

郭启云,杨荣康,钱媛,等,2018. 气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空对比分析[J]. 气象,44(8):1094-1103.

# 气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空对比分析\*

郭启云<sup>1</sup> 杨荣康<sup>1</sup> 钱媛<sup>1,2</sup> 曹晓钟<sup>1</sup> 雷勇<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国气象局气象探测中心,北京 100081

<sup>2</sup> 南京信息工程大学,南京 210044

**提 要:** 开展气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的探空仪观测试验,建立针对下投式的温度、湿度和气压试验评估方法。试验结果表明上升段的北斗温度、气压测量准确度与 RS92 基本相当,湿度差于 RS92 双加热湿度传感器;下降段的北斗温度测量准确度与下降段的 RS92 基本相当,气压由于快速下降对定位有一定影响从而导致气压误差较大,相对湿度误差基本上在 5% 以内,符合 WMO 的测量要求;与风廓线雷达进行时空匹配,上升段北斗风向测量准确度差于 RS92,风速测量准确度明显优于 RS92。试验同时还验证了气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降全程 2 次探空观测模式具有很好的应用前景,可以实现高空站网的时空加密。

**关键词:** 探空仪,试验,评估

**中图分类号:** P414

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.08.011

## Full-Range Sounding Comparison Analysis of Balloon Borne Radiosonde Rising and Parachute Carrying Radiosonde Descending

GUO Qiyun<sup>1</sup> YANG Rongkang<sup>1</sup> QIAN Yuan<sup>1,2</sup> CAO Xiaozhong<sup>1</sup> LEI Yong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

<sup>2</sup> Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** The observation experiments of balloon borne radiosonde rising and parachute carrying radiosonde descending were carried out, and the methods for evaluating the temperature, relative humidity and pressure of dropsonde were established. The results showed that the accuracy of temperature and pressure of Beidou dropsonde ascending is quite similar to that of RS92, and the relative humidity is worse than the double heating humidity sensor of RS92. The accuracy of temperature of Beidou dropsonde descending is almost equivalent to that of RS92 and the pressure has some influences on the positioning due to the fast falling, resulting in greater pressure error. The error of relative humidity is basically within 5%, meeting the requirements of WMO measurements. Beidou and RS92 are matched with wind profile radar in time and space. On the rising phase, the accuracy of wind direction of Beidou is worse than that of RS92, and the accuracy of wind speed is significantly greater than that of RS92. In addition, the results showed that the 2-time observation mode of the ball-loaded descent sounding has good application prospect and could

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506069)和探空气球平漂控制技术预先研究项目(TCZS201702)共同资助

2017年5月17日收稿; 2018年4月27日收修定稿

第一作者:郭启云,主要从事探空关键技术研究及应用. Email:feng\_cloudy@163.com

realize the densifying observation in space and time of upper-air station network.

**Key words:** radiosonde, experiment, evaluation

## 引 言

气球探空观测作为综合气象观测的重要组成部分,不仅要满足天气分析和数值预报的需要(李伟等,2011),还要适应气候变化监测的需求(郭启云等,2013),同时还是水汽遥感观测、卫星遥感观测、云遥感观测等的比对参考标准(彭艳秋等,2012;蔡兆男等,2009;赵静等,2017)。到2012年截止,中国气象局历经十年完成了全国120个探空站的L波段雷达探空系统的业务升级改造(郭启云等,2015a),L波段探空系统与59-701探空相比湿度测量相对偏低(苑跃等,2014),中国区域月平均探空相对湿度资料出现不均一(陈哲等,2015);然而L波段秒级高垂直分辨率探空资料的使用对数值模式分析初值及预报的改进有着积极的意义(郝民等,2014),L波段探空穿过云层获得整层高精度的大气廓线也可用于云垂直分布的探测(杨湘婧等,2011),一天两次高精度探空观测可以建立本站当地云的垂直结构(周毓荃和欧建军,2010;蔡森等,2014)。此外,国内学者还利用L波段探空资料分别开展雾-霾多发季节边界层特征研究(刘超等,2017)、冻雨温湿结构特征及其形成物理(尤凤春等,2015)以及对西南低涡暴雨天气过程数值模拟的影响(卢萍等,2016)研究等,极大丰富了L波段探空资料的应用开发。

我国探空站网平均间距基本上满足WMO对全球交换探空站平均间距在250km以内的布局要求(郭启云等,2015b),然而预报对高空站网布局和观测时次的需求仍然旺盛。同时,由于洋面上观测资料严重不足,使得客观分析的结果难以准确地描写初始台风的结构(刘宇迪等,2012;舒守娟等,2011),因此台风预报对下投探空的需求逐渐增强。同时近些年来为满足适应性观测的需要,下投探空观测得到了迅速发展,其与QuikSCAT散射计资料(张帆和刘宇迪,2008)一样可以有效地弥补恶劣天气条件下和广阔洋面上气象资料匮乏的不足(刘宇迪等,2012)。下投探空是从某种高空平台下投带降

落伞的探空仪,对大气温度、压力、湿度和风速风向等气象要素垂直分布进行测量的一种技术(陈洪滨和朱彦良,2008),常作为气球探空的有效补充,可以很好地弥补其不足(曲晓波和Julian,2006)。我国下投式探空试验活动发展较为滞后,直到2009年才首次实施了针对热带气旋的下投探空观测试验,因而对于该资料的研究相对薄弱。下投探空所获资料同化进入数值模式后能较明显地改进台风路径的预报能力(李杨等,2016)。国内学者(张诚忠,2012;舒守娟等,2011)曾利用观测的较少下投探空,初步分析台风外围南海上空大气层结特性及该资料对台风莫拉克路径预报的影响,以及西北太平洋典型强台风海棠不同阶段台风的垂直动力和热力结构特性及其差异。

目前,中国高空站网平均间距在西部地区间距较疏,存有探空资料空白区,而西部的青藏高原、沙漠、高山等多为气候敏感地区;同时每年的加密探空需求呈增加趋势,因此,本文根据中国高空自动化业务发展以及我国无人、少人以及恶劣地区气象服务和科学试验的实际建设需求,于2017年3月选取典型台站开展气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空试验,并开展试验观测数据分析,研究该下投探空仪的误差分布,验证其未来业务应用前景。

## 1 设备介绍

采用芬兰维萨拉RS92探空仪(简称RS92)、国产BD探空仪(简称BD)同球双施放,进行气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空试验(图1)。RS92探空仪是目前世界上测量性能较好的探空仪之一,常在国内外各种廓线观测试验中常作为参考标准,温度传感器采用珠状变电容丝,湿度传感器采用自产的双加热薄膜湿敏电容,气压传感器采用硅压阻,在2010年第八届国际阳江探空比对试验中排名第一。国产BD探空仪是由我国南京大桥机器有限责任公司研制生产的,测风技术采用BD-GPS联合导航体制,温度传感器采用珠状热

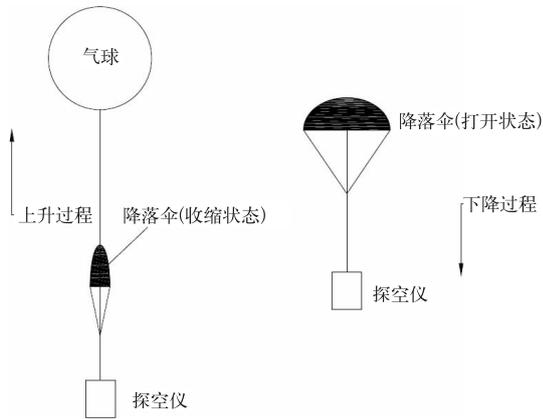


图 1 上升和下降全程探空试验

Fig. 1 The sounding test of rising and falling

敏电阻,湿度传感器采用 E+E 湿敏电容,气压传感器采用硅压阻,在国外各种科考试验中广泛应用。气象气球采用中国气象局业务所用,配合双施放使用,作为上升段的载体;降落伞采用国内主流专用于探空仪下投的国产型号,配合双施放使用,作为下降段的载体。

## 2 方案设计及情况

### 2.1 试验情况

2017 年 3 月 3—5 日,中国气象局气象探测中心选取湖南长沙探空站代表南方高湿气候环境,开展同球双施放试验,有效施放 10 次,每次气球爆炸后降落伞均能打开负载探空仪下落。试验期间天气情况以阴为主,上升速度在  $6\sim 7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,平均高度在 30 km 以上;下降速度在球炸时约在  $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,至对流层顶附近时约为  $7\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外,探空仪下降高度至 8 km 时,此时斜距达到 220 km 左右,根据角度计算此时的仰角约为  $1^\circ$ ,因探测低仰角(约  $1^\circ$ )受地形建筑物遮挡影响,接受机接受无线电波受限,直到信号减弱消失为止。

### 2.2 评估内容

本文评估分析主要在温度、湿度、气压等探空气象要素方面,即以上升段 RS92 为参考标准,评估同球上升的 BD 测量性能;和以下降段 RS92 为参考标准,评估同降落伞下降 BD 的可用性。由于探空仪

随降落伞坠落下落的测风原理、探空仪随气球漂浮上升的测风原理、风廓线雷达测风原理不同,以及距离最近(34 km)的风廓线雷达最大探测高度为 6 km,因此测风方面主要进行探空上升段测风与风廓线雷达测风比较。

### 2.3 统计方法

以同球施放上升或者同降落伞下降的参考标准测量值为约定真值,求出被评估测量值和参考标准的差,称为系统误差  $d$ ,对秒级数据的系统差  $d$  按照规定等压面分层进行平均偏差和标准偏差(贝塞尔函数)统计分析。测风方面主要增加了上升段与风廓线雷达的相互比较。

## 3 结果分析

### 3.1 上升 RS92 评估同球上升的 BD

#### (1) 温度

上升过程,BD 与 RS92 的温度一致性好,逆温的细微结构也很好,在对流层顶附近(探测全程低温区,约  $-75^\circ\text{C}$ )也有较好的跟随性。从单个样本来看,BD 与 RS92 温度偏差有一定的差异,但变化较小,整体上在  $\pm 1.0^\circ\text{C}$  以内(图 2)。

标准偏差(图 3a):除了探测顶层外,BD 与 RS92 的上升段整体合成误差在  $1.2^\circ\text{C}$  左右。球炸至 30 km,BD 上升温度与 RS92 上升段温度标准偏差在  $+2.0^\circ\text{C}$  以内,这与 BD 受辐射影响有很大的关系;30~20 km,标准偏差在  $+1.5^\circ\text{C}$  左右;在对流层附近,两者的标准偏差较小在  $0.3^\circ\text{C}$  以内;对流层以下,标准偏差减少,在  $+0.5^\circ\text{C}$  左右。

平均偏差(图 3b):除了探测顶层外,BD 与 RS92 的上升段温度平均偏差合成在  $\pm 1.0^\circ\text{C}$  以内;整体上表现以正偏差为主,且呈现随高度增大的趋势;在顶层 30 km 以上偏差较大,最大达  $4^\circ\text{C}$ ,这与 BD 在顶层受太阳短波辐射较强有直接关系。

#### (2) 气压

在上升阶段,RS92、BD 探测环境保持一致。相对温度而言,BD 与 RS92 的气压一致性明显更好,气压结构能得到很好的体现,两者之间的偏差在  $\pm 0.7\text{ hPa}$  以内(图 4)。

标准偏差(图 5a):BD 与 RS92 的上升段气压平均偏差合成在 0.3 hPa 以内。球炸至 30 km, BD 与 RS92 上升段气压标准偏差在 0.2 hPa 以内;30~20 km,标准偏差在 0.2 hPa 左右;20 km 以下,两者标准偏差逐步增大,在近地面附近,两者的标准偏差在 0.4 hPa 左右。

平均偏差(图 5b):BD 与 RS92 上升段气压平均

偏差在 ±0.4 hPa 以内,12 km 以下,两者为负偏差,最大达 -0.45 hPa,12 km 以上,两者为正偏差,24 km 左右平均偏差最大,在 0.3 hPa 左右。

(3) 相对湿度

在上升阶段,RS92、BD 探测环境保持一致。相对温度、气压而言,BD 与 RS92 的湿度一致性略差(图 6),整体上 BD 对大气湿度垂直结构的捕获能力

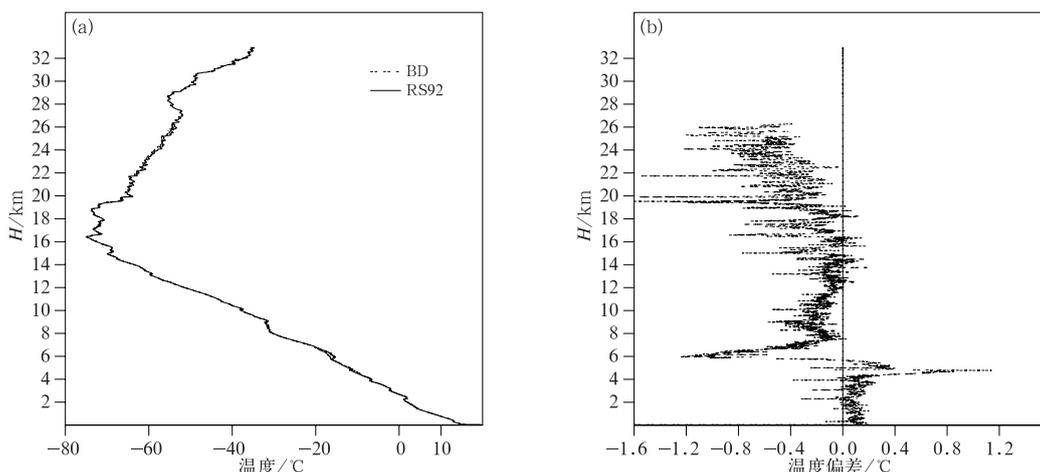


图 2 2017 年 3 月 3 日 15 时 BD、RS92 同球上升段温度对比

(a) 温度一致性, (b) 温度偏差对比

Fig. 2 Contrast of temperature of BD and RS92 sonde hanging on the same ball on the rise at 15:00 BT 3 March 2017

(a) consistency of temperature, (b) contrast of temperature deviation

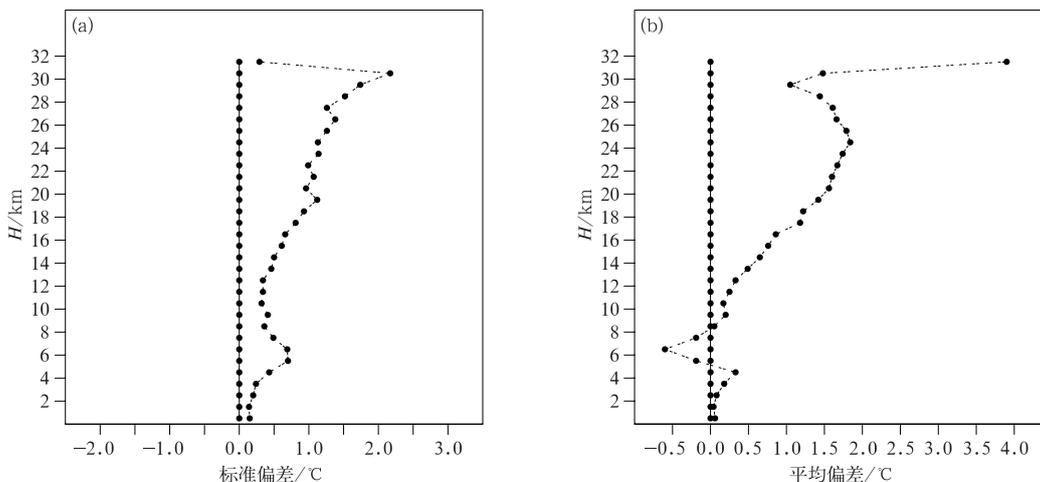


图 3 2017 年 3 月 3—5 日 BD、RS92 同球上升段温度误差统计分析

(a) 标准偏差, (b) 平均偏差

Fig. 3 Statistical analysis of temperature errors of BD and RS92 sonde hanging on the same ball on the rise in 3—5 March 2017

(a) standard deviation, (b) average deviation

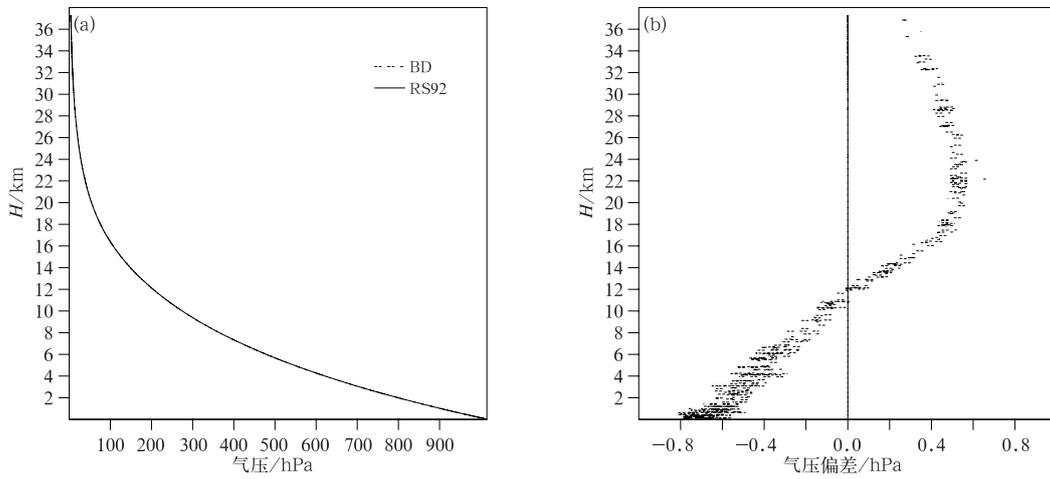


图 4 同图 2, 但为 2017 年 3 月 4 日 07 时气压

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for pressure at 07:00 BT 4 March 2017

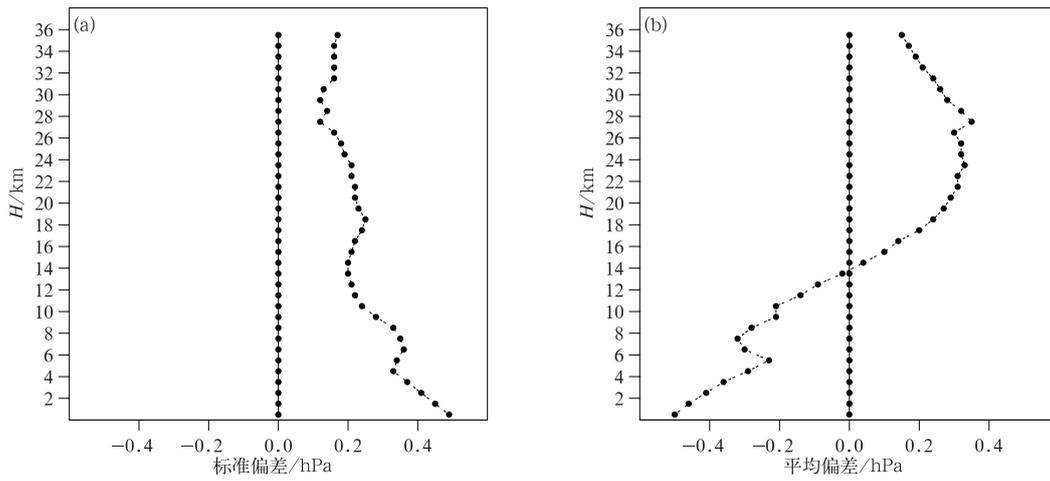


图 5 同图 3, 但为气压

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for pressure

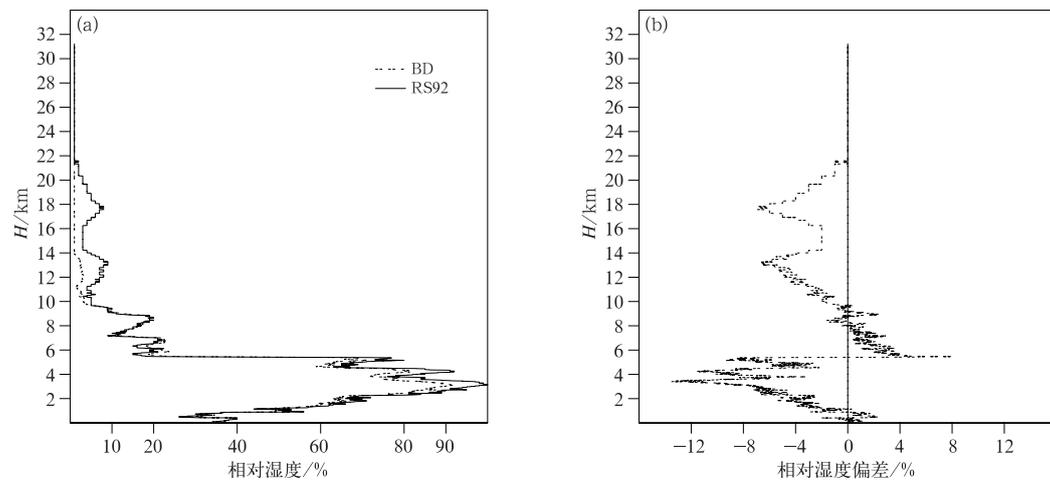


图 6 同图 2, 但为 2017 年 3 月 4 日 10 时相对湿度

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for relative humidity at 10:00 BT 4 March 2017

差于 RS92,这与其自身传感器性能有很大的关系。

标准偏差(图 7a):BD 与 RS92 的上升段相对湿度标准偏差合成在 5%以内。球炸至 30 km,BD 与 RS92 上升段相对湿度标准偏差在 +5%以内,这与 BD 湿度传感器自身性能有很大的关系;30~20 km,标准偏差成减小趋势,在 +3%以内;在对流层附近,两者的标准偏差呈增大趋势直至近地面,最大在 9%以内。

平均偏差(图 7b):BD 与 RS92 上升段湿度平均偏差整体上合成误差在 ±5%以内,20 km 以上,整体上表现为正偏差,20 km 以下,表现为负偏差向正偏差再向负偏差变化的过程。

### 3.2 下降 RS92 评估同降落伞下降 BD

在下降段,RS92、BD 以降落伞为同一载体进行同步观测,探测环境相对上升而言也是保持一致的。在 10 次下投观测中,BD 有 2 次发生传感器突然变性,分别是 3 月 3 日 12 时、3 月 4 日 19 时,作为传感器故障处理,不参与偏差分析。

#### (1) 温度

BD 下降段温度与 RS92 下降温度整体一致性较好,细微结构均能得到很好的体现,尤其是在对流层顶附近低温区也能有很好跟随性,且两者之间的偏差也较小(图 8)。

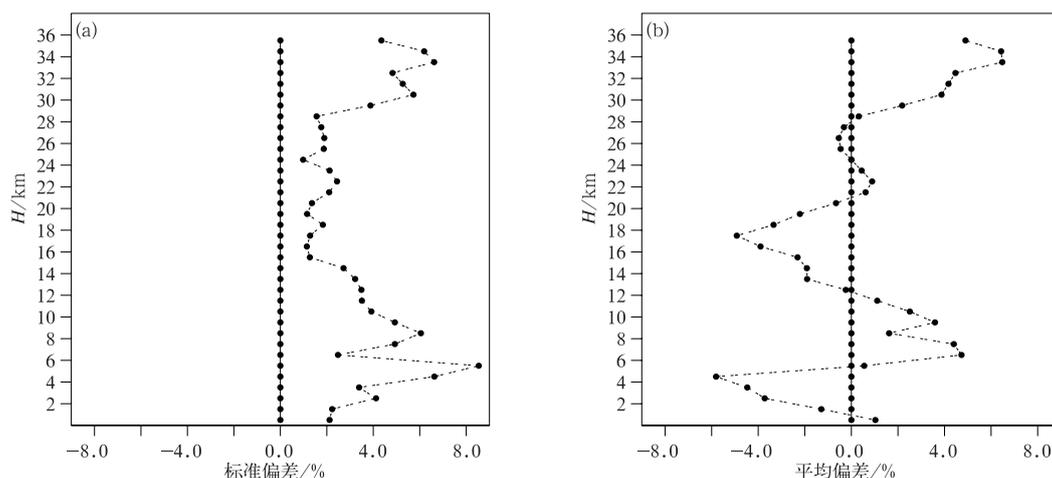


图 7 同图 3,但为相对湿度  
Fig. 7 Same as Fig. 3, but for relative humidity

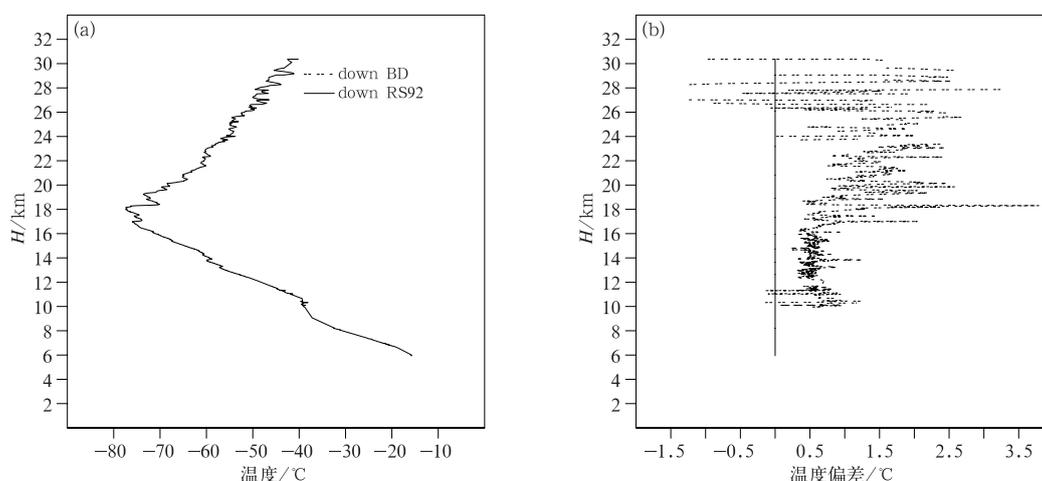


图 8 同图 2,但为 2017 年 3 月 5 日 12 时下降段温度  
Fig. 8 Same as Fig. 2, but for temperature on the fall at 12:00 BT 5 March 2017

标准偏差(图 9a):BD 下降段温度与 RS92 下降段温度整体上合成误差在  $1.6^{\circ}\text{C}$  左右;球炸至 30 km, BD 下降段温度与 RS92 下降段温度标准偏差在  $1.2^{\circ}\text{C}$  以内;30~20 km, 标准偏差在  $0.8\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ ; 在对流层附近, 两者的标准偏差较大, 可达  $2.5^{\circ}\text{C}$  左右; 对流层以下, 标准偏差呈增大再减小再增大的无规律变化过程, 标准偏差在  $1.0\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 。

平均偏差(图 9b):BD 下降段温度与 RS92 下降段温度相比, 整体上合成误差在  $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$  以内, 表现以负偏差为主, 对流层顶附近, 有偏差较大值, 在  $2.5^{\circ}\text{C}$  以上, 在这之上、之下高度均呈现减小的总体变化趋势。

## (2) 气压

相对温度而言, BD 下降段气压与 RS92 下降段气压整体趋势在前期有较好的跟随性, 但下降全程两者之间的偏差还是比较大, 这与自身定位性能偏弱有直接的关系(图 10)。

标准偏差(图 11a):BD 下降段气压与 RS92 下降段气压整体上合成误差在  $12.5\text{ hPa}$  以内;球炸至 30 km, BD 下降段气压与 RS92 下降段气压标准偏差在  $1\text{ hPa}$  以内;30~20 km, 标准偏差在  $2\text{ hPa}$  以内;在对流层至 12 km, 两者的标准偏差增大, 达  $5\text{ hPa}$  左右;12 km 以下, 标准偏差先增大再减少, 由  $5\text{ hPa}$  增到  $40\text{ hPa}$  再逐步减少到  $0.3\text{ hPa}$ , 再增

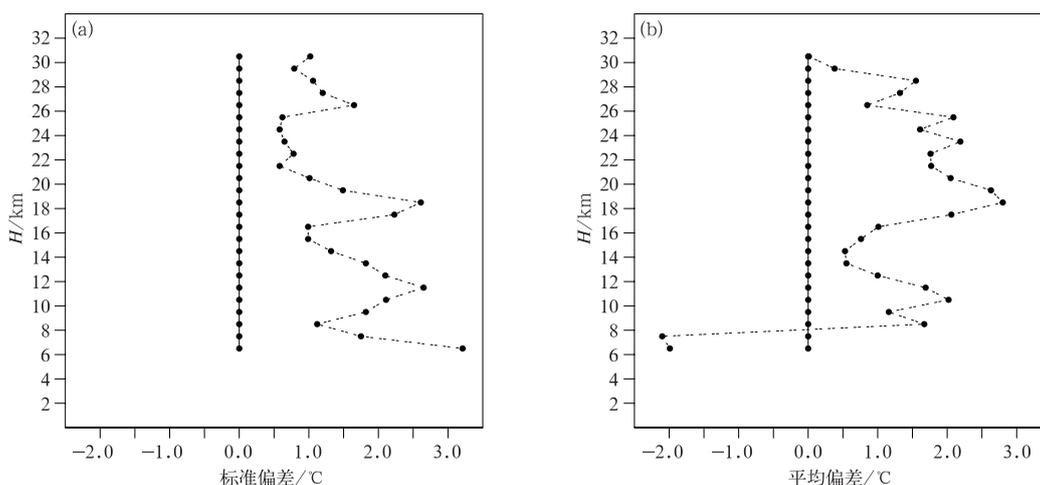


图 9 同图 3, 但为下降段温度

Fig. 9 Same as Fig. 3, but for temperature on the fall

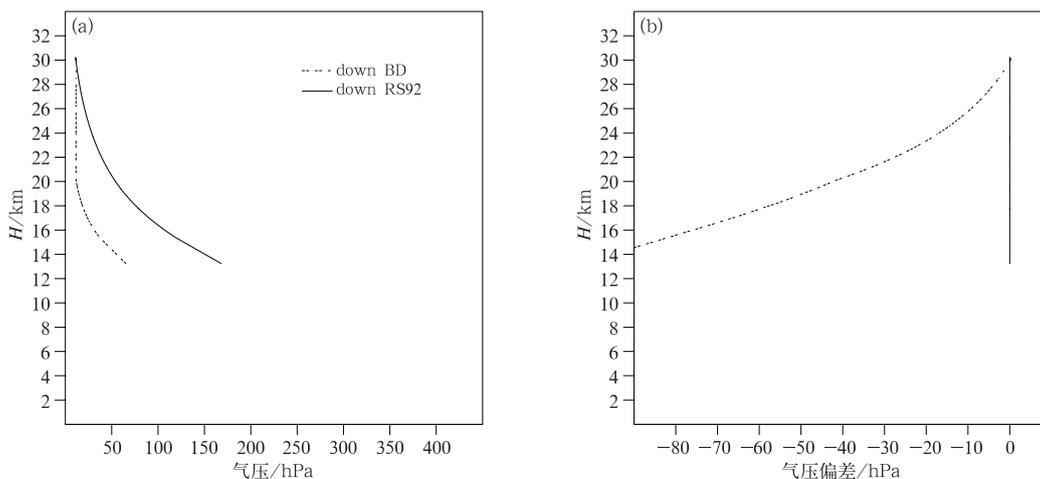


图 10 同图 2, 但为 2017 年 3 月 5 日 15 时下降段气压

Fig. 10 Same as Fig. 2, but for pressure on the fall at 15:00 BT 5 March 2017

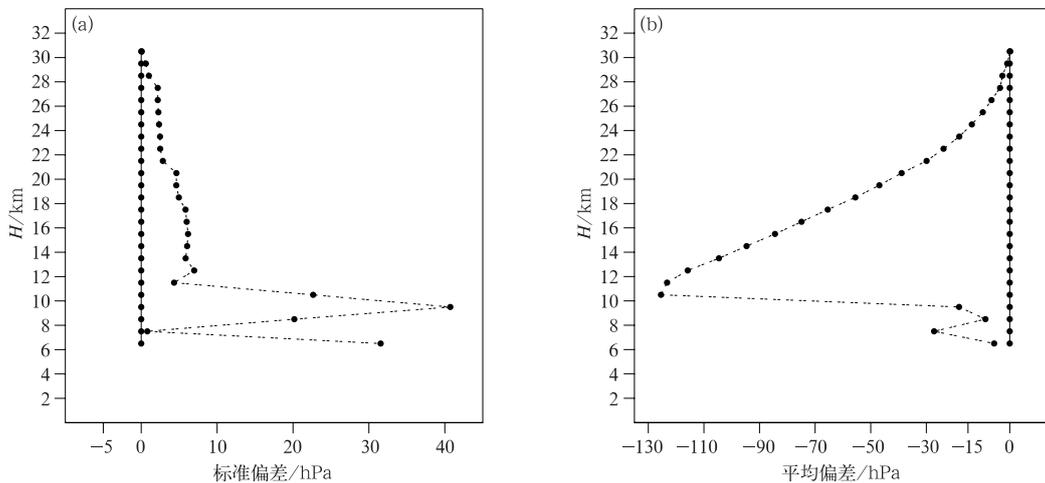


图 11 同图 3, 但为下降段气压  
Fig. 11 Same as Fig. 3, but for pressure on the fall

大到 31 hPa。

平均偏差(图 11b):BD 下降段气压与 RS92 下降段气压整体上合成误差在 ±43.9 hPa 左右,以以负偏差为主;10 km 以上,从 -0.3 hPa 减小到 -125.1 hPa;10 km 以下,从 -125.1 hPa 变化到 -7.0 hPa,在 8 km 附近有一个拐点,达 -30.5 hPa。

(3) 相对湿度

相对温度、气压而言,BD 下降段湿度与 RS92 下降段相对湿度的结构有较大差异,且有一定的滞后性,这与传感器自身性能反应慢有一定的关系(图 12)。

标准偏差(图 13a):BD 下降段湿度与 RS92 下

降段相对湿度整体上合成误差在 3.7% 以内;球炸至 30 km,由于湿度本身测量值很小,BD 下降段湿度与 RS92 下降段湿度标准偏差在 1% 以内;30~20 km,标准偏差在 2% 左右;20~10 km,两者的标准偏差成增大趋势,在 3% 以内;10 km 以下,湿度本身测量值较大,这时两者的标准偏差增大,最大可达 10%。

平均偏差(图 13b):BD 下降段湿度与 RS92 下降段湿度整体上合成误差在 -2.3% 以内,表现以负偏差为主;10 km 以上,在 -5% 以内;10 km 以下,先从 -7% 变化为 -24% (8 km 附近),再逐步向正偏差变化,直至 24%。

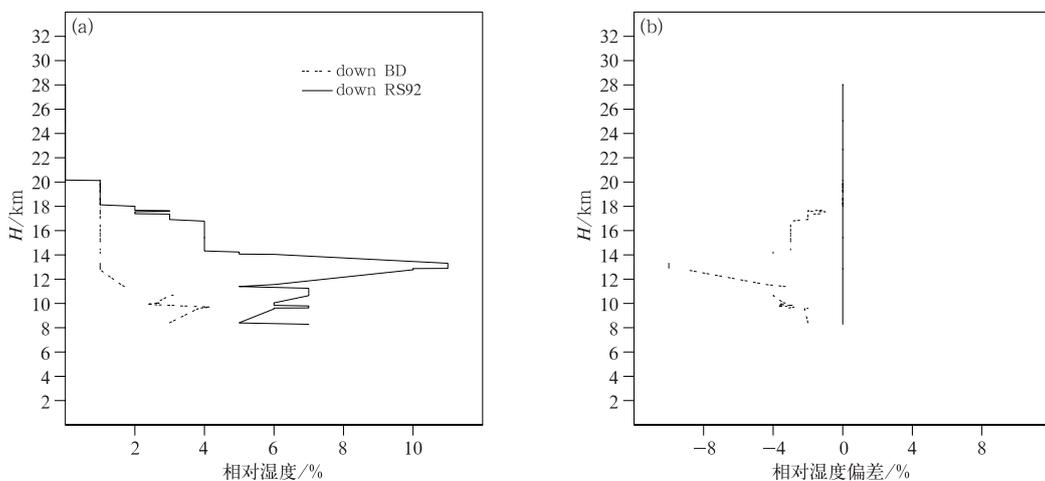


图 12 同图 2, 但为 2017 年 3 月 4 日 15 时下降段相对湿度  
Fig. 12 Same as Fig. 2, but for relative humidity on the fall at 15:00 BT 4 March 2017

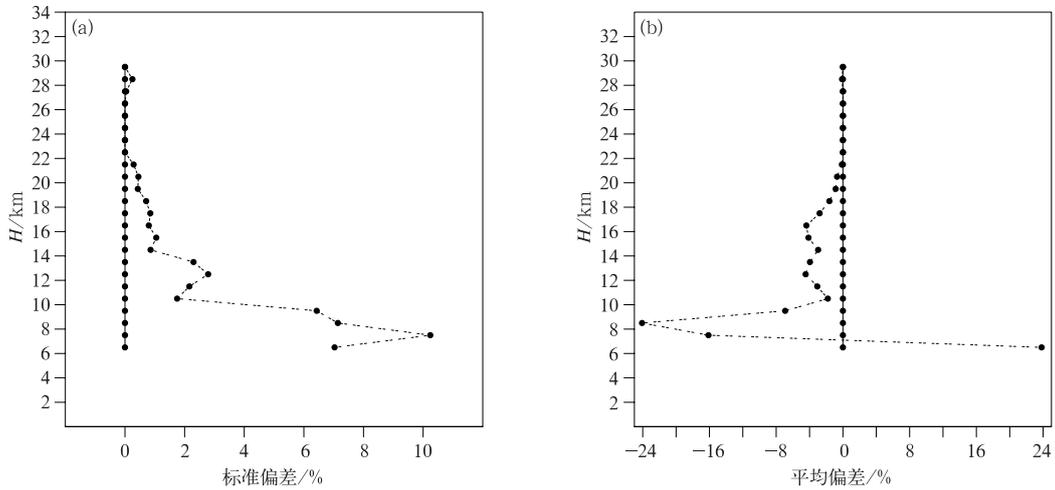


图 13 同图 3, 但为下降段相对湿度误差

Fig. 13 Same as Fig. 3, but for relative humidity on the fall

### 3.3 上升段 RS92、BD 测风与风廓线雷达相互比较

探空位于湖南长沙探空站(28.20°N、113.08°E), 风廓线雷达地点位于湖南长沙试验基地(28.11°N、112.79°E), 两地相距约 34 km。

由于探空与风廓线雷达的测风原理不同、时空采样不同以及气球漂移导致空间距离更大等, 因此, 首先明确主要进行上升段探空测风与风廓线雷达测风相互比较, 其次根据风廓线雷达最大有效探测高度将比较范围定在 6 km 以下, 最后进行时空匹配(相同时刻、相同高度)选取有效样本数据进行比较。此外, 探空与风廓雷达还需要进行有限空间内(假定水平间距在 100 km 以内有效)的时空匹配, 由此会

导致有效样本较少; 数据比较时未做较大偏差剔除, 可能有一些野值存在。

#### (1) 风向

RS92 与风廓线雷达相比, 有效样本较小, 去除个别层, 风向平均偏差基本上在  $\pm 12^\circ$  以内, 标准偏差在  $24^\circ$  以内。BD 与风廓线雷达相比, 有效样本也较小, 去除个别层, 风向的平均偏差基本上在  $\pm 15^\circ$  以内, 标准偏差在  $104^\circ$  以内。

整体而言, BD 风向的测量准确度低于 RS92, 但 BD、RS92 与风廓线雷达的平均偏差和标准偏差还是较大, 这可能与探空与风廓线雷达测风原理不同以及其与风廓线雷达距离较远造成有效样本偏少有关。

表 1 上升段 RS92、BD 与风廓线雷达风向误差统计分析(单位:  $^\circ$ )  
Table 1 Statistical analysis of wind direction errors for RS92, BD and wind profilers radar on the rising phase (unit:  $^\circ$ )

探测仪	偏差/ $^\circ$	高度/km						
		100	400	880	940	2880	3480	3600
RS92	平均偏差	34.6	-138	12.3	1.5	12.8	3.35	0.25
	标准偏差	28.9	165.2	24.12	132.6	3.6	2.62	1.2
BD	平均偏差	77.33	-109.9	-89.2	-5.1	12.2	15	19.75
	标准偏差	88.11	160.1	104.1	159.8	4.45	14.35	22.3

#### (2) 风速

RS92 与风廓线雷达相比, 有效样本较小, 去除个别层, 风速的平均偏差基本上在  $\pm 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内, 标准偏差在  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内。BD 与风廓线雷达相比, 有效样本也较小, 去除个别层, 风速的平均偏差基

本上在  $\pm 4.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内, 标准偏差在  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内。

整体而言, BD 风速的测量准确度优于 RS92, 但由于有效样本较小, 该结果仅有一定的参考, 后期还需要进行大量试验验证。

表 2 上升段 RS92、BD 与风廓线雷达风速误差统计分析(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )Table 2 Statistical analysis of wind speed errors for RS92, BD and wind profiler radar on the rising phase (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

探空仪	偏差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	高度/km						
		100	400	880	940	2880	3480	3600
RS92	平均偏差	-4.2	-4.4	-7.9	1.5	-10.5	-17.4	-18.65
	标准偏差	0.75	5.28	3.12	4.6	0.5	0.57	0.5
BD	平均偏差	-0.75	1.68	0.29	4.3	-0.6	-0.8	-1.87
	标准偏差	0.54	1.5	2.29	1.8	3.1	1.4	0.68

## 4 结论与讨论

在长沙开展的球载式下投探空观测试验表明基于上升段球载式、下降段伞载式的 2 次探空观测模式具有很好的应用前景,首先在时间上可以对 1 次探空进行加密,其次通过控制下降点可以实现同站施放,不同站的接收,利于对现有站网分布进行合理优化,同时其应用也会对气象要素测量传感器、定位以及载体(气球、降落伞)提出了更高的技术要求,符合气象综合观测从人工定性观测向自动化遥感遥测、定量观测转变的迫切需求。

(1) 以上升 RS92 评估同球上升的 BD,表明 BD 温度、气压测量准确度基本上与 RS92 相当,湿度由于其自身单湿度传感器略差于双加热湿度传感器。

(2) 以下降 RS92 评估同降落伞下降 BD,表明下降的 BD 在温度与下降段的 RS92 测量基本相当,气压由于快速下降对定位有一定影响从而导致气压误差较大,湿度基本上在 5% 内,符合 WMO 的测量要求。

(3) 进行探空测风、风廓线雷达测风时空匹配比较,表明 BD 风向准确度低于 RS92, BD 风速准确度优于 RS92,但由于探空测风与风廓线雷达测风原理、采样不同、气球漂移影响以及两者之间距离较远等,结果仅具有一定的参考。

## 参考文献

- 蔡森,欧建军,周毓荃,等,2014. L 波段探空判别云区方法的研究[J]. 大气科学,38(2):213-222.
- 蔡兆男,王永, Liu Xiong,等,2009. 利用探空资料验证 COME 卫星臭氧数据[J]. 应用气象学报,20(3):337-345.
- 陈洪滨,朱彦良,2008. 大气下投探空技术的发展与应用[J]. 地球科学进展,23(4):337-341.
- 陈哲,杨溯,刘靛珂,2015. 1979—2012 年中国探空相对湿度资料的

非均一性检验与订正[J]. 气象,41(11):1374-1382.

郭启云,李峰,郭凯,等,2015a. 新型 GPS 探空仪与业务 GTS1-2 探空仪对比分析[J]. 气象科技,43(1):59-64.

郭启云,李峰,郭凯,等,2015b. 自动探空系统性能试验与评估[J]. 电子测量技术,38(2):10-15.

郭启云,李伟,张玉存,2013. 基于第 8 届国际探空比对试验对 GTS1-2 型探空仪技术改进与对比分析[J]. 气象科技,43(3):59-64.

郝民,田伟红,龚建东,2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究[J]. 气象,40(2):158-165.

李伟,赵培涛,郭启云,等,2011. 国产 GPS 探空仪国际比对试验结果[J]. 应用气象学报,22(4):453-462.

李杨,马舒庆,官福顺,2016. 飞机下投探空在台风探测中的应用[J]. 气象科技,44(5):710-714.

刘超,花丛,张恒德,等,2017. L 波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J]. 气象,43(5):591-597.

刘宇迪,李国义,任景鹏,2012. 散射计和下投式探空仪资料对台风模拟的影响[J]. 气象科学,32(1):18-28.

卢萍,李旭,李英,等,2016. 空间加密探空观测资料对西南低涡暴雨天气过程数值模拟的影响[J]. 大气科学,40(4):730-742.

彭艳秋,王卫国,刘煜,等,2012. 利用不同资料研究我国大陆上空柱水汽含量[J]. 应用气象学报,23(1):59-68.

曲晓波, Julian Heming, 2006. 下投式探空资料对数值预报初始场影响的个例分析[J]. 气象与环境学报,22(2):34-37.

舒守娟,王元,宋金杰,2011. 西北太平洋台风“海棠”结构的 GPS 下投式探空仪观测分析[J]. 气象学报,69(6):933-944.

杨湘婧,徐祥德,陈宏尧,等,2011. L 波段高空分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型[J]. 气象,37(12):1504-1510.

苑跃,陈中钰,赵晓莉,等,2014. L 波段与 59-701 探空系统观测资料差异评估[J]. 气象,40(2):238-246.

尤凤春,付桂琴,刘卓,等,2015. 北京地区冻雨时空分布及探空温湿特征分析[J]. 气象,41(12):1488-1493.

张诚忠,万齐林,丁伟钰,等,2012. 下投探空资料在台风莫拉克路径预报的应用试验[J]. 气象学报,70(1):30-38.

张帆,刘宇迪,2008. 散射计风场反演的台风海平面气压场分析[J]. 自然科学进展,18(11):1288-1296.

赵静,曹晓钟,代桃高,等,2017. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象,43(1):101-107.

周毓荃,欧建军,2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象,36(11):50-58.