

文章编号: 0455-2059(2015)01-0061-11

基于微波辐射计的大气温湿廓线遥感探测

李娜, 张武, 陈艳, 柳丹, 史晋森, 张北斗

兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室, 大气科学学院, 兰州 730000

摘要: 利用2010年1—6月甘肃省榆中站(52983)逐日的探空资料和兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)的地基微波辐射计反演资料, 对榆中所在的半干旱地区大气的温度和湿度的垂直分布特征进行了分析. 通过对比探空资料, 讨论了微波辐射计的探测性能和反演效果, 并对2013年1—3月微波辐射计反演的温度进行了偏差订正. 结果表明微波辐射计反演资料与探空资料反映的温湿垂直分布趋势基本一致, 温度的拟合效果优于相对湿度. 近地层反演效果较好, 温度的相关系数大于0.90, 相对湿度的相关系数大于0.80, 均通过了显著性水平为0.01的相关性检验. 距地2~7 km之间, 微波辐射计反演的温度小于探空观测值, 相对湿度大于探空观测值. 温度订正效果显著, 但仍存在一定的偏差.

关键词: 探空; 微波辐射计; 温度; 相对湿度; 垂直分布

中图分类号: P412

文献标识码: A

doi: 10.13885/j.issn.0455-2059.2015.01.010

Remote-sensing of atmospheric temperature and relative humidity profiles based on microwave radiometer

Li Na, Zhang Wu, Chen Yan, Liu Dan, Shi Jin-sen, Zhang Bei-dou

Key Laboratory of Semi-Arid Climate Changes with the Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Using the data of air sounding over Yuzhong (52983), Gansu Province and the microwave radiometer of Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL) from January to June 2010, the temperature and vertical distribution characteristics of the relative humidity (RH) in Yuzhong region were analyzed. The detection properties and inversion effect of the microwave radiometer were discussed and a temperature correction was made from January to March 2013. The results showed that the retrieval temperature and RH from the microwave radiometer observations had a similar tendency with the air sounding data. The correlation coefficients of temperature and RH were more than 0.90 and 0.80 in the surface layer. The analysis of the vertical profile from 2—7 km showed that the retrieval temperature was systemically smaller than the sounding measurements, but RH was larger than the sounding measurements. The effect of temperature correction was significant, but there were still biases.

Key words: air sounding; microwave radiometer; temperature; relative humidity; vertical distribution

在对流层中, 气象要素在时间上的变化和空间上的分布表征着大气运动的状态, 要素的垂直分布与变化对于用数值预报模式模拟和预测大气运动至关重要. 探空是测量大气温度、湿度、风、气压和水汽等要素垂直廓线的最基本方法^[1], 但是考虑到操作和观测成本等方面的因素, 目前在国内

业务工作中每天只进行两次规定时间的观测(北京时间08:00和20:00), 在要素时间连续性等方面尚不能满足研究与业务工作的需求. 随着技术的进步, 气象探测逐步向自动化转换, 对气象要素垂直特征的探测手段也有了很大的进展, 如探测温度的声雷达, 探测风随高度变化的风廓线雷达, 探

收稿日期: 2013-11-20; 修回日期: 2014-01-28

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955302); 公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY201306006)

作者简介: 张武(1960—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 教授, 博士, e-mail: wzhang@lzu.edu.cn, 研究方向为大气辐射与大气遥感, 通信联系人.

测温度、湿度廓线以及液态水等要素的微波辐射计等。这些新的设备,在一定精度范围内实现了对上述气象要素垂直变化的自动、连续观测,提供了高时间分辨率的大气运动状态信息,有利于提高天气预报的能力和精度。

微波辐射计可应用于大气温湿廓线、云水含量、水汽通量、降水量以及大气成分等重要的大气参数的测量^[2]。将探空和微波辐射计的观测资料有效地结合起来,可以更好地分析气象要素在时间上的变化及空间上的分布情况。作为一种新型的观测仪器,微波辐射计尚未进入气象业务观测应用,有关微波辐射计的观测仍没有国家或行业标准可依^[3]。国内外许多学者和业务工作者对微波辐射计的性能以及如何在业务系统中广泛使用十分关注^[4-7]。微波辐射计的观测资料是否能够真实地反映某一地区各个高度层的大气状况,现有的仪器附带的神经网络反演算法有效性和精度如何等问题都需要通过大量的数据资料长期对比验证。在实际应用中微波辐射计的反演方法存在一定程度的不确定性,亟需改进。姚志刚等^[8-14]分别用微波辐射计遥感大气的温湿廓线,并进行了性能分析。王黎俊等^[15]将地基微波辐射计资料应用于黄河上游的人工增雨作业,提供了一定的理论依据。刘红燕等^[16]分析了北京地区发生沙尘暴期间,微波辐射计观测的各气象要素的变化特征及垂直廓线结构。敖雪等^[17]利用武汉的地基微波辐射计,详细分析了积分水汽含量、云中液态水含量的分布演变与降水的关系。姚俊强等^[18-20]利用微波辐射计的观测数据分析了乌鲁木齐夏季水汽日变化及其与降水的关系。这些研究工作表明,利用微波辐射计遥感探测大气的温湿垂直廓线结构有很好的应用前景,是一种行之有效的观测手段。

温度和相对湿度都是大气最基本的要素,它们的垂直分布及变化情况是描述大气热力和动力情况必不可少的,可以在很大程度上反映一个地区的天气特征,对人工影响天气作业也是一个重要的参数。本文利用2010年1-6月甘肃省榆中站(52983)的探空资料和兰州大学半干旱气候与环境观测站(Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL)的微波辐射计资料,分析了榆中所在半干旱地区的温度和相对湿度垂直分布特征,讨论了微波辐射计的探测性能和反演效果,并对2013年1-3月微波辐射计反演的温度进行了偏差订正,为反演算法的改进提供一定的科学依据。

1 资料

1.1 探空

本文使用的探空资料由 <http://weather.uwyo.edu/upperair/seasia.html> 取得,时间为2010年1月1日-6月20日,以及2013年1月1日-3月31日。站点为中国甘肃省兰州市榆中县(以下称为榆中站),站号为52983,图1为榆中站和SACOL站地理位置示意图(35.87°N, 104.15°E, 海拔1875 m)。探空资料包括每日北京时间08:00和20:00从地面到高空的气压、高度、温度、露点温度、相对湿度、比湿、风向、风速、位温、假相当位温和虚位温数据,共340组,其中,2010年4月25日08:00和4月30日20:00的数据缺失。

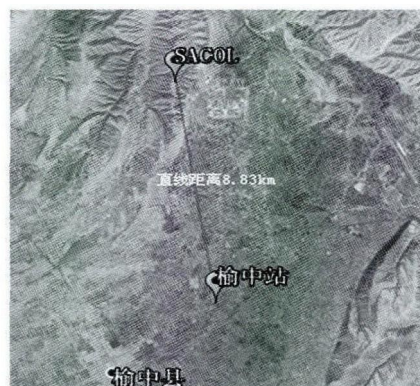


图1 榆中站和SACOL站地理位置示意图

Figure 1 Location of Yuzhong station and SACOL

1.2 微波辐射计

本文所用微波辐射计资料由SACOL(35.95°N, 104.14°E, 海拔1965.8 m)提供,时间段和探空资料一致。微波辐射计资料从地面到距地1 km,垂直分辨率为100 m,从1 km到高空10 km,垂直分辨率为250 m,每分钟输出一组温度、相对湿度以及液态水含量等的的数据,一共47个反演层,每天24 h连续观测,共1436组数据,所提供的大气温湿廓线的连续观测,为深入研究西北干旱半干旱地区大气状态及空中云水资源研究提供了有力的数据支撑^[21]。微波辐射计采用神经网络法反演得到温度湿度等参数的垂直分布,神经网络输入层和隐含层各个节点的权重系数都是由至少两年以上的历史探空资料训练得到的^[22]。由于仪器标定、信号异常等原因,部分观测日期的数据存在缺失情况,如表1所示。

在资料使用时,综合文献中提供的各种方法与讨论,作出以下几点处理:首先,为了便于对比分析,只选择探空资料和微波辐射计资料都有的温度和相对湿度两个物理量的数据。地基微波辐

射计虽然不会受到低空中等覆盖云量的影响,但如果云量较多时同样会影响反演效果.当空气中相对湿度较大或者有降水发生时,可能会导致微波辐射计亮温的观测值偏高,反演结果比较差,这时微波辐射计就无法提供可用的数据^[23].因此在进行两种资料的对比时,剔除了这些高相对湿度条件下的观测数据.

表1 微波辐射计缺测时间
Table 1 Missing observation time of microwave radiometer

观测日期	缺测时间
2010-02-27	10:37–15:05
2010-03-18	17:32–23:58
2010-03-19	00:03–09:44
2010-03-30	09:12–12:14
2010-04-09	10:41–23:58
2010-04-10	00:03–09:22
2010-05-01	11:16–17:08
2010-06-20	19:23–23:58
2013-01-30	18:15–23:58

探空气球受气象条件的影响,数据在时间和空间上都存在不规律的变化,而微波辐射计则是在观测点上空垂直方向47个固定高度层上的数据,因为必须将探空资料处理成与微波辐射计资料可比的格式,本文选择了将探空资料的温度和相对湿度数据进行线性插值,以得到与微波辐射计数据相同的高度上的温度和相对湿度值.在时间的处理上,探空资料的时间为08:00和20:00,微波辐射计资料选取08:00–08:59和20:00–20:59的观测数据,并取其平均值分别作为08:00,20:00的值.此外,在实际的预报工作和科学研究中,午后14:00的温湿廓线具有重要的参考价值,但常规探空资料并不能提供这一时次的温湿廓线,本文利用微波辐射计的探测资料,选取14:00~14:59的观测数据,并取其平均值作为14:00的值,分析了榆中地区午后14:00温度和相对湿度的垂直分布特征,以弥补探空资料的不足.

为了研究天气条件对微波辐射计反演效果的影响,根据历史观测资料进行了天气条件的划分.2010年1月1日–6月20日这一时间段内,共有336对有效数据(一对有效数据包括一次探空数据和在探空观测时间内的微波辐射计反演数据),包括晴天数据232对,云天数据69对,降水天数据25对,风沙天数据10对.在2013年1月1日–3月31日这一时间段内,共有179对有效数据,其中晴天数据134对,云天数据29对,降水天数据2对,风沙天数据14对.

采用相关系数 R ,平均偏差 T_{bias} 和均方根误差 T_{std} 来分别描述微波辐射计资料与探空资料的趋势吻合度、系统偏差和观测值精度,其计算公式为

$$R = \frac{\sum(T_S T_R) - \frac{\sum T_S \cdot \sum T_R}{N}}{\sqrt{[\sum T_S^2 - \frac{(\sum T_S)^2}{N}][\sum T_R^2 - \frac{(\sum T_R)^2}{N}]}} \quad (1)$$

$$T_{bias} = \frac{\sum(T_R - T_S)}{N} \quad (2)$$

$$T_{std} = \sqrt{\frac{\sum(T_R - T_S)^2}{N}} \quad (3)$$

其中, T_S 为探空观测值, T_R 为微波辐射计观测值, N 为观测样本数.

2 结果分析

2.1 温度的垂直分布

图2为由榆中站探空资料做出的2010年1–6月榆中地区08:00和20:00月平均温度垂直廓线图.总体上来看,温度随高度呈递减趋势.1–6月各月08:00的气温垂直递减率分别为0.46,0.54,0.53,0.53,0.52,0.48 K/100 m,平均递减率为0.51 K/100 m.各月20:00的气温垂直递减率分别为0.49,0.61,0.59,0.63,0.57,0.58 K/100 m,平均递减率为0.58 K/100 m.由此可见,20:00气温的垂直递减率略大于08:00.08:00气温的垂直递减率1月最小,2月最大,20:00气温的垂直递减率1月最小,4月最大.

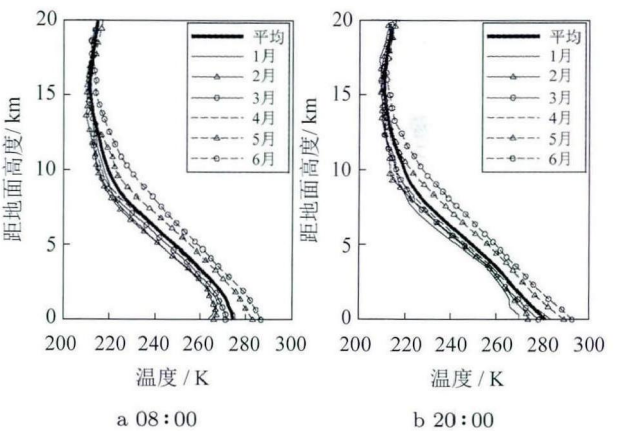


图2 2010年1–6月榆中站08:00和20:00探空温度廓线

Figure 2 Temperature profile of air sounding in Yuzhong station at 08:00 and 20:00

从图2中可以看出榆中地区对流层顶的大致高度.根据对流层顶的热力学定义方法^[24]:500 hPa等压面以上,温度的递减率小到0.2 K/100 m或以下的最低高度,而且在此高度及其以上2 km气层内的温度平均递减率均不超过0.2 K/100 m,将达到此条件的最低高度视为对流层顶高度.此方法计算得出的结果见表2.由表2知,观测期间,08:00对流层顶高度变化范围为距地面11.58~16.98 km,

平均高度为距地面 13.98 km; 20:00 对流层顶高度变化范围为距地面 11.62~15.57 km, 平均高度为距地面 13.57 km. 各月对流层顶高度从低到高依次是: 2, 3, 1, 4, 5, 6 月, 白天高于夜间, 5 月对流层顶

的温度最低, 其余各月相差不大. 1-3 月对流层顶的气压 >150 hPa, 可将其视为第 1 对流层顶, 4-6 月对流层顶的气压 ≤150 hPa, 可将其视为第 2 对流层顶^[25].

表 2 2010 年 1-6 月榆中站对流层顶

Table 2 Tropopause of Yuzhong station from January to June, 2010

时间	08:00			20:00			对流层顶平均 气压/hPa
	垂直递减率/ (K/100 m)	对流层顶 高度/m	该高度的 温度/K	垂直递减率/ (K/100 m)	对流层顶 高度/m	该高度的 温度/K	
1 月	0.46	13 327	214.8	0.49	13 123	214.6	155
2 月	0.54	11 580	215.3	0.61	11 621	214.1	200
3 月	0.53	12 728	213.6	0.59	12 701	214.9	170
4 月	0.53	13 587	213.9	0.63	12 984	214.9	150
5 月	0.52	15 646	211.9	0.57	15 446	211.8	115
6 月	0.48	16 980	214.0	0.58	15 567	215.6	100
半年平均	0.51	13 975	213.9	0.58	13 573	214.3	148

由图 2a 中可见, 榆中地区 2010 年 1-4 月均有不同程度的逆温层出现, 1 月逆温层最厚, 超过 1 km, 2-4 月则为几百米. 20:00 基本没有观测到逆温层. 08:00 各月的地面温度分别为 263.3, 266.2, 271.4, 275.5, 283.3, 286.9 K, 半年的平均地面温度为 274.4 K; 20:00 各月的地面温度分别为 269.8, 273.8, 278.3, 283.9, 289.2, 292.9 K, 半年的平均地面温度为 281.3 K. 20:00 地面温度分别比 08:00 高出 6.5, 7.6, 6.9, 8.4, 5.9, 6.0 K, 平均高出 6.9 K.

图 3 为根据 SACOL 站微波辐射计资料做出的 2010 年 1-6 月榆中地区 08:00, 14:00, 20:00 的温度垂直廓线图. 对比榆中站的探空曲线, SACOL 站微波辐射计反演的温度廓线在各月均存在逆

温层, 1-3 月, 逆温层出现在距地 200~800 m 之间. 从地面到逆温层, 14:00 气温变化最剧烈, 08:00 次之, 20:00 最小. 4-6 月逆温层出现在距地面 300~700 m 之间, 3 个时次气温的变化范围均不如 1-3 月大. 逆温层以上温度随高度继续呈递减规律. 由图 3 可见各月 3 个时次的平均地面气温均为 14:00 最高, 20:00 次之, 08:00 时最低, 各月 14:00, 08:00 的平均地面气温差分别为 7.6, 12.6, 13.1, 11.5, 10.7, 10.4 K, 6 个月平均值为 11.0 K. 除 1 月外, 距地 2 km 以下, 14:00 气温均高于 08:00 和 20:00, 温度差随高度减小. 距地 7.5 km 以下, 2, 3 月各层的气温同样为 14:00 最高, 1 月为 08:00 时最高, 4, 5, 6 月为 20:00 最高. 1 月和 2 月的平均气温在 08:00, 20:00

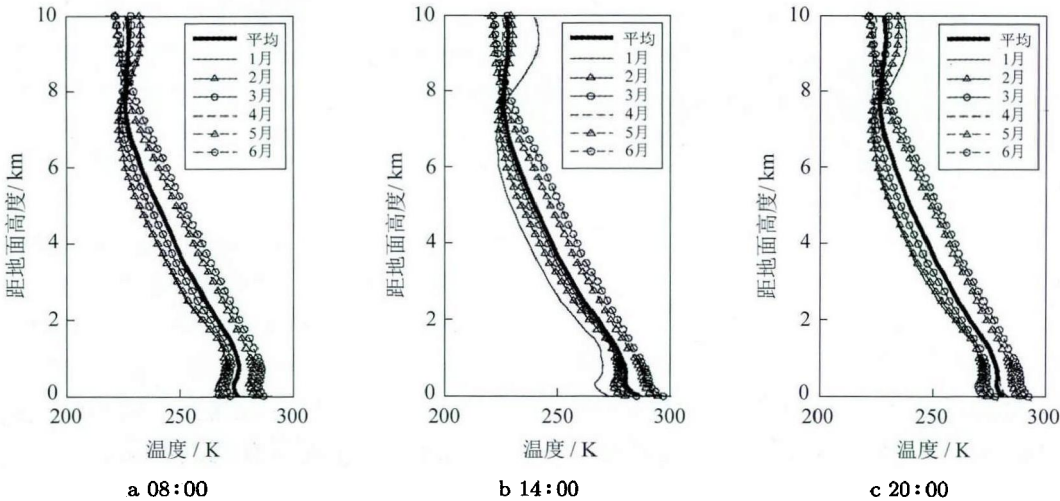


图 3 2010 年 1-6 月 SACOL 站 08:00, 14:00 和 20:00 微波辐射计反演温度廓线

Figure 3 Temperature profile of microwave radiometer in SACOL at 08:00, 14:00 and 20:00 from January to June, 2010

两个时次相差较小,距地5 km 以下,温度差的绝对值总体不高于2 K,但在14:00 相差较大,距地面5 km 以下,温度差的绝对值一般不低于5 K.

与探空曲线不同,1–4 月的微波辐射计反演的温度廓线在距地7–8 km 高度处也显现出逆温特征,并一直持续到距地10 km. 出现这种情况的原因可能是:微波辐射计探测的是垂直方向上的温度变化特征,而探空气球随风而动,由于高空风速增大,探空气球的水平位移也逐渐增大. 有研究表明,探空气球在500 hPa 以上就开始有明显的漂移,经向漂移较小,平均在150 hPa 以上达到0.1°,10 hPa 以上超过0.2°(约20 km);纬向偏移较大,在150 hPa 为0.5°,10 hPa 以上为0.85°(约80 km)^[26]. 因此,二者的观测数据所反映的位置并不完全相同.

2.2 相对湿度的垂直分布

图4 为由榆中站探空资料做出的2010 年1–6 月榆中地区08:00 和20:00 的相对湿度垂直廓线图. 从08:00 的廓线图可以看出,各月的相对湿度均在地面出现最大值,最大相对湿度范围是55%~69%,探测最高点出现最小值,几乎都小于10%. 1 月的相对湿度在距地3 km 左右减小到15%,2 月在距地4 km 左右减小到20%,之后相对湿度又逐渐增大,在距地8 km 左右再次达到一个峰值,之后总体呈减小的趋势,这种变化趋势应该和1,2 月的逆温层较厚有关. 3–6 月,相对湿度从地面到高空大致呈减小的趋势,3,5,6 月在距地6~8 km 之间会存在一个弱的高值. 在4 km 以下,1 月的相对湿度最小,超过6 km 后,4 月的相对湿度最小. 从20:00 的廓线图可以看出,1,2 月相对湿度随高度

呈先减小后增大、再减小的分布状态,1 月在距地面5 km 左右减小到13%,在7 km 左右增大到31%,2 月在距地面3.8 km 左右减小到29%,在7 km 左右增大到42%. 3–6 月,相对湿度随高度呈先增大后减小的分布状态,在距地2~3 km 之间出现最大值,范围是50%~62%. 在探测最高点出现最小值,均小于5%.

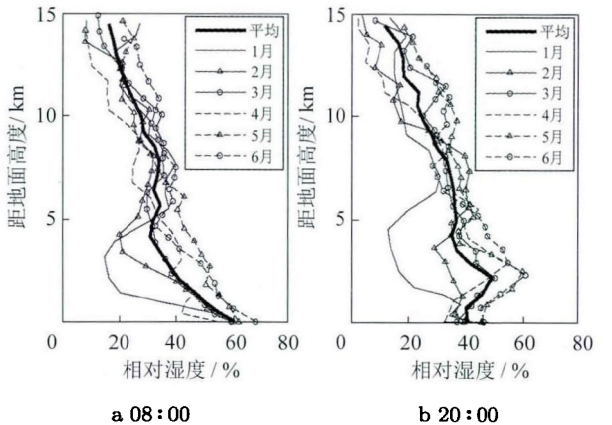


图4 2010 年1–6 月榆中站08:00 和20:00 探空相对湿度廓线

Figure 4 RH profile of air sounding in Yuzhong station at 08:00 and 20:00 from January to June, 2010

图5 为SACOL 站微波辐射计反演出的2010 年1–6 月榆中地区08:00, 14:00 和20:00 的相对湿度垂直廓线图. 由图5a 可知, SACOL 站08:00 相对湿度的垂直变化规律为距地1 km 以下,相对湿度随高度递减,1~5 km 之间相对湿度随高度呈增加趋势,6 km 以上基本呈减小趋势. 14:00 和20:00 相对湿度的变化规律与08:00 大致相同,但从地面到300 m 附近相对湿度出现了增大的现象(1 月除

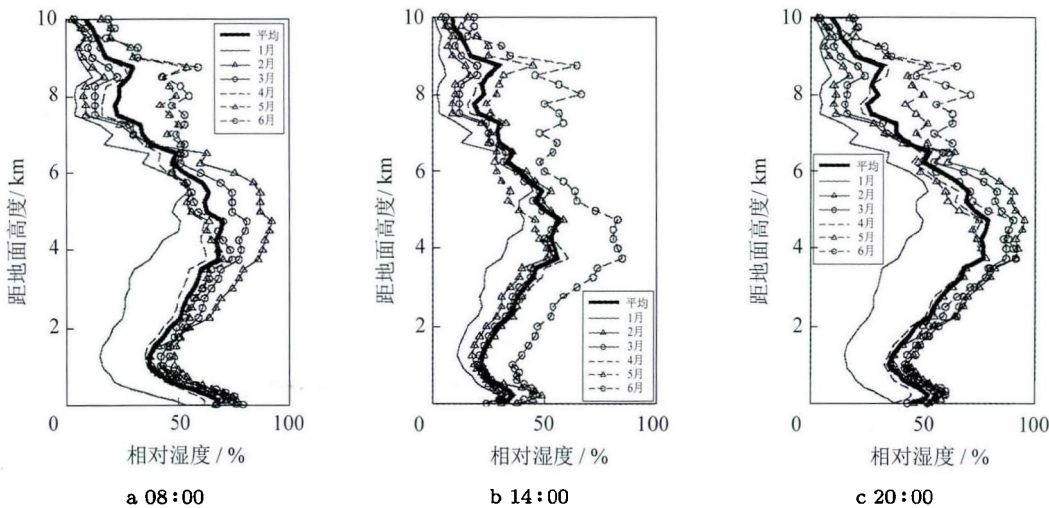


图5 2010 年1–6 月SACOL 站08:00, 14:00 和20:00 微波辐射计反演相对湿度廓线

Figure 5 RH of microwave radiometer in SACOL at 08:00, 14:00 and 20:00 from January to June, 2010

外). 各月相对湿度的高值区一般均出现在距地 4~6 km 之间, 1 月在距地面 5.5 km 附近相对湿度最大, 约为 55%. 2, 3 月在距地面 4.75 km 处出现最大值, 相对湿度可达 80%~90%. 4~6 月在距地 3.75 km 和 4.75 km 附近出现两个最大值, 变化范围为 60%~90%. 各月的相对湿度均在距地面 10 km 处减小到最小值, 1~3 月小于 5%, 4 月小于 10%, 5, 6 月小于 20%. 从时间上来看, 1 月相对湿度最小, 2.2~6.5 km 之间, 08:00 和 20:00 两个时次均为 2 月的相对湿度最大, 次之为 3 月, 4 月的相对湿度仅大于 1 月, 却小于其他 4 个月. 但在 14:00 则为 6 月的相对湿度最大, 2~5 月相对湿度变化范围不大. 从地面到距地面 10 km 处, 各月三个时次的平均相对湿度均为 14:00 最小, 地面相对湿度比 08:00 分别低 20%, 29%, 43%, 39%, 45% 和 48%, 半年平均值为 38%.

距地 2 km 以下, 08:00 的相对湿度为三个时次中最大, 距地 2~10 km, 20:00 的相对湿度为三个时次中最大. 同 08:00 和 20:00 相比, 1 月的相对湿度与半年平均相对湿度的差值在 14:00 较小, 各高度层差值的绝对值范围为 1%~22%, 而 08:00 的变化范围为 5%~31%, 20:00 的变化范围为 7%~38%.

与温度相比, 相对湿度的变化比较复杂, 不均匀, 连续性较差. 水汽含量随高度的分布通常会受到温度垂直分布、对流运动、湍流交换、云层凝结、蒸发和降水等多种因素的影响.

2.3 探空与微波资料的比较

2.3.1 温度的比较

图 6 为 2010 年 1~6 月 08:00 和 20:00 SACOL 站微波辐射计的反演温度和榆中站探空温度 (经插

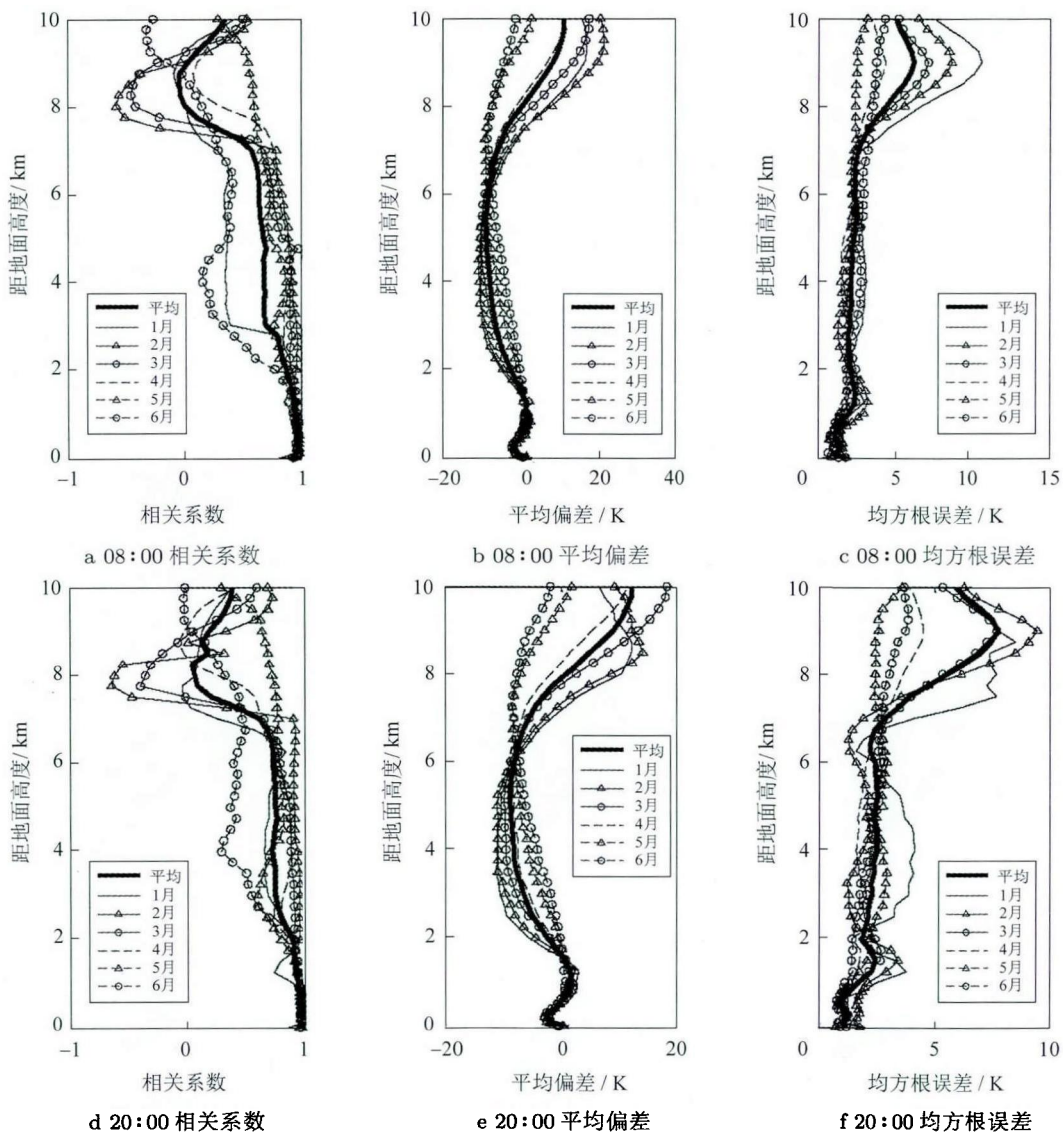


图 6 2010 年 1~6 月 SACOL 站与榆中站 08:00 和 20:00 温度的相关系数、平均偏差、均方根误差

Figure 6 R , T_{bias} , T_{std} of temperature between SACOL and Yuzhong station at 08:00 and 20:00 from January to June, 2010

值处理后,下同)的相关系数、平均偏差和均方根误差曲线.距地1.5 km 以下,微波辐射计的反演温度值与探空的吻合度较好,各月的相关系数均大于0.90,通过了显著性水平为0.01的相关性检验,平均偏差和均方根误差均小于2.0 K,20:00的相关系数大于08:00,平均偏差的绝对值和均方根误差小于08:00,因此在近地层微波辐射计反演的温度较为准确,且20:00的温度反演结果比08:00更接近探空观测值.距地面1.5~7 km 之间,微波辐射计的反演温度与探空的相关系数随高度减小,2月的相关系数减小到0.85,3~5月的相关系数减小到0.70,均通过了显著性水平为0.01的相关性检验,但1月和6月的相关性较低,未通过检验.对比08:00和20:00的相关系数曲线,可发现距地面1.5~7 km 之间20:00的相关系数大于08:00.在1.5~7 km 高度区间,微波辐射计反演的温度值小于探空的观测值,除6月份温度的平均偏差随高度递增外,其余各月通常在3.5~5 km 之间平均偏差达到

最大.与近地层相比,均方根误差随高度也有一定程度的增大.距地8 km 以上,微波辐射计反演的温度值接近于气候平均值,因此与探空的相关系数迅速减小,甚至出现负相关现象,平均偏差的绝对值和均方根误差急剧增大.由于大气下层对微波辐射计的亮温贡献大,包含的大气信息多^[27],因此微波辐射计对低层的探测能力较强,高层较弱,对比结果显示低层拟合效果较好,高层较差.大气中水汽分子和云滴所发出的微波辐射原本也是相当微弱的,即使在吸收线附近,想要能够精确地接收到这十分微弱的微波信号,还是需要高灵敏度的微波辐射计^[14].

2.3.2 相对湿度的比较

图7为2010年1~6月08:00和20:00 SACOL站微波辐射计反演的相对湿度和榆中站探空相对湿度的相关系数、平均偏差和均方根误差曲线.整体来看,微波辐射计对相对湿度的反演效果明显不

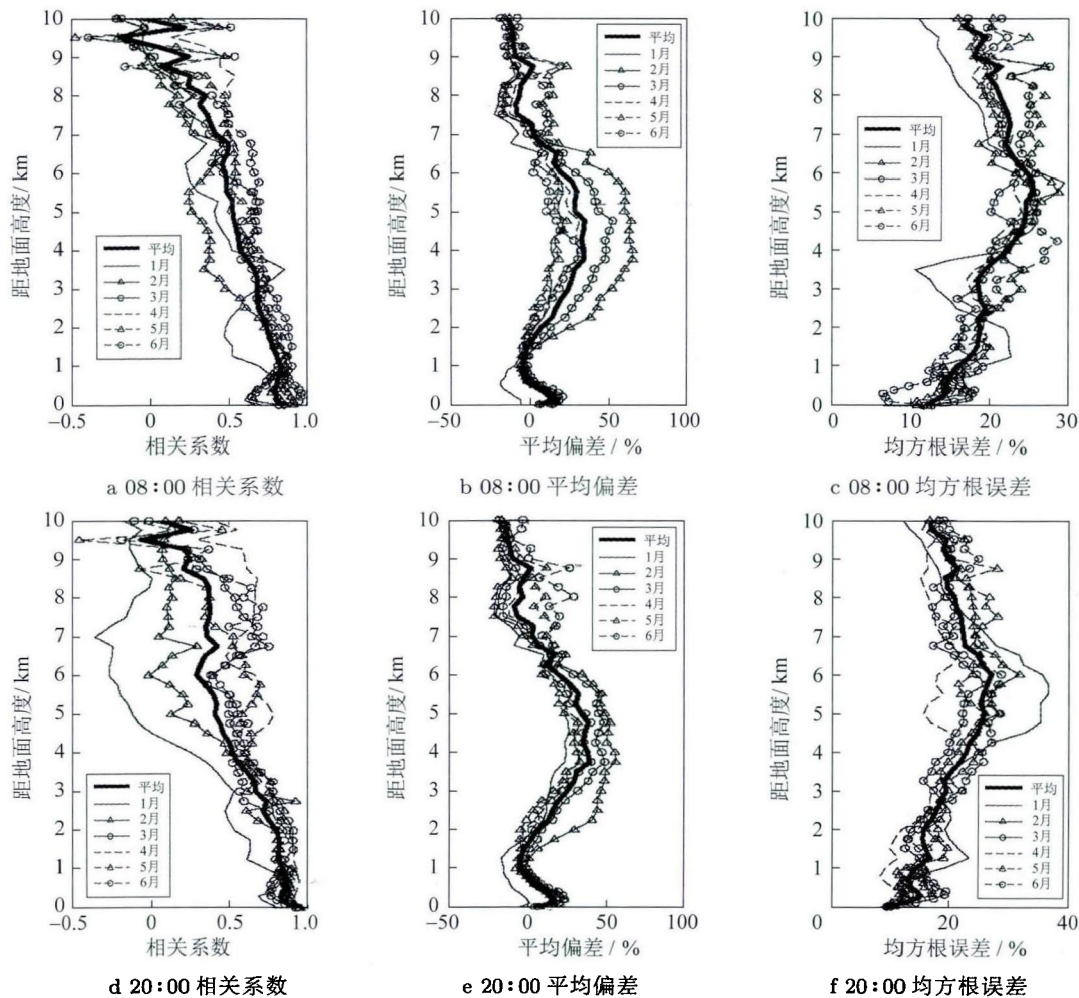


图7 2010年1~6月SACOL站与榆中站08:00和20:00相对湿度的相关系数、平均偏差、均方根误差
Figure 7 R , T_{bias} , T_{std} of RH between SACOL and Yuzhong station at 08:00 and 20:00 from January to June, 2010

如温度好,相关性较差,平均偏差和均方根误差较大. 相关系数随高度基本呈递减的趋势,3-6月微波辐射计反演相对湿度与探空的吻合度较好,距地面3 km 以下,相关系数均超过0.75,当距地高度上升至7 km 时,相关系数减小到0.5,但仍能通过显著性水平为0.01 的相关性检验. 1月和2月相关性较差,仅在距地面3.5 km 以下,相关系数能超过0.5. 距地面7 km 以上,各月的相关系数均迅速减小,没有通过显著性检验. 距地面2 km 以下,相对湿度平均偏差的绝对值均小于20%,其中2-6月份,在距地面0.5~1.5 km 之间的平均偏差绝对值不超过10%. 在2~7 km 的区间内,与温度平均偏差相反,微波辐射计反演的相对湿度均高于探空的观测值,通常也在3.5~5 km 附近平均偏差达到最大值,其中2月和3月的平均偏差很大,部分超过50%. 其余各月为20%左右. 由于7 km 以上空气中水汽含量很少,因此微波辐射计反演的相对湿度与探空观测值的平均偏差减小. 各月相对湿度的标准差没有明显的变化规律,基本集中在10%~25%之间,与5%的精度允许范围相差很大.

2.4 微波辐射计温度的偏差订正

图8为2010年1-6月榆中地区不同天气条件下08:00和20:00 SACOL站微波辐射计反演温度与榆中站探空观测值的平均偏差廓线图. 由图8a可知,从天气条件来看,一般情况下,晴天时微波辐射计的反演温度与探空观测值的平均偏差绝对值最小,微波辐射计的反演效果较好,混合天次之,云天和降水天平均偏差的绝对值较大. 但在距地1.5~3 km 之间,云天条件下平均偏差的绝对值小于晴天. 从距地高度来看,在任何天气条件下,均为近地层平均偏差最小,距地1.5 km 以下,晴天条件下的温度平均偏差不超过±1.5 K. 在该高度区间,微波辐射计的反演温度基本可以代替探空的观测值. 距地2~7.5 km 之间,微波辐射计的反演值均小于探空的观测值,平均偏差基本呈抛物线状,在距地5 km 左右,平均偏差的绝对值达到最大. 本文试图通过拟合晴天条件下距地1.5~8 km 高度区间的温度平均偏差来订正微波辐射计对温度的反演结果. 距地8 km 以上,微波辐射计的反演值均大于探空的观测值,且平均偏差随高度增加而增大. 由于在8 km 以上,微波辐射计反演的温度近似为气候平均值,因此对该高度区间的温度偏差不进行处理. 对于20:00,由图8b可知,距地面2 km 以下,晴天时微波辐射计的反演效果较好,但平均偏差的绝对值大于08:00,距地面2~6.5 km

之间,降水天的平均偏差绝对值最小,云天次之,晴天最差,微波辐射计的反演值均小于探空观测值. 不同天气条件下,20:00温度的平均偏差在距地1.5~8 km 之间也基本呈抛物线状,平均偏差的绝对值在距地5 km 附近达到最大.

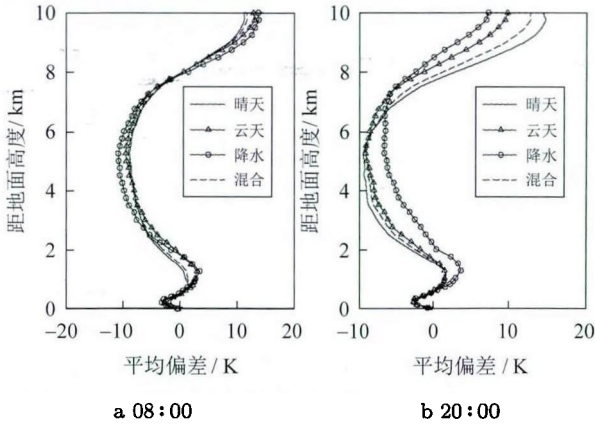


图8 2010年1-6月SACOL站和榆中站不同天气条件08:00和20:00温度平均偏差廓线

Figure 8 T_{bias} of temperature between SACOL and Yuzhong station at 08:00 and 20:00 from January to June, 2010 in different weather condition

图9为2010年1-6月SACOL站08:00和20:00晴天条件下距地面1.5~8 km 之间温度平均偏差的拟合曲线. 考虑到微波辐射计在晴天时反演效果相对较好,且在336对有效数据中,晴天数据有232对,约占整体样本的70%,而云天数据和降水天数据分别只有69对和25对,数量较少,代表性不足,

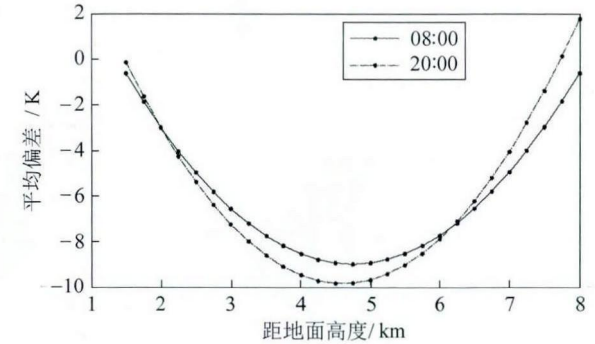


图9 2010年1-6月SACOL站与榆中站晴天08:00和20:00温度平均偏差拟合曲线

Figure 9 T_{bias} fitting of temperature between SACOL and Yuzhong station at 08:00 and 20:00 from January to June, 2010 in sunny

因此选取距地1.5~8 km 的晴天数据进行温度平均偏差的拟合. 08:00温度平均偏差的拟合方程为

$$\Delta t = 0.7907h^2 - 7.507h + 8.831. \tag{4}$$

其中, h 为距地高度,单位 km, Δt 为不同高度的温度平均偏差,单位 K.

拟合方程 $R^2=0.969$, 通过了显著性水平为 0.01 的检验. 拟合后各高度上温度平均偏差的标准差基本在 $\pm 0.5\text{ K}$ 以内.

20:00 温度平均偏差的拟合方程为

$$\Delta t = 1.005h^2 - 9.254h + 11.46.$$

(5)

拟合方程 $R^2=0.980$, 通过了显著性水平为 0.01 的检验. 拟合后各高度上温度平均偏差的标准差也基本在 $\pm 0.5\text{ K}$ 以内.

图 10 为 2013 年 1–3 月榆中地区在晴天条件下 08:00 和 20:00 订正前后 SACOL 站微波辐射计反演温度和榆中站探空观测温度之间的相关系数、平均偏差、标准差廓线图. 在 2013 年 1 月 1 日–3 月 31 日这一时间段内, 共有 179 对有效数据, 其中晴天数据 134 对, 约占整体样本的 75%. 本文用拟

合方程 (4), (5) 来订正 SACOL 站微波辐射计反演的距地 1.5~8 km 之间温度数据. 由图 10a 和图 10d 可知, 在距地 1.5 km 以下, 微波辐射计和探空的晴天温度廓线具有较好的相关性, 08:00 的相关系数均超过 0.91, 20:00 的相关系数都在 0.97 以上, 部分甚至超过了 0.99, 均通过了显著性水平为 0.01 的相关性检验, 表明二者在该高度层的温度廓线吻合得很好. 距地 1.5~7 km 之间, 微波辐射计和探空的晴天温度廓线趋势也大体一致, 08:00 的相关系数基本不小于 0.80, 20:00 的相关系数不小于 0.85, 1.5~5 km 之间的相关系数不小于 0.90, 均通过了显著性水平为 0.01 的相关性检验. 距地面 7 km 以上, 二者的相关性迅速减小, 甚至呈负相关的变化, 无法通过显著性检验. 由于温度平均偏差的订正并未影响到相关系数的计算, 因此订正前后二

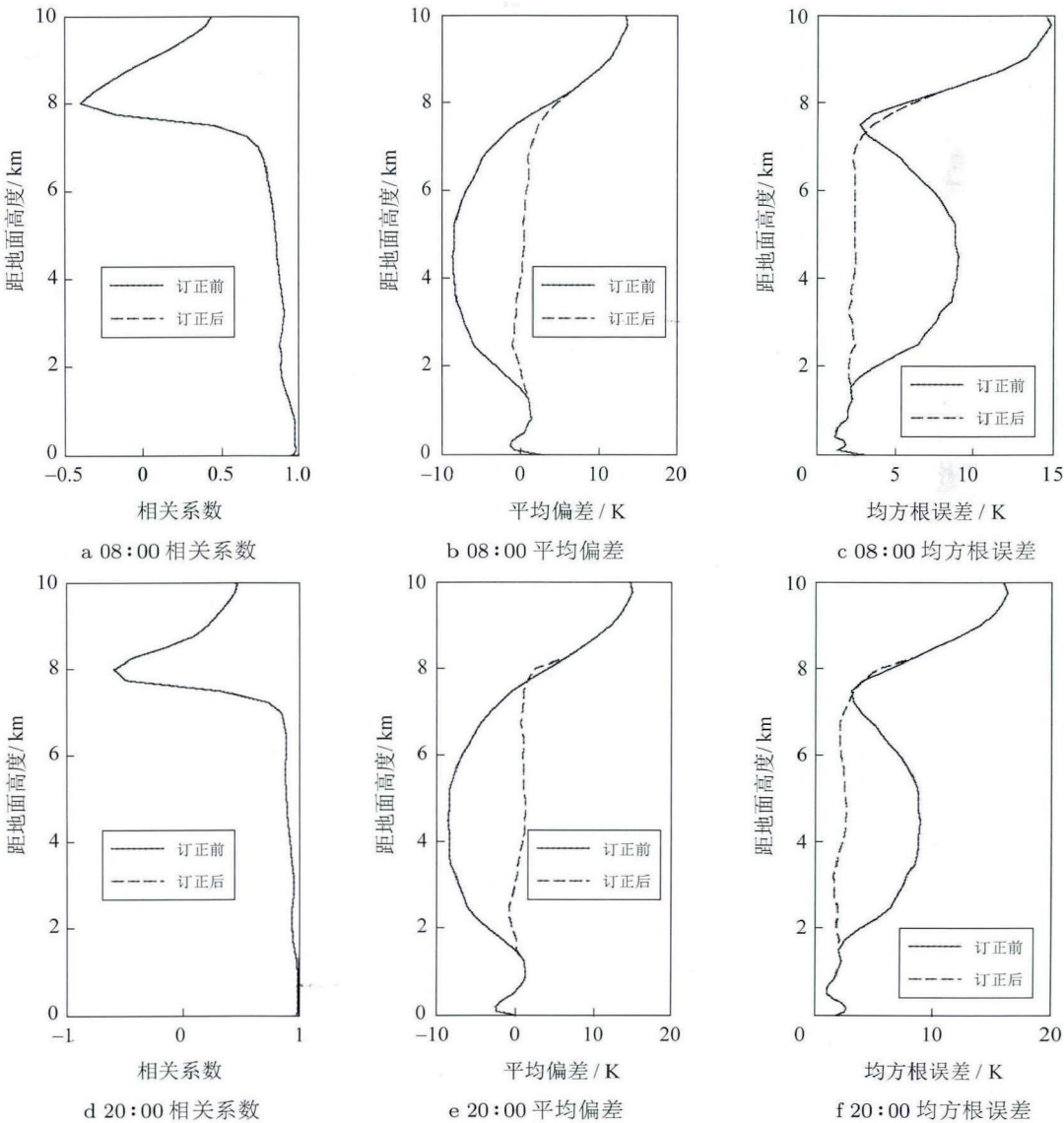


图 10 2013 年 1–3 月 SACOL 站与榆中站晴天 08:00 和 20:00 温度订正

Figure 10 Temperature correction between SACOL and Yuzhong station at 08:00 and 20:00 from January to March, 2013 in sunny

者的相关系数是一致的. 与2010年1–6月温度平均偏差的变化规律相似, 订正前, 距地1.5 km以下微波辐射计和探空温度的平均偏差较小, 1.5~8 km之间呈抛物线变化, 微波辐射计的反演值均小于探空的观测值, 距地5 km附近平均偏差的绝对值最大. 8 km以上, 微波辐射计的反演值大于探空的观测值. 订正后距地1.5~7 km之间的温度平均偏差的绝对值在08:00减小到0.5 K, 20:00减小到1.0 K. 微波辐射计和探空之间的温度平均偏差绝对值有了较大幅度的减小, 标准差也减小到2.5 K以下, 因此, 用拟合方程(4), (5)对2013年1–3月SACOL站微波辐射计反演的距地1.5~8 km之间的温度值进行订正是有效的, 但拟合方程只适用于SACOL站微波辐射计的温度反演结果, 若使其具有广泛的代表性, 还需多站点长时间的资料分析.

3 结论与讨论

分析2010年1–6月榆中站探空资料和SACOL站微波辐射计反演资料, 结果表明, 20:00气温随高度的垂直递减率略大于08:00. 各月的对流层顶高度略有不同, 白天高于夜间. 清晨易出现逆温层, 1月的逆温层较厚.

探空观测的相对湿度最大值出现在地面, 范围是55%~69%, 探测最高点出现最小值, 几乎都小于10%. 微波辐射计反演的相对湿度高值区一般出现在距地面4~6 km附近. 与温度相比, 相对湿度的变化比较复杂, 均匀性和连续性都较差.

对比探空廓线和微波辐射计反演廓线, 在距地面1.5 km以下, 微波辐射计反演的温度与探空的吻合度较好, 相关系数大于0.90, 通过了显著性水平为0.01的相关性检验; 在距地1.5~7 km的高度区间内, 微波辐射计反演的温度数据均小于探空的观测值, 一般在3.5~5 km附近温度的平均偏差绝对值最大.

微波辐射计反演的相对湿度与探空之间的相关系数随高度呈递减的趋势, 在距地2~7 km之间, 微波辐射计反演的相对湿度均高于探空的观测值, 通常在3.5~5 km附近平均偏差达到最大. 微波辐射计相对湿度的反演效果明显不如温度好, 相关性较差, 平均偏差和均方根误差较大.

用2010年1–6月SACOL站和榆中站温度的平均偏差拟合方程对2013年1–3月微波辐射计反演的距地1.5~8 km之间的温度值进行订正, 效果显著, 表明微波辐射计对大气的温湿廓线具有一

定的探测能力, 可作为探空的有利补充. 二者观测结果之间的差异可能与两种设备的探测原理不同. 微波辐射计的反演算法、探空气球的高空漂移以及数据处理引入的不确定性等因素有关. 地基微波辐射计仍需在应用过程中不断改进和完善, 反演方法有待进一步优化.

致谢 感谢兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)提供研究资料.

参考文献

- [1] 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 46–146.
- [2] 周玉驰. 地基多通道微波辐射计反演大气温湿廓线的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [3] 郭伟, 王振会, 孙安平, 等. 地基微波辐射计网络资料处理系统设计与实现[J]. 气象, 2010, 36(4): 120–125.
- [4] 刘建中, 张蕾. 微波辐射计反演产品评价[J]. 气象科技, 2010, 38(3): 325–331.
- [5] 廖国男, 周诗健, 阮忠永, 等. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 1985: 363–451.
- [6] Ruffieux D, Nash J, Jeannet P, et al. The COST 720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign: TUC[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2006, 15(1): 5–10.
- [7] Li L, Vivekanandan J, Chan C H, et al. Microwave radiometric technique to retrieve vapor, liquid and ice I: development of a neural network-based inversion method[J]. Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(2): 224–236.
- [8] 姚志刚, 陈洪滨. 七通道微波辐射计遥感大气温度廓线的性能分析[J]. 气象科学, 2005, 25(2): 133–141.
- [9] 陈涛, 卜清军, 赵玉洁. 微波辐射计探测滨海新区大气温湿参数垂直分布[J]. 天津科技, 2011, 32(5): 75–82.
- [10] 何杰颖, 张升伟. 地基和星载微波辐射计数据反演大气湿度[J]. 电波科学学报, 2011, 26(2): 362–368.
- [11] 杜荣强, 魏合理, 伽丽丽, 等. 基于地基微波辐射计的大气参数廓线遥感探测[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(5): 329–335.
- [12] 刘红燕. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析[J]. 气象学报, 2011, 69(4): 719–728.
- [13] 姚作新, 吕鸣, 贺晓东, 等. MP-3000A型地基微波辐射计在乌鲁木齐探空站的辅助性探测研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(1): 38–43.

- [14] 朱元竞, 胡成达, 甄进明, 等. 微波辐射计在人工影响天气研究中的应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1994, 30(5): 597–606.
- [15] 王黎俊, 孙安平, 刘彩红, 等. 地基微波辐射计探测在黄河上游人工增雨中的应用[J]. 气象, 2007, 33(11): 28–33.
- [16] 刘红燕, 李炬, 曹晓彦, 等. 遥感大气结构的地基12通道微波辐射计测量结果分析[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(2): 222–229.
- [17] 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.
- [18] 姚俊强, 杨青, 韩雪云, 等. 乌鲁木齐夏季水汽日变化及其与降水的关系[J]. 干旱区研究, 2013, 30(1): 67–73.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Huang Jian-ping, Zhang Wu, Zuo Jin-qing, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau[J]. Advance in Atmospheric Sciences, 2008, 25(6): 906–921.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] WMO Meteorology. A three-dimensional science: second session of the commission for aerology[J]. WMO Bull, 1957(4): 134–138.
- [25] 王树廷, 王伯民. 气象资料的整理和统计方法[M]. 北京: 气象出版社, 1984: 9–158.
- [26] 刘红亚, 薛纪善, 沈桐立, 等. 探空气球漂移及其对数值预报影响的研究[J]. 应用气象学报, 2005, 16(4): 518–526.
- [27] 林乐科, 张业荣, 赵振维, 等. 微波辐射计探测大气剖面的相关向量机算法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(1): 90–94.

(责任编辑: 张勇)

(上接第60页)

- [24] 邱临静, 郑粉莉, 尹润生. 1952–2008年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 49–53.
- [25] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 653–661.
- [26] Hirsch R M, Slack J R. Non-parametric trend test for seasonal data with serial dependence[J]. Water Resource Research, 1984, 20(6): 727–732.
- [27] Gan T Y. Hydroclimatic trends and possible climatic warming in the Canadian Prairies[J]. Water Resource Research, 1998, 34(11): 3009–3015.
- [28] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.

(责任编辑: 王春燕)