

周永水,原野,杨林,等.2022.晴空时微波辐射计温度廓线反演误差分析[J].暴雨灾害,41(6):720-726

ZHOU Yongshui, YUAN Ye, YANG Lin, et al. 2022. Bias analysis of retrieval profile of temperature with microwave radiometer in clear sky [J]. Torrential Rain and Disasters, 41(6): 720-726

## 晴空时微波辐射计温度廓线反演误差分析

周永水<sup>1</sup>,原野<sup>2</sup>,杨林<sup>1</sup>,王瑾<sup>3</sup>,严小冬<sup>4</sup>

(1. 贵州省气象台, 贵阳 550002; 2. 贵州省气象服务中心, 贵阳 550002;  
3. 贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550002; 4. 贵州省气候中心, 贵阳 550002)

**摘要:**利用2017年1月—2019年5月逐日08:00(北京时,下同)、20:00贵阳地基微波辐射计和无线电探空仪、地面自动站观测数据,评估了微波辐射计在晴空时温度廓线的反演误差及误差的标准差的季节变化以及逆温与误差的关系,结果显示:(1)从春季到冬季4个季节垂直温度廓线的误差分别为 $-1.71 \sim 1.35$  °C、 $-1.69 \sim 0.78$  °C、 $-2.24 \sim 1.29$  °C、 $-4.98 \sim 1.49$  °C,误差的标准差分别为 $1.13 \sim 2.93$  °C、 $0.43 \sim 1.86$  °C、 $0.76 \sim 1.92$  °C、 $0.62 \sim 3.48$  °C,春季到秋季的误差及误差的标准差在垂直方向的变化较为一致,冬季误差和误差的标准差均大于其它季节。(2)逆温与误差有较好的相关性。在逆温的3种表达方式中,逆温层厚度为490~740 m时,逆温层厚度与误差有最优的相关系数,最大相关系数出现在逆温层厚度为650 m时;逆温层厚度小于490 m或大于740 m且逆温差阈值为1.2 °C时与误差有最优的相关系数。(3)逆温平均高度和误差平均高度的拟合度较差,不能由逆温发生的高度推测误差所在高度。

**关键词:**微波辐射计;晴空;误差;逆温

中图分类号:P407.7

文献标志号:A

DOI:10.12406/byzh.2020-194

### Bias analysis of retrieval profile of temperature with microwave radiometer in clear sky

ZHOU Yongshui<sup>1</sup>, YUAN Ye<sup>2</sup>, YANG Lin<sup>1</sup>, Wang Jin<sup>3</sup>, YAN Xiaodong<sup>4</sup>

(1. Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002; 2. Guizhou Meteorological Service Center, Guiyang 550002; 3. Guizhou Institute of Mountainous Environment and climate, Guiyang 550002; 4. Guizhou Climate Center, Guiyang 550002)

**Abstract:** With the Guiyang ground-based microwave radiometer, radiosonde and ground observation data at 08:00 and 20:00 from January 2017 to May 2019, this paper evaluates the seasonal variation and the standard deviation of bias of temperature profile retrieved from the microwave radiometer in clear sky. The results show that: (1) the average relative biases of the vertical profiles of temperature from spring to winter are as follows:  $-1.71-1.35$  °C,  $-1.69-0.78$  °C,  $-2.24-1.29$  °C and  $-4.98-1.49$  °C, and the standard deviations of biases are as follows:  $1.13-2.93$  °C,  $0.43-1.86$  °C,  $0.76-1.92$  °C,  $0.62-3.48$  °C. The vertical changes and standard deviations of biases from spring to autumn are the same, while the changes and standard deviations of error in winter are larger than those in other seasons. (2) The samples of inversion and biases have the best correlation. Among the three expressions of inversion, the inversion thickness and the bias have an best correlation when the inversion thickness is 490-740 m. The largest correlation coefficient appears when the inversion thickness is 650 m. The inversion magnitude and the error have the best correlation when the inversion thickness is less than 490 m or more than 740 m and inversion threshold is taken as 1.2 °C. (3) The correlation between the average height of inversion and bias is analyzed. It is found that the correlation between the two is poor. The height of bias can not be reflected by the height of inversion.

**Key words:** microwave radiometer; clear sky; bias; temperature inversion

### 引言

无线电探空仪时间采样少,一些相关的技术和手段如激光雷达和傅里叶变换红外光谱仪以及RASS温

度廓线仪可应用于连续的温度和水汽廓线的获取,但是这些技术和手段仍然存在一定的缺陷,比如激光雷达和傅里叶变换红外光谱仪只有在有云存在的情况下才能够探测到大气的温度和水汽,RASS温度廓线

收稿日期:2020-09-22;定稿日期:2021-11-18

资助项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2020115);国家自然科学基金项目(41965010);黔气科登(20200504)

第一作者:周永水,主要从事强对流天气预报预警研究。E-mail: joever2000@163.com

通信作者:严小冬,主要从事气候预测和诊断研究。E-mail: 312404588@qq.com

仪能够精确获取大气的温度和湿度廓线,但是一般状况下其垂直探测高度在300~800 m,最大垂直探测高度不超过1 000 m。但是,微波辐射计具有能够连续24 h工作、时间分辨率高、无人值守等优点,因此微波辐射计在强对流天气监测和预警中具有较好的应用前景。魏东等(2011)对比了在强对流发生前后的常规探空、微波辐射计和风廓线的数据后认为三者的表现基本一致。微波辐射计数据能应用到短时暴雨及对流云降水中(黄治勇等,2013;张秋晨等,2018),以及雷电潜势及冰雹监测中(齐琳琳等,2005;黄治勇,2015;Ren et al.,2016;苟阿宁,2018),在不同级别的降水过程中其温度和湿度反演扩线也有一定的指示意义(汪小康等,2016)。另外,微波辐射计在模式模拟和改进同化效果方面也发挥了较好的作用(王叶红等,2010;Caumont et al.,2016;Martinet et al.,2016)。

微波辐射计通过51~59 GHz频段的氧气吸收通道来获取亮温后进行温度的反演,22~30 GHz频段的水汽吸收通道来进行水汽反演。亮温是微波辐射计得到的一级数据,代表微波辐射计在指定的频率接收的电磁波强度,这种一级数据要通过数学方法转化为温度廓线和湿度廓线(Rodgers et al.,1976;Solheim et al.,1998),很多数学方法在反演过程中都被尝试,包括神经网络机器学习、牛顿迭代法、线性回归以及贝叶斯最大值法等等(Fredrick et al.,1998)。王振会等(2014)研究结果表明这些反演方法的误差大致是相等的。除了数据反演造成的误差外,微波辐射计的定标、观测环境的变化、电磁波干扰等也是造成数据误差的原因。另外,在距太阳位置约15°以内,K和V波段观测资料(3°—6°波束宽度)方向上误差会迅速增加(赵玲等,2009)。数学方法反演以及定标过程等造成的误差会体现在所有垂直探测高度上,这种误差产品在前端显示时容易被使用者发现。除此以外,在一级数据探测中,仪器探测还会受到其他探测环境的影响,如天线罩上附着的水会严重影响微波辐射计的反演精度(Ware et al.,2004);降水对微波辐射计探测也有一定影响(张文刚等,2017);天空有云存在时微波辐射计的精度有明显的降低(车云飞等,2015);晴空和云天的温湿廓线误差有明显的区别(王志诚等,2018;茆佳佳等,2018);晴空时红外亮温明显偏低、突变较小,有云时亮温值明显升高,且由于云层厚度不均,出现较大范围的温度起伏(刘思波等,2015);逆温层的存在也会造成误差的增大(刘晓璐等,2019)。

以上研究中均提到了降水以及积云对微波辐射计观测精度的影响,以及晴天的探测精度高于云天和雨天,但是对晴天时微波辐射计误差精度如何变化,以及这种变化会受到哪些气象要素的影响研究较少。另

外,如果变化和影响是存在的,这些要素是影响整个垂直高度的探测精度,还是仅仅影响探测环境高度附近的探测精度,这些研究尚未涉及。本文将试着利用无线电探空仪数据和微波辐射计晴天观测数据进行误差对比分析,来进行上述问题的初步探讨,为微波辐射计在天气预报业务中的推广和使用提供参考。

## 1 设备与资料

微波辐射计数据由布设在贵州省贵阳市(106.626°E,26.628°N,海拔1 295 m)的德国RPG-HAT-PRO 42通道14接收机并行技术微波辐射计RPG-HATPRO-G4(42×14)提供,这个型号的微波辐射计在多个型号的微波辐射计精度评估中表现较好,它可以连续得到从地面到10 km高度的温度、湿度、水汽和液态水的垂直廓线,垂直分辨率高达93层,地面—1 200 m的垂直分辨率为25~40 m,1 200—10 000 m的垂直分辨率为50~250 m。反演温度用的是51—58 GHz(V波段)之间的21个频率氧气吸收带通道,湿度用的是22—32 GHz(K波段)之间的21个频率水汽吸收带。该微波辐射计支持天顶模式(垂直向上对天顶观测)和边界层高度角扫描两种扫描模式,系统采用的并行变频技术极大地减少了变频次数,提高了通道占空比,保证了高的信噪比。本次研究所使用的数据时间为2017年1月—2019年5月。

探空数据来自同期贵阳气象探空站(106.44°E,26.35°N,海拔1 223.6 m)08:00、20:00(北京时,下同)秒级探测数据,测量周期为 $1.2\pm 0.1$  s,垂直分辨率为5~8 m,探空站和微波辐射计站点的两地水平距离为11.6 km。根据刘晓璐等(2019)的研究结果,在分别为晴空、层积云、高积云(天空云量分别为0、10、10)天气条件且大范围天气是一致的情况下,探空气球因漂移远离微波辐射计的天顶位置时,其误差偏差仍在可接受范围且3种天气条件时的偏差均无显著变化。因此,即使考虑气球和微波辐射计的距离,气球在地面为晴天,随着漂移距离内天空仍然为晴天时可以认为漂移距离对误差的影响是有限的。据统计,当探空气球垂直高度为10 km时,经统计所有晴天样本探空气球漂移最大距离49 km,最小距离9.5 km。

依据晴天的定义,采用贵阳气象探空站同期08:00、20:00观测的小时数据,把贵阳测站云量为0且以贵阳站为中心的40 km观测范围内测站云量为0,作为晴天样本的挑选标准。

## 2 数据处理

根据Domenico等(2013)的外场试验评估,微波辐

射计和无线电探空仪的温湿廓线误差分别为1.5℃和0.5 g·m<sup>-3</sup>, Susanne等(2009)认为积云引起的地面亮温变化在1 K左右,仪器噪音的亮温变化也在1 K左右,为减少噪音等误差的干扰,本文将微波辐射计和无线电探空仪温度廓线误差绝对值大于或等于3℃的探测数据作为研究样本,结合无线电探空仪探测的高空气象要素变化,来考察引起误差的原因,并研究这种误差的垂直影响距离。在研究过程中发现,此类大气环境引起的误差不会出现在整个探测高度上,因此若从地面到10 km高度探测误差均超过3℃,则考虑是仪器引起的误差,此类样本在研究中予以剔除。剔除了冷锋或云贵静止锋在探测时间恰好位于两个仪器之间造成的误差样本,剔除了垂直高度上孤立的误差样本(只有1个误差大于3℃且相邻上下2个高度内误差均小于2℃)。由此得到微波辐射计和探空数据匹配的晴天样本组178组,其中春、夏、秋、冬样本组分别为47、42、75、14组。考虑到探空廓线垂直分辨率约为10 m,贵阳微波辐射计反演廓线的垂直分辨率25—250 m,在对比分析前,参考徐桂荣等(2019)的做法,先将探空廓线采用线性插值法插值到微波辐射计廓线的93个高度上,再以这93个高度上的探空参量廓线为参考,对匹配的微波辐射计廓线精度进行评估。

把一次微波辐射计探测中温度廓线探测误差达3℃以上的视为一次误差样本(简称误差样本,下同),并着重探讨相对湿度、逆温及逆湿等与微波辐射计探测误差的相关联系,其中将RH分为70%和80%两个阈值。无线电探空仪垂直方向精度为5~8 m,垂直高度上升5~8 m时各种要素的变化较小或无变化,气象要素均要求达到一定的厚度才具有研究意义,因此在研究中设置了多个厚度阈值来筛选样本。

逆温的定义为:地面上空的大气结构出现气温随高度增加或维持不变。逆湿同理。在探讨各要素与微波辐射计探测误差的相关性时,分别将以上研究要素出现在晴天无线电探空仪上时记为1,没有出现记为0,微波辐射计晴天时垂直高度上温度廓线探测误差大于3℃时记为1,误差小于3℃记为0。在某一确定厚度时共得到4组探空要素矩阵(0,1序列,下同)和1组误差数据矩阵(0,1序列),每组样本数量为178个。设定最小厚度阈值为100 m,最大厚度阈值为1 000 m,厚度阈值步长设定10 m(约2个观测点)。

### 3 结果分析

#### 3.1 微波辐射计观测的误差和标准差分析

利用微波辐射计和探空数据的平均误差和标准差来进行垂直高度上的检验和分析,平均误差可以看

出微波辐射计数据的偏冷还是偏暖的程度,误差的标准差能够看出误差的总体离散情况。

$$\mu_h = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_1 - x_2) \quad (1)$$

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{hi} - \mu_h)^2} \quad (2)$$

其中 $\mu_h$ 为平均误差, $\sigma_h$ 为误差的标准差, $N$ 为样本个数,春、夏、秋、冬样本个数分别为47、42、75、14, $x_1$ 为微波辐射计数据, $x_2$ 是无线电探空仪同一高度探测数据, $x_{hi}$ 为单个样本误差数据, $x_{hi} = x_1 - x_2$ 。图1为2017年1月—2019年4月晴天时四个季节的平均误差和标准差分布。从图中可见,在晴空形势下,微波辐射计探测数据在地面到离地10 000 m的高度上4个季节的平均误差分别为-1.71~1.35℃、-1.69~0.78℃、-2.24~1.29℃、-4.98~1.49℃,从误差曲线来看(图1和表1),春季到秋季,最小误差出现高度分别为760 m、840 m和640 m,微波辐射计探测数据比探空数据在最小误差高度(离地高度,下同)以下偏暖,在其上偏冷,最大偏冷分别出现在7 200 m、7 200 m、9 800 m处;冬季变化较为复杂,在300 m以下偏暖,300—1 680 m偏冷,1 680—2 400 m处转为偏暖,随后向高层偏冷,最大偏冷出现在8 400 m,这种变化趋势和刘建忠等(2012)的研究结果是一致的。冬季的样本数量较少,因此它是否存在这种偏转结构可能还需要更多的数据进行对比分析。从误差的标准差的变化来看,4个季节的范围分别为1.11~2.93℃、0.43~1.86℃、0.76~1.94℃、0.62~3.48℃,春季和夏季误差的标准差曲线走势表现为从地面开始逐渐减小,春季在2 500 m左右达最小,夏季在310 m达最小,然后随高度逐渐增大;秋季误差的标准差曲线在1 200 m左右达最小后开始增大,在2 900 m处达最大1.86℃,随后又有所减小,最小偏差在8 400 m;冬季的误差的标准差变化曲线从地面开始一直增大到8 400 m处达3.48℃后略有减小,但是变化不明显,8 400 m以上标准差均在3.0℃以上。

表1 不同季节温度廓线最小、最大误差和误差的

标准差(单位:℃)及其所在的高度(单位:m),时间同图1

Table 1 The heights (unit: m) of the minimum, maximum error and standard deviation (unit: °C) of bias of temperature profile in different seasons, the time period is the same as Fig.1

季节	最小误差 /高度	最大误差 /高度	最小标准差 /高度	最大标准差 /高度
春	0.03/760	-1.71/7 200	1.11/2 500	2.93/9 300
夏	0.03/840	-1.37/7 200	0.43/310	1.86/9 600
秋	0.02/640	-1.93/9 800	0.76/8 400	1.94/2 900
冬	0.01/280	-4.92/8 400	0.62/220	3.48/8 400

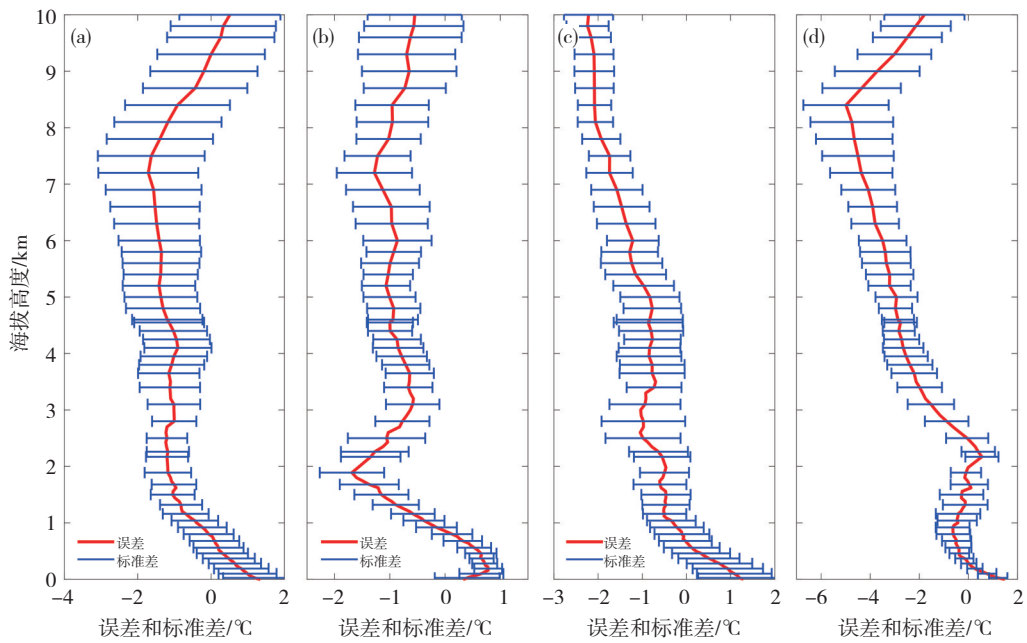


图1 2017年1月—2019年4月春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)晴空时微波辐射计温度廓线探测误差(红色曲线)和误差的标准差(蓝色直线)示意图

Fig.1 Schematic diagram of bias (red curve) and standard deviation (blue straight line) of bias of microwave radiometer temperature detection in clear sky in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter from January 2017 to April 2019

### 3.2 晴天误差样本与逆温、逆湿、相对湿度样本的相关性分析

为了找出晴天时在高原地区造成微波辐射计探测误差的气象因子,结合前人的研究结果,选择把逆温、逆湿和相对湿度作为研究对象,把相对湿度分为小于70%和小于80%两种情况分析。图2给出了晴天时逆温、逆湿以及相对湿度在不同厚度阈值(步长为10 m)时的样本与误差样本的相关系数。在所有要素

厚度阈值范围内,逆湿和误差的相关系数在-0.06 ~ 0.17之间,相关性较差,不能通过 $\alpha=0.02$ 的信度检验(样本数量为178时信度 $\alpha=0.02$ 的临界相关系数为0.1726)。RH阈值为70%和80%对应的相关系数范围分别为-0.21 ~ -0.05和-0.26 ~ -0.075,这两个要素的相关系数在某些厚度范围上能够通过 $\alpha=0.02$ 的信度检验,但和误差之间呈现负相关。逆温对应的相关系数为-0.05 ~ 0.40,这表明逆温在某一厚度区间内和探

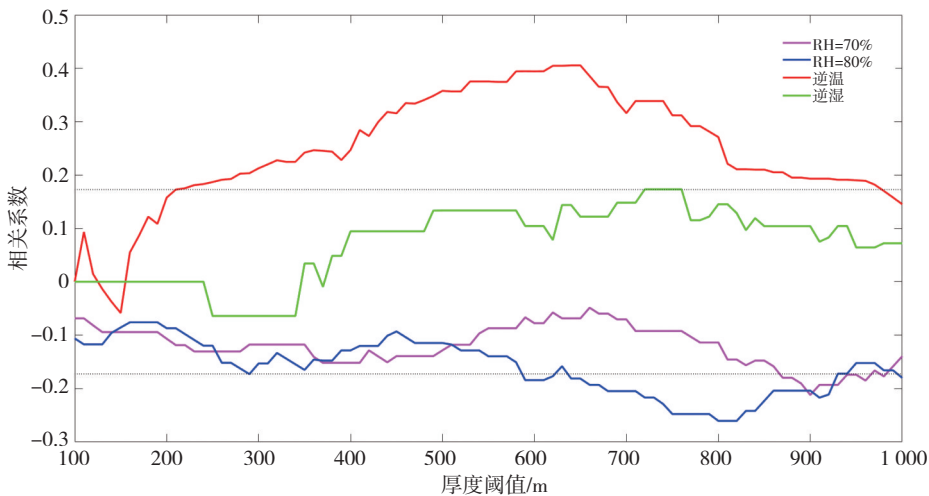


图2 晴天且厚度阈值从100 m变化到1 000 m时(步长10 m),逆温(红色曲线)、逆湿(绿色曲线)、70%相对湿度(紫色曲线)、80%相对湿度(蓝色曲线)的样本与误差样本的相关系数(黑色虚线为信度 $\alpha=0.02$ 临界相关系数曲线 $y=\pm 0.1726$ )

Fig.2 Correlation coefficient between sample of temperature inversion (red curve), humidity reverse (green curve), 70% relative humidity (purple curve), 80% relative humidity (blue curve) and error sample when the thickness thresholds change from 100 m to 1000 m (steps: 10 m) in clear sky (The black dotted line is critical correlation coefficient curve  $y=\pm 0.1726$  when confidence level  $\alpha=0.02$ )

空误差之间存在较好的正相关,逆温层厚度阈值为210~980 m的相关系数均能通过 $\alpha=0.02$ 的信度检验。从逆温层厚度阈值为150 m开始相关系数逐渐增大,是因为随着对逆温厚度取值的增加,过滤了很多探空上逆温厚度较小样本,逆温样本与误差样本的一致性增强,两者的相关系数增加;从650 m开始相关系数逐渐减小,并不能表示逆温层增厚误差反而减少,而是因为随着无线电探空仪逆温厚度取值的增大,逆温层厚度超过阈值出现概率减小,逆温厚度样本随之减少,其与误差样本的相关性变弱。最大相关系数0.40对应的逆温层厚度阈值为620~650 m,这说明当晴天时出现逆温层大于或等于650 m,微波辐射计探测误差超过3℃的可能性较大,这和前人的研究成果是一致的。如谢慧玲等(2018)的研究认为在不同天气背景下,微波辐射计温度和探空数据之间的相关系数均大于0.997,但对小逆温层的识别效果稍差;许皓皓等(2020)利用无人机探空观测和微波辐射计数据对比分析,认为微波辐射计对逆温层的表现能力有待提高。

逆温层对微波辐射计质量的影响可能和反演算法有关,目前我国使用的大部分地基微波辐射计使用的反演算法都是神经网络法(刘亚亚等,2010;张天虎等,2020;张雪芬等,2020)。它是利用已有的历史探空资料,通过微波辐射传输方程,计算出廓线对应的亮温来进行学习训练,需要构造经验正交函数并最终拟合出最佳神经网络系数,而在拟合算法的过程中,受探空廓线垂直分辨率和逆温层样本量的影响,逆温层的垂直结构特征较难拟合出来,因此拟合的神经网络系数并不能较好地反演逆温层垂直结构,这造成逆温层对微波辐射计的反演精度有较大的影响。

图3为研究要素厚度阈值为650 m时4个研究要素

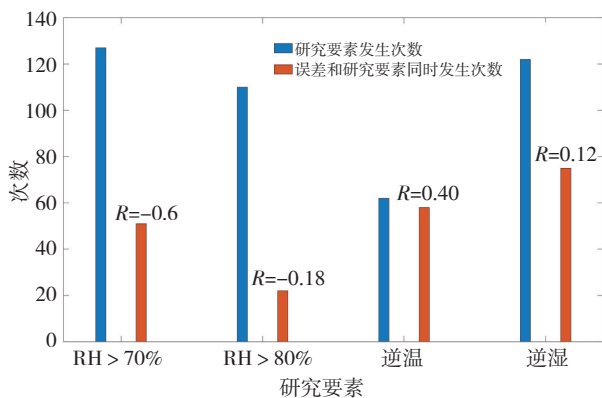


图3 4个研究要素厚度阈值为650 m时的发生次数及误差样本次数(R为二者的相关系数)

Fig.3 The number of occurrences of the four study elements with a thickness threshold of 650 m and their corresponding times with the bias samples, R is the correlation coefficient

素的样本与误差样本的对应图,晴天时误差样本共89次,RH阈值为70%发生的次数为127,两者对应(同一观测时间发生,下同)的次数为51,相关系数为-0.06;RH阈值为80%发生的次数为110,与误差样本对应的次数为22,相关系数为-0.18;逆温发生的次数为62,与误差样本对应的次数为47次,相关系数为0.40;逆湿发生次数为122,与误差样本对应的次数为75,相关系数为0.12。在650 m厚度阈值时,逆湿、RH阈值为70%不能通过 $\alpha=0.02$ 的信度检验,其余2个研究要素的相关系数能通过 $\alpha=0.02$ 的信度检验,由于RH阈值为80%的相关系数为负值,因此逆温在650 m这个厚度阈值的辨识度是较高的。当空气相对湿度大于70%且具有一定厚度时,晴天时天空虽然无云,但是空气中仍然存在较多的水分子能够吸收地面的长波辐射和大气热量,对逆温现象的发生有一定抑制作用。将相对湿度大于70%和80%且厚度大于650 m的样本和逆温样本求相关,其相关系数分别为-0.31、-0.23,结合逆温和误差有较好的正相关对应关系,表明了晴天无云状态下,相对湿度的增长有利于抑制微波辐射计的探测误差。

### 3.3 逆温强度和误差的相关性分析

除了用逆温的厚度来表达逆温外,逆温层中的逆温差和温度递减率也是表达逆温的有效方式。本文分别选取了逆温差和温度递减率的数值变化作为阈值来筛选样本,以此查看在100~1 000 m的逆温厚度中上述样本与误差样本的相关性,结果见图4。可以看到,随着逆温差取值的不同,有1条相关系数曲线明显好于其余曲线,其逆温差阈值是1.2℃,该曲线的相关系数大部分在0.3以上(图4a)。当逆温层厚度为140~270 m,逆温差阈值为1.2℃时相关系数为0.365。当逆温层厚度为320~1 000 m,逆温差阈值取1.4℃的曲线迅速靠近阈值取1.2℃的曲线,但前者的相关系数仍然小于后者。所有曲线中的最大相关系数出现在逆温差阈值为1.2℃且逆温层厚度为140~270 m时,这说明当逆温层厚度取140~270 m、逆温达1.2℃以上时,逆温和误差有最好的对应关系,随着逆温差增加,其相关系数下降,主要是由于更多的逆温样本被过滤所造成。当逆温差阈值大于1.8℃或者小于0.8℃时,相关系数均小于0.3。当温度递减率阈值取为每100 m温度上升1.3℃,逆温和误差有较好的相关系数,相关系数的变动范围为0.21~0.29,最大相关系数对应的逆温层厚度为180 m,以其余数值作为温度递减率阈值的逆温与误差的相关系数较小。

把逆温厚度、最大逆温差以及温度递减率的最优

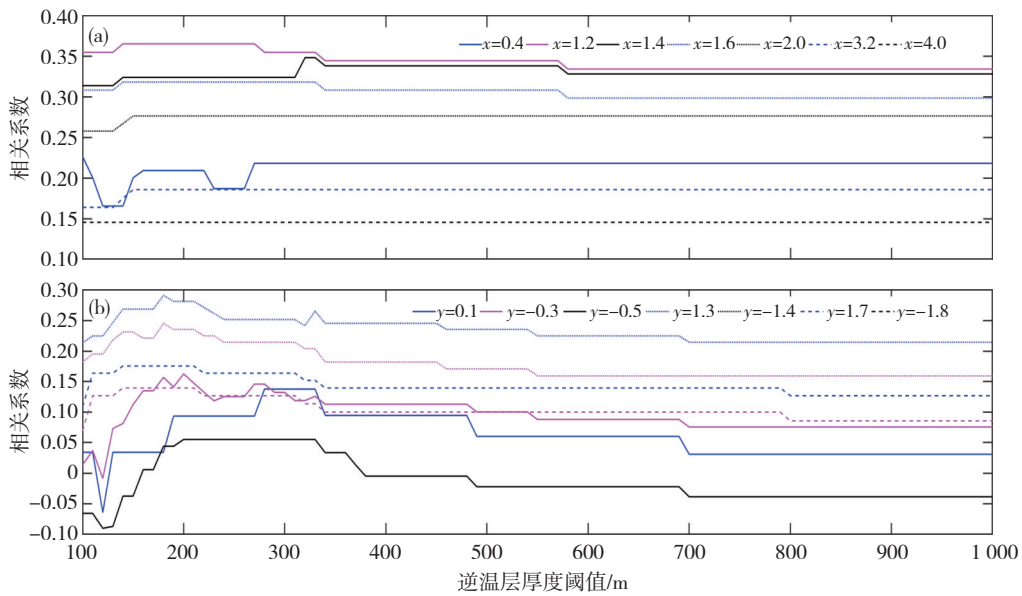


图4当逆温层厚度从100 m变化到1 000 m,逆温差 $x$  (a,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、温度递减率 $y$  (b,单位:  $^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{m})^{-1}$ )取不同阈值时与误差的相关系数(样本数为178,置信度 $\alpha=0.02$ 的临界相关系数为0.172 6)

Fig.4 Correlation coefficients of (a) inverse temperature difference (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and (b) temperature lapse rate (unit:  $^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{m})^{-1}$ ) which different thresholds are taken with errors ,and when thickness of inversion layer changed from 100 m to 1 000 m (The numbers of bias samples are 178, critical correlation coefficient is 0.172 6 when confidence  $\alpha=0.02$ )

曲线进行比较可知,逆温的3种表达方式中,逆温厚度在490~740 m时,逆温与误差的相关性较好,最大相关系数出现在逆温厚度为650 m;逆温厚度小于490 m或大于740 m时,逆温差阈值为1.2  $^{\circ}\text{C}$ 时的逆温和误差有最优的相关系数。

### 3.4 逆温层高度和误差高度分析

当逆温层厚度阈值为620~650 m时逆温和误差具有最大的相关系数,因此本节选取逆温层厚度为650 m的逆温样本及与其对应的误差样本来考查两者的高度变化,共得出47个逆温和误差对应样本。由表2可知,这些逆温样本的逆温层最小厚度为660 m,最大2 100 m,平均918 m,对应的误差样本的误差层最小厚度为7 m (1个观测点,其余观测点的误差小于2  $^{\circ}\text{C}$ ),最大厚度为6 300 m,平均厚度940 m。从逆温层和误差层的厚度可知,总体上误差层高度高于逆温层高度且误差层厚度大于逆温层厚度。所有样本中逆温顶高最小为1 890 m (图略),最大9 194 m,逆温顶高平均3 818 m;逆温底高最小为0 m (出现2次),最大为8 523 m,逆温底高平均2 900 m,逆温的平均高度为3 355 m;从平均逆温底高和顶高来看,此类逆温大部分发生在3 000~4 000 m附近。47次误差和逆温对应的晴空样本中有44个出现了接地的辐射逆温,占比93.6%,但由于辐射逆温的平均逆温厚度只有140 m,大于650 m厚度的辐射逆温只有2次,另外45个超过650 m厚度的逆温样本由其他类型的逆温贡献,这说明辐射逆温对本文研究误差的影响较小。

表2 逆温层阈值为650 m、微波辐射计探测误差大于3  $^{\circ}\text{C}$ 时的逆温和误差的高度及厚度统计

Table 2 Statistics about thickness and height of inversion layer and error layer when the inversion layer thresholds is 650 m and the detection bias of the microwave radiometer is greater than 3  $^{\circ}\text{C}$

统计量	厚度/m			高度/m
	最小值	最大值	平均值	
逆温	660	2 100	918	3 355
误差	7	6 300	940	4 917

图5为逆温层平均高度及温度误差大于3  $^{\circ}\text{C}$ 的平均离地高度,逆温层的平均离地高度和误差的平均离地高度分布较为发散,对二者进行直线拟合,拟合曲线方程 $y=0.19877x+3\ 321$ 的误差平方和为 $9.47\times 10^7$ ,多重测定系数R-square为0.001 8,均方根误差为1 442,说明逆温高度对误差高度的解释较差,不能由逆温发生的高度推测误差发生的高度。

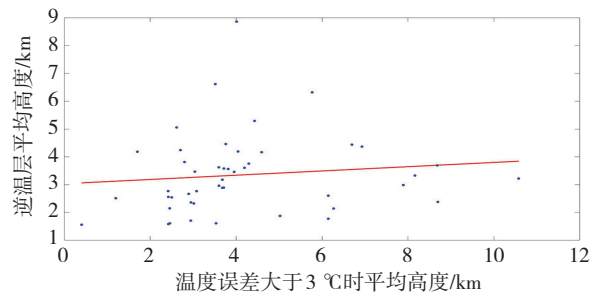


图5 逆温层平均高度和温度误差大于3  $^{\circ}\text{C}$ 时的平均高度分布以及二者的拟合曲线

Fig.5 The scatter of mean height of inversion layer and temperature error greater than 3  $^{\circ}\text{C}$  and their fitting curves (red line)

## 4 结论

本文利用2017年1月—2019年10月贵阳地基微波辐射计和无线电探空仪、地面观测数据,评估了微波辐射计在晴天时温度廓线的探测误差,结合误差大于3℃的探测样本和其余探空要素样本进行相关性分析,并统计分析了逆温层高度和误差高度的关系,得出如下结论:

(1) 微波辐射计探测数据在地面到10 000 m的垂直高度上春、夏、秋、冬的平均误差分别为-1.71~1.35℃、-1.69~0.78℃、-2.24~1.29℃、-4.98~1.49℃,误差的标准差分别为1.13~2.93℃、0.43~1.86℃、0.76~1.92℃、0.62~3.48℃,春季到秋季,误差的垂直变化趋势较为一致,冬季误差和误差的标准差均大于其余季节。

(2) 逆温、逆湿、70%和80%相对湿度4个研究要素中,逆温和误差有较好的相关系数;逆温厚度在490~740 m时,逆温和误差有最优的相关系数,最大相关系数0.4出现在逆温厚度为650 m;逆温厚度小于490 m或大于740 m时,逆温差阈值为1.2℃时与误差有最优的相关系数。

(3) 误差大于3℃的所有观测样本中,93.6%的样本出现辐射逆温(接地),而辐射逆温厚度大于650 m的样本只有2个,说明辐射逆温对此类误差的影响较小。平均逆温高度和平均误差高度的拟合度较差,说明逆温发生时误差发生的可能性大,但是不能由逆温发生的高度推测误差发生的高度。

## 参考文献:

- 车云飞,马舒庆,杨玲,等.2015.云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响[J].应用气象学报,26(2):193-202
- 苟阿宁,韩芳蓉,张文刚,等.2018.地基微波辐射计观测资料在一次雷电潜势预报中的应用分析[J].热带气象学报,34(2):268-278
- 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.2013.地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用[J].应用气象学报,24(5):576-584
- 黄治勇,周志敏,徐桂荣,等.2015.风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用[J].高原气象,34(1):269-278
- 刘建忠,何晖,张蕾.2012.不同时段地基微波辐射计反演产品评估[J].气象科技,40(3):332-339
- 刘思波,何文英,刘红燕,等.2015.地基微波辐射计探测大气边界层高度方法[J].应用气象学报,26(5):626-635
- 刘晓璐,刘东升,郭丽君,等.2019.国产MWP967KV型地基微波辐射计探测精度[J].应用气象学报,30(6):731-744
- 刘亚亚,毛节泰,刘钧,等.2010.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,29(6):1514-1523
- 茆佳佳,张雪芬,王志诚,等.2018.多型号地基微波辐射计亮温准确性对比[J].应用气象学报,29(6):86-98
- 齐琳琳,刘玉玲,赵思雄.2005.一次强降雨过程中对流参数对潜势预测影响的分析[J].大气科学,29(4):536-548
- 王振会,李青,楚艳丽,等.2014.地基微波辐射计工作环境对K波段亮温观测影响[J].应用气象学报,25(6):711-721
- 王志诚,张雪芬,茆佳佳,等.2018.不同天气条件下地基微波辐射计探测性能对比[J].应用气象学报,29(3):28-41

- 魏东,孙继松,雷蕾,等.2011.三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析[J].气象,37(4):412-422
- 谢慧玲,朱克云,张杰,等.2018.地基微波辐射计资料质量定量分析[J].云南大学学报(自然科学版),40(1):94-103
- 徐桂荣,张文刚,万霞,等.2019.地基微波辐射计反演的青藏高原东侧甘孜大气温湿廓线分析[J].暴雨灾害,38(3):238-248
- 许皓皓,张雪芬,黄思源,等.2020.地基微波辐射计与无人机探空观测对比分析[J].科技通报,36(1):48-53
- 张秋晨,王俊,李雪.2018.地基微波辐射计资料在对流云降水前的变化特征初探[J].高原气象,37(6):1578-1589
- 张天虎,鲍艳松,钱芝颖,等.2020.基于BP神经网络与遗传算法反演大气温湿廓线[J].热带气象学报,36(1):99-109
- 张文刚,徐桂荣,廖可文,等.2017.地基微波辐射计探测精度的变化特征分析[J].暴雨灾害,36(4):373-381
- 汪小康,徐桂荣,院琨.2016.不同强度降水发生前微波辐射计反演参数的差异分析[J].暴雨灾害,35(3):227-233
- 王叶红,赖安伟,赵玉春.2010.地基微波辐射计资料同化对一次特大暴雨过程影响的数值试验研究[J].暴雨灾害,29(3):201-207
- 王志诚,茆佳佳,等.2020.微波辐射计温湿廓线反演方法改进试验[J].应用气象学报,31(4):385-396
- 赵玲,马玉芬,张广兴,等.2009.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,3(5):54-57
- Caumont O, Cimini D, Lohnert U, et al. 2016. Assimilation of humidity and temperature observations retrieved from ground-based microwave radiometers into a convective-scale NWP model [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,142:2692-2704
- Ware R, Cimini D, Campos E, et al. 2013. Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics [J]. Atmospheric Research,132:278-290
- Solheim F, Godwin J. 1998. Passive ground-based remote sensing of atmospheric temperature, water vapor, and cloud liquid water profiles by a frequency synthesized microwave radiometer [J]. Meteorologische Zeitschrift,7(6):370-376
- Renju R, Raju C, Mathew N, et al. 2016. Tropical Convective Cloud Characterization Using Ground-Based Microwave Radiometric Observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,54(7):3774-3779
- Rodgers C D. 1976. Retrieval of Atmospheric Temperature and Composition from Remote Measurement of Thermal Radiation [J]. Rev Geophys, 14(4):609-624
- Crewell S, Ebell K, Lohnert U, et al. 2009. Can liquid water profiles be retrieved from passive microwave zenith observations [J]. Geophysical Research Letters,36(6):L06803.doi:10.1029/2008GL036934
- Solheim F, Godwin J R, Westwater E R, et al. 1998. Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods [J]. Radio Science,33(2):393-404
- Ware R, Cimini D, Herzegh P, et al. 2004. Ground-based Microwave Radiometer Measurements During Precipitation [C]. 8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry, Rome, Italy
- Ware R, Cimini D, Campos E, et al. 2017. Combining ground-based microwave radiometer and the AROME convective scale model through 1DVAR retrievals in complex terrain: an Alpine valley case study [J]. Atmospheric Measurement Techniques,10(9):3385-3402