

探空气球漂移对微波辐射计与探空温度差异的影响

董自鹏^{1,2} 李星敏^{1,2} 彭艳^{1,2} 赵奎锋³ 杜怡心^{1,2} 白水成³

1. 陕西省气象科学研究所, 西安, 710016

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室, 西安, 710016

3. 陕西省气象局, 西安, 710014

摘要 为了评估地基微波辐射计对大气温度廓线的探测性能以及探空气球漂移对微波辐射计与探空温度差异 (δT) 的影响, 利用西安市泾河气象站为期两年的微波辐射计和探空资料, 分析了两者温度差异的时空变化特征, 提出量化计算探空气球漂移引起的探空温度探测误差的方法。研究发现: (1) 微波辐射计温度反演值 (T_M) 与探空温度 (T_S) 的一致性存在着显著的时空变化, 两者在春、秋季相关性高于夏、冬季, 在低层的相关性高于高层。(2) 在同一高度上, 环境气温与 δT 显著负相关, 气温越高, 微波辐射计对气温的低估越明显, 反之亦然, 导致微波辐射计“高温低估、低温高估”现象, 且这一现象的严重程度在高空大于低空, 在冬、夏季大于春、秋季。(3) 在各个季节, 探空气球漂移均导致探空温度高于探空站上空的实际温度, 并且探空温度探测误差与环境温度负相关, 因此, 探空气球漂移造成微波辐射计与探空温度的平均差异幅度被高估、 δT 离散程度被低估, 同时削弱了 δT 与环境温度的相关性以及微波辐射计“高温低估、低温高估”的严重程度。总体而言, 探空气球漂移引起的温度均方根误差以及 δT 标准差的变化不足 2%, 其对微波辐射计与探空温度差异的贡献远小于反演算法本身。

关键词: 微波辐射计; 探空气球漂移; 温度廓线; 探空

中图分类号: P412

Impact of Sounding Balloon Drift on Temperature Differences between Microwave Radiometer and Radiosonde

DONG Zipeng^{1,2} LI Xingmin^{1,2} PENG Yan^{1,2} ZHAO Kuifeng³ DU Yixin^{1,2} BAI Shuicheng³

1. Shaanxi Institute of Meteorological Science, Xi'an 710016, China

2. China Meteorological Administration Eco-Environment and Meteorology for The Qinling Mountains and Loess Plateau Key Laboratory, Xi'an 710016, China

3. Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China

Abstract To evaluate the reliability of the atmospheric temperature profiles retrieved by the Microwave Radiometer (MWR) and the impact of sounding balloon drift on the temperature difference (δT) between MWR and radiosonde, more than two years of temperature profile derived from MWR are tested against those from radiosondes. A method for quantitative assessment of bias in radiosonde temperature caused by the drift of sounding balloon has been proposed. It is demonstrated that: (1) There are significant temporal and spatial changes in the

国家自然科学基金青年科学基金项目 (41905016)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024P021, CXFZ2022P021)、陕西省重点研发计划项目 (2024SF-YBXM-583、2023-YBSF-328) 共同资助。

第一作者: 董自鹏, 主要从事大气遥感和环境气象研究。 E-mail: dzp2003@126.com

consistency of the temperatures acquired by MWR (T_M) and radiosonde (T_S). The correlation coefficients between T_M and T_S are found to be higher in spring and autumn than in summer and winter, and better correlation is always detected at lower altitude for all seasons. (2) At a given altitude, the δT is significantly negatively correlated with the ambient temperature represented by T_S . The higher the temperature, the more obvious the underestimation of the temperature by the MWR, and vice versa, leading to a phenomenon of "overestimating low temperature and underestimating high temperature", which is more obvious at high altitudes than at low altitudes, and in winter and summer than in spring and autumn. (3) The drift of sounding balloon causes the sounding temperature to be higher than the actual temperature right above the radiosonde sites in all seasons, and the biases in radiosonde temperature records are negatively correlated with the environmental temperature. Therefore, sounding balloon drift causes MD to be overestimated, and the degree of dispersion in δT to be underestimated, resulting in underestimation of the correlation between δT and ambient temperature as well as the severity of "overestimating low temperature and underestimating high temperature" of MWR. Overall, the influence of sounding balloon drift on the standard deviation of δT and root mean square deviation of the microwave radiometer and radiosonde temperature is below 2%, and its contribution to δT is much smaller than that of the retrieval algorithm.

Keywords: Microwave radiometer; sounding balloon drift; temperature profile; radiosonde

1 引言

大气温湿廓线探测对数值天气预报、天气与气候变化研究以及地气系统辐射收支的精准模拟具有重要意义(刘亚亚等, 2010; 王丹等, 2013; 孙囡等, 2019; 黄钰等, 2020), 也是开展大气边界层热力结构演变对大气污染过程影响机制研究的重要基础(孙业乐, 2018; 黄俊等, 2019; 苗世光等, 2020; 车圣辉等, 2021)。大气温湿廓线的传统观测手段有气球探空、系留汽艇、铁塔观测等, 但这些观测大多具有时间或空间观测范围有限等缺点(王耀庭等, 2012; 李浩文等, 2017; Zhao et al, 2019)。微波辐射计通过被动接收大气微波辐射信号来反演温湿度垂直分布, 克服了传统探测方法的局限性, 具有时间分辨率高、可全天候连续观测的优点(雷连发等, 2018), 有助于提升我国中小尺度气象探测和预报能力(卢建平等, 2014; 唐兆康等, 2022), 已在强对流天气监测、模式数据同化、大气环境和云降水研究领域得到了一定的应用(Ratnam et al, 2013; Madhulatha et al, 2013; Cui et al, 2015; Cimini et al, 2015; 崔雅琴等, 2019; He et al, 2020; 李金辉等, 2022; 荆浩等, 2024), 但在其温湿度廓线探测误差分析方面仍存在不足(刘晓璐等, 2019), 尤其是探空资料被广泛的用于微波辐射计温度廓线检验, 然而, 受探空气球漂移的影响, 探空数据自身也存在探测温度并不严格等于探空站天顶真实气温的问题。多个研究发现, 探空气球在升空过程中的漂移距离可达 40—120 km(陈哲, 2010), 在同化探空资料过程中引入探空气球漂移信息能够提升数值模式预报效果(刘红亚等, 2005; Laroche and Sarrazin, 2013; Choi et al, 2015; 王丹等, 2020), 表明探空气球漂移对温度廓线的影响不容忽视, 可能影响到微波辐射计误差评估结果(姚作新等, 2011; 张文刚等, 2013; Zhao et al, 2022),

然而，由于暂无有效的方法来定量化评估气球漂移对探空温度的影响，因此以上推论有待验证。本文利用西安市泾河气象站为期两年的探空、微波辐射计温度廓线数据分析两者的时空差异，进而结合该站点周边三个探空站数据着重分析探空气球漂移对探空、微波辐射计温度差异（ δT ）的影响，以期能为进一步了解和改进微波辐射计的探测性能提供参考。

2 资料与方法

2.1 数据和评估指标

本文数据来源于西安市泾河国家气象站（108.97° E，34.43° N，图 1）2017.6.20—2019.7.15 的 L 波段探空和微波辐射计观测资料。探空于每天 08 时和 20 时（北京时间，下同）分别进行一次观测，探测时间分辨率为 1 s，对应的垂直分辨率为 5—7 m。布设在泾河站的 MWP967KV 型微波辐射计由北方天穹信息技术(西安)有限公司生产，该仪器设有 22.235、22.50、23.035、23.835、25.00、26.235、28.00、30.00 GHz 等 8 个水汽探测通道和 51.25、51.76、52.28、52.80、53.34、53.85、54.40、54.94、55.50、56.02、56.66、57.29、57.96、58.80 GHz 等 14 个温度探测通道，研究期内采用天顶探测模式，探测时间分辨率为 2 分钟，大气温湿廓线由 BP 神经网络（BPNN）算法反演获得，用于 BPNN 算法训练的数据为泾河站 2012.1—2017.6 的历史探空数据，反演得到的温湿廓线在垂直方向划分为 58 层，其中，地面到 500 m 高度的分辨率为 50 m，500—2000 m 的分辨率为 100 m，2000—10000 m 的分辨率为 250 m。仪器分别于 2017 年 6 月、2018 年 7 月和 2019 年 4 月进行了液氮标定，为了检验液氮定标前后亮温观测数据的连续性，利用 MonoRTM(Turner et al, 2007) 模式和末次定标日期（2019.04.18）前、后各 10 天的探空资料模拟了 14 个温度探测通道的亮温，剔除云雨天后，亮温实测值和模拟值线性相关系数介于 0.92—0.99，其中 12 个通道的相关系数 ≥ 0.95 ，表明亮温观测连续性良好。

探空和微波辐射计廓线数据采取点对点匹配，匹配原则为时间和高度上均最为临近。基于该原则，匹配数据对的时间差不超过微波辐射计时间分辨率的一半（即 $< 1 \text{ min}$ ），高度差不超过探空垂直分辨率的一半（通常 $< 5 \text{ m}$ ）。研究期内，共获得 1240 对匹配廓线。

由于雨滴对大气微波辐射具有散射和吸收作用 (Battaglia et al, 2010)，并且附着在微波辐射计天线罩上的雨水也可造成亮温观测异常 (魏重等, 2001; 樊旭等, 2019; 茆佳佳等, 2018; 傅新姝等, 2023)，导致微波辐射计反演结果不可靠，因此，本研究剔除了探空前、后 1h 内发生降水的个例。

文中采用温度差异（ δT ）、平均温度差异（MD）、 δT 标准差（ $STD_{\delta T}$ ）、均方根误差（RMSD）等指标进行不同高度上的微波辐射计温度廓线数据评估分析：

$$\delta T = T_M - T_S \quad (1)$$

$$MD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta T_i) \quad (2)$$

$$STD_{\delta T} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta T_i - MD)^2} \quad (3)$$

105
$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta T_i)^2} \quad (4)$$

106 其中, T_M 为微波辐射计反演温度, T_S 为探空温度, N 为选定高度上总匹配样本数。

107 对式(3)两侧取平方并展开, 联合式(2)、式(4), 可以证明:

108
$$RMSD^2 = MD^2 + STD_{\delta T}^2 \quad (5)$$

109 由式(5)可知, RMSD 综合反映了 MD 和 $STD_{\delta T}$ 的量值变化。此外, 分别采用相关系数(R)
110 和最小二乘法线性拟合斜率 (slope) 探讨微波辐射计与探空温度间的吻合度以及探空气球
111 漂移对 δT 的影响等。

112 2.2 探空气球漂移引起的温度探测误差计算

113 为了探讨气球漂移对探空温度探测的影响, 文中采用涇河站周边的汉中 (107.03° E,
114 33.07° N)、延安 (109.45° E, 36.57° N) 和南阳 (112.48° E, 33.10° N) 三个探空站的
115 同期观测资料 (图 1), 通过同一时次相同海拔高度上的三个站点探空温度、纬度和经度值
116 两两相减构建二元方程组的方法, 计算每个探空时次各个高度上的气温经向梯度 ($\nabla_m T$) 和
117 纬向梯度 ($\nabla_z T$)。由于研究区域的复杂地形会对气温分布造成扰动, 而气球漂移主要发生
118 在高空, 因此, 仅计算海拔 2.0 km 以上的 $\nabla_m T$ 和 $\nabla_z T$ 。那么, T_S 与探空站天顶温度 (T_Z) 有
119 如下关系:

120
$$T_S - T_Z = \nabla_m T \cdot \Delta\varphi + \nabla_z T \cdot \Delta\lambda \quad (6)$$

121 其中, $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\lambda$ 分别为探空气球与探空站的纬度差 (经向漂移) 和经度差 (纬向漂移)。

122 结合式(1)和式(6), T_M 与 T_Z 的差异为:

123
$$T_M - T_Z = \delta T + \nabla_m T \cdot \Delta\varphi + \nabla_z T \cdot \Delta\lambda \quad (7)$$

124

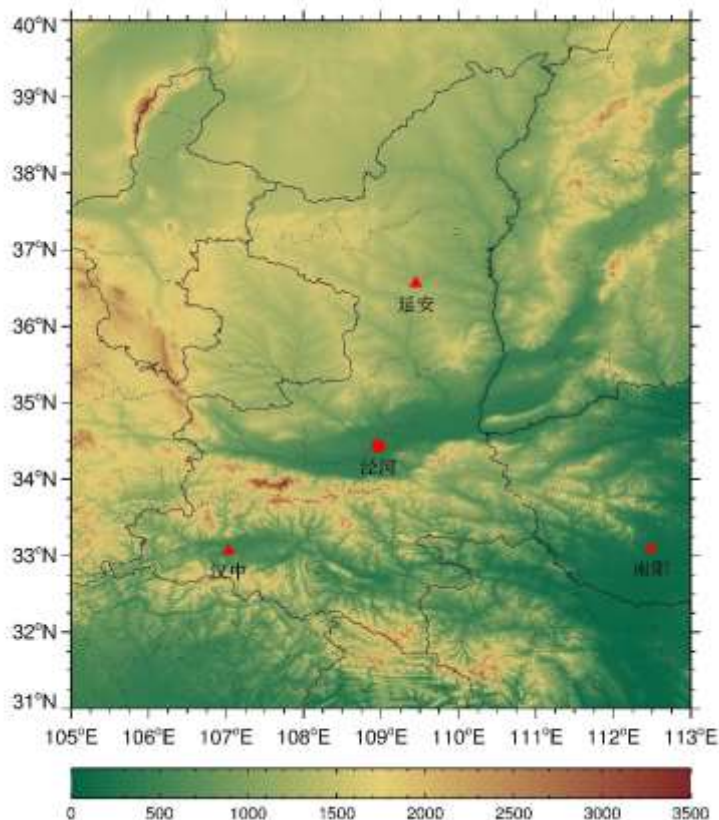


图 1 泾河及其周边探空站地理位置和地势图

Fig. 1 Terrain map showing the topography and location of Jinghe (red dot) and other three radiosonde stations (red triangles)

3 微波辐射计温度与探空温度比较

3.1 全年温度廓线比较

图 2 给出了 2 年内非降水时段 T_M 与 T_S 对比情况。从 T_M 和 T_S 的平均温度廓线来看，两者都能够反映出温度随高度的递减趋势（图 2. a），但在同一高度上， T_M 普遍低于 T_S ，MD 以负值为主（图 2. b），并且差异幅度随高度先增后减，而在所有高度上， $STD_{\delta T}$ 的量值均大于 MD，表明 δT 的离散程度大于其均值，是 RMSD 的主要贡献项。就评价指标的垂直变化而言，在 4.0 km 以下，MD 随高度近乎线性增加，由地面 0 °C 左右升至 -2.55 °C，与此同时， $STD_{\delta T}$ 快速增大、R 快速下降，表明温度差异幅度和离散程度都显著上升， T_M 和 T_S 线性相关程度迅速减弱（图 2. c）；在 4.0—7.8 km，MD 超过 -2.0 °C， $STD_{\delta T}$ 维持在 3.0 °C 以上， T_M 反演效果显著低于低层，但 MD 和 $STD_{\delta T}$ 的垂直变化较小，数据质量相对稳定；8 km 以上 MD 随高度逐渐减小，在 10 km 降至 0 °C 左右，而 $STD_{\delta T}$ 和 RMSD 则迅速上升、R 进一步下降，表明 T_M 和 T_S 在均值上更加接近，但 δT 的离散程度快速增大， T_M 和 T_S 线性相关度进一步减弱。

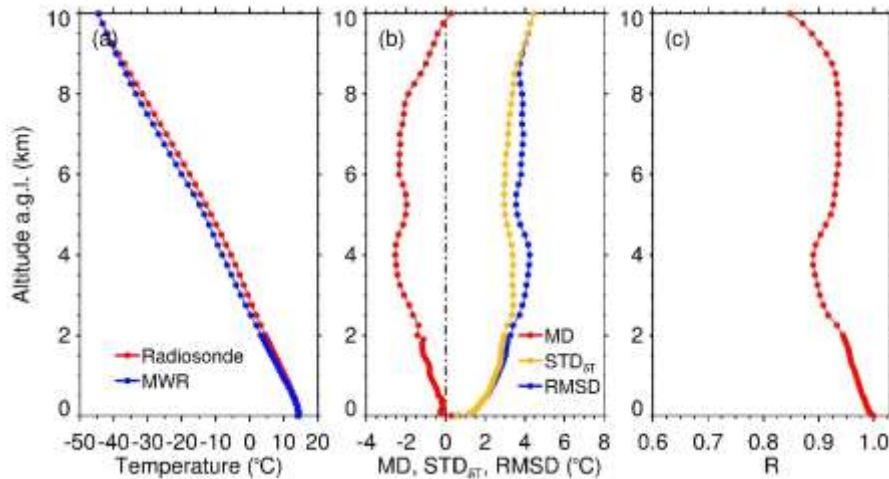


图 2 探空和微波辐射计观测的平均温度廓线 (a)，平均温度差异 (MD)、

标准差 ($STD_{\delta T}$)、均方根误差 (RMSD) 廓线 (b)，微波辐射计与探空温度线性相关系数 R 廓线 (c)

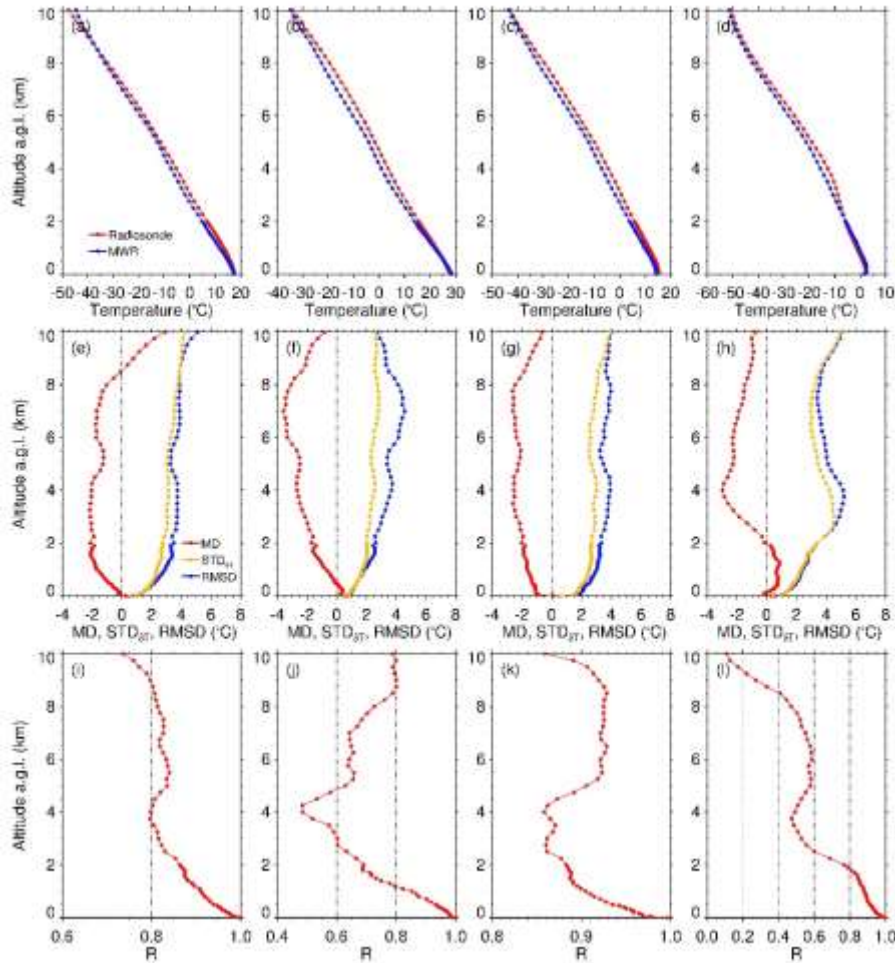
Fig. 2 Mean temperature profiles observed by radiosonde and MWR (a), the mean difference (MD), standard deviation ($STD_{\delta T}$), and root-mean-square difference (RMSD) for simultaneous temperature profiles (b), and the profile of correlation coefficient (R) between radiosonde and MWR temperatures

与同型号微波辐射计相比，本文 MD、RMSD 量值及其垂直变化与刘骁璐等 (2019) 研究结果相当，而 MD 量值及其垂直分布与郑飒飒 (2019) 研究结果存在较大差异；与徐桂荣等 (2019) 对 MP-3000A 型微波辐射计的检验结果相比，本文 MD 量值与之相当，但符号相反，表明微波辐射计个体差异较大。

3.2 不同季节 T_M 与 T_S 的比较

各季节 MD、 $STD_{\delta T}$ 、RMSD 的垂直变化与全年结果较为相似 (图 3)，主要特征为 T_M 系统性偏低，MD 以负值为主，且温度差异幅度随高度先增大后减小， $STD_{\delta T}$ 随高度以上升为主，高度越高， δT 离散程度越大。值得指出的是，冬季 2 km 以下大部分 MD 以正值为主，显著有别于全年和其它三个季节的结果，这将导致微波辐射计边界层产品在冬季出现逆温的概率偏高，在其他季节出现逆温的概率偏低。

T_M 与 T_S 的相关性存在明显的季节差异，秋季 T_M 与 T_S 线性关系最好，其所有高度上的 R 均值为 0.91。春季次之，其所有高度上 R 均值为 0.86。夏、冬季 T_M 与 T_S 线性关系明显偏差，与之相应的所有高度上的 R 均值分别为 0.75 和 0.66。在垂直变化上，各季节低层的相关性高于高层，700 m 以下相关系数都在 0.9 以上。上述 R 的季节变化和垂直变化与樊旭等 (2019)、康晓燕等 (2019)、乔贺等 (2019) 研究结果相吻合。



164

165 图3 春、夏、秋、冬四个季节探空和微波辐射计平均温度廓线 (a-d)，温度平均差异 (MD)、温度差异
 166 标准差 ($STD_{\delta T}$)、均方根误差 (RMSD) 廓线 (e-h) 以及微波辐射计与探空温度相关系数 R 廓线 (i-l)

167

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the spring, summer, autumn and winter, respectively

168

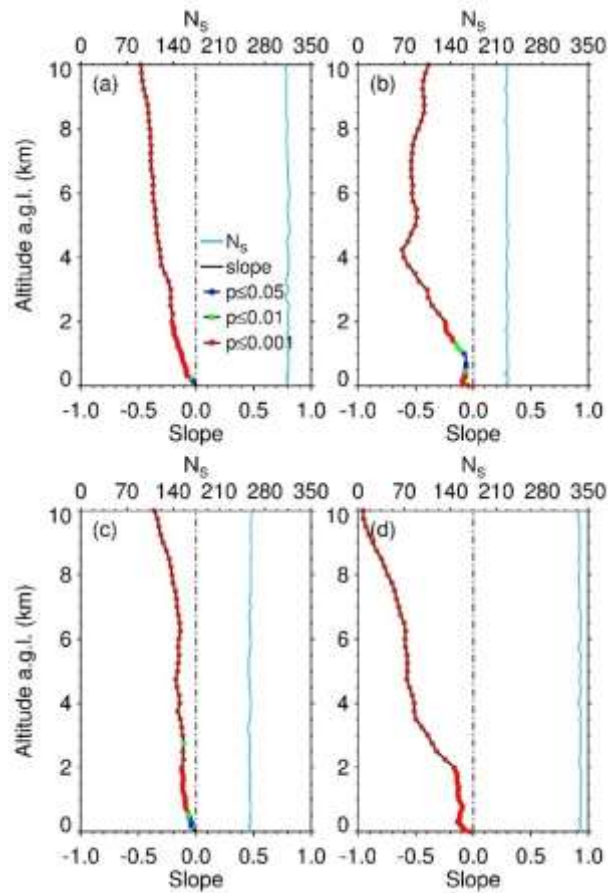
3.3 δT 与环境温度的关联性

169

170 图4 给出不同季节 δT 与 T_s 的线性拟合斜率、显著性水平以及样本数 (N_s)，各季节
 171 所有高度上的 δT 与 T_s 都表现为负相关，且除了春、秋季 300 m 以下以及夏季 1 km 附近高度
 172 层外，其它高度上 δT 与 T_s 线性关系都能够通过 99% 的置信度检验，表明 δT 对大气环境温
 度有强烈的依赖性，且微波辐射计在同一高度上总是倾向于“高温低估、低温高估”。

173

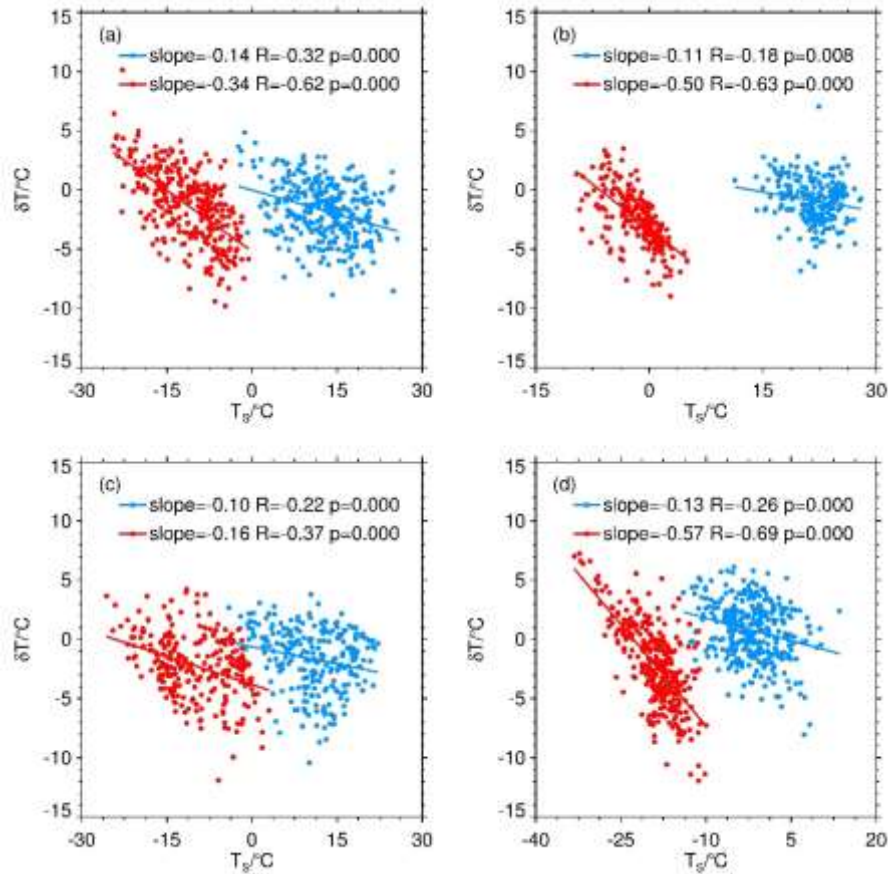
174 就垂直变化而言，春、秋、冬季三个季节 δT 与 T_s 的拟合斜率随高度上升而负向增大，
 175 表明随着高度增加，微波辐射计在给定高度上“高温低估、低温高估”的现象趋于严重。四
 176 个季节中，秋季 δT 与 T_s 拟合斜率偏离于 0 的程度最小，所有高度上的斜率均值为 -0.14；
 177 春、夏季所有高度上的斜率均值分别为 -0.25 和 -0.32；冬季所有高度上的斜率均值为 -0.4，
 178 偏离于 0 的程度最显著。上述结果表明微波辐射计“高温低估、低温高估”的现象在冬季最
 为严重，夏、春季次之，秋季较轻。



179
 180
 181
 182
 183
 184
 185
 186
 187
 188

图4 春 (a)、夏 (b)、秋 (c)、冬 (d) 季 δT 与 T_s 线性回归的斜率和置信区间以及配对样本数
 Fig.4 Slopes and confidence intervals of the linear regression between δT and T_s for different seasons along with the paired-samples number

图5 给出与天气预报密切相关的 850 hPa、500 hPa 两个典型高度上 δT 与 T_s 在不同季节的线性拟合细节。可以看出，不同季节、不同高度上，气温越低， δT 正值越大，反之亦然，同一高度上“高温低估、低温高估”的现象同时存在。



189

190

图5春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)季850hpa(蓝色)、500hpa(红色) δT 与 T_s 的对应关系

191

Fig.5 δT at 850 hPa (blue dots), 700 hPa (red dots) as a function of T_s for spring (a), summer

192

(b), autumn (c) and winter (d), respectively

193

194

4 探空气球漂移对微波辐射计与探空温度差异的影响

195

探空气球漂移导致其探测的温度并不严格位于探空站上空, 这将造成用于 T_M 检验的温

196

度“真值”不真问题。为了量化这一影响, 首先利用泾河气象站周边的三个探空站数据计算

197

了 2 km 以上的 $\nabla_m T$ 和 $\nabla_z T$ 。如图 6 所示, 关中地区 $\nabla_m T$ 季节变化明显, 冬季和秋季较大, 分

198

别为 -0.013 和 -0.010 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 春季和夏季较小, 分别为 -0.0080 和 -0.048 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 全

199

年均值 -0.0093 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 与谢永坤等(2013)基于多年模式数据计算的结果相当。相较于 $\nabla_m T$,

200

$\nabla_z T$ 几乎要小一个量级, 四个季节均值介于 $-0.0015 \sim -0.00033$ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 全年均值为

201

-0.00091 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 。对探空气球漂移距离统计发现, 其冬季漂移距离最远, 秋、春季次之,

202

夏季最近。除夏季经向、纬向漂移距离相当以外, 其它季节纬向漂移距离是经向漂移距离的

203

$2.4 \sim 3.9$ 倍。

204

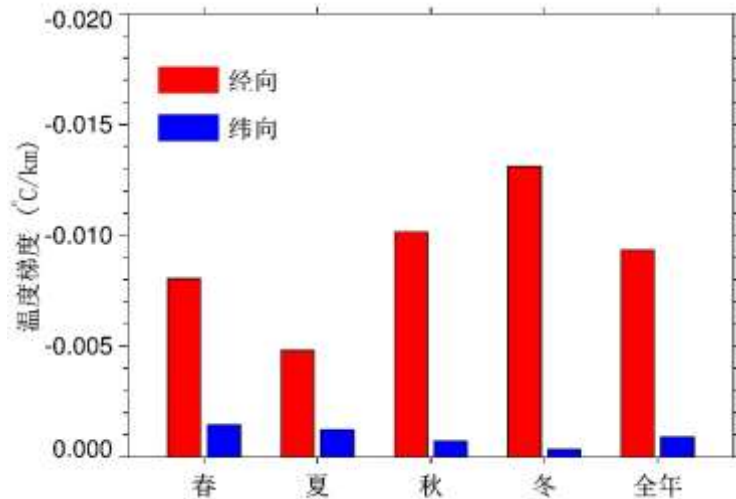
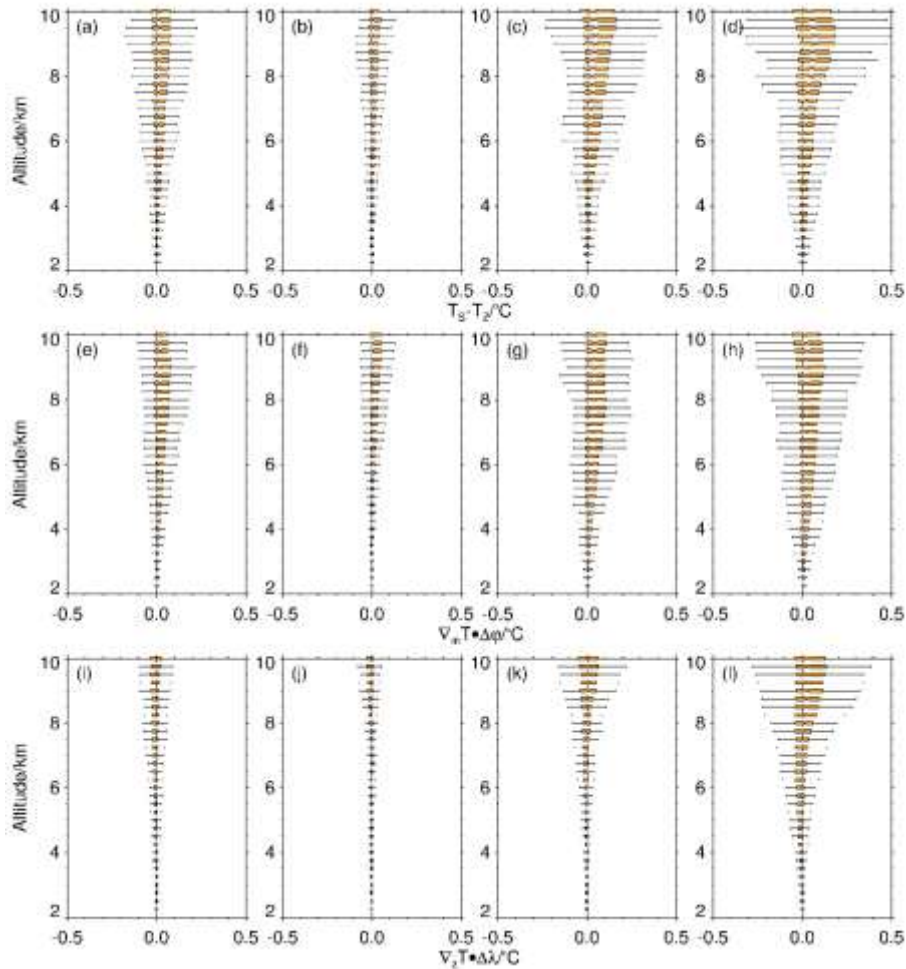


图6 研究区内经向、纬向温度梯度的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of meridional and zonal temperature gradients in the study region

205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216

探空气球漂移引起的 T_s 与 T_z 的差异如图 7 所示。总体来说，各个季节的探空气球漂移都导致 T_s 高于 T_z (图 7 a-d)，其中，冬季气球漂移造成的影响最大，秋季和春季次之，夏季的影响最弱，这与夏季温度梯度小、漂移距离近有关。虽然温度探测误差的季节均值较小，但其变化范围较大，以冬季 9 km 高度为例，气球漂移引起的平均温度探测误差仅为 0.09 °C，但误差变化范围可达 -0.47~1.02 °C。虽然 $v_m T$ 远大于 $v_z T$ ，但由于经向漂移距离远小于纬向漂移距离，平均而言，两者对探空温度误差的影响幅度大致相当，但在影响方向上有所差异，经向漂移造成所有季节的探空温度偏高，而纬向漂移造成春、夏季探空温度偏低，秋、冬季偏高。



217

218 图7 由探空气球漂移 (a-d) 及其经向 (e-h)、纬向 (i-l) 漂移分量引起的春 (a、e、i)、夏 (b、f、
219 j)、秋 (c、g、k)、冬 (d、h、l) 季探空温度探测误差

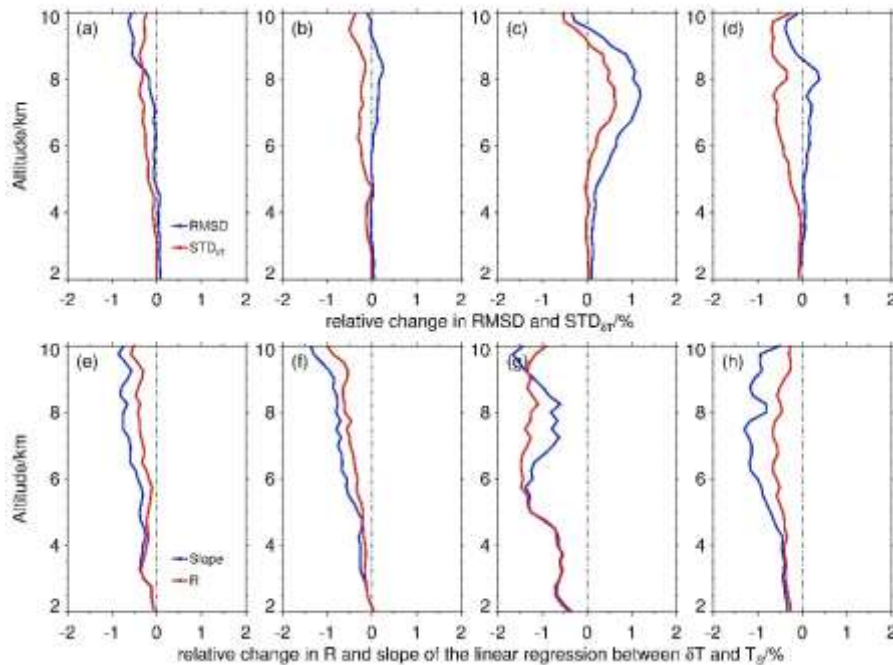
220 Fig.7 biases in radiosonde temperature records caused by the drift of sounding balloon (a-d) and
221 its meridional (e-h) and zonal (i-l) components for spring (a, e, i), summer (b, f, j), autumn
222 (c, g, k) and winter (d, h, l), respectively

223

224 由于探空气球漂移引起 T_s 系统偏高于 T_z ，因此，对于 MD 为负值的情形，探空气球漂移
225 的影响表现为使微波辐射计与探空的平均温度差异幅度高于实际值，而对于 MD 为正值的情
226 况，探空气球漂移使两者的平均温度差异幅度低于实际值。对于泾河站，探空气球漂移除了
227 导致春季 8.5 km 以上的平均温度差异幅度被低估外，其他季节的温度差异幅度都被高估。

228 图 8. a-d 给出探空气球漂移对 $STD_{\delta T}$ 、RMSD 的影响。可以看到，探空漂移对 $STD_{\delta T}$ 、RMSD
229 的影响不足 2%。在四个季节中，探空气球漂移对秋季 $STD_{\delta T}$ 、RMSD 的影响最大，使 6-9 km
230 的 $STD_{\delta T}$ 和 RMSD 分别上升了 0.5% 和 1.0%。除了秋季以外，探空气球漂移导致其他三个季节
231 4 km 以上的 $STD_{\delta T}$ 系统偏小。由于 RMSD 的变化同时取决于 MD 和 $STD_{\delta T}$ 两部分，因此，探空
232 气球漂移对 RMSD 的影响更为复杂，夏、秋、冬季以导致 RMSD 的高估为主，春季以导致 RMSD
233 的低估为主。总体而言，探空气球漂移导致 MD 和 RMSD 被高估， $STD_{\delta T}$ 被低估。与此同时，

234 探空气球漂移导致 δT 与 T_s 线性拟合斜率和相关系数下降 (图 8. e-h), 降低了 δT 与环境
 235 温度的相关性, 而斜率的下降则意味着探空气球漂移削弱了微波辐射计“高温低估、低温高估”
 236 的程度。
 237

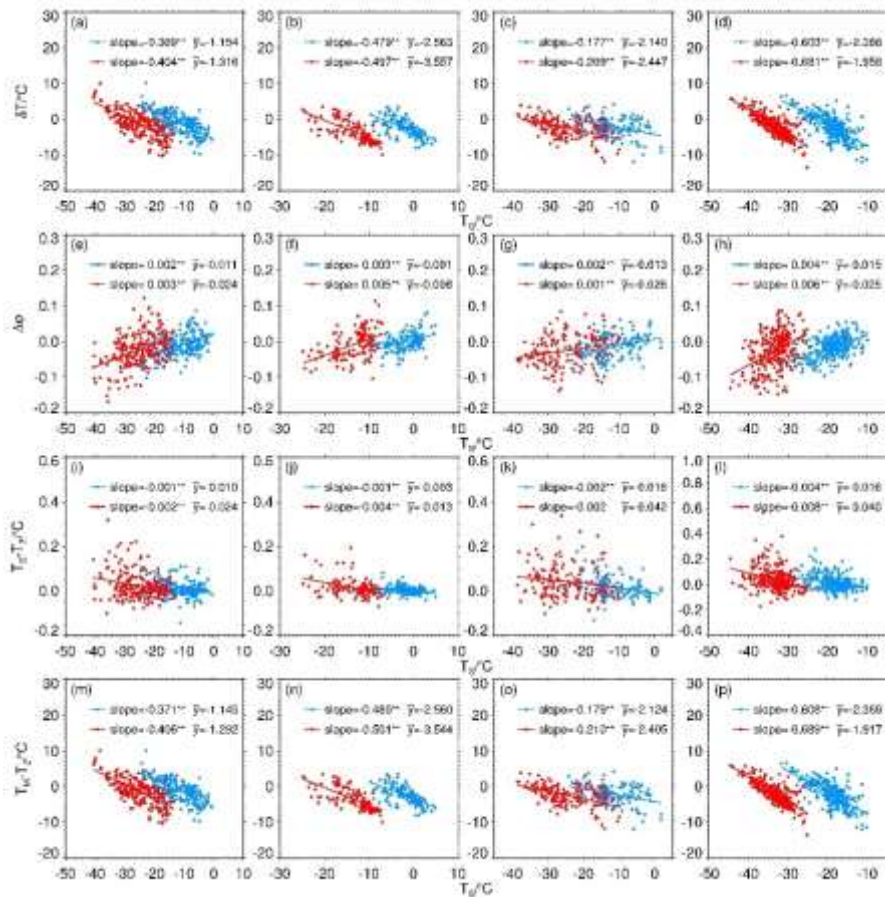


238
 239 图 8 由探空气球漂移引起的 $STD_{\delta T}$ 、RMSD (a-d) 的相对变化以及 δT 与 T_s 拟合斜率和相关系数 (e-h) 的相
 240 对变化

241 Fig. 8 relative change in $STD_{\delta T}$ and RMSD (a-d), and in correlation coefficient and slope of the
 242 linear regression between δT and T_s (e-h) cause by the radiosonde balloon drift

243
 244 为了分析探空气球漂移对 MD、 $STD_{\delta T}$ 、RMSD 造成复杂影响的成因, 图 9 给出 5.5 和 7.5km
 245 高度上 δT 、 $\Delta\phi$ 、 T_s-T_z 、 T_M-T_z 对环境温度依赖关系的细节信息。如图 9 a-d 所示, 微波辐
 246 射计在不同高度上总是倾向于“高温低估、低温高估”, 而受季风影响, 关中地区低温天气
 247 所对应的以偏北风为主的风场将导致气球向南部暖区漂移 (图 9 e-h), 引起探空温度偏高
 248 于探空站上空实际温度 (图 9 i-l), 而微波辐射计在低温段的反演结果又高于探空温度,
 249 因此, 订正气球漂移的影响后, 微波辐射计“低温高估”的现象进一步加重 (图 9 m-p),
 250 对于高温段来说, 订正气球漂移的影响后微波辐射计“高温低估”的现象也进一步加重, 两
 251 者共同导致 $STD_{\delta T}$ 的低估, 并造成 δT 与环境温度的拟合斜率低于 T_M-T_z 与环境温度的拟合斜
 252 率 (图 9 m-p)。上述结果表明, 将 T_s 订正至 T_z 后, 微波辐射计“高温低估、低温高估”的
 253 程度将进一步扩大。

254
 255



256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266

图9 不同季节5.5 km (蓝点) 和7.5 km (红点) 高度上 δT (a-d)、探空气球经向漂移 (e-h)、探空温度探测误差 (i-l) 以及微波辐射计与探空站天顶温度差异 (m-p) 对大气温度的响应关系

从左到右的四列分别对应春、夏、秋、冬季

Fig. 9 the δT (a-d), meridional drift of radiosonde balloon (e-h), detection bias in radiosonde temperature (i-l), and temperature difference between MWR and the actual temperature right above radiosonde site (m-p) as a function of atmospheric temperature at altitudes of 5.5km (blue dots) and 7.5km (red dots)

The four-column layouts from left to right represent spring, summer, autumn, and winter, respectively.

5 结论与讨论

268
269
270
271
272
273
274
275

(1) 除冬季 2km 以下的大部分高度层 MD 为正值外, 其它季节和全年所有高度上的 MD 以负值为主, T_m 相较于 T_s 系统性偏低。在 8—10 km 高度范围内, 全年以及秋、冬季的 MD 随高度下降, $STD_{\delta T}$ 随高度上升, 表明 T_m 、 T_s 虽然在均值上更加接近, 但温度差异的离散程度明显上升, 随机误差增大。

(2) 与探空数据相比, 微波辐射计总是倾向于“高温低估、低温高估”, 各个季节几乎所有高度上的 δT 与 T_s 都表现为显著的负相关关系 ($p < 0.001$)。除夏季外, 其它三个季节 δT 与 T_s 的拟合斜率随高度上升而负向增大, 表明随着高度增加, 微波辐射计“高温低估、低温高估”的现象趋于严重。就季节变化而言, 微波辐射计“高温低估、低温高估”的现象

276 在冬季最为严重，夏、春季次之，秋季较轻。

277 (3) 探空气球漂移对探空与微波辐射计温度差异评价指标的影响相对复杂。一方面，
278 探空气球漂移导致 MD 被高估，即对 T_m 平均误差的评估结果比实际偏大；另一方面，探空气
279 球漂移削弱了微波辐射计“高温低估、低温高估”的程度，造成温度差异的离散程度以及温
280 度差异与环境气温的相关程度被低估。

281 虽然探空气球漂移对 MWR 与探空温度差异评估指标的影响有限 (<2%)，但文中提出的
282 量化计算气球漂移引起的探空温度探测误差的方法在未来的研究中仍具有一定的参考价
283 值，特别是目前大气温度廓线观测手段发展迅速，一些更为精准的主动探测和主被动联合探
284 测手段或反演算法大量涌现 (Kang et al, 2013; He et al, 2018; Turner and Blumberg,
285 2019)，在对这些具有更高精度的探测资料进行检验评估时，充分考虑探空气球漂移的影响
286 极为必要。

287

288 致谢：感谢中国气象局秦岭气溶胶与云微物理野外科学试验基地提供的微波辐射计数据，感谢北方天穹信
289 息技术（西安）有限公司雷连发博士提供本文所需的微波辐射计硬件设置、观测方式等细节信息。

290

291 参考文献：

292 车军辉, 赵平, 史茜, 等, 2021. 大气边界层研究进展[J]. 地球物理学报, 64(3): 735-751. Che J H, Zhao P, Shi Q, et al,
293 2021. Research progress in atmospheric boundary layer[J]. Chin J Geophys, 64(3): 735-751 (in Chinese).

294 陈哲, 2010. 中国探空气球水平漂移总体特征分析[J]. 气象, 36(2): 22-27. Chen Z, 2010. Characteristics of the overall
295 sounding data drift in China[J]. Meteor Mon, 36(2): 22-27 (in Chinese).

296 崔雅琴, 张佃国, 王洪, 等, 2019. 2015 年济南地区雾霾天气过程大气物理量特征初步分析[J]. 大气科学, 43(4): 705-718.
297 Cui Y Q, Zhang D G, Wang H, et al, 2019. Preliminary analysis of atmospheric physical quantity characteristics
298 during haze weather in Jinan area in 2015[J]. Chin J Atmos Sci, 43(4): 705-718 (in Chinese).

299 樊旭, 吴肖燕, 曲宗希, 等, 2019. 地基微波辐射计反演温/湿度廓线的 BP 神经网络训练方案对比[J]. 兰州大学学报: 自然科
300 学版, 55(5): 587-596. Fan X, Wu X Y, Qu Z X, et al, 2019. A comparison of training schemes of BP neural network
301 for retrieving relative humidity and temperature profiles from the ground-based microwave radiometer[J]. J
302 Lanzhou Univ: Nat Sci, 55(5): 587-596 (in Chinese).

303 傅新姝, 彭杰, 王晓峰, 等, 2023. 地基微波辐射计探测质量综合分析[J]. 气象, 49(10): 1235-1245. Fu X S, Peng J, Wang
304 X F, et al, 2023. Comprehensive analysis on accuracy of ground-based microwave radiometer measurements[J]. Meteor
305 Mon, 49(10): 1235-1245 (in Chinese).

306 黄俊, 廖碧婷, 王春林, 等, 2019. 新型垂直探测资料在污染天气分析中的应用[J]. 中国环境科学, 39(1): 92-105. Huang J,
307 Liao B T, Wang C L, et al, 2019. Application of new vertical detection data in the analysis of a heavy pollution
308 weather[J]. China Environ Sci, 39(1): 92-105 (in Chinese).

309 黄钰, 郭学良, 毕凯, 等, 2020. 北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究[J]. 大气科学, 44(2): 356-370.
310 Huang Y, Guo X L, Bi K, et al, 2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical
311 characteristics of snow-producing over Yanqing Mountain Area in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 44(2): 356-370
312 (in Chinese).

- 313 荆浩, 赵桂洁, 于波, 等, 2024. 北京一次罕见 1 月初雪过程的复杂降水相态成因分析[J]. 气象, 50(8): 905-916. Jing H,
314 Zhao G J, Yu B, et al, 2024. Analysis of complex precipitation types during a rare first snow process in January
315 in Beijing[J]. Meteor Mon, 50(8): 905-916 (in Chinese).
- 316 康晓燕, 张博越, 田建兵, 等, 2019. 地基微波辐射计反演产品在青海省东部适应性研究[J]. 干旱区研究, 36(2): 356-364.
317 Kang X Y, Zhang B Y, Tian J B, et al, 2019. Applicability of products retrieved from microwave radiometer in
318 east Qinghai Province[J]. Arid Zone Res, 36(2): 356-364 (in Chinese).
- 319 雷连发, 马若飞, 朱磊, 等, 2018. 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, 47(1): 11-16. Lei L F,
320 Ma R F, Zhu L, et al, 2018. Application of ground-based multi-channel microwave radiometer in atmospheric remote
321 sensing[J]. Fire Control Radar Technol, 47(1): 11-16 (in Chinese).
- 322 李浩文, 张阿思, 步巧利, 等, 2017. 2015 年干季佛山一次重空气污染过程形成机理研究[J]. 环境科学学报, 37(8):
323 3044-3053. Li H W, Zhang A S, Bu Q L, et al, 2017. Investigation of the formation mechanism of a heavy air pollution
324 episode in the dry season of 2015 in Foshan[J]. Acta Sci Circum, 37(8): 3044-3053 (in Chinese).
- 325 李金辉, 周毓荃, 岳治国, 等, 2022. 基于微波辐射计数据的秦岭南北水汽和云底高度等参量的差异[J]. 气象, 48(4):
326 452-458. Li J H, Zhou Y Q, Yue Z G, et al, 2022. Water vapor and cloud base height difference between the north
327 and south of Qinling Mountains based on microwave radiometer measurements[J]. Meteor Mon, 48(4): 452-458 (in
328 Chinese).
- 329 刘红亚, 薛纪善, 沈桐立, 等, 2005. 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, 16(4): 518-526. Liu H Y,
330 Xue J S, Shen T L, et al, 2005. Study on sounding balloon drifting and its impact on numerical predictions[J].
331 J Appl Meteor Sci, 16(4): 518-526 (in Chinese).
- 332 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. Liu X
333 L, Liu D S, Guo L J, et al, 2019. The observational precision of domestic MWP967KV ground-based microwave
334 radiometer[J]. J Appl Meteor Sci, 30(6): 731-744 (in Chinese).
- 335 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):
336 1514-1523. Liu Y Y, Mao J T, Liu J, et al, 2010. Research of BP neural network for microwave radiometer remote
337 sensing retrieval of temperature, relative humidity, cloud liquid water profiles[J]. Plateau Meteor, 29(6):
338 1514-1523 (in Chinese).
- 339 卢建平, 黄建平, 郭学良, 等, 2014. 探测大气温湿廓线的 35 通道微波辐射计设计原理与特点[J]. 气象科技, 42(2): 193-197.
340 Lu J P, Huang J P, Guo X L, et al, 2014. A 35-channel microwave radiometer for profiling atmospheric temperature
341 and humidity[J]. Meteor Sci Technol, 42(2): 193-197 (in Chinese).
- 342 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比对[J]. 应用气象学报, 29(6): 724-736. Mao J J,
343 Zhang X F, Wang Z C, et al, 2018. Comparison of brightness temperature of multi-type ground-based microwave
344 radiometers[J]. J Appl Meteor Sci, 29(6): 724-736 (in Chinese).
- 345 苗世光, 蒋维楣, 梁萍, 等, 2020. 城市气象研究进展[J]. 气象学报, 78(3): 477-499. Miao S G, Jiang W M, Liang P, et
346 al, 2020. Advances in urban meteorology in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 477-499 (in Chinese).
- 347 乔贺, 徐进, 刘寅, 等, 2019. 地基微波辐射计温湿廓线对比试验初步分析研究[J]. 环境科学与管理, 44(10): 129-134. Qiao
348 H, Xu J, Liu Y, et al, 2019. Analysis on temperature and relative humidity profiles in comparison test of
349 ground-based microwave radiometers[J]. Environ Sci Manag, 44(10): 129-134 (in Chinese).
- 350 孙囡, 陈逸伦, 傅云飞, 2019. 中国东部大气温湿廓线特征及其对辐射收支计算影响的分析[J]. 气象学报, 77(3): 563-578.

351 Sun N, Chen Y L, Fu Y F, 2019. Characteristics of temperature and humidity profiles in eastern China and their
352 impacts on radiation budget[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(3): 563-578 (in Chinese).

353 孙业乐, 2018. 城市边界层理化结构与大气污染形成机制研究进展[J]. *科学通报*, 63(14): 1374-1389. Sun Y L, 2018.
354 Vertical structures of physical and chemical properties of urban boundary layer and formation mechanisms of
355 atmospheric pollution[J]. *Chin Sci Bull*, 63(14): 1374-1389 (in Chinese).

356 唐兆康, 鲍艳松, 顾英杰, 等, 2022. 基于伴随敏感性的风廓线雷达和地基微波辐射计观测对模式预报的影响评估研究[J]. *大
357 气科学*, 46(4): 775-787. Tang Z K, Bao Y S, Gu Y J, et al, 2022. Using the adjoint-based forecast sensitivity
358 method to evaluate the observations of wind profile radar and microwave radiometer impacts on a model forecast[J].
359 *Chin J Atmos Sci*, 46(4): 775-787 (in Chinese).

360 王丹, 徐枝芳, 王瑞文, 等, 2019. 14:00 加密探空对区域数值预报系统的影响研究[J]. *高原气象*, 38(4): 872-886. Wang D,
361 Xu Z F, Wang R W, et al, 2019. Intensive radiosonde observations at 14:00 in China mainland and their impact
362 study on mesoscale numerical weather prediction[J]. *Plateau Meteor*, 38(4): 872-886 (in Chinese).

363 王丹, 王金成, 田伟红, 等, 2020. 往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析[J]. *大气科学*, 44(4): 865-884. Wang D,
364 Wang J C, Tian W H, et al, 2020. Quality control and uncertainty analysis of return radiosonde data[J]. *Chin
365 J Atmos Sci*, 44(4): 865-884 (in Chinese).

366 王耀庭, 李威, 张小玲, 等, 2012. 北京城区夏季静稳天气下大气边界层与大气污染的关系[J]. *环境科学研究*, 25(10):
367 1092-1098. Wang Y T, Li W, Zhang X L, et al, 2012. Relationship between atmospheric boundary layer and air pollution
368 in summer stable weather in the Beijing urban area[J]. *Res Environ Sci*, 25(10): 1092-1098 (in Chinese).

369 魏重, 雷恒池, 沈志来, 2001. 地基微波辐射计的雨天探测[J]. *应用气象学报*, 12(S1): 65-72. Wei C, Lei H C, Shen Z L,
370 2001. Microwave radiometric measurement in the rainy atmosphere[J]. *J Appl Meteor Sci*, 12(S1): 65-72 (in Chinese).

371 谢永坤, 刘玉芝, 黄建平, 等, 2013. 雪冰反馈对北半球经向温度梯度的影响[J]. *地球科学进展*, 28(11): 1276-1282. Xie Y
372 K, Liu Y Z, Huang J P, et al. 2013. Impact of the ice-albedo feedback on meridional temperature gradient of
373 northern hemisphere[J]. *Adv Earth Sci*, 28(11): 1276-1282 (in Chinese).

374 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):
375 238-248. Xu G R, Zhang W G, Wan X, et al, 2019. Analysis on atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer
376 observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Torr Rain Dis*, 38(3): 238-248 (in Chinese). (查
377 阅网上资料, 未找到本条文献刊名缩写, 请确认)

378 姚作新, 吕鸣, 贺晓东, 等, 2011. 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*,
379 5(1): 38-43. Yao Z X, Lv M, He X D, et al, 2011. Research on auxiliary exploration of MP-3000A ground-based
380 microwave radiometer in Urumqi[J]. *Desert Oasis Meteor*, 5(1): 38-43 (in Chinese).

381 张文刚, 徐桂荣, 廖可文, 等, 2013. 降水对地基微波辐射计反演误差的影响[J]. *暴雨灾害*, 32(1): 70-76. Zhang W G, Xu G
382 R, Liao K W, et al, 2013. Impact of precipitation on the retrieval deviation of ground-based microwave
383 radiometer[J]. *Torr Rain Dis*, 32(1): 70-76 (in Chinese).

384 郑飒飒, 2019. MWP967 KV 型地基微波辐射计反演产品的质量评估[J]. *高原山地气象研究*, 39(2): 82-86. Zheng S S, 2019.
385 Quality assessment on inverted products of MWP967 KV ground-based microwave radiometer[J]. *Plateau Mountain
386 Meteor Res*, 39(2): 82-86 (in Chinese).

387 Battaglia A, Saavedra P, Rose T, et al, 2010. Characterization of precipitating clouds by ground-based measurements
388 with the triple-frequency polarized microwave radiometer ADMIRARI[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(3): 394-414.

389 Choi Y, Ha J C, Lim G H, 2015. Investigation of the effects of considering balloon drift information on radiosonde
390 data assimilation using the four-dimensional variational method[J]. *Wea Forecasting*, 30(3): 809-826.

391 Cimini D, Nelson M, Guldner J, et al, 2015. Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational
392 meteorology[J]. *Atmos Meas Tech*, 8(1): 315-333.

393 Cui C G, Wan R, Wang B, et al, 2015. The Mesoscale Heavy Rainfall Observing System (MHROS) over the middle region
394 of the Yangtze River in China[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(19): 10399-10417.

395 He J X, Chen S Y, Zhang Y C, et al, 2018. A novel calibration method for pure rotational Raman lidar temperature
396 profiling[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 123(19): 10925-10934.

397 He W Y, Chen H B, Li J, 2020. Influence of assimilating ground-based microwave radiometer data into the WRF model
398 on precipitation[J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 13(2): 107-112.

399 Kang S H, Goo T Y, Ou M L, 2013. Improvement of AERI *T/q* retrievals and their validation at Anmyeon-do, South Korea[J].
400 *J Atmos Ocean Technol*, 30(7): 1433-1446.

401 Laroche S, Sarrazin R, 2013. Impact of radiosonde balloon drift on numerical weather prediction and verification[J].
402 *Wea Forecasting*, 28(3): 772-782.

403 Madhulatha A, Rajeevan M, Ratnam M V, et al, 2013. Nowcasting severe convective activity over southeast India using
404 ground-based microwave radiometer observations[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 118(1): 1-13.

405 Ratnam M V, Santhi Y D, Rajeevan M, et al, 2013. Diurnal variability of stability indices observed using radiosonde
406 observations over a tropical station: comparison with microwave radiometer measurements[J]. *Atmos Res*, 124:
407 21-33.

408 Turner D D, Clough S A, Liljegren J C, et al, 2007. Retrieving liquid water path and precipitable water vapor from
409 the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) microwave radiometers[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 45(11):
410 3680-3690.

411 Turner D D, Blumberg W G, 2019. Improvements to the AERIoe thermodynamic profile retrieval algorithm[J]. *IEEE J*
412 *Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens*, 12(5): 1339-1354.

413 Zhao D D, Xin J Y, Gong C S, et al, 2019. The formation mechanism of air pollution episodes in Beijing city: insights
414 into the measured feedback between aerosol radiative forcing and the atmospheric boundary layer stability[J].
415 *Sci Total Environ*, 692: 371-381.

416 Zhao H J, Ma X H, Jia G R, et al, 2022. Synergistic retrieval of temperature and humidity profiles from space-based
417 and ground-based infrared sounders using an optimal estimation method[J]. *Remote Sens*, 14(20): 5256.

418