

# GTS12 与 GTS1 探空仪平行观测数据对比分析和评估\*

杨国彬<sup>1</sup> 郭启云<sup>2</sup> 夏元彩<sup>2</sup> 蒋锐<sup>1</sup> 舒康宁<sup>1</sup> 周明刚<sup>1</sup>

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

**摘要:** 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 °C 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 °C 和 0.44 °C, 平均均方根误差分别约为 1.23 °C 和 1.31 °C, 平均相关系数分别约为 0.908 和 0.916; 位势高度对应为 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:** P412.23

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

YANG Guobin<sup>1</sup> GUO Qiyun<sup>2</sup> XIA Yuancai<sup>2</sup> JIANG Rui<sup>1</sup> SHU Kangning<sup>1</sup> ZHOU Minggang<sup>1</sup>

1 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

2 Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

\* 资助项目: 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(2021QN01、2024CX02)、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共同资助

第一作者: 杨国彬, 主要从事气象资料质量控制与应用研究. Email: 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. Email: feng\_cloudy@163.com

24 **Abstract:** Based on the parallel observation data of GTS12 and GTS1 radiosondes from 89 high  
25 altitude meteorological observation stations in China and the model forecast field data of  
26 CMA-GFS, a comparative analysis and evaluation of the observation data of the two radiosondes  
27 on each mandatory level were conducted. The results show that the GTS12 radiosonde and GTS1  
28 radiosonde have good consistency in temperature and geopotential height observation data, the  
29 absolute value of bias of temperature and geopotential height are less than 0.5 °C and 30.0 gpm  
30 except for a few mandatory levels. The relative humidity observation data of GTS12 radiosonde is  
31 about 4.6 % larger than that of GTS1 radiosonde. For the stability of observation data, there is not  
32 much difference between the two types of radiosondes on the middle and lower mandatory levels.  
33 On the upper mandatory levels, the temperature and geopotential height of the GTS12 radiosonde  
34 are significantly better than those of the GTS1 radiosonde, but the relative humidity is slightly  
35 worse than that of the GTS1 radiosonde. The absolute average bias of temperature observed by  
36 GTS12 radiosonde and GTS1 radiosonde relative to the CMA-GFS model data is about 0.34 °C  
37 and 0.44 °C, respectively. The average root mean square error is about 1.23 °C and 1.31 °C, and  
38 the average related coefficient is about 0.908 and 0.916, respectively. The corresponding of  
39 geopotential heights are 11.05 gpm and 14.97 gpm, 18.76 gpm and 25.16 gpm, 0.948 and 0.934.  
40 The corresponding of relative humidity are 5.26% and 8.59%, 16.19% and 18.44%, 0.687 and  
41 0.627, indicating that the consistency between the observation data of the GTS12 radiosonde and  
42 the CMA-GFS model data is better than that of the GTS1 radiosonde. The improvement of GTS12  
43 radiosonde sensor technology has effectively enhanced the overall observation performance of the  
44 radiosonde.

45 **Key words:** GTS12 radiosonde; GTS1 radiosonde; parallel observation data; comparative  
46 analysis; evaluation

## 47 引 言

48 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  
49 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)。  
50 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  
51 (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,  
52 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)、

53 GNSS 水汽 (Vaquero-Martínez et al, 2019)、卫星 (Carminati et al, 2019; 郭启云等, 2020a)  
54 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  
55 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,  
56 2022; 龚玺等, 2023)。

57 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,  
58 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)。  
59 探空仪在 20 世纪 20 年代后得到快速发展 (黄炳勋, 1994), 20 世纪 80 年代后世界各国相  
60 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  
61 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  
62 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  
63 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了对比研究, 指出  
64 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  
65 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  
66 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;  
67 张立功等, 2007; 伊里哈木等, 2013)。有学者对全国高空气象观测站相对湿度观测资料的  
68 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 (郝民等, 2015;  
69 王英和熊安元, 2015; 姚雯等, 2017)。

70 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  
71 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  
72 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  
73 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  
74 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。  
75 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, 将上海长望气象科技股份  
76 有限公司生产的 GTS1 型探空仪换型为 GTS12 型探空仪, 将太原无线电一厂有限公司生产  
77 的 GTS1-1 型探空仪换型为 GTS13 型探空仪, 将南京大桥机器有限公司生产的 GTS1-2 型探  
78 空仪换型为 GTS11 型探空仪。换型后探空仪相对于换型前探空仪工作方式、数据格式等未  
79 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  
80 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  
81 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

82 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）。

83 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  
84 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  
85 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  
86 和 20:00 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，  
87 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  
88 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、  
89 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 WMO 对全球气候观测系统  
90 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  
91 进行了对比分析，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  
92 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  
93 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  
94 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  
95 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  
96 等，2021）。

97 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  
98 有全国范围的对比研究，为了较为全面的分析探空仪换型前后观测数据的差异，系统的分析  
99 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  
100 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，  
101 使用客观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  
102 的重要手段（姚雯等，2012；钱媛等，2019；郭启云等，2020b；杨国彬等，2021），但由于  
103 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，  
104 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  
105 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  
106 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  
107 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  
108 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  
109 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  
110 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

111 和探测数据应用提供一定的参考。

## 112 1 数据与方法

### 113 1.1 数据

114 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，  
115 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，在我国的 120  
116 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  
117 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，  
118 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、  
119 700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、40、30、20、15、10 hPa）上  
120 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  
121 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  
122 高度和相对湿度观测数据。

123 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  
124 压的比值求得，而计算水面饱和水汽压的公式的适用温度范围为-50 ~100 °C，因此当温度  
125 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  
126 -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  
127 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，  
128 相对湿度仅选用 1000~200 hPa 各标准等压面上的数据。

129 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  
130 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报系统（CMA Global Forecast  
131 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  
132 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  
133 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  
134 一时次的 12 小时预报产品。

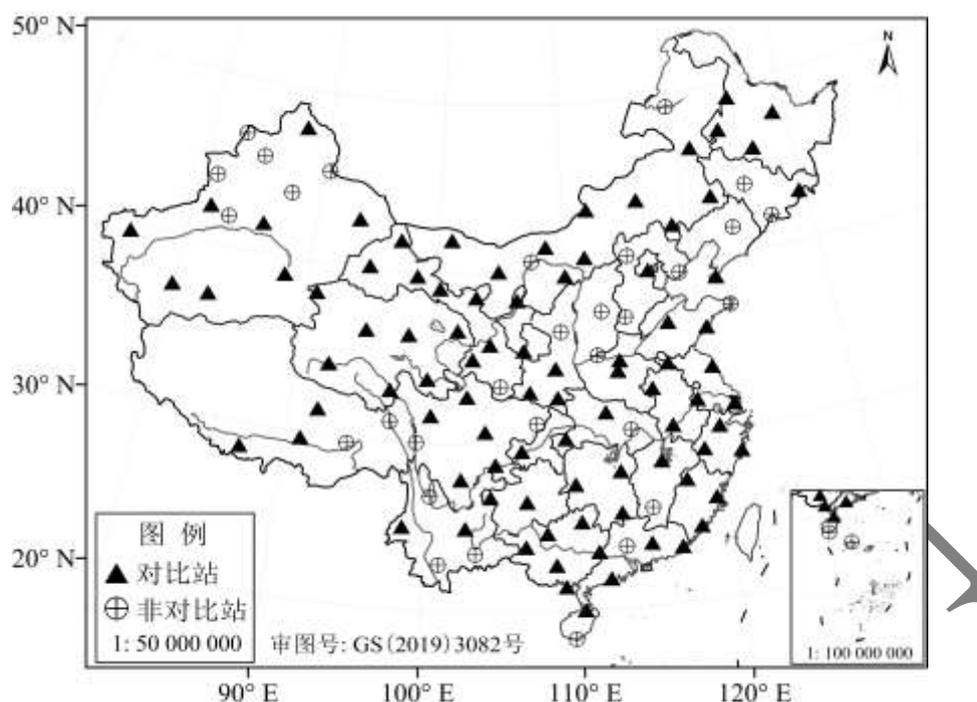


图 1 全国高空气象观测站点分布图

Fig. 1 The distribution of high altitude meteorological observation stations in China

## 1.2 观测数据质量控制

由于电磁干扰、仪器变性、信号突变、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、缺测值检查、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 $\sigma$ ，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控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

153 探空仪，除 600 hPa 附近个别等压面外，GTS12 探空仪样本量均大于 GTS1 探空仪，100 hPa  
 154 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，反应出  
 155 GTS12 探空仪的整体观测性能优于 GTS1 探空仪。

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  
 Table 1 Sample size of parallel observation data of GTS12 and GTS1 radiosondes on each  
 mandatory level

要素 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	26878	22598	26738	22605	21041	18854

156

157 1.3 观测数据对比分析和评估指标

158 1.3.1 观测数据直接对比分析指标

159 (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  
 160 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  
 161 空仪观测数据的偏差为:

162 
$$Bias_1 = X_{12} - X_1 \quad (1)$$

163 (2) 标准偏差 (Standard Deviation, SD): 表征随机误差大小的代表值，可以有效反应  
 164 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

165 压面共有  $N$  个观测数据，则标准偏差计算公式为：

$$166 \quad SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

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

### 168 1.3.2 基于模式数据的评估指标

169 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  
170 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  
171 对两种探空仪观测数据进行评估分析。

172 （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  
173 报场数据为  $B$ ，则观测数据相对于模式数据的偏差为：

$$174 \quad Bias_2 = O - B \quad (3)$$

175 （2）均方根误差（Root Mean Square Error,  $RMSE$ ）：描述观测数据与模式数据之间离  
176 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。均方根差计算公式  
177 为：

$$178 \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M BIAS_{2i}^2} \quad (4)$$

179 式中， $M$  为某一标准等压面上所有站点的观测数据总量。

180 （3）相关系数（Related Coefficient,  $R$ ）：衡量观测数据与模式数据之间关系密切程度  
181 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：

$$182 \quad R = \frac{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M (B_i - \bar{B})^2}} \quad (5)$$

183 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。

184 相关系数是否显著需要作统计检验（黄嘉佑，2004），相关系数  $R$  的概率密度函数遵从  
185 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

$$186 \quad t = \frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \cdot \sqrt{M-2} \quad (6)$$

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

## 189 2 观测数据直接对比分析结果

190 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  
191 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  
192 行直接对比分析。

### 193 2.1 偏差

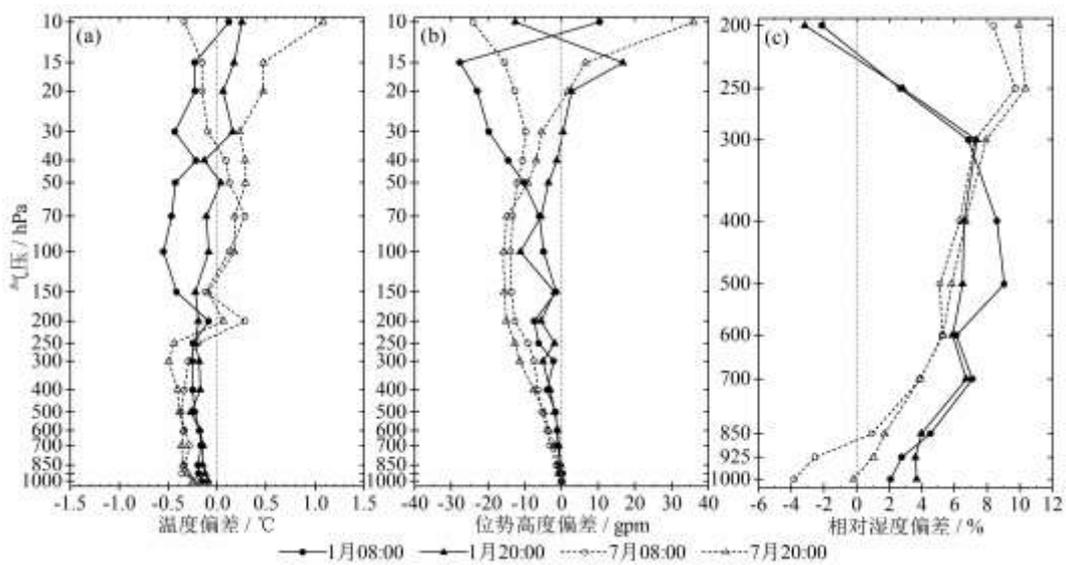
194 首先计算各高空气象观测站各标准等压面上 GTS12 探空仪相对于 GTS1 探空仪观测数  
195 据的偏差, 再求平均得出所有站点的偏差, 结果如图 2 所示。由图 2a 可知, 温度偏差绝对  
196 值除 1 月 08:00 的 100 hPa ( $-0.55\text{ }^\circ\text{C}$ ) 和 7 月 20:00 的 10 hPa ( $1.08\text{ }^\circ\text{C}$ ) 外均小于  $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  
197 在 200 hPa 以下均为负偏差, 200 hPa 以上 08:00 以负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

203 由图 2b 可知, 位势高度偏差绝对值除 7 月 20:00 的 10 hPa ( $35.9\text{ gpm}$ ) 外均小于  $30.0\text{ gpm}$ ,  
204 除底层和高层极少部分等压面外均为负偏差。08:00 的 1000、40—15 hPa 和 20:00 的 1000、  
205 20、15 hPa 等压面 1 月偏差绝对值大于 7 月, 其他等压面则相反。1 月除 300、100、10 hPa  
206 外 08:00 偏差绝对值大于 20:00, 40—15 hPa 两个时次差异大于  $10\text{ gpm}$ , 其中 20 hPa 最大为  
207  $20.2\text{ gpm}$ ; 7 月 400—70、10 hPa 等压面 08:00 偏差绝对值小于 20:00, 其他等压面则相反,  
208 除 20—10 hPa 外两个时次差异小于  $5\text{ gpm}$ , 10 hPa 两个时次差异最大为  $11.8\text{ gpm}$ 。

209 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  $10\%$ ,  
210 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  
211 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  
212 hPa 等压面 1 月偏差绝对值大于 7 月, 其他等压面则相反。1 月 850—400 hPa 和 7 月 1000、  
213 925 hPa 等压面 08:00 偏差绝对值大于 20:00, 其他等压面则相反, 1 月 500、400 hPa 和 7 月  
214 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  $3.6\%$ 。

215 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,

216 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  
 217 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  
 218 溅射镀膜铝珠状热敏电阻, 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  
 219 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  
 220 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  
 221 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  
 222 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。



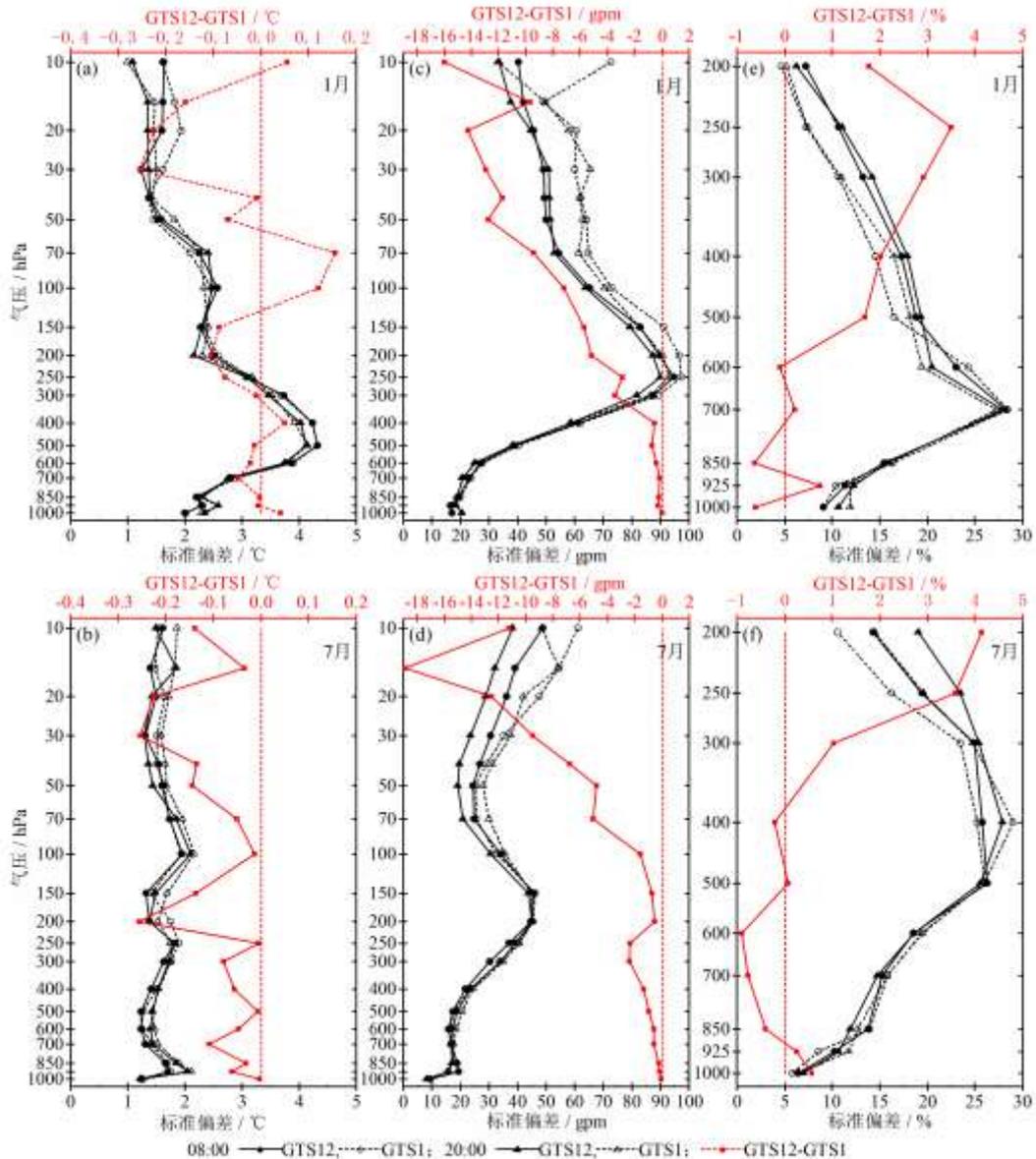
223  
 224 图2 1月和7月各标准等压面GTS12探空仪相对于GTS1探空仪温度(a)、位势高度(b)和相对湿度(c)  
 225 观测数据偏差

226 Fig. 2 Bias of temperature (a), geopotential height (b) and relative humidity (c) observation data of GTS12  
 227 radiosonde relative to GTS1 radiosonde on different mandatory levels in January and July

## 2.2 标准偏差

229 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  
 230 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和图3b可知,  
 231 1月GTS12探空仪和GTS1探空仪温度标准偏差分别在1.1~4.32 °C和1.0~4.33 °C, 7月对  
 232 应为1.22~2.11 °C和1.24~2.16 °C; 除1月1000、400、100、70、10 hPa外GTS12探空仪  
 233 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 °C。由图3c和  
 234 图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  
 235 和16.86~97.39 gpm, 7月对应为8.10~48.79 gpm和8.24~61.18 gpm; 除1月1000 hPa外GTS12  
 236 探空仪标准偏差小于GTS1探空仪, 两种探空仪标准偏差差异基本随其他减小而增大。由图  
 237 3e和图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 %

238 和 4.69~28.36 %，7 月对应为 6.44~27.92 % 和 5.76~28.96 %；除 1 月 1000、850、600 hPa 和  
 239 7 月 850、700、600、400 hPa 外 GTS12 探空仪标准偏差大于 GTS1 探空仪，1 月 600 hPa 以  
 240 下和 7 月 400 hPa 以下两种探空仪标准偏差差异小于 1 %。



241  
 242 图 3 1 月和 7 月各标准等压面 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪温度 (a, b)、位势高度 (c, d) 和相对湿度 (e、  
 243 f) 观测数据标准偏差

244 Fig. 3 Standard deviation of temperature (a, b), geopotential height (c, d) and relative humidity (e, f) observation  
 245 data of GTS12 radiosonde and GTS1 radiosonde on different mandatory levels in January and July

### 246 3 基于模式数据的评估结果

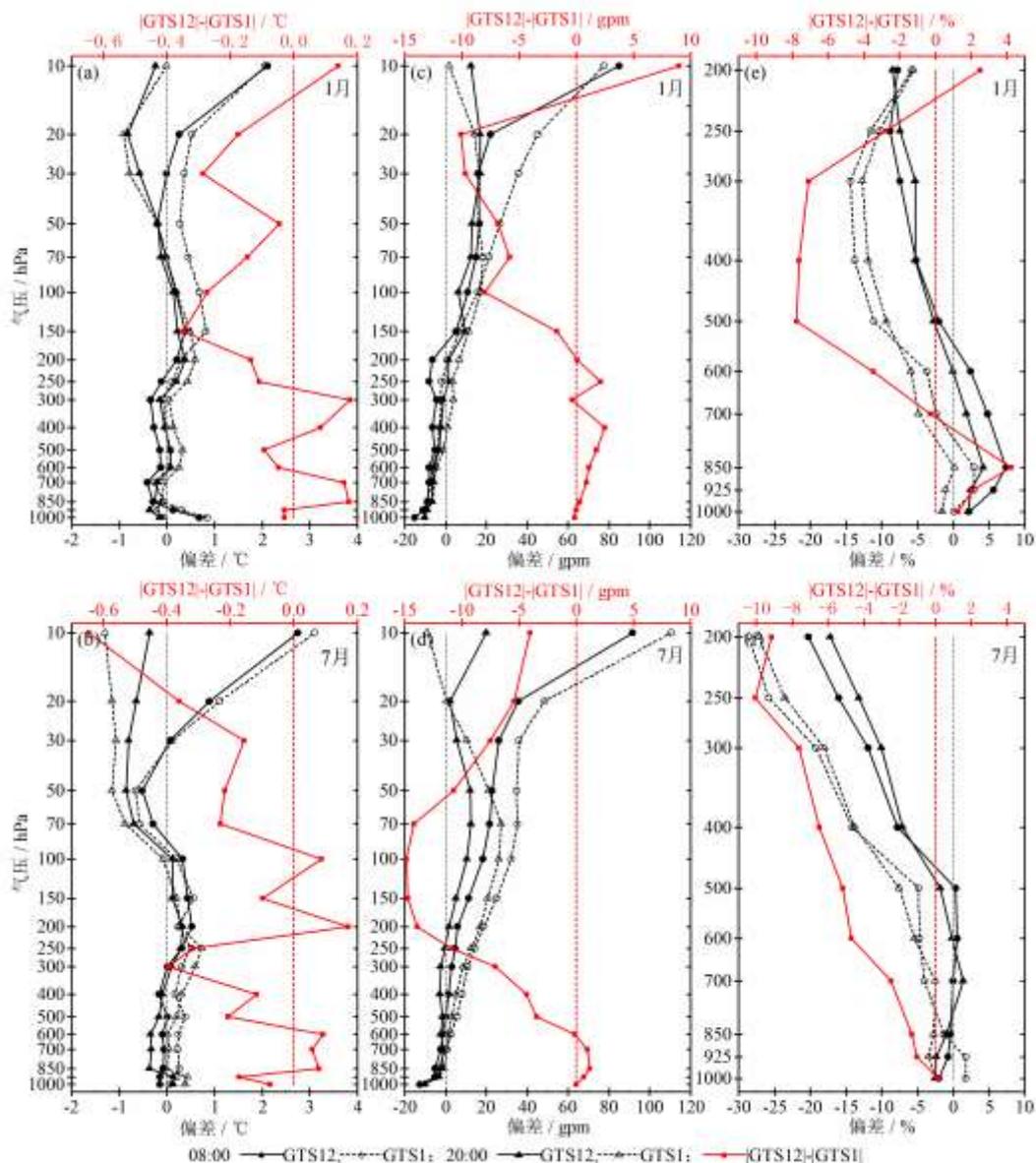
247 由上述分析可知，除个别等压面外两种探空仪温度和位势高度观测数据差异较小，  
 248 GTS12 探空仪相对湿度观测数据显著大于 GTS1 探空仪；两种探空仪观测数据标准偏差随气  
 249 压变化形势基本一致。为进一步对比两种探空仪观测数据，通过计算观测数据与 CMA-GFS

250 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。

### 251 3.1 偏差

252 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  
253 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、  
254 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  
255 和 12.85 gpm、4.69 % 和 6.57 %；7月对应为 0.37 °C 和 0.52 °C、10.72 gpm 和 17.09 gpm、  
256 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  
257 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  
258 图可知，同一月份的同一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  
259 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  
260 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。

261 由图 4a 和图 4b 可知，1月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪偏差分别在-0.82~2.11 °C 和  
262 -0.91~2.06 °C，7月对应为-0.85~2.74 °C 和-1.29~3.11 °C，除 1月 08:00 的 10 hPa 和 7月 50  
263 —10 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 hPa 和 7  
264 月 850、700、600、200、100 hPa 外 GTS12 探空仪偏差绝对值小于 GTS1 探空仪。由图 4c  
265 和图 4d 可知，1月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪偏差分别在-14.96~84.93 gpm 和-15.06~77.51  
266 gpm，7月对应为-12.77~91.39 gpm 和-12.72~110.37 gpm，除 1月 08:00 的 20、10 hPa 和 7  
267 月 150—10 hPa 部分等压面外位势高度偏差绝对值小于 20 gpm；除 1月 925—400、250、200  
268 hPa 和 7月 925—700 hPa 外 GTS12 探空仪偏差绝对值小于 GTS1 探空仪。由图 4e 和图 4f  
269 可知，1月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪偏差分别在-8.82~7.44 % 和-14.33~2.91 %，7月对  
270 应分别为-20.29~1.42 % 和-28.64~1.81 %，GTS12 探空仪除 7月 300—200 hPa 外相对湿度偏差绝  
271 对值均小于 10 %，GTS1 探空仪 1月 500—250 hPa 和 7月 400—200 hPa 相对湿度偏差绝对  
272 值大于 10 %；除 1月 1000—850、200 hPa 和 7月 1000 hPa 外 GTS12 探空仪偏差绝对值小  
273 于 GTS1 探空仪。



274  
275 图 4 1 月和 7 月各标准等压面 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪温度 (a、b)、位势高度 (c、d) 和相对湿度 (e、  
276 f) 观测数据相对于模式数据偏差

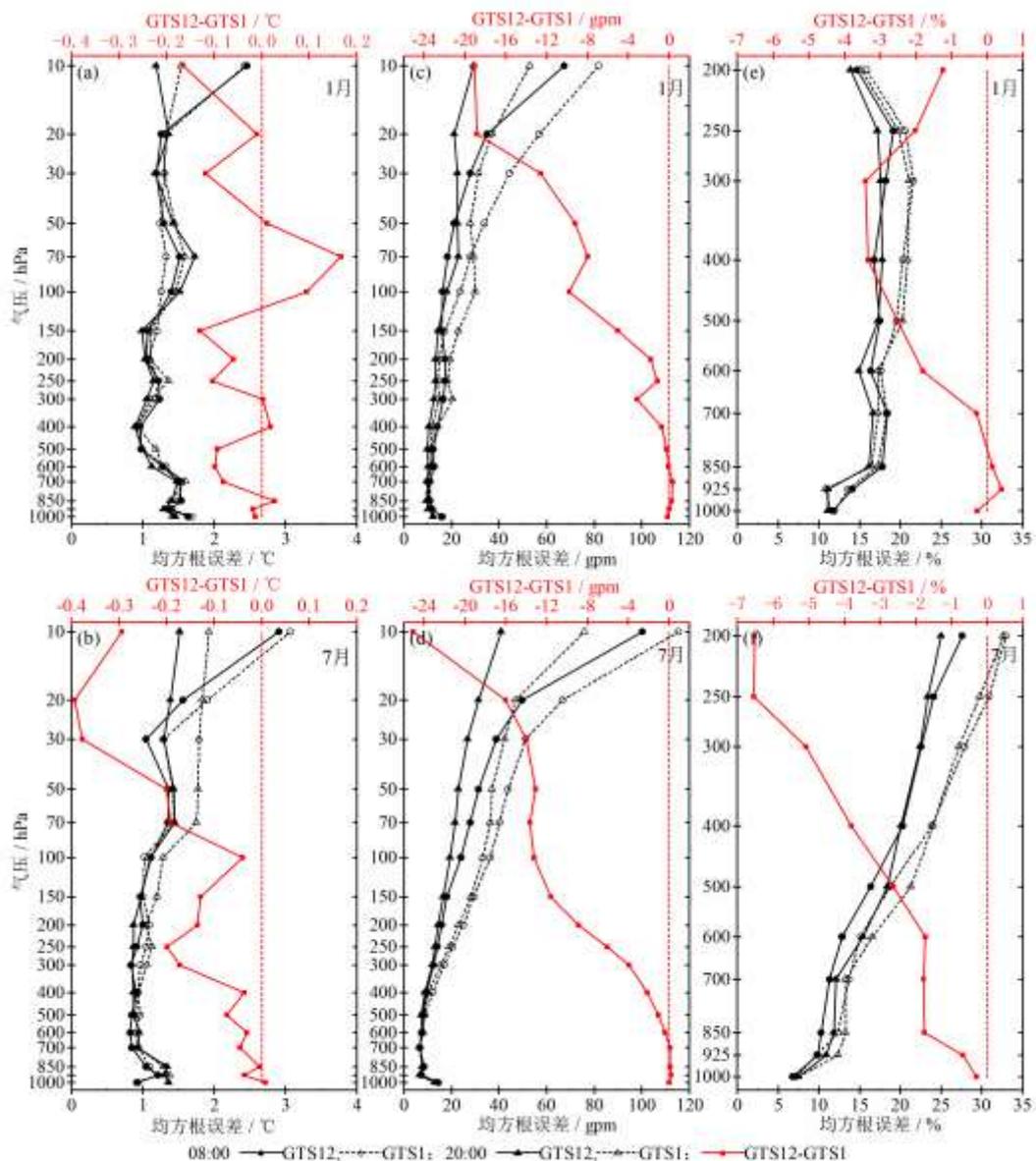
277 Fig. 4 Bias of temperature (a, b), geopotential height (c, d) and relative humidity (e, f) observation data of GTS12  
278 radiosonde and GTS1 radiosonde relative to mode data on different mandatory levels in January and July

279 3.2 均方根误差

280 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  
281 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、  
282 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、  
283 15.93 % 和 17.36 %; 7 月对应为 1.15 °C 和 1.29 °C、19.73 gpm 和 27.29 gpm、16.44 % 和  
284 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、  
285 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

286 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  
287 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，  
288 7 月基本随气压减小而增大。

289 由图 5a 和图 5b 可知，1 月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪均方根误差分别在 0.89~2.46 °C  
290 和 0.90~2.43 °C，7 月对应为 0.83~2.90 °C 和 0.89~3.07 °C，除 08:00 的 10 hPa 外温度均方  
291 根误差均小于 2.0 °C；除 1 月 850、400、300、100—50 hPa 和 7 月 1000 hPa 外 GTS12 探空  
292 仪均方根误差小于 GTS1 探空仪。由图 5c 和图 5d 可知，1 月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪  
293 均方根误差分别在 9.74~67.48 gpm 和 9.56~81.85 gpm，7 月对应为 6.72~100.30 gpm 和  
294 6.53~115.43 gpm，除 20—10 hPa 个别时次外位势高度均方根误差均小于 60.0 gpm；除 1 月  
295 925—700 hPa 和 7 月 1000—700 hPa 外 GTS12 探空仪均方根误差小于 GTS1 探空仪。由图  
296 5e 和图 5f 可知，1 月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪均方根误差分别在 11.07~19.11 % 和  
297 10.85~21.63 %，7 月对应为 6.75~27.54 % 和 7.26~32.93 %，除 1 月 GTS1 探空仪 500—250 hPa  
298 和 7 月 500—200 hPa 外相对湿度均方根误差均小于 20.0 %；除 1 月 925、850 hPa 外 GTS12  
299 探空仪均方根误差小于 GTS1 探空仪。



300 图 5 1 月和 7 月各标准等压面 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪温度 (a、b)、位势高度 (c、d) 和相对湿度 (e、  
 301 f) 观测数据相对于 CMA-GFS 模式数据均方根误差  
 302

303 Fig. 5 RMSE of temperature (a, b), geopotential height (c, d) and relative humidity (e, f) observation data of  
 304 GTS12 radiosonde and GTS1 radiosonde relative to CMA-GFS mode data on different mandatory levels in  
 305 January and July

### 306 3.3 相关系数

307 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 至表 4 所  
 308 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  
 309 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  
 310 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  
 311 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

312 月，500 hPa 以上则相反。

313 由表 2 可知，温度相关系数在 50 hPa 以下同一月份各等压面间差异较小，且两种探空  
 314 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  
 315 GTS12 小于 GTS1，20:00 则 GTS12 大于 GTS1。1 月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪平均相  
 316 关系数分别约为 0.911 和 0.927，7 月对应为 0.905 和 0.904；同一探空仪相关系数除 1 月 20 hPa  
 317 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。  
 318

表 2 1 月和 7 月各标准等压面温度观测数据与模式数据相关系数  
 Table 2 Related coefficient of temperature observation data and model data on different  
 mandatory levels in January and July

气压/hPa	时次	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 的显著性检查，下同。

Note: \* and \*\* respectively indicate that the related coefficient has passed the significance check of 0.05 and 0.01, the same below.

319  
 320 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  
 321 以及 7 月的 1000—100 hPa 两种探空仪差异不大，其它等压面同一时次 GTS12 探空仪大于  
 322 GTS1 探空仪。1 月 GTS12 探空仪和 GTS1 探空仪平均相关系数分别约为 0.960 和 0.943，7  
 323 月对应为 0.936 和 0.924。1 月 GTS12 探空仪 1000—50 hPa 等压面 08:00 和 20:00 差异不大，  
 324

325  
 326  
 327

324 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  
 325 他等压面则相反; 7 月同一探空仪 08:00 和 20:00 差异不大。  
 326

表 3 1 月和 7 月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 Related coefficient of geopotential height observation data and model data on different mandatory levels in January and July

气压/hPa	时次	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**	

327  
 329 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  
 330 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  
 331 探空仪平均相关系数分别约为 0.653 和 0.575, 7 月对应为 0.720 和 0.679。同一探空仪相关  
 332 系数在 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  
 333 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。  
 334

表 4 1 月和 7 月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 Related coefficient of relative humidity observation data and model data on different mandatory levels in January and July

气压/hPa	时次	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**

336

## 338 4 结论与讨论

339 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  
 340 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，  
 341 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：

342 (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，GTS12  
 343 探空仪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  
 344 探空仪。

345 (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  
 346 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 °C，位势高度  
 347 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  
 348 探空仪，平均偏大约 4.6%。

349 (3) 由仪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  
 350 异不大，200hPa 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  
 351 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  
 352 以下两种探空仪差异不大，以上 GTS12 探空仪略差于 GTS1 探空仪。

353 (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  
 354 数据相对于模式数据的偏差绝对平均值分别约为 0.34 °C、11.05 gpm、5.26 %，均方根误差  
 355 分别约为 1.23 °C、18.76 gpm、16.19 %，相关系数分别约为 0.908、0.948、0.687；GTS1 探  
 356 空仪对应的偏差绝对平均值为 0.44 °C、14.97 gpm、8.59 %，均方根误差为 1.31 °C、25.16  
 357 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  
 358 式数据一致性优于 GTS1 探空仪。

359 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  
360 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  
361 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  
362 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  
363 对统计结果进行深入分析和讨论。

## 364 参考文献

- 365 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  
366 technology at home and abroad[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译,  
367 请确认) 已修改, 未找到已有英文翻译, 自主翻译
- 368 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.  
369 Gong X, Chen Q Y, Ni C J, et al, 2023. Turbulence distribution characteristics of five typical underlying surfaces based on high  
370 vertical resolution radiosonde data[J]. Meteor Mon, 49(8): 901-914 (in Chinese).
- 371 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,  
372 et al, 2013. Technical improvement and experimental analysis of GTS1 radiosonde[J]. Meteor Sci Technol, 41(2): 254-258 (in  
373 Chinese).
- 374 郭启云, 杨荣康, 程凯琪, 等, 2020a. 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,  
375 Yang R K, Cheng K Q, et al, 2020a. Refractive index quality control and comparative analysis of multi-source occultation based on  
376 sounding observation[J]. J Appl Meteor Sci, 31(1): 13-26 (in Chinese).
- 377 郭启云, 钱媛, 杨荣康, 等, 2020b. 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,  
378 Yang R K, et al, 2020b. Study on the quality control method of wind measurement of L-band sounding radar[J]. Trans Atmos Sci,  
379 43(5): 845-855 (in Chinese).
- 380 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,  
381 Gong J D, Wang R W, et al, 2015. The quality assessment and correction of the radiosonde humidity data biases of L-band in  
382 China[J]. Acta Meteor Sin, 73(1): 187-199 (in Chinese).
- 383 郝民, 龚建东, 田伟红, 等, 2018. L 波段探空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,  
384 Tian W H, et al, 2018. Deviation correction and assimilation experiment on L-band radiosonde humidity data[J]. J Appl Meteor Sci,  
385 29(5): 559-570 (in Chinese).
- 386 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  
387 upper-air observational techniques at home and abroad[J]. Meteor Mon, 20(5): 3-9 (in Chinese).
- 388 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  
389 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  
390 system[C]/Annual Meeting 2003 of China Meteorological Society. Beijing: Chinese Meteorological Society: 1785-1789 (in  
391 Chinese). (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认) 确认无误, 未找到已有英文翻译, 自主翻译
- 392 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  
393 forecast methods[M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确  
394 认) 已修改, 未找到已有英文翻译, 自主翻译
- 395 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  
396 Q L, Liang C W, Zhao Y B, et al, 2020. Comparative analysis on observation data of GTS12, GTS13 and GTS1 digital sounder[J].  
397 Meteor Hydrol Mar Instrum, 37(3): 46-49 (in Chinese).
- 398 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,

399 Wang M Y, 2022. Influence of densely-observed radiosonde data assimilation on numerical simulation of atmospheric boundary  
400 layer in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 48(5): 580-594 (in Chinese).

401 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  
402 al, 2008. Performance evaluation of L band upper-air meteorological sounding system[J]. Chin J Sci Instrum, 29(4S): 732-735 (in  
403 Chinese).

404 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  
405 Q, 2009. The analysis and comparison between GTS1 radiosonde made in China and RS92 radiosonde of Vaisala Company[J].  
406 Meteor Mon, 35(10): 97-102 (in Chinese).

407 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  
408 F W, et al, 2020. Comparative analysis of observation data of GTS1-2 and GTS11 radiosonde in Sanya[J]. J Shaanxi Meteor, (6):  
409 60-63 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认) 确认无误, 未找到已有英文翻译, 自主翻译

410 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  
411 B X, 2010. Comparison of temperature and geopotential height records between 59 type and L-band radiosonde systems[J]. J Appl  
412 Meteor Sci, 21(2): 214-220 (in Chinese).

413 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,  
414 Ma X L, Guo Q Y, et al, 2019. Error analysis of sounding temperature data based on the FNL and GRAPES analysis fields[J].  
415 Meteor Mon, 45(10): 1464-1475 (in Chinese).

416 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,  
417 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. Meteor Mon, 48(5): 556-570  
418 (in Chinese).

419 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.  
420 Interpretation and application practice tutorial of numerical weather prediction products[M]. Beijing: China Meteorological Press (in  
421 Chinese). (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认) 已修改, 未找到已有英文翻译, 自主翻译

422 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  
423 analyses for temperature of L band radiosonde[J]. Meteor Mon, 32(10): 46-51 (in Chinese).

424 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):  
425 159-169. Wang J C, Wang D, Wang R W, et al, 2024. Assimilation of round-trip horizontal drift radiosonde data in CMA-MESO  
426 3DVar and its impact on model forecast[J]. Meteor Mon, 50(2): 159-169 (in Chinese).

427 王蕊, 袁湘玲, 赵遵, 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  
428 L, Zhao L, et al, 2021. Comparative analysis on observation data of four digital radiosondes in Qiqihar city[J]. Desert Oasis Meteor,  
429 15(6): 134-140 (in Chinese).

430 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  
431 of radiosonde system changing to L-band radar digital radiosonde on humidity measurements in China[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1):  
432 76-86 (in Chinese).

433 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  
434 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  
435 Chinese).

436 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  
437 K N, et al, 2021. Quality analysis of the radiosonde wind observation data based on the list control method[J]. Meteor Mon, 47(6):  
438 727-736 (in Chinese).

439 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,  
440 Shu K N, Li C P, et al, 2022. Comparative analysis of temperature and geopotential height observation data of radiosonde type  
441 change in Yunnan[J]. Meteor Sci Technol, 50(5): 636-645 (in Chinese).

442 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

443 B, Shen D, Meng X F, et al, 2024. Experimental study on regional numerical forecast sensitivity to radiosonde and surface  
444 observation in Inner Mongolia[J]. Meteor Mon, 50(2): 144-158 (in Chinese).

445 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,  
446 Wang Z, et al, 2012. Indirect comparison of two types of radiosonde systems deployed in Xinjiang using first guess fields[J]. J Appl  
447 Meteor Sci, 23(2): 159-166 (in Chinese).

448 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  
449 error of second level sounding data[J]. J Appl Meteor Sci, 26(5): 600-609 (in Chinese).

450 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,  
451 2017. Comparison of relative humidity data between L-band and 59-701 sounding system[J]. J Appl Meteor Sci, 28(2): 218-226 (in  
452 Chinese).

453 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  
454 W P, Hu Y C, et al, 2013. Comparative analysis of high-altitude data before and after device change in Xinjiang[J]. Desert Oasis  
455 Meteor, 7(2): 61-67 (in Chinese).

456 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,  
457 Wang Y, et al, 2007. Comparison of radiosonde observation and L-band radar data and 59-701 system[J]. Meteor Sci Technol, 35(1):  
458 123-125 (in Chinese).

459 张进, 孙健, 沈学顺, 等. CMA-GFS V4.0模式关键技术研发和业务化. 应用气象学报, 2023, 34(5): 513-526. Zhang J, Sun J, Shen X  
460 S, et al. Key model technologies of CMA-GFS V4.0 and application to operational forecast. J Appl Meteor Sci, 2023, 34(5): 513-526  
461 (in Chinese).

462 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.  
463 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  
464 River based on “up-drift-down” sounding data[J]. Meteor Mon, 47(12): 1512-1524 (in Chinese).

465 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.  
466 Comparison of wind profiler wind products against radiosonde measurements in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 48(2): 154-162 (in  
467 Chinese).

468 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  
469 B, 2009. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China[J]. Chin J Atmos Sci,  
470 33(3): 634-648 (in Chinese).

471 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  
472 specifications for conventional high altitude observation[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese). (查阅网上资料,  
473 未找到对应的英文翻译, 请确认) 已修改, 参考该文最后一篇文献的翻译(柳士俊, 杨荣康, 曹晓钟, 等. 2022. 对流层平流  
474 层往返式平漂探空气球系统的动力热力过程理论分析与数值试验[J]. 大气科学, 46(4): 788-804.)

475 中国气象局, 2011. QX/T 123-2011 无线电探空资料质量控制[S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration,  
476 2011. QX/T 123-2011 Quality control for radiosonde data[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese). (查阅网上资料, 未  
477 找到对应的英文翻译, 请确认) 确认无误, 与标准文本里面的翻译一致

478 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  
479 comparison and analysis of three new types of sonde[J]. Meteor J Inner Mongolia, (6): 44-48 (in Chinese).

480 Bian J C, Chen H B, Vömel H, et al, 2011. Intercomparison of humidity and temperature Sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH[J]. Adv  
481 Atmos Sci, 28(1): 139-146.

482 Carminati F, Migliorini S, Ingleby B, et al, 2019. Using reference radiosondes to characterise NWP model uncertainty for improved  
483 satellite calibration and validation[J]. Atmos Meas Tech, 12(1): 83-106.

484 Naakka T, Nygård T, Tjernström M, et al, 2019. The impact of radiosounding observations on numerical weather prediction analyses in  
485 the Arctic[J]. Geophys Res Lett, 46(14): 8527-8535.

486 Vaquero-Martínez J, Antón M, Ortiz de Galisteo J P, et al, 2019. Comparison of integrated water vapor from GNSS and radiosounding at

- 487 four GRUAN stations[J]. Sci Total Environ, 648: 1639-1648.  
488 Yamazaki K, Miura H, 2021. On the formation mechanism of cirrus banding: Radiosonde observations, numerical simulations, and  
489 stability analyses[J]. J Atmos Sci, 78(11): 3477-3502.

