

何文英,陈洪滨. COSMIC 数据验证 AMSU 平流层低层观测的初步分析结果. 地球物理学报, 2009, **52**(12):2951~2957, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.12.003

He W Y, Chen H B. Validation of AMSU measurements in lower stratosphere using COSMIC radio occultation data: preliminary results. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(12):2951~2957, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.12.003

COSMIC 数据验证 AMSU 平流层低层 观测的初步分析结果

何文英,陈洪滨

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室,北京 100029

摘 要 基于 Global Positioning System (GPS)掩星数据在平流层具有较高准确性、稳定性的优势,本文尝试用新一代 GPS 掩星观测——the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC) 资料验证不同卫星平台上先进的微波探测仪 (AMSU) 的平流层观测结果. 通过 COSMIC 大气温度廓线与 AMSU 辐射传输模式结合,得到模拟亮温,然后与 AMSU 平流层观测进行匹配比较. 分析表明 GPS 掩星数据能够作为一个相对独立的参量检验 NOAA15、16、18 卫星平台内部的偏差. 通过一年数据的比较验证,初步显示不同卫星平台的 AMSU 观测亮温在平流层低层都偏低,并且 NOAA18 平台的亮温偏低程度明显大于 NOAA15、16. AMSU 亮温偏差在极地冬季较为显著,尤其南极地区 NOAA18 的偏差幅度达到 1.8 K. 结合 24 小时内 AMSU 观测亮温偏差变化及其样本分布特征,可以看到明显的太阳辐射差异可能是导致 AMSU 观测亮温在极地偏差显著的主要原因.

关键词 GPS,掩星, COSMIC, AMSU, 亮温,卫星平台

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.12.003

中图分类号 P407

收稿日期 2009-02-09,2009-10-09 收修定稿

Validation of AMSU measurements in lower stratosphere using COSMIC radio occultation data: preliminary results

HE Wen-Ying, CHEN Hong-Bin

LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Global Positioning System (GPS) Radio Occultation (RO) data from the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC) mission is used to validate the measurements of advance microwave sound unit (AMSU) on different NOAA satellite platforms due to high accuracy and stability of RO data in lower stratosphere. The atmospheric temperature profiles derived from COSMIC RO data are combined with the AMSU radiative transfer model to simulate the microwave brightness temperatures (T_b). The comparison of the matched simulated and observed T_b of AMSU in lower stratosphere show that RO data can be used as an independent reference to valid the measurement of AMSU on different NOAA platforms. The preliminary validating results from one year's T_b comparisons show that all the measurement of AMSU on three NOAA satellites in lower stratosphere are underestimated, and the T_b bias on NOAA18 is more significant than those on NOAA15, 16.

基金项目 国家自然科学基金项目(40605011)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-206-4)共同资助。

作者简介 何文英,女,1973年生,2005年博士毕业于中国科学院大气物理研究所,从事微波遥感和中高层大气物理研究。

E-mail: hwy@mail.iap.ac.cn

The bias of AMSU measurements in lower stratosphere is more significant in polar region during the winter time, especially in south pole region the variation range of Tb bias on NOAA18 about 1.8 K. Combining with the variation of Tb bias and the samples' distribution within 24 hours, it implies that the significant solar radiation difference might be the main cause for large Tb bias in polar region.

Keywords GPS, Radio occultation, COSMIC, AMSU, Microwave brightness temperature, Satellite platform

1 引言

准确、稳定的大气温度垂直观测对于研究全球气候变化非常重要,其中平流层温度是研究平流层大气结构特征和气候变化的一个重要方面^[1~3]. 一直以来,探空观测是提供全球大气温度的主要方式. 但是,探空设备、数据处理方法的调整更换,致使常年观测的探空数据一致性较为有限;同时,由于探空有限的监测范围和探空数据随高度质量下降,仅靠探空提供的大气温度数据难以达到建立高质量气候数据库标准的要求^[4,5].

近二十几年来,随着卫星气象学的迅速发展,国内外学者开始广泛使用能够覆盖全球观测的卫星资料来研究气候变化. 搭载在美国 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 发射的系列极轨卫星平台上的微波探测仪器 (MSU) 和先进的微波探测仪 (AMSU) 分别从 1979 年和 1998 年起一直提供全球大气温度垂直廓线,成为气候研究的重要数据^[6]. 在过去的几十年里,大约有 30 年的 MSU/AMSU 资料一直广泛用于全球温度趋势的研究^[7~9]. 阿拉巴马大学 (UAH) 的 Christy 等^[10] 曾经用 23 年的 MSU/AMSU 数据分析对流层和平流层温度的气候变化特征,得到全球温度气候增长速度为 $0.009 \text{ K/decade}^{-1}$. 遥感系统 (RSS) 的 Mears 等^[11] 也做了类似的分析,并且与 Christy 结果进行比较,发现洋面两者得到的全球温度的气候变化呈相反趋势,陆面两者的气候变化趋势一致,全球温度的气候变化趋势 ($0.097 \pm 0.020 \text{ K/decade}^{-1}$) 比 Christy 显著增加. 对于同样的 MSU/AMSU 卫星观测资料,分析的全球温度变化趋势却有着显著差异,这主要与研究采用不同经验或者物理方法订正观测结果有关. 通常,NOAA 卫星平台和探测设备的改变、轨道漂移和衰减、MSU/AMSU 业务标定系数的变化都会对观测的微波亮温产生影响. 由于缺少可信的参考背景,MSU/AMSU 数据中存

在的误差因素难以准确地剔除,因此很难评价这些研究者得到的温度趋势. 这也一直成为近年来采用 MSU/AMSU 资料分析温度气候性变化中一个备受争议的问题^[12].

GPS 掩星技术是采用临边探测原理,通过电磁波穿越大气产生的信号时间延迟信息,获取大气折射率廓线,然后反演得到大气温度廓线^[13~15]. 与 AMSU 探测原理不同,GPS 掩星数据不存在平台、仪器更换和轨道偏移产生的误差. 此外,GPS 掩星数据具有很高的垂直分辨率 ($0.1 \sim 1 \text{ km}$),能够全天候进行观测,不受云雨大气的影响. Hajj 等^[16] 通过比较 Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) 和 Satellite de Aplicaciones Científicas-C (SAC-C) 掩星数据,显示了 GPS 掩星数据在 $10 \sim 20 \text{ km}$ 的精度是 0.1 K . Kuo 等^[17] 的研究表明 GPS 掩星数据最为准确的范围是 $5 \sim 25 \text{ km}$. 宫晓艳等^[18] 通过分析 GPS 掩星技术反演大气参数的误差特性表明,反演的大气温度误差在 30 km 以下较小,而 30 km 以上,由于受电离层影响误差明显. Ho 等^[19] 用 4 年的 CHAMP 掩星数据与 RSS 和 UAH 研究中心采用的 MSU 资料比较,展示了气候研究中 GPS 掩星数据能够作为独立的数据比较、检验其他卫星观测数据质量的作用. 更多的研究^[20,21] 表明,较高稳定性和精确性的 GPS 掩星数据为气候研究提供一个可靠的参考背景,也成为气候研究领域一个关注的发展方向.

新一代的掩星任务——the FORMOSAT-3/COSMIC 于 2006 年 4 月发射成功,这是 GPS 掩星观测历史一个重大的突破^[22]. 与以往掩星任务不同,COSMIC 同时有 6 颗低轨卫星接收器,因此每天能获取全球 2500 条廓线,这比以往任何 GPS 掩星任务获取的数据量高出一个量级. GPS 掩星的优越性和大量的 COSMIC 掩星数据为进一步深入研究大气温度垂直结构和验证相关的大气温度数据提供了有利的条件.

因此,本文利用新的 GPS 掩星观测——COSMIC 数据检验,NOAA 不同卫星平台的 AMSU 观测质

量. 为了和卫星观测结果比较, 将 COSMIC 提供的大气温度廓线与微波辐射传输模式结合, 得到模拟的 AMSU 亮温. 通过亮温比较, 分析了 GPS 掩星数据用于检验和订正不同卫星平台上 AMSU 观测结果的可行性和必要性. 同时, 两种不同探测原理数据的比较, 初步显示了 GPS 掩星数据和 AMSU 资料共同结合而构建长期稳定、准确的大气温度数据库的潜在优势.

2 数据与方法

本文使用的 COSMIC 温度廓线是从 University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) 数据资料分析和存档中心 (CDAAC) (<http://cosmic.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>) 获取. 公式 (1) 描述了大气折射率与大气压强 (hPa)、水汽压 (hPa) 和温度 (K) 的关系. Kuo 等^[17] 详细介绍了 CDAAC 如何通过掩星观测得到大气折射率以及反演大气温度的过程.

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

忽略公式 (1) 中水汽项的影响, 通过大气折射率反演的是“干空气”温度, 这个温度在水汽很少的对流层顶以上和真实大气温度非常接近^[23]. COSMIC 工作组曾经分析了掩星数据反演的干空气温度精度和稳定性. 结果表明, 从地面到 30 km 范围内的温度误差平均值 < 0.05 K, 并且 3~25 km 的温度误差均值 < 0.02 K. 通过比较 COSMIC 和 CHAMP 反演的干空气温度廓线, 两者在 500~10 hPa 之间的温度误差均值为 -0.021 K. 因此, 具有较高精度和稳定性优势的 COSMIC 干空气温度廓线成为本文使用的数据.

为了和卫星观测结果比较, 我们将 COSMIC 干空气温度廓线输入到 AMSU 快速辐射传输模式, 得到模拟亮温. 详细的模式辐射验证分析可以参考 Woolf 等的工作^[24]. 本文只关注表征平流层低层大气温度的 AMSU 通道 9 的观测结果. 该通道亮温的权重函数峰值位置在 18 km 左右, 主要的大气贡献位于 10~25 km. 该高度范围内没有对流层中复杂的水汽以及云水粒子存在, 微波辐射传输过程相对比较简单, 大气辐射的主要影响因子是大气温度. 如上所述, 该高度范围内的 GPS 掩星数据反演的大气温度具有很高的准确性, 为获取更为真实的模拟亮温提供有利保障.

原始的 AMSU 数据以及标定系数从 NESDIS 下载, 然后通过数据中心提供的程序将原始的 AMSU 数据转换成对应的微波亮温形式. 我们下载了 NOAA15、16 和 18 三个平台上的 AMSU 数据. 然后按照时间间隔 30 min 和空间 50 km 匹配三个卫星平台上 AMSU 的通道 9 (Ch9) 亮温. 为了选取更为准确的卫星观测, 我们只选用卫星扫描角 15° 范围内的 AMSU 像素.

除了卫星平台之间的匹配, 我们以同样的时空匹配原则 (30 min/50 km) 将不同平台的 AMSU-Ch9 观测亮温与 COSMIC 模拟亮温进行匹配. 为了避免时空匹配引入的误差, 我们采用该时空范围内 AMSU 观测亮温的平均值与模拟亮温匹配, 并且选用的是卫星扫描角 15° 范围内的 AMSU 像素. 这样匹配样本受到影响是随机的, 不易产生显著的系统匹配偏差.

通过比较模拟的微波亮温 (记为 T_{bcosmic}) 与 NOAA15、16 和 18 平台的 AMSU-Ch9 亮温 (分别记为 T_{bamsu_N15} 、 T_{bamsu_N16} 和 T_{bamsu_N18}), 分析 COSMIC 资料检验 AMSU 观测结果的可行性以及识别不同平台 AMSU 在平流层观测结果的偏差变化特征.

3 结果和讨论

首先, 我们比较 2007 年 7 月不同 NOAA 平台的 AMSU-A 观测亮温和对应 COSMIC 模拟亮温的关系 (图 1). 总的看来, 对于三个不同的卫星平台, 模拟与观测的亮温都具有非常好的一致性, 相关系数均达到 0.99 以上, 标准偏差均小于 0.9 K. 对于不同平台、不同数目的匹配样本, 如此高的接近程度也初步展示 COSMIC 数据能够作为检验或内部标定不同卫星平台 AMSU 通道 9 观测结果的一个理想参量. 为了量化亮温随地理位置的改变, 我们将亮温分布分成三个纬度带: $60^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{S}$ (黑色)、 $60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$ (绿色) 和 $60^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{N}$ (红色). 可以看出, 较高亮温一般都分布在北极地区, 低亮温都分布在南极地区. 这主要是该时间阶段是北半球夏季、南半球冬季. 在寒冷的南极地区, NOAA16、NOAA18 的观测亮温随着温度降低出现偏低于模拟亮温的趋势, 尤其后者更为显著.

为了进一步了解亮温差异随纬度带变化, 表 1 给出三个平台的观测亮温和模拟亮温在两个极地地区的偏差. 可以看出无论南极还是北极, NOAA15、16、18 的 AMSU 观测亮温都偏低于模拟结果, 并且

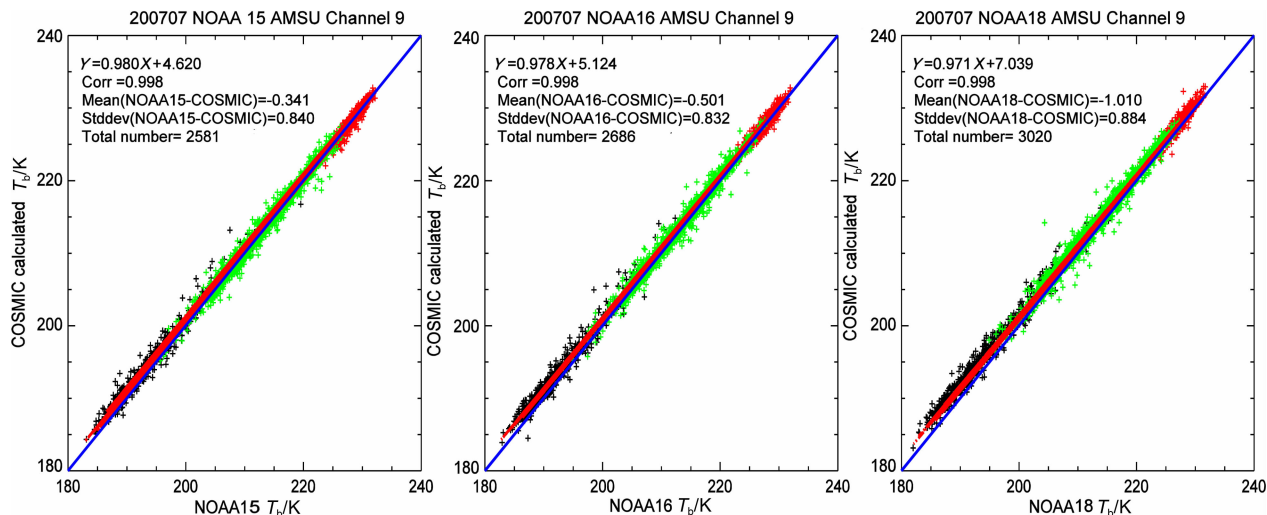


图1 NOAA不同平台上 AMSU 通道 9 观测亮温与匹配的 COSMIC 模拟亮温比较

Fig. 1 The scattering plots of COSMIC simulated T_b with the observed T_b of AMSU Channel 9 on different NOAA platforms

表 1 极地地区 COSMIC 模拟的亮温与不同平台观测亮温以及平台之间观测亮温的差值比较(单位:K)

Table 1 The difference of COSMIC simulated T_b and AMSU observed T_b on different satellite platforms as well as the difference of AMSU T_b among different NOAA satellites in polar region (unit: K)

	60°N~90°N	60°S~90°S
N15-COSMIC	-0.13	-0.72
N16-COSMIC	-0.26	-0.83
N18-COSMIC	-0.72	-1.54
N15-N16	0.11	0.17
N16-N18	0.42	0.59
N15-N18	0.48	0.73

南极地区的偏差明显大于北极地区. 对于不同的卫星平台, NOAA15、16 的结果与模拟亮温差异程度较为接近, 而 NOAA18 的偏差程度明显高于前两个平台的结果.

通过观测与模拟亮温差异反映的不同平台之间观测亮温的差异程度是否与观测结果一致? 为此我们也利用不同平台之间观测亮温匹配数据比较 NOAA15、16、18 平台上 AMSU 通道 9 微波亮温差异程度. 从表 1 数据显示出 NOAA15、16 之间的差异最小, 小于 0.2 K, 而它们和 NOAA18 之间的差异程度显著增加, 尤其在南极地区, 差异最为明显, 高达 0.73 K. 同时, 南极地区的不同平台差异程度都大于北极地区. 这种平台之间差异趋势与用 COSMIC 模拟亮温比对所反映的趋势是一致的. 同时, 不同平台观测亮温之间的差异也能通过 COSMIC 模拟和观测亮温之间关系再现出来, 如北极地区的

NOAA16、18 观测亮温的差异(0.48 K)能通过对应的 N16-COSMIC(-0.26 K)减去 N18-COSMIC(-1.01 K)得到. 当然, 在有些情况下, 通过模拟亮温计算的平台亮温差异与观测结果偏差较大, 如北极地区用 N15-COSMIC(-0.13 K)减去 N18-COSMIC(-1.01 K)得到的 N15-N18 的偏差为 0.59 K, 与实际的 NOAA15-18 亮温差异 0.48 K 有着 0.11 K 的差距, 这主要是不同平台观测亮温匹配的样本与用模拟亮温匹配观测亮温获得的样本不一样引起的. 总的看来, 通过 COSMIC 模拟亮温与观测结果比较反推的不同平台之间 AMSU 亮温的偏差趋势和差异程度都与观测结果非常接近, 这表明 COSMIC 数据可以作为一个独立的参考标准, 用来验证和分析不同 NOAA 平台的 AMSU 在平流层观测结果的相对和绝对偏差程度.

接下来, 我们比较分析 2006 年 8 月至 2007 年 7 月, NOAA 不同卫星平台上 AMSU 通道 9 观测亮温与对应匹配的 COSMIC 模拟亮温的差异变化特征. 图 2 显示了三个卫星平台上观测亮温与模拟亮温偏差的月平均分布图, 我们依旧关注差异较为明显的极地地区. 总的看来, 整个一年中, 观测亮温都低于模拟亮温, 并且极地冬季偏低的幅度最大, 夏季最小. NOAA15 与 NOAA16 的观测与模拟亮温偏差程度都很接近, 而 NOAA18 平台上亮温差异幅度明显大于前两者. 无论南极还是北极地区, 三个平台上观测亮温与模拟亮温的变化趋势都比较一致, 即极地冬季差异显著, 夏季差异最小. 相比较而言, 北极地区亮温差异随季节变化幅度较小, NOAA15、

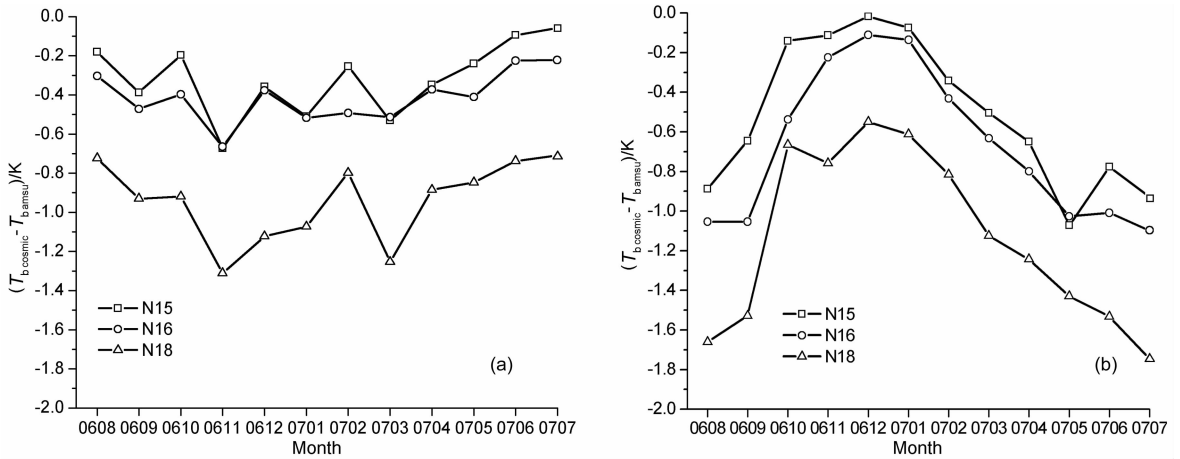


图 2 不同平台观测与模拟亮温的差值月平均变化(时间:2006 年 8 月~2007 年 7 月)
(a) 北极(60°N~90°N); (b) 南极(60°S~90°S).

Fig. 2 The variation of monthly averaged difference between the simulated and observed T_b on different platforms from August, 2006 to July, 2007
(a) North pole (60°N~90°N); (b) South pole (60°S~90°S).

16 平台的亮温差异变化幅度小于 0.6 K, NOAA18 的变化幅度在 0.8~1.4 K. 南极地区亮温差异随季节变化幅度剧烈, 如 NOAA15, 16 平台上亮温差异程度从夏季较小的 0.1 K 增加到冬季的 1 K, NOAA18 平台的亮温差异由夏季的 0.6 K 增加到冬季的 1.8 K.

除了通道 9, 我们也采用类似方法比较 2007 年 7 月 AMSU 通道 8 观测结果与对应 COSMIC 模拟亮温. 通道 8 主要响应 5~25 km 的大气贡献, 其权重函数峰值约在 13 km. 由于低层 500 hPa 左右的大气对通道 8 贡献相对较小, 因此 COSMIC 干空气温度廓线在低层对模拟亮温产生的不确定性也较小. 通道 8 的模拟和观测亮温的散点图(图略)与图 1 非常类似, 即其 COSMIC 模拟亮温和观测结果在不同平台都非常接近, 也达到 0.99 以上的相关系

数, 对应的标准偏差略微增加为 1.1 K, 这估计是受到较低层大气的影响. 此外, 不同平台的通道 8 观测与模拟亮温在极地地区的偏差变化特征也与通道 9 的结果类似, 即所有平台的观测亮温都偏低于模拟结果, 并且这种偏低趋势在南极地区更为显著.

为了进一步了解亮温差异, 我们用 2007 年 7 月资料分析了一天 24 小时内通道 9 的观测和模拟亮温差异分布. 图 3a 显示出白天的亮温差异较小, 而晚上亮温差异显著增加. 结合对应的 24 小时内匹配的亮温样本的纬度分布(图 3b), 可以看到白天的样本主要分布在北极地区, 这时是北极夏季极昼时段, 对应的 NOAA15, 16 平台的亮温差异几乎接近零, 甚至出现正偏差; 而到了晚上, 样本主要分布在南极地区, 这时是南极冬天极夜时段, 可以看到不同平台

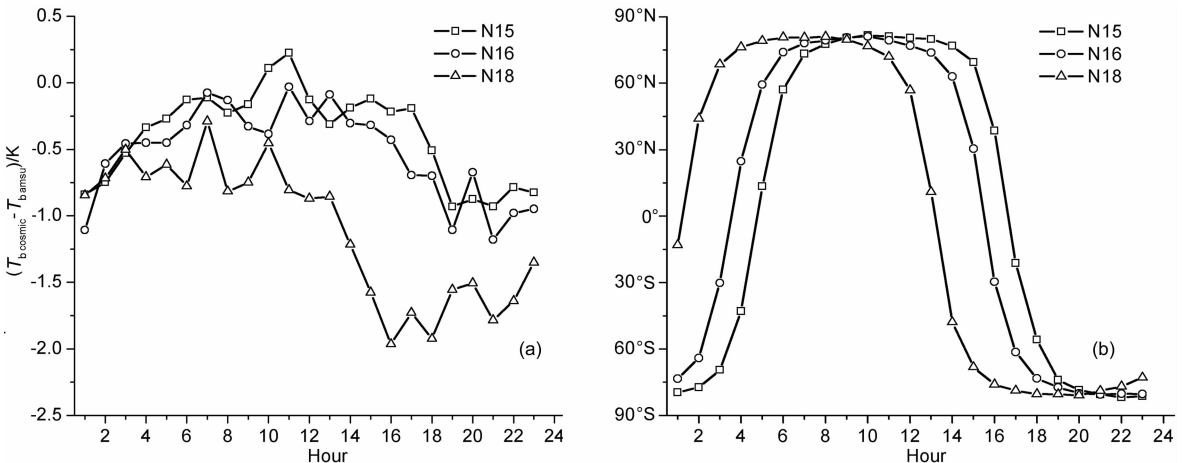


图 3 (a) 不同平台观测与模拟结果差异在 24 小时内分布和 (b) 模拟与观测匹配样本在 24 小时内随纬度的分布
Fig. 3 The distribution within 24 h of (a) the difference of the simulated and observed T_b on different satellite platforms and (b) the samples of matching pairs along the latitude

的亮温差异都是显著的负偏差,尤其 NOAA18 最为明显.

由于 COSMIC 掩星数据没有仪器和轨道变化引入的误差,并且 COSMIC 资料质量也不受地理位置和天气条件改变影响. 以前研究以及本文的分析也表明,平流层的 COSMIC 数据具有很高准确性和稳定性,可以作为一个相对独立的参量用于验证容易受卫星轨道、传感器等影响的卫星观测数据. 因此,本文比较中不同平台上 AMSU 平流层低层的观测结果出现不同程度的偏差应该是卫星平台以及 AMSU 亮温标定等因素产生. 偏差的基本趋势是不同平台的 AMSU 平流层观测亮温都普遍偏低,尤其 NOAA18 平台最为显著;并且,观测结果在南极冬季偏低的最为明显. 对于极地 AMSU 观测结果一天内不同的偏差变化趋势,最为直接的可能是,极昼和极夜情况下,太阳辐射差异显著,会影响到 AMSU 观测设备,尤其是天线性能,致使获得的观测亮温出现明显差异.

由于 AMSU 卫星数据受卫星平台变换、轨道和传感器标定系数随时间衰变等因素的多重影响,上述比较中发现的 AMSU 平流层观测结果在不同平台、不同区域和时间存在不同偏差的具体原因目前难以全面、详细地剖析出来,这需要对观测设备硬件和数据处理软件方面做大量研究. 不过,通过引入一种不同观测方式——GPS 临边探测技术获取的 COSMIC 掩星数据,本文工作不仅展示了 COSMIC 数据检验不同卫星平台观测结果的可行性,而且还利用掩星数据的优势识别了 AMSU 平流层观测结果的偏差程度. 这将有利于开展 AMSU 平流层观测结果的修订工作,重新构建高质量的 AMSU 数据库,为正确分析全球气候变化提供有利保障. 目前, COSMIC 数据中心正在开展这样一个对 AMSU 数据长时间序列的订正工作,本文工作是该计划前期研究的一部分. 我们将在今后继续与 COSMIC 中心合作,通过更长时间尺度的数据分析 AMSU 观测结果的质量及其订正研究.

4 结 论

基于 GPS 临边探测技术在平流层观测的优势,本文用新一代 GPS 掩星数据——COSMIC 资料验证不同卫星平台上 AMSU 的平流层观测结果. 通过 COSMIC 大气温度廓线与辐射传输模式结合,得到模拟亮温,并与匹配的 AMSU 平流层观测结果进行

比较.

对于三个 NOAA 卫星平台, COSMIC 模拟亮温和其 AMSU 观测亮温都非常接近,两者具有非常好的一致性,相关系数均达到 0.99 以上. 通过不同平台的 AMSU 观测结果与匹配的 COSMIC 模拟亮温比较,能够反推出与观测结果一致的不同平台之间的偏差程度. 这表明 COSMIC 模拟亮温可以作为相对独立的参考标准,用以验证 NOAA 不同卫星平台上 AMSU 观测亮温相对和绝对偏差程度.

通过一年数据的比较验证,初步显示 NOAA 不同卫星平台的 AMSU 观测亮温在平流层低层都偏低,并且 NOAA18 平台的亮温偏低程度明显大于 NOAA15、16,而后两者无论变化趋势还是范围都很接近. AMSU 亮温偏差趋势是极地冬季偏差显著,夏季较小. 相比较而言,北极地区不同平台的 AMSU 观测亮温偏差随时间变化幅度较小,较为稳定;而南极地区,不同平台的观测亮温的偏差随着季节明显变化,尤其在冬季, NOAA18 的观测结果达到 1.8 K 的偏差. 结合 24 小时内 AMSU 观测亮温偏差变化及其样本分布特征,可以看到明显的太阳辐射差异可能是导致 AMSU 观测亮温偏差的主要原因.

本文通过一年的 COSMIC 数据得到上述初步验证结果,对于 AMSU 平流层观测结果随时空的偏差变化特征,我们还需要用更长时间的数据分析加以论证;并且对于冬季南极地区模拟和观测亮温差异显著的原因,需要结合其他观测数据做更多分析.

致 谢 本工作中的资料获取和处理以及部分资料分析是在美国 UCAR/COSMIC 工作组完成的,感谢 CDAAC 的 Doug、Karl 的帮助,感谢 Shu-Peng Ho, Bill Guo 的访问邀请.

参考文献(References)

- [1] Tett S, Mitchell J, Parker D, et al. Human influences on the atmospheric vertical temperature structure: detection and observations. *Science*, 1996, **274**:1170~1173
- [2] Shine K P, Bourqui M S, Forster P M F, et al. A comparison of model-simulated trends in stratospheric temperatures. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2003, **129**: 1565~1588
- [3] Santer B D, Wigley T M L, Mears C, et al. Amplification of surface temperature trends and variability in the tropical atmosphere. *Science*, 2005, **309**:1551~1556, doi:10.1126/science.1114867
- [4] Gaffen D J. Temporal inhomogenities in radiosonde temperature records. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 3667~

- 3676
- [5] Gaffen D J, Sargent M A, Habermann R E, et al. Sensitivity of tropospheric and stratospheric temperature trends to radiosonde data quality. *J. Clim.*, 2000, **13**:1776~1796
- [6] Folland C K, Karl T R, Christy J R, et al. Observed Climate Variability and Change, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, 2001. 99~181
- [7] Grody N C, Vinnikov K Y, Goldberg M D, et al. Calibration of multi-satellites observations for climate studies: Microwave Sounding Unit (MSU). *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, doi:10.1029/2004JD005079
- [8] Christy J R, Spencer R W, Braswell W D. MSU tropospheric temperatures: data set construction and radiosonde comparisons. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 2000, **17**: 1153 ~ 1170
- [9] Zou C Z, Goldberg M, Cheng Z, et al. Recalibration of microwave sounding unit for climate studies using simultaneous nadir overpass. *J. Geophys. Res.*, 2006, D19114, doi:10.1029/2005JD006798
- [10] Christy J R, Spencer R W, Norris W B, et al. Error estimates of Version 5.0 of MSU/AMSU bulk atmospheric temperatures. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 2003, **20**: 613 ~ 629
- [11] Mears C A, Schabel M C, Wentz F J. A reanalysis of the MSU channel 2 tropospheric temperature record. *J. Clim.*, 2003, **16**:3650~3664
- [12] Karl T R, Hassol S J, Miller C D, et al. Temperature trends in the lower atmosphere: steps for understanding and reconciling differences. Clim. Change Sci. Program. Washington D. C., 2006
- [13] Yunck T P, Liu C H, Ware R. A history of GPS sounding. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 2000, **11**: 1~20
- [14] Sokolovskiy S. Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit. *Radio Sci.*, 2001, **36**: 483~498
- [15] 胡 雄, 曾 桢, 张训械等. 大气 GPS 掩星观测反演方法. 地球物理学报, 2005, **48**(4):768~774
Hu X, Zeng Z, Zhang X X, et al. Atmospheric retrieval method using GPS radio occultation measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(4):768~774
- [16] Hajj G A, Ao C O, Iijima B A, et al. CHAMP and SAC-C atmospheric occultation results and intercomparisons. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, D06109, doi: 10.1029/2003JD003909
- [17] Kuo Y H, Wee T K, Sokolovskiy S, et al. Inversion and error estimation of GPS radio occultation data. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2004, **82**:507~531
- [18] 宫晓艳, 胡 雄, 吴小成. 大气掩星反演误差特性初步分析. 地球物理学报, 2007, **50**(4):1017~1029
Gong X Y, Hu X, Wu X C. The preliminary analysis of atmospheric retrieval error using radio occultation data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(4):1017~1029
- [19] Ho S P, Kuo Y H, Zeng Z, et al. Validation of microwave lower stratosphere temperature using CHAMP GPS RO data. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, L15701, doi:10.1029/2007GL030202
- [20] Kuo Y H, Schreiner W S, Wang J, et al. Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L05817, doi:10.1029/2004GL021443
- [21] Mannucci A J, AO C O, Yunck T P, et al. Generating climate benchmark atmospheric soundings using GPS occultation data. In: Huang A H L, Bloom H J eds. Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization II: Perspective on Calibration/Validation Initiatives and Strategies. International Society for Optical Engineering (SPIE Proceedings, 2006, Vol. 6301), art. 630108, doi:10.1117/12.683973
- [22] Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission early results. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2008, **89**: 313~333
- [23] Ware R, Rocken C, Solheim F, et al. GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: preliminary results. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1996, **77**:19~40
- [24] Woolf H, Van Delst P, Zhang W. NOAA-15 HIRS/3 and AMSU transmittance model validation. Technical Proceedings of the International ATOVS Study Conference, 10th, Boulder, CO, 27 January-2 February 1999. Bureau of Meteorology Research Centre, Melbourne, Australia, 1999. 564~573

(本文编辑 何 燕)