

彭冲,张祖强. 上对流层/下平流层 GPS 掩星资料与我国探空温度对比[J]. 气象, 2012, 38(9): 1033-1041.

# 上对流层/下平流层 GPS 掩星资料 与我国探空温度对比<sup>\* 1</sup>

彭 冲<sup>1</sup> 张祖强<sup>1,2</sup>

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 江苏省气象局, 南京 210008

**提 要:** 本文使用 CDAAC(COSMIC Data Analysis and Archival Center)提供的 1995—2010 年 GPS 掩星干反演大气温度和我国无线电探空温度资料,选择临近的廓线进行匹配,以掩星资料为基准,分析上对流层/下平流层区域(200~30 hPa)探空温度与掩星温度之间的偏差。分析多种时空匹配条件下总的温度偏差和标准差的结果表明,匹配条件对偏差平均值影响较小,主要影响偏差标准差,选择探空和掩星廓线时间差小于 3 h、距离小于 200 km 作为匹配条件。就全国平均而言,探空温度和掩星温度相差很小,其中在上对流层的偏差大于下平流层,偏差的标准差随高度增加而变大。在上对流层昼夜偏差都为正,下平流层白天为正、夜间为负,温度偏差和标准差在白天大于夜间,说明掩星资料具有足够的精度可以识别出太阳辐射对我国探空温度的影响。偏差在低纬较大,随纬度升高逐渐减小,与使用掩星资料计算的大气垂直减温率有较好的对应关系,其变化特征与探空滞后误差比较一致,说明使用掩星资料可以辨别滞后误差对探空资料的影响。就全国平均而言,L 波段探空仪和 59 型探空仪的平均温度偏差都相对较小,但在不同纬度表现不同;在低纬地区二者偏差对比明显,59 型探空仪具有较大的偏差,L 波段探空仪偏差较小,高纬地区二者偏差相对都较小;59 型探空仪的偏差标准差始终大于 L 波段探空仪。结果说明掩星资料可以分辨仪器换型对温度偏差的影响,探空仪的升级使我国探空资料的精准度提高,特别在纬度较抵的区域,偏差的改进更加明显。

**关键词:** GPS 掩星, 探空, 温度误差, UTLS

## Comparison of GPS Radio Occultation Dry Temperature and China's Radiosonde Temperature in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere

PENG Chong<sup>1</sup> ZHANG Zuqiang<sup>1,2</sup>

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210008

**Abstract:** Temperature differences between GPS/RO dry retrievals, derived from COSMIC Data Analysis and Archival Center (CDAAC), and China's radiosonde temperature profiles in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere (UTLS, from 200 to 30 hPa) are calculated to analyze the radiosonde temperature bias. A simple quality control is carried out first to reduce the effects of outliers. Total mean temperature difference and standard deviation with temporal difference ranging from 1 to 3 hours and spatial distance ranging from 30 to 300 km are calculated to check the affection of collocation methods. Results show that the mean difference between GPS/RO retrieval and radiosonde temperature is independent of the collocation criteria, which mainly affect the standard deviation. Compared to GPS/RO data, China's radiosonde

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(973-2010CB951601)项目资助

2011 年 12 月 21 日收稿; 2012 年 4 月 12 日收修定稿

第一作者: 彭冲,主要从事卫星资料验证与应用方面的研究. Email: ichpch@gmail.com

temperature shows a small warm mean bias in general, and the absolute mean bias and standard deviation in upper troposphere are larger than that in lower stratosphere. Latitudinal comparison results show that bias distribution characteristic agrees well with the temperature lapse rate, which indicates that GPS/RO data have the ability to differentiate the lag errors of radiosonde measurements. The bias is larger in low latitudes than that in high latitudes. Comparison of temperature difference in daytime and nighttime reveals that GPS/RO data can differentiate radiative errors of radiosonde caused by solar radiation. In comparison to the small bias between the new L band electronic radiosonde and GPS/RO profiles, the significant temperature bias between type 59 mechanic radiosonde and GPS/RO data, especially in low latitude area, which may be attributed to large lag errors caused by the large lag index of type 59 radiosonde and lapse rate in low latitude area, demonstrates the ability of GPS/RO data to differentiate the old and new radiosonde type of China and the improvements of temperature precision by the L band radiosonde measurements.

**Key words:** GPS radio occultation, radiosonde, temperature bias, UTLS (upper troposphere and lower stratosphere)

## 引 言

无线电探空是目前业务运行时间最长的高空大气探测手段,探空温度广泛用于大气温度长期变化趋势的计算,在高空气候变化研究中具有不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>。我国无线电探空观测大致开始于 20 世纪 50 年代,经过几十年的发展,探空观测仪器和测量方法不断改进,探空资料的质量和精度不断提高。但是由于探空站点分布稀疏、误差原因错综复杂,更重要的是缺少绝对的温度参考标准,使得探空温度的订正十分困难。除人为误差和随机误差外,造成探空温度误差的原因很多,如太阳辐射、热传导、辐射冷却等,且误差随地理位置每天都在变化,依赖于太阳高度、云、地面温度和气球上升速度等<sup>[4]</sup>。

GPS 掩星技术(Global Positioning System Radio Occultation, GPS/RO)作为新兴的大气探测手段,为天气和气候学研究带来了新的机遇。到目前为止,国际上已成功执行了多个 GPS 掩星探测计划,如 GPS/MET (GPS/METeorology)<sup>[5]</sup>, CHAMP (the CHAllenging Minisatellite Payload)<sup>[6]</sup>, SAC-C (Satellite de Aplicaciones Cientificas-C)<sup>[7]</sup>, COSMIC (The Constellation Observation System for Meteorology, Ionosphere, and Climate)<sup>[8]</sup>, MetOp-A (the Meteorological Operational satellite Programme)<sup>[9]</sup>等,可提供 1995 年至今约十几年的掩星观测资料。GPS 掩星观测具有高精度、高准确度、高垂直分辨率、长期稳定

无需定标、全天候不受天气影响、全球覆盖的特点,可以作为气候变化研究的基准资料检验其他资料的偏差<sup>[10-14]</sup>。GPS 掩星资料已经广泛应用于气候变化监测、改进数值预报<sup>[15]</sup>和卫星资料交叉验证<sup>[16]</sup>。Kuo<sup>[17]</sup>比较了 CHAMP 和 SAC-C 的掩星廓线,在 5~20 km 范围内二者的平均温度偏差小于 0.1 K。GPS/MET 和 CHAMP 掩星反演结果与无线电探空结果对比表明,5~40 km 范围内温度相差通常在 2 K 以内,平均折射率偏差在 0.5%~1% 之间<sup>[5,10-11]</sup>,掩星资料具有足够的精度识别不同类型探空仪的表现<sup>[17-18]</sup>。

掩星资料的积累为使用掩星资料细致评估探空资料提供了条件。本文使用 GPS/MET、CHAMP、GRACE-A、COSMIC、MetOp-A 多个掩星观测任务的反演资料,与我国探空资料进行匹配,分析上对流层和下平流层(Upper Troposphere and Lower Stratosphere, UTLS)区域探空温度与掩星反演温度之间的偏差,为我国探空温度资料的误差订正提供参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 资 料

本文使用的 GPS 掩星资料取自 CDAAC(COSMIC Data Analysis and Archival Center, <http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu>),包括 GPS/MET、

CHAMP、GRACE、COSMIC 和 METOP-A 5 个不同掩星任务的观测资料,提供掩星点大气温度、气压、折射率、高度、经度、纬度等信息。大气折射率  $N$ (单位为 1)满足以下关系:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (1)$$

式中,  $P$ 、 $T$  和  $P_w$  分别表示气压(hPa)、温度(K)和水汽压(hPa)。当水汽较少时,忽略式(1)中的水汽项只保留前一项,利用干空气状态方程  $P = \rho R_d T$ ,可以得到干空气密度:

$$\rho = 77.6 \frac{N}{R_d T} \quad (2)$$

通过对静力方程积分可以得到干空气反演的气压,再利用状态方程得到干空气反演温度:

$$P(z_0) = \int_0^\infty \rho(z) g(z) dz \quad (3)$$

$$T_{\text{dry}}(z_0) = \frac{P(z_0)}{\rho(z_0) R_d} \quad (4)$$

在中、低对流层,水汽较多,忽略水汽项会造成较大的反演误差。由式(1)不能同时得到大气温度和水汽压,利用其他观测手段测得的温度代入式(1)中可以得到相应的水汽压;使用模式分析场作为初估场,通过一维变分,可同时获得 GPS 湿反演温度  $T_{\text{wet}}$  和水汽压  $P_w$ <sup>[19]</sup>。

由公式(1)可知干反演温度始终小于湿反演温度,水汽含量越多,干、湿温度间偏差越大,在水汽较少的中上对流层和平流层,全球平均的高空干反演温度与湿反演温度差小于  $0.03 \text{ K}$ <sup>[20]</sup>。掩星资料在上对流层和下平流层精度最高<sup>[12]</sup>,本文选择比较了上对流层/下平流层区域 200、150、100、70、50 和 30 hPa 6 个规定层的温度,对应高度约为 11~25 km,在这一区域水汽含量极少,对折射率的贡献可忽略,干反演温度具有很高的精度。规定层上的温度值由接近规定层的等压面上的温度线性插值得到。

探空资料取自国家气象信息中心制作的“全球高空探测资料定时值数据集”,该资料集除台站常规的误差订正、质量控制外,对温度没有做额外的订正。本文使用了其中 1995—2010 年 120 个探空站点的温度资料,香港、台湾地区因使用非国产探空仪未做考虑。

## 1.2 资料处理方法

在对掩星资料和探空资料进行比较时,由于反演大气温度所用的折射率是高度的函数,Kuo<sup>[17]</sup>认

为选择高度作为垂直坐标较为合理,Wickert 等<sup>[21]</sup>则使用了气压坐标。本文使用的探空资料只在规定层有观测值,垂直分辨率低,而掩星资料具有很高的垂直分辨率。为避免低垂直分辨率的探空资料插值引入的误差,本文将掩星资料线性插值到规定层等压面上,计算临近的探空资料和掩星资料(即探空站点和掩星点距离、时间接近)在同一等压面上的温度偏差。探空资料的时间取 00 和 12 时(世界时),经纬度为探空站点的经纬度;掩星资料的时间和位置取为掩星廓线的中间时间和位置。本文主要使用的计算公式如下:

$$\Delta T(i, l) = T_{\text{RS}}(i, l) - T_{\text{GPS}}(i, l) \quad (5)$$

$$\overline{\Delta T(l)} = \frac{1}{N(l)} \sum_{i=1}^{N(l)} [T_{\text{RS}}(i, l) - T_{\text{GPS}}(i, l)] \quad (6)$$

$$SD_{\Delta T}(l) = \sqrt{\frac{1}{n(l)-1} \sum_{i=1}^{n(l)} [\Delta T(i, l) - \overline{\Delta T(l)}]^2} \quad (7)$$

式中,  $i$  表示临近匹配的探空和掩星廓线,  $l$  表示等压面,  $T_{\text{RS}}$  和  $T_{\text{GPS}}$  分别表示探空温度和掩星反演温度,  $\Delta T$  是温度偏差,  $n(l)$  表示该层等压面上匹配的样本数量,  $\overline{\Delta T(l)}$  和  $SD_{\Delta T}(l)$  分别表示该层等压面上温度偏差的平均值和标准差。

以前的研究在对探空资料和掩星资料进行交叉验证时采用了不同的匹配条件。Wickert 等<sup>[21]</sup>使用的条件是距离小于 300 km、时间差小于 3 h; Kuo<sup>[17]</sup>、He 等<sup>[18]</sup>使用的配对条件是距离小于 200 km、时间差小于 2 h;王洪等<sup>[22]</sup>选择的条件是距离小于一个经、纬度(约 110 km),时间差 3 h 之内。徐晓华等<sup>[23]</sup>等的研究表明距离和时间差越大,折射率偏差的标准差越大,距离对标准差的影响大于时间差的影响。Sun 等<sup>[20]</sup>估算了对流层内(850~200 hPa)掩星与探空廓线之间的时间差和距离对温度偏差标准差的影响,分别为  $0.35 \text{ K}/3 \text{ h}$  和  $0.42 \text{ K}/300 \text{ km}$ 。可根据研究的需要选择匹配条件,时间差和距离越大(小),则样本数量越多(少),统计的信度越高(低),偏差的标准差越大(小)。

本研究在选择样本时发现少量资料计算得到的温度偏差过大(几十到上百 K),经核查为资料异常。为减小离群资料带来的不确定性,本文对匹配所得的样本进行了质量控制(Quality Control, QC),将标准化后的温度偏差大于 5 的资料作为离群资料按层次进行剔除。后文中将会检验质量控制对结果的影响。

## 2 结果分析

### 2.1 不同匹配条件对比

表 1 是分别使用距离小于 300、200、100、50 km 和时间差小于 3、2、1 h 多种匹配条件计算的质量控制前后温度偏差总的平均值和标准差。不同的匹配条件下,  $\overline{\Delta T}$  的变化较小, 与匹配条件没有必然联系, 说明因时空差异, 由大气变率引入的偏差平均几乎为零;  $SD_{\Delta T}$  大小受匹配的距离  $d$  和时间差  $\Delta t$  影响,  $d$  和  $\Delta t$  越小则  $SD_{\Delta T}$  越小。质量控制前偏差为 0.12~0.18 K, 质量控制后为 0.12~0.17 K, 变化小于 0.02 K; 受质量控制影响  $SD_{\Delta T}$  都有幅度不等的减小, 约 0.03~0.27 K。质量控制剔除的离群资料中以探空资料温度偏高居多, 在低层数量多于高层, 可能是因为低层标准差小于高层。本文选择了最大时空差不超过 3 h、200 km 作为匹配条件, 质量控制剔除的离群资料约占 0.15%。

图 1 是使用最大时空差 3 h、200 km 匹配条件得到的结果, 图中实线表示  $\overline{\Delta T}$ , 虚线表示  $SD_{\Delta T}$ , 点划线表示样本数量, 标准误差 (Stand Error of Mean) 数值较小没有在图中给出。比较图 1a 和 1b 可见, 质量控制前后温度偏差平均值变化很小, 均方差有所减小。由图 1b 可知, 总体而言探空温度与掩

表 1 不同匹配条件下质量控制前后的温度偏差的平均值和标准差

Table 1 Temperature differences between radiosonde and GPS/RO in different collocation criteria

$d/\text{km}$	$\Delta t/\text{h}$	质量控制前		质量控制后	
		$\overline{\Delta T}/\text{K}$	$SD_{\Delta T}/\text{K}$	$\overline{\Delta T}/\text{K}$	$SD_{\Delta T}/\text{K}$
300	3	0.15	2.14	0.15	2.00
300	2	0.14	2.10	0.13	1.98
300	1	0.12	2.10	0.12	1.97
200	3	0.15	1.89	0.15	1.79
200	2	0.14	1.86	0.14	1.78
200	1	0.12	1.82	0.12	1.76
100	3	0.16	1.84	0.16	1.64
100	2	0.15	1.76	0.15	1.60
100	1	0.12	1.66	0.13	1.56
50	3	0.18	1.80	0.17	1.60
50	2	0.18	1.82	0.16	1.55
50	1	0.15	1.53	0.16	1.50

注:  $\Delta t$  和  $d$  分别表示匹配资料的最大时空差

Note:  $\overline{\Delta T}$  is the mean difference,  $SD_{\Delta T}$  is the standard deviation of temperature difference,  $d$  is the maximum distance mismatch and  $\Delta t$  is the maximum time mismatch between GPS/RO and radiosonde profiles

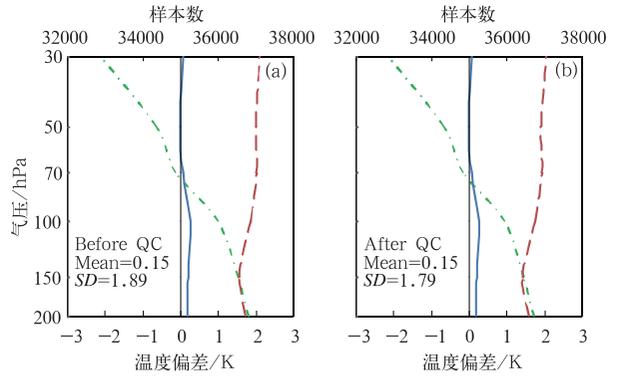


图 1 质量控制前后使用 3 h、200 km 匹配条件计算的探空和掩星温度偏差 (a)质量控制前, (b)质量控制后 (实线和虚线分别表示偏差的平均值和标准差, 点划线表示样本数量)

Fig. 1 Temperature bias between radiosonde and GPS/RO with collocation criteria

$d \leq 200 \text{ km}$  and  $\Delta t \leq 3 \text{ h}$

(a) before QC and (b) after QC

(The solid, the dashed and the dot dash lines indicate mean difference, standard deviation and sample number, respectively. The same symbols are also used for the following plots)

星温度的比较一致, 偏差为 0.15 K, 标准差 1.79 K; 温度偏差随高度变化, 在上对流层 (200~100 hPa; 上对流层, UT) 是正偏差, 下平流层 (70~30 hPa; 下平流层, LS) 偏差相对于上对流层较小, 接近 0 K; 标准差则随高度增加而增加, LS 区域的标准差大于 UT 区域。探空气球因爆炸上升高度不同, 高空缺测较多, 所以样本数量随高度增加而减少。

### 2.2 探空温度与不同掩星任务的温度偏差对比

图 2 是分别使用 CHAMP、GRACE、COSMIC 和 METOP-A 4 个不同掩星任务的资料与探空资料匹配计算的温度偏差。CHAMP 持续时间较长 (2002—2007 年) 资料相对较多; CDAAC 提供的 GRACE 和 METOP-A 资料从 2007 年开始, 相对较少; COSMIC 任务由 6 颗低轨卫星 (Low Earth Orbiting, LEO) 组成, 样本数量最多, GPS/MET 匹配的资料较少, 这里没有进行比较。4 个不同掩星任务得到总的平均值分别为 0.22、0.28、0.30 和 0.12 K, 标准差 1.74~1.94 K。其中 METOP-A 的偏差最大 (0.30 K), 而 COSMIC 资料计算得到偏差在下平流层有负值, 所以得到的总偏差最小

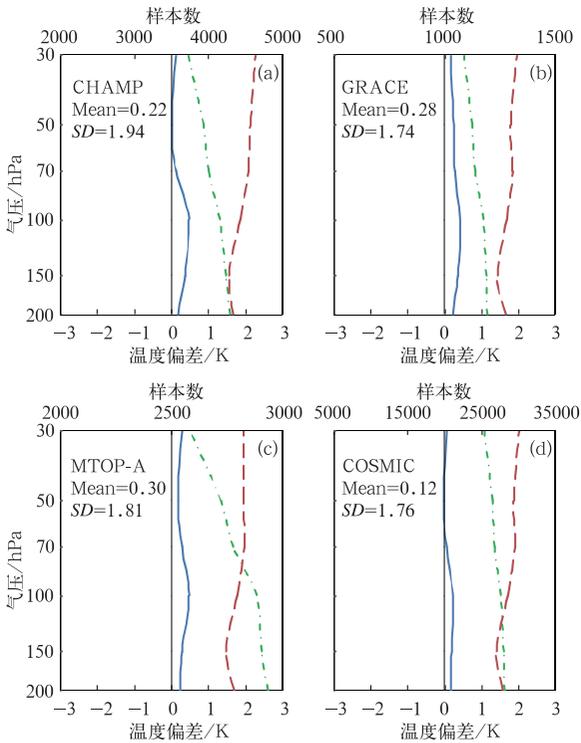


图 2 不同掩星任务的温度偏差对比

(a)CHAMP, (b)GRACE, (c)METOP-A, (d)COSMIC (其余同图 1)

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the comparison of temperature bias between radiosonde and GPS/RO for GPS/RO missions (a) CHAMP, (b) GRACE, (c) METOP-A and (d) COSMIC

(0.12 K)。使用 CHAMP 资料计算的偏差标准差最大(1.94 K),GRACE 最小(1.74 K)。本研究还分别计算了探空资料与 COSMIC 6 颗不同低轨卫星的偏差(图略),结果表明总的  $\overline{\Delta T}$  为 0.09~0.13 K,  $SD_{\Delta T}$  为 1.74~1.79 K,垂直分布特征一致,受卫星平台变更的影响很小。在后文的比较中不区分掩星任务。

2.3 探空仪换型前后对比

从 2002 年开始,中国气象局开始了常规高空探测设备的升级换代,以新型的 L 波段探空仪替代 59 型机械式探空仪。L 波段探空仪使用热敏电阻测温,59 式探空仪使用的是双金属片测温,59 型探空仪相对于前者具有较大的滞后系数和吸收系数。我国气象工作者对 59 型和 L 波段探空仪进行了大量直接和间接的对比评估。陶士伟等<sup>[24]</sup>将两种探空仪的资料分别与模式背景场比较,结果表明 L 波段

的观测误差明显改进。朱兰娟等<sup>[25]</sup>的对比结果表明 L 波段探空系统的资料具有更高的稳定性。马颖等<sup>[26]</sup>使用同站施放的 59 型探空仪和 L 波段探空资料进行比较发现,两种探空资料的温度差在 100 hPa 以上较大,59 型探空仪的观测温度低于 L 波段探空仪的观测资料。李伟等<sup>[27]</sup>的结果表明我国生产的 L 波段探空仪和 VAISALA 公司的 RS92 型探空仪还有一定差距,存在温度滞后误差。

根据中国气象局大气探测中心提供的探空站仪器升级时间,分别计算了 59 型探空仪和 L 波段探空仪观测温度与掩星反演温度的偏差,更换时间不详的站点不参与计算。如图 3 所示,就全国平均而言,对于 59 型探空仪,偏差平均值为 -0.06~0.33 K,标准差为 1.58~2.36 K,整层的平均值和标准差分别为 0.14 和 1.95 K;L 波段探空仪的偏差平均值为 0.01~0.24 K,标准差 1.36~1.90 K,整层的平均值和标准差分别为 0.13 和 1.70 K。两种探空仪与掩星资料的总偏差都较小,但 59 型探空仪的偏差绝对值略大于 L 波段探空资料,L 波段探空仪的偏差标准差较 59 型探空仪减小 0.25 K,说明 L 波段探空仪的使用使得探空资料精度有所提高。

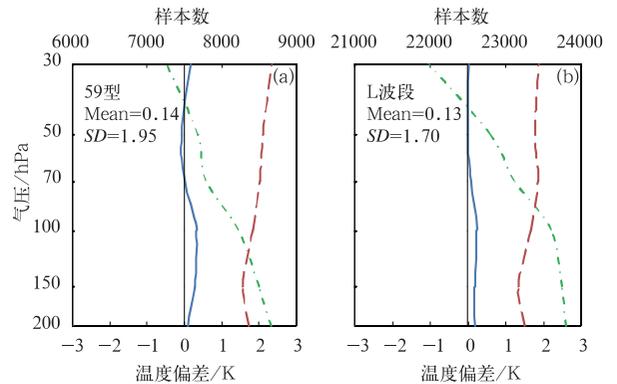


图 3 掩星资料分别与 59 型探空仪、L 波段探空仪偏差

(a)59 型探空仪, (b)L 波段探空仪 (图例说明同图 1)

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for the comparison of temperature bias in the different types of radiosonde (a) type 59 radiosonde, and (b) L band radiosonde

2.4 昼夜偏差对比

辐射误差是探空温度误差的主要来源之一。辐射误差包括太阳短波辐射和红外辐射造成的误差,

探空仪在白天受太阳短波辐射和红外长波辐射影响,夜间主要受长波辐射影响,误差相对白天较小。白天探空仪吸收太阳短波辐射,温度高于周围大气,以太阳高度角  $20^\circ$  为例,在 300 hPa 高度,辐射误差可以达到 0.3~1.0 K,在 100 hPa 高度,辐射误差可以达到 0.8~1.8 K,30 hPa 高度,辐射误差可以达到 1.4~3.3 K。尽管探空站点已经对资料辐射误差进行了订正,但仍然不够充分。为考察太阳辐射对温度偏差的影响,本文将资料分成昼夜分别计算。由于我国东西跨度较大,日出日落时间受地理位置、季节等影响,本文计算了探空资料在 00 时和 12 时的太阳高度角,将太阳高度角大于  $0^\circ$  的资料作为白天的样本、小于  $0^\circ$  的资料作为夜间的样本,分别统计 59 型和 L 波段探空的昼、夜温度偏差。

对于 59 型探空仪,白天(图 4a)整层都是正偏

差(0.04~0.39 K),标准差为 1.73~2.43 K,总的平均值和标准差分别为 0.21 和 2.00 K;在夜间(图 4b),上对流层区域的偏差相对白天减小,下平流层区域由正偏差变为负偏差,各层的平均值和标准差分别为  $-0.13\sim 0.29$  K 和 1.57~2.27 K,总的平均值和标准差分别为 0.08 和 1.90 K,相对于白天分别减小 0.13 和 0.10 K。对于 L 波段探空仪(图 4c 和 4d),白天偏差为 0.11~0.37 K、标准差 1.34~1.88 K,夜间偏差平均值和标准差分别为  $-0.06\sim 0.15$  K 和 1.38~1.92 K,上对流层偏差在白天小于夜间,下平流层偏差由正转负。尽管这里计算的昼夜偏差包含了滞后误差(滞后误差受太阳辐射直接影响较小),59 型及 L 波段探空资料的偏差都在白天大于夜间,说明掩星资料具有足够的精度可以辨别出太阳辐射对我国探空资料的影响。

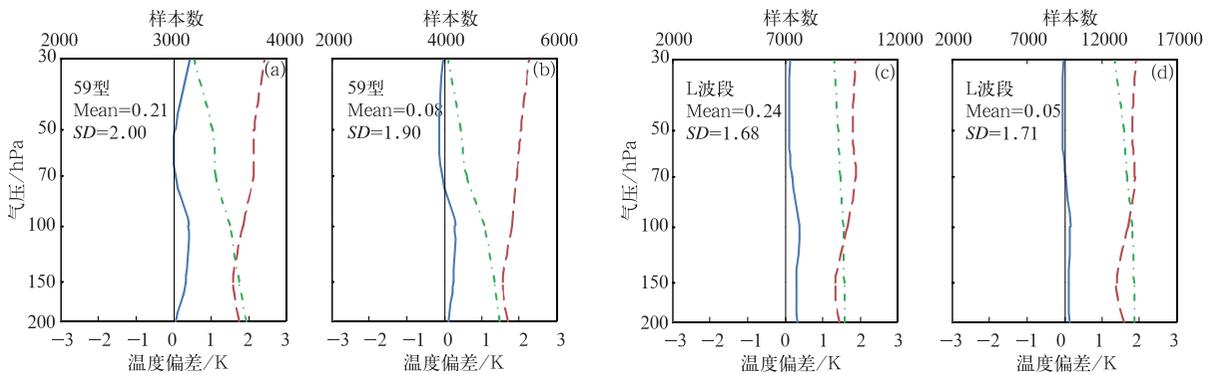


图 4 不同探空仪昼、夜温度与掩星资料温度的偏差对比  
(a) 59 型白天, (b) 59 型夜间, (c) L 波段白天和 (d) L 波段夜间  
(图例说明同图 1)

Fig. 4 Same as Fig. 1, but for temperature bias of (a) type 59 in daytime, (b) type 59 in nighttime, (c) L band in daytime and (d) L band in nighttime

## 2.5 不同纬带对比

探空仪的测温元件响应滞后造成的温度测量偏差是探空温度误差的另一主要来源,滞后误差一般小于 1 K,远小于温度大小本身,因而在观测站点没有进行订正。滞后误差与仪器自身的滞后系数、大气的垂直减温率(Lapse Rate)、通风量和气球的上升速度等有关。滞后误差的大小与垂直减温率的绝对值和上升速度的大小成正比,符号与垂直减温率相反,即在对流层内滞后误差为正,在平流层内为负。大气的垂直减温率与地理位置、季节和天气尺度的影响等有关。

为考察滞后误差的影响,本文将匹配的样本划

分为低纬(小于  $30^\circ\text{N}$ )、中低纬( $30^\circ\sim 40^\circ\text{N}$ )和中高纬(大于  $40^\circ\text{N}$ )三个纬度带,分别计算 59 型和 L 波段探空仪相对于掩星资料的温度偏差,并使用匹配的掩星资料计算不同纬度区域的垂直减温率[单位:  $\text{K}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ ]。为减小太阳辐射误差的影响,在计算中只选择了太阳高度角小于  $0^\circ$  即夜间的资料进行比较。

图 5 是 59 型探空仪在夜间不同纬带的温度偏差,图中点线表示垂直减温率。在低纬带(图 5a),温度偏差的平均值为  $-0.60\sim 0.61$  K,垂直减温率为  $-0.73\sim 0.14\text{ K}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ ;在中低纬(图 5b)温度偏差为  $-0.29\sim 0.43$  K,垂直减温率为  $-0.38\sim 0.21\text{ K}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ ;中高纬(图 5c)的温度偏差

相对较小,温度偏差和垂直减温率分别为 $-0.04 \sim 0.19 \text{ K}$ 和 $-0.14 \sim 0.10 \text{ K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。比较这三个纬带可知,随着纬度升高,上对流层的温度偏差逐渐减小,下平流层的偏差由负逐渐变为正值,偏差的绝对值随纬度增加而减小。垂直减温率随纬带的变化与偏差变化大致相同,即绝对值随纬度增加而减小。图 5a 和 5b 中温度偏差与垂直减温率符号相反,两者大小大致成正比关系,而中高纬地区(图 5c)垂直减温率比较小 $[-0.14 \sim 0.11 \text{ K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}]$ ,对应的偏差也较小,只在 70 hPa 以下偏差与垂直减温率符号相反,二者关系没有低纬明显。夜间 59 型探空温度与掩星温度间偏差在纬度较低的区域与垂直减温率的关系及其随纬度变化的规律说明,这一偏差在一定程度上反映了 59 型探空仪的

滞后误差。纬度较低的区域垂直减温率大,相应的滞后误差大,所以图 5a 和 5b 中二者关系较为明显;而高纬地区的减温率数值较小滞后误差不明显,所以计算所得的温度偏差与垂直减温率的关系不如低纬区域明显。

与 59 型探空仪结果相比,L 波段探空仪的偏差和标准差相对较小。在 200~100 hPa,L 波段探空资料与掩星温度之间的偏差都是正偏差(0.05~0.18 K),与垂直减温率符号相反;下平流层区域,低纬地区的平均偏差(图 6a)可达 $-0.4 \text{ K}$ ,随纬度增加,偏差由负转正且幅度变小,与 59 型探空仪的变化规律相同。比较图 5、图 6 可以发现,在纬度较低的区域(图 5a 和 5b,图 6a 和 6b),L 波段探空资料的滞后误差相对较小,偏差平均值和标准差相对

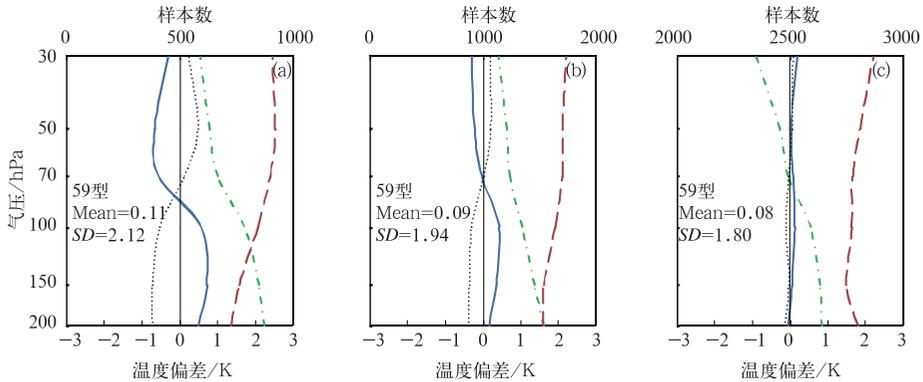


图 5 在不同纬度带 59 型探空仪与掩星资料的温度偏差

(a)  $30^\circ\text{N}$  以南, (b)  $30^\circ \sim 40^\circ\text{N}$ , (c)  $40^\circ\text{N}$  以北

(点线表示垂直减温率(单位:  $\text{K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ), 其余同图 1)

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for type 59 radiosonde in different latitudes

(a) within  $30^\circ\text{N}$ , (b)  $30^\circ - 40^\circ\text{N}$ , and (c) beyond  $40^\circ\text{N}$

(The dotted line means the mean temperature decreasing rate (unit:  $\text{K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ) based on GPS/RO dry retrievals)

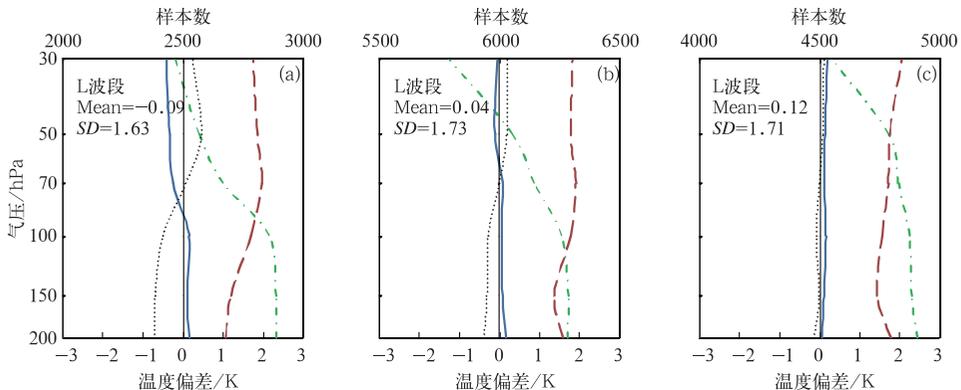


图 6 在不同纬度带 L 波段探空仪相对于掩星资料的温度偏差

(a)  $30^\circ\text{N}$  以南, (b)  $30 \sim 40^\circ\text{N}$ , (c)  $40^\circ\text{N}$  以北

(图例同图 5)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the L band radiosonde

59 型改进都比较明显, L 波段探空资料具有更高的精度;而在较高纬度区域(图 5c、图 6c), 两种探空仪的资料偏差比较接近, 差异主要体现在标准差上。以上说明探空仪的升级改进了探空资料的精度, 但在不同区域改进效果不同。

由于减温率是使用等压面上下层温度差除以高度差计算得到, 方法粗糙, 而滞后误差还与探空仪上升速度、仪器的滞后系数有关, 且没有考虑长波辐射的影响, 所以图 5 和 6 中的偏差并不完全代表探空资料的滞后误差, 但在一定程度上反映出了滞后误差的变化特征。此外, 因探空温度偏差在不同纬度具有不同的特征, 特别是下平流层, 低纬为负, 高纬为正, 而图 3 和 4 的计算中没有区分纬带, 高纬与低纬地区偏差正负抵消, 使得 59 型与 L 波段探空资料的偏差比较接近。

### 3 结论与讨论

本文使用 1995—2010 年 GPS 掩星干反演大气温度, 与临近的探空资料匹配, 分析上对流层和下平流区域探空和掩星温度之间的偏差, 得出以下结论:

(1) 不同匹配条件下计算的温度偏差结果一致, 匹配条件主要影响偏差的标准差;使用时空差小于 3 h、200 km 作为匹配条件计算, 就全国平均而言, 总的偏差为 0.15 K, 温度偏差在上对流层大于下平流层, 偏差的标准差随高度增加而增大。不同掩星任务计算的温度偏差较为一致, 说明掩星观测受卫星平台变更影响较小。

(2) 以太阳高度角大于  $0^\circ$  作为白天、小于  $0^\circ$  作为夜间分别计算昼、夜的温度偏差, 在下平流层, 白天为正偏差, 夜间为负偏差, 在上对流层昼夜都是正偏差但白天大于夜间;夜间标准差始终小于白天。昼夜的偏差对比说明掩星资料可以识别出太阳辐射对我国探空温度资料的影响。

(3) 计算夜间不同纬度的温度偏差表明, 偏差随纬度变化具有明显的地域特征。在下平流层, 偏差在低纬为负、高纬为正, 上对流层自南向北都是正偏差, 低纬地区偏差绝对值大于高纬地区。偏差随纬度的变化与大气垂直减温率随纬度变化具有较好的对应关系, 二者符号相反、大小成正比, 一定程度上反映了探空资料的滞后误差, 说明掩星资料可以识别出仪器反应滞后对探空资料的影响。在中高纬地区温度偏差与减温率关系没有低纬地区明显, 可

能是由于这一区域垂直减温率较小, 使得滞后误差较小。

(4) 比较我国探空仪换型前后的温度偏差, L 波段探空仪的偏差标准差小于 59 型探空仪。总体而言两者的偏差平均值相差较小, 但在不同纬度表现不同。在低纬度区域, 59 型探空仪因滞后误差使得偏差较大, L 波段滞后误差较小因而偏差也比较小, 两者对比明显;高纬度地区两者偏差都相对较小。结果说明探空仪升级后探空资料精度得到提高, 误差的改进在低纬地区更明显。

本文使用的比较方法存在一定不足, 会因探空资料与掩星资料的代表性不同、等压面对应的地理高度有差异、选择的样本存在时空差等引入一定的偏差, 但是通过比较探空温度和掩星温度揭示出了探空资料因仪器响应滞后、太阳辐射和仪器换型引起系统偏差, 说明掩星资料可以为我国探空资料的误差订正提供一定的依据。在对探空温度校准时, 应当考虑到上述原因引起的探空误差随仪器型号、高度、时间、地理位置的变化特点。未来, 随着掩星资料的积累, 可以选择更严谨的匹配条件进行更加全面、准确的评估, 为探空资料的误差订正提供参考。

**致谢:**感谢佛罗里达州立大学邹晓蕾教授给予的指导、建议, 感谢中国气象局大气探测中心的李伟博士提供的探空元数据及 CDAAC 提供的掩星资料。

### 参考文献

- [1] Durre I, Reale T, Carlson D, et al. Improving the usefulness of operational radiosonde data[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(3): 411-416.
- [2] Thorne P W. Revisiting radiosonde upper air temperatures from 1958 to 2002 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D18): 1-17.
- [3] Thompson D W J, Solomon S. Understanding recent stratospheric climate change[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(8): 1934-1943.
- [4] Luers J. Use of radiosonde temperature data in climate studies [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(5): 1002-1019.
- [5] Ware R, Rocken C, Solheim F, et al. GPS Sounding of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary results[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(1): 19-40.
- [6] Wickert J, Reigber C, Beyerle G, et al. Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(17): 3263-3266.
- [7] Hajj G A. CHAMP and SAC-C atmospheric occultation re-

- sults and intercomparisons[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D6): 1-45.
- [8] Anthes R A, Ector D, Hunt D C, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 313-333.
- [9] Montenbruck O, Andres Y, Bock H, et al. Tracking and orbit determination performance of the GRAS instrument on MetOp-A[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(4): 289-299.
- [10] Rocken C, Anthes R, Exner M, et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D25): 29849-29866.
- [11] Anthes R, Rocken C. Applications of COSMIC to meteorology and climate[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2000, 11(1): 115-156.
- [12] Kuo Y-H, Wee T-K, Sokolovskiy S, et al. Inversion and error estimation of GPS radio occultation data[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(1B): 507-531.
- [13] Foelsche U, Kirchengast G, Borsche M. Creating a consistent radio occultation data base for climate studies in the upper troposphere and lower stratosphere[C]. *Proc of the ECMWF*, 2008: 151-165.
- [14] Foelsche U, Pirscher B, Borsche M, et al. Assessing the climate monitoring utility of radio occultation data: From CHAMP to FORMOSAT-3/COSMIC[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2009, 20(1): 155.
- [15] 赵德显, 郁红弟, 沈桐立. GPS 折射率资料在梅雨锋暴雨数值模拟中的应用[J]. *气象*, 2011, 37(12): 1511-1518.
- [16] Ho S-Peng, Goldberg M, Kuo Y-Hwa, et al. Calibration of temperature in the lower stratosphere from microwave measurements using COSMIC radio occultation data: Preliminary results[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2009, 20(1): 87.
- [17] Kuo Y-H. Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(5): 3-6.
- [18] He W, Ho S-Peng, Chen H, et al. Assessment of radiosonde temperature measurements in the upper troposphere and lower stratosphere using COSMIC radio occultation data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): 1-7.
- [19] 胡雄, 张训械, 张冬娅, 等. 大气 GPS 掩星观测反演方法[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 768-774.
- [20] Sun B, Reale A, Seidel D J, et al. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D23): 1-16.
- [21] Wickert J. Comparison of vertical refractivity and temperature profiles from CHAMP with radiosonde measurements[R]. *Scientific Technical Report*, 2004, Potsdam.
- [22] 王洪, 曹云昌, 肖稳安. COSMIC 掩星数据与 L 波段探空数据的对比分析[J]. *气象*, 2010, 36(9): 14-20.
- [23] 徐晓华, 罗佳. GPS 掩星与探空观测统计比较中配对标准的比较研究[J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2009, 863(11): 2007-2010.
- [24] 陶士伟, 陈晓红, 龚建东. L 波段探空仪温度资料误差分析[J]. *气象*, 2006, 32(10): 46-51.
- [25] 朱兰娟, 华行祥. 杭州 L 波段和 59-701 高空探测系统资料对比分析[J]. *气象科技*, 2007, 35(5): 750-754.
- [26] 马颖, 姚雯, 黄炳勋. 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*, 2010, 21(2): 214-220.
- [27] 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[J]. *气象*, 2009, 35(10): 97-102.