

沈芳,黄浩杰,周玉都,等.廊坊地基微波辐射计大气温湿廓线反演产品评估分析[J].海洋气象学报,2023,43(4):71-83.  
SHEN Fang, HUANG Haojie, ZHOU Yudu, et al. Evaluation and analysis of retrieval products of atmospheric temperature and humidity profiles from ground-based microwave radiometer in Langfang[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(4): 71-83.  
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.008. (in Chinese)

## 廊坊地基微波辐射计大气温湿廓线反演产品评估分析

沈芳,黄浩杰,周玉都,许敏,张湘涵

(廊坊市气象局,河北 廊坊 065099)

**摘要:** 利用2017—2020年廊坊市大厂县QFW-6000型微波辐射计和北京探空资料,对08时和20时2个时段共737组有效样本垂直方向的气温、湿度进行对比检验。结果表明:(1)整层气温均方根误差在5℃以内,相对湿度均方根误差为20%~30%,气温的相关系数明显高于相对湿度,即前者的探测精度更高。(2)1 km以下08时和20时温度和相对湿度的误差差异显著,08时误差均小于20时,1 km以上气温误差稳定在3℃左右,相对湿度误差廓线随高度先增大后减小。(3)夏秋季温度误差总体小于春季和冬季,但夏季贴地层误差明显大于其他季节,而相对湿度误差在冬季更为稳定。(4)晴天微波辐射计的探测精度明显优于云天和雨天,且随着云量的增多,探测精度逐渐下降。(5)降雨量级的差异对微波辐射计的探测精度产生不同影响,雨量越大,温度和相对湿度的误差越大;小雨时温度的相关系数在贴地层以上为0.60~0.90,但整层相对湿度的相关系数普遍在0.50以下,中雨及以上的降雨出现时,08时和20时温度的相关系数表现出显著差异,而相对湿度的相关系数在大雨及以上时波动最大,表现出极不稳定的探测性能。

**关键词:** 微波辐射计;探空;温度廓线;相对湿度廓线

**中图分类号:** P413.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)04-0071-13

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.008

## Evaluation and analysis of retrieval products of atmospheric temperature and humidity profiles from ground-based microwave radiometer in Langfang

SHEN Fang, HUANG Haojie, ZHOU Yudu, XU Min, ZHANG Xianghan

(Langfang Meteorological Bureau, Langfang 065099, China)

**Abstract:** Using the QFW-6000 microwave radiometer data of Dachang County, Langfang City and the radiosonde data of Beijing from 2017 to 2020, the temperature and humidity in the vertical direction of 737 groups of effective samples at 08:00 and 20:00 are compared and tested. The results are shown below. (1) The root mean square error of temperature in the whole layer is within 5℃, and the root mean square error of relative humidity is 20%–30%. The correlation coefficient of temperature is significantly higher than that of relative humidity, that is, the detection accuracy of the former is higher. (2) The errors of temperature and relative humidity at 08:00 and 20:00 below 1 km are significantly different. The errors at 08:00 are less than those at 20:00 and the errors of temperature above 1 km are

收稿日期:2022-08-01;修回日期:2023-06-09

基金项目:河北省廊坊市气象局科研项目(202105)

第一作者简介:沈芳,女,助理工程师,主要从事天气预报工作,1506150715@qq.com。

通信作者简介:黄浩杰,男,工程师,主要从事天气预报及相关研究工作,604012409@qq.com。

stable at about 3 °C. The error in relative humidity profile first increases and then decreases with height. (3) The temperature errors in summer and autumn are generally smaller than those in spring and winter, but the error in the ground layer in summer is significantly greater than those in other seasons, and the error of relative humidity is more stable in winter. (4) The detection accuracy of the microwave radiometer in sunny days is obviously better than those in cloudy and rainy days, and with the increase of cloud cover, the detection accuracy gradually decreases. (5) Different rainfall intensity has different effects on the detection accuracy of microwave radiometer, and the greater the rainfall, the greater the errors of temperature and relative humidity. The correlation coefficient of temperature during light rain ranges from 0.60 to 0.90 above the ground layer, but the correlation coefficient of relative humidity in the whole layer is generally below 0.5; when moderate rain or above occurs, the correlation coefficient of temperature at 08:00 and 20:00 shows significant differences, while the correlation coefficient of relative humidity shows the biggest fluctuation in heavy rain or above, showing extremely unstable detection performance.

**Keywords:** microwave radiometer; radiosonde; temperature profile; relative humidity profile

## 引言

目前,我国天气预报业务中最常用的高空气象资料主要来源于探空气球观测的数据,但该数据每日仅 08 时和 20 时两次,且根据高空气象观测网布局,各站之间间距通常在 300 km 左右,其时间和空间的密度很难满足天气预报,尤其是对中小尺度天气系统监测和预警的需求。近年来,多普勒天气雷达的广泛布设提供了降水时段的风场信息,结合风廓线雷达的应用可弥补垂直方向上对高精度风场信息的需求,而微波辐射计多站点布设则增加了温湿廓线的垂直观测资料,使业务中能够获得较完整的高时空分辨率高空资料<sup>[1-4]</sup>。

地基微波辐射计是一种无源微波被动遥感设备,可以接收来自其天线视场内物体自身所辐射、散射或反射的微波辐射,并把这些辐射转化为等效黑体温度。地基微波辐射计能够全天候、全天时工作,常用于观测短时间内生成和消散的中小尺度天气<sup>[5-9]</sup>。近年来,国内外研发出了多种型号的地基微波辐射计,其中,国外以美国 Radiometrics 公司的 MP-3000 型微波辐射计和德国 RPG 公司的 RPG-HATPRO 型微波辐射计为代表;国内为中国电子科技集团公司第二十二研究所研发的 QFW 系列微波辐射计和西安电子工程研究所研制的 MWP967KV 型地基多通道微波辐射计,在数据稳定性和精度方面已经达到较高的水平。MP-3000 型微波辐射计在台风预报<sup>[10]</sup>、中小尺度天气监测<sup>[11-13]</sup>、人工影响天气以及雾霾的立体监测<sup>[14]</sup>等方面的应用,一定程度

上提高了灾害性天气的探测精度和短时、临近预报准确率。随着更多国产微波辐射计加入自动化观测体系,陆续有许多学者开展了微波辐射计的数据质量控制研究,刘萱等<sup>[15]</sup>检验了微波辐射计不同季节温度和相对湿度廓线的精确度,结果表明微波辐射计在青岛地区温度廓线均方根误差在夏季最小、冬季最大,而相对湿度在冬季最小、秋季最大。乔贺等<sup>[16]</sup>对国内 6 种微波辐射计进行观测实验,证明了温度的观测精度要高于湿度。海阿静等<sup>[17]</sup>和陈涛等<sup>[18]</sup>的研究表明 QFW-6000 和 MP-3000 型微波辐射计工作性能优良,测量的大气温湿垂直分布比较可靠,可以有效弥补气球探空时空分辨率低的不足。

廊坊市大厂县的 QFW-6000 型地基微波辐射计于 2017 年 11 月投入业务运行,此后在重要天气过程分析中虽多次得到应用,但一直未对长期时间序列资料的精准度做过检验,因此本文将从总体概况、不同季节、不同晴雨状况等角度,对该微波辐射计反演的温湿廓线数据与邻近的北京探空资料进行对比检验,定量给出该资料的精准度和可用性,为微波辐射计资料在业务中的深入应用奠定基础。

## 1 资料及方法

### 1.1 资料说明

选取 2017 年 11 月—2020 年 11 月大厂县微波辐射计温湿廓线资料与北京 54511 高空气象观测站的温湿资料进行对比检验。两站的海拔分别为 18.1 m 和 54.7 m,地理位置比较接近,因此将观测 0 m 的数据统一作为起始高度基本合理;两站之间直线距离仅为

43 km(图1),且大厂县气象观测站位于北京 54511 高空气象观测站的东偏北方向,地势平坦并处于其下风向,因此将后者作为对比检验的临近探空站是最优选择。大厂县 QFW-6000 型微波辐射计具有 16 个并行通道(同一时刻同时进行观测),逐分钟通过测量大气辐射亮温反演出大气垂直分层温湿等参数,微波辐射计全天候不间断观测,垂直分辨率为 2 000 m 以下

每层间隔 100 m,2 000 m 以上每层间隔 250 m,共 53 层。取微波辐射计每日 07:55—08:05、19:55—20:05 探测的温湿量进行时间平均,与北京 54511 高空气象观测站 08 时、20 时探空数据进行对比,对 0~10 km 共 53 层高度的温度和相对湿度进行对比检验。微波辐射计定期校准并正常运行,在选定时段内共筛选出有效样本 737 组。

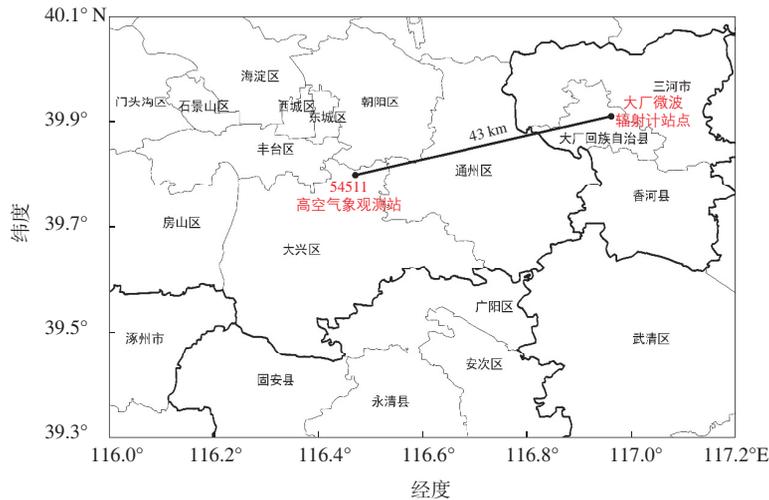


图1 北京 54511 高空气象观测站与大厂微波辐射计站点地理位置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of geographic location of Beijing 54511 radiosonde station and Dachang microwave radiometer station

## 1.2 分析方法

### 1.2.1 高度转换

微波辐射计反演数据中采用的是几何高度,而探空数据中使用的是位势高度,需要将高度转换并修正为同一高度,本文将位势高度转换为几何高度<sup>[16]</sup>,计算公式如下:

$$Z = \frac{r_\varphi \times H}{\frac{g_{0\varphi}}{g_n} \times r_\varphi - H}, \quad (1)$$

式(1)中,  $r_\varphi = \frac{2 g_{0\varphi}}{3.085 462 \times 10^{-6} + 2.27 \times 10^{-9} \times \cos 2\varphi}$ ,  $r_\varphi$  是  $\varphi$  处的海平面地球半径的标定值,单位为 m;  $g_{0\varphi} = 9.806 16 \times (1 - 0.002 637 3 \cos 2\varphi + 0.000 005 9 \cos^2 2\varphi)$ ,  $g_{0\varphi}$  是  $\varphi$  处海平面重力加速度,单位为  $m/s^2$ ,  $Z$  是几何高度,单位为 m;  $H$  是位势高度,单位为 gpm;  $\varphi$  是地理纬度,单位为 rad;  $g_n$  是标准重力加速度,取固定值  $9.806 65 m/s^2$ 。

### 1.2.2 相对湿度转换

微波辐射计反演数据为温度廓线和相对湿度廓

线,而探空数据中采用的是温度、露点温度数据,为了统一表示不同高度上的湿度特征,本文将用探空数据中不同高度的温度和露点温度计算出对应的饱和水汽压,再计算出不同高度的相对湿度,具体计算公式<sup>[19]</sup>如下。

$$\ln \frac{P_{ws}}{P_c} = \frac{T_c}{T} (C_1 \vartheta + C_2 \vartheta^{1.5} + C_3 \vartheta^3 + C_4 \vartheta^{3.5} + C_5 \vartheta^4 + C_6 \vartheta^{7.5}), \quad (2)$$

式(2)为水的饱和水汽压计算公式。其中:  $\vartheta = 1 - T/T_c$ ,  $T$  为观测温度,单位为 K,  $T_c$  为临界温度 647.096 K;  $P_{ws}$  为饱和水汽压,单位为 hPa;  $P_c$  为临界压强 220 640 hPa;  $C_1$  为系数 ( $C_1 = -7.859 517 83$ ,  $C_2 = 1.844 082 59$ ,  $C_3 = -11.786 649 7$ ,  $C_4 = 22.680 741 1$ ,  $C_5 = -15.961 871 9$ ,  $C_6 = 1.801 225 02$ )。

$$\ln \frac{P_{wi}}{P_n} = a_0 (1 - \theta^{-1.5}) + a_1 (1 - \theta^{-1.25}), \quad (3)$$

式(3)为冰的饱和水汽压的计算公式。其中:  $\theta = T/T_n$ ,  $T$  为观测温度,单位为 K,  $T_n$  为冰点温度 273.16 K;  $P_{wi}$  为饱和水汽压,单位为 hPa;  $P_n$  为冰点

温度下的饱和水汽压6.116 57 hPa;  $a_i$  为系数 ( $a_0 = -13.928\ 169, a_1 = 34.707\ 823$ )。

$$V_{RH} = 100\% \times \frac{P_{ws}(T_d)}{P_{ws}(T)}, \quad (4)$$

式(4)为相对湿度的计算公式。其中:  $V_{RH}$  表示相对湿度;  $P_{ws}(T_d)$  表示露点温度下的饱和水汽压, 单位为 hPa;  $P_{ws}(T)$  表示当前温度下的饱和水汽压, 单位为 hPa。

### 1.2.3 平均绝对误差

将探空资料作为真实值, 微波辐射计资料作为观测值, 计算平均绝对误差, 各层平均绝对误差计算如下:

$$V_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |x_i - y_i|, \quad (5)$$

式(5)中,  $V_{MAE}$  为同一高度处的平均绝对误差,  $i$  为观测时间,  $x_i$  和  $y_i$  分别为第  $i$  时次同一高度探空和微波辐射计的观测资料,  $n$  为总观测次数。

### 1.2.4 均方根误差

对微波辐射计资料和探空资料各高度上温度、相对湿度进行均方根误差的统计分析, 衡量 2 种数据之间的偏差, 各层均方根误差计算如下:

$$V_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (6)$$

式(6)中,  $V_{RMSE}$  为同一高度处的均方根误差,  $i$  为观测时间,  $x_i$  和  $y_i$  分别为第  $i$  时次同一高度探空和微波辐射计的观测资料,  $n$  为总观测次数。

### 1.2.5 相关系数

除了对均方根误差的统计, 还进行了相关系数的统计分析, 用来衡量 2 种数据的相关关系及研究变量之间线性相关程度, 各层相关系数计算如下:

$$R = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (7)$$

式(7)中,  $R$  为同一高度处的相关系数,  $i$  为观测时间,  $x_i$  和  $y_i$  分别为第  $i$  时次同一高度探空和微波辐射计的观测资料,  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  分别为同一高度探空和微波辐射计总观测的平均值,  $n$  为总观测次数。

## 2 结果分析

### 2.1 微波辐射计温湿度探测性能评估

为了了解微波辐射计总体的探测精度情况, 对

737 组有效样本进行了整层对比检验, 结果见表 1。与探空资料相比, 温度的平均绝对误差为 3.45 °C, 均方根误差为 5.02 °C, 相关系数高达 0.97, 而相对湿度的平均绝对误差为 23.11%, 均方根误差则为 28.77%, 相关系数显著低于温度, 仅为 0.31。可见, 在微波辐射计对整层大气的探测中, 温度的测量精度显著优于相对湿度。

表 1 整层大气温度、相对湿度的平均绝对误差、均方根误差和相关系数统计结果

Table 1 Statistical results of mean absolute error, root mean square error, and correlation coefficient of the whole layer of temperature and relative humidity

评价指标	气象要素	
	温度	相对湿度
平均绝对误差	3.45 °C	23.11%
均方根误差	5.02 °C	28.77%
相关系数	0.97	0.31

为进一步掌握微波辐射计在各高度以及不同观测时次的精度表现, 图 2 给出了 08 时和 20 时温度和相对湿度平均绝对误差的垂直分布。温度平均绝对误差在贴地层 08 时优于 20 时, 2 个时次其余各层均维持在 3.5 °C 左右(图 2a); 相对湿度平均绝对误差整体维持在 14%~28%, 在近地面层 20 时(19%)明显大于 08 时(15%), 在 4 km 处达到最大值, 4 km 以下 08 时较 20 时波动幅度大, 而 4 km 以上 08 时明显小于 20 时, 说明 08 时在中高层精度要优于 20 时(图 2b)。总体来看, 温度的相关系数明显高于相对湿度, 即前者的探测精度更高, 且各高度层误差波动幅度相对较小, 说明大口径微波辐射计对于温度的探测更为精确。

由 08 时和 20 时温度和相对湿度均方根误差和相关系数的垂直分布(图 3)可见: 贴地层大气温度的探测误差大于高空大气, 尤以 20 时的观测表现最明显, 0.1 km 以上微波辐射计探测的稳定性明显增强, 2 个时次观测的均方根误差始终维持在 5 °C 左右(图 3a); 同样, 20 时温度的相关系数值也在贴地处出现最低值 0.65, 但 08 时观测相关系数则可达到 0.90, 随着高度的上升, 探测精度稳定在 0.80 附近(图 3b)。与温度相比, 微波辐射计在各高度层的相对湿度廓线探测精度较低, 2 个时次的均方根误差大致都呈现从低层到高层先增大后减小的趋势特点(图 3c); 在 6 km 以下, 08 时和 20 时相对湿度的相关系数变化趋势相同, 即贴地层最大达到 0.75 左右,

向上至 2 km 迅速减小至0.20,随着高度的继续增加,相关系数呈现出增减交替的变化,但总体仍为减小趋势,6 km 以上相关系数的波动幅度均趋缓,但 2 个时次的变化趋势截然相反(图 3d)。总体而言,微波辐射计对温度的探测精度明显高于湿度,乔贺等<sup>[16]</sup>、海阿静等<sup>[17]</sup>也得出了同样的结论。整层温度均方根误差在近地面层稳定为 5 °C 左右,相对湿度均方根误差为 20%~35%,在 5 km 高度均方根误差值达到最大,这是由于水汽主要集中在大气低层,5 km 以上相对湿度值较小,相对的误差也小;温度误差随高度的变幅较相对湿度更小,而两者的相关系数均为正值,相对湿度的相关系数在地表层处最大,为0.80。由 4 km 高度往上,相对湿度的相关系数越来越小,到高层甚至接近于 0,这是因为微波辐射计随着垂直方向探测距离增大,精度变差。除 20 时贴地层温度误差较大外,其余高度和观测时次,对温度的探测都表现出较好性能,但相对湿度低层和高层误差相对较小,中层误差较大,相关系数随高度减小。

### 2.2 不同季节温湿廓线性能分析

廊坊处于大陆性季风气候区,影响不同季节的天气系统有着较大差异,导致气候特征也不尽相同。为了进一步深入研究微波辐射计数据的准确性,将样本按照季节分为 4 组,即春季 227 组、夏季 120 组、秋季 199 组、冬季 191 组,以分析微波辐射计在不同季节的探测精度。

刘萱等<sup>[15]</sup>的研究结果表明 QFW-6000 微波辐射计在青岛地区温度廓线均方根误差存在着一定的季节差异。对大厂微波辐射计的温度反演资料(图 4)进行检验后发现,夏季贴地层大气温度的探测误差明显高于其他季度,且各季节 20 时的误差均大于 08 时,均方根误差达到 10 °C 以上(图 4d),0.1 km 以上微波辐射计探测的稳定性明显增强,其中秋季和冬季的 2 个时次观测的温度均方根误差明显低于春季(图 4a、g、j)。初步分析夏季近地面误差较大的原因为大厂夏季降水远多于其他季节,而降水过程多、雨量大均会对微波辐射计的探测精度产生较大影响,故而表现出上述特点。

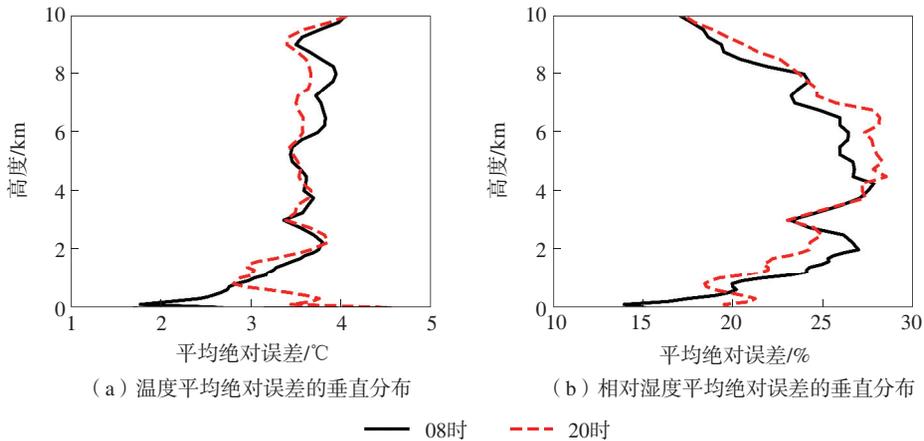
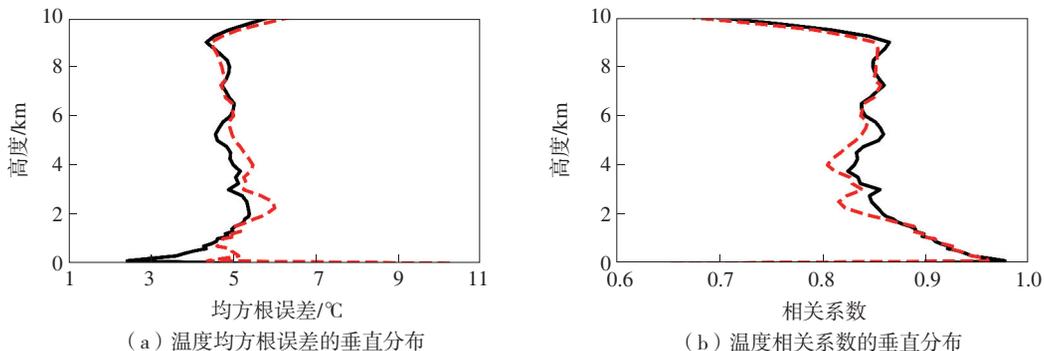


图 2 08 时和 20 时 2 种气象要素平均绝对误差的垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of mean absolute error of temperature and relative humidity at 08:00 and 20:00



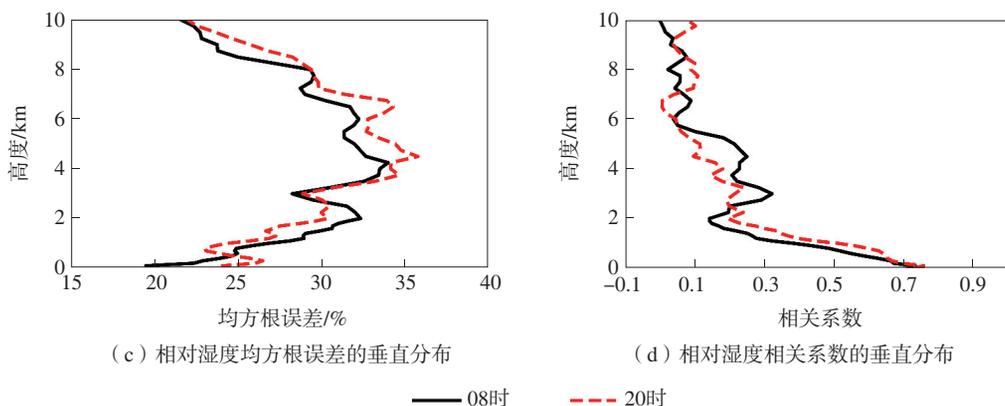


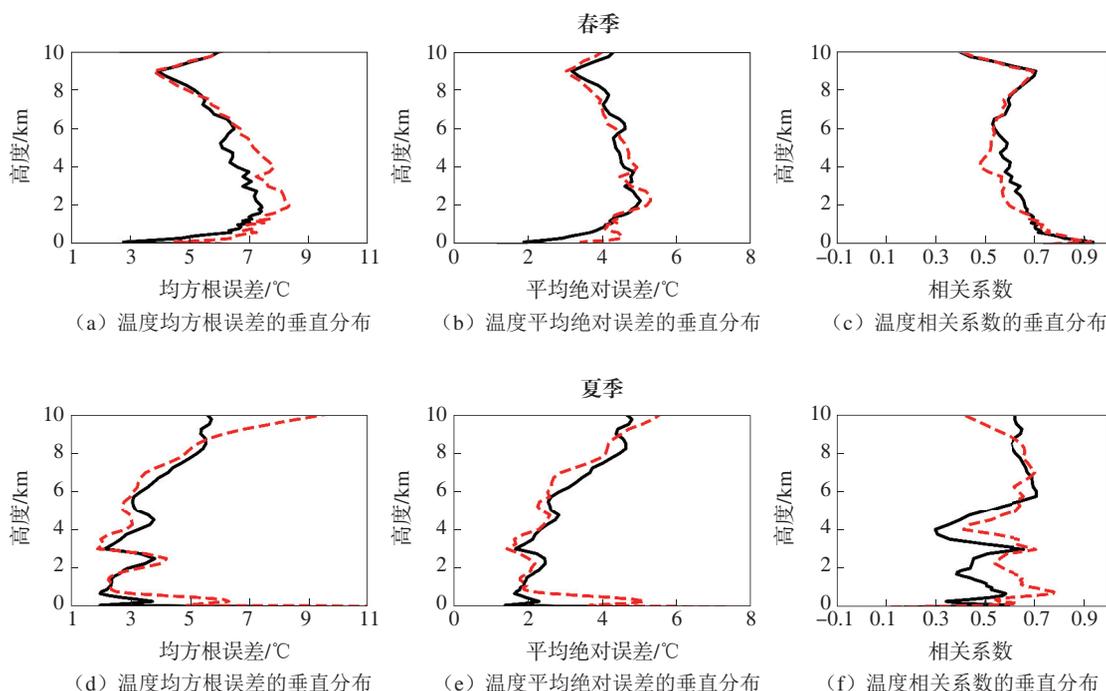
图3 2种气象要素均方根误差和相关系数的垂直分布  
 Fig.3 Vertical distribution of root mean square error and correlation coefficient of temperature and relative humidity

由不同季节 08 时和 20 时温度的平均绝对误差垂直分布(图 4b、e、h、k)可以看出,对贴地层大气温度的探测夏季误差明显高于其他季节。春季(图 4b),2 个时次低层和高层的温度误差较小,中层误差集中在 5 °C 左右;夏季(图 4e),2 个时次的中低层误差最小,稳定在 2 °C,高层随高度的增加逐渐增大;秋季(图 4h),20 时贴地层误差较 08 时大,贴地层以上 2 个时次误差随高度的增加略有增大;冬季(图 4k),2 个时次在 2~4 km 处误差较其他各层偏大。

由不同季节 08 时和 20 时温度的相关系数垂直分布(图 4c、f、i、l)发现,秋季相关系数较其他季节

随高度变化幅度小,各层的相关性相对较高,春、冬季在 2~8 km 相关系数稳定在 0.6 左右,夏季温度的相关系数在 6 km 以下波动幅度较大,20 时的相关系数明显高于 08 时,6 km 以上相关系数稳定在 0.6 左右。总体来看,08 时和 20 时各季节趋势基本相同,数值相对接近。

由不同季节相对湿度的评价指标检验结果(图 5)来看,各季节相对湿度均方根误差随高度呈先增后减趋势。其中冬季波动较小,误差稳定在 20%~30%(图 5j);而春、夏、秋季 0~1 km 误差较小,秋季在 4 km 附近误差接近 40%(图 5a、d、g)。



(a) 温度均方根误差的垂直分布 (b) 温度平均绝对误差的垂直分布 (c) 温度相关系数的垂直分布  
 (d) 温度均方根误差的垂直分布 (e) 温度平均绝对误差的垂直分布 (f) 温度相关系数的垂直分布

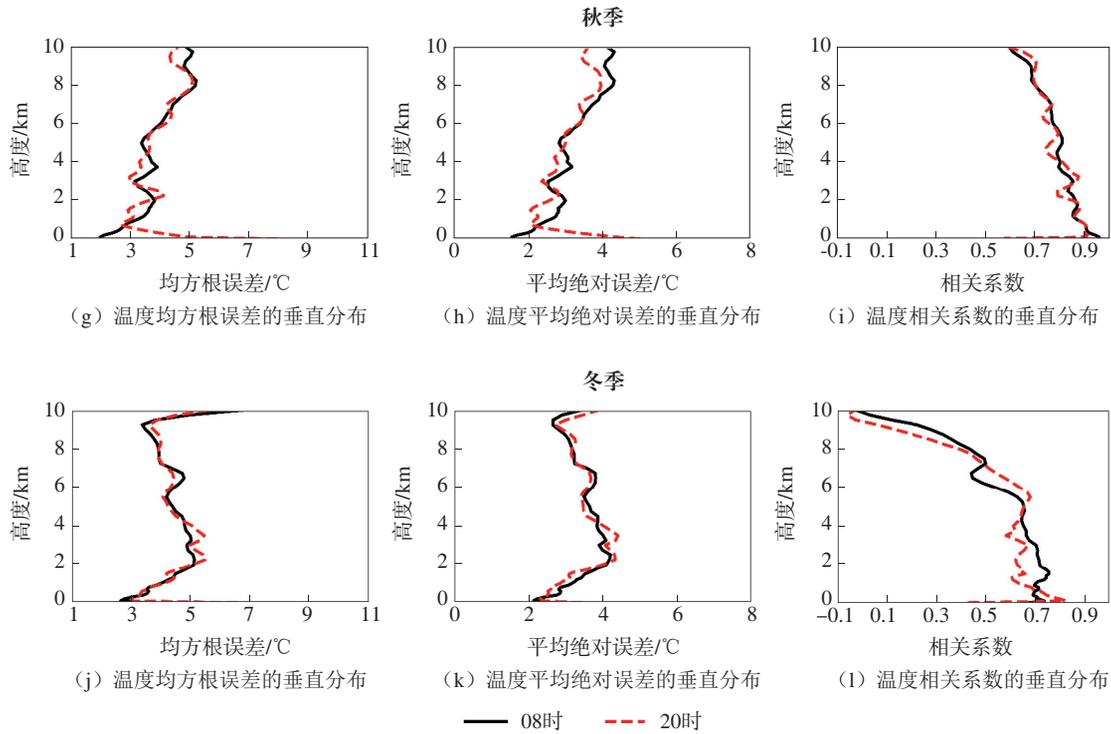
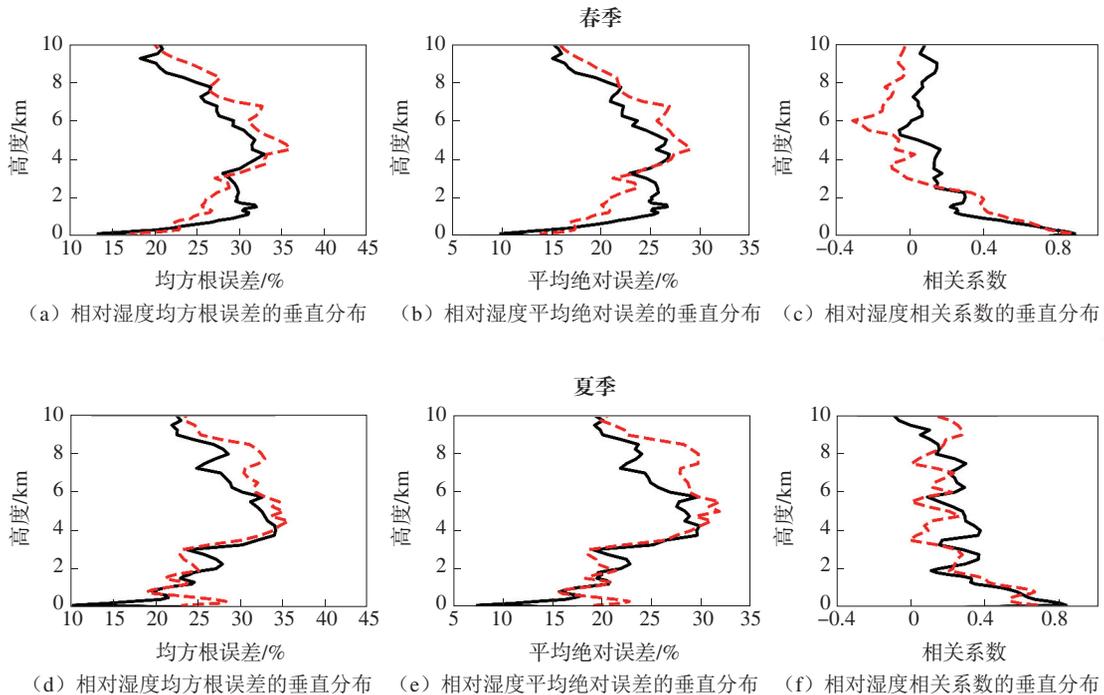


图4 不同季节各高度上温度的评估指标对比

Fig.4 Comparison of evaluation indicators for temperature at different heights in different seasons

通过不同季节 08 时和 20 时相对湿度平均绝对误差的垂直分布,可以看出:春季(图 5b),2 个时次相对湿度的误差在 4 km 以下 20 时明显优于 08 时,而在 4 km 以上 08 时误差比 20 时小;夏、秋季(图 5e、h),2 个

时次贴地层 08 时误差小于 20 时,误差在中低层波动幅度较大,高层误差逐渐减小;冬季(图 5k),低层 20 时误差明显小于 08 时,2 个时次误差随高度逐渐增大,在 4 km 以上误差逐渐减小,08 时明显优于 20 时。



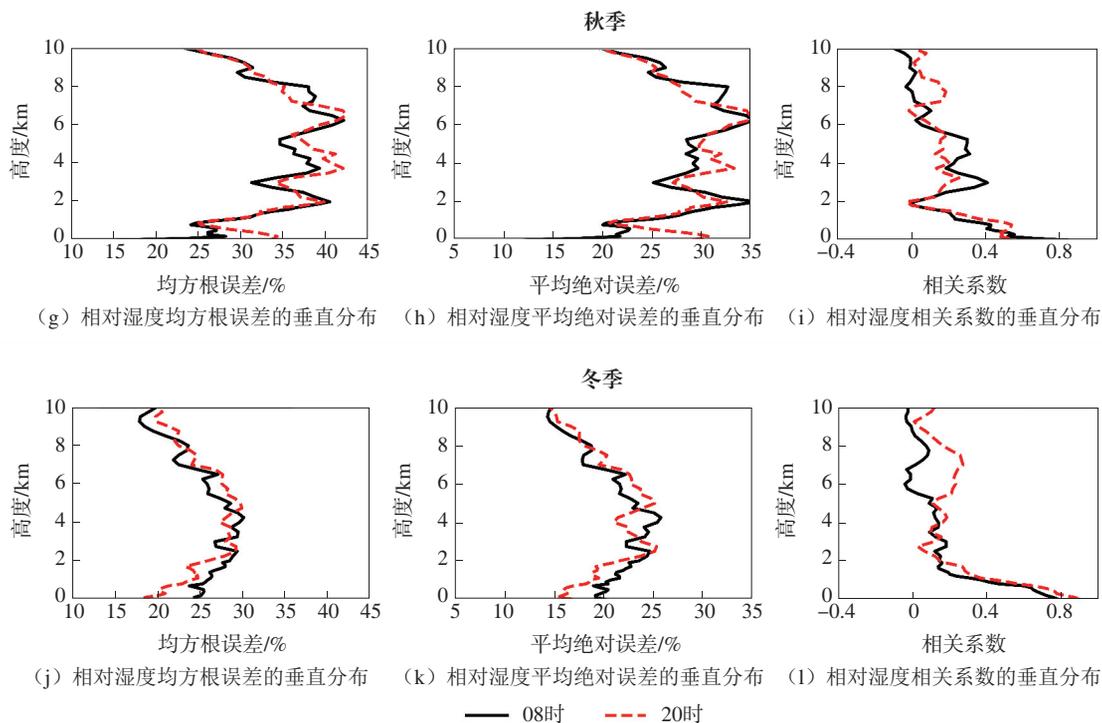


图5 不同季节各高度上相对湿度的评估指标对比

Fig.5 Comparison of evaluation indicators for relative humidity at different heights in different seasons

由不同季节 08 时和 20 时相对湿度相关系数的垂直分布(图 5c、f、i、l)来看,各季节在 1 km 以上相关系数均小于 0.5,其中春季在 2 km 以上基本维持在 0 附近,其他季节保持在 0.1~0.3,而春、秋、冬季在 1 km 以下相关系数逐渐接近 1.0,相关性较高。

总体来看,不同季节在温度方面秋季 08 时整层均方根误差相对最小,为 2 °C,相关性最好,夏季 08 时均方根误差仅次于秋季,但相关性最差为 0.1;春季 20 时均方根误差相对最大,相关性略强于夏季。相对湿度方面,冬季 20 时均方根误差整体最小,且波动幅度最小,相关性最好;春季 20 时均方根误差幅度最大,为 12%~35%,且相关性在 3 km 以上均小于 0,为负相关;秋季 2 个时次均方根误差在中层最大,达 40%以上。

### 2.3 不同天气条件下温湿廓线分析

晴空、云天、雨天等不同天气条件会对微波辐射计精度检验的观测结果产生直接影响,并进一步影响短时临近预报的准确率<sup>[1]</sup>。将 0~10 km 相对湿度小于 85%作为晴空判据<sup>[20]</sup>,气象记录降雨量  $P \geq 0.1$  mm 记为雨天,其余为云天,对不同天气条件下微波辐射计的精度进行分析。应用探空资料,将全部样本分为晴天 340 组、云天 307 组、雨天 90 组。

图 6 为不同天气条件下 08 时和 20 时温度的评价指标垂直分布,3 种条件均存在贴地层和顶层误差波动的情况。由均方根误差(图 6a、d、g)可以看出,晴天温度整体均方根误差较小,08 时和无降水时误差要小于 20 时。由平均绝对误差(图 6b、e、h)发现,晴天整体误差要小于云天和雨天,但云天整层误差波动幅度较小,雨天误差相对较大。由相关系数(图 6c、f、i)来看,晴天 08 时相关性最好,雨天 08 时相关性最差,同是 3 种条件在低层的相关性明显要高于中高层。

图 7 为不同天气条件下 08 时和 20 时相对湿度的评价指标垂直分布,3 种条件均存在中层误差要大于低层和高层,尤其是云天和雨天误差更明显。由均方根误差(图 7a、d、g)可以看出,晴天相对湿度整体均方根误差较小;雨天 2~6 km 误差最大达 45%,6 km 以上 08 时误差小于 20 时。由平均绝对误差(图 7b、e、h)发现,晴天整层误差波动幅度最小,且均在 25%以下;而云天和雨天 1 km 以下误差相对较小,4 km 处误差达 30%以上。由相关系数(图 7c、f、i)来看,3 种条件 1 km 以下相关性均较好,1~2 km 相关性迅速转差,在 6 km 以上甚至为负相关。

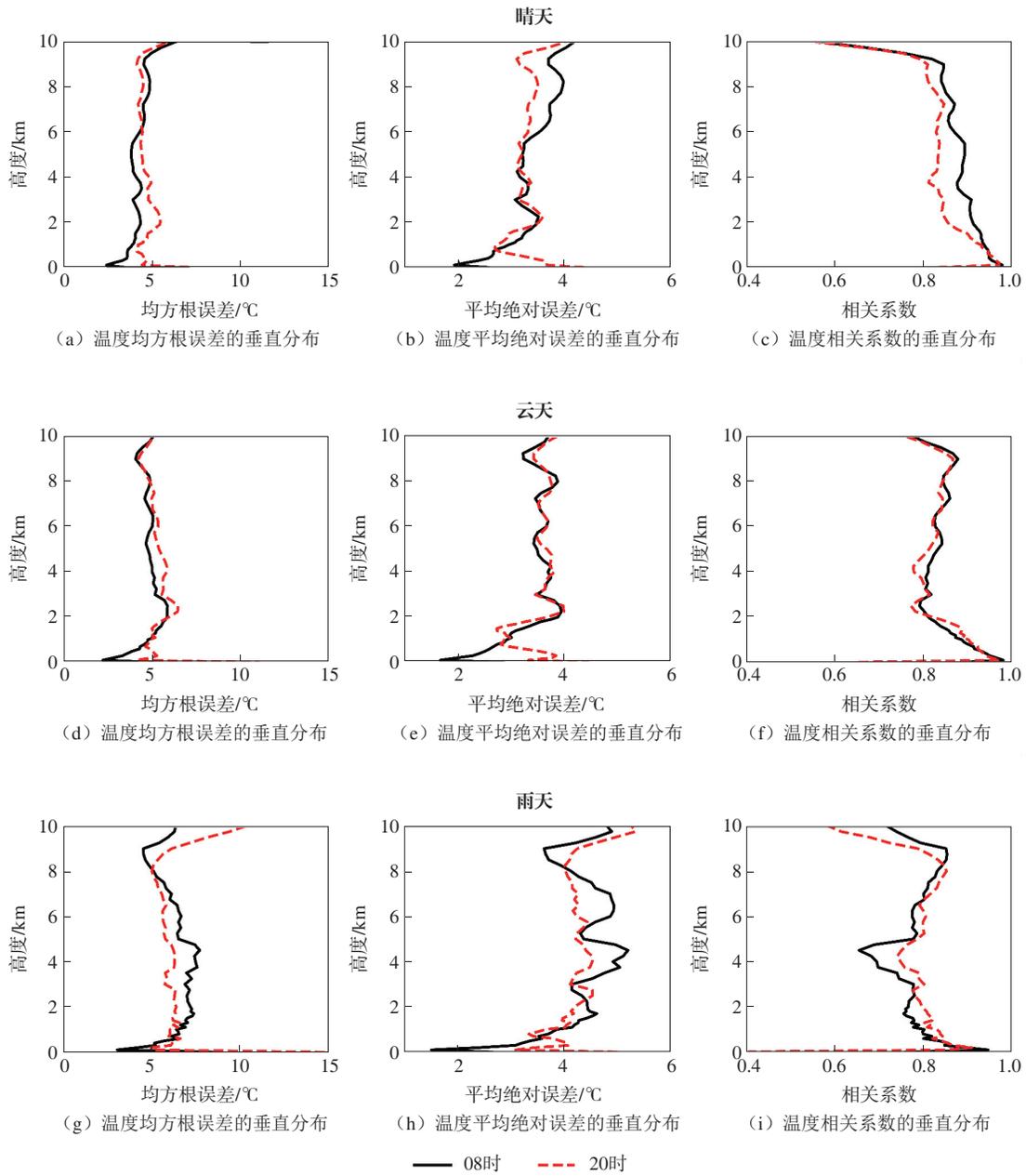
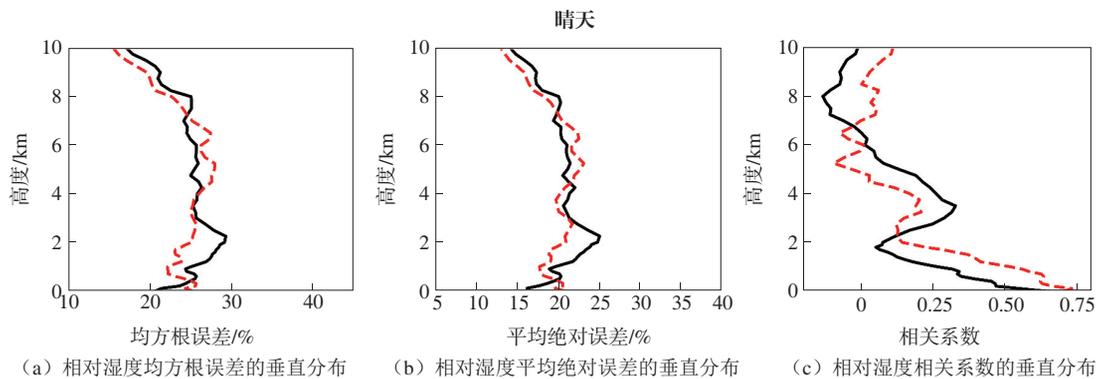


图6 不同天气条件各高度上温度的评估指标对比

Fig.6 Comparison chart of evaluation indicators for temperature at different heights under different weather conditions



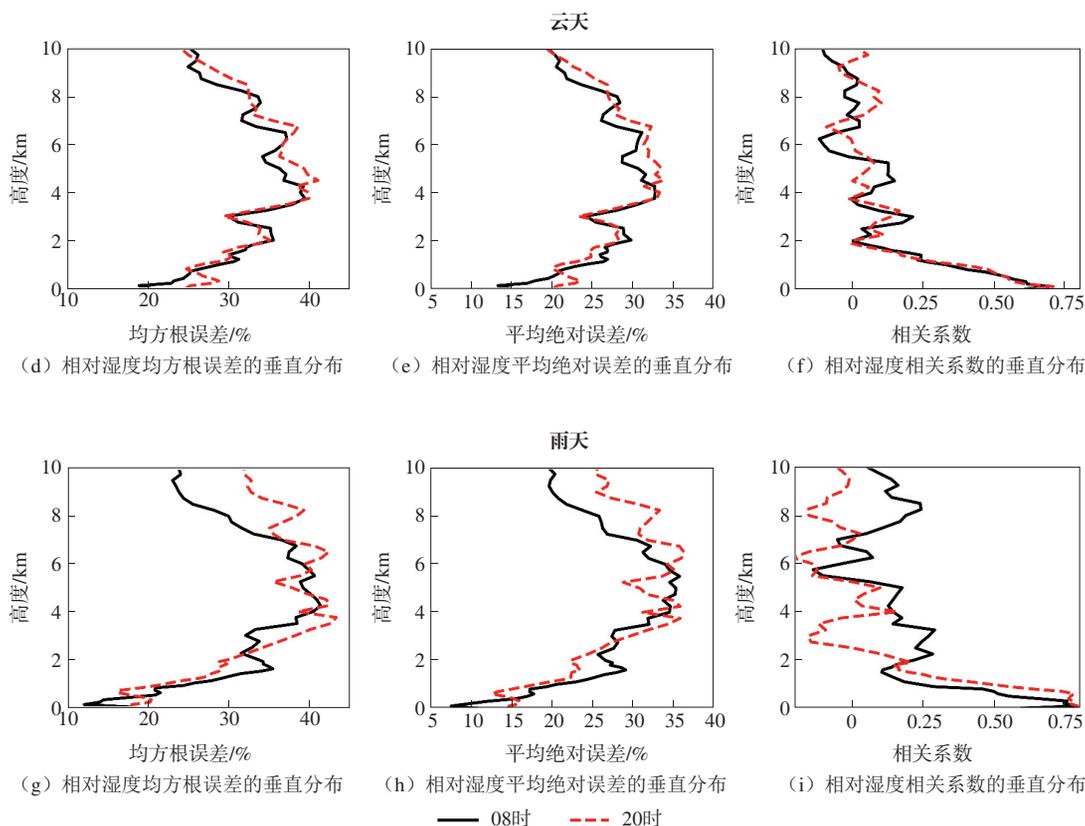


图7 不同天气条件各高度上相对湿度的评估指标对比

Fig.7 Comparison chart of evaluation indicators for relative humidity at different heights under different weather conditions

综上所述,晴天温度和相对湿度整体误差较小,相关性较高,晴天微波辐射计的探测精度明显优于云天和雨天。而在3种天气条件下,温度均存在贴地层和顶层误差波动的情况。相对湿度在云天和雨天中层误差较大,低层和高层误差相对小,08时和20时探测精度与天气条件关系不明显。

#### 2.4 不同降雨量级下温湿廓线分析

为了探究降雨对微波辐射计精度的影响,将上文中雨天的数据按照降雨量级分为小雨、中雨、大雨及以上3种情况(表2),分别计算不同降雨量级对微波辐射计精度的影响。

表2 降雨量级分类

Table 2 Classification of rainfall intensity	
降雨量级	降雨量( $P$ )/mm
小雨	$0 < P < 10$
中雨	$10 \leq P < 25$
大雨及以上	$P \geq 25$

由不同降雨量级下08时和20时温度的评价指标垂直分布(图8)可以发现:不同降雨量误差均小于 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。小雨时,贴地层均方根误差达到最大值,之

后稳定在 $5.0\sim 8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图8a);中雨时,贴地层误差最小,3 km以上20时误差明显大于08时(图8d);大雨及以上时,20时贴地层均方根误差达到最大值 $11.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,之后2个时次在 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内波动(图8g)。

对不同降雨量级下08时和20时温度的平均绝对误差垂直分布(图8b、e、h)进行分析发现:贴地层误差均有不同幅度的波动,贴地层以上无雨时误差最稳定,为 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

通过对不同降雨量级下08时和20时温度的相关系数垂直分布进行分析,可以看出:小雨时,20时贴地层相关系数达最低值0.25,4 km附近08时相关系数减小至0.65,相关系数在贴地层以上为 $0.60\sim 0.90$ (图8c),整层相对湿度的相关系数普遍在0.50以下;中雨时,2个时次均在贴地层相关系数达最大,为0.99,3 km以下逐渐减小,3 km以上08时稳定在0.90左右,而20时继续减小(图8f);大雨及以上时,20时在贴地层相关系数达最小,为 $-0.58$ ,08时3 km以下相关系数接近1.00,3 km以上在0.60附近,20时正好与08时趋势相反(图8i)。

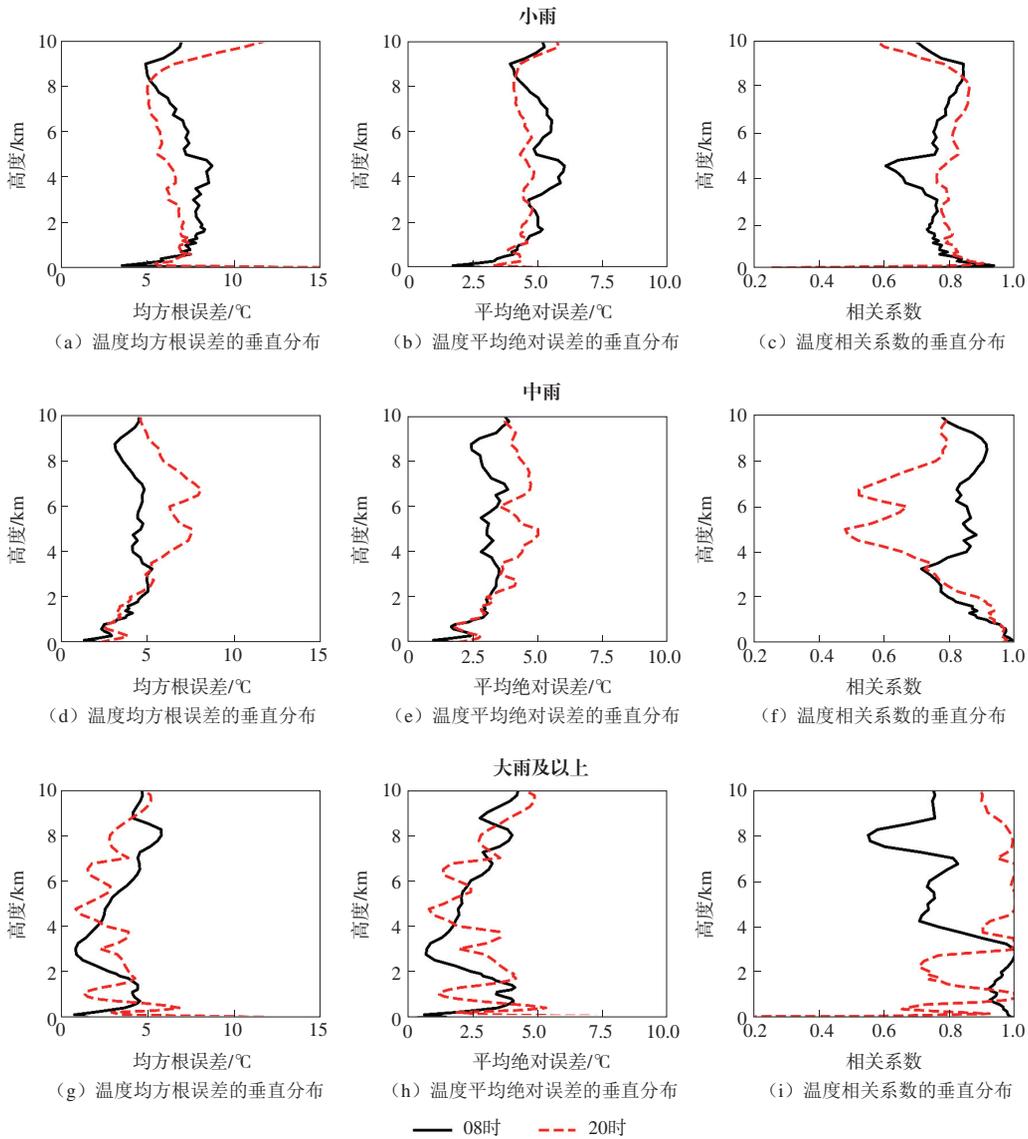


图8 不同降雨量级下温度的评估指标对比

Fig.8 Comparison chart of evaluation indicators for temperature at different rainfall intensities

通过不同降雨量级下08时和20时相对湿度的评价指标垂直分布(图9)可知:小雨时,均方根误差08时较20时精确度更高,整体幅度为12%~44%(图9a);中雨时,均方根误差08时在3km以下逐渐增加,在6km以上逐渐减小,而20时在2km处突然增加,之后波动为32%~46%(图9d);大雨及以上时,08时均方根误差在2km以下逐渐增加,2km以上波动幅度较大(图9g)。

由不同降雨量级下08时和20时相对湿度平均绝对误差的垂直分布(图9b、e、h)发现,小雨和中雨均表现出误差随高度先增大后减小的趋势,而大雨及以上误差波动幅度较大。通过不同降雨量级下08时和20时相对湿度相关系数的垂直分布可以看出:小

雨时,2km以下2个时次相关系数逐渐减小,2km以上08时相关性好于20时(图9c);中雨时,2km以下20时相关系数逐渐下降,最大值达0.90,而08时先增大后减小,最大值为0.78,2km以上2个时次均波动为-0.60~0.35(图9f);大雨及以上时,2个时次的相关系数整层波动幅度较大,整体相关性较差(图9i)。

综合来看,温度在不同降雨量级下,小雨时08时整体均方根误差最大,普遍接近10°C;中雨时3km以下均方根误差最小,精确度最高;大雨及以上时贴地层均方根误差较大且相关性较差。相对湿度在不同降雨量级下,小雨和中雨时均方根误差波动幅度基本一致,小雨时相关性优于中雨;大雨及以上时均方根误差波动较大,相关性较差。

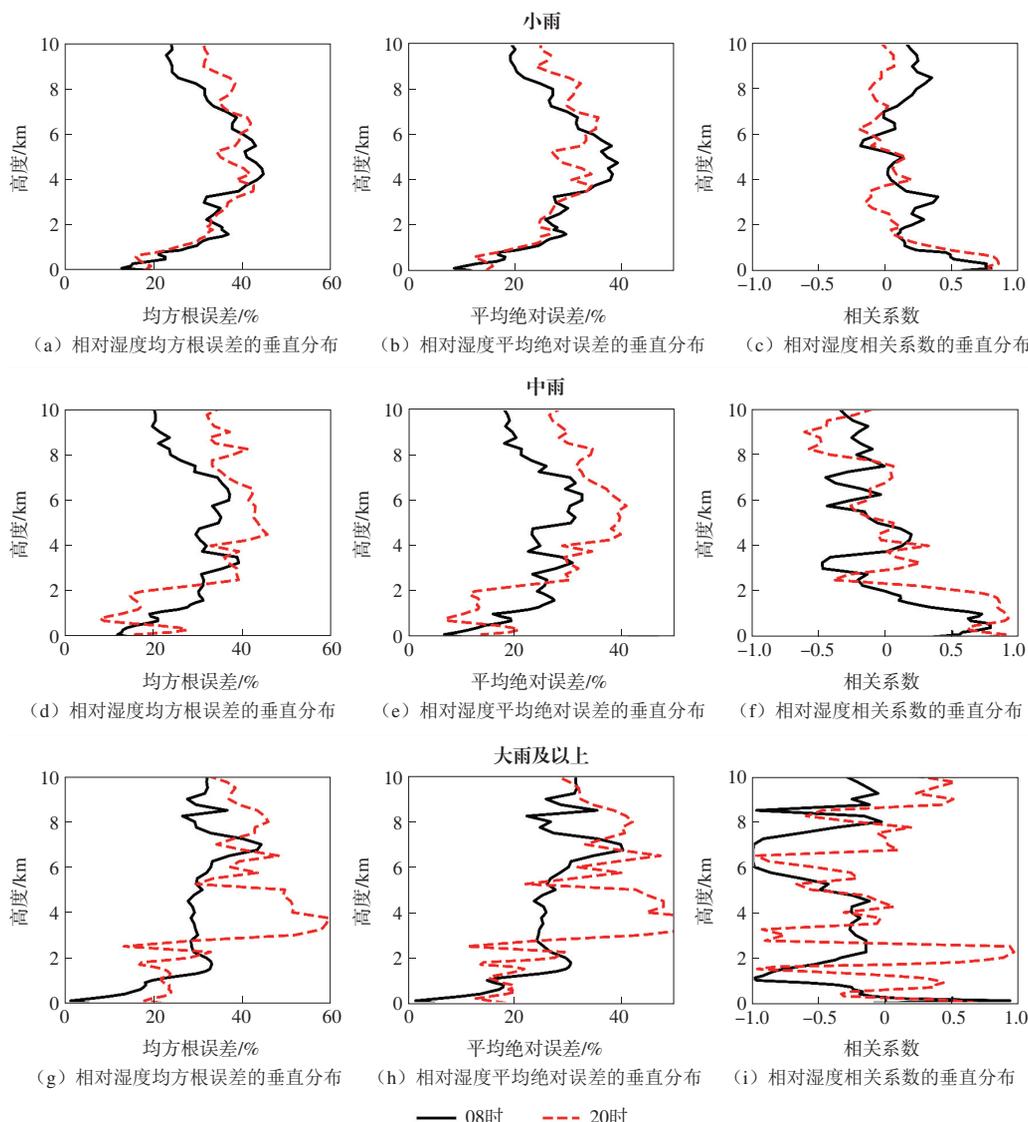


图9 不同降雨量级下相对湿度的评估指标对比

Fig.9 Comparison chart of evaluation indicators for relative humidity at different rainfall intensities

经过以上对微波辐射计温湿度精度的检验对比可以看出,温度、湿度廓线的均方根误差和相关系数在贴地层精度普遍较差。通过对大厂站的周边环境考察发现,这主要是受大厂观测站周边探测环境和人类活动的影响,使得微波辐射计在第一层0 m的反演数据与探空数据出现较大误差。

### 3 结论

通过对国产QFW-6000型微波辐射计08时和20时2个时次垂直方向的温度、相对湿度进行对比检验,分别研究了不同季节、不同天气条件、不同降雨量级对微波辐射计精确度的影响,对微波辐射计温度、相对湿度的探测精度给出了定量评估。得到

的主要结论如下:

(1)对比整体观测资料发现,微波辐射计在对整层大气的探测中,温度的探测精度和稳定性显著优于相对湿度,整层温度均方根误差在 $5^{\circ}\text{C}$ 以内,相对湿度均方根误差为 $20\% \sim 30\%$ ,且温度误差随高度的变幅较相对湿度更小,两者相关系数均为正值。

(2)温度在1 km以下的误差差异显著,08时误差均小于20时,但1 km以上08时和20时的温度误差都趋于稳定,误差值为 $3^{\circ}\text{C}$ 左右;相对湿度误差廓线表现出随高度先增大后减小的特点,4 km以下20时误差较小,4 km之上08时更优。

(3)不同季节下,夏秋季的温度误差总体小于春季和冬季,但夏季贴地层误差明显大于其他季节,

且 20 时的均方根误差达到 20 ℃,而相对湿度误差在冬季更为稳定。

(4)不同天气条件下,微波辐射计反演温度与探空观测值都具有较高的相关性,晴天微波辐射计的探测精度明显优于云天和雨天,随着云量的增多探测精度越差,而 08 时和 20 时探测精度与天气条件关系不明显。

(5)不同降雨量级下,雨量越大,温度和相对湿度的误差越大;小雨时温度的相关系数在贴地层以上为 0.60~0.90,但整层相对湿度的相关系数普遍在 0.50 以下,中雨及以上的降雨出现时,08 时和 20 时温度的相关系数表现出显著差异,而相对湿度相关系数在大雨及以上时波动最大,表现出极不稳定的探测性能。降雨量级的差异,对微波辐射计的探测精度会产生不同影响。

总体而言,QFW-6000 型微波辐射计对温度的探测精度更高,在业务中的可用性强于相对湿度,而不同季节、不同时次,受不同天气条件影响,温度和相对湿度的误差和相关性又表现出更为复杂的变化特征,只有掌握了这些特性,才能更加科学合理地将这一新型探测资料应用于天气预报和分析中。此外,除了云量、降水等天气条件外,风向风速等因素或许也是影响微波辐射计探测精度的因素之一,这也为后续检验和研究工作的开展提供了方向。

### 参考文献:

- [1] 邹倩,陈小敏,邓承之,等.重庆不同天气条件下地基微波辐射计探测特征[J].干旱气象,2022,40(1):114-124.
- [2] 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.
- [3] 刁宁辉,吴奎桥,孙从容,等.HY-2B 卫星微波辐射计地理定位与偏差修正[J].海洋气象学报,2022,42(4):77-84.
- [4] YANG H Y, CHANG K H, CHA J W, et al. Characteristics of precipitable water vapor and liquid water path by microwave radiometer[J]. J Korean Earth Sci Soc,2012,33(3):233-241.
- [5] MAROUANE T, RICARDO M F, NARENDRA R N, et al. On the analysis of ground-based microwave radiometer data during fog conditions[J]. Atmos Res, 2020, 231: 104652.
- [6] 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[J].沙漠与绿洲气象,2009,3(5):54-57.
- [7] 韩芙蓉,舒斯,苟阿宁,等.基于地基微波辐射计对武汉夏季暴雨过程的观测分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(6):83-88.
- [8] 张立,王玉龙,王媛.基于地基微波辐射计观测的东营地区低能见度天气指示性分析[J].海洋气象学报,2022,42(2):54-63.
- [9] 王洪,雷恒池,杨超,等.济南地区大气可降水量三种观测反演资料的对比分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):83-89.
- [10] 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.
- [11] 王健,吕新生,赵克明,等.地基微波辐射计对乌鲁木齐暴雨天气过程的观测分析[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(3):45-49.
- [12] 宋静,傅文伶,周天煜.基于地基微波辐射计资料对成都双流机场两次雷雨过程的分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(2):61-67.
- [13] 敖雪,王振会,徐桂荣,等.地基微波辐射计资料在降水分析中的应用[J].暴雨灾害,2011,30(4):358-365.
- [14] DI MICHELE S, BAUER P. Passive microwave radiometer channel selection based on cloud and precipitation information content[J]. Quart J Roy Meteor Soc,2006,132(617):1299-1323.
- [15] 刘莹,岳增祥,陈后财,等.QFW-6000 型微波辐射计探测精度分析[J].电子技术与软件工程,2020(9):66-68.
- [16] 乔贺,徐进,刘寅,等.地基微波辐射计温湿廓线对比试验初步分析研究[J].环境科学与管理,2019,44(10):129-134.
- [17] 海阿静,于永杰,张志国,等.QFW-6000 型地基多通道微波辐射计及典型天气过程观测结果分析[J].火控雷达技术,2016,45(4):6-11.
- [18] 陈涛,卜清军.MP-3000 微波辐射计气候资料数据质量控制方法研究[J].天津科技,2013,40(5):74-76.
- [19] WAGNER W, PRUB A. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use[J]. J Phys Chem Ref Data, 2002,31(2):387-535.
- [20] 黄润恒,邹寿祥.两波段微波辐射计遥感云天气的降水液态水[J].大气科学,1987,11(4):397-403.