

董自鹏,李星敏,彭艳,等,2025.探空气球漂移对微波辐射计与探空温度差异的影响[J].气象,51(5):529-541. Dong Z P, Li X M, Peng Y, et al, 2025. Impact of sounding balloon drift on temperature differences between microwave radiometer and radiosonde[J]. Meteor Mon, 51(5):529-541(in Chinese).

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

提 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的影响,利用陕西省西安市泾河气象站为期两年的微波辐射计和探空资料,分析了两者的温度差异(δT)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: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;在同一高度上,环境温度与 δT 呈显著负相关,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;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

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.040101

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 Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710016

2 CMA Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau Key Laboratory, Xi'an 710016

3 Shaanxi Meteorological Service, Xi'an 710014

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 differences (δT) between MWR and radiosonde, more than two years of temperature profiles derived from MWR of Xi'an Jinghe Station in Shaanxi Province are tested against those from radiosondes. A method for quantitative assessment of bias in radiosonde temperature caused by the drift of sounding balloon is proposed. It is demonstrated that there are significant spatial and temporal changes in the 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 altitudes in all seasons. At a given altitude, the δT is significantly negatively correlated to the ambient temperature represented

* 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)和陕西省重点研发计划(2024SF-YBXM-583、2023-YBSF-328)共同资助

2024年5月9日收稿; 2025年3月12日收修定稿

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

by T_s . The higher the temperature, the more obvious the underestimation of the temperature by the MWR, and vice versa. This leads to a phenomenon of “overestimating low temperature and underestimating high temperature”, which is more obvious at high altitudes than at low altitudes, and more obvious in winter and summer than in spring and autumn. 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 to the ambient temperature. Therefore, sounding balloon drift causes mean deviation (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 (RMSD) of the microwave radiometer and radiosonde temperature is below 2%, and its contribution to δT is much smaller than that of the retrieval algorithm.

Key words: microwave radiometer, sounding balloon drift, temperature profile, radiosonde

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,2019;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;车军辉等,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。本文利用陕西省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 3 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。

1 资料与方法

1.1 数据和评估指标

本文数据来源于西安市泾河国家气象站(图 1) 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日的 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,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

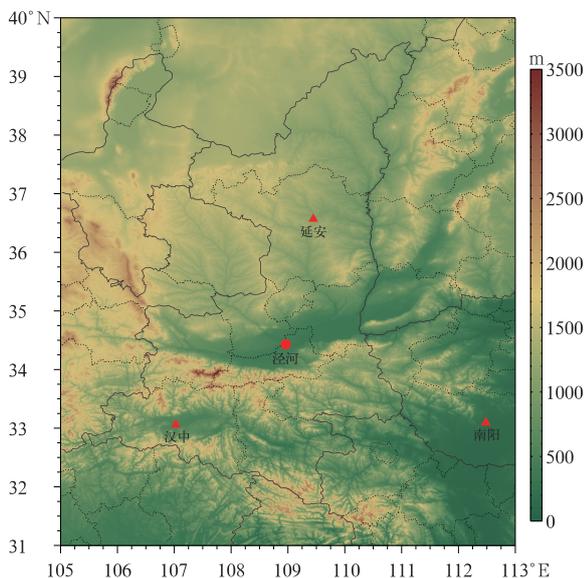


图 1 西安泾河站(红色圆点)及其周边探空站(红色三角)地理位置和地势(填色)

Fig. 1 Topography (colored) and location of Jinghe Station in Xi'an (red dot) and other three radiosonde stations (red triangle)

为 2 min, 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 年 1 月至 2017 年 6 月的历史探空数据, 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, 为了检验液氮标定前后亮温观测数据的连续性, 利用 MonoRTM(Turner et al, 2007)模式和末次标定日期(2019 年 4 月 18 日)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, 匹配原则为时间最临近和高度最邻近。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 min), 高度差不超过探空垂直分辨率的一半(通常 < 5 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; 傅新妹等, 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 1 小时内发生降水的个例。

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:

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

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

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

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

式中: 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。

对式(3)两侧取平方并展开, 联合式(2)、式(4), 可以得到:

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

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)和最小二乘法线性拟合斜率(S)探讨微波辐射计与探空温度间的吻合度以及探空气球漂移对 δT 的影响等。

1.2 探空气球漂移引起的温度探测误差计算

为了探讨气球漂移对探空温度探测的影响, 文中采用泾河站周边的汉中、延安和南阳三个探空站的同期观测资料(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温度经向梯度($\nabla_m T$)和纬向梯度($\nabla_z T$)。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)有如下关系:

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

式中: $\Delta\varphi$ 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)。

结合式(1)和式(6), T_M 与 T_Z 的差异为:

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

2 微波辐射计温度与探空温度比较

2.1 全年温度廓线比较

图 2 给出了 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日非降水时段 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 2a),但在同一高度上, T_M 普遍低于 T_S ,MD 以负值为主(图 2b),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 左右变化至 -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 2c);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。

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晓璐等(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。

2.2 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他季节结果,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

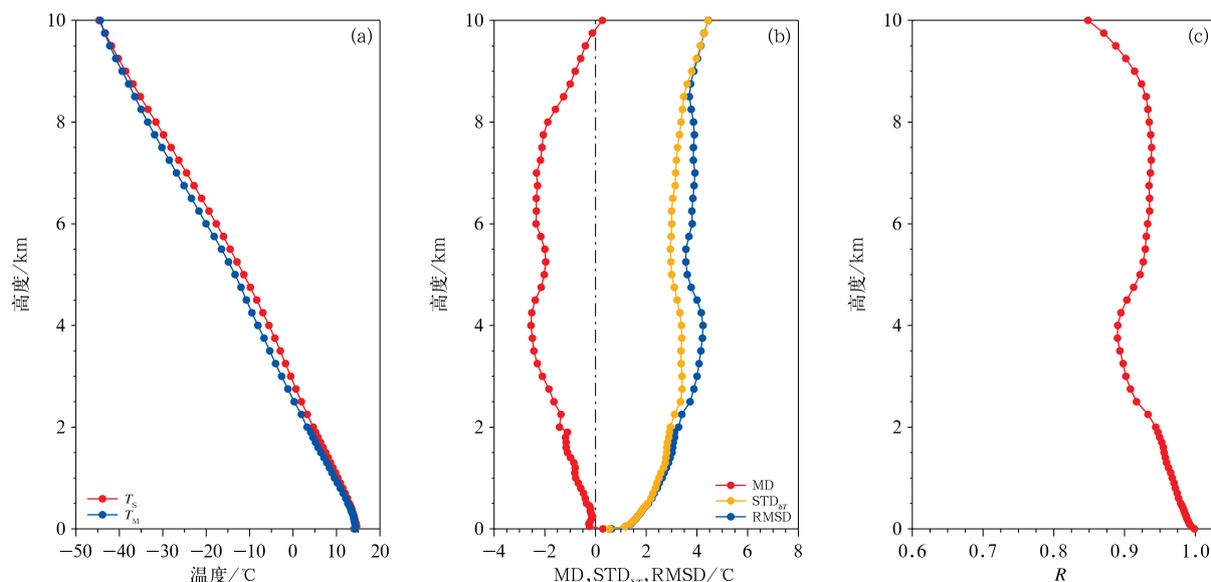


图 2 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日泾河站探空和微波辐射计观测的(a)平均温度廓线,(b)MD、 $STD_{\delta T}$ 、RMSD 廓线,(c)微波辐射计与探空温度线性相关系数 R 廓线

Fig. 2 (a) Mean temperature profiles, (b) MD, $STD_{\delta T}$, and RMSD for simultaneous temperature profiles observed by radiosonde and MWR, and (c) profile of correlation coefficient (R) between radiosonde and MWR temperatures in Jinghe Station from 20 June 2017 to 15 July 2019

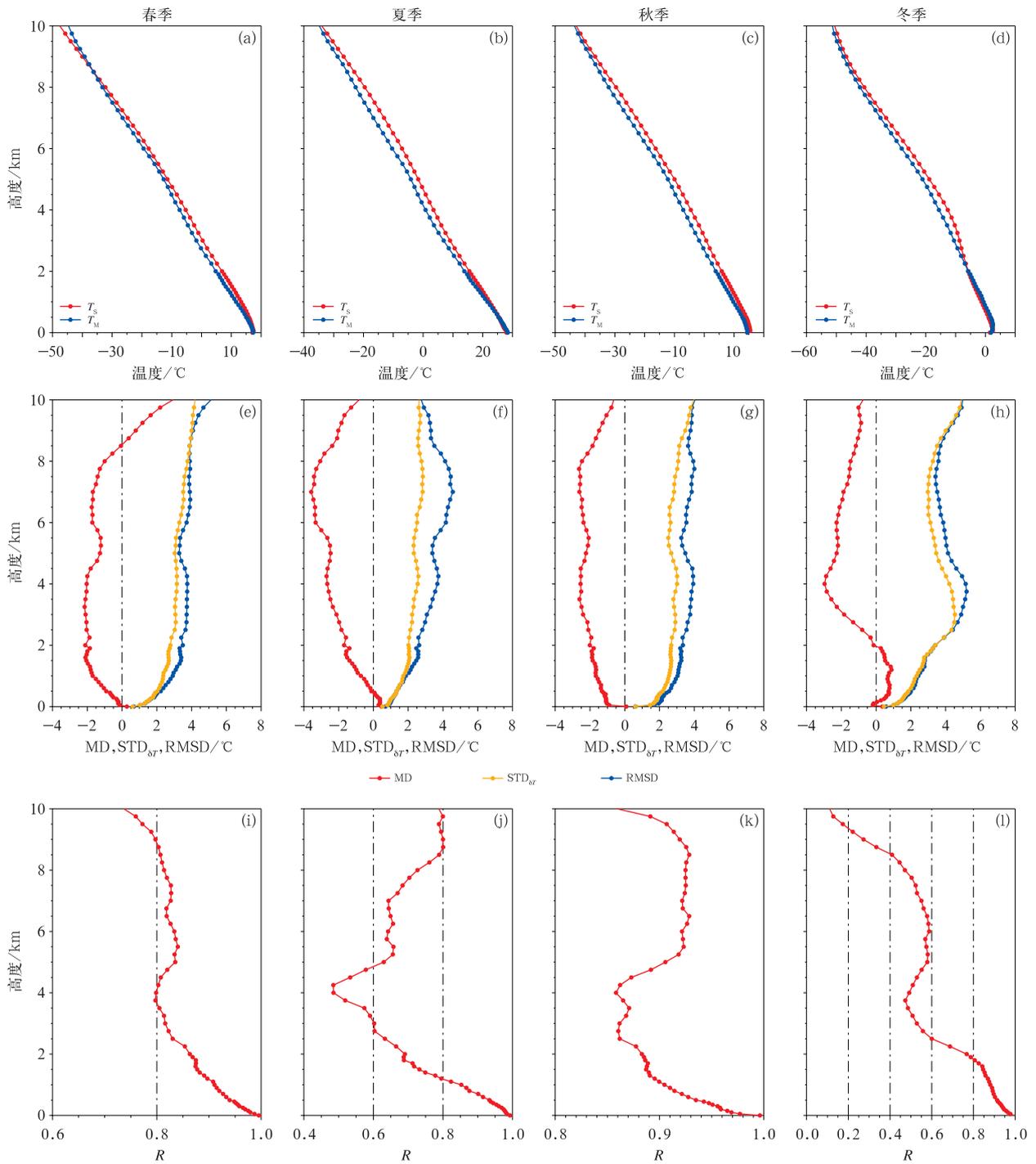


图 3 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日泾河站春、夏、秋、冬四个季节(a~d)探空和微波辐射计平均温度廓线，(e~h)MD、 $STD_{\delta T}$ 、RMSD 廓线以及(i~l)微波辐射计与探空温度相关系数 R 廓线

Fig. 3 (a~d) Mean temperature profiles, (e~h) MD, $STD_{\delta T}$, and RMSD for simultaneous temperature profiles observed by radiosonde and MWR, and (i~l) profile of correlation coefficient (R) between radiosonde and MWR temperatures in Jinghe Station in spring, summer, autumn and winter from 20 June 2017 to 15 July 2019

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 R 都在 0.90 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。

2.3 δT 与环境温度的关联性

图 4 给出不同季节 δT 与 T_s 的线性拟合斜率、显著性水平检验 (P) 以及样本数 (N_s), 各季节所有高度上的 δT 与 T_s 都表现为负相关, 且除了春季、秋季 300 m 以下以及夏季 1 km 附近高度层外, 其他高度上 δT 与 T_s 线性关系都能够通过 0.01 的显著性水平, 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”。

就垂直变化而言, 春、秋、冬三个季节 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, 微波辐射计在给定高度上“高温低估、低温高估”的现象趋于严重。四个季节中, 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 ; 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 -0.40 , 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, 夏季、春季次之, 秋季较轻。

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。

3 探空气球漂移对微波辐射计与探空温度差异的影响

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了 2 km 以上温度的经向梯度 ($\nabla_m T$) 和纬向梯度 ($\nabla_z T$)。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, 分别为 $-0.013 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $-0.010 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 春季和夏季较小, 分别为 $-0.0080 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $-0.048 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 全年均值为 $-0.0093 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 与谢永坤等 (2013) 基于多年模式数据计算的结果相当。相较于 $\nabla_m T$, $\nabla_z T$ 几乎要小一个量级, 四个季节均值介于 $-0.0015 \sim -0.00033 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 全年均值为 $-0.00091 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 。对探空气球漂移距离统计发现, 其冬季漂移距离最远, 秋季、春季次之, 夏季最近。除夏季经向、纬向漂移距离相当以外, 其他季节纬向漂移距离是经向漂移距离的 2.4~3.9 倍。

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 7a~7d), 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

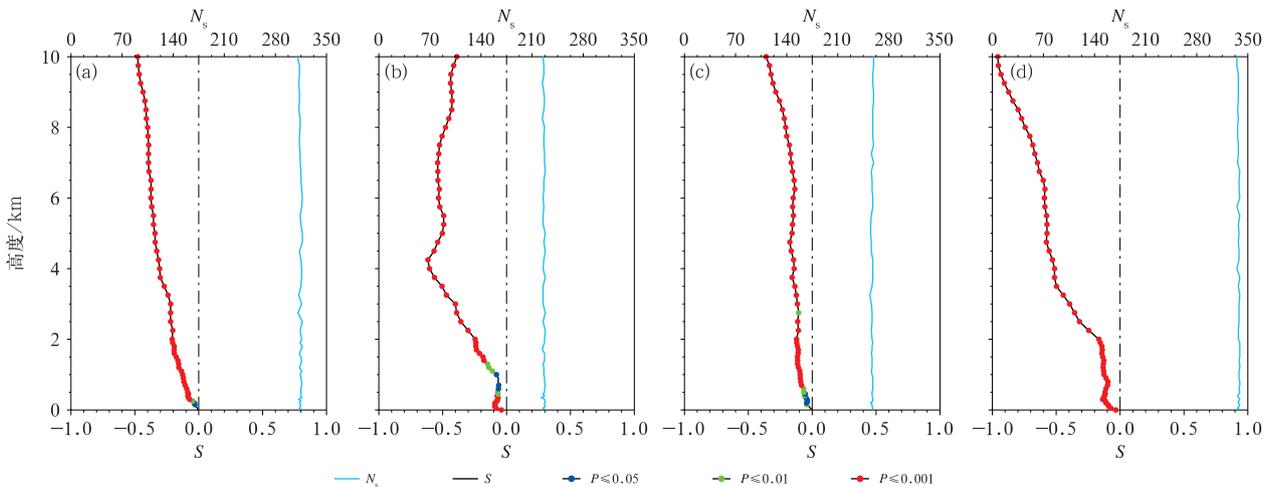


图 4 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日泾河站 (a) 春、(b) 夏、(c) 秋、(d) 冬四个季节 δT 与 T_s 线性回归的斜率 (S) 和不同显著性水平检验 (P) 以及配对样本数 (N_s)

Fig. 4 Slopes (S) and different significance level tests (P) of the linear regression between δT and T_s along with the paired-sample number (N_s) in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter in Jinghe Station from 20 June 2017 to 15 July 2019

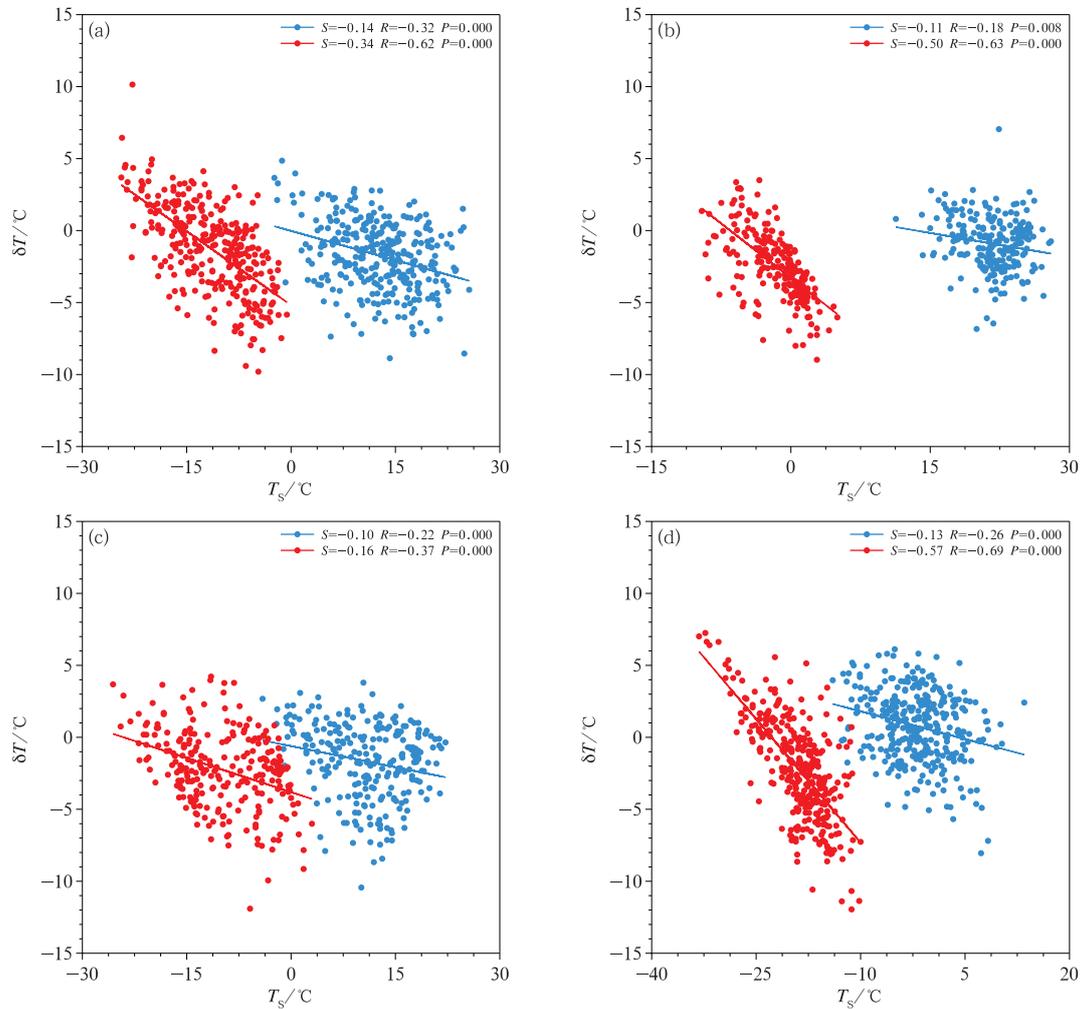


图 5 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日泾河站(a)春,(b)夏,(c)秋,(d)冬四个季节 850 hPa(蓝色)和 500 hPa(红色) δT 与 T_s 的对应关系

Fig. 5 Relation of δT and T_s at 850 hPa (blue dot) and 500 hPa (red dot) in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter in Jinghe Station from 20 June 2017 to 15 July 2019

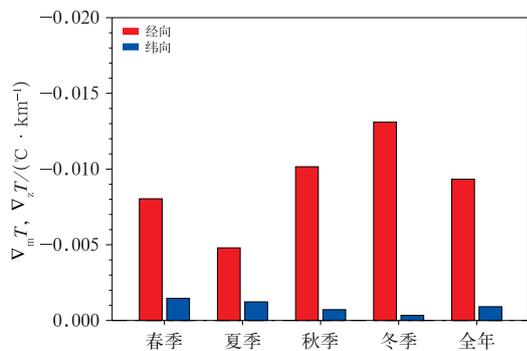


图 6 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日研究区内经向、纬向温度梯度的季节和全年变化
Fig. 6 Seasonal and annual variations of meridional and zonal temperature gradients in the study region from 20 June 2017 to 15 July 2019

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 $-0.47 \sim 1.02^{\circ}\text{C}$ 。虽然 $\nabla_m T$ 远大于 $\nabla_z T$,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,而纬向漂移造成春季、夏季探空温度偏低,秋季、冬季偏高。

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

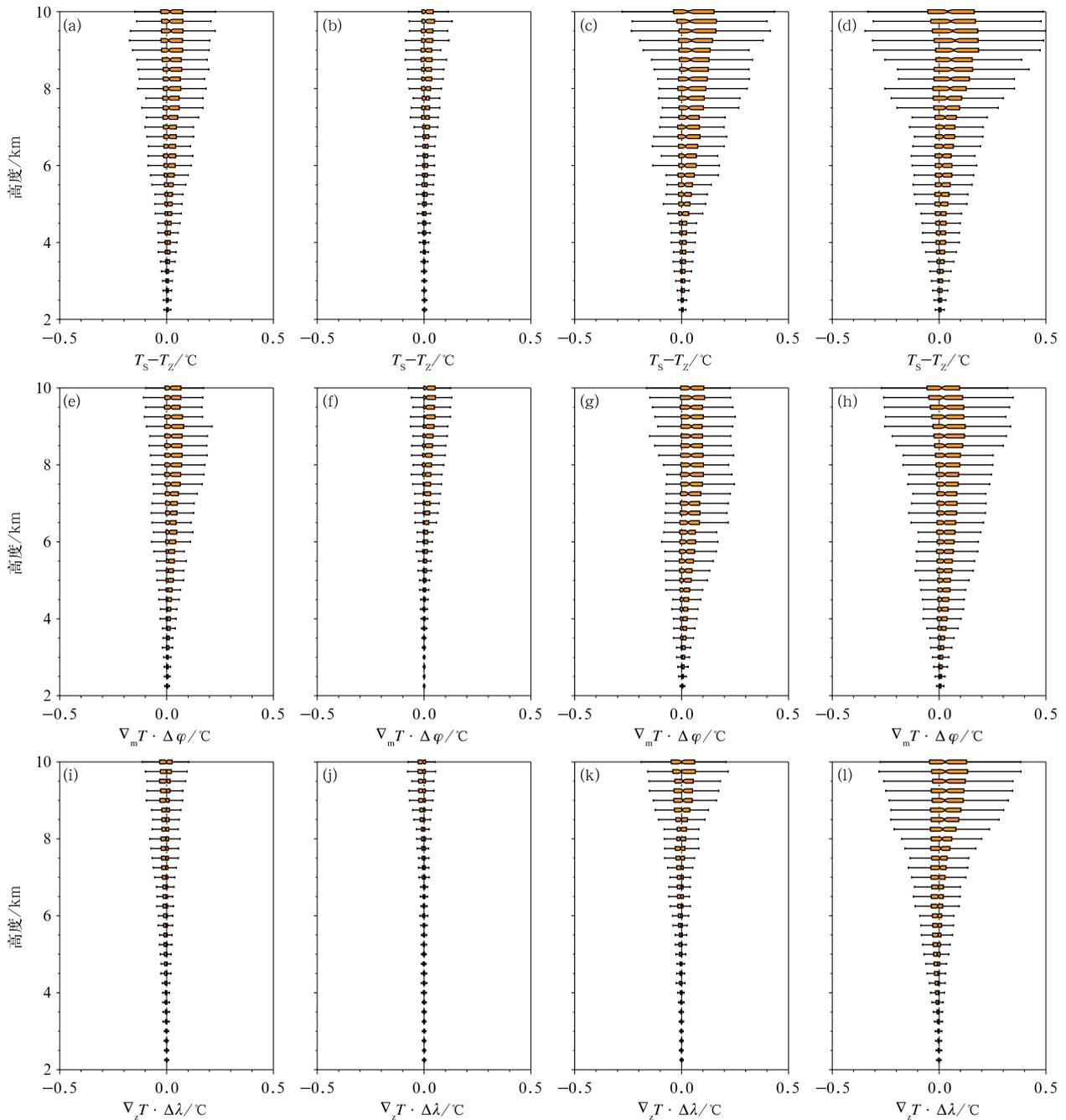


图 7 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日涇河站由(a~d)探空气球漂移及其(e~h)经向、(i~l)纬向漂移分量引起的

(a, e, i)春, (b, f, j)夏, (c, g, k)秋, (d, h, l)冬四个季节探空温度的探测误差

Fig. 7 Biases in radiosonde temperature records caused by (a–d) the drift of sounding balloon and its drift of (e–h) meridional and (i–l) zonal components in (a, e, i) spring, (b, f, j) summer, (c, g, k) autumn and (d, h, l) winter in Jinghe Station from 20 June 2017 to 15 July 2019

河站,探空气球漂移除了导致春季 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。

图 8a~8d 给出探空气球漂移引起的 $STD_{\delta T}$ 、

RMSD 的相对变化。可以看到,探空气球漂移引起的 $STD_{\delta T}$ 、RMSD 的相对变化不足 2%。在四个季节中,探空气球漂移引起的秋季 $STD_{\delta T}$ 、RMSD 的相对变化最大,使 6~9 km 的 $STD_{\delta T}$ 和 RMSD 分别

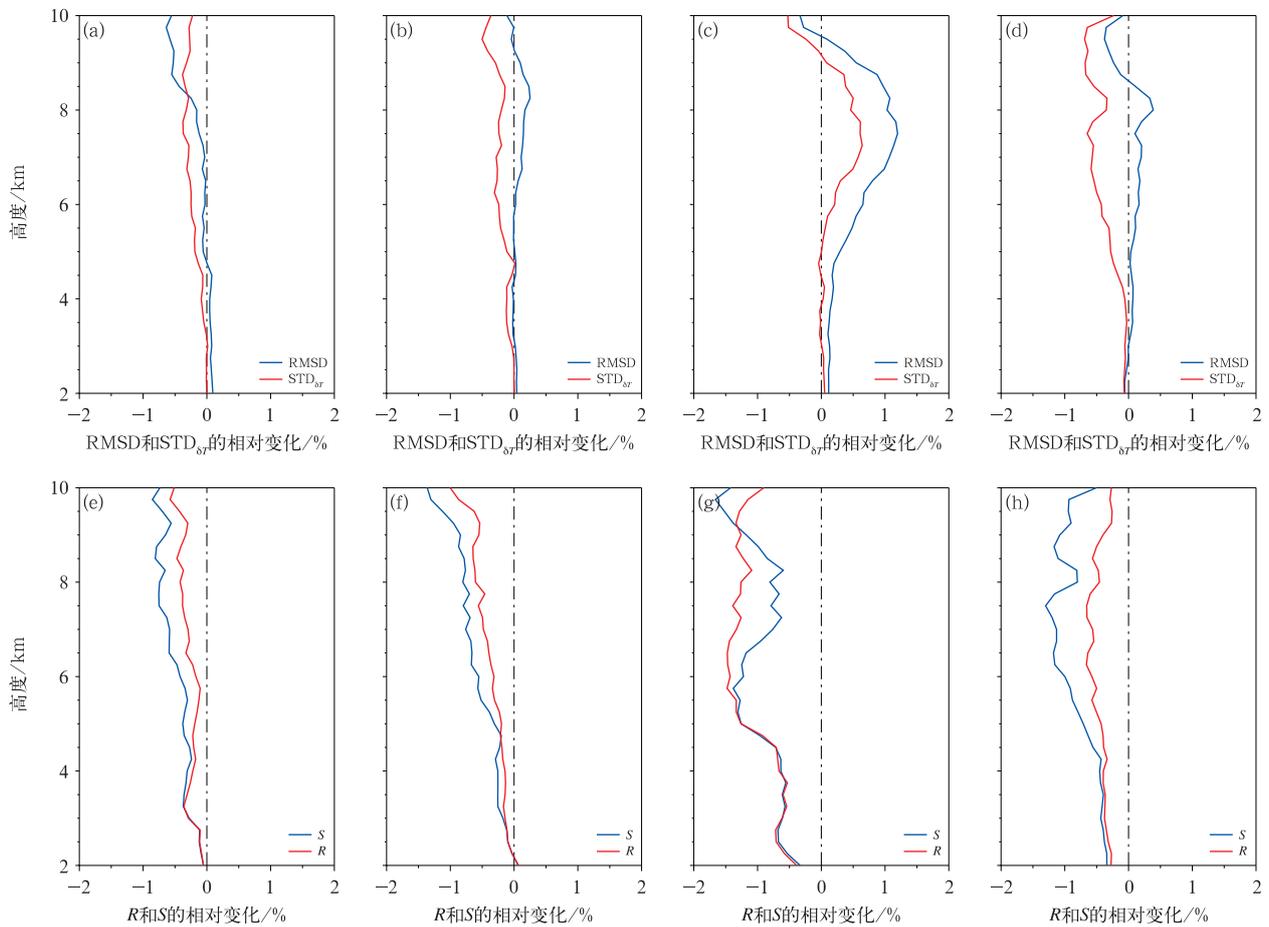


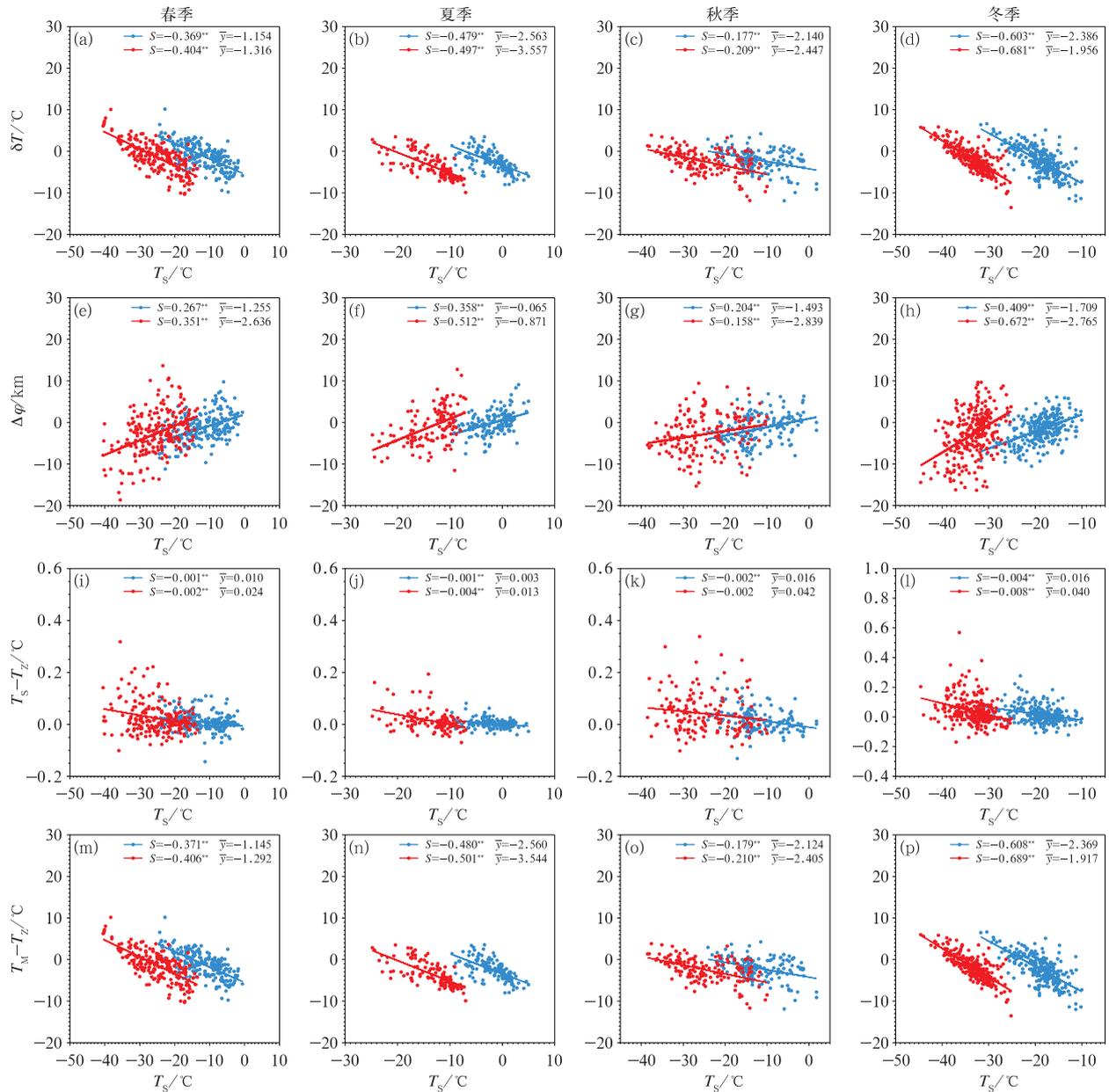
图 8 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日由探空气球漂移引起的(a~d)STD_{δT} 和 RMSD 的相对变化以及(e~h)δT 与 T_s 拟合斜率(S)和相关系数(R)的相对变化

Fig. 8 Relative change in (a~d) STD_{δT} and RMSD, and (e~h) correlation coefficient (R) and slope (S) of the linear regression between δT and T_s caused by the sounding balloon drift in Jinghe Station from 20 June 2017 to 15 July 2019

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 4 km 以上的 STD_{δT} 系统偏小。由于 RMSD 的变化同时取决于 MD 和 STD_{δT} 两个部分,因此,探空气球漂移对 RMSD 的影响更为复杂,夏、秋、冬三个季节以导致 RMSD 的高估为主,春季以导致 RMSD 的低估为主。总体而言,探空气球漂移导致 MD 和 RMSD 被高估,STD_{δT} 被低估。与此同时,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 8e~8h),降低了 δT 与环境温度的相关性,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”的程度。

为了分析探空气球漂移对 MD、STD_{δT}、RMSD 造成复杂影响的成因,图 9 给出 5.5 km 和 7.5 km 高度上 δT、Δφ、T_s - T_Z、T_M - T_Z 对环境温度依赖

关系的细节信息。如图 9a~9d 所示,微波辐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 9e~9h),引起探空温度偏高于探空站上空实际温度(图 9i~9l),而微波辐射计在低温段的反演结果又高于探空温度,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 9m~9p),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,两者共同导致 STD_{δT} 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率(图 9m~9p)。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”的程度将进一步扩大。



注: ** 表示 $P \leq 0.01$, \bar{y} 表示因变量的平均值。

图 9 2017 年 6 月 20 日至 2019 年 7 月 15 日泾河站春、夏、秋、冬四个季节 5.5 km (蓝点) 和 7.5 km (红点) 高度上 (a~d) δT , (e~h) 探空气球经向漂移, (i~l) 探空温度探测误差以及 (m~p) 微波辐射计与探空站天顶温度差异对探空温度的响应关系
Fig. 9 (a~d) δT , (e~h) meridional drift of sounding balloon, (i~l) detection bias in radiosonde temperature, and (m~p) temperature difference between MWR and the actual temperature right above radiosonde site as a function of T_s at altitudes of 5.5 km (blue dot) and 7.5 km (red dot) in Jinghe Station in different seasons from 20 June 2017 to 15 July 2019

4 结论与讨论

(1) 除冬季 2 km 以下的大部分高度层 MD 为

正值外, 其他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($P < 0.001$)。除夏季外,其他三个季节 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”的现象在冬季最为严重,夏季、春季次之,秋季较轻。

(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,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度差异与环境气温的相关程度被低估。

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(RMSD、 $STD_{\delta T}$ 相对变化 $< 2\%$),但文中提出的定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测手段或反演算法大量涌现(Kang et al, 2013; He et al, 2018; Turner and Blumberg, 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极为必要。

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。

参考文献

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, 2021. Research progress in atmospheric boundary layer[J]. Chin J Geophys, 64(3):735-751(in Chinese).

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 sounding data drift in China[J]. Meteor Mon, 36(2):22-27(in Chinese).

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. Cui Y Q, Zhang D G, Wang H, et al, 2019. Preliminary analysis of atmospheric physical quantity characteristics during haze weather in Jinan Area in 2015[J]. Chin J Atmos Sci, 43(4):705-718(in

Chinese).

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 for retrieving relative humidity and temperature profiles from the ground-based microwave radiometer[J]. J Lanzhou Univ: Nat Sci, 55(5):587-596(in Chinese).

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 X F, et al, 2023. Comprehensive analysis on accuracy of ground-based microwave radiometer measurements[J]. Meteor Mon, 49(10):1235-1245(in Chinese).

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, Liao B T, Wang C L, et al, 2019. Application of new vertical detection data in the analysis of a heavy pollution weather[J]. China Environ Sci, 39(1):92-105(in Chinese).

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. Huang Y, Guo X L, Bi K, et al, 2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing over Yanqing Mountain Area in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 44(2):356-370(in Chinese).

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, Zhao G J, Yu B, et al, 2024. Analysis of complex precipitation types during a rare first snow process in January in Beijing[J]. Meteor Mon, 50(8):905-916(in Chinese).

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. Kang X Y, Zhang B Y, Tian J B, et al, 2019. Applicability of products retrieved from microwave radiometer in east Qinghai Province[J]. Arid Zone Res, 36(2):356-364(in Chinese).

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, Ma R F, Zhu L, et al, 2018. Application of ground-based multi-channel microwave radiometer in atmospheric remote sensing[J]. Fire Control Radar Technol, 47(1):11-16(in Chinese).

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):3044-3053. Li H W, Zhang A S, Bu Q L, et al, 2017. Investigation of the formation mechanism of a heavy air pollution episode in the dry season of 2015 in Foshan[J]. Acta Sci Circum, 37(8):3044-3053(in Chinese).

李金辉,周毓莹,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):452-458. Li J H, Zhou Y Q, Yue Z G, et al, 2022. Water vapor and cloud base height difference between the north and south of Qinling Mountains based on microwave radiometer measurements[J]. Meteor Mon, 48(4):452-458(in Chinese).

- 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, Xue J S, Shen T L, et al, 2005. Study on sounding balloon drifting and its impact on numerical predictions[J]. J Appl Meteor Sci, 16(4): 518-526(in Chinese).
- 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 L, Liu D S, Guo L J, et al, 2019. The observational precision of domestic MWP967KV ground-based microwave radiometer[J]. J Appl Meteor Sci, 30(6): 731-744(in Chinese).
- 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. Liu Y Y, Mao J T, Liu J, et al, 2010. Research of BP neural network for microwave radiometer remote sensing retrieval of temperature, relative humidity, cloud liquid water profiles[J]. Plateau Meteor, 29(6): 1514-1523(in Chinese).
- 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. Lu J P, Huang J P, Guo X L, et al, 2014. A 35-channel microwave radiometer for profiling atmospheric temperature and humidity[J]. Meteor Sci Technol, 42(2): 193-197(in Chinese).
- 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, Zhang X F, Wang Z C, et al, 2018. Comparison of brightness temperature of multi-type ground-based microwave radiometers[J]. J Appl Meteor Sci, 29(6): 724-736(in Chinese).
- 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 al, 2020. Advances in urban meteorology in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 477-499(in Chinese).
- 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 H, Xu J, Liu Y, et al, 2019. Analysis on temperature and relative humidity profiles in comparison test of ground-based microwave radiometers[J]. Environ Sci Manag, 44(10): 129-134(in Chinese).
- 孙园,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. Sun N, Chen Y L, Fu Y F, 2019. Characteristics of temperature and humidity profiles in eastern China and their impacts on radiation budget[J]. Acta Meteor Sin, 77(3): 563-578(in Chinese).
- 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. Vertical structures of physical and chemical properties of urban boundary layer and formation mechanisms of atmospheric pollution[J]. Chin Sci Bull, 63(14): 1374-1389(in Chinese).
- 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 method to evaluate the observations of wind profile radar and microwave radiometer impacts on a model forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 775-787(in Chinese).
- 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, Wang J C, Tian W H, et al, 2020. Quality control and uncertainty analysis of return radiosonde data[J]. Chin J Atmos Sci, 44(4): 865-884(in Chinese).
- 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, Xu Z F, Wang R W, et al, 2019. Intensive radiosonde observations at 14:00 in China mainland and their impact study on mesoscale numerical weather prediction[J]. Plateau Meteor, 38(4): 872-886(in Chinese).
- 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):1092-1098. Wang Y T, Li W, Zhang X L, et al, 2012. Relationship between atmospheric boundary layer and air pollution in summer stable weather in the Beijing urban area[J]. Res Environ Sci, 25(10): 1092-1098(in Chinese).
- 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, 2001. Microwave radiometric measurement in the rainy atmosphere[J]. J Appl Meteor Sci, 12(S1): 65-72(in Chinese).
- 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 K, Liu Y Z, Huang J P, et al, 2013. Impact of the ice-albedo feedback on meridional temperature gradient of Northern Hemisphere[J]. Adv Earth Sci, 28(11): 1276-1282(in Chinese).
- 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夜大气温湿廓线分析[J].暴雨灾害,38(3):238-248. Xu G R, Zhang W G, Wan X, et al, 2019. Analysis on atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Torr Rain Dis, 38(3): 238-248(in Chinese).
- 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,5(1):38-43. Yao Z X, Lv M, He X D, et al, 2011. Research on auxiliary exploration of MP-3000A ground-based microwave radiometer in Urumqi[J]. Desert Oasis Meteor, 5(1): 38-43(in Chinese).
- 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 R, Liao K W, et al, 2013. Impact of precipitation on the retrieval deviation of ground-based microwave radiometer[J]. Torr Rain Dis, 32(1): 70-76(in Chinese).
- 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. Quality assessment on inverted products of MWP967 KV ground-based microwave radiometer[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 39(2): 82-86(in Chinese).
- Battaglia A, Saavedra P, Rose T, et al, 2010. Characterization of precipitating clouds by ground-based measurements with the triple-frequency polarized microwave radiometer ADMIRARI[J]. J

- Appl Meteor Climatol, 49(3):394-414.
- Choi Y, Ha J C, Lim G H, 2015. Investigation of the effects of considering balloon drift information on radiosonde data assimilation using the four-dimensional variational method[J]. Wea Forecasting, 30(3):809-826.
- Cimini D, Nelson M, Güldner J, et al, 2015. Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational meteorology [J]. Atmos Meas Tech, 8(1):315-333.
- Cui C G, Wan R, Wang B, et al, 2015. The Mesoscale Heavy Rainfall Observing System (MHRoS) over the middle region of the Yangtze River in China[J]. J Geophys Res: Atmos, 120(19):10399-10417.
- He J X, Chen S Y, Zhang Y C, et al, 2018. A novel calibration method for pure rotational Raman lidar temperature profiling[J]. J Geophys Res: Atmos, 123(19):10925-10934.
- He W Y, Chen H B, Li J, 2020. Influence of assimilating ground-based microwave radiometer data into the WRF model on precipitation[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 13(2):107-112.
- 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]. J Atmos Ocean Technol, 30(7):1433-1446.
- Laroche S, Sarrazin R, 2013. Impact of radiosonde balloon drift on numerical weather prediction and verification[J]. Wea Forecasting, 28(3):772-782.
- 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):1-13.
- Ratnam M V, Santhi Y D, 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.
- Turner D D, Blumberg W G, 2019. Improvements to the AERIoe thermodynamic profile retrieval algorithm[J]. IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens, 12(5):1339-1354.
- Turner D D, Clough S A, Liljegren J C, et al, 2007. Retrieving liquid water path and precipitable water vapor from the atmospheric radiation measurement (ARM) microwave radiometers [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 45(11):3680-3690.
- Zhao D D, Xin J Y, Gong C S, et al, 2019. The formation mechanism of air pollution episodes in Beijing City: insights into the measured feedback between aerosol radiative forcing and the atmospheric boundary layer stability[J]. Sci Total Environ, 692:371-381.
- Zhao H J, Ma X H, Jia G R, et al, 2022. Synergistic retrieval of temperature and humidity profiles from space-based and ground-based infrared sounders using an optimal estimation method[J]. Remote Sens, 14(20):5256.

(本文责编:俞卫平)