

杨莲梅,李霞,赵玲,等. MP-3000A型地基微波辐射计探测性能及其在乌鲁木齐降水天气中的初步应用[J]. 干旱气象, 2013, 31(3): 570-578, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-03-0570

MP-3000A型地基微波辐射计探测性能及其在乌鲁木齐降水天气中的初步应用

杨莲梅^{1,2}, 李霞², 赵玲², 王世杰²

(1. 新疆维吾尔自治区气象台, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:利用乌鲁木齐 MP-3000A 型 35 通道地基微波辐射计与 L 波段高空气象探测系统 2010 年逐日探测的温湿度, 分析微波辐射计探测温湿度性能及其在降水天气中的特征。结果表明:微波辐射计与探空测量温、湿度具有很好的相关性和一致性, 两者观测 58 层高度的温度、相对湿度、水汽密度和整层可降水量的相关系数分别为 0.99、0.74、0.92 和 0.94, 均达到 0.01 显著性水平。10 km 以下垂直廓线分析表明:微波辐射计测量的温度值均小于探空测量值, 相对湿度和水汽密度大于探空测量值, 存在系统误差。可降水量偏差冬季最小, 夏季最大。降水发生时两者探测的温湿度廓线变化趋势一致, 温度和 2 000 m 以上水汽密度受降水天气影响相对较小, 微波辐射计能较好地反映大雨和暴雨天气发生和结束过程中热力和水汽参数的时空分布和剧烈变化特征。

关键词:微波辐射计; 温度; 水汽密度; 相对湿度; 可降水量

文章编号:1006-7639(2013)-03-0570-09 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-03-0570

中图分类号:P407.7

文献标识码:A

引言

探空是测量大气温度、气压、风和水汽等廓线的最基本方法,但在测量精度、费用以及时间连续性等方面存在诸多局限性,而且常规探空由于气球漂移存在误差^[1]。微波辐射计通过接收来自大气一定波段的微波辐射,探测大气温度、相对湿度、水汽密度、液态水含量的连续垂直廓线^[2-4]。国外有较多气象学者从事地基微波遥感的研究和应用工作,Revercomb 等^[5]综述了美国 Atmospheric Radiation Measurement 实验中使用微波辐射计探测有关水汽的研究背景以及前景。Ware 等^[6]对微波辐射计和探空资料进行了对比,指出在数值预报中微波辐射计与探空资料具有同等的准确性;Knupp 等^[7]对比微波辐射计和探空结果表明温度误差 < 2 °C,水汽密度 < 1.5 g · m⁻³,微波辐射计对中尺度天气系统结构有较好的监测能力。国内科学家在微波辐射计探测温度、水汽方面也进行了大量研究工作,赵兵科等^[8]分析了地基微波辐射计在 0713 号“韦帕”台风登陆前后探测性能及台风登陆前后温度和水汽密度场连续变化特征,表明微波辐射

计对台风具有一定的探测能力。魏重^[9]、刘红燕^[10]等分析了北京地区地基微波辐射计的探测性能及其水汽特征等,虽然由于微波辐射计探测误差造成探空与热力相关的物理参量存在不同程度误差,但其随着时间演变仍然具有很好的指示意义,是模式预报的有益补充。地基微波辐射计资料越来越多地被用于云、水汽和雾等的研究^[11-21],具有对温度、水汽的三维高空分辨探测能力,在人工增雨作业中发挥着积极作用。

新疆位于我国西北干旱区,探空站点稀少,限制了对该地区温度、水汽垂直廓线演变特征的认识。中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所在乌鲁木齐探空站安置了一台 MP-3000A 型 35 通道微波辐射计,本文利用乌鲁木齐微波辐射计和探空站 2010 年逐日探测资料,分析微波辐射计在乌鲁木齐地区的探测性能及其在降水天气过程中温湿参数的变化特征,为微波辐射计在乌鲁木齐天气预报、空气污染预报、区域数值模式改进和人工影响天气中的应用提供科学依据。此外,在站点稀疏的中国西北内陆地

收稿日期:2013-03-21; 改回日期:2013-05-16

基金项目:中央级科研院所基本科研业务费专项(IDM200802)、新疆自然科学基金(2011211A102)共同资助

作者简介:杨莲梅(1969-),女,河北人,研究员,主要从事中高纬天气气候研究. E-mail: yanglm@idm.cn

区地基微波遥感探测可以用于合理评估卫星的反演精度。

1 资料与方法

探空观测采用 L 波段高空气象探测系统, L 波段雷达是 GFE(L)1 型二次测风雷达, 与 GST1 型数

字探空仪相配合, 能测定高空的风向、风速、气温、气压、湿度 5 个气象要素, 其技术参数见表 1。每日探测 2 次, 探测时间为 07 时和 19 时(北京时), 采集 0 ~ 40 000 m 资料, 获得间隔 50 m 各个高度的气压、温度、露点温度、相对湿度等, 可以求得对应高度水汽密度以及大气可降水量。

表 1 GST1 型数字探空仪技术参数
Tab. 1 Technical parameter of GST1 digital radiosonde

探测要素	型式	量程	测量范围	测量误差
温度	热敏电阻	50 ~ -90 °C	40 ~ -80 °C	$\Delta T \leq \pm 0.2$ °C
湿度($T \geq -25$ °C)	湿敏电阻	0% ~ 100%	15% ~ 95%	$\Delta RH \leq \pm 5\%$
湿度($T < -25$ °C)	湿敏电阻	0% ~ 100%	15% ~ 95%	$\Delta RH \leq \pm 10\%$
气压($P \geq 500$ hPa)	硅阻固体压力传感器	1 060 ~ 5 hPa	1 050 ~ 10 hPa	$\Delta P \leq \pm 2$ hPa
气压($P < 500$ hPa)	硅阻固体压力传感器	1 060 ~ 5 hPa	1 050 ~ 10 hPa	$\Delta P \leq \pm 1$ hPa

美国 Radiometric Corporation 公司生产的 MP-3000A 型微波辐射计是目前国际上较先进的多通道微波辐射计, 该型号的微波辐射计具有 51 ~ 59 GHz 和 22 ~ 30 GHz 二重波段, 共计 35 个通道, 可用于大气温度、相对湿度、水汽和液态水含量的探测, 探测高度从地面开始至 10 km 高空。它的探测原理是通过测量氧气在 60 GHz 附近的辐射强度或亮度温度得出温度分布^[8], 谱线峰值中心位置由于不透明性很强, 所有信号均来源于天线上方附近; 在此峰值中心 2 侧的频率位置吸收减弱, 辐射计则会“看”得远一些。从此峰值向谱线 2 侧下方扫描, 仪器则可通过此方法获得高度信息。在任意高度上的氧气发射电磁波都与当地的温度和氧气密度分布呈正比, 因此可以得到温度剖面。而通过观测来自于水汽线压力增宽的辐射的强度和形状的信息, 可以得到水汽廓线。22 GHz 附近适合进行相对潮湿地区的地基廓线反演。微波遥感反演算法从早期的经验统计算法过渡到神经网络方法^[22-25], 已经有了很大的发展, 本文在反演过程中运用神经网络方法反演得出廓线, 神经网络是运用 Stuttgart Neural Network Simulator(斯图加特神经网络模拟器)和乌鲁木齐 2001 ~ 2006 年逐日探空观测廓线得出的。标准后向传播(back-propagation)算法用于同化, 标准前馈网络用于廓线的得出。廓线 0 ~ 500 m 高度上每 50 m 输出一组数据, 500 m ~ 2 km 高度上每 100 m 输出一组数据, 2 ~ 10 km 每 250 m 输出一组数据, 共 58 个反演层的温度、相对湿度、水汽密度、液态水含量及可降水量, 时间间隔 1 min。仪器每 3 个月进行一

次液氮标定, 同时选择在晴空无云条件下做 tipping curve 标定^[25]。微波辐射计天线罩上的液态水可导致亮温测值偏高, 因此用防水罩和鼓风机在内的液体隔离缓解(REM)系统减少降雨时隔水罩上聚积的液态水, 使其保持正常观测。

探空为每天 07:15 ~ 08:15 和 19:15 ~ 20:15 观测, 利用微波辐射计 07:15 ~ 08:15 和 19:15 ~ 20:15 每 1 min 值平均代表 08 时和 20 时探测值, 与探空对应高度观测值进行对比分析。进行数据质量控制后, 2010 年逐日 08 时和 20 时 58 层高度两者观测温度、湿度和水汽密度数据样本均为 40 264 组, 可降水量 703 组。

2 结果分析

2.1 温度

58 层高度 40 264 组温度具有很好的相关性, 4 季和年相关系数均为 0.99, 线性拟合率均为 0.97, 截距分别为 0.19、0.59、0.71、0.39 和 0.41 °C, 年和 4 季均达到 0.01 显著性水平, 表明微波辐射计探测的温度垂直分布稳定而准确, 且存在系统负偏差。图 1 为微波辐射计与探空探测 4 季温度垂直分布廓线, 春季 2 种方法得到的温度都表现为一致随高度递减变化, 地面到 5 250 m 偏差为 0.0 ~ -0.9 °C, 微波辐射计测量值平均低 0.4 °C; 5 500 ~ 9 000 m 偏差为 -1.7 ~ -1.1, 平均比探空小 1.3 °C; 9 250 ~ 10 000 m 偏差在 -3.6 ~ -2.1 °C, 平均比探空小 2.9 °C, 微波辐射计测量温度与探空存在系统误差。

夏季两者探测温度分布廓线表现出极为一致的

变化特征,2 000 m 以内偏差为 $-0.3 \sim -1.3 \text{ }^\circ\text{C}$,微波辐射计测量值平均低 $0.65 \text{ }^\circ\text{C}$;2 000 ~7 500 m 偏差为 $-0.6 \sim -0.2 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空低 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$;7 750 ~10 000 m 偏差为 $-1.6 \sim -0.8 \text{ }^\circ\text{C}$,平均低 $1.3 \text{ }^\circ\text{C}$,夏季温度偏差小于春季,也存在系统误差。

秋季温度分布廓线探空测量值均大于微波辐射计测量值,且这种差异随高度增加而增大,偏差在 $-2.5 \sim -0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,最大出现在 9 500 m 附近,最小出现在边界层。地面至 1 100 m 偏差为 $-0.9 \sim -0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空小 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$;1 200 ~5 500 m 偏差为 $-1.7 \sim -0.7 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空小 $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$;5 750 ~8 750 m 偏差为 $-2.0 \sim -1.6 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空小 $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$;9 000 ~10 000 m 偏差为 $-2.5 \sim -2.0 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空小 $2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。秋季微波辐射计测量温度偏差高于夏季而低于春季。

冬季温度分布廓线两者都表现为对流层低层存在明显逆温特征,微波辐射计测量温度最大值 $-7.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 出现在 600 m 附近,而探空则表现为 1 000 m 以下逆温现象,最大值 $-6.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 出现在 1 000 m 附近。微波辐射计与探空探测温度 600 m 以内偏差为 $0.4 \sim 1.1 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空大 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$;700 ~2 750 m 偏差为 $-2.0 \sim -0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空小 $1.0 \text{ }^\circ\text{C}$;3 000 ~7 250 m 偏差为 $-2.9 \sim -2.0 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空小 $2.6 \text{ }^\circ\text{C}$;7 500 ~9 500 m 偏差为 $-1.9 \sim 0.0 \text{ }^\circ\text{C}$,平均比探空小 $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

此外,2 种测量方法得到 4 季各个高度的温度线性拟合分析和截距表明,拟合直线的斜率在 3 km 以下很接近 1,且截距 $< 1 \text{ }^\circ\text{C}$,3 km 以上线性拟合率则相对小些,截距也 $> 1 \text{ }^\circ\text{C}$,表明对流层中低层温度误差较小。

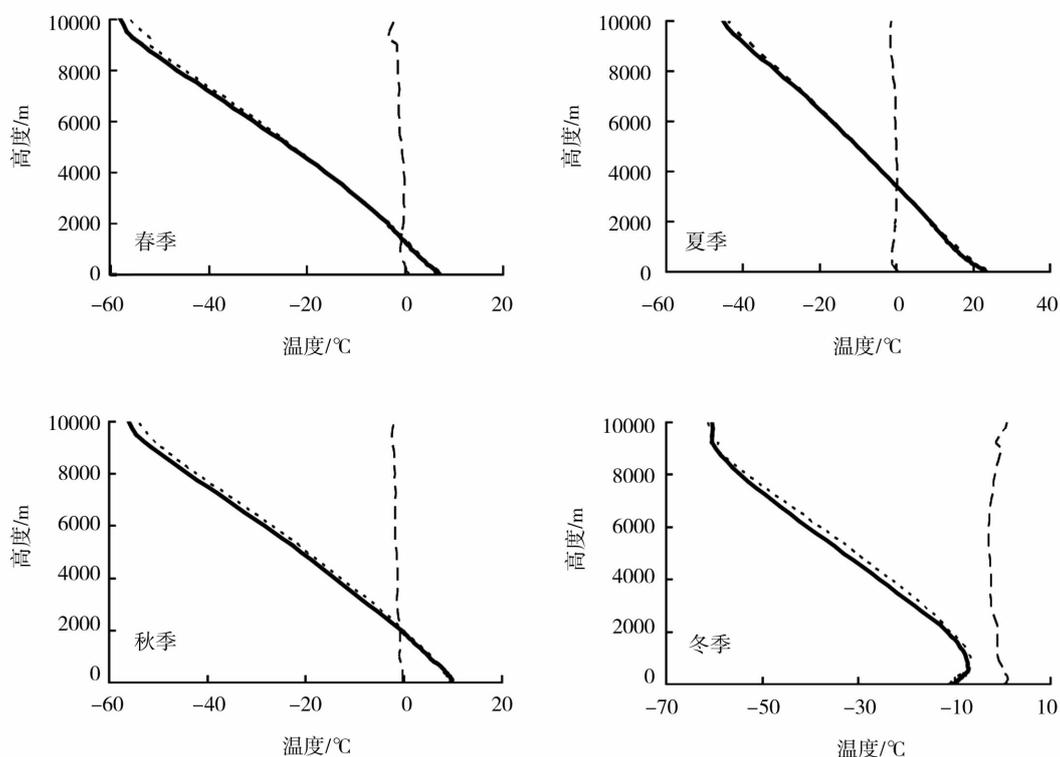


图1 4季微波辐射计(实线)和探空(点线)探测温度廓线及微波辐射计与探空温度之差(虚线)

Fig. 1 The temperature profile of Ground - Based Microwave Radiometer (solid line),

Radiosonde (dot line) and difference between them (dashed line) in spring, summer, autumn and winter

2.2 水汽密度

微波辐射计与探空测量水汽密度 (water vapor density, 简称 WVD) 相关系数为 0.92, 线性拟合率为 0.89, 截距为 -0.02 , 春季、夏季、秋季和冬季相关系数分别为 0.90、0.89、0.90 和 0.84, 线性拟合率分别为 0.85、0.88、0.97 和 0.87, 截距分别为 -0.08 、 0.19 、

-0.08 和 0.0 , 均达到 0.01 的显著性水平, 表明微波辐射计对水汽密度具有较好的探测能力。

图 2 为微波辐射计与探空探测的 4 季水汽密度垂直分布廓线。春季和秋季 2 种探测方法得到 WVD 均随高度呈现指数递减, 水汽主要集中在 2 000 m 以下, 近地面最大约为 $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 3 500 m

以上水汽密度 $< 1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,除地面外其他各高度微波辐射计测量值均大于探空。0~2 250 m 微波辐射计测量值平均比探空大 $0.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;2 500~4 250 m 偏差为 $0.11 \sim 0.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,平均比探空大 $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右;4 000 m 以上偏差很小,平均比探空大 $0.02 \sim 0.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

夏季微波辐射计与探空测量得到的 WVD 随高度也呈指数递减,地面水汽密度最大达 $10.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为春季的 2 倍,水汽集中在 4 500 m 以下,4 500 m 以上水汽密度 $< 2.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。0~2 500 m 两者偏

差在 $-1.81 \sim 1.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,微波辐射计测量值平均比探空大 $0.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;2 750~4 500 m 偏差在 $-0.21 \sim -0.005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,平均比探空小 $0.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;4 750 m 以上水汽密度小,偏差也小为 $0.003 \sim 0.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

冬季微波辐射计测量 WVD 在 600 m 以下存在逆湿现象,而探空测量值则没有,冬季 WVD 是一年中最小的,近地面最大仅为 $2.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,2 500 m 以下 $> 1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,两者的偏差较大为 $0.1 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,2 500 m 以上偏差均 $< 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

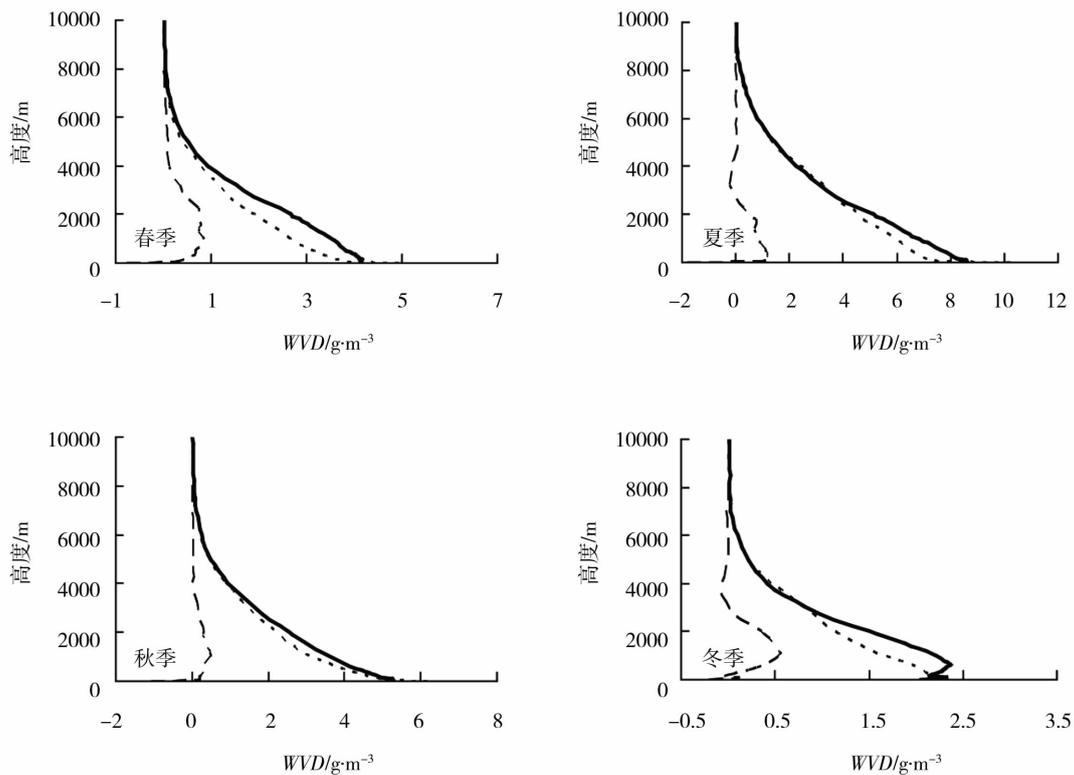


图2 4季微波辐射计(实线)和探空(点线)探测水汽密度廓线及微波辐射计与探空水汽密度之差(虚线)

Fig.2 The water vapor density profile of Ground - Based Microwave Radiometer(solid line),

Radiosonde (dot line) and difference between them (dashed line) in spring, summer, autumn and winter

2.3 相对湿度

微波辐射计与探空测量相对湿度相关系数为 0.74,线性拟合率为 0.78,截距为 28.8%,春季、夏季、秋季和冬季相关系数为 0.70~0.79,线性拟合率分别为 0.75、0.97、0.90 和 0.67,截距分别为 -5.7、-12.2、-10.2 和 2.9,均达到 0.01 显著性水平。

图3为微波辐射计与探空探测的4季相对湿度垂直分布廓线。春季微波辐射计测量相对湿度从地面至 2 000 m 左右存在逆湿现象,最大值 66% 出现在 1 900 m 附近,600~3 250 m 为相对湿度最大区间;而探空测量值逆湿现象出现在 2 000~3 000 m。

350~3 500 m 相对湿度偏差较大约为 20%~30%,而探空测量相对湿度为 35%~40%,可见相对湿度偏差比较大。夏季 2 种测量方法得到的相对湿度有一致变化趋势,4 000 m 以下存在明显逆湿,2 000~5 250 m 是相对湿度最大区间。整体上偏差在 2%~19% 之间,偏差最大值出现在 250~3 000 m 约为 15%~19%,其他高度偏差均小于 15%,微波辐射计测量值比探空值存在系统性偏大现象。线性拟合分析表明夏季 8 000 m 以下各高度拟合率在 0.9~1.1、250~500 m 和 1 700~4 250 m 截距大于 15%,其他高度截距小于 15%,与前述廓线分析结

果基本一致,夏季相对湿度变化趋势与探空一致性最高。秋季相对湿度分布廓线,两者均随高度增加而减小,偏差为2%~22%,1000~3500 m偏差在20%左右,其他高度偏差均小于20%,微波辐射计测量值系统性偏大。线性拟合分析与上述基本一致,秋季相对湿度变化探测性能与夏季相当。冬季微波辐射计与探空测量相对湿度均随高度减小,但探空测量值在3000~4000 m存在弱逆湿现象,

微波辐射计测量在1500~3000 m存在等湿现象,近地面相对湿度是一年中最大的,约为70%。8000 m以下微波辐射计测量值系统性偏大,400~3500 m相对湿度偏差为20%~30%,其他高度均小于20%。相对湿度是温度和水汽共同影响的物理量,分析表明其与探空探测相比差别相对较大,这和温度测量精度有关,温度误差1℃,都有可能使相对湿度差异很大。

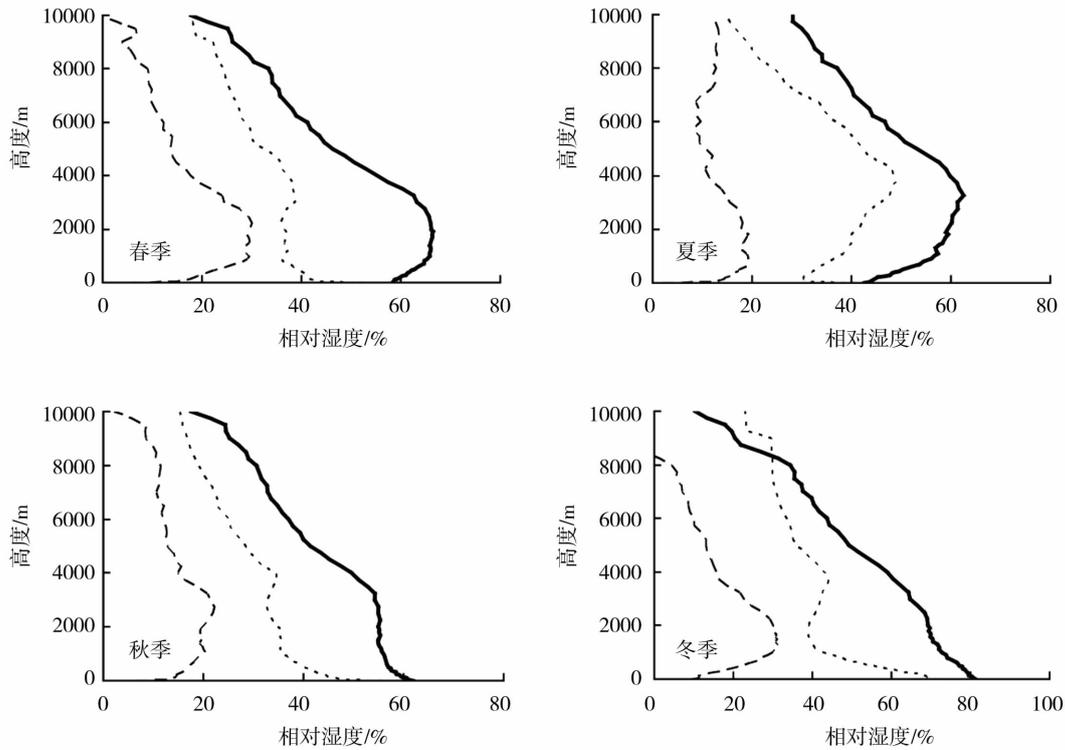


图3 4季微波辐射计(实线)和探空(点线)探测的相对湿度廓线及微波辐射计与探空相对湿度之差(虚线)

Fig. 3 The relative humidity profile of Ground - Based Microwave Radiometer (solid line), Radiosonde (dot line) and difference between them (dashed line) in spring, summer, autumn and winter

2.4 可降水量

图4为微波辐射计和探空测量得到的可降水量(precipitable water vapor,简称PWV)相关分析,两者相关系数为0.96,线性拟合率为0.82,截距为-0.66,达到0.01显著性水平,微波辐射计测量PWV存在系统性偏大现象,平均偏大2.8 mm。

表2为微波辐射计与探空在不同季节PWV相关分析,除了冬季相关系数为0.72以外,春季、夏季、秋季相关系数在0.94~0.96,两者测量的PWV线性拟合也较高,微波辐射计比探空测量得到的PWV系统性偏高,PWV平均偏差依次为春季2.6 mm、夏季4.9 mm、秋季2.9 mm、冬季1.1 mm。刘红燕等^[10]利用北京南郊观象台

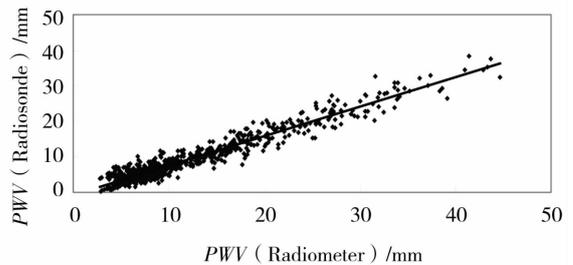


图4 微波辐射计(Radiometer)与探空(Radiosonde)测量可降水量(PWV)相关分析

Fig. 4 The correlation between PWV measured by the ground - based 35 channel microwave radiometer and radiosonde

2006年9~11月微波辐射计和探空资料对大气整层可降水量进行了对比分析,得出微波辐射计测量水汽值与探空测量的值平均偏差为2.81

mm。本文秋季对比结果与刘红燕的结果较为相似。从上述分析可知微波辐射计测量PWV的能力与探空的测量能力相当。

表2 各季节微波辐射计与探空测量PWV相关分析

Tab.2 The correlation analysis of PWV measured by the ground-based 35 channel microwave radiometer and radiosonde in four seasons

季节	各季节包含月份	对比样本数	2种方法得到可降水量 相关关系	2种方法得到可降水量 相关系数
春季	3,4,5月	183	$y = 1.0875x + 1.977$	0.96
夏季	6,7,8月	161	$y = 1.0207x + 4.596$	0.94
秋季	9,10,11月	181	$y = 0.9128x + 3.6347$	0.95
冬季	12,1,2月	178	$y = 0.9186x - 0.6302$	0.72

3 降水对微波辐射计反演温湿度的影响

由于目前业务化的逐小时降水量观测只在夏半年进行,因此选取2010年5~9月08时和20时有降水的情况分析,共有9次明显降水天气,进行统计分析样本太少,这里分析9次降水发生时微波辐射计和探空探测的温、湿度廓线特征。降水时两者温度变化表现为随高度减小的相同特征,且微波辐射计探测温度大于探空,图5a、图5b为2010年6月3日20时和

7月4日08时降水发生时温度随高度的分布,2次过程两者温度偏差有差异,其他7次降水发生时温度偏差也有所不同,但都能很好地表现温度随高度的变化。对水汽密度而言,2000m以下两者WVD分布和变化差异较大,微波辐射计探测WVD明显偏大且距离地面400m左右存在逆湿现象,而探空却没有这一现象,只是每次降水时逆湿程度有所不同,2000m以上两者WVD分布和变化差异较小,而2000m以下微波辐射计反演WVD误差较大。

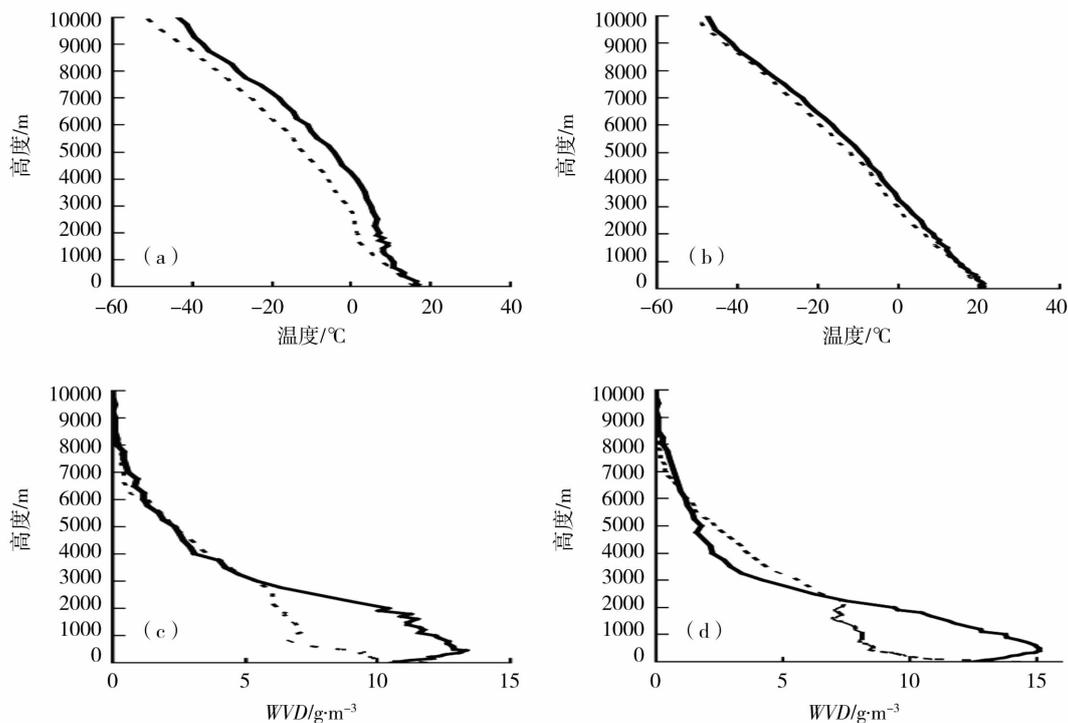


图5 降水发生时微波辐射计(实线)与探空(虚线)测量的温度(a,b)和水汽密度(c,d)廓线

Fig.5 Temperature (a,b) and water vapor density (c,d) profile measured by the ground-based 35 channel microwave radiometer (solid line) and radiosonde (dot line) during the rainfall processes

图 5c, 图 5d 为 2010 年 6 月 3 日 20 时和 7 月 4 日 08 时降水发生时 WVD 随高度分布, 降水对微波辐射计 WVD 2 000 m 以下影响明显, 2 000 m 以上影响很小。相对湿度廓线两者探测值随高度变化特征比较一致, 但微波辐射计探测值偏大且比较光滑, 探空相对湿度抖动明显, 这可能与两者的探测方式有关, 探空仅是气球所到之处的探测结果, 随高度气球存在一定漂移, 而微波辐射计是固定点探测, 相对湿度不仅与水汽有关还与温度联系, 变化较大。由此可知, 微波辐射计反演的温湿度受降水影响, 但反映的廓线变化趋势比较一致, 具有一定的探测能力。

4 降水过程中微波辐射计探测温湿度特征

乌鲁木齐 2010 年 5 月 2 日 21 ~ 23 时和 3 日 04 ~ 12 时分别出现了 10.3 mm 和 4.3 mm 降水, 按新疆降水量级标准^[26] 是一次大雨天气过程。由图 6a 可知, 降水前 2 d 各层温度变化很小, 在 2 日 21 ~ 23 时降水过程中整个对流层温度急剧上升, 这时由于降水产生凝结潜热所致, 该段时期 3 km 以下各层温度约比降水前高 5 °C 左右, 以上各层温度则高 10 °C 左右, 随着降水结束各层温度明显下降到降水前状态, 3 日 04 ~ 12 时又出现降水, 各层温度又出现明显上升, 由于降水持续 8 h, 这段时间对流层 3 km 以下各层温度比降水前高约 10 °C 左右, 以上各层温度则高 15 °C 左右, 随着降水结束各层温度降低到降水前温度。中亚低涡分裂短波东移造成北疆地区这次降水天气, 利用 NCEP/NCAR 一日 4 次 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 资料分析降水过程中对流层冷暖空气活动, 表明冷空气自西向东入侵, 没有明显的暖气团移到观测区, 以前认为干旱区降水凝结潜热作用较小^[26], 这里观测表明干旱区降水释放凝结潜热可能对大气局地加热十分明显, 需要进一步分析。

由图 6b 可知, 2 日 05 ~ 10 时 2.5 km 以下 WVD 有短暂增加但未产生降水, 与动力条件不配合有关, 19 时 6 km 以内各层 WVD 显著增加, 约为降水前的 2 倍, 21 ~ 23 时强降雨发生时期对流层中低层 WVD 迅速增加更显著, 0.5 km 左右达最大为 $12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 降水前仅为 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 随着降水结束 WVD 迅速减小, 降水间歇时段 WVD 变化很小, 至 3 日 04 时降水开始 6 km 以内 WVD 又开始急剧上升, 降水持续期变化较小, 期间 WVD 最大在 2 km 左右达 $11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 随着降水结束 WVD 出现迅速减小。

这次降水过程是天山山区及其以北北疆地区自

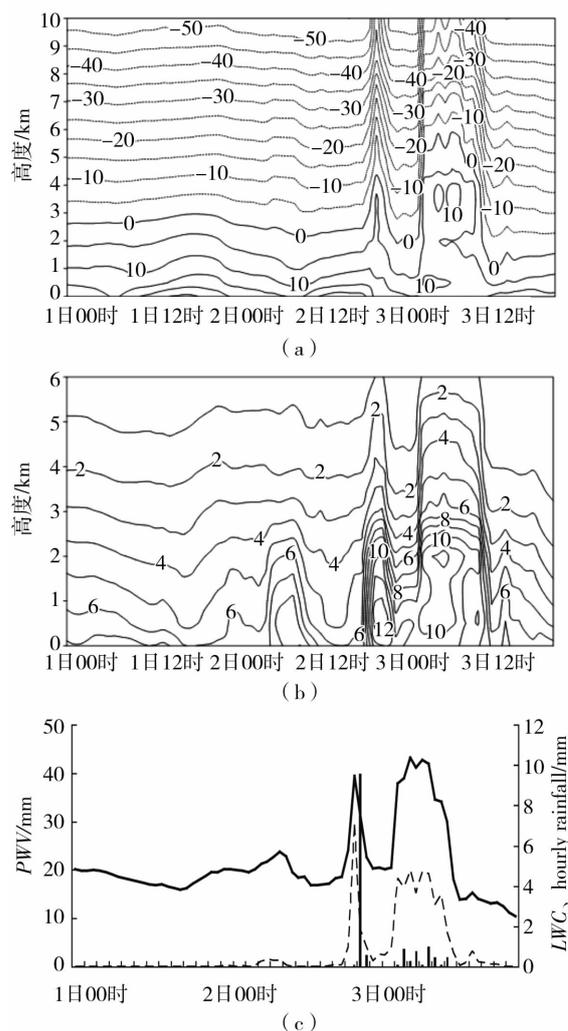


图 6 2010 年 5 月 3 日乌鲁木齐大雨过程温度 (a, 单位: °C)、水汽密度 (b, 单位: mm) 时间-高度廓线及可降水量 (PWV, 实线)、液态水含量 (LWC, 虚线) 和逐小时降水量 (c, 单位: mm)
Fig. 6 The time-height profile of temperature (a), WVD (b) and PWV (solid line), LWC (dashed line) and hourly rainfall (c, bar-chart) during the heavy rainfall process on May 3, 2010

西向东的区域性降水过程, 其中伊犁河谷和北疆沿天山一带为大雨, 降水开始于 5 月 1 日 20 时, 3 日 20 时结束。图 6c 为乌鲁木齐降水过程 PWV、液态水含量 (Liquid Water Content, 简称 LWC) 和逐小时降水量随时间变化。4 月 30 日 PWV 有一次显著增加过程 (图略), 从 5 月气候平均 13.1 mm 增加为 20 mm 左右并维持 2 d 左右, 表明降水发生前有一个水汽缓慢聚集过程, 2 日 21 ~ 23 时 10.3 mm 降水时段, 降水前 1 ~ 2 h PWV 和 LWC 有一个迅速增长过程, PWV 1 h 增量达 15 mm, PWV 达到 39.4 mm, 随着降水结束迅速减

小到20 mm左右,LWC 1 h增量达6 mm,3日04时降水再次开始时PWV和LWC又出现一次迅速增长过程,PWV 1 h增量达17 mm,最大达43 mm,降水结束时其迅速减小到气候平均值13 mm左右,LWC 1 h增量达3 mm,降水期间PWV和LWC维持高值变化较小。可见干旱区降水发生和结束时温度、WVD、PWV和LWC变化均很剧烈。

2010年6月22日22时至23日03时、24日11时、25日04~05时、25日12~20时分别出现了13.2 mm、0.1 mm、3.0 mm、12.7 mm的降水,过程降水量达29 mm,是一次暴雨过程。由图7可见,降水过

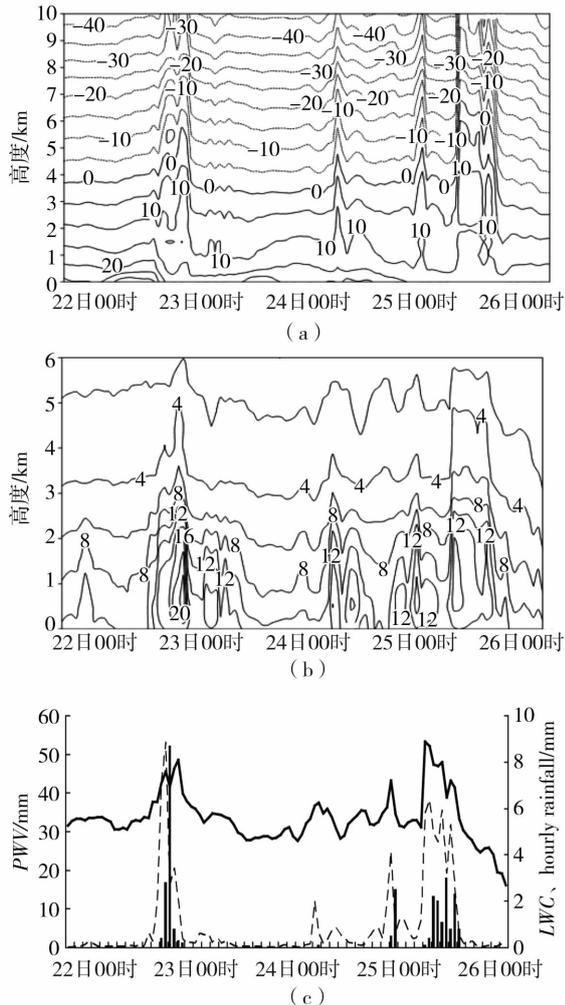


图7 2010年6月23~25日乌鲁木齐暴雨过程温度(a,单位:°C)、水汽密度(b,单位:mm)时间—高度廓线及可降水量(PWV,实线)、液态水含量(LWC,虚线)和逐小时降水量(柱状)(c,单位:mm)

Fig. 7 The time-height profile of temperature (a), WVD (b) and PWV (solid line), LWC (dashed line) and hourly rainfall (c, bar-chart) during the heavy rainfall process on July 23-25, 2010

程中温度、WVD、PWV和LWC与5月2日21~23时和3日04~12时降水过程具有一致的变化特征:降水开始前2 d有水汽缓慢聚集过程,降水发生和结束时温度、WVD、PWV和LWC变化均很剧烈,降水期间维持高值变化较少,6月23日00时1 h降水量达8.7 mm,此时0.5 km处WVD最大达 $21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,降水释放凝结潜热对大气局地加热十分明显。可见微波辐射计探测的温度、WVD、PWV和LWC能较好地反映降水发生发展过程的热力和水汽时空分布和变化特征,反映出干旱区降水过程物理量变化具有短时、剧烈的特征,这可能也是预报难以把握的原因之一。

5 结论与讨论

(1)微波辐射计及探空两者测量的温度及其随高度的变化趋势非常一致,且4季差异不大,微波辐射计测量温度比探空系统偏小,5 500 m以下春季、夏季微波辐射计的测量值平均比探空小 $0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$,秋季和冬季平均小 $0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ 和 $0.9 \text{ } ^\circ\text{C}$,6 000 m以上,春季、夏季、秋季和冬季微波辐射计测量值平均比探空小 $1.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $1.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $2.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 和 $1.3 \text{ } ^\circ\text{C}$,误差产生的原因可能与探空气球的漂移、反演算法误差等有关。

(2)微波辐射计测量水汽密度和相对湿度能很好地反映水汽随高度变化的特征,且存在系统性偏大现象,水汽密度在2 000 m以下偏差相对较大,相对湿度在1 000~2 500 m偏差较大,春、冬季最大偏差达30%左右,夏、秋季最大偏差达20%左右。2种方法得到的PWV不同季节均有较好的相关性,春季、夏季、秋季和冬季PWV平均偏差分别为2.6 mm、4.9 mm、2.9 mm和1.1 mm。

(3)降水发生时微波辐射计反演的温湿度及其随高度变化趋势与探空一致,其中温度和2 000 m以上水汽密度受天气影响不明显,反演的温度、WVD、PWV和LWC能较好地反映降水天气发生和结束过程中热力和水汽参数的时空分布和剧烈变化特征。

以上结果表明地基微波辐射计对温湿度具有一定的探测性能,2种测量方法得到的结果之间存在的偏差可能与2种设备探测方法的差异、微波辐射计反演算法以及降水影响有关,微波辐射计能获取在时间和高度上连续的温度、相对湿度、水汽密度、液态水含量、可降水量等物理量,这是探空所不具备的,可为今后乌鲁木齐地区的短期临近预报或定量降水预报提供参考,在探空的非探测时段,微波辐射计可以是其有益的补充。

参考文献:

- [1] 陈哲. 中国探空气球水平漂移总体特征分析[J]. 气象, 2010, 36(2): 22-27.
- [2] 周秀骥, 吕达仁, 黄润恒, 等. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [3] 陈洪滨. 利用高频微波被动遥感探测大气[J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(2): 49-54.
- [4] 廖国男, 郭彩丽, 周诗健. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [5] Revercomb H E, Turner D C, Tobin D D, et al. The ARM program's water vapor intensive observation periods?: Overview, initial accomplishments, and future challenges[J]. Bull Amer. Meteor. Soc., 2003, 84: 217-236.
- [6] Ware R, Alber C, Rocken C, et al. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24: 417-420.
- [7] Knupp K. Mobile Integrated Profiling System (MIPS) observations of boundary layer and water vapor variations around boundaries and storms[A]. American Meteorological Society. 12th symposium on Meteorological Observations and Instrumentation[C]. Long Beach, California, 2003.
- [8] 赵兵科, 邵德民, 鲁小琴, 等. 多通道地基微波辐射计在 0713 号“韦帕”台风登陆前后探测性能及特征分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(9): 1001-1008.
- [9] 魏重, 薛永康, 朱晓明, 等. 用 1.35 厘米波长地面微波辐射计探测大气中水汽总量及分布[J]. 大气科学, 1984, 8(4): 418-426.
- [10] 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J]. 大气科学, 2009, 33(2): 388-396.
- [11] 赵从龙, 蔡化庆, 宋玉东. 对流层水汽和液态水的地基微波遥感探测[J]. 应用气象学报, 1991, 2(2): 200-207.
- [12] 段英, 吴志会. 利用地基遥感方法检测大气中气态、液态水含量分布特征[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 34-40.
- [13] 梁宏, 刘晶淼, 张建成, 等. 青藏高原大气总水汽量的反演研究[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1055-1063.
- [14] Alia Iassamen, Henri Sauvageot, Nicolas Jeannin, et al. Distribution of Tropospheric Water Vapor in Clear and Cloudy Conditions from Microwave Radiometric Profiling[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48(3): 600-615, doi:10.1175/2008JAMC1916.1
- [15] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. 大气科学, 2010, 34(3): 548-558.
- [16] 李德俊, 唐仁茂, 向玉春, 等. 基于多种探测资料对武汉一次短时暴雪天气的监测分析[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1386-1391.
- [17] 金华, 何晖, 张蕾. 一次对流性降水过程中人工催化部位的选择[J]. 干旱气象, 2008, 26(1): 52-56.
- [18] 陈跃, 陈添宇. 俄勒冈州喀斯喀特山区 2001 年 12 月 13 日气旋风暴分析[J]. 干旱气象, 2008, 26(3): 82-94.
- [19] 周崑, 吴宏议, 田海军. 基于微波辐射计资料浅析对流降水云内与环境温差[J]. 干旱气象, 2011, 29(1): 10-16.
- [20] 刘建忠, 张蕾, 杨道侠. 雾日期间边界层特性分析[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 41-48.
- [21] 邵元亭, 刘奇俊, 荆志娟, 等. 祁连山夏季地形云和降水宏微观结构的数值模拟[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 18-23.
- [22] 刘亚亚, 毛节泰, 刘钧. 地基微波辐射计遥感大气廓线的 BP 神经网络反演方法研究[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1514-1523.
- [23] 黄静, 邱崇践, 张艳武. 晴空卫星红外模拟资料反演大气温度廓线的研究[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 913-919.
- [24] 黄静, 张艳武, 邱崇践. 由 HIRS/S 资料反演大气温度廓线的理论误差分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 128-134.
- [25] Han Y, Westwater E. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens., 2000, 38: 1260-1276.
- [26] 张家宝, 邓子风. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1987, 400.

Detection Performance of MP-3000A Ground-based Microwave Radiometer and Its Preliminary Application During Rainfall Processes in Urumqi

YANG Lianmei^{1,2}, LI Xia², ZHAO Ling², WANG Shijie²

(1. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: By using daily temperature and humidity data detected by the 35-channel of MP-3000A ground-based microwave radiometer and L-band atmosphere detection system in Urumqi in 2010, the detection performances of the ground-based microwave radiometer and its application during rainfall weather processes were investigated. The results show that temperature and humidity data measured by the ground-based microwave radiometer and L-band atmosphere detection system had good consistency and correlation, and the correlation coefficients of temperature, relative humidity, water vapor density and precipitable water were 0.99, 0.74, 0.92 and 0.94, respectively, which all reached a significant level at 0.01. The analysis of the vertical profile below 10 km showed that the temperature measured by the radiometer was systemically smaller than that measured by radiosonde, but the relative humidity and water vapor density were larger than the sounding measurements. The deviation of measured values of precipitable water was minimum in winter and maximum in summer. The change trend of profiles of temperature and humidity measured by the radiometer and radiosonde were the same when rainfall occurred, and the temperature and the water vapor density over 2 000 m were less influenced by rainfall weather. The microwave radiometer can well reflect the spatial and temporal distribution and violent variation features of the heat and water vapor parameters during the beginning and ending stage of heavy rainfall.

Key words: microwave radiometer; temperature; water vapor density; relative humidity; precipitable water