

曹梅,王斌,杨珍,等. 地基微波辐射计与探空数据对比分析[J]. 陕西气象,2021(5):47-54.

文章编号:1006-4354(2021)05-0047-08

地基微波辐射计与探空数据对比分析

曹梅¹,王斌²,杨珍¹,张颖梅¹

(1. 西安市气象局,西安 710016;2. 陕西省气象局,西安 710014)

摘要:利用西安泾河国家高空气象站 2020 年 1—9 月电子探空仪在 0~10 km 探测高度内观测的温度和水汽密度数据,与同址的 MWP967KV 型地基微波辐射计反演的同类气象数据对比分析,以评估微波辐射计反演气象要素的准确性。结果表明:MWP967KV 型地基微波辐射计反演的温度廓线与探空数据相关性较高,平均偏差小于 1.5 °C,均方差小于 2.0 °C,两者相关性达到 0.990;水汽密度的平均偏差和均方差均小于 1.0 g/m³,相关性为 0.972;在任何天气条件下,温度的相关性均较高,水汽密度相关性较好;在雨天天气条件下,地基微波辐射计反演廓线与探空仪观测数据一致性最高,说明地基微波辐射计对厚云的反演精度比薄云高。地基微波辐射计在观测精度和探测高度方面还需要进一步优化改进,使其能获得高质量的探空观测资料。

关键词:西安;微波辐射计;探空资料;对比

中图分类号:P407.7:P414.5

文献标识码:A

在我国,传统的高空气象观测采用探空氢气球携带无线电探空仪升空探测各个高度的气象要素,可测得不同高度的大气温度、相对湿度、气压、风向、风速,通过这些资料计算出多种气象参数。无线电探空仪在升空过程中,由于是感应器直接接触空气,其所测量的气象资料精度高,准确可靠,但它也存在运作成本高,观测次数有限,探测仪随风会飘移很远等缺点。近年来,地基微波辐射计作为一种无源的遥感探测设备^[1],实现了实时连续、全自动、全天候的探测,获取大气温湿探空资料的时间和空间分辨率高,能够克服传统探空观测的局限性,具有独立工作的能力,近年来已被广泛应用到大气探测中^[2-7],成为大气探测的重要观测手段之一。

地基微波辐射计的硬件研制涉及到结构设计、电气设计、天线设计、标定设计等,其集成度高,结构复杂,因此微波辐射计在测量精度、稳定性方面的设计难度大,需要不断提高^[1]。地基微

波辐射计基于观测地所有的历史探空资料为样本集,经过对历史资料的前期处理,进而反演出观测数据,其数据的可靠性很大程度上依赖于观测的探空资料质量,因此地基微波辐射计需要不断验证和改进^[8-10],才能满足各种天气状况下的观测要求。张文刚等^[11]利用武汉站探空资料与同址地基微波辐射计资料,分析了微波辐射计探测偏差的日变化及时间序列变化特征,结果表明温度的探测偏差大值区出现在午后,相对湿度及水汽密度的探测偏差大值区则在凌晨,温度及相对湿度探测误差的时间序列表现为起伏较大,而水汽密度则相对平稳,降水对微波辐射计的探测准确度产生较明显的影响。王旗等^[12]利用地基微波辐射计反演的气象要素数据与长春探空站电子探空数据进行对比,认为地基微波辐射计的反演廓线与探空数据在天气良好的情况下一致性较高,在雪(雨)天气下很好地表现出大气水汽变化趋势及量值的时空变化,在霾天气影响下,相关度迅速

收稿日期:2021-02-07

作者简介:曹梅(1979—),女,陕西米脂人,硕士,高工,从事综合气象测报工作。

基金项目:西安市气象局 2019 年科研项目(xqky2019-18);西安市科技计划项目(20SFSF0015)

下降。孙雷等^[13]应用温江探空站 3 年的 L 波段探空数据和地基微波辐射计资料进行比较,发现气温的相关性比相对湿度的相关性好,冬季的气温和相对湿度数据以及春夏两季的气温数据可直接使用,其他季节的需订正后使用。在 4 km 以下,有降水发生时,地基微波辐射计反演的气温较探空数据偏高 3 ℃。2020 年全国高空观测站电子探空仪全面升级,大大增加了电子探空仪的观测精度,本文利用西安泾河国家高空气象观测站 2020 年 1—9 月探空资料与在同址内布设的 MWP967KV 型地基微波辐射计资料,分析二者在 0~10 km 探测高度内 58 个层次的温度和水汽密度的差异及相关性,以评估微波辐射计反演气象要素的准确性。

1 数据与方法

1.1 探空资料

西安泾河国家高空气象观测站采用传统氢气球携带探空仪自由升空方式观测。电子探空仪观测数据每秒一组,包括温度、相对湿度、气压,每日探测两次,时间分别是北京时 07:15 和 19:15。采样时长通常大于 60 min,随着气球的升空,探测到不同高度气象要素的时间都不相同,高度和探测时间成正比。

1.2 地基微波辐射计资料

中国兵器工业第 206 研究所于 2017 年 9 月在泾河国家高空气象站同址布设了 MWP967KV 型地基多通道微波辐射计,地基微波辐射计每年定期液氮绝对标定一到两次,其中在 2019 年 7 月初和 2020 年 4 月初进行了液氮标定。日常设备实时进行热源标定和噪声源标定,定标时间间隔 2 min。在晴天每 2 min 进行一次 Tipping 定标,通过多重定标方式来确保亮温观测精度。MWP967KV 型地基多通道微波辐射计利用人工神经网络实现了距地 0~10 km 范围内垂直方向上 58 层的大气温度、相对湿度、水汽密度、液态水廓线等要素的观测。地基微波辐射计的采样频率为每 2 min 一次,采样的垂直分辨率为 0~500 m 为 50 m,500 m~2 km 为 100 m,2 km~10 km 为 250 m。

1.3 样本分类质控说明

对试验用地基微波辐射计进行严格的一致性检查,如有缺测时间过长,或数据明显不连续的样本,直接剔除。探空数据因在台站进行随班质控,不再重复进行,共获得样本 545 组。为了减少地基微波辐射计和探空资料在观测时间上的差异,本文在资料选取过程中考虑探空资料空间和时间尺度变化,选取与探空资料某一高度层最为接近的微波辐射计观测数据,根据探空气球观测时间和高度的变化选取与之对应的微波辐射计探测值。将全部样本分为晴空(无云或云量小于 3 成),云天(云量大于等于 3 成),雨天,均以西安泾河国家高空气象观测站每日 07 时和 19 时的云天人工观测记录为依据判断。经过筛选,确定晴空样本共 122 组,云天样本共 367 组,雨天样本共 56 组。

1.4 水汽密度计算公式

传统探空观测中没有直接的水汽密度值,可利用其它探空要素计算出水汽密度,采用如下公式计算^[14]。

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

式(1)中 e_s 为饱和水汽压(hPa); T 为热力学温度, $T = t + 273.15$, t 为气温(℃)。

将式(1)的饱和水汽压 e_s 计算结果代入式(2)计算实际水汽压

$$e = e_s U, \quad (2)$$

式(2)中, e 为实际水汽压(hPa), U 为探空相对湿度(%)。

将式(2)中的实际水汽压计算结果代入式(3)计算水汽密度

$$\rho_v = e / R_v T. \quad (3)$$

式(3)中, R_v 是水汽的比气体常数,取 461.51 (J/(K·kg))。

1.5 平均偏差和均方差的计算方法

为了判断地基微波辐射计反演数据与探空数据的差异,计算二者之间的绝对平均偏差和均方差。绝对平均偏差(D)是数列中各项数值 X_i 与其真值 X 的离差绝对值的算术平均数,这里的真值是指传统的探空观测数据。它是用来测定数列中各项数值对其真值离散程度的量值。其计算公

式为

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X|}{n}, \quad (4)$$

均方差(σ)也被称为标准偏差,能反映一个数据集的离散程度。其计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{n}}。 \quad (5)$$

2 对比分析

2.1 温度廓线观测反演对比

由图1可以看出,地基微波辐射计反演的温度廓线与探空数据的绝对平均偏差在3.5 km以下小于1.0℃,随着高度的增加绝对平均偏差逐渐增大,10 km时绝对平均偏差为1.45℃。均方差在0.4 km以下小于1.0℃,随着高度的增加逐渐增大,9.5 km以下均方差小于2.0℃。因此地基微波辐射计反演的数据在低空可靠性较高,随着高度的增加,其观测能力逐渐减弱。

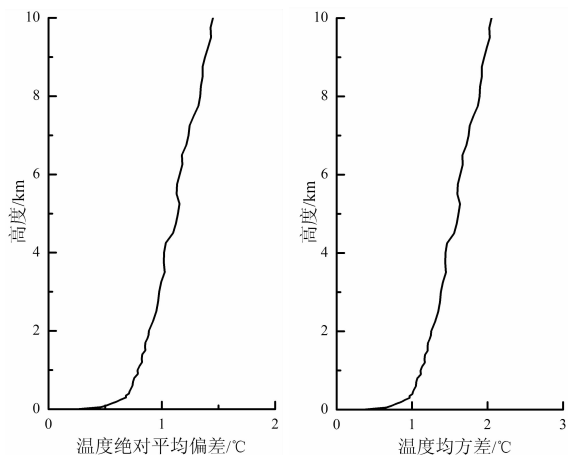


图1 西安泾河站2020年1—9月微波辐射计反演温度与探空温度的绝对平均偏差和均方差

将地基微波辐射计数据与探空数据在散点图(图2)上作对比分析。地基微波辐射计反演温度与探空观测温度数据之间相关系数达到0.990,具有良好的线性相关关系。在温度较高时,数据点分布较集中;温度较低时,数据点分布相对分散。地面低层温度通常高于高层温度,表明微波辐射计在低层观测的温度精度与探空数据较为接

近,低层温度可信度高于高层。

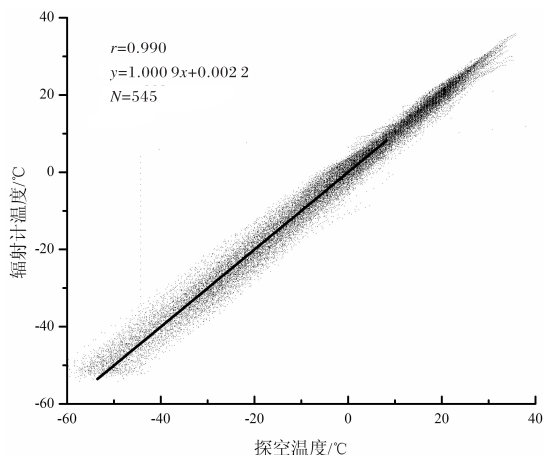


图2 西安泾河站2020年1—9月微波辐射计反演温度与探空温度散点图(直线为拟合线)

2.2 水汽密度廓线观测反演对比

图3为水汽密度廓线的绝对平均偏差和均方差,从图中可以看出,水汽密度廓线的绝对平均偏差和均方差均小于0.8 g/m³,最大误差不超过1.0 g/m³。在2 km高度以下,两者误差随着高度的增加而增大,但2 km以上,误差逐渐减小,在8 km以上接近于0 g/m³。虽然近地面水汽含量丰富,但误差却较小,说明地基微波辐射计对低层的探测精度较高,随着高度的增加探测精度逐渐减弱。但是在2 km高度以上,水汽含量逐渐减小,到了高空,特别是8 km以上,水汽含量稀薄,水汽变化幅度小,反而使得反演相对准确。

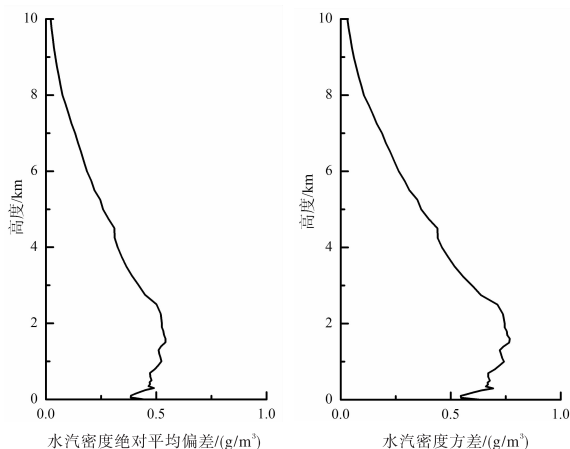


图3 西安泾河站2020年1—9月微波辐射计反演水汽密度与探空水汽密度的绝对平均偏差和均方差

由地基微波辐射计反演的水汽密度与探空观测水汽密度的散点图(图4)可知,二者之间相关系数为0.972,线性相关关系较好,且在水汽密度数值较低时分布集中,水汽密度较大时相对离散。水汽分布较为复杂,地面低层水汽密度高于高层,水汽密度越大,误差分布越宽。

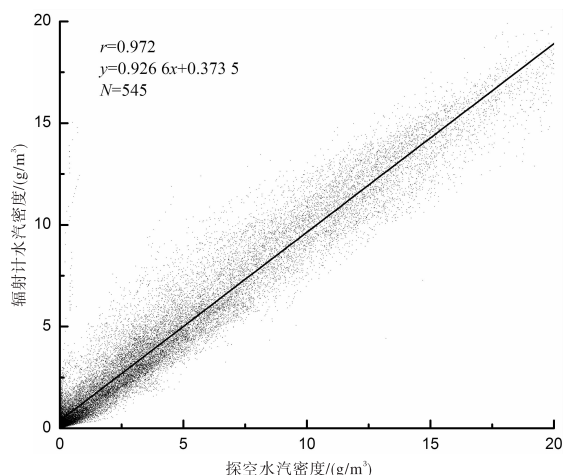


图4 西安泾河站2020年1—9月微波辐射计反演水汽密度与探空水汽密度散点图(直线为拟合线)

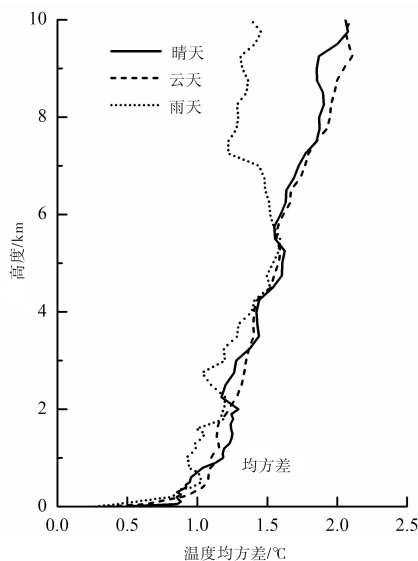
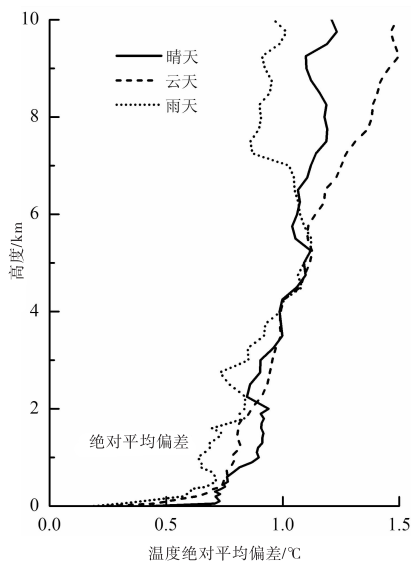


图5 西安泾河站2020年1—9月不同天气条件下微波辐射计反演温度与探空温度的绝对平均偏差和均方差

为进一步分析不同天气条件下两种仪器廓线,随机选取2020年几次不同天气状况的个例进行分析,选取时尽量覆盖不同季节。图6至图8分别为晴天、云天、雨天情况下地基微波辐射计反

2.3 不同天气条件下观测数据对比

为了进一步分析在不同天气条件下地基微波辐射计(用ZP表示)与探空资料的差异,将全部样本资料分为晴天、云天和雨天三类,分别分析它们的平均偏差和均方差。

2.3.1 温度 从不同天气条件下温度的绝对平均偏差和均方差(图5)可以看出,不论在什么天气条件下,温度的绝对平均偏差和均方差都随着高度的增加而增大,表明地基微波辐射计在任何天气条件下观测精度都随高度增加而减小。在0.6 km高度以下,天气条件对温度的偏差无明显影响;在0.6 km以上,2 km以下,雨天时的绝对平均偏差比云天和晴天小,晴天时绝对平均偏差最大;在2 km以上,4 km以下,雨天的绝对平均偏差最小,晴天的绝对平均偏差小于云天;在6 km以上不同天气下的绝对偏差出现明显差异,雨天下绝对平均偏差最小,其次是晴天,云天时绝对平均偏差最大。以上分析说明MWP967KV型地基微波辐射计反演的厚云温度的精度比薄云的高。这与雷连发等^[5]分析的结论一致。

演的温度与探空数据廓线对比个例图。从图6至图8可见,地基微波辐射计与探空温度廓线相关性都在0.99以上,说明两条温度廓线的整体吻合度非常高。对于垂直高度的对比,在晴空天气条

件下,2、4、9月探空观测温度廓线均出现明显的贴地逆温,微波辐射计未观测出明显逆温层。在云天天气条件下,低空1 km以下两条廓线吻合

度较高,随着高度的增加误差逐渐增大。雨天天气下,从地面到10 km高度两条廓线都保持良好的 consistency。

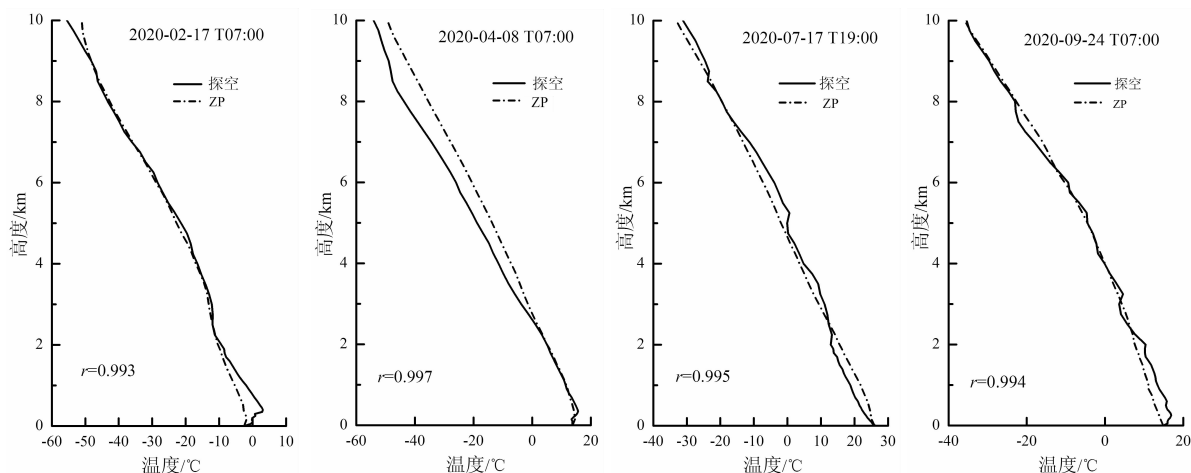


图6 西安泾河站晴天天气下微波辐射计与探空温度廓线对比个例图(ZP为地基微波辐射计廓线,下同)

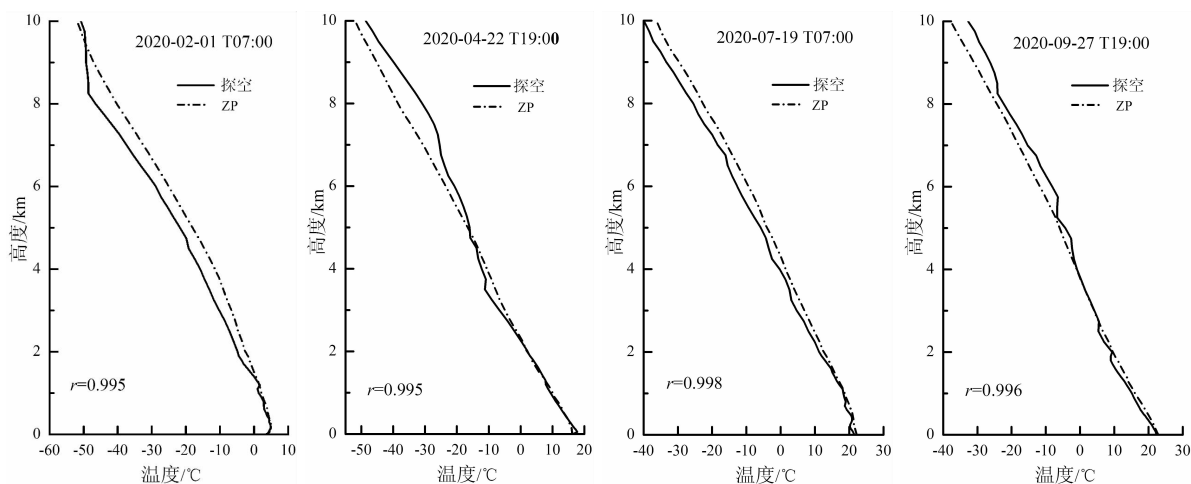


图7 西安泾河站云天天气下微波辐射计与探空温度廓线对比个例图

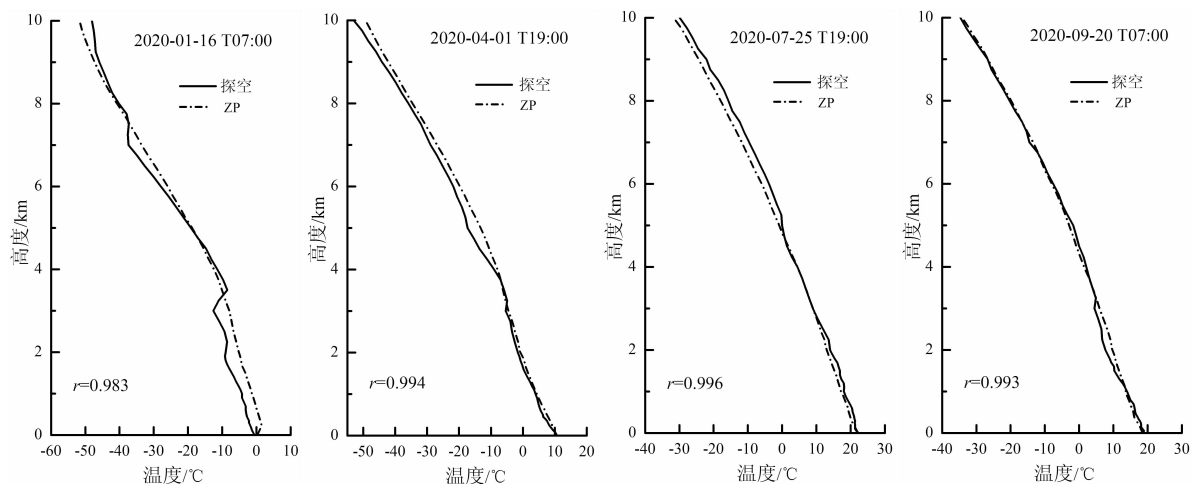


图8 西安泾河站降水天气下微波辐射计与探空温度廓线对比个例图

2.3.2 水汽密度 从不同天气条件下水汽密度的绝对平均偏差和均方差(图9)可以看出,在1 km以下,不论在什么天气条件下,水汽密度的绝对平均偏差和均方差都随着高度的增加而增大,并且雨天的平均偏差比晴天和云天小,晴天的平均偏差最大。1 km以上,晴天和雨天天气下绝对平均偏差和均方差随着高度的增加逐渐减小。

在云天天气下,2 km以下,水汽密度的绝对平均偏差和均方差仍随着高度的增加而增大,2.5 km以上,随着高空水汽的减少,观测误差也逐渐减小。在4 km以上,晴天天气下绝对平均偏差和均方差反而比云天和雨天时小,高空水汽含量迅速减小,特别是晴天时水汽含量更小,因此相应的误差也减小。

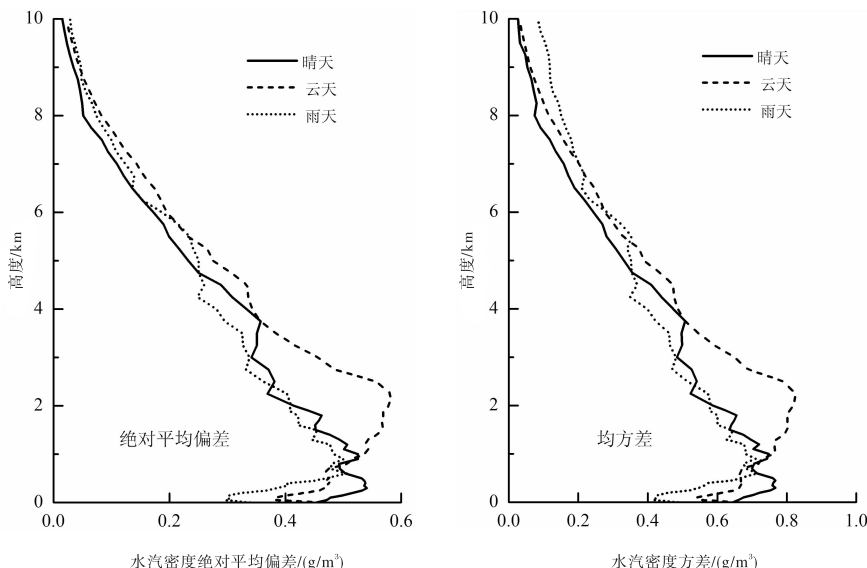


图9 西安泾河站2020年1—9月不同天气条件下微波辐射计反演水汽密度与探空水汽密度的绝对平均偏差和均方差

图10至图12(见第53页)分别为晴天、云天及雨天天气条件下地基微波辐射计水汽密度与探空水汽密度廓线对比个例图。从图中可以看出,地基微波辐射计水汽廓线与探空数据之间成正相关关系,相关系数在0.87~0.99之间。在晴空天气条件下,水汽密度值较小,在低空1 km以下两者一致

性较好,在6 km以下误差较大,6 km以上高空水汽密度非常小,几乎接近于零,两条水汽密度廓线吻合。在云天天气条件下,低层相关性较差,6 km以上高空水汽密度非常小时,两条廓线重合。在降雨天气条件下,从低层到高层水汽密度值都较大,两条廓线从上到下都保持较好的一致性。

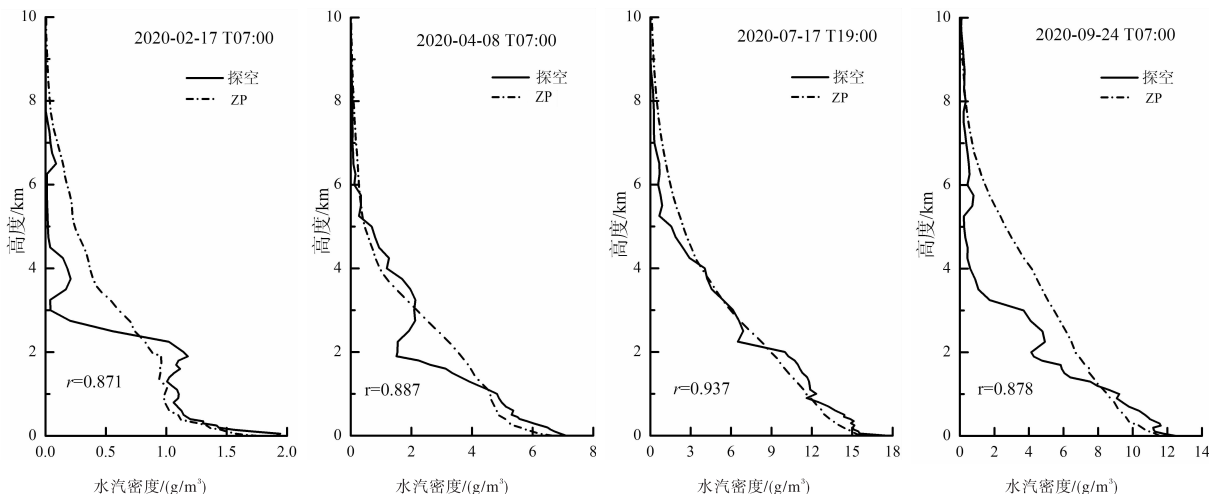


图10 西安泾河站晴天天气下微波辐射计与探空水汽密度廓线对比个例图

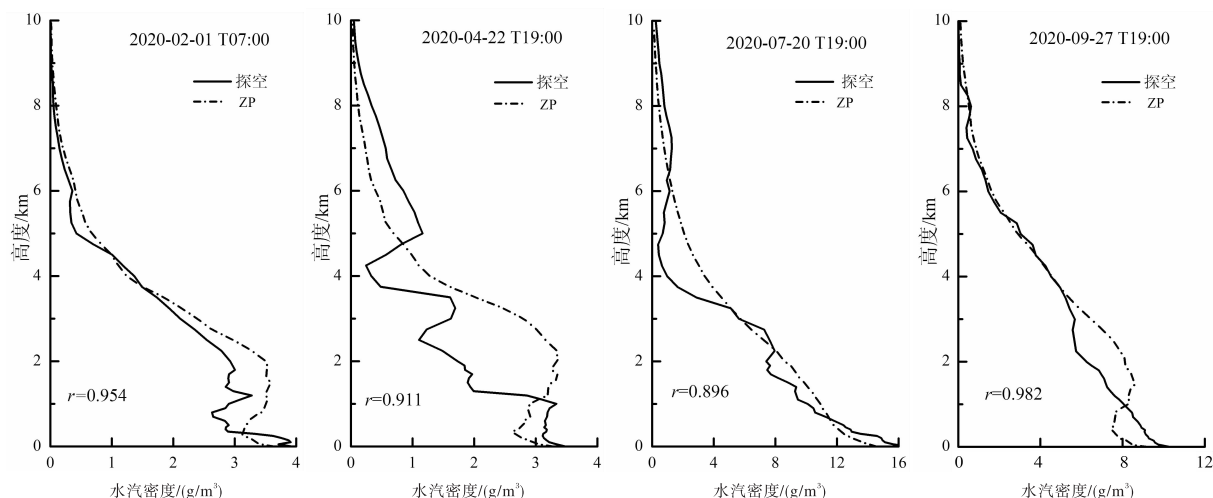


图 11 西安泾河站云天天气下微波辐射计与探空水汽密度廓线对比个例图

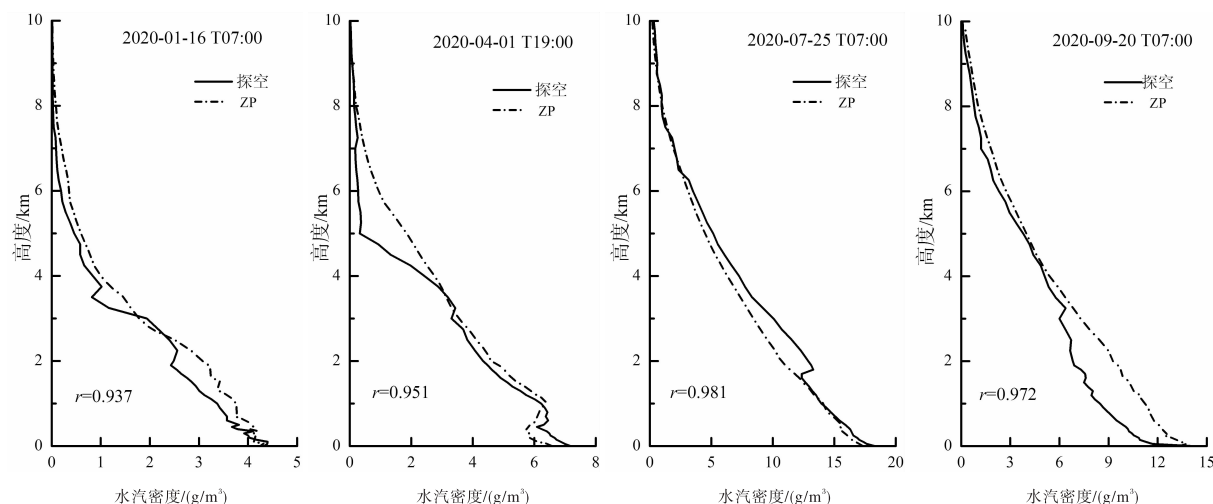


图 12 西安泾河站降水天气下微波辐射计与探空水汽密度廓线对比个例图

MWP967KV 型地基多通道微波辐射计在雨天探测中进行了改进,在降雨时段通过加大风机鼓风量减少天线罩表面雨水。利用降雨传感器识别降雨,根据长期观测经验对降雨期间的亮温误差进行订正,反演过程结合天控扫描观测数据很大程度改善了数据反演效果。在降雨期间大气湿度饱和,反演结果接近饱和与实际情况接近,因此与其他天气状况误差相比反而减小。

3 结论与讨论

利用西安泾河国家高空气象站 2020 年 1—9 月电子探空仪在 0~10 km 探测高度内观测的温度和水汽密度数据,与同址的 MWP967KV 型地基微波辐射计反演的同类气象数据对比分析,以评估微波辐射计反演气象要素的准确性,得出以

下结论。

(1)西安泾河站 2020 年 MWP967KV 型地基微波辐射计反演的温度廓线与探空数据呈较高的正相关关系,平均偏差小于 1.5 °C,均方差小于 2.0 °C,两者相关性达 0.990。地基微波辐射计反演的低空数据可靠性较高,随着高度的增加,观测能力逐渐减弱。

(2)地基微波辐射计反演的水汽密度廓线与探空数据成正相关关系,绝对平均偏差和均方差均小于 1.0 g/m³,相关系数为 0.972。地基微波辐射计对低层的探测精度较高,随着高度的增加探测精度逐渐减小,但是在 2 km 高度以上,随着水汽含量逐渐减小,反演数据反而相对准确。

(3)在任何天气条件下,温度的绝对平均偏差

和均方差都随着高度的增加而增大,从垂直分布看,雨天时地基微波辐射计反演廓线与探空数据的偏差最小,说明地基微波辐射计对厚云的观测比薄云的精度高。从个例的相关性分析可得,在垂直观测模式固定不变的条件下,地基微波辐射计对于逆温层未能很好地反映出来。

(4)在 1 km 以下,不论在什么天气条件下,水汽密度的绝对平均偏差和均方差都随着高度的增加而增大,雨天的平均偏差比晴天和云天小,晴天的平均偏差最大。而随着高度的增加,高空水汽含量迅速减小,相应的误差也减小。在降雨天气条件下,两种设备的水汽密度廓线一致性好于晴天和云天。

(5)MWP967KV 型地基微波辐射计作为一种新型的探测仪器,能够提供连续性高时间密度的探空数据。地基微波辐射计对低层的探测精度高于高层,2 km 以上垂直分辨率明显减小,且目前观测高度最高仅到达 10 km,与传统探空观测高度相差甚远。地基微波辐射计在垂直分辨率、观测精度和探测高度等方面还需要进一步优化改进,使其获得高质量的探空观测资料,在气象预报预警、人工影响天气、气象防灾减灾等领域发挥其重要的价值。

参考文献:

- [1] 张北斗.地基多通道微波辐射计的反演算法及应用[D].兰州:兰州大学,2014.
- [2] 王湘玉.微波辐射计的应用及其研究进展[J].湖北农机化,2018,212(11):60.
- [3] 党张利,张京朋,曲宗希,等.微波辐射计观测数据在降水预报中的应用[J].干旱气象,2015,33(2):340-343.
- [4] 郝巨飞,王晓娟,齐佳慧,等.MWP967KV 型微波辐射计对重污染天气的探测分析[J].环境科学与技术,2018,41(5):206-213.
- [5] 雷连发,马若飞,朱磊,等.地基多通道微波辐射计在大气遥感中的应用[J].火控雷达技术,2018,47(1):11-16.
- [6] 梁谷,李燕,纪爱琴,等.用微波辐射计作云降水潜力的估算[J].陕西气象,2003(5):28-31.
- [7] 梁谷,李燕,岳治国,等.地基微波辐射计探测空中水个例分析[J].陕西气象,2005(1):23-25.
- [8] 张文刚,徐桂荣,颜国跑,等.微波辐射计与探空仪测值对比分析[J].气象科技,2014,42(5):737-741.
- [9] 魏东,孙继松,雷蕾,等.用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析[J].气候与环境研究,2011,16(6):21-30.
- [10] 马丽娜,李青,姜苏麟,等.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,2018,33(1):68-77.
- [11] 张文刚,徐桂荣,廖可文,等.降水对地基微波辐射计反演误差的影响[J].暴雨灾害,2013,32(1):70-76.
- [12] 王旗,王周翔,于翠红.MWP967KV 型地基微波辐射计与探空观测数据对比分析[J].现代农业科技,2017(7):211-213.
- [13] 孙磊,张涛.成都地基微波辐射计反演大气温湿性能的分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2021,46(1):125-132.
- [14] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].2版.北京:北京大学出版社,2003:19-21.