

六盘山地形及相对湿度对微波辐射计反演气温的影响

邱玉珺¹, 舒志亮^{2, 3}, 陆春松¹, 林彤^{2, 3}, 党张利^{2, 3}

1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

2. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002;

3. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002

摘要: 利用 2018 年 4 月-2019 年 11 月的六盘山隆德站微波辐射计探测资料与平凉站探空资料, 研究了微波辐射计反演温度 (TM) 对空气相对湿度的敏感性, 首次提出湿度敏感性系数 (HSR) 和零度漂移度 (ZDD) 概念, 利用这两个参量在不同高度层的分布特征, 研究了六盘山地形对空气相对湿度和温度的影响, 主要结论如下: ①非降水天气条件下, 空气相对湿度越大, HSR 与 1.0 的差别越大, ZDD 也越大。②六盘山地形对气层湿度垂直分布影响较大。爬坡气流或抬升气流明显增加了 3km 以下气层湿度水平, 晴天和阴天条件下空气相对湿度分别在山顶以上 500m 气层和 1.0-2.0km 气层达到最大, TM 比实际温度最大能偏低 2.7℃。③地形对气层湿度的影响进一步影响了空气温度的垂直分布, 阴天条件下的大气逆辐射加热使得 3km 以下气层平均升温 2.3℃, 因湿度敏感性产生的温度影响平均达到 0.9℃, 最高能达到 1.7℃。

关键词 微波辐射计, 温度, 敏感性, 六盘山, 地形

文章编号 中图分类号 P426 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2206.22042

Effects of Liupan Mountain topography and humidity sensitivity of retrieved temperature by microwave radiometer

Qiu yujun¹, Shu zhiliang^{2, 3}, Lu chunsong¹, Lin tong^{2, 3}, Dang zhangli^{2, 3}

1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002

3. Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002

收稿日期 2022-02-25; 网络出版日期

作者简介 邱玉珺, 女, 教授, 主要从事大气探测与大气物理研究。Email: qyj@nuist.edu.cn

通讯作者 邱玉珺, Email: qyj@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(42075073, 42075077, 42175099), 宁夏自然科学基金(2022AAC03684)。

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42075073, 42075077, 42175099), Natural Science Foundation of Ningxiam (2022AAC03684).

Abstract: By using the data of microwave radiometer (MWR), placed at the foot of the Liupan Mountain at Longde station in the time period from April 2018 to November 2019, and the data of radiosonde at Pingliang station, the humidity sensitivity of retrieved temperature of MWR (TM) is studied. The humidity sensitivity rate (HSR) and the zero degree drift (ZDD) are proposed for the first time. Based on the distribution characteristics of HSR and ZDD at different altitude layers, the impact from the mountain terrain on layer humidity and temperature is studied. It shows that, ① under non-precipitation conditions, the wetter the air, the larger the difference between HSR and 1.0, and the greater the value of ZDD. ② The terrain has a great impact on the vertical distribution of layer humidity. The climbing air flow or uplift air flow increases the humidity level of layers below 3km significantly. The air humidity reaches the maximum at the layer of 500m above the top of the mountain under clear days and at the layer of 1.0-2.0km above the top of the mountain under the cloudy days respectively. The difference between TM and the station actual temperature reaches maximum by 2.7 °C. ③ The terrain affects the vertical distribution of the layer humidity and then affects the layer temperature. The downward atmospheric radiation under the cloudy days heats the lower layer and makes the average temperature of the layers below 3 km rise by 2.3 °C, and the temperature caused by humidity sensitivity reaches 0.9 °C, up to 1.7 °C.

Keywords: Microwave radiometer; Temperature; Sensitivity; Liupanshan; Terrain

1. 引言

微波辐射计(MWR) 是探测空气温度和湿度垂直廓线的重要仪器 (Knupp 等, 2009; Candlish 等, 2012; Bianco 等, 2017), 探测资料可以用来研究大气分层、云的形成和演变过程以及各种不同的天气和气候特征(Güldner 和 Spänkuch, 2001; Hewison, 2007; 赵兵科等, 2009; Chan, 2009; Cimini 等, 2011; Madhulatha 等, 2013; Ware 等, 2013), 因此在国内(周珺等, 2008; 刘红燕等, 2009; 王振会等, 2014; 郭丽君和郭学良, 2015; Xu 等, 2015; Che 等, 2016) 和国外的一些国家得到广泛使用(如, Löhnert 等, 2004; Spänkuch 等, 2011; Löhnert 等, 2012; Cadeddu 等, 2013; Venkat Ratnam 等, 2013; Ware 等, 2013)。

MWR 测量不同辐射频率下的大气亮温 T_B , 再根据辐射传输方程从 T_B 进一步反演可得到 10km 以下气层的温度廓线、空气湿度廓线和液态水含量, 方程中的权重函数由探测通道上氧气或水汽在垂直高度层的吸收特征确定, 因不同波长探测通道权重函数垂直宽度较大、覆盖程度高,

[在此处键入]

提供的信息不完全独立，所以反演出的温度和湿度廓线与实际大气不完全一致。此外，TB 测量值也受实际空气温度、相对湿度和水物质含量的共同影响，因此 MWR 反演温度 (TM) 的精度在不同地区不同高度气层有很大差别。如，Güldner 和 Spänkuch (2001) 指出 TM 反演精度是高度的函数，TM 与探空温度 (TR) 的标准偏差从边界层的 0.7 K 增加到 7km 的 1.6 K。Hewison(2007) 研究也指出，TM 在近地面的反演精度为 0.6，随高度增加，3.3km 精度为 1.5K。Liljegren 等(2005) 的研究指出边界层 TM 与探空温度 TR 相差 1K，在对流层中层相差 2 K，整个气层 TM 的系统误差达到 1 K。刘红燕（2011）对北京南郊观象台 3 年的地基微波辐射计反演温度与探空温度对比发现，二者在 0.1km 高度处的偏差最小为 1.2K，偏差随高度上升而增加，10km 处的偏差最大为 4.5K。Löhnert 和 Maier (2012) 评价了 Payerne 站点 HATPRO 型号微波辐射计反演温度廓线的可靠性和准确性，指出 TM 与 TR 的差别在边界层低层低于 0.5 K，4km 高度层增加到 1.7 K。Yan 等（2020）研究指出，利用归一化和神经网络方法能显著提高 TM 的准确性，但其平方根误差仍然达到 1.70K。

利用亮温 T_B 反演气层温度廓线时，因微波辐射计各通道 T_B 在阴天条件下受云的发射作用而升高，其升高幅度与云液态水含量、云与观测高度的距离及云厚有关（王婉等，2021），因此 TM 在阴天或降水天气下的准确性较差（刘红燕，2011；Navas-Guzmán 等，2014；Xu 等，2014；郭丽君和郭学良，2015；王婉等，2021）。如，刘红燕（2011）对比北京观象台地基微波辐射计反演温度与探空温度研究中指出，二者在晴天的差异在 3.25km 以下比阴天无降水日小。郭丽君和郭学良（2015）对华北地区 11 个雾天气过程的微波辐射计反演温度与探空温度对比发现，前者比后者偏低约 3°C。

以上研究显示 TM 反演精度随着不同场景有较大变化。对于高原山地，因其容易触发对流而成为云量高值区（Sumargo and Cayan, 2017; 张沛等，2020），TM 反演精度更加需要关注。本论文研究区为六盘山地区，处于青藏高原与黄土高原的交汇地带，山脊海拔最高达 2942m，张沛等（2020）对该地区夏季空中水资源特征研究指出，该地区云水路径和云光学厚度均明显大于周边地区，是相对湿度高值区。为了理清该地区 TM 与空气相对湿度之间的关联，本文对比分析了六盘山脚下气象站 TM 与平原地区探空站 TR，得到 TM 对不同空气相对湿度条件的敏感性特征，以及六盘山地形对气层湿度和温度垂直分布的影响。本文研究方法可用于微波辐射计资料质量控制，研究结果可加深对六盘山区温度和湿度环境的认识。

2. 观测站点与资料

2.1 观测站点

[在此处键入]

本文使用的 MWR 是 PG 公司生产的 RPG-HATPPRO 廓线型地基微波辐射计, 放置在隆德气象站 (35.37 °N, 106.07 °E, 2078 m), 该站点位于宁夏回族自治区六盘山西坡山脚。六盘山海拔 2078m, 位于我国西北地区中南部, 是为数不多的西北和东南走向的狭长山地 (南北方向夹角约 30°), 最高峰海拔 2942 m。

探空资料来自平原地区的平凉气象站(35.55 °N, 106.67 °E, 1468 m)。该气象站距离隆德气象站 49 km, 这两个站的位置关系类似于 Sánchez 等 (2013)研究中所选取的站点, 尽管选取的两个站点位置有很大的差别, 二者对比效果较好。

2.2 资料

本文所使用的资料包括利用神经网络算法反演的 MWR 温度和湿度廓线资料, 探空温度和湿度资料, 时间从 2018 年 4 月 23 日-2019 年 11 月 30 日。RPG-HATPRO 包括 21 个 22 至 30 GHz 的 K 波段频率通道和 21 个 51 至 59 GHz 的 V 波段通道。MWR 每半年用液氮校准一次, 亮温(T_B)的绝对精度为 0.5K。时间分辨率为 1 分钟, 0-10km 的垂直气层分 93 层。

TR 来自 L 波段数字探空仪, 时间分辨率为 1s, 该资料已通过了站点资料质量控制, 装载探空仪的探空气球要求 30 分钟内从地面飞行到 10km 高度层, 每天在世界时 11:15 和 23:15 释放 2 次。本文按照气球探测时间和飞行高度, 将 TR 资料同化到相同时段 TM 的探测高度层。

为了研究 TM 对空气相对湿度环境的敏感性, 对 TM 和 TR 进行了湿度分类, 5 个相对湿度类型对应的范围分别为 0-30%、30-50%、50-70%、70-85% 和 85-100%。参考已有的研究(Wang et al., 1995; 车云飞等, 2015; Chen et al., 2016), 将相对湿度大于等于 85%的非降水资料确定为阴天条件。5个绝对湿度类型对应的范围分别为0-0.5 g/m³、0.5-2 g/m³、2-4 g/m³、4-6 g/m³和 6-25 g/m³。

MWR 有降水传感器, 可以区分降水和非降水条件, 本文使用的资料中剔除了所有标记有降水的资料。另外, 为了研究方便, 把 MWR 所在的隆德站地面高度作为 0km, 因考虑到 100m 高度层内的 TM 受地面建筑物以及其他干扰较大, 所以我们只选取 0.1-10km 的资料进行分析。

此外, 为了分析六盘山地形对气温和相对湿度的影响, 本文还使用了分别位于六盘山山底、下坡、上坡和山顶的四个地面气象梯度观测站的气象观测资料, 四个观测站经纬度和海拔高度见表 1。资料时间从 2019.9-2020.9。

表 1 六盘山山坡不同高度处的 4 个地面气象梯度观测站经纬度和海拔高度

Table 1 Longitude, latitude and altitude of four surface meteorological gradient observation stations at different heights on the hillside of Liupan Mountain

站名	经度(E, 度)	纬度(N, 度)	海拔 (m)
S1	106.1	35.6	2223

[在此处键入]

S2	106.2	35.7	2317
S3	106.2	35.7	2600
S4	106.2	35.7	2842

3. 结果与分析

3.1 TM 和 TR 在整个气层中的对比

因本文使用的隆德站微波辐射计反演温度 TM 时，使用的神经网络模型输入层和隐含层各节点的系数由平凉探空站近 10 年的历史探空数据进行训练得到，所以论文中把平凉站的探空温度 TR 作为标准温度与 TM 进行对比。在同一空气相对湿度环境下，两种温度 TM 与 TR 的差别主要与微波辐射计探测信号的湿度敏感性有关。在局地热平衡情况下，微波辐射计观测的气层辐射亮温 T_B 由气层温度和透过率决定，由 T_B 反演的 TM 准确性主要受水汽对辐射衰减的不确定性所致 (Chan et al., 2009)，对流层中水汽随时间和空间具有高度的可变性，不同含量的水汽对探测信号衰减的程度也不同。对 0.1-10km 整个气层中 TM 和 TR 的对比发现，TM 与 TR 在 5 种相对湿度条件下都具有显著的线性相关性 (见图 1)，但 TM 与 TR 的线性关系在不同相对湿度条件下有明显差别。

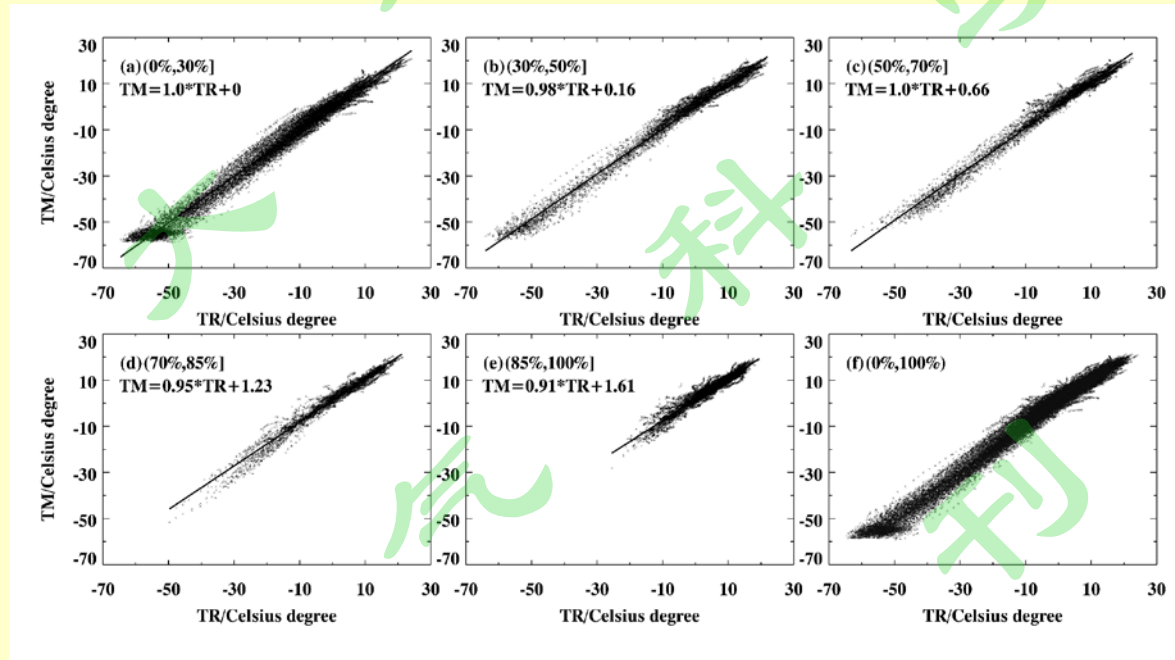


图 1 微波辐射计反演温度 TM 与探空温度 TR 在 0.1-10km 气层内不同相对湿度条件下的对比，(a) 0 - 30 %，(b) 30 - 50 %，(c) 50 - 70 %，(d) 70 - 85 %，(e) 85 - 100 %，(f) 0 - 100 %。

Fig.1 Comparisons between the temperature of radiosonde (TR) and the temperature of microwave radiometer (TM) in the different ranges of relative humidity: (a) 0 - 30 %, (b) 30 - 50 %, (c) 50 - 70 %, (d) 70 - 85 %, (e) 85 - 100 %, (f) 0 - 100 %.

[在此处键入]

由图 1 中 TM 和 TR 的线性关系, 得到 TM 和 TR 满足公式 (1),

$$TM = TR \times a + b, \quad (1)$$

公式 (1) 中, 系数 a 表示了 TM 随 TR 的相对变化率, 也就是说, 当 TR 变化 1°C 时, TM 的响应温度为 a °C。理论上讲, 气层湿度越小、水汽含量越少, 微波辐射计探测信号被衰减的越少, 这时 TM 随 TR 的变化率 a 接近 1.0 (一般把探空温度作为气层的实际温度); 反之, 气层湿度越大、水汽含量越多, 对探测信号的衰减越多, 则 a 值越偏离 1.0。TM 与 TR 的这种响应关系从图 1 中的拟合系数 a 得到印证, 空气最干燥的条件下 (相对湿度小于 30%), a 值为 1, 晴天条件下的 a 值平均达到 0.98, 而阴天条件下的 a 值只有 0.91。系数 a 与气层湿度条件密切相关, 这里称为湿度敏感性系数(HSR), HSR 与 1.0 的差别越小, 表示空气越干燥, TM 受到的湿度敏感性影响也越小。

此外, 由公式 (1) 得到, 当探空温度 TR 为 0°C 时, TM 为 b °C, 如果 b 值为 0, 则 TM 也为 0°C, 意味着 TM 与 TR 的 0°C 层温差为 0°C。如果 b 值不为 0, 意味着 TR 为 0°C 时 TM 与 TR 之间存在温度差, 这里称为零度漂移度(ZDD)。图 1 显示, 空气最干燥的条件下(相对湿度小于 30%), b 值为 0, 再结合此时 a 值为 1 的条件, 说明在不受空气相对湿度影响的条件下, TM 与 TR 相等, 这也印证了论文把 TR 作为标准温度与 TM 进行对比的合理性。另一方面, 从表 2 中看到, TR 均值随气层相对湿度数值增大而升高, 相应的 ZDD 也逐渐增大。由辐射传输方程得到, 空气越湿润, 大气逆辐射越强, 气层被加热越明显, 探测信号被衰减的也越多, 因此产生的 ZDD 数值也越大。从表 1 中看到, 晴天条件下 ZDD 低于 1°C, 阴天条件下 ZDD 比最干燥的晴天条件下高出 1.6 °C。也就是说, 空气越湿润, TM 与 TR 之间的相对温度差别越大。

表 2 不同相对湿度条件下 0.1-10km 气层的探空温度 TR、湿度敏感性系数 HSR、零度漂移度 ZDD 和微波辐射计反演温度 TM 的湿度敏感性误差 E_R

Table 2 Average values of temperature of radiosonde (TR), HSR, ZDD, ΔT and E_R in the relative humidity ranges of 0 - 30 %, 30 - 50 %, 50 - 70 %, 70 - 85 %, and 85 - 100 % in the atmospheric layer from 0.1 km to 10 km.

	相对湿度				
	0-30%	30-50%	50-70%	70-85%	85-100%
TR(°C)	-15.3	-15.2	-13.4	-9.6	-6.4

TM(°C)	-14.4	-13.9	-12.2	-8.1	-5.2
HSR	1.0	0.98	1.0	0.95	0.91
ZDD(°C)	0.0	0.16	0.66	1.23	1.61
ΔT(°C)	0.0	0.16	0.66	1.29	1.77
E _R (°C)	0.00	0.30	0.00	0.42	0.42

注：表 1 中的 ΔT 是消除 TM 中湿度敏感性影响后的两站温差。E_R 是用公式 (1) 中的 TM 计算得到。

另一方面，假设空气中水汽含量极少，对 TM 几乎没有什么影响，这时 a 值取 1.0，公式 (1) 变为公式 (2)，

$$TM = TR + \Delta T, \quad (2)$$

也就是说，没有湿度敏感性影响的情况下，TM 对 TR 变化 1°C 的响应温度是 1°C，ΔT 表示微波辐射计观测站与探空观测站点之间的温差。

公式 (1) 还可变形写为公式 (3)，

$$TM/a = TR + b/a, \quad (3)$$

公式 (3) 中 TM/a 对 TR 变化 1°C 的响应温度也是 1°C，也就是说，TM/a 是消除湿度敏感性影响后的温度。对比公式 (3) 和公式 (2) 发现，公式 (3) 中的 b/a 与 ΔT 对应。从表 2 看到，相对湿度小于 70% 时，ΔT 与 ZDD 数值近乎相等，此时 ΔT 中的湿度敏感性影响可以忽略。此外，ΔT 随相对湿度增加而增大，主要是因干燥空气比湿润空气热传导更迅速、空气混合更均匀，从而使环境温度差别更小；另外，湿润空气的大气逆辐射更强，加热气层使其升温更明显，也会影响 ΔT。整层大气平均而言，阴天条件下的 ΔT 达到 1.8°C，晴天条件下，随着相对湿度的增加，ΔT 从 0°C 增加到 1.3°C。

由公式 (3) 得到消除湿度敏感性影响的微波辐射计站点温度为 TR + ΔT，如果用 E_R 表示 TM 偏离站点温度的程度，则 E_R 可表示为公式 (4)，

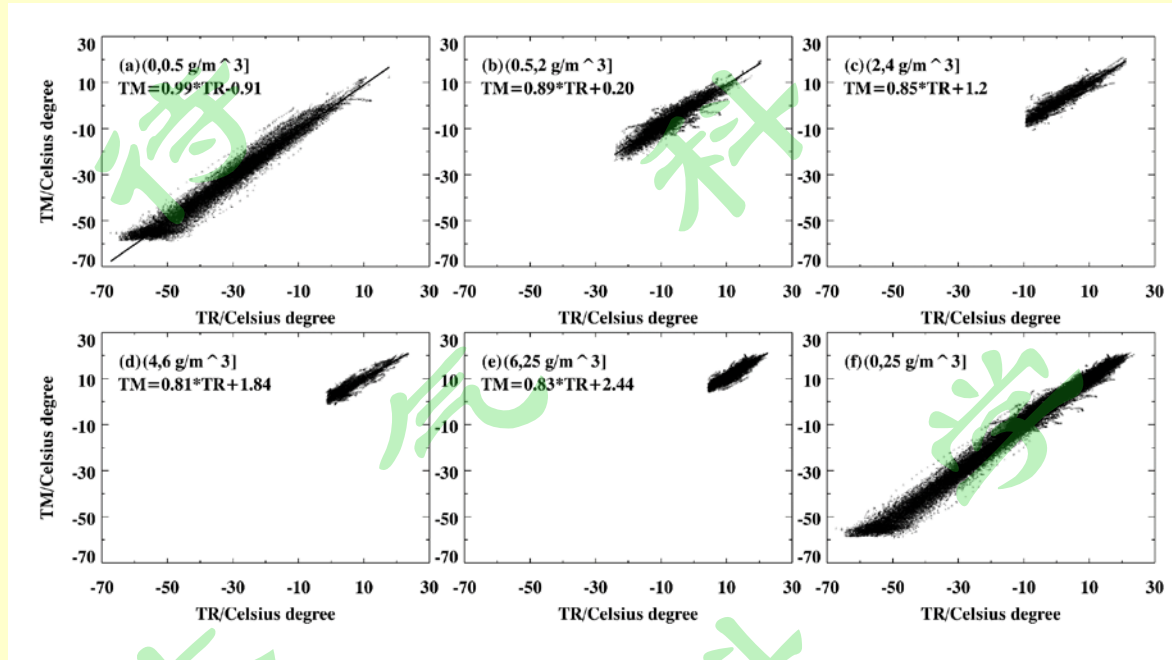
$$E_R = TM - (TR + \Delta T), \quad (4)$$

公式 (4) 中的 E_R 与 TM 的湿度敏感性有关，这里称为湿度敏感性误差。E_R 为 0°C 表示 TM 不受湿度敏感性影响，E_R 为正值表示湿度敏感性使得 TM 偏高于实际温度，E_R 为负值表示 TM 偏低于是实际温度。从表 2 中看到，在空气相对湿度较低、HSR 接近于 1.0 的条件下，E_R 接近于 0°C，表示湿度敏感性对 TM 几乎没有影响。相对湿度大于 70%、HSR 较小、湿度敏感性较强时，E_R 越偏离 0°C。晴天和阴天条件下的 E_R 均值大于 0°C，说明整层大气平均而言湿度敏感性使得 TM

[在此处键入]

180 偏高于实际温度，需要强调的是，这个平均值只说明了整层大气的一个平均水平。

181 对不同绝对湿度范围下的 TM 与 TR 进行对比分析，发现 TM 与 TR 仍然具有显著的线性关
182 系 (见图 2)。但是，因绝对湿度较大值主要集中在低层大气，导致高层大气在高湿度条件下的样
183 本量过少，这将影响 TM 与 TR 的拟合效果。与之不同的是，按照相对湿度标准选取的样本量保
184 证了不同高度气层在不同湿度条件下的样本量，因此下面的分析中，我们采用相对湿度标准对气
185 层湿度水平进行分类。



186
187 图2 微波辐射计反演温度 TM 与探空温度 TR 在 0.1-10km 气层内在不同绝对湿度条件下的对比，
188 (a) 0 - 0.5 g/m³, (b) 0.5 - 2 g/m³, (c) 2 - 4 g/m³, (d) 4 - 6 g/m³, (e) 6 - 25 g/m³, (f) 0 - 25 g/m³.

189 Fig.2 Comparisons between the temperature of radiosonde (TR) and the temperature of microwave
190 radiometer (TM) in the different ranges of absolute humidity, (a) 0 - 0.5 g/m³, (b) 0.5 - 2 g/m³, (c) 2 - 4
191 g/m³, (d) 4 - 6 g/m³, (e) 6 - 25 g/m³, (f) 0 - 25 g/m³.

193 3.2 不同高度层 TM 和 TR 的对比

194 对流层空气温度和湿度随高度上升变化较大，为了检查 HSR 是否也随着高度发生变化，我们
195 把 10km 以下气层按照 500m 的厚度进行分层。从图 3 中看到，阴天条件下 6km 以上气层的样本
196 量少于 10。与之不同的是，晴天条件下每个气层的样本量都大于 670，保证了 HSR 和 ZDD 的拟
197 合效果，所以我们首先对晴天条件下 20 个气层的 TM 和 TR 进行了对比分析。

[在此处键入]

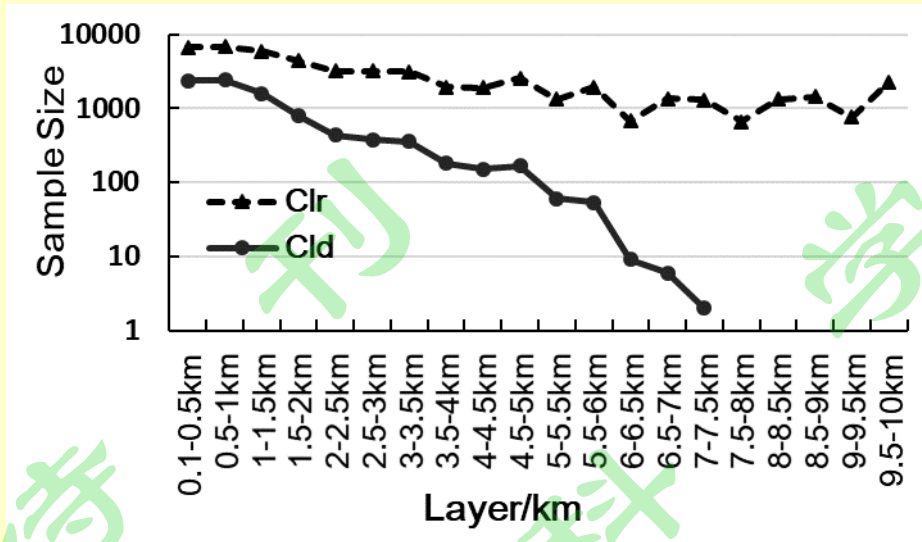


图3 晴天和阴天条件下选取的不同高度层的样本量

Fig.3 The sample sizes at different layers under clear days and the cloudy days.

3.2.1 TM 的湿度敏感性

对比晴天条件下 20 个气层的 TR 和 TM 发现，二者在每个气层都具有显著的线性相关性（见图 4），为了更加清楚的显示图 4 中每层拟合出的 HSR 和 ZDD，用图 5（a）展示了 HSR 和 ZDD 随高度层的分布特征。

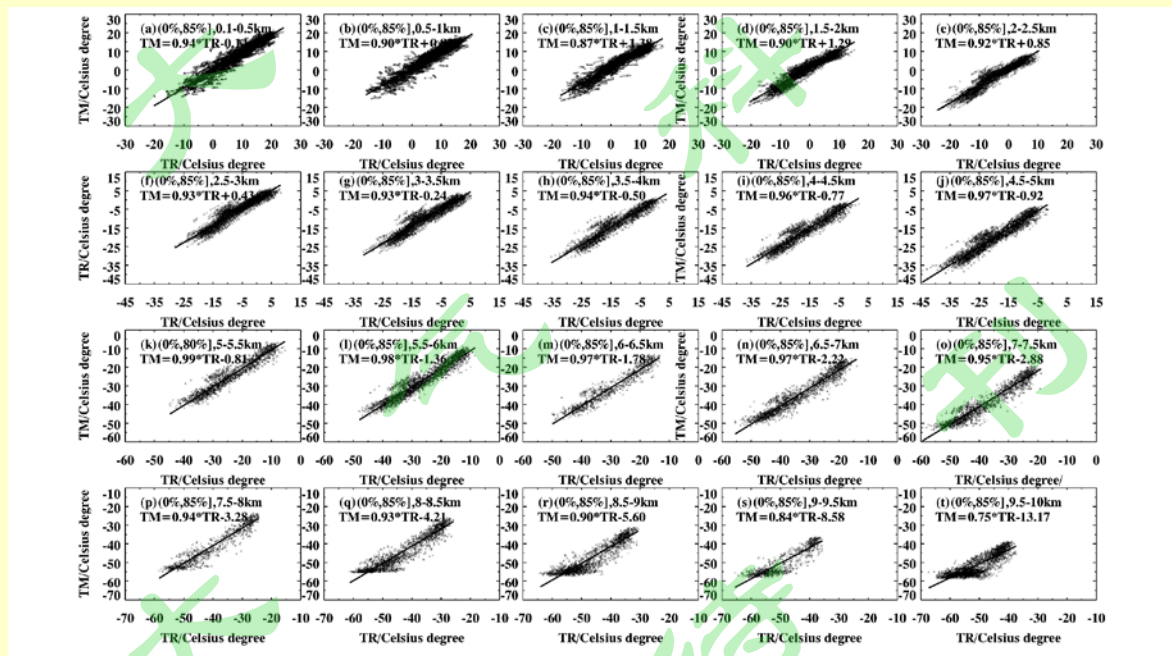


图4 微波辐射计反演温度 TM 和探空温度 TR 在晴天条件下（相对湿度小于 85%）在 20 个气层上的对比，第一层 0.1-0.5 km，其他气层厚度之间间隔为 500m

Fig.4 Comparisons between the temperature of radiosonde (TR) and the temperature of microwave

[在此处键入]

radiometer (TM) at 20 layers on clear days. The first layer is 0.1-0.5 km and the interval of other layers is 0.5 km.

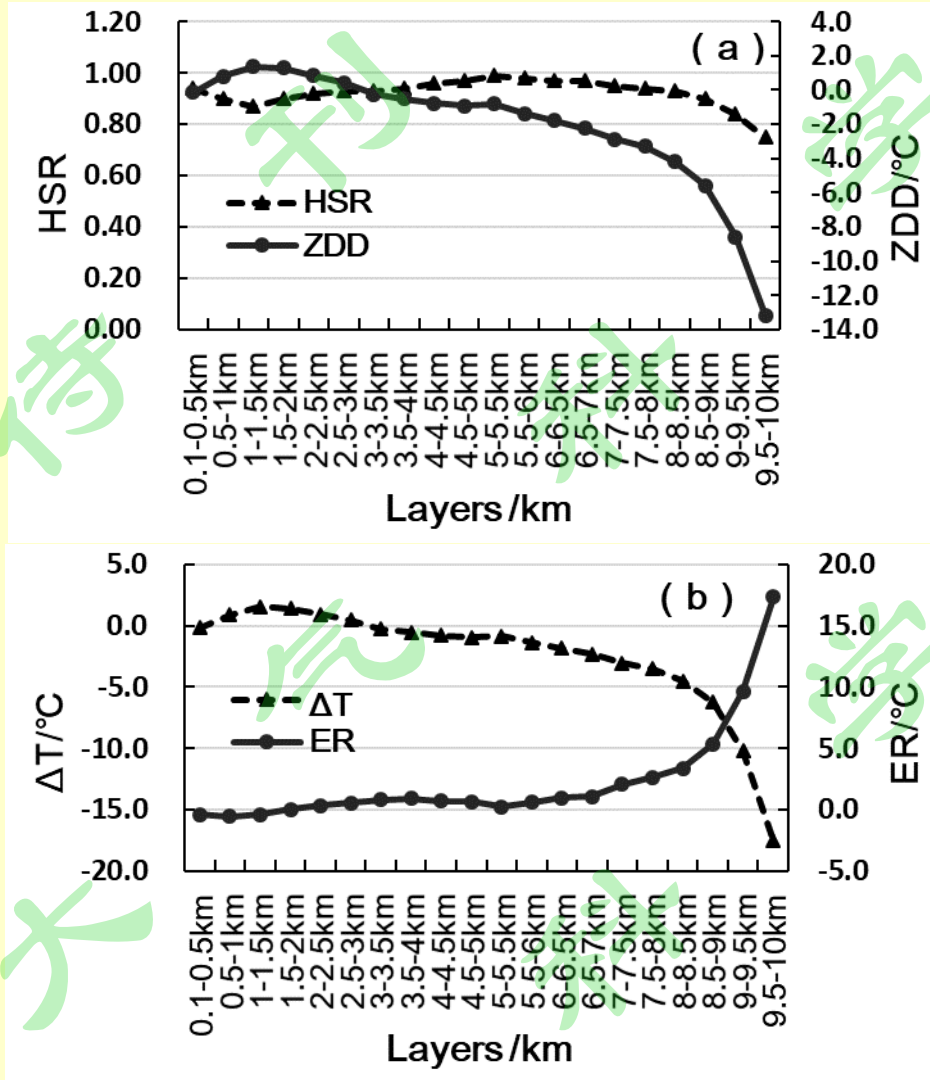


图 5 (a) 湿度敏感性系数 HSR 与零度漂移度 ZDD 在不同高度层的分布; (b) 微波辐射计站点与探空站点温度差 ΔT 和微波辐射计温度 TM 的湿度敏感性误差 E_R

Fig.5 (a) The distribution of HSR and ZDD at different layers; (b) The temperature difference (ΔT) between the stations of radiosonde and microwave radiometer, and the humidity sensitivity error E_R of the retrieved temperature of microwave radiometer (TM).

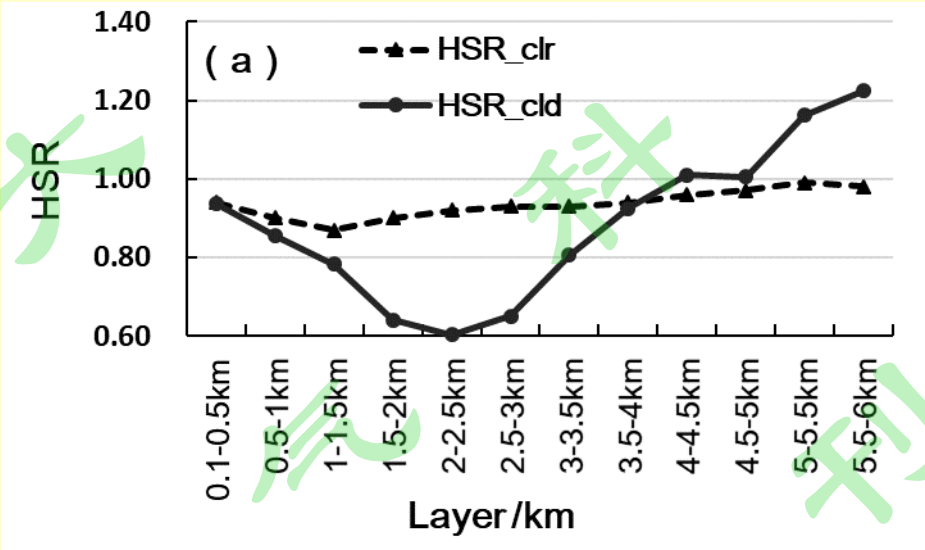
晴天条件下的 HSR 随高度层波段较大, 从 0.75 变化到 0.99, 说明不同高度气层的湿度环境差异较大。一般的, 对流层中下层的湿度水平高于对流层高层, 对应到 HSR, 则有中下层 HSR 小于高层。但从图 5 (a) 看到, 6km 以上气层 HSR 反而随着高度上升而减小。这种现象可能与 TR 在高空探测的不确定性有关, 许多学者指出 TR 在高空有明显的漂移(Gaffen, 1994; Lanzante

[在此处键入]

224 等, 2003; Xu 等, 2015), 温度准确性是高度的函数(Güldner 和 Spänkuch, 2001; Liljegren 等, 2005;
225 Löhnert 和 Maier, 2012)。这也可能是 TM 和 TR 样本量随高度上升迅速减少的主要原因, TR 同
226 化到 TM 的观测高度时, 在高空缺少有效数据。因此我们把注意力集中在 6km 以下的气层。

227 6km 以下气层内的 HSR 随高度上升呈现 U 型分布, 从山底上升到山顶气层 HSR 逐渐减小,
228 意味着空气相对湿度逐渐增加, 这与低层水汽顺着山坡向上层大气输送有关。如果向上输送气流
229 具有足够的动力条件支撑, 爬到山顶的气流将继续向高层输送, 否则将在山的另一侧下沉, 因此
230 山顶所在气层成为空气相对湿度变化的一个分水岭。晴天条件下, 山顶所在气层的 HSR 达到最
231 小值, 仅是山底气层的 0.9 倍, 说明山顶以上 500m 内气层湿度达到最大。邓沛云等(2021)利
232 用六盘山 30 年地面降水资料分析指出, 山顶站点降水量高于其他站点, 平均降水量从山底站点
233 到山顶站点呈现增加趋势, 这与 HSR 反映出的空气相对湿度从山底到山顶气层的变化趋势结果
234 一致。

235 为了调查湿度条件对 TM 的影响, 我们对比了晴天和阴天条件下的 HSR。需要说明的是, 阴
236 天条件下的样本量在 6km 以上气层都少于 10 个, 为了保证拟合效果, 我们只对比晴天和阴天条
237 件下 6km 以下气层的 HSR (见图 6)。



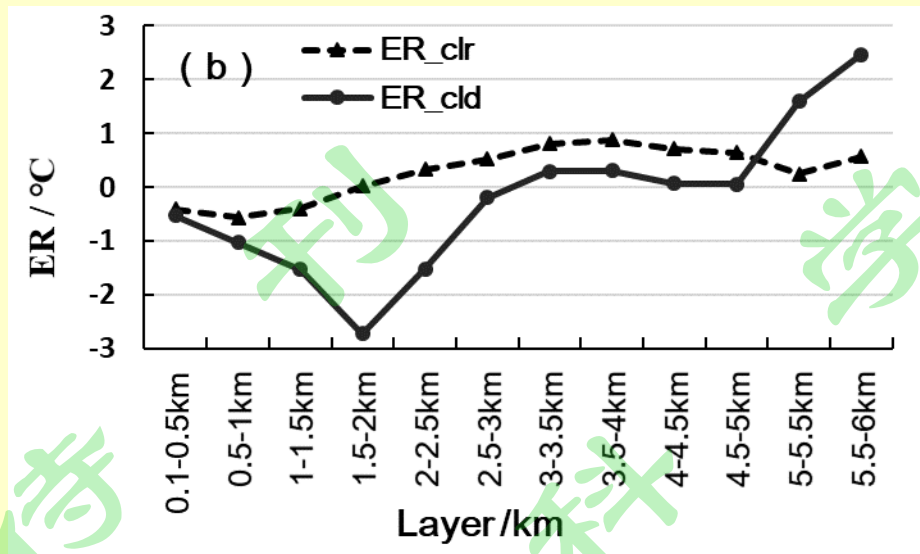


图 6 晴天和阴天条件下的 (a) 湿度敏感性系数 HSR 的对比 (b) 湿度敏感性误差 E_R 的对比

Fig.6 Comparisons of (a) HSR, (b) humidity sensitivity error E_R at different layers under clear days and the cloudy days.

由图 6 显示, 阴天条件下的 HSR 随高度上升也具有 U 型分布特征, 其波动幅度明显大于晴天条件。平均而言, 阴天条件下的 HSR 仅是晴天条件下的 0.80 倍, 最小值只有 0.6, 意味着 TM 对气层实际温度变化 1°C 的反馈只有 0.6°C 。晴天和阴天 HSR 在不同高度层的差异主要与低层爬坡气流或受阻气流被山地抬升过程有关, 低层暖湿气流随着高度上升增加了上层空气相对湿度, 当水汽被输送到抬升凝结高度时达到饱和并将形成雾或云。山地地形使得气层湿度和云量远高于周边环境 (张沛等, 2020), 山脉的坡度、上升气流、风速等要素都将影响空气湿度分布 (Yu 和 Cheng, 2008; Yu 和 Cheng, 2014; Shige 和 Kummerow, 2016; Yamamoto 等, 2017)。

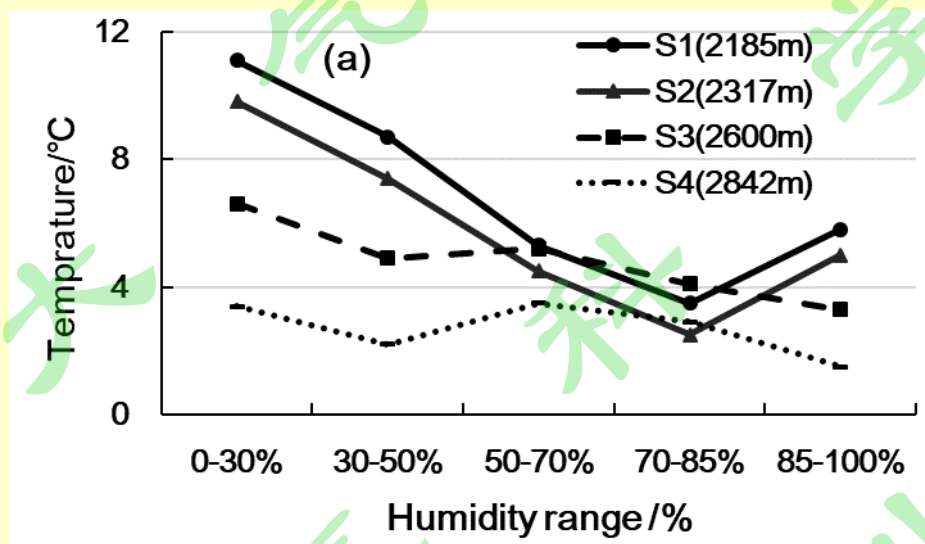
阴天条件下 HSR 最小值出现在 2.0-3.0 km 的气层, 而晴天条件下则出现在 1.0-1.5km 气层。也就是说, 阴天和晴天条件下的空气分别在 2-3km 和山顶以上 500m 气层达到最湿。张沛等 (2020) 研究指出, 宁夏北部和中部地区低层水汽主要来源于西北风输送, 南部地区水汽主要为西南风输送, 产生低层辐合高空辐散的动力场。但在 500hPa 及以上高度的水汽均为西风纬向输送, 说明地形对水汽输送的影响主要集中在 5.5km 以下高度层 (对应站点高度为 3.5km)。

图 6 (b) 显示, E_R 随气层高度的变化趋势与 HSR 相似, 也就是说, 气层湿度越大, TM 的偏差越大。晴天条件下山顶以下 3 个气层 E_R 都为负值 (图 6b), 暗示着 TM 偏低于气层实际温度。反之, 山顶以上气层 E_R 都为正值, 说明 TM 偏高于气层实际温度。阴天条件下 E_R 负值主要出现在 3.0 km 以下气层, 该气层内 TM 最高比气层实际温度偏低 2.7°C , 平均偏低度数是晴天条件下的近 3 倍。3km 以下高度层 TM 偏低于气层实际温度的这种分布特征与 3.1 中整层大气的平均分 [在此处键入]

布特征正好相反,说明整层大气的 ER 均值主要体现了 3km 以上高度层 TM 偏高于气层实际温度的特征。

3.2.2 地形对温度的影响

六盘山山体近似南北走向,坡向以西南为主,由南到北气候从半湿润区、半干旱区过渡到干旱区。一般平均而言,区域气温在对流层内随高度上升而降低。对比六盘山山底站点(S1)、下坡站点(S2)、上坡站点(S3)和山顶站点(S4)在不同相对湿度条件下的平均气温(见图 7(a)),在相对湿度小于 50%的晴天条件下,四个站点平均气温随高度上升而降低,但在相对湿度大于 50%、小于 85%的条件下,气温却没有这种分布规律。另一方面,对比各站点在不同相对湿度范围内的出现频率发现,50%-85%范围内的相对湿度出现频率从 S1 到 S4 随高度上升呈减少趋势(分别为 49.2%、44.4%、37.5%、32.3%),而在 85%-100%范围内的相对湿度出现频率却随高度上升呈增加趋势(分别为 23.1%、31.3%、29.7%、39.8%),气温和相对湿度的这种分布特征显然与六盘山地形影响有关。



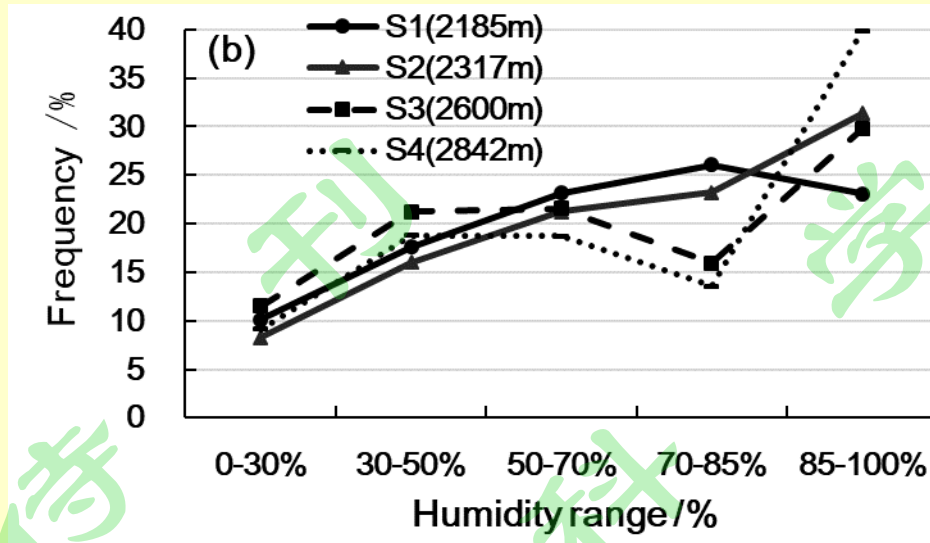


图 7 六盘山山底站点 (S1)、下坡站点 (S2)、上坡站点 (S3) 和山顶站点 (S4) 在不同相对湿度条件下的 (a) 温度, (b) 相对湿度出现频率

Fig.7 The occurrence frequency of (a) temperature and (b) relative humidity of Liupan mountain at the bottom station (S1), downhill station (S2), uphill station (S3) and mountaintop station (S4) under different relative humidity conditions

为了进一步考察地形对气温和相对湿度的影响,图 8 对比分析了晴天和阴天条件下 6km 以下高度层的 ZDD 和 ΔT 。图 8 显示, ZDD 和 ΔT 在 6.0 km 以下气层随高度层的变化趋势正好与 HSR 的变化趋势相反,意味着气层湿度越大,两站的温度差别越大,阴天条件下各层的 ZDD 和 ΔT 都高于晴天条件。王婉等 (2021) 研究指出,云的热发射作用使辐射计各通道亮温都升高,亮温升高幅度与云液态水含量、云与观测高度的距离及云厚有关。晴天下的 ZDD 和 ΔT 在最底层接近于 0°C , 0.5-3.0 km 各气层中均大于 0°C , 3km 以上气层都小于 0°C ,说明两站在 3.0 km 以下气层和 3.0 km 以上气层温度环境有较大差异。由 3.1 节内容得到,地形对 3.0 km 以下气层湿度的垂直分布影响很大,低层暖湿空气顺着山坡爬升或受阻气流被地形抬升都将增加上层空气相对湿度,使得大气逆辐射增强,从而加热邻近的下层空气,使其温度升高。

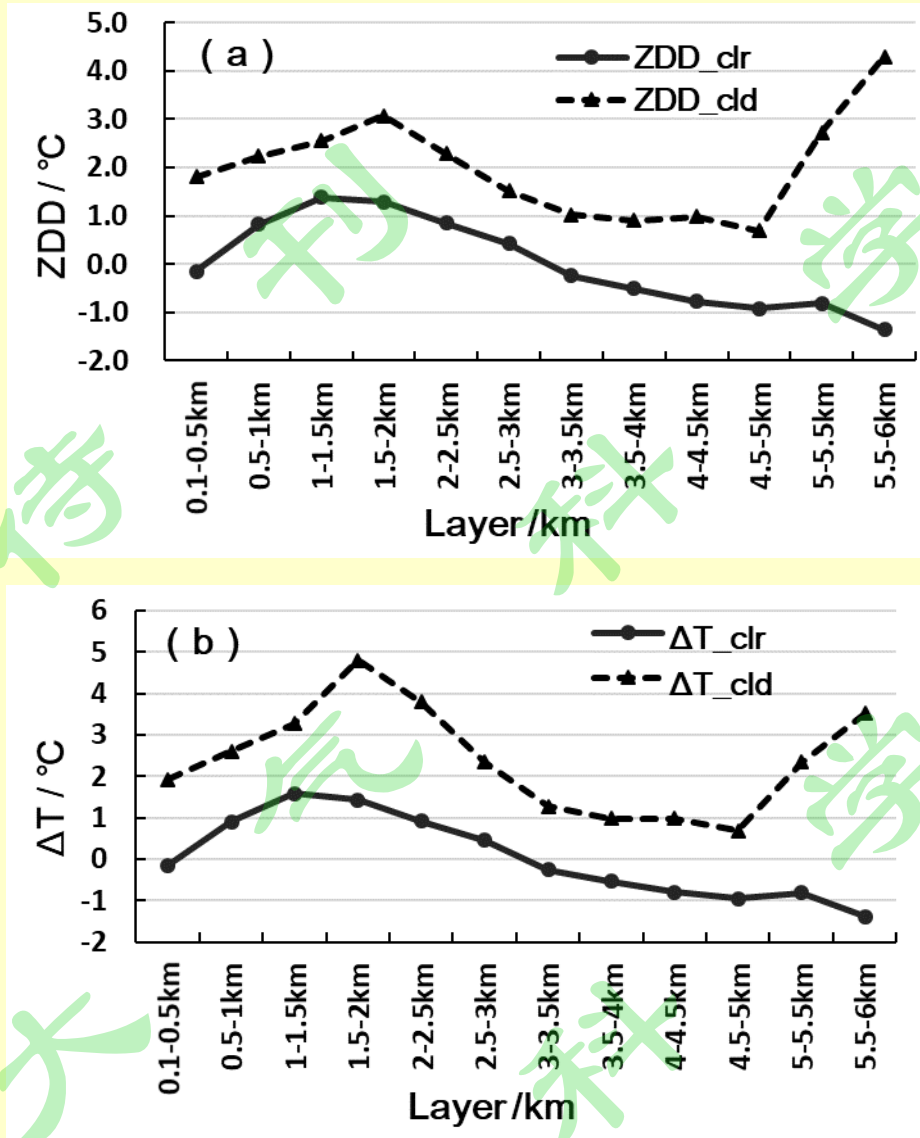


图 8 晴天和阴天条件下的 (a) 零度漂移度 ZDD 对比, (b) 微波辐射计站点和探空站点温度差 ΔT 的对比

Fig.8 Comparisons of (a) ZDD, (b) the temperature difference of (ΔT) between the stations of radiosonde and microwave radiometer at different layers under clear days and the cloudy days.

与晴天条件不同的是, 阴天条件下的 ZDD 和 ΔT 在 6.0 km 以下气层都大于 0°C , 说明阴天条件下, 该气层内的 TM 高于 TR。这与云的垂直分布有密切关系, 田磊等 (2021) 利用六盘山顶毫米波云雷达观测资料分析指出, 山区云顶高度主要分布在 4.5-5.6km, 山顶容易出现云底低于 2km 的低云, 这与 ZDD 和 ΔT 正值出现在 6.0km 以下气层、高值出现在 3km 以下气层相一致, 说明温度对空气相对湿度条件有明显的反馈。阴天条件下 3km 以下气层 ΔT 比晴天条件下平均高出 2.3°C , 最大差别出现在 HSR 最小值气层的下一层, 达到 3.4°C , 这也进一步说明了因气层湿度影响下的大气逆辐射对下层空气温度的影响。

另一方面, 各气层因湿度敏感性对 TM 产生的温度影响也有较大差别, 这种影响可通过 ΔT [在此处键入]

和 ZDD 的对比得到。对比图 7 (a) 和图 7 (b) 得到, 阴天条件下, 3km 以下气层的湿度敏感性对 TM 的最大影响达到 1.7 °C, 每层平均达到 0.9°C, 但晴天条件下湿度敏感性对 TM 的影响不大。Navas-Guzmán 等 (2014) 的研究指出云能使 TM 和 TR 的温差增加 2.5 ± 1.4 K。

最后需要说明的是, 从图 4 显示, 阴天条件下的样本量随高度上升按照指数规律递减的速率明显高于晴天条件, 这是因为气层越高其湿度越小越不易产生云。需要注意的是, 5km 以上气层样本量的波动性较大, 说明两站点气层温度差异随高度上升而加大, 这从晴天和阴天条件下的 ZDD 随高度上升的变化特征也有反馈。晴天条件下, 3.0 km 以上气层 ZDD 和 ΔT 数值随高度上升而明显加大。3.0-6.0 km 气层内 ΔT 按照 -0.4°C/km 变化, 也就是说, 气层每升高 500m, TM 与 TR 的平均温度差别增加 -0.2°C, 湿度敏感性对 TM 的影响较弱可忽略。

4. 结论

本文通过对比一年多的微波辐射计反演温度 TM 与探空温度 TR 资料, 分析了 TM 对空气相对湿度条件的敏感性。另外, 因微波辐射计位于六盘山脚下, 探空站点位于平原地区, TM 在不同高度层的湿度敏感性反馈了地形对空气相对湿度和温度的影响, 主要结论如下:

- 1) 整层大气平均而言, 阴天条件下的敏感性系数平均为 0.91, 晴天条件下的均值为 0.98。空气相对湿度越大, TM 与 TR 的温度差别越大, 这种温度差别在阴天条件下平均达到 1.8°C, 相对湿度小于 70% 时的晴天条件下小于 1°C, 阴天条件下的湿度敏感性误差高于晴天。
- 2) 山地地形对气层空气相对湿度有较大影响, 晴天条件下的湿度敏感性在山顶以上 500m 气层达到最大, 阴天条件下则出现在 1-1.5km。地形对湿度的影响主要体现在 3km 以下气层, 该气层内晴天和阴天条件下的湿度敏感性系数平均分别达到 0.91 和 0.74。受湿度敏感性影响, 阴天条件下 TM 比实际温度平均偏低 1.3°C, 最大能偏低 2.7°C, 晴天条件下 TM 比实际温度平均偏低 0.5°C。
- 3) 地形对空气相对湿度的影响直接影响了气层温度的垂直分布, 主要体现在 3km 以下气层。该气层内, 阴天条件下的气层平均升温 2.3°C, 气层升温最高能达到 3.4°C。因湿度敏感性对 TM 的影响每层平均达到 0.9°C, 最高能达到 1.7°C。

致谢: 本文所用资料由六盘山地形云野外科学试验基地提供, 在此表示感谢!

参考文献 (References)

[在此处键入]

- Bian J, Chen H, Vömel H, et al. 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28: 139-146.
- Bianco L, Friedrich K, Wilczak J M, et al. 2017. Assessing the accuracy of microwave radiometers and radio acoustic sounding systems for wind energy applications [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(5): 1707-1721.
- Cadeddu M P, Liljegren J C, Turner D D. 2013. The atmospheric radiation measurement (ARM) program network of microwave radiometers: Instrumentation, data, and retrievals [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 6: 2359-2372.
- Candlish L M, Raddatz R L, Asplin M G, et al. 2012. Atmospheric Temperature and Absolute Humidity Profiles over the Beaufort Sea and Amundsen Gulf from a Microwave Radiometer [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29: 1182-1201.
- Chan P W. 2009. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 18(3): 253-265.
- 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. Che Yunfei, Ma Shuqing, Yang Ling, et al. 2015. Cloud influence on atmospheric humidity profile retrieval by ground-based microwave radiometer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 26(2): 193-202. doi:10.11898/1001-7313.20150207
- Che Y, Ma S, Xing F, et al. 2016. Research on Retrieval of Atmospheric Temperature and Humidity Profiles from combined Ground-based Microwave Radiometer and Cloud Radar Observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1-24.
- Cimini D, Campos E, Ware R, et al. 2011. Thermodynamic atmospheric profiling during the 2010 Winter Olympics using ground-based microwave radiometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49: 4959-4969.
- 邓佩云, 桑建人, 杨萌, 等. 2021. 近 30 年六盘山东与西坡降水及空中水汽条件差异特征分析 [J]. *气象科技*, 49(01): 77-85. doi: 10.19517/j.1671-6345.20200061. Deng Peiyun, Sang Jianren, Yang Meng, et al. 2021. Ananalysis difference characteristics of precipitation and air water vapor conditions over east and west slopes of Liupan Mountain in recent 30 years [J]. *Meteorological Scinece and Technology*, 49(01): 77-85.
- Gaffen D J. 1994. Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records [J]. *Journal of* [在此处键入]

- Geophysical Research: Atmospheres, 99(D2): 3667-3676.
- Güldner J, Spänkuch D. 2001. Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 18: 925-933.
- 郭丽君, 郭学良. 2015. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究 [J]. *气象学报*, 73(2): 368-381. Guo Lijun, Guo Xueliang. 2015. Verification study of the atmospheric temperature and humidity profiles retrieved from the ground-based multi-channels microwave radiometer for persistent foggy weather events in northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(2): 368-381.
- Hewison T. 2007. 1D-VAR retrievals of temperature and humidity profiles from a ground-based microwave radiometer [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 45: 2163-2168.
- Knupp K R, Coleman T, Phillips D, et al. 2009. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(6): 1057-1073.
- Lanzante J R, Klein S A, Seidel D J. 2003. Temporal homogenization of monthly radiosonde temperature data. Part II: Trends, sensitivities, and MSU comparison [J]. *Journal of Climate*, 16(2): 241-262.
- Liljegren J C, Boukabara S A, Cady-Pereira K. 2005. The effect of the half-width of the 22-GHz water vapor line on retrievals of temperature and water vapor profiles with a 12-channel microwave radiometer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(5): 1102-1108.
- 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 2009. 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*, 33(2): 388-396. Liu Hongyan, Wang Yingchun, Wang Jingli, et al. 2009. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(2): 388-396. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.16
- 刘红燕. 2011. 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*, 69(04): 719-728. Liu Hongyan. 2011. The temperature profile comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(4): 719-728.
- Löhnert U, Crewell S, Simmer C. 2004. An integrated approach toward retrieving physically consistent profiles of temperature, humidity, and cloud liquid water [J]. *Journal of Applied Meteorology* [在此处键入]

- and Climatology, 43(9): 1295-1307.
- Löhnert U, Maier O. 2012. Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry at Payerne: Prospects and challenges [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 5(5): 1121-1134.
- Madhulatha A, Rajeevan M, Ratnam M V, et al. 2013. Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118: 1-13. doi:10.1029/2012JD018174.
- Navas-Guzmán F, Stähli O, Kämpfer N. 2014. An integrated approach toward the incorporation of clouds in the temperature retrievals from microwave measurements [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 7(6): 1619-1628.
- Sánchez J L, Posada R, García-Ortega E, et al. 2013. A method to improve the accuracy of continuous measuring of vertical profiles of temperature and water vapor density by means of a ground-based microwave radiometer[J]. Atmospheric Research, 122: 43-54.
- Shige S, Kummerow C D. 2016. Precipitation-top heights of heavy orographic rainfall in the Asian monsoon region [J]. J. Atmos. Sci., 73: 3009-3024, doi:10.1175/JAS-D-15-0271.1.
- Spänkuch D, Güldner J, Steinhagen H, et al. 2011. Analysis of a dryline-like featured in northern Germany detected by a ground-based microwave profiling [J]. Meteorol. Z., 20 (4): 409-421.
- Sumargo E, Cayan D R. 2017. Variability of cloudiness over mountain terrain in the western United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 18(5): 1227-1245. doi:10.1175/JHM-D-16-0194.1
- 田磊, 桑建人, 姚展予. 2021. 基于 Ka 波段云雷达的六盘山顶云特征分析 [J]. 气象与环境学报, 37(02): 84-90. Tian Lei, Sang Jianren, Yao Zhanyu, et al. 2021. Preliminary analysis of cloud macro characteristics over the Liupan mountain based on Ka-band cloud radar [J]. Journal of Meteorology and Environment, 37(2): 84-90.
- Venkat Ratnam M, Durga Santhi Y, Rajeevan M, et al. 2013. Diurnal variability of stability indices observed using radiosonde observations over a tropical station: Comparison with microwave radiometer measurements [J]. Atmos. Res., 124: 21-33.
- Vömel H, Selkirk H, Miloshevich L, et al. 2007. Radiation dry bias of the Vaisala RS92 humidity sensor [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 24: 953-963.
- Wang J, Rossow W B. 1995. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 34(10): 2243-2258.
- [在此处键入]

- 王婉, 雷恒池, 聂浩浩, 等. 2021. 基于机载微波辐射计探测大气水汽通道饱和问题研究 [J]. 气象学报, 79(03): 509-520. Wang Wan, Lei Hengchi, Nie Haohao, et al. 2021. A study on channel saturation of atmospheric water vapor detection based on airborne microwave radiometer [J]. Acta Meteorologica Sinica, 79(3): 509-520.
- 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(06): 711-721. Wang Zhenhui, Li Qing, Chu Yanli, et al. 2014. Environmental thermal radiation interference on atmospheric brightness temperature measurement with ground-based K-band microwave radiometer [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 25(06): 711-721.
- Ware R, Cimini D, Campos E, et al. 2013. Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics [J]. Atmospheric Research, 132: 278-290.
- Westwater E R, Crewell S, Mätzler C, et al. 2005. Principles of surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere [J]. Quad. Soc. Ital. Elettromagnetismo, 1(3): 50-90.
- Xu G, Xi B, Zhang W, et al. 2015. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 120: 10313-10323, doi:10.1002/2015JD023438.
- Xu G, Zhang W, Feng G, et al. 2014. Effect of off-zenith observations on reducing the impact of precipitation on ground-based microwave radiometer measurement accuracy [J]. Atmospheric Research, 140: 85-94.
- Yamamoto M K, Shige S, Yu C K., et al. 2017. Further improvement of the heavy orographic rainfall retrievals in the GSMAp algorithm for microwave radiometers [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 56(9): 2607-2619.
- Yan X, Liang C, Jiang Y, et al. 2020. A Deep Learning Approach to Improve the Retrieval of Temperature and Humidity Profiles From a Ground-Based Microwave Radiometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58(12): 8427-8437.
- Yoneyama K, Fujita M, Sato N, et al. 2008. Correct for radiation dry bias found in RS92 radiosonde data during the MISMO field xperiment [J]. SOLA, 4: 13-16.
- Yu C K, Cheng L W. 2008. Radar observations of intense orographic precipitation associated with Typhoon Xangsane (2000) [J]. Mon. Wea. Rev., 136: 497-521, doi:10.1175/2007MWR2129.1.
- [在此处键入]

- Yu C K, Cheng L W. 2014. Dual-Doppler-derived profiles of the southwesterly flow associated with southwest and ordinary typhoons off the southwestern coast of Taiwan [J]. *J. Atmos. Sci.*, 71, 3202-3222, doi:10.1175/JAS-D-13-0379.1.
- 张沛, 姚展予, 贾烁, 等. 2020. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究 [J]. *大气科学*, 44(2): 421-434. Zhang Pei, YAO Zhanyu, JIA Shuo, et al. 2020. Study of the Characteristics of Atmospheric Water Resources and Hydrometeor Precipitation Efficiency over the Liupan Shan Area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(2): 421-434. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.19104.
- 赵兵科, 邵德民, 鲁小琴, 等. 2009. 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*, 24(9): 1001-1008. Zhao Bingke, Shao Demin, Lu Xiaoqin, et al. 2009. Performance and characteristics analysis of a multiwavelength, ground-based microwave radiometer before and after 0713 typhoon “Wipha” landfall [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24(9): 1001-1008. doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2009.09.006
- 周珺, 雷恒池, 魏重, 等. 2008. 机载微波辐射计反演云液水含量的云物理方法 [J]. *大气科学*, 32(5): 1071-1082. Zhou Jun, Lei Hengchi, Wei Chong, et al. 2008. Retrieval method of path-integrated cloud liquid water content for airborne upward-looking microwave radiometer using a cloud model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 32(5): 1071-1082.