

杨国彬,郭启云,夏元彩,等,2025. GTS12 与 GTS1 探空仪平行观测数据对比分析和评估[J]. 气象,51(5):552-565. Yang G B, Guo Q Y, Xia Y C, et al, 2025. Comparative analysis and evaluation of parallel observation data of GTS12 and GTS1 radiosondes [J]. Meteor Mon, 51(5):552-565 (in Chinese).

GTS12 与 GTS1 探空仪平行观测数据 对比分析和评估^{*}

杨国彬¹ 郭启云² 夏元彩² 蒋 锐¹ 舒康宁¹ 周明刚¹

¹ 云南省气象台, 昆明 650034

² 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

提 要: 基于全国 89 个高空气象观测站 GTS12 与 GTS1 探空仪的平行观测数据和 CMA-GFS 模式预报场数据对两种探空仪各标准等压面上的观测数据进行对比分析和评估。结果表明: 两种探空仪温度和位势高度偏差绝对值除个别等压面外分别小于 0.5℃ 和 30.0 gpm, 表明两种探空仪测得的温度和位势高度一致性较好, 而 GTS12 探空仪测得的相对湿度较 GTS1 探空仪平均偏大约 4.6%; 对于观测数据稳定性, 在中低层等压面两种探空仪差异不大, 在高层 GTS12 探空仪的温度和位势高度明显优于 GTS1 探空仪, 但相对湿度略差于 GTS1 探空仪。GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪观测数据相对于模式数据, 温度偏差绝对平均值分别约为 0.34℃ 和 0.44℃, 平均均方根误差分别约为 1.23℃ 和 1.31℃, 平均相关系数分别约为 0.908 和 0.916; 位势高度对应分别为 11.05 gpm 和 14.97 gpm, 18.76 gpm 和 25.16 gpm, 0.948 和 0.934; 相对湿度对应分别为 5.26% 和 8.59%, 16.19% 和 18.44%, 0.687 和 0.627, 表明 GTS12 探空仪观测数据与模式数据一致性优于 GTS1 探空仪。GTS12 探空仪传感器技术的改进有效提升了探空仪的整体观测性能。

关键词: GTS12 探空仪, GTS1 探空仪, 平行观测数据, 对比分析, 评估

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.021601

Comparative Analysis and Evaluation of Parallel Observation Data of GTS12 and GTS1 Radiosondes

YANG Guobin¹ GUO Qiyun² XIA Yuancan² JIANG Rui¹ SHU Kangning¹ ZHOU Minggang¹

¹ Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

² CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the parallel observation data of GTS12 and GTS1 radiosondes from 89 high altitude meteorological observation stations in China and the CMA-GFS model field data, a comparative analysis and evaluation of the observation data of the two radiosondes on each mandatory level are conducted. The results show that the GTS12 and GTS1 radiosondes have good consistency in temperature and geopotential height observation data, and the absolute values of biases in temperature and geopotential height are less than 0.5℃ and 30.0 gpm except on a few mandatory levels. The relative humidity observed by GTS12 radiosonde is about 4.6% higher than that by GTS1 radiosonde on average. For the stability of observation data, there is not much difference between the two types of radiosondes on the middle and lower mandatory

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506201、2018YFC1506204)、云南省气象局科研项目(YZ202112、YZ202401)、云南省气象局创新团队(2022QN01、2024CX02)和西南区域多源气象数据融合实况产品研究与应用重点创新团队(西南气中[2024]10号)共同资助

2024 年 3 月 28 日收稿; 2025 年 2 月 8 日收修定稿

第一作者: 杨国彬, 主要从事气象资料质量控制与应用研究. E-mail: yanggb_ynu@163.com

通讯作者: 郭启云, 主要从事探空关键技术研究及应用. E-mail: feng_cloudy@163.com

levels. On the upper mandatory levels, the temperature and geopotential height observed by the GTS12 radiosonde are significantly superior to those by the GTS1 radiosonde, but the relative humidity by the former is slightly worse than that by the latter. The absolute average biases of temperature observed by GTS12 and GTS1 radiosondes relative to the CMA-GFS model data are about 0.34°C and 0.44°C , respectively. Their average root mean square errors are about 1.23°C and 1.31°C , and the average correlation coefficients are about 0.908 and 0.916, respectively. The corresponding geopotential heights are 11.05 gpm and 14.97 gpm, 18.76 gpm and 25.16 gpm, 0.948 and 0.934 and the corresponding relative humidities are 5.26% and 8.59%, 16.19% and 18.44%, 0.687 and 0.627, which indicate that the consistency between the observation data by the GTS12 radiosonde and the CMA-GFS model data is better than that of the GTS1 radiosonde with the model. The improvement of GTS12 radiosonde sensor technology has effectively enhanced the overall observation performance of the radiosonde.

Key words: GTS12 radiosonde, GTS1 radiosonde, parallel observation data, comparative analysis, evaluation

引 言

高空气象观测作为大气科学和综合气象观测的重要组成部分,可以提供及时、准确的高空气象资料,为认识大气及其演变规律、预测其变化趋势提供重要依据(曹晓钟,2021)。高空气象观测数据常用作描述大气状态的相对真值(张旭鹏等,2021),在数值预报产品(Naakka et al,2019;姚乐宝等,2024)和再分析资料(赵天保和符淙斌,2009;韦芬芬等,2015)的评估检验中发挥了重要作用,也常被用作风廓线雷达(张智华和刘建忠,2020)、GNSS水汽(Vaquero-Martínez et al,2019)、卫星(Carminati et al,2019;郭启云等,2020b)等大气遥感探测产品真实性检验和校准的基准,并广泛应用于数值预报(Yamazaki and Miura,2021;李秋阳等,2022;王金成等,2024)及气象科研和各类气象服务(苏爱芳等,2022;龚玺等,2023)。

目前,我国常规高空气象观测业务中使用无线电数字探空仪与L波段探空雷达相配合,可综合观测地面至高空的大气温度、气压、相对湿度、风等气象要素(姚雯和马颖,2015)。探空仪在20世纪20年代后得到快速发展(黄炳勋,1994),80年代后世界各国相继改用数字探空仪,而我国一直继续使用机械式59型探空仪,直到2002年才逐步开始59型探空仪到L波段雷达-数字探空仪的换型(黄炳勋等,2003;马颖等,2010),并持续到2011年才完成全国所有高空气象观测站的换型(王英和熊安元,2015)。有学者通过对我国部分高空气象观测站59

型探空仪与L波段雷达-数字探空仪观测数据进行对比研究,指出L波段雷达-数字探空仪系统自动化水平和探测精度较59型探空仪系统均有所提高,两者保持了探测数据的一致性(李伟等,2008),两者测定的温度、位势高度、风向、风速无显著性差异,但L波段雷达-数字探空仪测定的相对湿度显著小于59型探空仪(陶士伟等,2006;张立功等,2007;伊里哈木等,2013)。郝民等(2015)、王英和熊安元(2015)、姚雯等(2017)对全国高空气象观测站相对湿度观测资料的分析研究,也指出了L波段雷达-数字探空仪相对湿度观测存在偏干的问题。

因此,L波段雷达-数字探空仪的相对湿度观测性能有待进一步改进,并且国产数字探空仪的传感器性能相较于国际上较为先进的探空仪还是存在一定差距(李伟等,2009)。L波段雷达-数字探空仪在中国气象局高空气象观测站使用已超过10年,其技术略显滞后,迫切需要技术改进,为进一步提升我国高空气象观测水平,中国气象局致力于国产数字探空仪的技术改进,并于2020年组织开展了全国常规高空气象观测业务探空仪的换型升级工作。本次探空仪换型涉及3个不同厂家生产的3种不同型号的探空仪,分别是GTS1型、GTS1-1型、GTS1-2型探空仪换型为GTS12型、GTS13型、GTS11型探空仪。换型后探空仪相对于换型前探空仪的工作方式、数据格式等未改变,气压传感器进行了小型化处理;将温度传感器由涂白漆棒状热敏电阻改进为对短波反射率更高的真空溅射镀铝珠状热敏电阻,增强了防辐射和防水性能,体积较小的珠状热敏电阻基本上可以不考虑大气长波辐射的影响;将湿度传

感器由湿敏电阻改进为湿敏电容,解决了湿敏电阻反复使用性能差、响应速度慢、滞后误差大等问题(郭启云等,2013)。

探空仪换型前后的平行对比观测是确定新老仪器换型引起的观测数据差异最直接有效的方法(姚雯等,2017)。为了对比分析不同探空仪观测数据的差异,全国高空气象观测站分别在 2020 年 1 月和 7 月进行了换型探空仪的平行对比观测,对比观测每天 1 次,08:00 和 20:00(北京时,下同)交替进行,1 月和 7 月 3 种不同型号的探空仪各进行不少于 10 次的有效对比观测,为了降低施放误差,对比观测采用同球串联施放的方式进行。已有学者对此次探空仪换型开展了研究,周雪松和田泓(2022)指出新型探空仪传感器技术的改进,有效提高了测量精度、稳定性和环境适应能力,提升了我国高空气象观测水平,满足世界气象组织对全球气候观测系统探空的要求。贾秋兰等(2020)通过对河北邢台市高空气象观测站探空仪换型平行观测数据进行对比分析,指出不同探空仪系统差异随高度增加而增大,并且 08:00 差异明显大于 20:00。杨国彬等(2022)基于 ECMWF 模式预报场数据对云南高空气象观测站探空仪换型平行观测数据进行了对比分析,指出新旧探空仪观测数据一致性较好,新探空仪观测数据离散性相对较小,并且与模式数据更为一致。总体来说,换型后探空仪整体上测得较低的温度值和较高的相对湿度值,两种探空仪测得的位势高度一致性较好(梁正鹏等,2020;王蕊等,2021)。

关于本次探空仪换型观测数据的已有研究都是基于单站或某一地区的数据进行的,未见有全国范围的对比研究,为了较为全面地分析探空仪换型前后观测数据的差异,系统地分析探空仪换型对数据一致性的影响以及换型前后的系统偏差,本文利用全国高空气象观测站探空仪换型的平行观测数据进行直接对比分析。此外,随着数值模式数据准确性的不断提高,使用客观定量化的数值模式数据对探空观测数据进行评估已经成为评价探空观测数据质量的重要手段(姚雯等,2012;钱媛等,2019;郭启云等,2020a;杨国彬等,2021),但由于平行观测期间的换型后探空仪的观测数据作为业务探空数据已经进入了数值模式同化系统,而换型前探空仪的观测数据只是作为平行对比观测数据,未进入同化系统,因此,模式分析场数据与换型后探空仪观测数据的关联性大于换型前探空仪观测数据,如果使用模式分

析场数据进行平行对比观测数据的质量评估,其客观性略差于模式预报场数据,此外,考虑到探空业务中对实时观测数据质量评估的时效需求,选择模式预报场数据对观测数据进行质量评估更为切实可行。因此,本文在不同探空仪观测数据直接对比分析的基础上,进一步使用模式预报场数据对不同探空仪观测数据进行定量评估,以期能够通过对比换型前后不同探空仪观测数据进行全面深入的对比分析和评估,为探空仪更新换代、探空系统升级、探空技术发展和探测数据应用提供一定的参考。

1 数据与方法

1.1 数据

由于不同厂家生产的探空仪在原材料和制作工艺上都有不同程度的差异(马颖等,2010),在探空仪换型前,各高空气象观测站一般都是使用同一型号的探空仪,我国的 120 个高空气象观测站中有 90 个站使用的是 GTS1 探空仪(郝民等,2018),使用范围最广。因此,平行观测资料选取我国大陆上 2020 年 1 月和 7 月平行观测期间原探空仪型号为 GTS1,换型后探空仪型号为 GTS12 的 89 个高空气象观测站 19 层标准等压面(1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、40、30、20、15、10 hPa)上的观测数据。这 89 个高空气象观测站遍布全国(图 1),具有很好的代表性。由于两种探空仪测风体制均采用 L 波段雷达二次测风,故本文不进行比较分析,仅对比分析温度、位势高度和相对湿度观测数据。

需要说明的是,由于相对湿度是根据空气中的水汽压与空气温度所对应的水面饱和水汽压的比值求得,而计算水面饱和水汽压的公式适用温度范围为 $-50\sim 100^{\circ}\text{C}$,因此当温度在 -50°C 及以下时,计算出来的相对湿度可能存在较大误差,在探空业务中,将温度低于 -60°C 时的相对湿度设置为恒定值 2%,并且当温度低于 -60°C 后,湿度传感器恢复能力较差(Bian et al, 2011),当气压小于 200 hPa 后,低温导致相对湿度数据可靠性较低,因此,相对湿度仅选用 1000~200 hPa 各标准等压面上的数据。

考虑到我国探空实际业务的需求,同时考虑到评估结果与 ECMWF 等国际其他机构评估结果的可比较性,模式数据选择中国气象局全球数值预

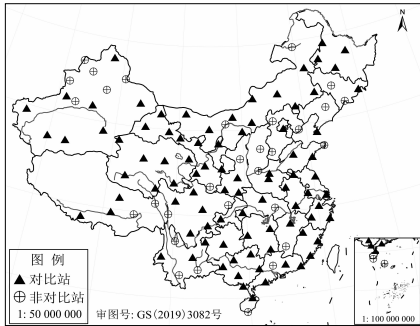


图 1 全国高空气象观测站点分布
Fig. 1 Distribution of high altitude meteorological observation stations in China

报系统(CMA Global Forecast System,CMA-GFS)的东北半球区域预报产品作为预报场数据(张进等, 2023)。预报场数据的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 垂直方向相对于观测数据少了 40 hPa 和 15 hPa 两个标准等压面,为了与探空观测 08:00 和 20:00 间隔时间保持一致,在时间上选择每个观测时次前一时次的 12 小时预报产品。

1.2 观测数据质量控制

由于电磁干扰、仪器变性、信号突失、下沉气流

和仪器故障等情况会造成探空观测数据异常,这将会直接影响到数据应用的效果,因此,在数据使用前需对其进行必要的质量控制(中国气象局,2010)。本文研究所用的观测数据经过了业务软件中常规的质量控制,如格式检查、缺失值检查、界限值检查、主要变化范围检查、时间一致性检查、内部一致性检查等(中国气象局,2011);在此基础上本文采用标准差法对观测数据再进行一次基本质量控制,首先计算各高空气象观测站各标准等压面上的标准差 σ ,当观测数据距平值 $X_i - \bar{X} > 3\sigma$ 时,认为观测数据错误,当 $2\sigma < X_i - \bar{X} \leq 3\sigma$ 时,认为观测数据可疑(钱媛等,2019)。

由两种探空仪观测数据质量控制结果(图略)可知,GTS12 探空仪温度和位势高度观测数据距平值明显小于 GTS1 探空仪,异常离群错误数据相对较少;相对湿度观测数据距平值在 100 hPa 以下两种探空仪差异不大,在 100 hPa 以上 GTS12 探空仪距平值明显小于 GTS1 探空仪。

在本文的研究中剔除根据标准差法质量控制为错误和可疑数据后得到研究所用观测数据,具体观测数据样本量如表 1 所示。从表中可以看出,GTS12 探空仪各要素样本总量均大于 GTS1 探空仪,除 600 hPa 附近个别等压面外,GTS12探空仪样本量

表 1 各标准等压面上 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪平行观测数据样本量(单位:个)
Table 1 Sample size of parallel observation data of GTS12 and GTS1 radiosondes on each mandatory level (unit: number)

气压/hPa	温度		位势高度		相对湿度	
	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1
10	321	131	316	135	20	17
15	1059	568	1070	579	79	62
20	1366	796	1376	814	116	94
30	1506	954	1530	968	140	130
40	1543	1028	1565	1045	541	415
50	1575	1084	1587	1097	1178	765
70	1650	1178	1619	1182	1451	1012
100	1707	1281	1664	1274	1522	1114
150	1697	1419	1681	1425	1520	1290
200	1637	1490	1709	1540	1638	1459
250	1724	1631	1713	1638	1686	1563
300	1737	1685	1713	1685	1742	1648
400	1741	1728	1705	1708	1761	1703
500	1742	1739	1708	1720	1758	1719
600	1681	1688	1660	1667	1676	1680
700	1547	1569	1534	1539	1593	1589
850	1326	1314	1293	1292	1320	1307
925	966	962	934	936	941	931
1000	353	353	361	361	359	356
总计	26 878	22 598	26 738	22 605	21 041	18 854

均大于 GTS1 探空仪, 100 hPa 以上等压面差异更为明显; GTS12 探空仪的有效观测样本量整体大于 GTS1 探空仪, 反映出 GTS12 探空仪的整体观测性能优于 GTS1 探空仪。

1.3 观测数据对比分析和评估指标

1.3.1 观测数据直接对比分析指标

(1) 偏差(Bias): 某一高空气象观测站某一标准等压面上平行观测时段内 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪观测数据的平均值分别为 X_{12} 和 X_1 , 则 GTS12 探空仪相对于 GTS1 探空仪观测数据的偏差为:

$$\text{Bias}_1 = X_{12} - X_1 \quad (1)$$

(2) 标准偏差(SD): 表征随机误差大小的代表值, 可以有效反映观测数据的稳定性, 标准偏差越小, 观测数据稳定性越好。某一高空气象观测站某一标准等压面共有 N 个观测数据, 则标准偏差计算公式为:

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

式中: X_i 为某一观测数据, $\bar{X}$ 为 N 个观测数据的平均值。

1.3.2 基于模式数据的评估指标

首先通过双线性内插法(谭桂容等, 2017)将格点上的模式数据插值到站点, 再通过分别计算 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪观测数据与模式数据的偏差、均方根误差和相关系数对两种探空仪观测数据进行评估分析。

(1) 偏差: 某一高空气象观测站某一标准等压面上的观测数据为 O , 插值后的模式预报场数据为 B , 则观测数据相对于模式数据的偏差为:

$$\text{Bias}_2 = O - B \quad (3)$$

(2) 均方根误差(RMSE): 描述观测数据与模式数据之间离散程度的统计量, 均方根误差越小, 观测数据与模式数据的一致性越高。均方根误差计算公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{Bias}_{2i}^2} \quad (4)$$

式中 M 为某一标准等压面上所有站点的观测数据总量。

(3) 相关系数(R): 衡量观测数据与模式数据之间关系密切程度的统计量, 相关系数越大, 观测数据与模式数据的相关程度越高。相关系数计算公式

为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M (B_i - \bar{B})^2}} \quad (5)$$

式中: $\bar{O}$ 和 $\bar{B}$ 分别为某一标准等压面上所有站点观测数据和模式数据的平均值。

相关系数是否显著需要作统计检验(黄嘉佑, 2004), R 的概率密度函数遵从自由度为 $M-2$ 的 t 分布, 因此, 可以用 t 检验法来检验 R 的显著性, 即:

$$t = \frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \sqrt{M-2} \quad (6)$$

式中 t 为显著性统计检验值, 若显著性水平为 α 时的界限值为 t_α , 当 $|t| \geq t_\alpha$, 则认为 R 在显著性水平 α 下是显著的, 反之则不显著。

2 观测数据直接对比分析结果

通过计算 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪观测数据偏差和标准偏差对 1000~10 hPa 各标准等压面上的温度、位势高度和 1000~200 hPa 各标准等压面上的相对湿度平行观测数据进行直接对比分析。

2.1 偏差

首先计算各高空气象观测站各标准等压面上 GTS12 探空仪相对于 GTS1 探空仪观测数据的偏差, 再求平均得出所有站点的偏差, 结果如图 2 所示。由图 2a 可知, 温度偏差绝对值除 1 月 08:00 的 100 hPa(0.55℃) 和 7 月 20:00 的 10 hPa(1.08℃) 外均小于 0.5℃, 在 200 hPa 以下均为负偏差, 200 hPa 以上 08:00 以负偏差为主, 20:00 以正偏差为主。08:00 的 250 hPa、150~15 hPa 和 20:00 的 200 hPa、150 hPa 等压面 1 月温度偏差绝对值大于 7 月, 其他等压面则相反。1 月除 500、200、10 hPa 外 08:00 温度偏差绝对值大于 20:00, 200 hPa 以下两个时次差异小于 0.1℃, 100~50 hPa 两个时次差异大于 0.3℃; 7 月除 925、200、150、70 hPa 外 08:00 温度偏差绝对值小于 20:00, 300 hPa 以下两个时次差异小于 0.1℃, 20~10 hPa 两个时次差异大于 0.3℃。

由图 2b 可知, 位势高度偏差绝对值除 7 月 20:00 的 10 hPa(35.9 gpm) 外均小于 30.0 gpm, 除底层和高层极少部分等压面外均为负偏差。08:00

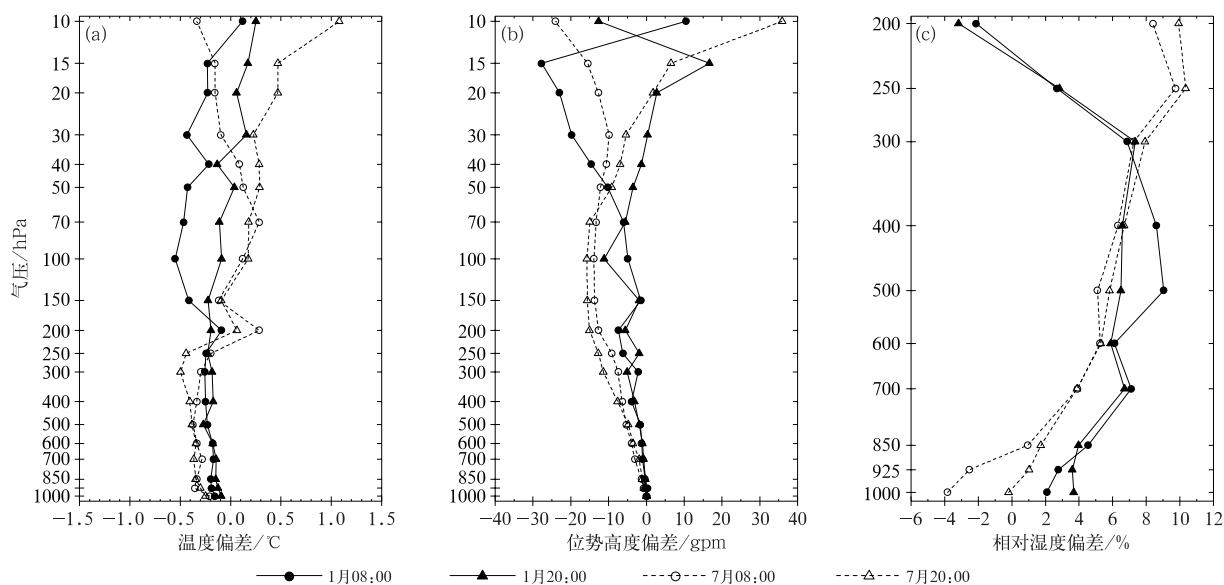


图2 2020年1月、7月08:00和20:00各标准等压面GTS12探空仪相对于GTS1探空仪

(a)温度,(b)位势高度和(c)相对湿度观测数据偏差

Fig. 2 Bias of (a) temperature, (b) geopotential height and (c) relative humidity observation data of GTS12 radiosonde relative to GTS1 radiosonde on different mandatory levels at 08:00 BT and 20:00 BT in January and July 2020

的1000 hPa、40~15 hPa和20:00的1000、20、15 hPa等压面1月位势高度偏差绝对值大于7月,其他等压面则相反。1月除300、100、10 hPa外08:00位势高度偏差绝对值大于20:00,40~15 hPa两个时次差异大于10.0 gpm,其中20 hPa最大为20.2 gpm;7月400~70 hPa、10 hPa等压面08:00位势高度偏差绝对值小于20:00,其他等压面则相反,除20~10 hPa外两个时次差异小于5.0 gpm,10 hPa两个时次差异最大为11.8 gpm。

由图2c可知,相对湿度偏差绝对值除7月20:00的250 hPa(10.4%)外均小于10%,除1月200 hPa和7月1000~925 hPa部分时次外均为正偏差,平均偏大约4.6%,在300 hPa以下1月偏大更为明显,300 hPa以上则相反。08:00的925~400 hPa和20:00的1000~500 hPa等压面1月相对湿度偏差绝对值大于7月,其他等压面则相反。1月850~400 hPa和7月1000 hPa、925 hPa等压面08:00相对湿度偏差绝对值大于20:00,其他等压面则相反,1月500 hPa、400 hPa和7月1000 hPa两个时次差异大于2%,其中1月500 hPa最大为2.5%,7月1000 hPa最大为3.6%。

总体来看,除200 hPa以上部分等压面外,GTS12探空仪测得的温度低于GTS1探空仪,1月

较7月偏低更为明显,08:00较20:00偏低更为明显,这主要可能是由于GTS12探空仪相较于GTS1探空仪将温度传感器由涂白漆棒状热敏电阻改进为对短波反射率更高的真空溅射镀铝珠状热敏电阻,大气长波辐射对体积较小的珠状热敏电阻的影响较小,从而有效增强了防辐射性能,减小了辐射增温的影响,因此,在冬季和白天测得的温度较GTS1探空仪偏低更为明显。GTS12探空仪测得的相对湿度明显高于GTS1探空仪,在7月高层的低温高湿情况下更为明显,主要可能是由于GTS12探空仪相较于GTS1探空仪将湿度传感器由湿敏电阻改进为湿敏电容,反应更加灵敏,具有更好的湿度测量性能。

2.2 标准偏差

首先分别计算各高空气象观测站各标准等压面上GTS12探空仪和GTS1探空仪观测数据的标准偏差,再求平均得出所有站点的标准偏差,结果如图3所示。由图3a和3b可知,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪温度标准偏差分别在1.1~4.32℃和1.0~4.33℃,7月分别为1.22~2.11℃和1.24~2.16℃;除1月1000、400、100、70、10 hPa外GTS12探空仪温度标准偏差小于GTS1探空仪,200 hPa以下两种探空仪标准偏差差异小于0.1℃。

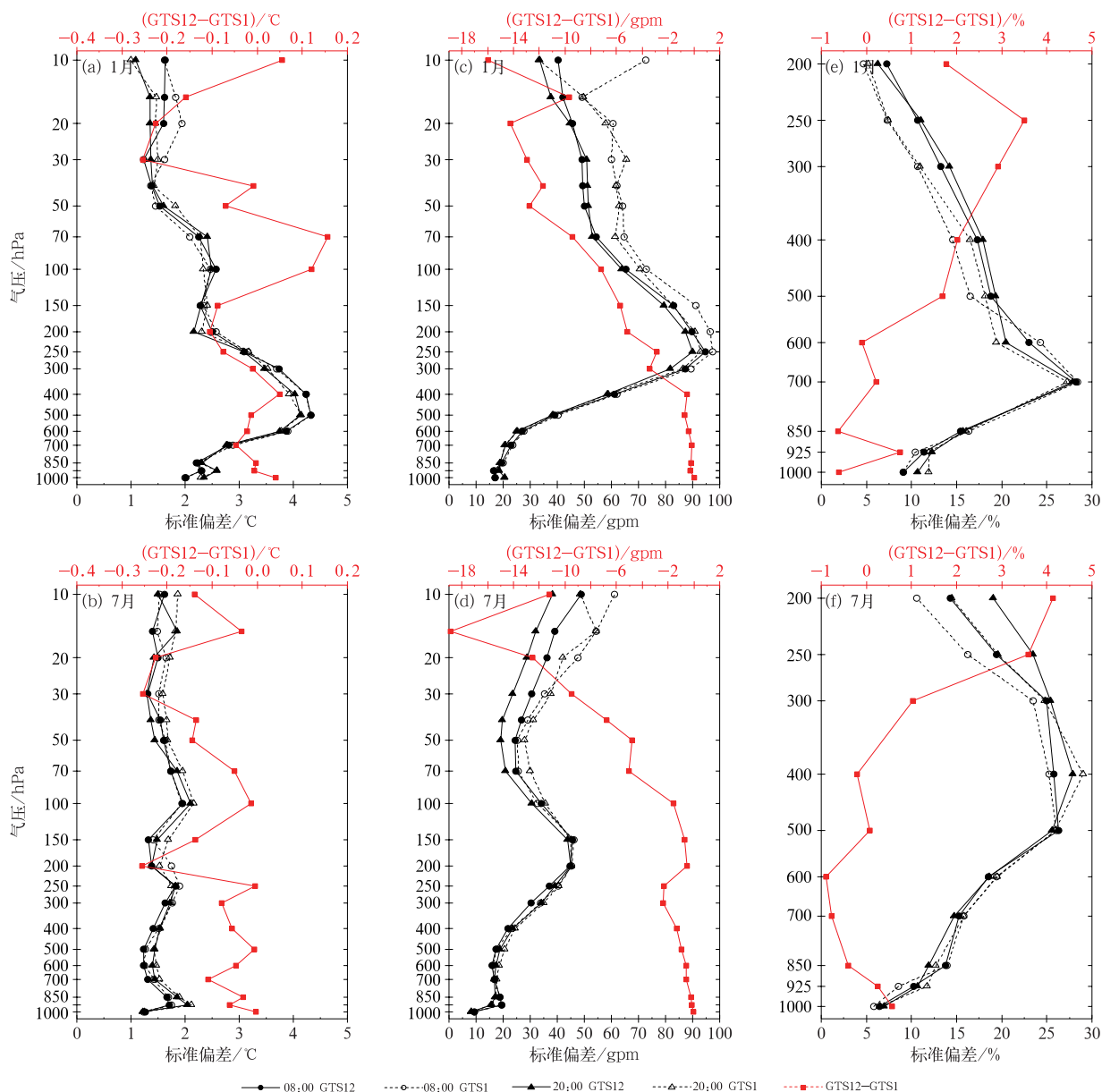


图 3 2020 年 1 月、7 月 08:00 和 20:00 各标准等压面 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪(a,b)温度, (c,d)位势高度和(e,f)相对湿度观测数据标准偏差和它们标准偏差差异(GTS12-GTS1, 红线)
Fig. 3 Standard deviation and their SD difference (GTS12-GTS1, red line) of (a, b) temperature, (c, d) geopotential height and (e, f) relative humidity observation data of GTS12 and GTS1 radiosondes on different mandatory levels at 08:00 BT and 20:00 BT in January and July 2020

由图 3c 和 3d 可知,1 月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪位势高度标准偏差分别在 16.39~94.67 gpm 和 16.86~97.39 gpm,7 月分别为 8.10~48.79 gpm 和 8.24~61.18 gpm;除 1 月 1000 hPa 外 GTS12 探空仪位势高度标准偏差小于 GTS1 探空仪,两种探空仪标准偏差差异基本随气压减小而增大。由图 3e 和 3f 可知,1 月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪相对湿度标准偏差分别在 6.30%~28.17% 和 4.69%~28.36%,7 月分别为 6.44%~27.92% 和

5.76%~28.96%;除 1 月 1000、850、600 hPa 和 7 月 850、700、600、400 hPa 外 GTS12 探空仪相对湿度标准偏差大于 GTS1 探空仪,1 月 600 hPa 以下和 7 月 400 hPa 以下两种探空仪标准偏差差异小于 1%。

3 基于模式数据的评估结果

由上述分析可知,除个别等压面外两种探空仪温度和位势高度观测数据差异较小,GTS12 探空仪

相对湿度观测数据显著大于GTS1探空仪;两种探空仪观测数据标准偏差随气压变化形势基本一致。为进一步对比两种探空仪观测数据,通过计算观测数据与CMA-GFS模式预报场数据的偏差、均方根误差和相关系数对两种探空仪观测数据进行评估分析。

3.1 偏差

首先计算各高空气象观测站各标准等压面上观测数据相对于模式数据的偏差,再求平均得出所有站点的偏差。通过计算可得,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪温度、位势高度、相对湿度观测数据相对于模式数据的偏差绝对平均值分别为 0.30°C 和 0.36°C 、 11.38 gpm 和 12.85 gpm 、 4.69% 和 6.57% ;7月分别为 0.37°C 和 0.52°C 、 10.72 gpm 和 17.09 gpm 、 5.83% 和 10.61% ;GTS12探空仪温度、位势高度、相对湿度较GTS1探空仪分别减小约 0.1°C 、 3.9 gpm 、 3.3% 。各标准等压面上观测数据相对于模式数据的偏差如图4所示。由图可知,同一月份、同一时次两种探空仪偏差随气压变化形式基本一致,温度 100 hPa 以上 $20:00$ 以负偏差为主,其他基本以正偏差为主;位势高度1月 200 hPa 以下和7月 500 hPa 以下以负偏差为主,以上则以正偏差为主;相对湿度除 500 hPa 以下部分时次外均为负偏差。

由图4a和4b可知,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪温度偏差分别在 $-0.82\sim 2.11^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.91\sim 2.06^{\circ}\text{C}$,7月分别在 $-0.85\sim 2.74^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.29\sim 3.11^{\circ}\text{C}$;除1月 $08:00$ 的 10 hPa 和7月 $50\sim 10\text{ hPa}$ 部分等压面外温度偏差绝对值均小于 1°C ;除1月 850 、 700 、 400 、 300 、 10 hPa 和7月 850 、 700 、 600 、 200 、 100 hPa 外GTS12探空仪温度偏差绝对值小于GTS1探空仪。由图4c和4d可知,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪位势高度偏差分别在 $-14.96\sim 84.93\text{ gpm}$ 和 $-15.06\sim 77.51\text{ gpm}$,7月分别在 $-12.77\sim 91.39\text{ gpm}$ 和 $-12.72\sim 110.37\text{ gpm}$;除1月 $08:00$ 的 20 hPa 、 10 hPa 和7月 $150\sim 10\text{ hPa}$ 部分等压面外位势高度偏差绝对值小于 20 gpm ;除1月 $925\sim 400$ 、 250 、 200 、 10 hPa 和7月 $925\sim 700\text{ hPa}$ 外GTS12探空仪拉势高度偏差绝对值小于GTS1探空仪。由图4e和4f可知,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪相对湿度偏差分别在 $-8.82\%\sim 7.44\%$ 和 $-14.33\%\sim 2.91\%$,7月分别在 $-20.29\%\sim$

1.42% 和 $-28.64\%\sim 1.81\%$;GTS12探空仪除7月 $300\sim 200\text{ hPa}$ 外相对湿度偏差绝对值均小于 10% ,GTS1探空仪1月 $500\sim 250\text{ hPa}$ 和7月 $400\sim 200\text{ hPa}$ 相对湿度偏差绝对值大于 10% ;除1月 $1000\sim 850\text{ hPa}$ 、 200 hPa 和7月 1000 hPa 外GTS12探空仪相对湿度偏差绝对值小于GTS1探空仪。

3.2 均方根误差

首先计算各高空气象观测站各标准等压面上观测数据相对于模式数据的均方根误差,再求平均得出所有站点的均方根误差。通过计算可得,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪温度、位势高度、相对湿度平均均方根误差分别为 1.30°C 和 1.34°C 、 17.79 gpm 和 23.03 gpm 、 15.93% 和 17.36% ;7月分别为 1.15°C 和 1.29°C 、 19.73 gpm 和 27.29 gpm 、 16.44% 和 19.52% 。GTS12探空仪温度、位势高度、相对湿度较GTS1探空仪分别减小约 0.1°C 、 6.4 gpm 、 2.3% 。各标准等压面上观测数据相对于模式数据的均方根误差如图5所示。总体来看,两种探空仪均方根误差随气压变化形势基本一致,温度均方根误差随气压减小而波动,位势高度均方根误差基本随气压减小而增大,相对湿度均方根误差1月随气压减小先增大后减小,7月基本随气压减小而增大。

由图5a和5b可知,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪温度均方根误差分别在 $0.89\sim 2.46^{\circ}\text{C}$ 和 $0.90\sim 2.43^{\circ}\text{C}$,7月分别在 $0.83\sim 2.90^{\circ}\text{C}$ 和 $0.89\sim 3.07^{\circ}\text{C}$;除 $08:00$ 的 10 hPa 外温度均方根误差均小于 2.0°C ;除1月 850 、 400 、 300 、 $100\sim 50\text{ hPa}$ 和7月 1000 hPa 外GTS12探空仪温度均方根误差小于GTS1探空仪。由图5c和5d可知,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪位势高度均方根误差分别在 $9.74\sim 67.48\text{ gpm}$ 和 $9.56\sim 81.85\text{ gpm}$,7月分别在 $6.72\sim 100.30\text{ gpm}$ 和 $6.53\sim 115.43\text{ gpm}$;除 $20\sim 10\text{ hPa}$ 个别时次外位势高度均方根误差均小于 60.0 gpm ;除1月 $925\sim 700\text{ hPa}$ 和7月 $1000\sim 700\text{ hPa}$ 外GTS12探空仪位势高度均方根误差小于GTS1探空仪。由图5e和5f可知,1月GTS12探空仪和GTS1探空仪相对湿度均方根误差分别在 $11.07\%\sim 19.11\%$ 和 $10.85\%\sim 21.63\%$,7月分别在 $6.75\%\sim 27.54\%$ 和 $7.26\%\sim 32.93\%$;除1月GTS1探空仪 $500\sim 250\text{ hPa}$ 和7月 $500\sim 200\text{ hPa}$

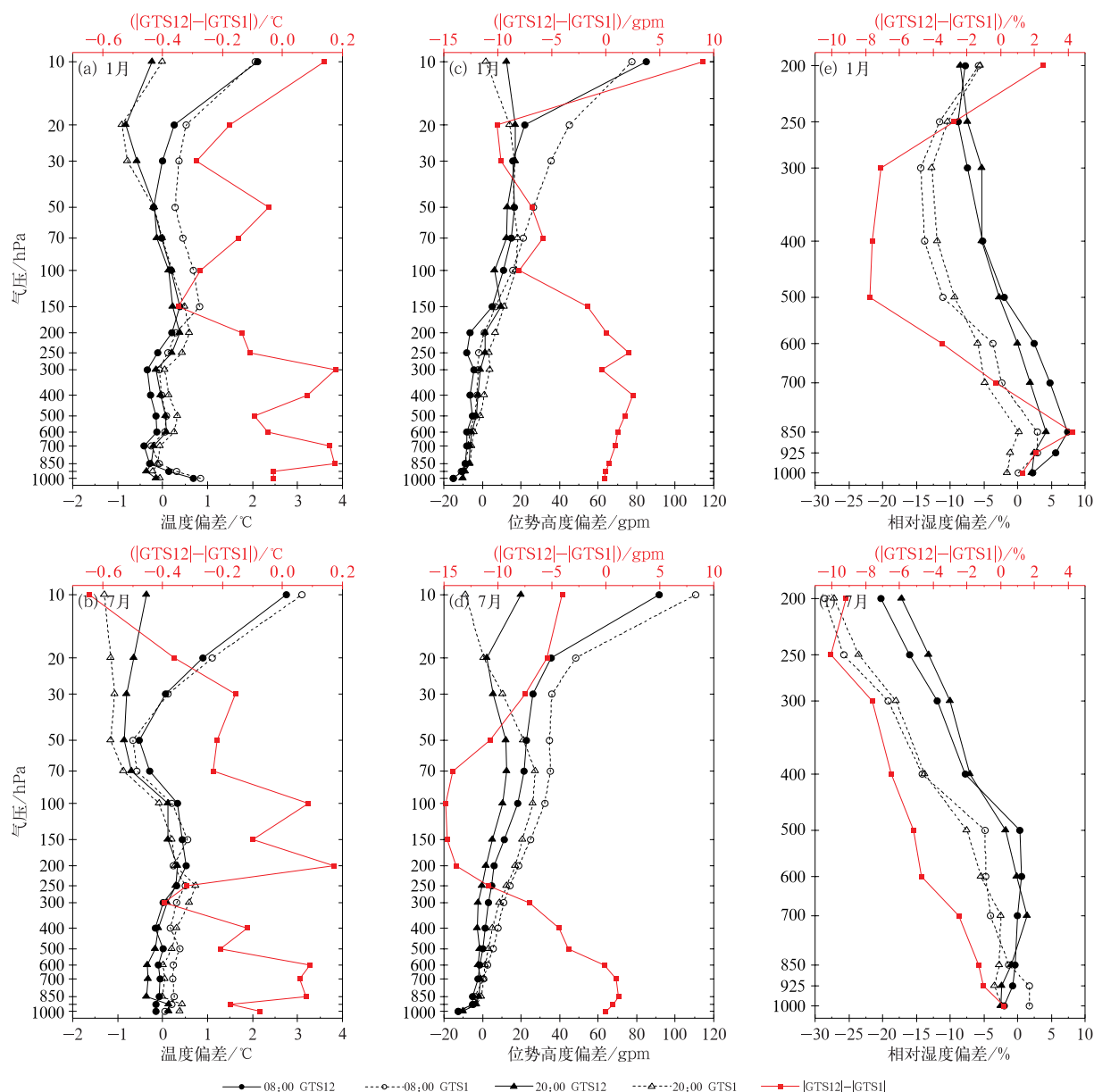


图 4 2020 年 1 月、7 月 08:00 和 20:00 各标准等压面 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪(a,b)温度,(c,d)位势高度和 (e,f)相对湿度观测数据相对于模式数据偏差和它们偏差绝对值差异($|GTS12| - |GTS1|$, 红线)

Fig. 4 Bias and their Bias difference ($|GTS12| - |GTS1|$, red line) of (a, b) temperature, (c, d) geopotential height and (e, f) relative humidity observation data of GTS12 radiosonde and GTS1 radiosonde relative to CMA-GFS model data on different mandatory levels at 08:00 BT and 20:00 BT in January and July 2020

外相对湿度均方根误差均小于 20.0%;除 1 月 925 hPa、850 hPa 外 GTS12 探空仪相对湿度均方根误差小于 GTS1 探空仪。

3.3 相关系数

所有高空气象观测站各标准等压面上观测数据与模式数据的相关系数如表 2~表 4 所示,由表可知,除 GTS1 探空仪 1 月 200 hPa 的相对湿度外,各

等压面温度、位势高度和相对湿度观测数据与模式数据显著正相关;温度和位势高度同一时次、同一探空仪相关系数在 50 hPa 以下除个别等压面外 1 月大于 7 月,50 hPa 以上则相反;相对湿度同一探空仪相关系数 08:00 除个别等压面外 1 月大于 7 月,20:00 在 500 hPa 以下除个别等压面外 1 月大于 7 月,500 hPa 以上则相反。

由表 2 可知,温度相关系数在 50 hPa 以下同一

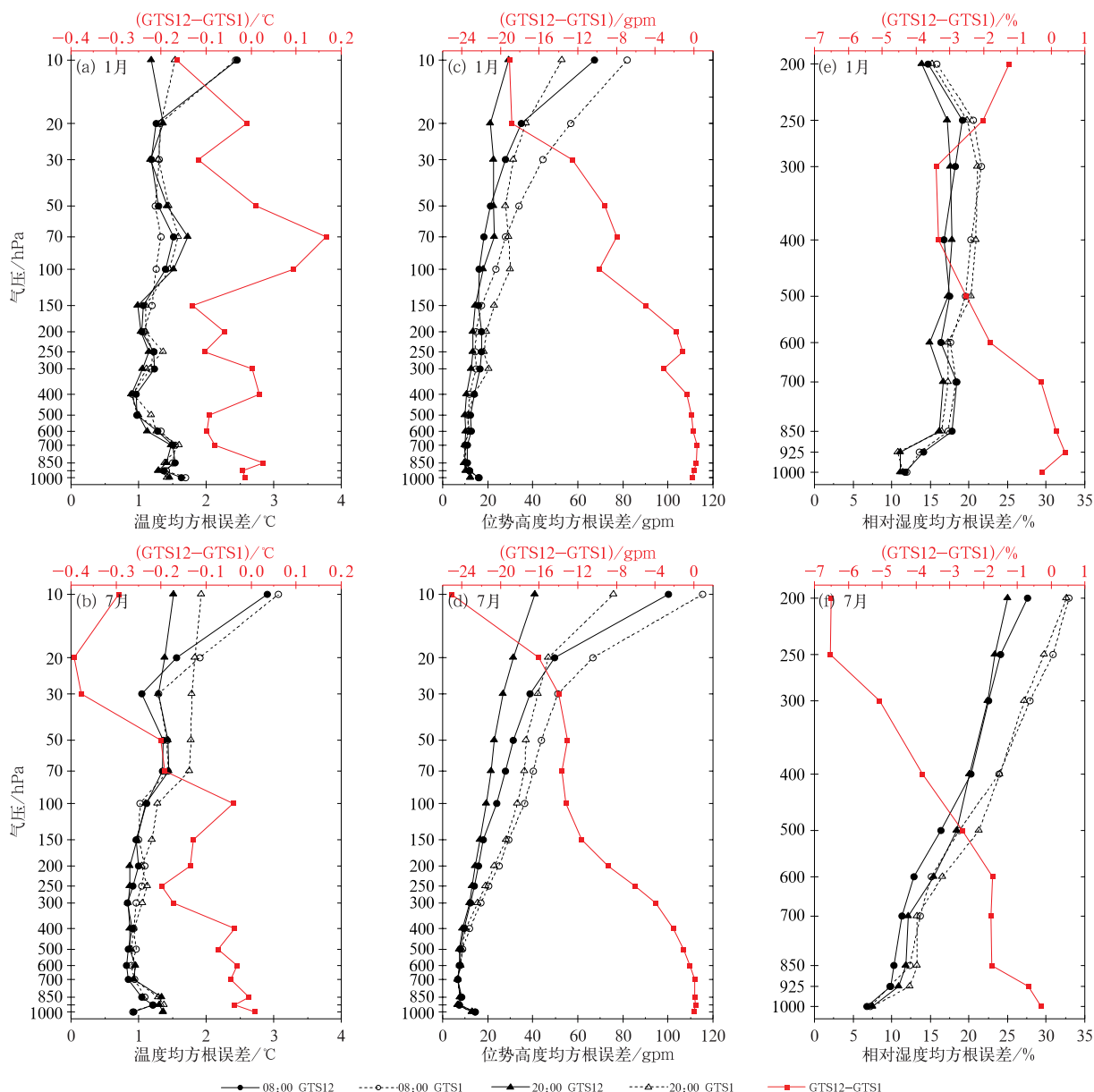


图5 2020年1月、7月08:00和20:00各标准等压面GTS12探空仪和GTS1探空仪(a,b)温度,(c,d)位势高度和(e,f)相对湿度观测数据相对于模式数据均方根误差和它们均方根误差差异(GTS12-GTS1,红线)

Fig. 5 RMSE and their RMSE difference (GTS12-GTS1, red line) of (a, b) temperature, (c, d) geopotential height and (e, f) relative humidity observation data of GTS12 radiosonde and GTS1 radiosonde relative to CMA-GFS model data on different mandatory levels at 08:00 BT and 20:00 BT in January and July 2020

月份各等压面间差异较小,且两种探空仪差异不大;50~10 hPa等压面1月同一时次GTS12小于GTS1,7月08:00除20 hPa外GTS12小于GTS1,20:00则GTS12大于GTS1。1月GTS12探空仪和GTS1探空仪温度平均相关系数分别约为0.911和0.927,7月分别约为0.905和0.904;同一探空仪温度相关系数除1月20 hPa和7月1000 hPa等压面08:00显著大于20:00外,同一月份08:00和

20:00差异不大。

由表3可知,位势高度相关系数在1月08:00的1000~50 hPa和20:00的1000~150 hPa以及7月的1000~100 hPa两种探空仪差异不大,其他等压面同一时次GTS12探空仪大于GTS1探空仪。1月GTS12探空仪和GTS1探空仪位势高度平均相关系数分别约为0.960和0.943,7月分别约为0.936和0.924。1月GTS12探空仪1000~50 hPa

表 2 2020 年 1 月、7 月 08:00 和 20:00 各标准等压面温度观测数据与模式数据相关系数

Table 2 Correlation coefficient of temperature observation data and model data on different mandatory levels at 08:00 BT and 20:00 BT in January and July 2020

气压/hPa	1 月				7 月			
	08:00		20:00		08:00		20:00	
	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1
10	0.477**	0.533**	0.418**	0.551*	0.736**	0.776**	0.775**	0.695**
20	0.734**	0.823**	0.611**	0.706**	0.736**	0.724**	0.761**	0.737**
30	0.724**	0.805**	0.768**	0.823**	0.810**	0.822**	0.825**	0.786**
50	0.920**	0.952**	0.894**	0.922**	0.894**	0.923**	0.914**	0.895**
70	0.974**	0.983**	0.969**	0.973**	0.966**	0.972**	0.968**	0.955**
100	0.984**	0.989**	0.983**	0.982**	0.984**	0.988**	0.986**	0.979**
150	0.979**	0.981**	0.981**	0.971**	0.964**	0.971**	0.963**	0.941**
200	0.918**	0.929**	0.908**	0.917**	0.894**	0.929**	0.897**	0.923**
250	0.979**	0.980**	0.982**	0.962**	0.966**	0.975**	0.970**	0.963**
300	0.990**	0.990**	0.991**	0.986**	0.973**	0.977**	0.973**	0.970**
400	0.993**	0.994**	0.994**	0.994**	0.960**	0.966**	0.967**	0.968**
500	0.993**	0.992**	0.992**	0.981**	0.953**	0.953**	0.958**	0.957**
600	0.985**	0.985**	0.990**	0.984**	0.939**	0.941**	0.938**	0.934**
700	0.974**	0.975**	0.978**	0.973**	0.894**	0.904**	0.893**	0.891**
850	0.976**	0.978**	0.977**	0.977**	0.886**	0.891**	0.895**	0.899**
925	0.985**	0.984**	0.985**	0.984**	0.867**	0.880**	0.906**	0.904**
1000	0.979**	0.979**	0.977**	0.978**	0.938**	0.940**	0.814**	0.810**

注: *、** 分别表示相关系数通过了 0.05、0.01 的显著性水平检验,下同。

表 3 2020 年 1 月、7 月 08:00 和 20:00 各标准等压面位势高度观测数据与模式数据相关系数

Table 3 Correlation coefficient of geopotential height observation data and model data on different mandatory levels at 08:00 BT and 20:00 BT in January and July 2020

气压/hPa	1 月				7 月			
	08:00		20:00		08:00		20:00	
	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1
10	0.699**	0.657**	0.881**	0.683**	0.916**	0.872**	0.948**	0.820**
20	0.874**	0.823**	0.944**	0.834**	0.944**	0.918**	0.952**	0.914**
30	0.918**	0.899**	0.945**	0.906**	0.945**	0.927**	0.948**	0.915**
50	0.967**	0.969**	0.968**	0.948**	0.934**	0.909**	0.937**	0.899**
70	0.988**	0.990**	0.984**	0.967**	0.893**	0.859**	0.899**	0.868**
100	0.996**	0.996**	0.995**	0.973**	0.949**	0.946**	0.954**	0.943**
150	0.998**	0.998**	0.998**	0.993**	0.987**	0.988**	0.987**	0.985**
200	0.999**	0.998**	0.999**	0.996**	0.990**	0.989**	0.992**	0.990**
250	0.999**	0.998**	0.998**	0.997**	0.989**	0.990**	0.991**	0.989**
300	0.998**	0.998**	0.998**	0.986**	0.987**	0.988**	0.989**	0.988**
400	0.997**	0.997**	0.997**	0.990**	0.983**	0.985**	0.985**	0.984**
500	0.996**	0.996**	0.996**	0.991**	0.976**	0.981**	0.976**	0.976**
600	0.992**	0.992**	0.991**	0.987**	0.958**	0.960**	0.951**	0.951**
700	0.989**	0.989**	0.983**	0.980**	0.959**	0.961**	0.951**	0.955**
850	0.947**	0.947**	0.929**	0.928**	0.915**	0.914**	0.918**	0.919**
925	0.923**	0.917**	0.920**	0.921**	0.933**	0.931**	0.918**	0.918**
1000	0.908**	0.908**	0.915**	0.915**	0.607**	0.622**	0.651**	0.667**

等压面 08:00 和 20:00 差异不大,30~10 hPa 等压面 08:00 小于 20:00;GTS1 探空仪 850~50 hPa 等压面 08:00 大于 20:00,其他等压面则相反;7 月同一探空仪 08:00 和 20:00 差异不大。

由表 4 可知,相对湿度相关系数除 1 月 20:00 的

1000~925 hPa 以及 7 月 08:00 的 925 hPa 和 20:00 的 600 hPa 外,同一时次 GTS12 探空仪大于 GTS1 探空仪。1 月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪相对湿度平均相关系数分别约为 0.653 和 0.575,7 月分别为 0.720 和 0.679。同一探空仪相对湿度相关系数在

表 4 2020 年 1 月、7 月 08:00 和 20:00 各标准等压面相对湿度观测数据与模式数据相关系数
Table 4 Correlation coefficient of relative humidity observation data and model data on
different mandatory levels at 08:00 BT and 20:00 BT in January and July 2020

气压/hPa	1 月				7 月			
	08:00		20:00		08:00		20:00	
	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1	GTS12	GTS1
200	0.235**	-0.077	0.271**	-0.098	0.686**	0.579**	0.702**	0.588**
250	0.465**	0.290**	0.539**	0.365**	0.693**	0.659**	0.654**	0.599**
300	0.683**	0.586**	0.713**	0.644**	0.696**	0.655**	0.670**	0.640**
400	0.789**	0.738**	0.759**	0.713**	0.769**	0.743**	0.763**	0.748**
500	0.756**	0.693**	0.754**	0.689**	0.807**	0.793**	0.745**	0.709**
600	0.796**	0.778**	0.786**	0.736**	0.810**	0.791**	0.729**	0.738**
700	0.802**	0.792**	0.809**	0.797**	0.820**	0.788**	0.799**	0.779**
850	0.676**	0.670**	0.720**	0.696**	0.835**	0.797**	0.840**	0.829**
925	0.678**	0.660**	0.753**	0.755**	0.639**	0.643**	0.642**	0.620**
1000	0.471**	0.449**	0.611**	0.628**	0.577**	0.427**	0.527**	0.452**

1 月 600~400 hPa 等压面 08:00 大于 20:00,其他等压面则相反,7 月除 GTS12 探空仪 925、850、200 hPa 和 GTS1 探空仪 1000、850、400、200 hPa 等压面外 08:00 大于 20:00。

4 结论与讨论

基于 2020 年 1 月和 7 月探空仪换型期间 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪平行观测的各标准等压面上的温度、位势高度和相对湿度观测数据以及对应的 CMA-GFS 模式预报场数据,进行了观测数据的直接对比分析和基于模式数据的对比评估,得到以下主要结论:

(1)由观测数据质量控制分析可知,GTS12 探空仪异常离群错误数据相对较少,其各要素样本总量均大于 GTS1 探空仪,表明 GTS12 探空仪的整体观测性能优于 GTS1 探空仪。

(2)由 GTS12 探空仪相对于 GTS1 探空仪观测数据的偏差可知,两种探空仪温度和位势高度观测数据一致性较好,两者温度偏差绝对值除个别等压面外均小于 0.5℃,位势高度偏差绝对值除个别等压面外均小于 30.0 gpm;GTS12 探空仪测得的相对湿度显著大于 GTS1 探空仪,平均偏大约 4.6%。

(3)由仪器观测数据标准偏差可知,温度观测数据稳定性在 200 hPa 以下两种探空仪差异不大,200 hPa 以上 GTS12 探空仪明显优于 GTS1 探空仪;GTS12 探空仪位势高度观测数据稳定性明显优于 GTS1 探空仪;相对湿度观测数据稳定性在 1 月 600 hPa 以下和 7 月 400 hPa 以下两种探空仪差异不大,以上 GTS12 探空仪略差于 GTS1 探空仪。

(4)由基于模式数据的对比评估可知,GTS12 探空仪温度、位势高度和相对湿度观测数据相对于模式数据的偏差绝对平均值分别约为 0.34℃、11.05 gpm、5.26%,均方根误差分别约为 1.23℃、18.76 gpm、16.19%,相关系数分别约为 0.908、0.948、0.687;GTS1 探空仪对应的偏差绝对平均值为 0.44℃、14.97 gpm、8.59%,均方根误差为 1.31℃、25.16 gpm、18.44%,相关系数为 0.916、0.934、0.627。表明 GTS12 探空仪各要素观测数据与模式数据一致性优于 GTS1 探空仪。

总之,GTS12 探空仪传感器技术的改进,有效提高了探空仪的整体观测性能,提升了我国高空气象观测水平,特别是对 GTS1 探空仪相对湿度观测数据存在偏干的问题有了一定的改善。本文基于 2020 年 1 月和 7 月的平行观测数据采用相关指标进行了统计分析,相关结果具有一定的代表性,但也存在一定的局限性,尚需使用较长时间和较大范围的观测数据对统计结果进行深入分析和讨论。

参考文献

曹晓钟,2021. 气球探空国内外技术进展与展望[M]. 北京:气象出版社. Cao X Z, 2021. Progress and Prospect of Balloon Sounding Technology at Home and Abroad[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

龚玺,陈起英,倪长健,等,2023. 基于高垂直分辨率探空数据对五种典型下垫面湍流分布特征分析[J]. 气象,49(8):901-914. Gong X, Chen Q Y, Ni C J, et al, 2023. Turbulence distribution characteristics of five typical underlying surfaces based on high vertical resolution radiosonde data[J]. Meteor Mon, 49(8):901-914(in Chinese).

郭启云,钱媛,杨荣康,等,2020a. L 波段探空雷达测风质量控制方法研究[J]. 大气科学学报,43(5):845-855. Guo Q Y, Qian Y,

- Yang R K, et al, 2020a. Study on the quality control method of wind measurement of L-band sounding radar[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(5): 845-855 (in Chinese).
- 郭启云, 杨荣康, 程凯琪, 等, 2020b. 基于探空观测的多源掩星折射率质量控制及对比[J]. *应用气象学报*, 31(1): 13-26. Guo Q Y, Yang R K, Cheng K Q, et al, 2020b. Refractive index quality control and comparative analysis of multi-source occultation based on sounding observation[J]. *J Appl Meteor Sci*, 31(1): 13-26 (in Chinese).
- 郭启云, 赵培涛, 张玉存, 等, 2013. GTS1 型探空仪技术改进对比试验[J]. *气象科技*, 41(2): 254-258. Guo Q Y, Zhao P T, Zhang Y C, et al, 2013. Technical improvement and experimental analysis of GTS1 radiosonde[J]. *Meteor Sci Technol*, 41(2): 254-258 (in Chinese).
- 郝民, 龚建东, 田伟红, 等, 2018. L 波段探空仪湿度资料偏差订正及同化试验[J]. *应用气象学报*, 29(5): 559-570. Hao M, Gong J D, Tian W H, et al, 2018. Deviation correction and assimilation experiment on L-band radiosonde humidity data[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(5): 559-570 (in Chinese).
- 郝民, 龚建东, 王瑞文, 等, 2015. 中国 L 波段探空湿度观测资料的质量评估及偏差订正[J]. *气象学报*, 73(1): 187-199. Hao M, Gong J D, Wang R W, et al, 2015. The quality assessment and correction of the radiosonde humidity data biases of L-band in China[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(1): 187-199 (in Chinese).
- 黄炳勋, 1994. 国内外常规高空观测技术发展近况综述[J]. *气象*, 20(5): 3-9. Huang B X, 1994. A summary of recent progress in the upper-air observational techniques at home and abroad[J]. *Meteor Mon*, 20(5): 3-9 (in Chinese).
- 黄炳勋, 郭亚田, 陶士伟, 等, 2003. L 波段雷达-电子探空仪系统探空资料质量初析[C]// 中国气象学会 2003 年年会. 北京: 中国气象学会: 1785-1789. Huang B X, Guo Y T, Tao S W, et al, 2003. Preliminary analysis of sounding data quality of L-band radar system[C]// Annual Meeting 2003 of China Meteorological Society. Beijing: Chinese Meteorological Society: 1785-1789 (in Chinese).
- 黄嘉佑, 2004. 气象统计分析与预报方法: 第 3 版[M]. 北京: 气象出版社. Huang J Y, 2004. *Meteorological Statistical Analysis and Forecast Methods* [M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 贾秋兰, 梁春旺, 赵玉兵, 等, 2020. GTS12、GTS13 与 GTS1 数字探空仪观测数据对比分析[J]. *气象水文海洋仪器*, 37(3): 46-49. Jia Q L, Liang C W, Zhao Y B, et al, 2020. Comparative analysis on observation data of GTS12, GTS13 and GTS1 digital sounder[J]. *Meteor Hydrol Mar Instrum*, 37(3): 46-49 (in Chinese).
- 李秋阳, 王成刚, 王旻燕, 2022. 加密探空资料同化对北京地区边界层数值模拟的影响[J]. *气象*, 48(5): 580-594. Li Q Y, Wang C G, Wang M Y, 2022. Influence of densely-observed radiosonde data assimilation on numerical simulation of atmospheric boundary layer in Beijing Area[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 580-594 (in Chinese).
- 李伟, 李书严, 陶士伟, 等, 2008. L 波段高空气象探测系统性能评估[J]. *仪器仪表学报*, 29(4S): 732-735. Li W, Li S Y, Tao S W, et al, 2008. Performance evaluation of L band upper-air meteorological sounding system[J]. *Chin J Sci Instrum*, 29(4S): 732-735 (in Chinese).
- 李伟, 邢毅, 马舒庆, 2009. 国产 GTS1 探空仪与 VAISALA 公司 RS92 探空仪对比分析[J]. *气象*, 35(10): 97-102. Li W, Xing Y, Ma S Q, 2009. The analysis and comparison between GTS1 radiosonde made in China and RS92 radiosonde of Vaisala Company[J]. *Meteor Mon*, 35(10): 97-102 (in Chinese).
- 梁正鹏, 黄平, 马凤妮, 等, 2020. GTS1-2 与 GTS11 探空仪三亚观测数据对比分析[J]. *陕西气象*, (6): 60-63. Liang Z P, Huang P, Ma F W, et al, 2020. Comparative analysis of observation data of GTS1-2 and GTS11 radiosonde in Sanya[J]. *J Shaanxi Meteor*, (6): 60-63 (in Chinese).
- 马颖, 姚雯, 黄炳勋, 2010. 59 型与 L 波段探空仪温度和位势高度记录对比[J]. *应用气象学报*, 21(2): 214-220. Ma Y, Yao W, Huang B X, 2010. Comparison of temperature and geopotential height records between 59 type and L-band radiosonde systems[J]. *J Appl Meteor Sci*, 21(2): 214-220 (in Chinese).
- 钱媛, 马旭林, 郭启云, 等, 2019. 基于 FNL 和 GRAPES 分析场的探空温度数据的误差分析[J]. *气象*, 45(10): 1464-1475. Qian Y, Ma X L, Guo Q Y, et al, 2019. Error analysis of sounding temperature data based on the FNL and GRAPES analysis fields[J]. *Meteor Mon*, 45(10): 1464-1475 (in Chinese).
- 苏爱芳, 席乐, 吕晓娜, 等, 2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. *气象*, 48(5): 556-570. Su A F, Xi L, Lü X N, et al, 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 556-570 (in Chinese).
- 谭桂容, 郭志荣, 陈旭红, 2017. 数值天气预报产品释用实习教程[M]. 北京: 气象出版社. Tan G R, Guo Z R, Chen X H, 2017. *Interpretation and Application Practice Tutorial of Numerical Weather Prediction Products* [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 陶士伟, 陈晓红, 龚建东, 2006. L 波段探空仪温度资料误差分析[J]. *气象*, 32(10): 46-51. Tao S W, Chen X H, Gong J D, 2006. Error analyses for temperature of L band radiosonde[J]. *Meteor Mon*, 32(10): 46-51 (in Chinese).
- 王金成, 王丹, 王瑞文, 等, 2024. 往返平飘式探空在 CMA-MESO 三维变分中的同化及对模式预报的影响[J]. *气象*, 50(2): 159-169. Wang J C, Wang D, Wang R W, et al, 2024. Assimilation of round-trip horizontal drift radiosonde data in CMA-MESO 3DVar and its impact on model forecast[J]. *Meteor Mon*, 50(2): 159-169 (in Chinese).
- 王蕊, 袁湘玲, 赵遴, 等, 2021. 齐齐哈尔四种数字探空仪观测数据对比分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 15(6): 134-140. Wang R, Yuan X L, Zhao L, et al, 2021. Comparative analysis on observation data of four digital radiosondes in Qiqihar City[J]. *Desert Oasis Meteor*, 15(6): 134-140 (in Chinese).
- 王英, 熊安元, 2015. L 波段探空仪器换型对高空湿度资料的影响[J]. *应用气象学报*, 26(1): 76-86. Wang Y, Xiong A Y, 2015. Effects of radiosonde system changing to L-band radar digital

- radiosonde on humidity measurements in China[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1): 76-86(in Chinese).
- 韦芬芬, 汤剑平, 王淑瑜, 2015. 中国区域夏季再分析资料高空变量可信度的检验[J]. 地球物理学报, 58(2): 383-397. Wei F F, Tang J P, Wang S Y, 2015. A reliability assessment of upper-level reanalysis datasets over China[J]. Chinese J Geophys, 58(2): 383-397(in Chinese).
- 杨国彬, 郭启云, 舒康宁, 等, 2021. 基于名单控制方法的探空测风数据质量分析[J]. 气象, 47(6): 727-736. Yang G B, Guo Q Y, Shu K N, et al, 2021. Quality analysis of the radiosonde wind observation data based on the list control method[J]. Meteor Mon, 47(6): 727-736(in Chinese).
- 杨国彬, 舒康宁, 李成鹏, 等, 2022. 云南探空仪换型温度和位势高度观测数据对比分析[J]. 气象科技, 50(5): 636-645. Yang G B, Shu K N, Li C P, et al, 2022. Comparative analysis of temperature and geopotential height observation data of radiosonde type change in Yunnan[J]. Meteor Sci Technol, 50(5): 636-645(in Chinese).
- 姚乐宝, 沈丹, 孟雪峰, 等, 2024. 内蒙古区域数值预报对探空和地面观测资料的敏感性试验研究[J]. 气象, 50(2): 144-158. Yao L B, Shen D, Meng X F, et al, 2024. Experimental study on regional numerical forecast sensitivity to radiosonde and surface observation in Inner Mongolia[J]. Meteor Mon, 50(2): 144-158(in Chinese).
- 姚雯, 马颖, 2015. 秒级探空数据随机误差评估[J]. 应用气象学报, 26(5): 600-609. Yao W, Ma Y, 2015. Evaluation on the random error of second level sounding data[J]. J Appl Meteor Sci, 26(5): 600-609(in Chinese).
- 姚雯, 马颖, 高丽娜, 2017. L波段与59-701探空系统相对湿度对比分析[J]. 应用气象学报, 28(2): 218-226. Yao W, Ma Y, Gao L N, 2017. Comparison of relative humidity data between L-band and 59-701 sounding system[J]. J Appl Meteor Sci, 28(2): 218-226(in Chinese).
- 姚雯, 马颖, 王战, 等, 2012. 用数值预报场间接对比新疆两种型号探空系统[J]. 应用气象学报, 23(2): 159-166. Yao W, Ma Y, Wang Z, et al, 2012. Indirect comparison of two types of radiosonde systems deployed in Xinjiang using first guess fields[J]. J Appl Meteor Sci, 23(2): 159-166(in Chinese).
- 伊里哈木, 刘卫平, 胡义成, 等, 2013. 新疆探空8站仪器换型前后资料对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 7(2): 61-67. Yi L H M, Liu W P, Hu Y C, et al, 2013. Comparative analysis of high-altitude data before and after device change in Xinjiang[J]. Desert Oasis Meteor, 7(2): 61-67(in Chinese).
- 张立功, 陈志斌, 王勇, 等, 2007. L波段雷达-电子探空仪系统对比观测分析[J]. 气象科技, 35(1): 123-125. Zhang L G, Chen Z B, Wang Y, et al, 2007. Comparison of radiosonde observation and L-band radar data and 59-701 system[J]. Meteor Sci Technol, 35(1): 123-125(in Chinese).
- 张进, 孙健, 沈学顺, 等, 2023. CMA-GFS V4.0模式关键技术研发和业务化[J]. 应用气象学报, 34(5): 513-526. Zhang J, Sun J, Shen X S, et al, 2023. Key model technologies of CMA-GFS V4.0 and application to operational forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 34(5): 513-526(in Chinese).
- 张旭鹏, 郭启云, 杨荣康, 等, 2021. 基于“上升-平漂-下降”探空资料的长江中下游暴雨同化试验[J]. 气象, 47(12): 1512-1524. Zhang X P, Guo Q Y, Yang R K, et al, 2021. Assimilation experiment of rainstorm in the middle and lower reaches of the Yangtze River based on “up-drift-down” sounding data[J]. Meteor Mon, 47(12): 1512-1524(in Chinese).
- 张智华, 刘建忠, 2020. 北京地区风廓线雷达水平风资料评价分析[J]. 气象科技, 48(2): 154-162. Zhang Z H, Liu J Z, 2020. Comparison of wind profiler wind products against radiosonde measurements in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 48(2): 154-162(in Chinese).
- 赵天保, 符淙斌, 2009. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性[J]. 大气科学, 33(3): 634-648. Zhao T B, Fu C B, 2009. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China[J]. Chin J Atmos Sci, 33(3): 634-648(in Chinese).
- 中国气象局, 2010. 常规高空气象观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2010. Operational Specifications for Conventional High Altitude Observation[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 中国气象局, 2011. 无线电探空资料质量控制: QX/T 123—2011[S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2011. Quality control for radiosonde data: QX/T 123—2011[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 周雪松, 田泓, 2022. 三种新型探空仪的性能对比与分析[J]. 内蒙古气象, (6): 44-48. Zhou X S, Tian H, 2022. Performance comparison and analysis of three new types of sonde[J]. Meteor J Inner Mongolia, (6): 44-48(in Chinese).
- Bian J C, Chen H B, Vömel H, et al, 2011. Intercomparison of humidity and temperature Sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH[J]. Adv Atmos Sci, 28(1): 139-146.
- Carminati F, Migliorini S, Ingleby B, et al, 2019. Using reference radiosondes to characterise NWP model uncertainty for improved satellite calibration and validation[J]. Atmos Meas Tech, 12(1): 83-106.
- Naakka T, Nygård T, Tjernström M, et al, 2019. The impact of radiosounding observations on numerical weather prediction analyses in the Arctic[J]. Geophys Res Lett, 46(14): 8527-8535.
- Vaquero-Martinez J, Antón M, Ortiz de Galisteo J P, et al, 2019. Comparison of integrated water vapor from GNSS and radiosounding at four GRUAN stations[J]. Sci Total Environ, 648: 1639-1648.
- Yamazaki K, Miura H, 2021. On the formation mechanism of cirrus banding: Radiosonde observations, numerical simulations, and stability analyses[J]. J Atmos Sci, 78(11): 3477-3502.

(本文责编:俞卫平)