

国产珠状温度传感器对比分析

李伟¹

摘要

通过对比试验,采取同球比对施放方式,选择德国 GRAW 探空仪作为比对标准,使用总共 12 次同球比对数据,对中国长峰、华云和大桥 3 种型号探空仪的珠状电阻温度传感器开展对比分析。经典型个例分析与统计分析表明:3 个型号国产探空仪高空温度廓线与德国 GRAW 探空仪具有较好的整体一致性,温度测量夜间性能均好于白天;长峰探空仪温度探测性能随高度变化比较稳定,而华云探空仪与大桥探空仪性能相仿,均随高度性能下降,尤其是 30 km 以上高空;长峰探空仪温度探测整体性能最好,相对系统误差在 0.2 °C 左右;而华云探空仪与大桥探空仪误差可达 1 °C,且均表现为整体上温度测值偏低。体积较小的珠状温度传感器将是未来高空温度探测的一个好的选择,下一步需要改善华云探空仪与大桥探空仪温度传感器表面涂层工艺,两者的温度辐射订正算法也需要进一步完善。

关键词

高空;阳江国际探空比对;国产探空仪;珠状温度传感器

中图分类号 TP212.9

文献标志码 A

0 引言

常规高空气象探测是对地面以上到中间层大气的温度、气压、湿度、风向风速等气象要素进行观测,是描述大气三维结构特征的主要资料来源,在天气分析和数值预报业务中具有不可替代的重要的基础作用,气候变化诊断与模拟研究也同样依赖于可靠的长期历史气候资料^[1]。探空资料非常重要,最长的高空观测记录是通过在全球观测网络,每天施放无线电探空仪获取的,这些探空仪提供了自 20 世纪 30 年代以来的高空气象变量的数据库。Angell^[2]利用 1958—1987 年 63 个站的探空资料分析了近 30 a 全球对流层与平流层大气的温度变化的特点;为了了解高空气温的长期变化趋势,薛德强等^[3]利用中国 28 个高空探空站 1961—2000 年间地面至高空 10 hPa 的温度资料进行了不同区域与不同高度的年季统计分析;任国玉等^[4]的研究表明,不论是近 54 a 还是近 100 a 全国年平均地面气温升高趋势一般比原来分析结果表明的要强,分别达到 0.25 °C/(10 a) 和 0.7 °C/(10 a)。

世界气象组织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、观测方法等^[5]。气候变化监测要求气候观测系统能长期稳定地提供 36 km 以下更准确的探空资料,温度系统偏差不超过 0.1 °C,随机误差不超过 0.5 °C^[6]。鉴于观测资料质量对气候变化观测研究的重要影响,探空资料的误差问题已经引起了国际上不少学者的重视^[7-9]。国内翟盘茂^[10]利用综合静力学质量控制技术,分析中国历史探空资料集中的一些过失误差情况,着重研究了 20 世纪 60 年代探空仪器变化给温度和湿度时间序列带来的不均一性问题,讨论了中国近期探空温度和湿度资料中垂直层次上存在的一些偏差问题。探空资料除了用于天气、气候、气候变化等业务服务外,还要作为遥感探测真实性检验和校准的基准。这些都要求气象探空系统提供时空密度更高、准确度更好、覆盖空间更广的观测数据。

在实际大气中,气象要素无法保持恒定,而是随时间变化,无论是一阶系统还是二阶系统的测量传感器,随时都会产生仪器的输出不能适应被测量变化所造成的误差,即“动态误差”^[11]。对于气象仪器大部分适用于静态测量结果的评定,而对普遍采用的动态测量尚无科学的评定理论,目前常用“以静代动”或采用随机过程特征量参数来评定动态测量结果,均是一种近似办法,与科学的不确定度原理和实际情况还有明显差距^[12]。影响高空温度测量的动态误差是多方

收稿日期 2010-12-21

资助项目 国家自然科学基金(40975064)

作者简介

李伟,男,博士,主要从事高空仪器比对、评估与分析工作。lw1024@263.net

¹ 中国气象局气象探测中心,北京,100081

面的,有探空仪本身的误差,校准过程中引入的误差,地面基值测定引入的误差,施放环境,如太阳辐射、背景辐射、云层辐射,元件沾湿、探空仪摆动、气球尾流影响等也可能造成误差,其中辐射误差是影响高空温度测量的最大影响因子^[13].目前在中国气象局业务上广泛使用的GTS1探空仪采用GPW2型棒状热敏电阻,表面有高反射率涂层,短波反射率大于93%,但长波吸收率也大于90%,但是即使是这样,如果不进行辐射订正,在高空能造成大约3K的温度系统差.减小辐射误差可以从传感器涂层与软件算法订正两方面开展.理论上传感器体积越小,则吸收辐射能量越少,散热也越快;此外美国采用具有多个表面涂层的多温度传感器测量高空温度,其绝对辐射误差通过联立方程组进行解算后予以消除,在多次国际探空比对中得到试用^[14-17].前者可以视为半理论半经验平均辐射订正方法,后者则被视为绝对辐射订正方法.为了减小辐射影响,目前业务上正在逐渐使用体积更小的珠状温度传感器,表面涂层能够同时减小长波与短波影响,从硬件上尽量减小辐射影响.

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,世界气象组织根据探测技术发展,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.借世界气象组织在中国广东阳江探空站开展国际探空比对的机会,对参加国际比对的3种型号国产珠状电阻温度传感器性能进行综合比较,为未来中国高空温度传感器发展提供借鉴.

1 比对背景介绍

2010年7月12日—8月1日,世界气象组织在我国广东阳江组织了第8届国际探空仪比对试验,共施放气球72次.本次参加比对的探空仪系统中,中国南京大桥机械有限公司(简称大桥,在本文图中标为DAQIAO)、航天科工集团第23研究所长峰公司(简称长峰,在本文图中标为CHANGF)和中国华云技术开发公司(简称华云,在本文图中标为HUA-YUN)参加了国际比对.3个中国厂家均采用珠状电阻温度传感器,体积大大缩小,反应速度显著提高,可以不进行滞后误差订正,也均未开展大气长波辐

射订正,但是表面涂层与温度辐射订正算法各有不同.大桥探空仪温度传感器表面采用白漆涂层,短波反射率优于93%,但是对于红外长波吸收率几乎达到100%.软件上采用热平衡方程对短波辐射误差进行订正;长峰探空仪温度传感器表面采用真空镀铝涂层,对于红外长波可以忽略不进行处理,而对于短波反射率也超过90%.软件上采用热平衡方程对短波辐射误差进行订正;华云探空仪温度传感器表面采用真空镀铝涂层,对于红外长波可以忽略不进行处理,而对于短波反射率也超过90%.软件上采用查表方式对短波辐射误差进行订正.

在国际比对中,采取多个探空仪同球施放方式,气球采用中国化工橡胶株洲研究设计院开发生产的2kg探空气球,支架使用柔韧性较好,长度3m的竹竿交叉捆绑,探空仪悬挂距支架高度为80cm,气球绳长为30m.试验比对共有效同球施放72次,每2s采集1组数据.

本文采用世界气象组织国际比对标准分析软件,以秒数据对齐方式对对比数据进行分析,数据预处理时将异常数据予以剔除.由于世界气象组织对于国际比对数据限制,本文仅分析中国探空仪温度传感器的性能,对于国外探空仪不予定量分析,待世界气象组织最终报告发布后再开展进一步深入分析.

2 典型个例分析

德国GRAW探空仪采用珠状温度传感器,与中国CHANGF探空仪、HUAYUN探空仪、DAQIAO探空仪一起同球施放,同时也与目前国际上作为温度比对参考标准的多温度传感器温度探空仪——美国3THERM探空仪一起进行了科学探空仪组的同球比对施放,通过夜间与白天的施放,考察德国GRAW探空仪温度探测能力.

图1为德国GRAW探空仪与美国3THERM探空仪夜间同球施放的温度曲线,不同的颜色代表不同型号探空仪的探测结果,图1a为温度廓线,图1b为德国GRAW探空仪与美国3THERM探空仪温度的差值.横坐标为温度(°C),纵坐标为气球飞行高度(km).由图1可以看出,12km以下两者温度差值在0.2°C之内,32km以下温度差在0.5°C之内,32km以上温度差在0.8°C之内.

图2为德国GRAW探空仪与美国3THERM探空仪白天同球施放的温度曲线.从图2b可见,24km

以下两者温度差值基本上在 0.5 °C 之内,向上逐渐增大到 1.2 °C. 此外,从图 2 还可以看出,德国 GRAW 探空仪总体温度探测性能要好于中国 CHANGF 探空仪和 HUAYUN 探空仪.

因此,通过夜间与白天的综合分析,德国 GRAW 探空仪在本次国际比对中温度探测表现比较稳定. 由于德国 GRAW 探空仪同时参与了中国 3 个型号

探空仪的同球对比施放,下面将其作为温度参考标准开展分析.

图 3a 为德国 GRAW 探空仪与中国 3 个型号探空仪的垂直高空廓线,图 3b 为与德国 GRAW 探空仪温度差值. 从图 3a 可见,白天 4 种探空系统整体趋势一致性很好,但是从图 3b 也可以看出,与 GRAW 探空仪相比,从低层到高层偏差呈逐渐增大

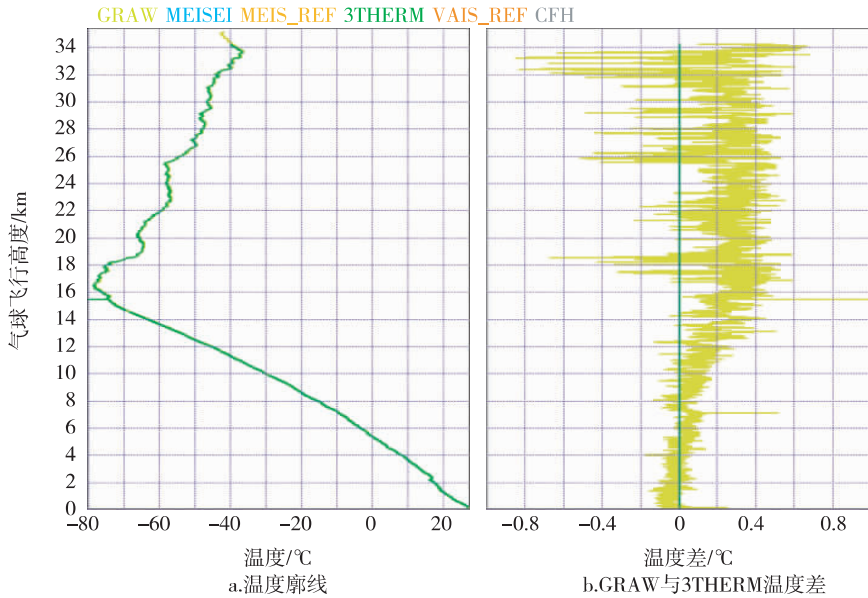


图 1 2010 年 7 月 25 日 03 时 01 分第 43 次同球比对施放

Fig. 1 The 43th test flight with the same balloon model at 03:01 on July 25 2010

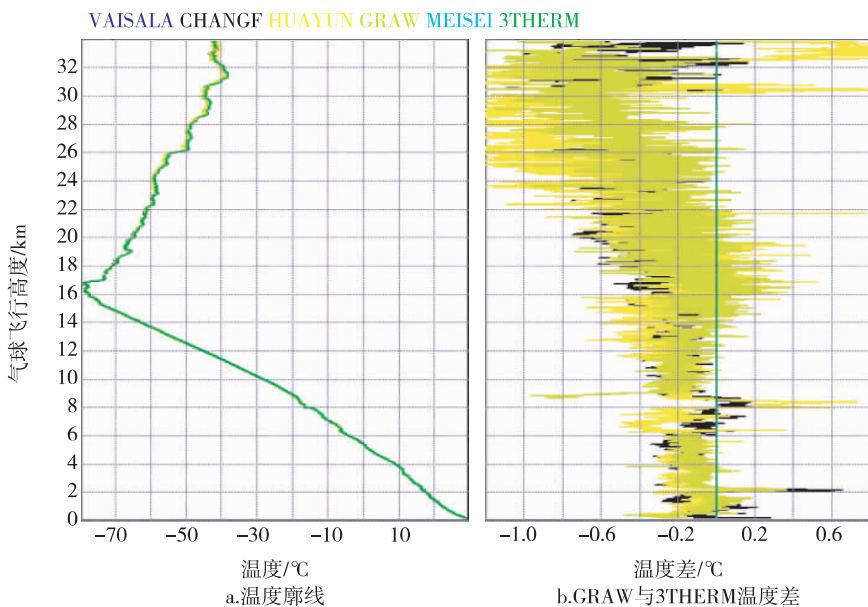


图 2 2010 年 7 月 28 日 08 时 34 分第 54 次同球比对施放

Fig. 2 The 54th test flight with the same balloon model at 08:34 on July 28 2010

趋势,特别到了 30 km 以上,不同探空系统温度探测偏差明显增大;在对流层顶以下,低于 16 km 时,整体相对偏差在 0.5 °C 之内;在 16 ~ 30 km 之间,整体相对偏差在 1 °C 之内;在 30 km 之上,相对偏差明显增大,变化范围在 4 °C 之间。

夜间可以忽略太阳短波影响,仅需要考虑大气长波影响。由图 4a 的温度垂直廓线对比可见,夜间 4

种探空系统整体趋势一致性也很好。由图 4b 的差值曲线可见,与白天相比,误差整体波动不大,表现比较稳定,从低层到高层略有增加;低层变化幅度在 0.5 °C 之内,到了对流层顶之上,16 km 至 30 km 之间,变化幅度在 1 °C 之内,到了 30 km 之上,整体变化幅度在 1.5 °C 之内。

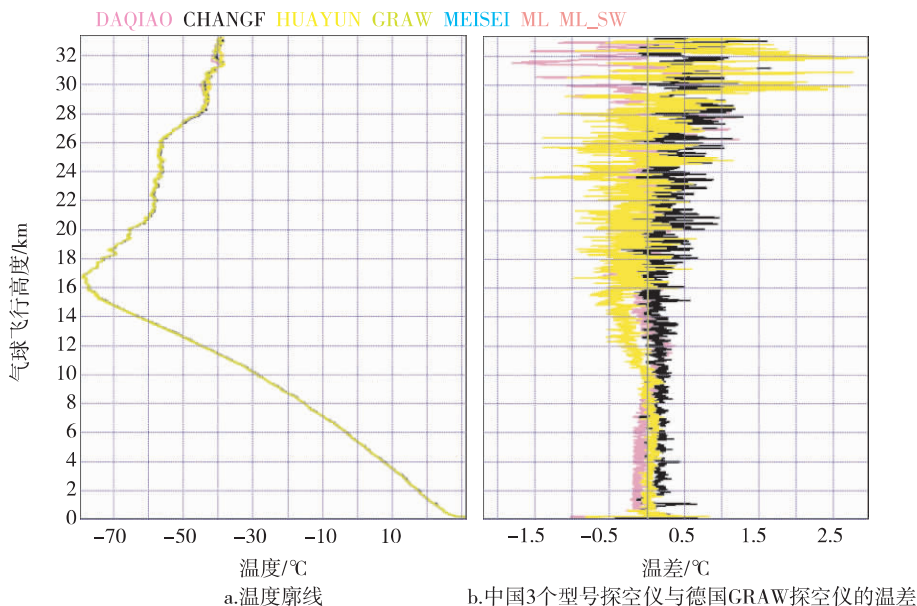


图3 2010年7月24日12时47分第40次同球比对施放

Fig. 3 The 40th test flight with the same balloon model at 12:47 on July 24, 2010

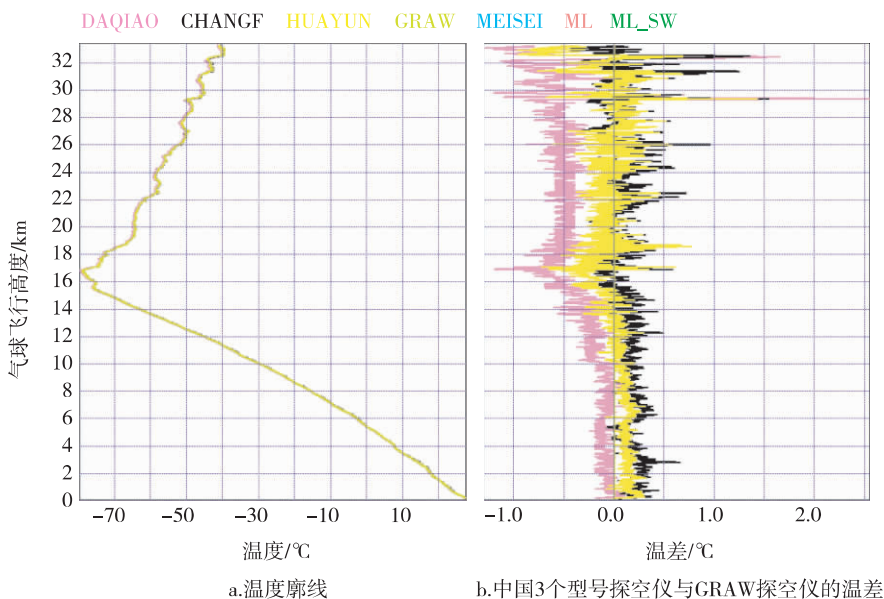


图4 2010年7月24日00时48分第42次同球比对施放

Fig. 4 The 42th test flight with the same balloon model at 00:48 on July 24, 2010

从图3与图4还可以看出,华云探空仪与大桥探空仪总体呈现负偏差,而长峰探空仪表现不明显,整体在0轴左右摆动.

不同的探空系统采取不同的温度平滑算法,由图5可见,长峰探空仪平滑度最大,华云探空仪次之,大桥探空仪与 GRAW 探空仪平滑度最小.

3 统计分析

与德国 GRAW 探空仪共同球施放 12 次,其中 6 次白天施放 6 次夜间施放. 首先进行全部 12 次施放整体分析,其次为了分析辐射对于高空温度传感器测量结果影响,将白天与夜间分别进行统计.

图 6a 为相对系统差,图 6b 为标准偏差,横坐标为温度(°C),纵坐标为气球飞行高度(km). 由图 6 可见,长峰探空仪表现最好,大桥探空仪与华云探空仪基本上属于同一水平. 对于长峰探空仪,其相对系统差整体都在 -0.2 ~ 0.2 °C,除了 8 km 以下的低层标准偏差略大,可达 0.7 °C 之外,其他均可控制在 0.4 °C 之内,整体上性能非常稳定;对于大桥探空仪,其相对系统差随高度明显呈增大趋势,除了 8 ~ 14 km 之间的中层温度测值偏高外,其他层次均呈偏低状态,在 15 km 以下的对流层内,相对系统误差可控制在 -0.2 ~ 0.1 °C,在 15 km 以上的高空相对系统误差迅速增大,最大可达 -1 °C,标准偏差也基本上呈现随高度增大趋势,最大超过 0.7 °C;华云探

空仪与大桥探空仪总体变化趋势相仿,在 26 km 以上的高空好于大桥探空仪,最大相对系统误差超过 -0.8 °C,但是标准偏差在 18 km 以上要比大桥探空仪稍差,最大超过 0.9 °C.

夜间主要考虑大气短波辐射影响. 如前所述,对于体积较小的珠状温度传感器,如果表面采用镀铝涂层,则基本上可以不考虑大气长波辐射影响,也就是说能够反映传感器本身真实性能,而对于白漆涂层,由于其长波吸收率达 100%,则受到大气长波辐射影响较大. 由图 7 可见,长峰探空仪整体相对系统差在 -0.2 ~ 0.2 °C,其标准偏差除了 30 km 以上最大超过 0.3 °C 外,其他均在 0.2 °C,性能表现相当稳定;而对于华云探空仪,没有进行长波辐射订正,但是明显受到长波辐射降温影响,在 14 km 以上,相对系统差均为负值,相对系统差随高度增大,在 30 km 以下,相对系统差在 -0.45 ~ 0.1 °C,30 km 以上明显增大,最大可达 -1.0 °C,标准偏差基本上也是随高度增大,最大超过 0.6 °C;对于大桥探空仪,其整体变化趋势与华云探空仪基本一致,虽然由于考虑体积较小的珠状温度传感器受大气长波辐射影响小的原因,未进行大气长波辐射订正,但是由于传感器表面采取白漆涂层,因此不可避免还是会受到大气长波辐射冷却作用的影响,因此在 3 个型号国产探空仪中相对系统差最大,而标准偏差在 20 km 以下与华云探空仪相当,之上则好于华云探空仪,其稳定

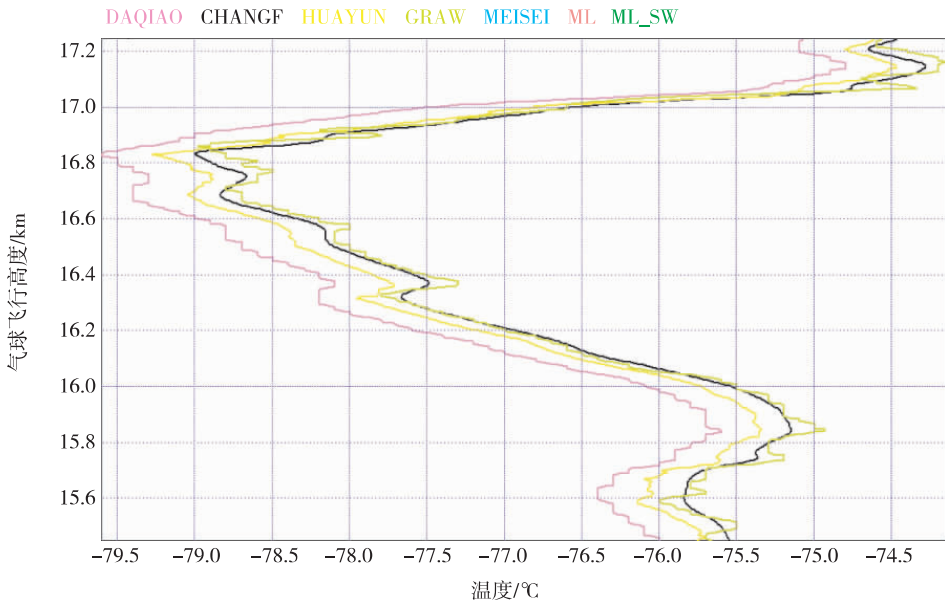


图 5 高空温度廓线细微结构

Fig. 5 The expanded structure of upper-air temperature profile

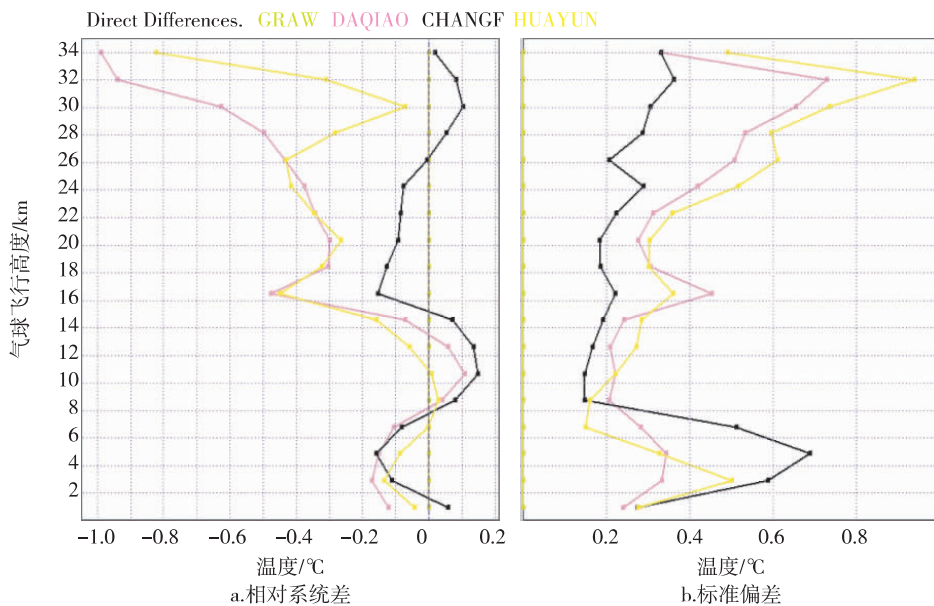


图 6 温度随高度变化统计

Fig. 6 The statistics result of temperature changes with height

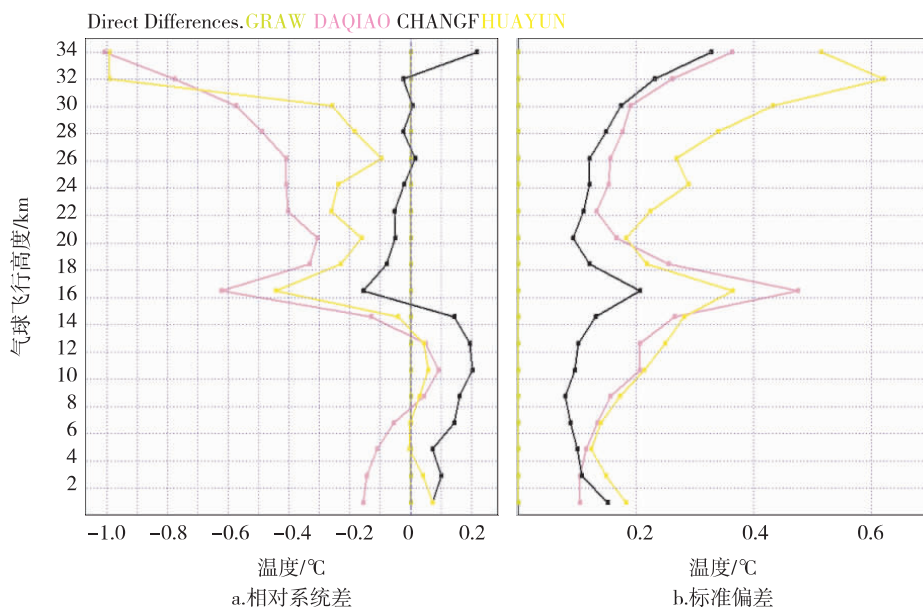


图 7 夜间温度随高度变化统计

Fig. 7 The statistics result of temperature changes with height in nighttime

性要好于华云探空仪. 此外, 还可以注意到, 在 16 km 附近的对流层顶, 3 个型号的国产探空仪均表现出同样异常变化趋势, 这也可能是作为温度参考的 GRAW 探空仪夜间在对流层顶的温度探测产生异常, 不一定是国产探空仪本身的问题.

虽然与长峰探空仪同样采取传感器表面镀铝涂层, 但是华云探空仪却表现出与大桥探空仪传感器表面白漆涂层的类似性能, 分析其原因, 可能是华云

温度传感器表面镀铝涂层工艺有待改进, 存在不均匀, 甚至太薄导致内部原有黑色传感器表面直接裸露在空气中的问题, 最后也体现为对大气长波辐射吸收率高, 而其镀膜工艺不稳定直接造成标准偏差变大.

白天主要考虑太阳短波辐射订正, 除了表面涂层外, 最重要的就是其辐射订正算法. 由图 8 可见, 3 个型号国产探空仪夜间性能均好于白天性能. 长峰

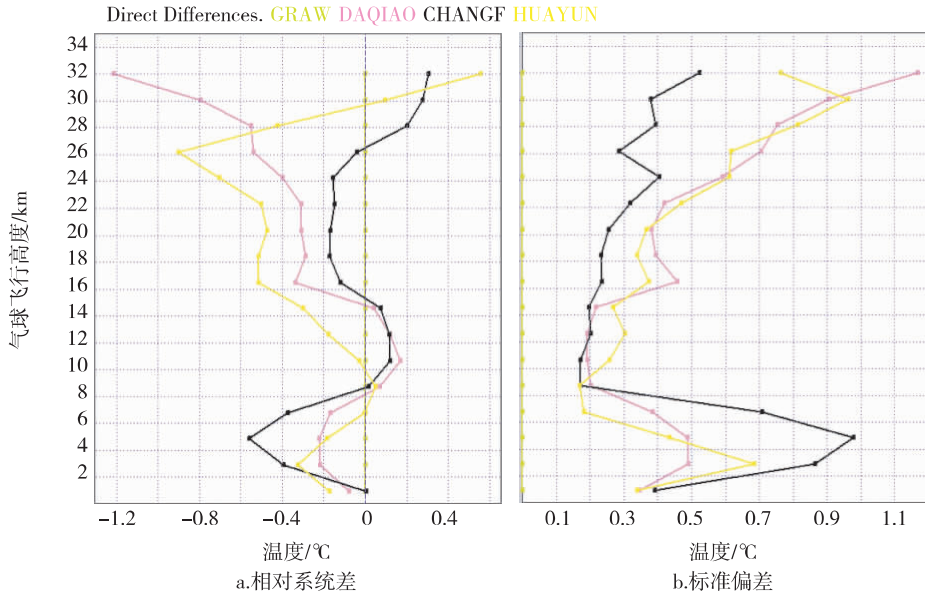


图8 白天温度随高度变化统计

Fig. 8 The statistics result of temperature changes with height in daytime

探空仪相对系统差变化比较稳定,整体在 $-0.6 \sim 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ 标准偏差在 8 km 以下的低层偏大,最大可接近 $1.0 \text{ } ^\circ\text{C}$,其他均在 $0.52 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之内;华云探空仪相对系统差变化较大,除了 30 km 以上的高层,其他温度测值基本上均呈偏低状态,在 16 km 以下的对流层内可控制在 $-0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之内,到了 28 km 达到极大值 $-0.9 \text{ } ^\circ\text{C}$,之后呈线性变化接近 $0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$,标准偏差基本上呈随高度增加趋势,最大可达 $0.95 \text{ } ^\circ\text{C}$;大桥探空仪除了 28 km 以上的高空外性能均好于华云探空仪,除了 $8 \sim 15 \text{ km}$ 的中空相对系统差呈现正值外,其他均呈负值,低于 24 km 时相对系统误差在 $-0.4 \sim -0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之上迅速增大超过 $-1.2 \text{ } ^\circ\text{C}$,标准偏差基本上呈随高度增加趋势,最大可达 $1.16 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

对于华云探空仪与大桥探空仪温度白天测值偏低的现象,基本上可以推断是对于太阳短波辐射温度订正过度所致。

4 总结与展望

通过以上分析,初步得到以下结论:

1) 3 个型号国产探空仪高空温度廓线与德国 GRAW 探空仪具有较好的整体一致性,夜间性能均好于白天;

2) 长峰探空仪温度探测整体性能最好,华云探空仪与大桥探空仪性能相仿,后两者均表现为整体上温度测值偏低;

3) 长峰探空仪温度探测性能随高度变化比较

稳定,而华云探空仪与大桥探空仪均随高度性能下降,特别表现在 30 km 以上高空;

4) 华云探空仪与大桥探空仪温度传感器表面涂层工艺需要改善,两者的温度辐射订正算法需要进一步完善。

通过前面的分析,说明体积较小的珠状温度传感器将是未来高空温度探测的一个好的选择,但是还需要针对前面分析中出现的问题,进一步改善温度传感器表面涂层工艺,完善辐射订正算法,不断提高高空温度探测质量。

参考文献

References

- [1] 田永祥,沈桐立,葛孝贞,等.数值天气预报教程[M].北京:气象出版社,1995
TIAN Yongxiang, SHEN Tongli, GE Xiaozhen, et al. Tutorial of numerical weather forecast [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995
- [2] Angell J K. Variations and trends in tropospheric and stratospheric global temperatures 1958—1987 [J]. Journal of Climate, 1988, 1(12): 1296-1313
- [3] 薛德强,谈哲敏,龚佃利,等.近40年中国高空温度变化的初步分析[J].高原气象,2007,26(1): 141-149
XUE Deqiang, TAN Zhemin, GONG Dianli, et al. Primary analyses of upper-air temperature changes in China in past 40 years [J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(1): 141-149
- [4] 任国玉,初子莹,周雅清,等.中国气温变化研究最新进展[J].气候与环境研究,2005,10(4): 701-716
REN Guoyu, CHU Ziyang, ZHOU Yaqing, et al. Recent

- progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. *Climatic and Environmental Research* 2005, 10(4):701-716
- [5] WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation [M]. 7th ed. Geneva: WMO 2006
- [6] 丑纪范, 赵柏林. 中国气象事业发展战略研究: 现代气象业务卷 [M]. 北京: 气象出版社 2004
CHOU Jifan ZHAO Bolin. Development strategy research for China's meteorology: Soutenterprise-volume of modern meteorological operation [M]. Beijing: China Meteorological Press 2004
- [7] Gaffen D J. Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994 99(D2): 3667-3676
- [8] Parker D E, Cox D I. Towards a consistent global climatological rawinsonde data-base [J]. *International Journal of Climatology* 1995, 15(5): 473-496
- [9] Eskridge R E, Alduchov O A, Chernykh I V, et al. A comprehensive aerological reference data set (CARDS): Rough and systematic errors [J]. *Bulletin of American Meteorological Society* 1995 76(10): 1759-1775
- [10] 翟盘茂. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题 [J]. *气象学报* 1997 55(5): 563-572
ZHAI Panmao. Some gross errors and biases in China's historical radiosonde data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997 55(5): 563-572
- [11] 张玉存. 军用气象仪器试验鉴定技术 [M]. 北京: 国防工业出版社 2008
ZHANG Yucun. Test and calibration technology of military meteorological instruments [M]. Beijing: National Defence Industrial Press 2008
- [12] 费业泰. 误差理论的研究与进展 [J]. *计量技术* 1998 (8): 40-41
FEI Yetai. Advances in error theory [J]. *Measurement Technique* 1998(8): 40-41
- [13] 李伟, 贺晓雷, 齐久成. 气象仪器及测试技术 [M]. 北京: 气象出版社 2010
LI Wei, HE Xiaolei, QI Jiucheng. Meteorological instruments and test technology [M]. Beijing: China Meteorological Press 2010
- [14] Ranganayakamma B. Experimental study for temperature dependency of absorption coefficients of 3 thermistor paints [R]. Interim Report Contract NAS5-32527, 1990
- [15] Schmidlin F J, Luers J K, Hoffman P D. Preliminary estimates of radiosonde thermistor errors [J]. *NASA Tech*, 1986: 2637-2653
- [16] Yagi S, Mita A, Inoue N. WMO international radiosonde comparison. Phase IV. Tsukuba, Japan, 15 February-12 March 1993 [R]. Instruments and Observing Methods Report No. 59, 1996: 130
- [17] Nash J, Smout R, Oakley T, et al. WMO intercomparison of high quality radiosonde systems [R]. Vacoas, Mauritius 2005

Performance analysis for China-made bead resistance temperature sensors

LI Wei¹

¹ Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Based on 12 flight dataset from the 8th WMO international radiosonde intercomparison hold at Yangjiang of Guangdong province, the systematic evaluation of 3 types of bead resistance temperature sensor for China-made radiosondes, which belong to CHANGFENG, HUAYUN and DAQIAO company respectively, is carried out by choosing Germany GRAW radioseonde as reference through the same balloon releasing model. The initial evaluation results show as following: 1) The 3 temperature observation profiles of domestic radiosondes have good consistence with that of Germany GRAW radiosonde, with better performance at nighttime than at daytime; 2) CHANGFENG temperature sensor has better stability, whereas HUAYUN temperature sensor and DAQIAO temperature sensor both decrease in performance with height increase, particularly above 30 km; 3) CHANGFENG temperature sensor has the best performance, whose relative systematic error is about 0.2 °C, whereas the relative systematic errors of HUAYUN temperature sensor and DAQIAO temperature sensor can reach 1 °C. So bead temperature sensor may be a good choice for future upper-air temperature detection, but the coating material and radiation correction algorithm for HUAYUN temperature sensor and DAQIAO temperature sensor need to be further improved.

Key words upper-air; Yangjiang international radiosonde intercomparison; China-made radiosonde; bead resistance temperature sensor