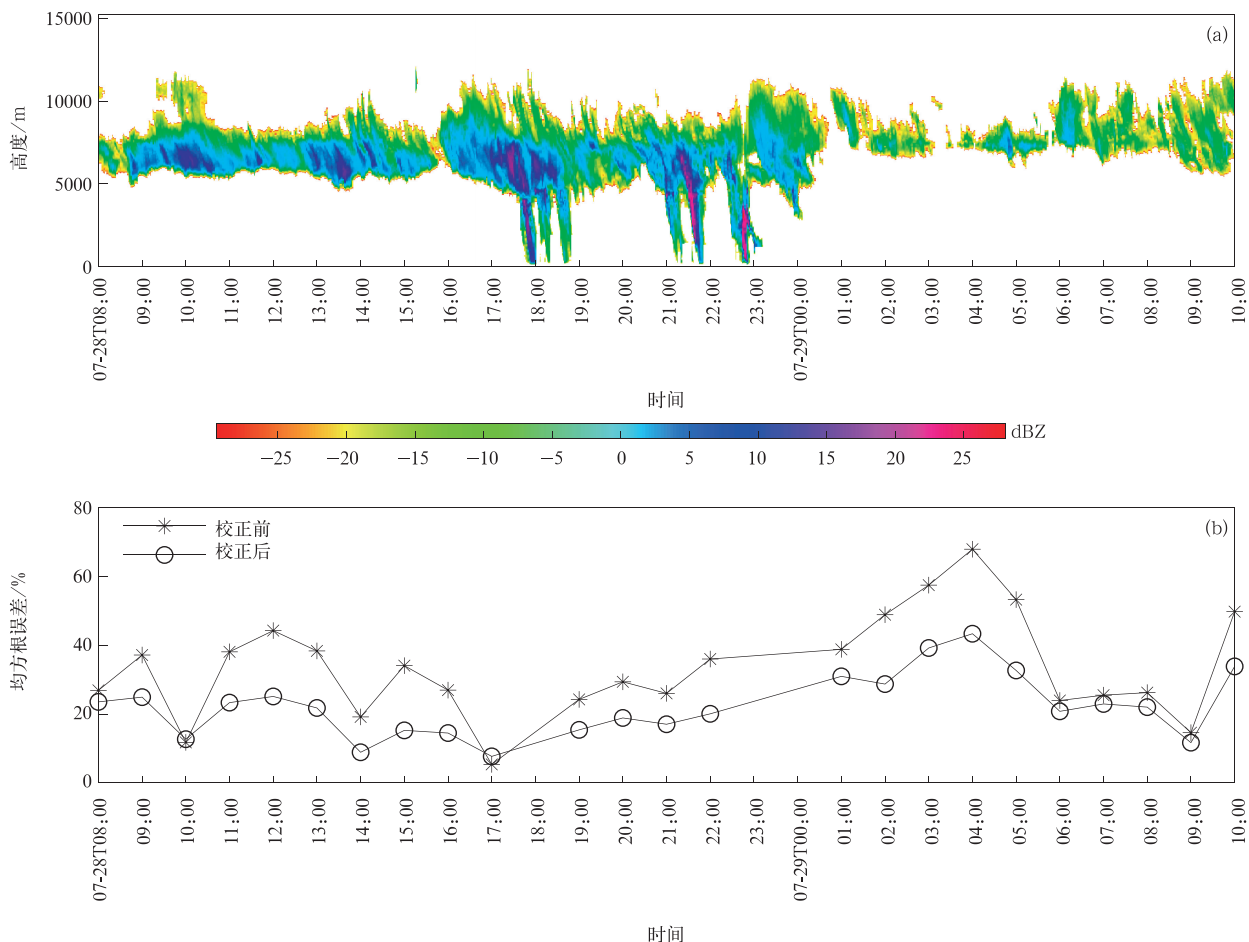


图 8 2023 年 7 月 28 日 08:00—29 日 10:00 连续云天条件下云反射率因子(a)和校正前后微波辐射计与 ERA5 相对湿度的均方根误差(b)

Fig. 8 Reflectivity(a) and relative humidity root mean square error of microwave radiometer before and after correction to ERA5(b) under continuous cloudy sky from 0800 BT 28 Jul to 1000 BT 29 Jul in 2023

云样本的均方根误差校正后比校正前减小。

无论与探空数据还是 ERA5 逐小时再分析数据对比,层状云条件下微波辐射计相对湿度校正后比校正前均方根误差、偏差中位数绝对值均减小,且校正后偏差更趋近于 0。由此可见,该校正方法用于层状云效果较好,用于连续时次相对湿度的校正效果较好。

3.1.2 个例分析

利用相对湿度分段校正方法,分析 2023 年 3 月

7 日 20:00 和 7 月 27 日 23:00 层状云条件下微波辐射计相对湿度校正结果与探空、ERA5 逐小时数据的对比,如图 9 所示。由图 9 可见,探空和 ERA5 相对湿度对云响应均很灵敏,其变化趋势与云雷达反射率因子变化趋势较一致,但微波辐射计相对湿度校正前对云响应灵敏度较差,在云区的波动幅度很小。校正后云区微波辐射计相对湿度比校正前增大,与探空和 ERA5 相对湿度在垂直方向上的变化趋势和数值更接近。

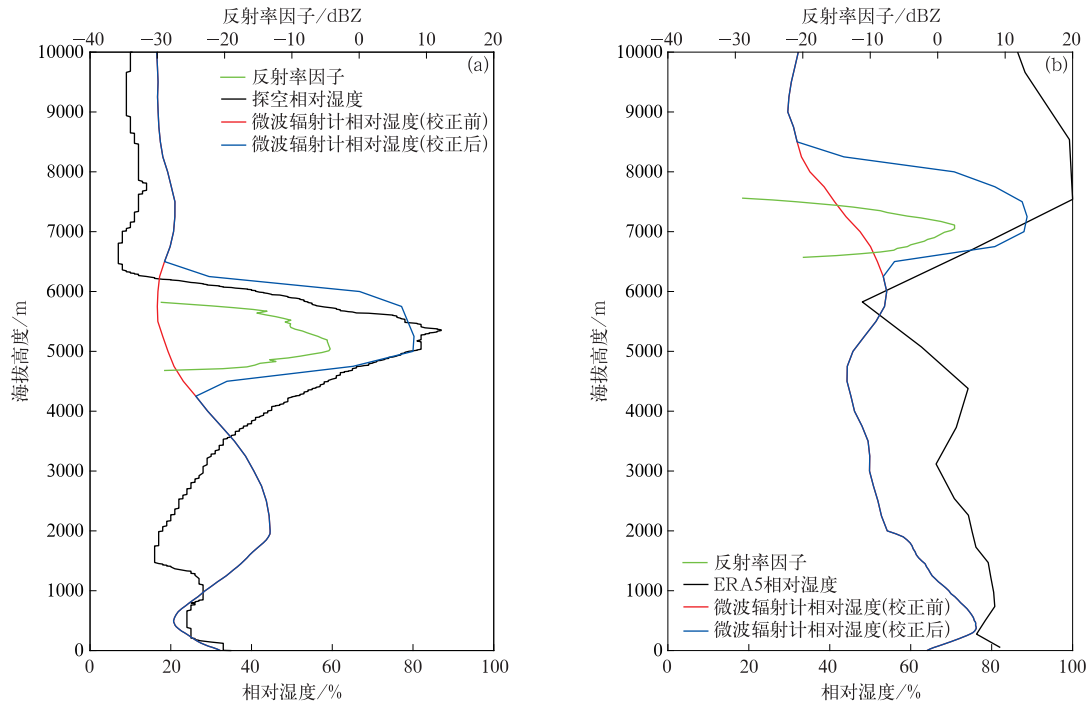


图 9 层状云条件下校正前后微波辐射计与探空(a)和 ERA5(b)相对湿度对比
 Fig. 9 Relative humidity comparison of microwave radiometer before and after correction and radiosonde(a) and ERA5(b) under stratiform cloud

3.2 对流云情况下适用性

通过人工挑选对流云个例,并分别与探空和 ERA5 数据进行时空匹配,分别得到 11 个和 22 个对流云样本。图 10 和图 11 分别为对流云条件下校正前后云区微波辐射计与探空和 ERA5 相对湿度

的偏差。由图 10 可见,相对湿度偏差中位数由校正前的一22.07%升至校正后的 8.64%,偏差中位数绝对值减小了 13.43%。均方根误差由校正前的 30.28%降低至校正后的 22.96%,降低了 7.32%, 81.81%样本的云区微波辐射计相对湿度校正后均

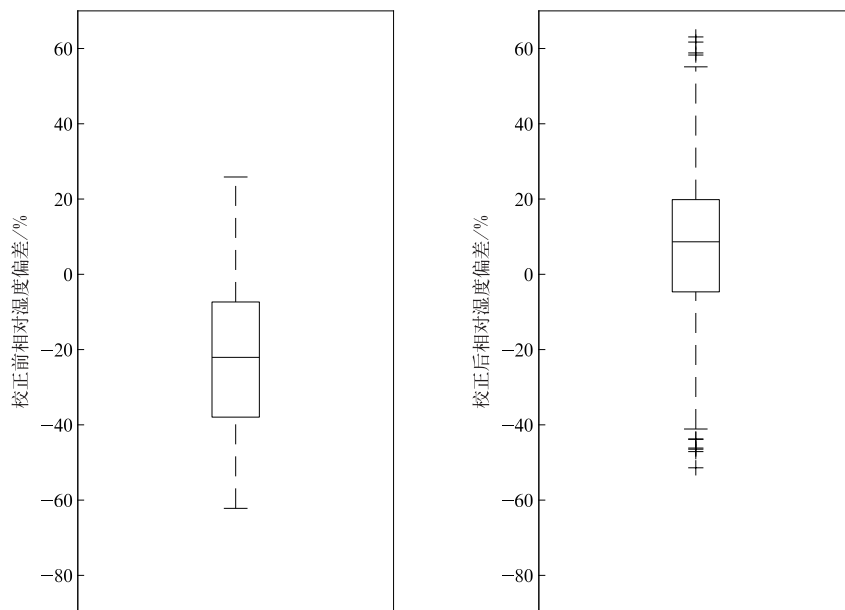


图 10 对流云条件下校正前后微波辐射计相对湿度与探空相对湿度偏差箱线图
 Fig. 10 Box plots for relative humidity deviation of microwave radiometer before and after correction to radiosonde under convective cloud

方根误差比校正前降低(图略)。由图 11 可见,相对湿度偏差中位数由校正前的 -5.77% 升至校正后的 5.99%,偏差中位数绝对值增大了 0.22%。均方根误差由校正前的 25.63% 降至校正后的 25.46%,降低了 0.17%,54.55% 样本的微波相对湿度校正后均方根误差比校正前降低(图略)。

为进一步分析相对湿度分段校正方法用于对流云条件下相对湿度廓线的校正效果,利用探空、ERA5 逐小时数据对比分析 2023 年 3 月 8 日 20:00 和 7 月 11 日 21:00 对流云情况下微波辐射计相对湿度校正结果(图 12)。由图 12 可见,对流云情况下校正后微波辐射计相对湿度均比校正前增大,校

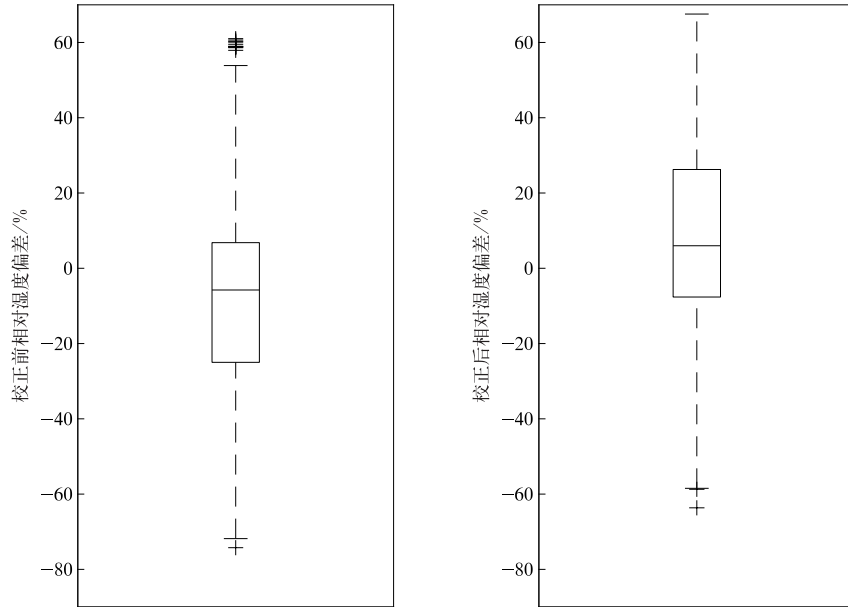


图 11 对流云条件下校正前后微波辐射计相对湿度与 ERA5 相对湿度偏差箱线图
Fig. 11 Box plots for relative humidity deviation of microwave radiometer before and after correction to ERA5 under convective cloud

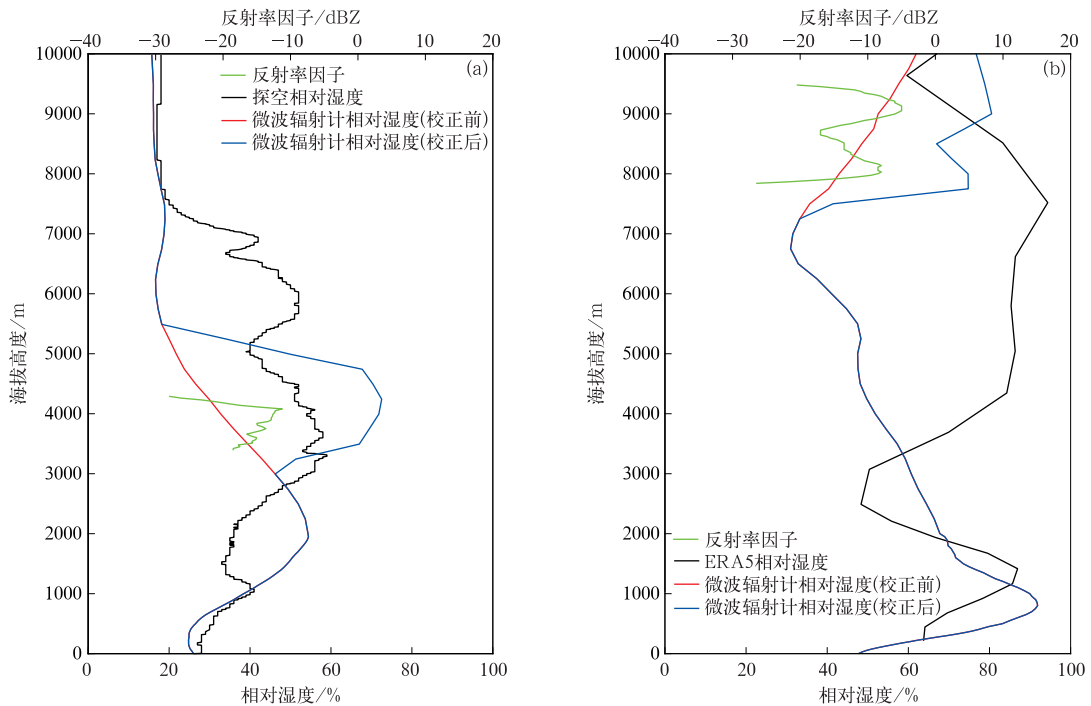


图 12 对流云条件下校正前后微波辐射计与探空(a)和 ERA5(b)相对湿度的对比
Fig. 12 Relative humidity comparison of microwave radiometer before and after correction to radiosonde(a) and ERA5(b) under convective cloud

正后与探空和 ERA5 相对湿度在垂直方向上的变化趋势更接近,但校正后的微波辐射计相对湿度较探空和 ERA5 在某些高度层偏大。此外,与校正前相比,校正后偏差中位数由负偏差变为正偏差,且偏差中位数绝对值增大,说明部分个例存在过度校正。未来可利用云雷达的体扫描模式采集数据,与探空数据在云区斜升路径上进行时空匹配,建立适用于对流云情况下微波辐射计相对湿度的校正方法模型。

4 小 结

基于地基遥感垂直廓线系统中毫米波云雷达与微波辐射计同步观测,分析云雷达反射率因子与探空相对湿度特征关系,提出联合毫米波云雷达的微波辐射计相对湿度分段校正方法,并利用探空和 ERA5 逐小时再分析数据对校正结果进行验证和误差分析。得到如下结论:

1) 入云区的相对湿度与反射率因子呈正相关关系,云区中段相对湿度近似饱和状态,且反射率因子最大值所在高度为相对湿度开始饱和的高度,亦为云区中段起始点,出云区与入云区相对湿度随高度变化趋势近似关于某一高度呈对称关系。

2) 提出联合云雷达的微波辐射计相对湿度分段校正方法,并在层状云情况下进行验证及误差分析。与校正前相比,校正后微波辐射计与探空和 ERA5 的相对湿度的均方根误差分别减小 7.99% 和 8.91%,偏差中位数绝对值分别减小 12.62% 和 13.05%。因此,该校正方法能够较好地实现层状云条件下微波辐射计相对湿度廓线的连续实时校正,提高了微波辐射计的观测质量。

3) 校正后微波辐射计与探空和 ERA5 的相对湿度在垂直方向上的变化趋势更接近,但校正后微波辐射计较探空和 ERA5 的相对湿度在某些高度上偏大,校正后偏差中位数与校正前相比由负偏差变为正偏差,说明部分个例存在过度校正。

随着毫米波云雷达体扫描模式发展,未来可利用云雷达的体扫描模式采集数据,通过更精准的点对点或同时空多点提取的方法与探空数据在云区斜升路径上进行时空匹配,建立有云条件下更加精准的云雷达反射率因子与探空相对湿度间的关系,使该方法适用于不同云天状况下微波辐射计相对湿度的校正。此外,由于本文所采用毫米波云雷达为 Ka 波段,大气和云内液水对 Ka 波段电磁波的衰减会

随着雷达探测距离的增加,透过率减小,导致雷达回波在准确反映目标物的真实性上存在一定局限性,未来可根据雷达反射率因子与衰减系数的经验关系,采用分级逐库订正方法进行订正,提升微波辐射计中高层相对湿度的校正精度。

参 考 文 献

- [1] 邹荣士,何文英,王普才,等. 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. 大气科学,2021,45(3):605-616.
Zou R S, He W Y, Wang P C, et al. Assessment of radiative transfer models based on observed brightness temperature from ground-based microwave radiometer. *Chinese J Atmos Sci*, 2021, 45(3): 605-616.
- [2] 赵从龙,蔡化庆,宋玉东,等. 对流层水汽和液态水的地基微波遥感探测. 应用气象学报,1991,2(2):200-207.
Zhao C L, Cai H Q, Song Y D. Measurement of water vapor and cloud liquid water content in the troposphere by ground-based microwave remote sensing. *J Appl Meteor Sci*, 1991, 2(2): 200-207.
- [3] 段英,吴志会. 利用地基遥感方法监测大气中气态、液态水含量分布特征的分析. 应用气象学报,1999,10(1):34-40.
Duan Y, Wu Z H. Monitoring the distribution characteristics of liquid and vapor water content in the atmosphere using ground-based remote sensing. *J Appl Meteor Sci*, 1999, 10(1): 34-40.
- [4] 王洪,周后福,王琛,等. 基于微波辐射计和探空的 FY-4A 温度廓线检验. 应用气象学报,2023,34(3):295-308.
Wang H, Zhou H F, Wang C, et al. Accuracy validation of FY-4A temperature profile based on microwave radiometer and radiosonde. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3): 295-308.
- [5] 茆佳佳,焦志敏,张雪芬,等. 天线罩疏水层老化对微波辐射计观测的影响分析. 气象科技,2022,50(6):759-765.
Mao J J, Jiao Z M, Zhang X F, et al. Influence analysis of hydrophobic layer aging of radome on microwave radiometer observation. *Meteor Sci Technol*, 2022, 50(6): 759-765.
- [6] 李金辉,周毓荃,岳治国,等. 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. 气象,2022,48(4):452-458.
Li J H, Zhou Y Q, Yue Z G, et al. Water vapor and cloud base height difference between the north and south of Qinling Mountains based on microwave radiometer measurements. *Meteor Mon*, 2022, 48(4): 452-458.
- [7] 常越,陈洪滨,施红蓉,等. 复合翼无人机不同传感器探测大气温湿度对比. 应用气象学报,2023,34(1):78-90.
Chang Y, Chen H B, Shi H R, et al. Comparison of atmospheric temperature and humidity sounding by different sensors onboard a new composite wing UAV. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 78-90.
- [8] 周冰雪,朱朗峰,吴昊,等. 微波辐射计反演大气廓线精度及降水预报应用. 应用气象学报,2023,34(6):717-728.
Zhou B X, Zhu L F, Wu H, et al. Accuracy of atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer and its application to precipitation forecast. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34

- (6):717-728.
- [9] 林晓萌,尉英华,张楠,等.基于地基遥感设备构建遥感探空廓线.应用气象学报,2022,33(5):568-580.
Lin X M, Wei Y H, Zhang N, et al. Construction of air-sounding-profile system based on foundation-remote-sensing equipment. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5):568-580.
- [10] 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.应用气象学报,2018,29(3):282-295.
Wang Z C, Zhang X F, Mao J J, et al. Comparison analysis on detection performance of ground-based microwave radiometers under different weather conditions. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(3):282-295.
- [11] 孔凡超,李江波,王颖.北京冬奥会云顶赛场微波辐射计反演大气温湿廓线分析.气象,2021,47(9):1062-1072.
Kong F C, Li J B, Wang Y. Analysis on atmospheric profiles retrieved by microwave radiometer at genting venue of Beijing Olympic Winter Games. *Meteor Mon*, 2021, 47(9):1062-1072.
- [12] 王振会,李青,楚艳丽,等.地基微波辐射计工作环境对K波段亮温观测影响.应用气象学报,2014,25(6):711-721.
Wang Z H, Li Q, Chu Y L, et al. Environmental thermal radiation interference on atmospheric brightness temperature measurement with ground-based K-band microwave radiometer. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(6):711-721.
- [13] 车云飞,马舒庆,杨玲,等.云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响.应用气象学报,2015,26(2):193-202.
Che Y F, Ma S Q, Yang L, et al. Cloud influence on atmospheric humidity profile retrieval by ground-based microwave radiometer. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(2):193-202.
- [14] 赵玲,马玉芬,张广兴,等.MP-3000A微波辐射计的探测原理及误差分析.沙漠与绿洲气象,2009,3(5):54-57.
Zhao L, Ma Y F, Zhang G X, et al. The principle and error analysis of microwave radiometer MP-3000A. *Desert Oasis Meteor*, 2009, 3(5):54-57.
- [15] 胡树贞,马舒庆,陶法,等.地基双波段测云系统及其对比试验.应用气象学报,2012,23(4):441-450.
Hu S Z, Ma S Q, Tao F, et al. Ground-based dual-band cloud observing system and its comparative experiments. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(4):441-450.
- [16] Chan P W. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather. *Meteorologische Zeitschrift*, 2009, 18(3):253-265.
- [17] Knupp K R, Ware R, Cimini D, et al. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions. *J Atmos Ocean Technol*, 2009, 26(6):1057-1073.
- [18] 刘红燕.三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析.气象学报,2011,69(4):719-728.
Liu H Y. The temperature profile comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 69(4):719-728.
- [19] 茆佳佳,张雪芬,王志诚,等.多型号地基微波辐射计亮温准确性比对.应用气象学报,2018,29(6):724-736.
Mao J J, Zhang X F, Wang Z C, et al. Comparison of brightness temperature of multi-type ground-based microwave radiometers. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(6):724-736.
- [20] Frate F D, Giovanni S. A combined natural orthogonal function/neural network technique for the radiometric estimation of atmospheric profiles. *Radio Science*, 1998, 33(2):405-410.
- [21] Löhnert U, Crewell S, Simmer C, et al. Profiling cloud liquid water by combining active and passive microwave measurements with cloud model statistics. *J Atmos Ocean Technol*, 2001, 18(8):1354-1366.
- [22] Liljegren J C, Clothiaux E E, Mace G G, et al. A new retrieval for cloud liquid water path using a ground-based microwave radiometer and measurements of cloud temperature. *J Geophys Res Atmos*, 2001, 106(D13):14485-14500.
- [23] 丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等.云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究.气象,2018,44(12):1604-1611.
Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer. *Meteor Mon*, 2018, 44(12):1604-1611.
- [24] 马丽娜.地基微波辐射计数据的质量控制及基于云天样本的参数反演研究.南京:南京信息工程大学,2018.
Ma L N. Quality Control of Ground-Based Microwave Radiometer Observations and Parameters Retrieval Study Based on Cloudy Samples. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
- [25] 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.应用气象学报,2020,31(4):385-396.
Zhang X F, Wang Z C, Mao J J, et al. Experiments on improving temperature and humidity profile retrieval for ground-based microwave radiometer. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4):385-396.
- [26] 唐英杰,马舒庆,杨玲,等.云底高度的地基毫米波云雷达观测及其对比.应用气象学报,2015,26(6):680-687.
Tang Y J, Ma S Q, Yang L, et al. Observation and comparison of cloud-base heights by ground-based millimeter-wave cloud radar. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(6):680-687.
- [27] 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.应用气象学报,2019,30(6):731-744.
Liu X L, Liu D S, Guo L J, et al. The observational precision of domestic MWP967KV ground-based microwave radiometer. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6):731-744.
- [28] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteor Soc*, 2020, 145(722):1882-1896.
- [29] 李喆,陈炯,马占山,等.CMA-GFS云预报的偏差分布特征.应用气象学报,2022,33(5):527-540.
Li Z, Chen J, Ma Z S, et al. Deviation distribution features of CMA-GFS cloud prediction. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5):527-540.
- [30] 王梧熠,董晓波,孙玉稳,等.邢台地区微波辐射计与无线电探空仪数据对比分析.气象科技,2022,50(3):344-354.
Wang W Y, Dong X B, Sun Y W, et al. Comparative analysis of microwave radiometer and radiosonde measurements in Xingtai Area. *Meteor Sci Technol*, 2022, 50(3):344-354.

Relative Humidity Correction Method of Microwave Radiometer Combined with Cloud Radar

Zhang Ting¹⁾ Jiao Zhimin²⁾ Mao Jiajia²⁾ Zhang Xuefen²⁾ Wang Yanfei¹⁾ Chen Peiyu¹⁾ Jin Long¹⁾

¹⁾ (*Meteorological Technology and Equipment Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050000*)

²⁾ (*Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081*)

Abstract

The microwave radiometer can detect and retrieve temperature and humidity profiles with high spatial and temporal resolution throughout the day. However, microwave radiometers have few detection frequencies in the middle and upper layers, making them easily affected by clouds. After integrating cloud information into brightness temperature data, the improvement in detection accuracy in the middle and upper layers still remains insufficient, failing to meet accuracy standards required for relative humidity. With the construction of a national ground-based remote sensing vertical profile system, the continuous observation of cloud radar and microwave radiometer at the same site has been achieved, enhancing the spatial and temporal resolution. Combined with the relationship between humidity and cloud formation, a comprehensive quality control method is proposed for relative humidity using cloud radar and microwave radiometer. It plays a crucial role in enhancing the accuracy of humidity profile of microwave radiometer under cloudy conditions.

By analyzing the characteristic relationship between the cloud radar reflectivity factor and the radiosonde relative humidity, a piecewise correction method for the microwave radiometer relative humidity of the combined cloud radar is proposed. Error correction results are analyzed using the radiosonde and ERA5 data. It shows that there is a positive linear correlation between the relative humidity and the reflectivity factor, the relative humidity in the middle of the cloud region is approximately saturated, and the relative humidity variation trend with the height of the cloud exit region and the cloud entry region is approximately symmetric about a certain height. Under the condition of stratiform clouds, the root mean square error of relative humidity by microwave radiometer decreases by 7.99% and 8.91% when comparing with radiosonde and ERA5, and the absolute value of median deviation decreases by 12.62% and 13.05%, respectively. The absolute median deviation also decreases. Further investigation indicates the method is also effective under the condition of convection cloud, but the relative humidity in the cloud region after correction is larger than that of sounding and ERA5, and the median deviation changes from negative deviation to positive deviation. Therefore, the relative humidity segment correction method of combing cloud radar can realize the continuous real-time correction of the relative humidity profile of microwave radiometer, which partly improves the observation quality of microwave radiometer under cloud conditions.

Key words: microwave radiometer; millimeter-wave cloud radar; relative humidity; cloud