

# 阳江第八届国际探空系统比对试验综述

李柏 李伟

(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要:** 世界气象组织(WMO)第八届国际探空系统比对试验于2010年7月12日—8月1日在中国阳江成功举办。对国际比对试验的举办背景、规模、试验情况和意义进行了阐述,介绍了国际比对试验主办方WMO仪器与观测方法委员会(CIMO)的组织结构及所承担的任务;重点介绍了国际探空系统比对试验中各参试系统的技术特点及观测数据分析评估结果。针对比对试验的分析结果,结合CIMO专家组对比对试验和观测仪器提出的建议,提出了我国参试系统的技术改进措施,并对我国高空观测系统未来发展方向进行了规划设计。

**关键词:** 阳江, 国际探空比对, 综述

## A Review of Yangjiang 8<sup>th</sup> International Radiosonde Intercomparison

Li Bai, Li Wei

(Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** Yangjiang 8<sup>th</sup> intercomparison of radiosonde system, sponsored by WMO, was held successfully from 12 July to 1 August 2010. The history, scale and significance of radiosonde intercomparison are reviewed together with an introduction to CIMO structure and its responsibility, in particular the final evaluation results and technological characteristics of Yangjiang 8th international radiosonde intercomparison as well as the advice and recommendations from CIMO expert team. Finally the corresponding improvement measurements and future development targets for Chinese radiosonde are proposed.

**Key words:** Yangjiang, international radiosonde intercomparison, review

### 1 引言

高空气象观测系统作为综合气象观测系统的重要组成部分,在天气预报和气候监测中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>,同时,高空气象观测资料在大气遥感观测真实性检验和校准检验中发挥着无可替代的基准作用。世界气象组织(WMO)认为,影响观测数据质量的因素多种多样,包括观测环境、观测仪器、业务规程等,其中特别强调了观测仪器的稳定性与探测精度对于观测数据质量会产生直接的影响<sup>[2]</sup>。各种不同探空系统之间的国际对比是提高全球高空气象探测准确度和一致性的重要手段之一,为了提高探空仪质量,WMO根据探测技术发展情况,定期或者不定期地举办国际探空比对试验。通过国际比对,一方面评估各国业务探空仪的水平,另一方面针对探空新技术与新设备进行测试与评估,为探空业务发展奠定技术基础。

WMO的仪器与观测方法委员会(CIMO)负责全球与区域仪器比对试验工作,截至目前CIMO已经主办了8届国际探空系统比对试验。1984年在英国举行了第一届国际探空比对试验,之后陆续于1985,1989,1993,2001和2005年分别在美国、哈萨克斯坦、日本、巴西和毛里求斯举办了多届国际探空比

对试验,期间还举办了一些特殊目的的国际比对,例如于1995—1997年间在俄罗斯和美国分别举行了国际探空湿度传感器比对<sup>[3-10]</sup>。为了正确评估探空仪性能,一直沿用了多个探空仪同球施放的方法,保证所有被试探空仪能够对同一观测对象进行观测,各参试探空仪悬挂及同球施放如图1所示。

对于探空仪的比对数据评估,其中两个最基本的指标就是系统偏差与随机误差(标准偏差),但是比对数据评估方法一直处于发展变化中,从气压对齐方式进行统计分析,逐步发展到以时间对齐方式进行统

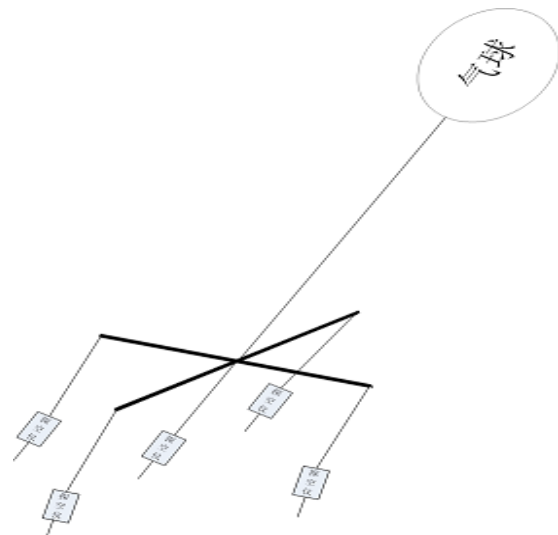


图1 同球比对示意图

收稿日期: 2011年5月24日; 修回日期: 2011年8月9日  
第一作者: 李柏(1959—), Email: libai@cma.gov.cn

计分析。例如最开始的两届国际比对试验，采用气压高度对齐进行数据评估，这首先要假设气压是精确的，但实际上这个假设前提很难满足，影响了数据的评估，在以后的比对中改变了这种方式，代之以气球飞行时间对齐方式进行数据评估，保证了比对评估是针对同一观测对象。为了保证国际比对数据的可比较性，采用关联探空仪的方法，即在不同的探空比对中采用相同类型的探空仪，其比较结果可以将不同的探空比对数据与分析结果关联起来，实现探空比对的可比较性，同时利用关联探空仪还可以将不同时期与不同地点的探空比对结果关联起来进行比较分析。在国际比对过程中，逐渐将比对方式与比对评估方法标准化，在此基础上，还发展了一套国际比对标准分析软件RSKOMP，这套软件在1990—2000年世界上许多探空仪比对中得到应用，并且从2005年毛里求斯国际探空比对开始，被世界气象组织指定为官方标准数据处理与产品生成软件，实现了比对数据分析标准化。

历届国际探空系统比对试验的开展，反映了探空技术的发展历程。以2001年的巴西国际探空比对为分界点，之前为雷达、无线电经纬仪、地基导航测风、GPS导航测风等多种方式并存，之后转向GPS导航测风探空系统；对于GPS导航测风系统，其位势高度与风的测量主要取决于GPS定位误差，而GPS定位误差不受高度影响，探测过程中水平和垂直方向定位误差分别在10m和16m左右，测量精度明显高于其他雷达探空系统。由于大气气压随高度呈指数减小趋势，造成气压随高度迅速减小，因此直接使用气压传感器会出现高度越高而气压测量准确性越差的情况，因此随着GPS技术的气象应用，采用GPS测量位势高度，结合温度与湿度信息，进行气压反算，也就是说，反算气压可以取代气压传感器，气压传感器不再是探空仪的必备元件；除此以外，与我国目前业务上采用地面雷达测风体制的L波段高

空探测系统相比，GPS导航测风系统安装简单，操作方便，自动化程度高，其被动接收体制增强了电磁屏蔽能力，尤其是位势高度、风、气压测量精度高，体现了卫星导航测风的优势。

从2005年毛里求斯国际探空比对开始，GPS探空系统发展成熟，其位势高度误差在20m之内，反算气压在16km之下与气压传感器精度相似，16km之上要好于气压传感器直接测量结果，此外湿度传感器开始由湿敏电阻转为湿敏电容，虽然低温性能有所改善，但是还是存在一些问题需要解决。2008年6月2—6日，WMO秘书处瑞士帕雅尼组织召开了第三届高空观测系统国际对比专家组和高空观测系统国际对比组织委员会联合会议，确定于2010年在中国进行第八届高精度探空仪国际比对试验。第八届国际比对试验将检验分析各国生产商对仪器进行改进后的观测性能，检验观测设备对全球范围内各地探空数据一致性的影响，第八届高精度探空仪国际比对试验的主要目的是在热带/亚热带高湿度条件下，测试高质量业务探空仪与高质量研究型探空仪的性能对比。测试结果将作为一些国家在区域基本气候网络/区域基本天气网络（RBCN/RBSN）以及高空基准观测站（GRUAN）中选用高质量业务探空仪的参考，同时也可为全球气候观测系统（GCOS）选择适宜于GCOS基准高空网络的探空系统提供依据。2010年7月12日—8月1日，世界气象组织在中国广东阳江组织了第八届国际探空比对试验，在中国气象局的大力支持下，中国气象局气象探测中心精心组织、周密安排，与其他单位密切合作，保障了比对试验的顺利开展。

## 2 阳江国际比对结果分析

第八届阳江国际探空系统比对试验有来自中国、美国、德国、芬兰、南非、法国、瑞士、日本、韩国等9个国家16种型号探空仪参与，其中瑞

### ☞ 链接 世界气象组织仪器与观测方法委员会

世界气象组织仪器与观测方法委员会（Commission for Instruments and Methods of Observations，简称CIMO）是世界气象组织下属的技术专业委员会，在气象、气候、水文、海洋，以及相关的地球物理与环境仪器领域，为了促进世界范围的标准化，负责制定技术标准、质量控制程序与仪器使用指南，负责仪器与观测方法的国际标准化与兼容性，具体体现在如下方面：

- 提出仪器与观测方法的具体建议，包括仪器类型、特性、精度、性能以及经济实用性。
- 负责全球与区域仪器比对，遴选满足用户需求的观测设备，同时符合全球资料兼容性要求。
- 观测方法研究与建议，包括测试与标定方法，以及数据订正方法。
- 促进科学试验仪器应用和发展。
- 制定仪器与观测系统规格，从经验与新的技术方法方面，对世界气象组织其他的项目与团体活动提供支持。
- 促进合适的、经济实用的仪器与观测方法应用，特别是针对发展中国家情况，提供满足发展中国家业务使用的观测设备。

从组织机构上，CIMO可划分为管理组与专家组两个层面；从技术上，CIMO又可以划分为标准与比对组、遥感与新技术组、能力建设组，其中标准与比对组被细分为标准、新地面技术、仪器比对、飞机观测专题四个小组，遥感与新技术组被细分为业务遥感、新遥感技术与试验基地、频率保护、卫星观测专题四个小组，能力建设组被细分为区域仪器中心与检定溯源、CIMO指南编写、培训与培训教材、探空仪性能监视、地基仪器性能五个小组。

士SnowWhite露点式湿度仪、美国CFH霜点式湿度仪、美国Multi-thermistor多温度传感器探空仪，以及日本Meisie科学试验探空仪、芬兰Vaisala科学试验探空仪也参与了比对试验。本次参加比对的探空仪系统中，中国南京大桥机器有限公司的GTS1-2型L波段电子探空仪系统、中国航天科工集团第23研究所和中国华云技术开发公司的国产GPS探空仪系统参加了本次国际比对试验，除中国南京大桥机器有限公司的GTS1-2型L波段电子探空仪系统使用的是地面二次测风雷达外，其他探空仪系统都是基于卫星导航的探空仪系统。此外，全球气候观测系统（GCOS）委员会也首次派出专家参与此次比对试验。

2010年7月14日上午8:30分，第一次比对施放开始，一直到2010年8月1日2:45最后一次结束，共施放气球72次，全部施放成功，取得了丰富翔实的观测数据。气球平均升空高度30577.8m，超过30km高度个数52个，30km升空有效率72.2%，升速总体控制在 $383\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。较好的飞行高度和合适的升速为获得足够多的观测数据提供保障。针对阳江高湿天气造成探空气球飞行高度有所降低的情况，采用双球（子母球）充球方式，有效地提高了飞行高度，为获得足够多的观测数据提供保障。

针对这次国际探空比对，中国气象局气象探测中心还专门组织了多种地基遥感设备开展辅助遥感观测，包括S波段天气雷达、GPS/MET水汽观测系统、云雷达、X波段双偏振雷达、风廓线雷达、云高仪、微脉冲激光雷达、全天空成像仪、微波辐射计等设备，利用不同原理的观测设备和观测方法对同一目标物（垂直大气柱）开展同步观测，并通过大气要素观测值的相互对比验证和综合分析，获得更加准确的垂直大气柱的连续观测结果。

## 2.1 参试探空仪总体评价

CIMO认为阳江国际探空比对试验中所有参试探空仪关于大气温度、气压、位势高度、风向风速要素的测量性能都比较理想，其中部分探空仪探测性能达到了GRUAN站的使用要求，各测量要素探测性能评价如下：

(1) 所有参试探空系统的温度测量结果差别很小（图2，图3）。所有参试探空仪的夜间温度探测性能达到非常高的标准，各系统温度偏差均小于0.4K，白天探测性能有所降低，主要原因可能是温度传感器没能充分暴露在自由大气中，或者是温度传感器与探空仪距离不够远，受到探空仪本身的热污染。

(2) 在高空相对湿度探测方面，存在着明显的不足（图4，图5）。不同探空仪系统对湿度测量结

果差别很大，在温度小于 $-40^{\circ}\text{C}$ 低温情况下，湿度传感器测量性能受到较大影响。自上届毛里求斯国际比对试验以来，尽管在相对湿度测量方面取得了很大的进步，但是在毛里求斯对比中出现的部分问题还继续存在。

①阳江国际探空比对试验参试探空仪除瑞士Meteolabor和韩国Jinyang外，其他探空仪在高于 $-40^{\circ}\text{C}$ 探测环境下湿度传感器测量性能复现性较好。大部分参试探空仪夜间比白天的湿度测量性能要差。

②法国Modem、中国大桥、韩国Jinyang、中国华云和日本Meisei在湿度测量方面具有正的系统偏差，与高质量探空仪的要求有较大差距，这五种探空仪的正的系统偏差在白天探测时要比夜间小。

③瑞士Meteolabor和德国Graw探空仪在白天测量时湿度探测结果也具有一定的正系统偏差，降低了其探测质量。

④南非InterMet探空仪在白天测量时，在高湿段存在大的负系统偏差。如果系统偏差的来源能够确定（例如校准偏差、传感器通风问题、材料的吸湿特性、软件处理中的问题），则系统偏差能够进行有效的订正。

⑤阳江国际比对试验不能有效证明芬兰Vaisala或者瑞士Meteolabor SnowWhite探空仪夜间湿度探测结果的绝对正确。SnowWhite探空仪在高层大气中具有比Vaisala探空仪更快的反应速度，因此不能认为Vaisala探空仪的测量结果总是绝对正确。然而Vaisala和Meteolabor SnowWhite探空仪探测结果差别很小，二者的测量性能非常优异，可以达到5分的等级。

⑥美国LMS探空仪在云中探测湿度结果不能达到饱和状态，存在较大的测量误差。在白天测量时出现的问题要比夜间测量时复杂得多，Vaisala探空仪对高层云中湿度探测结果为过饱和状态，而LMS探空仪不能得到过饱和结果，有可能是白天探测湿度结果订正过多造成。

⑦德国CFH（霜点式露点仪）探测结果与Vaisala探空仪相差不大，能够得到云中饱和水汽探测结果，测量误差较小，在白天探测高云时，Vaisala和LMS探空仪可以达到4.5分等级。

⑧中国华云探空仪在白天高层水汽探测时，由于探测结果随机误差比其他探空仪要大，因此其得分等级要低，主要原因可能是由于湿度传感器与探空仪箱体太近，受到箱体的污染。

(3) 在位势高度测量方面（图6），参试探空系统在100hPa等压面高度时，测量得到的位势高度随机误差小于20m，而当前各个国家正在使用的探空系统在此等

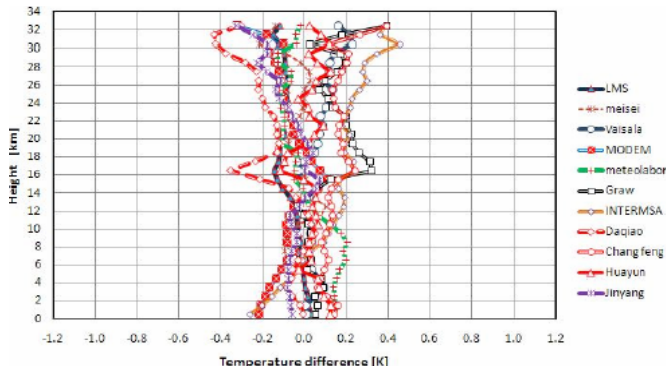


图2 夜间温度系统偏差

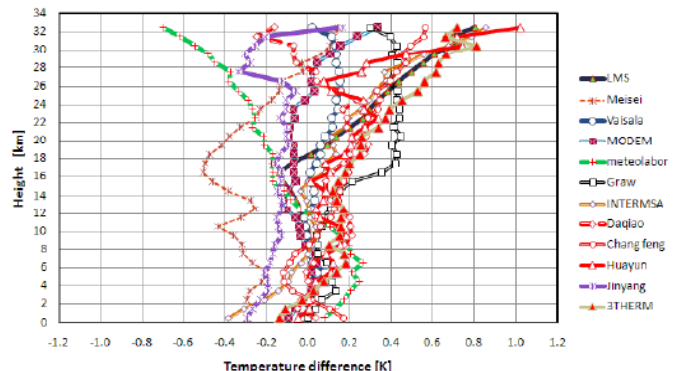


图3 白天温度系统偏差

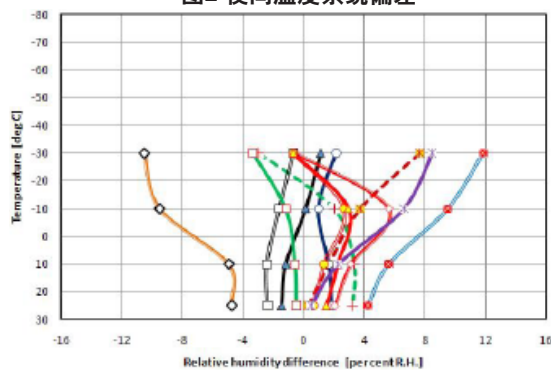


图4 夜间湿度系统偏差 (湿度大于80%)

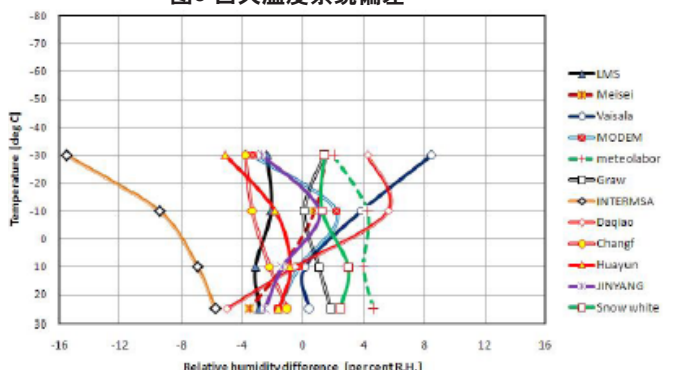


图5 白天湿度系统偏差 (湿度大于80%)

压面高度测量的位势高度随机误差在30~60m左右。

中国大桥探空系统采用气压、温度、湿度联合计算位势高度体制，其探空仪的气压传感器具有很好的测量性能，适于业务使用，但是当气压小于20hPa时，不适合应用于高空气候观测。

(4) 在气压探测方面，所有参试GPS探空系统均具有较高准确度(图7)。

①Meteolabor探空系统和Meisei探空系统通过位势高度反算气压的算法需要进一步改进。

②中国大桥气压传感器气压测量性能可达到其他GPS探空系统水平，而GPS探空系统比二次测风雷达系统要昂贵，因此对于常规观测业务使用来讲，没有理由不使用二次测风雷达系统。然而，如果在某地进行高空气候观测等试验时，最好还是使用GPS探空系

统(或其他卫星导航探空系统)。

(5) 所有参试探空系统在风向风速测量方面都具有良好性能(图8, 图9)。

①由于某些原因，瑞士Meteolabor探空系统在对流层风向风速测量结果稍差，平流层测量结果较好。

②中国大桥雷达探空系统在平流层风向风速探测时，由于其长的斜程观测方式，相比对流层探测，具有一定的噪声影响。

## 2.2 参试探空仪得分情况

阳江国际比对试验结束后，CIMO组成了比对数据处理评估专家组，对各参试探空仪获取观测数据利用RSKOMP标准分析软件进行了分析处理，各参试探空仪得分情况如表1所示，同时简单介绍了分值划分等级和个别探空仪数据处理中采取的措施。

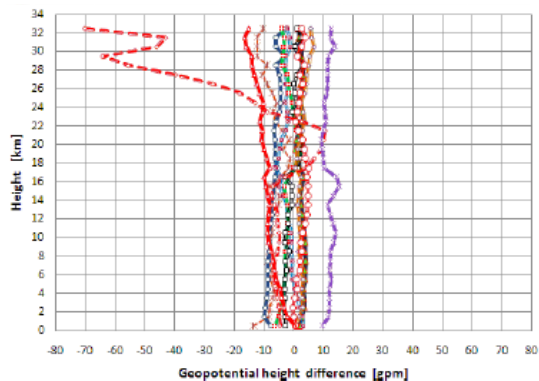


图6 位势高度系统偏差

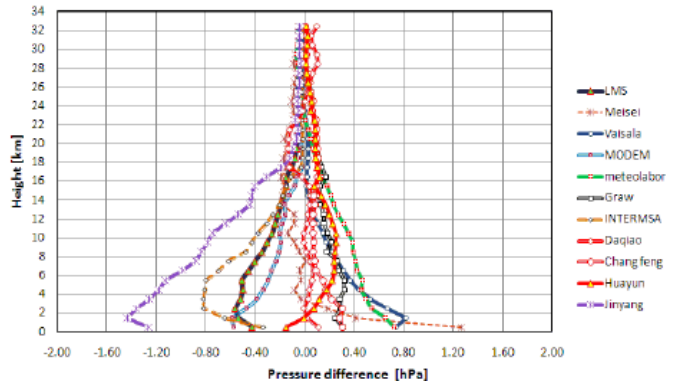


图7 气压系统偏差

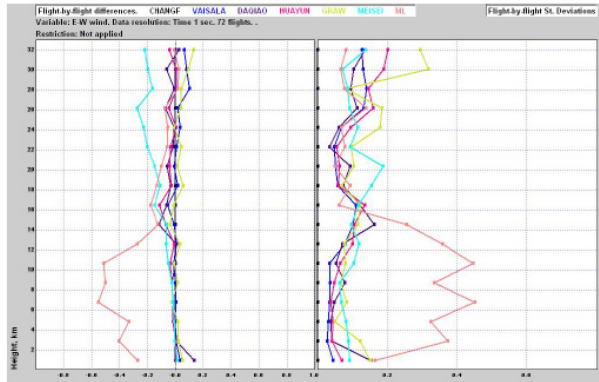


图8 东西风分量统计结果（左图为系统偏差，右图为标准偏差）

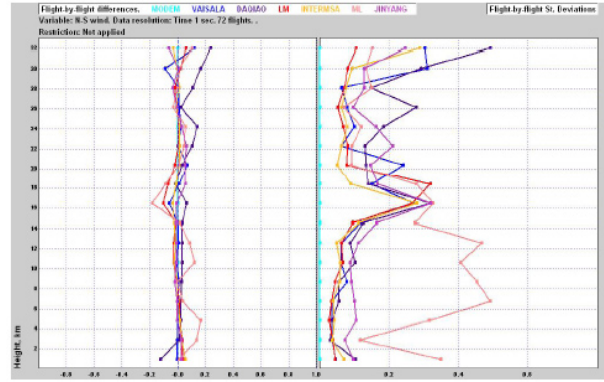


图9 南北风分量统计结果（左图为系统偏差，右图为标准偏差）

(1) 各分值代表的性能水平

- 1分：最低可接受的测量性能（鉴于目前现有的技术）。
- 2分：接近CIMO指南对仪器准确度的业务要求。
- 3分：刚满足CIMO指南的业务要求。
- 4分：满足CIMO指南的业务要求，但仍需进一步改善方能供GRUAN观测使用。
- 5分：性能良好可供GRUAN使用。
- 6分：误差订正和处理过程文档可供GRUAN观测使用。

(2) 上标说明

- ①\* 标注的是科学探空仪，其他为业务探空仪。
- ②<sup>1</sup> 法国Modem探空仪的工厂检定误差已被找到，大约高出5%，这个误差已经被英国气象局对Modem探空仪业务运行经验所证实。如果对其进行校正，其得分将会增加0.5~1.0的范围。此外由于前期

与试验项目小组的协议，地面湿度校正没有在试验中被使用。

③<sup>2</sup> 德国Graw的数据经过两次重新处理，以此达到修正算法的目的。

④<sup>3</sup> 瑞士Meteolabor的问题是由软件引起的。经过在瑞士帕雅尼站做了针对Meteolabor探空仪对比试验后，地面锁定GPS的问题得以解决。

⑤<sup>4</sup> 此问题引起的原因同<sup>3</sup>一样。经过在瑞士帕雅尼站做了针对Meteolabor探空仪的对比和订正后，计算低风速时的误差得以确定。

⑥<sup>5</sup> 韩国Jinyang在采用了一个新的高度偏移和发射点算法后其评分等级得以提升。目前改进后的算法正在韩国（韩国气象厅）使用。

⑦<sup>6</sup> 去掉日本Meisei大约10%不好的跟踪定位信息。在对不好的跟踪定位进行校正后，将会获得更大的改进。同时改善过滤算法，以减少在阳江探空站由

表 1 阳江第八届国际比对参试探空仪得分情况统计表

	南非	法国	德国	瑞士	大桥	韩国	日本	长峰	华云	美国	芬兰	瑞士*	美国*
气温 ( $h < 16\text{km}$ ), 夜间	4.50	5.00	4.50	5.00	4.25	4.75	5.00	4.75	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
气温 ( $h < 16\text{km}$ ), 日间	4.75	5.00	4.50	5.00	4.5	4.50	4.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
气温 ( $h > 16\text{km}$ ), 夜间	3.25	5.00	4.50	5.00	3.25	3.75	5.00	4.75	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
气温 ( $h > 16\text{km}$ ), 日间	3.25	5.00	4.25	4.75	3.75	3.50	4.25	4.50	2.75	5.00	5.00	5.00	5.00
对蒸发冷却误差的防护	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	是	否	否
湿度 ( $T > -40^\circ\text{C}$ ), 夜间	4.50	3.00 <sup>1</sup>	5.00	4.25	2.75	3.75	4.75	5.00	4.00	5.00	5.00	5.00	5.00
湿度 ( $T > -40^\circ\text{C}$ ), 日间	4.25	4.25 <sup>1</sup>	4.75	3.25	4.00	4.75	5.00	4.25	3.75	5.00	5.00	5.00	5.00
湿度 ( $T < -40^\circ\text{C}$ ) 对流层中上部, 夜间	4.50	4.25	4.5	xx	xx	4.00	4.00	3.50	3.25	4.75	5.00	5.00	4.75
湿度 ( $T < -40^\circ\text{C}$ ) 对流层中上部, 日间	2.50	3.00	4.25	xx	xx	4.25	3.00	3.00	2.75	4.50	4.50	xx	4.50
位势高度 ( $P < 100\text{hPa}$ )	5.00	5.00	5.00 <sup>2</sup>	5.00	4.75	4.25 <sup>5</sup>	4.00 <sup>6</sup>	5.00	5.00	5.00	5.00 <sup>7</sup>	5.00	5.00
位势高度 ( $P > 100\text{hPa}$ )	5.00	5.00	5.00 <sup>2</sup>	5.00	3.25	5.00	5.00 <sup>6</sup>	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
气压 ( $< 100\text{hPa}$ )	4.75	4.75	4.50 <sup>2</sup>	4.75 <sup>3</sup>	3.25	4.25	4.25 <sup>6</sup>	5.00	4.75	5.00	5.00 <sup>7</sup>	4.75	5.00
气压 ( $> 100\text{hPa}$ )	4.00	5.00	4.50 <sup>2</sup>	4.00 <sup>3</sup>	4.75	3.50 <sup>5</sup>	4.50 <sup>6</sup>	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00	5.00
风 (对流层)	5.00	5.00	5.00	3.00 <sup>4</sup>	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	3.00	5.00
风 (平流层)	5.00	5.00	5.00	5.00	4.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

于多变的气球升速造成的误差。

⑧<sup>7</sup> 芬兰Vaisala不正确的GPS天线定位设置被修正。

### 3 阳江GPS国际探空比对技术特点

本次国际探空比对主要体现了以下两个特点：

#### (1) 探空技术先进，探空仪呈多样化

对于温度探测，多个因素都会影响温度传感器测量准确性，通常包括电路自加热效应、滞后性、长波辐射、短波辐射等，通常情况下是采取缩小温度传感器体积、增加表面防辐射涂层、算法订正三种途径解决，其中传感器体积的缩小可以明显减小滞后误差，结合良好的防辐射涂层可以明显减小长波辐射，通过算法可以在一定程度上消除短波辐射，但是辐射订正算法从本质来说属于半理论半经验方法，在某些情况下会表现很好，但是在某些情况下还是会引入较大误差。美国Multi-thermistor探空仪采取多个不同涂层的温度传感器，利用不同的涂层吸收与反射辐射特性，采用联合解算方式去除温度辐射影响，是一种绝对辐射量计算，可以视为完全去除了辐射影响，大大提高了高空温度观测精度。

对于湿度探测，虽然近年来技术发展较快，但是与以前的湿敏电阻相比，目前世界上广泛采用的湿敏电容还是属于吸附式元件，吸湿容易而脱湿较为困难，存在明显的滞差环。为了解决这一问题，芬兰Vaisala公司设计了双湿度传感器，采用轮流加热方式强制去湿；瑞士SnowWhite探空仪与美国CFH探空仪分别采取了直接测量露点的方式探测高空湿度，这种方法更接近湿度的原始定义，更加准确，特别是美国CFH探空仪在对流层上层，特别是平流层环境下测量结果更为可靠准确；此外，芬兰Vaisala公司还专门设计了一种新型探空仪，也是通过直接测量露点来探测湿度，其特制湿敏电容传感器灵敏度更高，适于低湿下大气湿度测量。

(2) 多种参考探空仪参加试验，提高了比对的可比较性

此次比对试验中，分别有美国Multi-thermistor探空仪作为温度的相对参考标准，瑞士SnowWhite探空仪与美国CFH探空仪作为湿度的相对参考标准。此外日本Meisei科学试验探空仪与芬兰Vaisala科学试验探空仪也参加了此次比对。多种高精度科学试验探空仪的参与，为数据比对分析提供了良好的坐标系，发展高精度参考设备也是CIMO长期发展目标之一。

从历届国际探空比对结果来看，一些高质量探空仪的温度观测已经非常接近满足气候观测需求，也就是温度精度达到0.1K至0.2K之间<sup>[11-13]</sup>；虽然湿度也

有了长足的进步，但是湿度仍然是一个挑战性的课题，特别反映在对流层中层与高层的低湿性能<sup>[14]</sup>；虽然气压传感器的测量精度也在不断提高，但是在气压小于10hPa时，还是不能提供可靠的位势高度资料；令人鼓舞的是，现代GPS技术开始应用到气象探空领域，从1993年日本国际比对开始，在巴西和毛里求斯及2010年中国举办的国际探空比对试验中，GPS探空系统逐渐成为技术主流。探空仪的温、压、湿和经纬度、高度等数据经地面接收系统接收，并由相应的处理软件处理<sup>[15]</sup>，高空风是用探空仪在相邻时刻的水平位置变化量来计算的<sup>[16]</sup>，经对比分析证明，GPS探空系统与地面雷达测风系统相比，能够保证全量程的稳定的精度<sup>[17]</sup>。GPS定位不仅能够提供全量程高精度位势高度与测风数据，而且可以用来开展气压反算，历届国际探空比对试验技术概况如表2所示。

GPS探空体制具有较大的优势，针对GPS技术在气象探空中的应用，国内很早就开始这方面的研究。早在20世纪90年代，毛节泰等国内学者就开始关注GPS定位技术在气象上的应用<sup>[18-21]</sup>；21世纪初，国内徐刚等逐步开展了GPS探空仪原理样机的设计<sup>[22]</sup>，马舒庆等最早研制了GPS探空仪并通过中国气象局试验考核<sup>[23]</sup>，特别是在2008—2010年，中国气象局组织了专门的国产GPS探空系统试验比对，国内有多个科研院所与厂家参加，最后遴选了两个型号的国产GPS探空系统参加了阳江国际探空比对，国产参试探空系统的技术指标已达到国际同等观测设备要求<sup>[24, 25]</sup>。目前中国气象局已经基本完成了基于L波段二次测风雷达的电子探空仪换型工作，采用芬兰Vaisala公司RS92探空仪作为比对参考标准，对比结果显示国产探空仪的温度与气压观测结果表现相对较好，湿度、位势高度与风观测还存在较大的系统偏差<sup>[26]</sup>。考虑到国家安全、业务稳定使用，以及价格等多方面因素，GPS探空系统在中国虽然发展很早，也受到多方面关注，目前还是没有进入中国业务应用，但是不可否认，卫星导航系统在探空位势高度计算、测风以及气压反算等方面都具有明显优势，未来随着中国北斗卫星导航系统的发展与成熟，中国探空业务必将过渡到卫星导航测风系统。

此外，通过此次国际探空比对试验，我们得到以下几方面的启示：

(1) 随着卫星导航测风体制的应用，由于其高精度的位势高度测量结果，今后气压可以采用反算方式，气压传感器已不是必备元件。

(2) 采用体积更小的珠状温度传感器，替换目前体积较大的柱状温度传感器，表面涂层改为真空镀

铝，替代目前的白漆涂层，减少红外长波影响，特别是来自云体的长波影响。

(3) 采用湿敏电容湿度传感器替代目前的碳湿敏电阻湿度传感器，提高其稳定性，以及低温条件下测量性能。此外，参照国外先进探空仪经验，研制相应的湿度订正算法。

(4) 传感器支撑架应该尽量长，使传感器远离探空仪盒体，避免盒体热污染；围绕传感器本身的支架设计应对称形状，以利于利用软件算法进行滤波处理，建议尽可能减少传感器本身支架，使传感器直接裸露在空气中。

表2 历届国际比对试验技术特点概况

测风方式	辅助遥感	湿度测量	温度测量	气压测量	位势高度测量
第八届阳江国际比对试验	新一代天气雷达，激光雷达等多种辅助遥感观测设备	全部采用湿敏电容传感器，技术成熟	珠状热敏电阻温度传感器，金属涂层工艺	卫星定位高度反算气压	卫星导航定位为主
第七届毛里求斯国际比对试验	少量辅助遥感设备	开始采用湿敏电容传感器，技术未成熟	棒状热敏电阻温度传感器，白漆涂层工艺	卫星定位高度反算气压	卫星导航定位为主
前六届国际比对试验	少量辅助遥感设备	湿敏电阻传感器为主	双金属片、热敏电阻温度传感器	气压传感器直接测量	气压推算为主

## 4 CIMO专家组建议

### 4.1 对于WMO成员国的影响及益处

(1) 试验的结果可以作为成员国购买自身业务系统的参考，从而减少单独开展性能试验的花费。

(2) 试验证明，对于业务GPS探空系统，将不再需要配备压力传感器（这将进一步减少探空仪施加的花费）。

(3) 本次试验结果为GRUAN选择潜在可用的业务探空仪提出了建议，用于GRUAN站的探空系统已经明确了建立自身观测的不确定度模型的需求。

(4) 建议针对应用于GRUAN观测的探空仪，满足GRUAN站网的重要气候变量的测量性能评分结果应至少达到4分。

(5) 对于中国，二次雷达系统是一个具有优良探测性能的业务观测系统，但其配套的探空仪需要匹配能够满足中国气象业务要求的湿度传感器。

### 4.2 对WMO成员国的建议

(1) 对于特定的探空仪，配套的地面接收系统的信号接收能力必须跟得上，以前很多探空系统经常由于地面接收系统接收能力较弱，对距离较远的信号不能有效接收，不能够满足使用要求。

(2) 任何成员国决定购买某种型号的探空仪系统，必须充分考虑探空系统价格及本国或某一地区对观测性能业务水平的需求。本次试验的结果显示，相对于过去，现在可选择使用的探空系统的范围扩大了。但

是本次试验不能对探空系统制造商的可信程度、产品的长期稳定性以及其业务备份和技术支持的能力进行评价，因此需要在合同签约时开展商务谈判。

(3) 对于那些希望将观测结果应用于气候监测的成员国，在采购系统时应注意采购系统误差小的系统。对于那些正在使用平均得分低于3分业务探空仪的国家，如果本报告中的指标应用于其自身的观测网络，应该尽快替换其观测系统以达到本报告中提出的业务要求指标。

### 4.3 对系统制造商的要求

(1) 如果制造商进行基础数据的订正，需要完成订正方法文档的编写（湿度和温度的时间滞后订正，辐射订正，白天温度噪声的滤波方法等），并将文档向用户公开。

(2) 基础的原始数据对测试过程中判断探空仪存在的问题是至关重要的。因此，在未来的国际对比试验中，基础原始数据必须提供给试验组，并允许在最终报告中发布，系统制造商在开发软件时，应能够产生只有一个版本的基础原始数据的文件，并在下一阶段试验前完成软件的开发。

(3) 如果一个探空仪操作系统判定探测结果不可靠，对其进行标注，并做置空处理，而不是让软件通过插值或拟合来制造虚假数据。此外不鼓励对超过1分钟以上的缺失观测数据进行插值拟合。

(4) 未来开展相对湿度传感器在低温下的校准时，只有3个公式在温度低于-50℃以下时被用于水汽分压力方程的计算，即Wexler（1977），Hyland和Wexler（1983），以及Sonntag（1994）公式。

(5) 建议制造商提高相对湿度传感器的校准技术，处理参与的系统性误差，并持续关注低温状态下的传感器校准工作。

(6) 在温度传感器方面，制造商应注意到CIMO指南第七版（2008）的要求，不要在温度传感器上刷白漆，这将导致显著的红外辐射误差。

(7) 为温度传感器提供尽可能好的通风环境，这是减少平流层随机误差的关键因素（例如MTR探空仪能够检测到其传感器上面2m处空气流过竹竿时产生的扰动），类似的温度传感器必须在探空仪盒体的上方并尽可能远离探空仪盒体。

(8) 制造商现在需要提供更好的防护措施，防止探空仪穿过云层进入干层时，水汽蒸发制冷带来的误差。这对于在数值预报模式中对于低云部分的预测具有重要作用。

## 5 结束语

WMO第八届阳江国际探空系统比对试验结束后,中国气象局气象探测中心积极开展国产探空仪探测性能评估工作,针对我国三种型号参试探空系统的具体情况,对对比中出现的问题进行梳理和改进,对国产探空仪不同要素测量性能进行了评估,全面详细地对国产探空系统与其他参试系统的对比结果进行分析,找出自身的不足,并提出技术改进措施,组织国产探空系统生产厂家进行技术改进和数据处理算法的完善工作。具体表现在以下几个方面。

(1) 将比对成果转化到业务GTS1-2型探空仪上,以指导以后的生产,提高我国高空探测业务水平。

①借鉴国外探空仪的经验,将湿度元件的防雨帽直径由原来的6mm增加到12mm,以增加湿度测量元件周围的空气流量,减少时间常数,解决湿度测量的迟滞误差。

②借鉴南非InterMet探空仪的温湿度支杆结构,加长温湿度支杆,从原来的152mm增加到157mm,同时改变探空仪盒与支杆之间的角度。以减小探空仪机壳的辐射对温度测量结果的影响。

(2) 加强高空仪器研制,提高硬件水平

①开展高空温度标准探空仪的研制工作,开展高空温度辐射误差订正算法的完善研究,力图从硬件设计和软件控制两方面提高高空温度探测质量。

②针对国产探空仪湿度探测结果与国外探空仪差距较大的情况,国内相关厂家正在自行研发适用于探空用的湿敏电容,力图解决湿度传感器在低温下测试滞后的问题。

(3) 研制高空订正算法

通过文献调研,以及借鉴阳江国际比对经验,国外先进探空仪都包含了许多重要的算法,特别是对于温度与湿度的订正算法,而国内这一工作开展相对较少。中国气象局气象探测中心依托于气象行业专项,开展相关高空算法研究,并将其应用到业务探空仪上,从硬件与软件上综合提高高空数据质量。

(4) 完善比对技术

通过承办阳江国际探空比对,中国气象局积累了举办大型国际活动,特别是组织比对试验的经验,培养了一支比对试验队伍,并且通过吸取国外先进的比对技术与方法,进一步完善与提高我国高空比对技术,与世界先进水平接轨。

## 参考文献

- [1] 宋连春,李伟.综合气象观测系统的发展.气象,2008,34(3):3-9.
- [2] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation(V7.0). Geneva: WMO, 2006.
- [3] Hooper A H. WMO international radiosonde comparison, Phase I, Beaufort Park U K, 1984. WMO/TD-No.174, Instruments and Observing Methods Report, 1986: 28.
- [4] Schmidlin F J. WMO international radiosonde comparison, Phase II, Wallops Island, USA, 1985. WMO/TD-No. 312, Instruments and Observing Methods Report, 1988: 29.
- [5] Nash J, Schmidlin F J. WMO international radiosonde comparison, (UK 1984, USA 1985) Final report. WMO/TD-No.195, Instruments and Observing Methods Report, 1987: 30.
- [6] Ivanov A, Kats A, Kumosenko S, et al. WMO international radiosonde intercomparison phase III (Dzhambul,USSR,1989) final report. WMO/TD-No. 451, Instruments and Observing Methods Report, 1991: 40.
- [7] Yagi S, Mita A, Inoue N. WMO international radiosonde intercomparison phase IV (Tsukuba, Japan, 1993) final report. WMO/TD-No.742, Instruments and Observing Methods Report, 1996: 59.
- [8] Balagurov A, Kats A, Krestyannikova N, Schmidlin F. WMO radiosonde humidity sensor intercomparison, 1995. WMO/TD-No. 1305, Instruments and Observing Methods Report, 2006: 88.
- [9] Silveira D, Fisch R G, Machado L, et al. WMO intercomparison of GPS radiosondes, Alcantara, Brazil, 2001. WMO/TD-No.1314, Instruments and Observing Methods Report, 2006: 90.
- [10] Nash J, Smout R, Oakley T, et al. WMO intercomparison of high quality radiosonde systems final report (Vacaos, Mauritius, 2005), 2006.
- [11] GCOS. Manual on the GCOS surface and upper-Air networks: GSN and GUAN, GCOS73, WMO/TD-No.1106, 2002.
- [12] GCOS. GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN): Justification, requirements, siting and instrumentation options, GCOS112, WMO/TD-No.1379, 2007.
- [13] Haimberger L. Homogenization of radiosonde temperature time series using innovation statistics. Journal of Climate, 2007, 20(7): 1377-1403.
- [14] Sapucci, Luiz F, Luiz A T, et al. Analysis of relative humidity sensors at the WMO radiosonde intercomparison experiment in Brazil. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(6): 664-678.
- [15] 姚雯,郑国光,郭亚田,等.气象探空测风软件系统的标准化研究.应用气象学报,2004,15(1):88-94.
- [16] 黄炳勋. C波段测风一次雷达的跟踪特性及其应用前景.应用气象学报,1995,6(2):153-162.
- [17] 姚雯,马颖,黄炳勋,郭亚田.利用GPS定位资料分析L波段雷达测风性能.应用气象学报,2009,20(2):195-202.
- [18] 毛节奏. GPS的气象应用.气象科技,1993(4):45-49.
- [19] 朱喜林. GPS及其在大气探测中的应用.气象水文海洋仪器,2004(1):42-46.
- [20] 李国平,黄丁发. GPS气象学研究及应用的进展与前景.气象科学,2005,25(6):651-661.
- [21] 秦晓军. GPS技术在气象探空测风中的应用.陕西气象,2006,3:29-30.
- [22] 徐刚,王培延. GPS气象探空仪原理与工程设计.导航,2005,41(2):115-118.
- [23] 马舒庆,李峰,邢毅. 从毛里求斯国际探空系统对比看全球探空技术的发展.气象科技,2006,34(5):606-609.
- [24] 航天科工集团第二研究院23所北京长峰声表面波公司. GPS探空系统技术文件,2009:1-16.
- [25] 中国华云技术开发公司. HY-GTS(U)1-1型数字式GPS电子探空仪地面接收处理系统技术说明,2009:1-10.
- [26] 李伟,邢毅,马舒庆. 国产GTS1探空仪与VAISALA公司RS92探空仪对比分析.气象,2009,35(10):97-102.