

廖蜜,张鹏,吴雪宝,等. 利用 MSU 序列研究高空大气温度变化的进展[J]. 气象,2011,37(9):1151-1157.

利用 MSU 序列研究高空大气温度变化的进展^{* 1}

廖 蜜¹ 张 鹏² 吴雪宝² 邱 红²

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 国家卫星气象中心,北京 100081

提 要: 美国 NOAA 卫星上搭载的微波大气探测仪 MSU 以及后续继承改进仪器 AMSU,自 1978 年投入运行以来,已经积累了超过 30 年的全球大气温度的观测资料。近年来,国外学者通过仪器定标误差订正、卫星轨道衰减订正、观测时间差异导致的温度日变化订正、仪器间的相互定标处理等技术,发现并剔除了一些影响较大的非气候因素,提高了该序列资料的质量,并用于全球气候变化研究,特别是对对流层和平流层近 30 年的温度变化研究,研究结果是对常规地面和探空资料分析结果的重要补充。本文对目前国际上 3 种常用的 MSU 序列资料集的定标误差、偏差订正和不同卫星上仪器观测序列的一致化处理方法进行了综合介绍,并比较分析了 3 种资料用于 30 年高空大气温度变化趋势分析的异同。

关键词: 卫星资料, MSU, 高空大气, 温度变化

Research Advances of the Temperature Changes in the Upper Air Using MSU Time Series

LIAO Mi¹ ZHANG Peng² WU Xuebao² QIU Hong²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: There is a general agreement among the climate scientists that the Earth's global average surface-air temperature is now increasing at rates that are without precedent during the last 100 years. Different scales researches to the temperature of surface ground and upper air are the prerequisite for adapting the environment. Microwave Sounding Units (MSU/AMSU) on board NOAA polar orbiting satellites have provided temperatures of deep layers of the global atmosphere since 1978. After corrections such as calibration errors, orbital decay, and diurnal drift, MSU/AMSU long-term data for the upper air have become one of the best references, together with radiosonde observations and reanalysis data. This article elaborates the methods of calibrations, error corrections and merging from different satellites of MSU, and the advancement in the research of the long-term trend.

Key words: satellite data, MSU (microwave sounding unit), upper air, temperature change

引 言

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)第四次评估报告对全球地表平均温度的增暖变化得到了更为确信的结论,它指出最近 100 年

(1906—2005 年)全球平均地表温度上升了 0.74 (0.56~0.92)℃,比 2001 年第三次评估报告给出的 100 年上升 0.6(0.4~0.8)℃有所提高。与地表温度变化相比,高空大气温度变化的不确定性更大,而对于上层大气垂直温度结构变化的研究,可以更好地认识人类对气候变化的影响^[1-2],由此研究高空大气温

* 支撑项目:2010 年科技部国际合作计划专项(2010DFA21140)资助

2010 年 8 月 20 日收稿; 2011 年 2 月 23 日收修定稿

第一作者:廖蜜,主要从事卫星资料的气候应用. Email:liaomi803@yahoo.cn

度的变化趋势成为近年来各国科学家关注的热点^[3]。

国内外的科学家对于高空大气温度的变化做了很多的研究,主要是利用常规探空资料、卫星微波大气探测仪(microwave sounding unit, MSU)资料以及数值预报的再分析资料。自 1979 年以来,大部分资料显示全球平流层温度趋于下降,对流层温度趋于上升,但升降的幅度存在一定的差异^[4]。由于探空站点分布稀疏,探空观测的仪器和方法等经常变化^[5],资料连续性和一致性较差,加之高空观测涉及多个层次,难以准确地确定参照序列^[6]。再分析资料用于气候诊断分析时,长时间序列也存在非均一性问题。1978 年发射的 NOAA 极轨卫星上搭载的微波大气探测仪(MSU)及其后的改进型仪器——先进的微波大气探测仪(advanced MSU, AMSU)几乎可以全天候测量从地表到平流层底层的全球大气温度,该序列星载仪器已经稳定运行了近 30 年,可用于高空大气温度长期变化趋势的研究^[7]。MSU 卫星长序列历史资料用于气候变化研究技术难度大,需要解决资料的一致性问题,包括仪器自身观测误差的订正、仪器寿命期内信号衰减和观测时间漂移的订正以及仪器间的观测差异订正等。目前国际上有 3 组进行了完整订正的 MSU 长序列历史资料,即美国阿拉巴马大学(The University of Alabama in Huntsville)科学家 Christy 和 Spencer 订正的 MSU 数据,简称 UAH;美国遥感系统公司(Remote Sensing System)研究组订正的 MSU 数据,简称 RSS;以及美国大气海洋局(NOAA)国家环境卫星数据和信息中心(NESDIS)卫星应用和研究实验室(STAR)研究组订正的 MSU 数据,简称 STAR。这 3 组数据均为全球范围 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 分辨率格点数据,在垂直方向上包括代表地表温度、对流层中层温度、对流层上层温度和平流层低层温度的数据。本文将对上述 3 组 MSU 资料的定标、误差订正以及仪器间的资料一致性处理等方法进行总结,分析比较 3 组资料在对流层中层、平流层低层大气温度的长期变化趋势,在此基础上探讨卫星长序列历史资料用于气候诊断分析中需要注意的问题。文章的第一部分介绍了 MSU 和 AMSU 遥感大气温度的原理,第二部分总结了目前 MSU 序列资料用于气候变化研究需要解决的问题,第三部分介绍了主要的 UAH、RSS、STAR 3 组 MSU 序列资料分析高空温度变化趋势的主要结果,最后一部分是全文的总结。

1 利用 MSU/AMSU 遥感监测大气温度

微波大气探测仪 MSU 以及后来的改进型微波大气探测仪 AMSU 是美国 NOAA 极轨卫星上搭载的被动微波传感器。与常规测温设备不同,MSU 和 AMSU 通过测量微波氧气吸收带的辐射,组合实现对大气温度廓线的遥感探测^[8]。对于中等吸收强度的波段,低层大气辐射被上层大气吸收,极少能到达卫星仪器,而高层大气密度小,到达卫星以前的辐射量也很弱,故在大气某一层,有辐射贡献的一个峰值。对于弱吸收波段,上层大气对低层大气的辐射吸收较少,低层大气辐射可以较多地穿透大气到达卫星仪器,使得设置在微波氧气吸收带翼区的通道的观测辐射能量主要来自大气的低层。对于设置在微波氧气强吸收中心的通道,其观测辐射能量则主要来自大气的高层,图 1 中的权重函数的垂直分布即是代表了各个不同吸收强度通道的辐射能量的垂直贡献,因而通过这样一系列在微波氧气吸收带上的通道组合就可以遥感反演大气的温度结构。

MSU 传感器是跨轨扫描探测器,星下点分辨率为 109.3 km,在 50~60 GHz 的氧气吸收带有 4 个通道探测大气的温度。从图 1 中可以看出,通道 1 主要接收地表发射的辐射,通道 2 接收的主要是

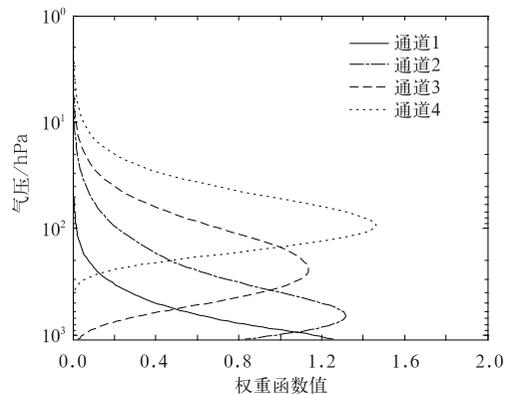


图 1 1976 年美国标准大气廓线模拟得到的 MSU 传感器 4 个通道的权重函数的垂直分布

横坐标表示权重函数值,纵坐标表示气压

Fig. 1 The weighting functions of MSU simulated by the 1976 US standard atmosphere profiles

x-axis is the weight and y-axis is the pressure

850~75 hPa 代表对流层中层的辐射,通道 3 接收 700~20 hPa 代表对流层上层的辐射,而通道 4 则接收 150~15 hPa 代表平流层低层辐射。

1998 年发射的 NOAA-15 及之后的卫星上搭载了 MSU 仪器的升级版——AMSU, AMSU-A 观测方式同 MSU,星下点分辨率提高至 45 km,探测通道增加到 15 个,其中 3、5、7、9 通道与 MSU 的 1、2、3、4 通道光谱参数和探测特性相近 (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/index.htm>)。

自 1978 年发射的 TIROS-N 卫星以来,NOAA 已经先后发射了搭载 MSU 的 NOAA-6、7、8、9、10、11、12、14 等 9 颗卫星以及搭载 AMSU 的 NOAA-15、16、17、18 等卫星,由此积累了 30 多年的高空温度资料。最先对 MSU 数据进行处理的是阿拉巴马大学科学家 Christy 和 Spencer^[9],他们注意到 NOAA 卫星上的 MSU 2、4 通道在探测高层大气温度时性能稳定,可以提供长时间的全球对流层、平流层低层大气的辐射观测值。高空大气的温度在气候尺度上的变化为 $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,如此微弱的变率要求卫星 MSU/AMSU 序列必须要解决资料的稳定性与精度问题,剔除一些影响较大的非气候因素,方可用于高空大气温度长期变化趋势的研究。

2 MSU 序列资料用于气候变化研究需要解决的问题

MSU 序列资料由多颗卫星上的 MSU 观测组成,一颗卫星的观测寿命通常只有几年时间,由这些不同卫星的 MSU/AMSU 探测资料得到均一性时间序列的过程,不只是一定要订正掉单独一颗卫星的测量误差,还有卫星间的差异,以及从 MSU 升级到 AMSU 的测量偏差。因此长时间序列卫星资料应用于气候诊断分析,需要首先解决资料的空间和时间一致性问题^[10]。

根据国际上已有的 UAH、RSS 和 STAR 3 组 MSU 序列数据来看,均一性订正过程中存在的主要问题包括:

(1) 定标误差(Calibration Error)^[11]

MSU 最初的定标系数是仪器发射前在实验室里测量得到的,由于实际仪器的响应函数为弱非线性,并且卫星在空间运行后,太空环境不同于实验室,卫星轨道的变化导致热黑体受到不同的太阳照

射,使其温度变化,进而使定标系数有一定的误差。

(2) 轨道高度衰减(Orbital Decay)

不同视角观测的辐射是轨道高度的函数^[12-13]。由于太阳活动,上层空气会垂直膨胀,使得卫星置于密度更大的空气中,受到的拖曳力也更大,从而出现卫星高度的衰减。

(3) 过赤道时间(Local Equator Crossing Time,即 LECT)的变化

NOAA-6、8、10、12 的过赤道升交点和降交点时间分别是当地时间 07:30 和 19:30,NOAA-7、9、11、14 的过赤道时间是 02:30 和 14:30,由于轨道漂移,卫星过赤道时间或提前或延后,使得观测的大气温度有虚假的变化^[14]。

(4) 热黑体温度变化(Warm Target)

热黑体温度即星上暖黑体温度,是用于定标的主要参考温度。有研究发现,热黑体温度的变化除了受宇宙射线的影响外,还受轨道漂移的影响^[15]。测量目标的亮度温度与星上黑体的温度相关性很大,对于其误差形成的确切来源还不明了,但在 MSU 仪器中普遍存在的这种现象跟未订正掉的测值误差以及仪器的非线性定标有关,反过来,它也影响定标精度^[16]。

(5) 平流层冷却效应

对流层的温度主要由通道 2 的辐射亮温来反映,但通道 2 观测的辐射亮温中有 15%来自平流层低层的贡献^[17]。有科学家定量估算出平流层低层对对流层趋势变化的影响为 $-0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[17],使得平流层的辐射贡献对对流层的温度变化起着不可忽视的作用。

(6) 不同卫星之间的观测系统偏差

不同卫星上的 MSU 仪器探测大气时存在着系统偏差^[11],这在数据的定标过程中也要考虑到。

(7) MSU 与 AMSU 的差异

AMSU 是 MSU 仪器的升级版,自 1998 年的 NOAA-15 卫星开始代替 MSU 进行微波温度探测。AMSU-A 有 15 个通道,其 3、5、7、9 通道与 MSU 的 1、2、3、4 通道探测特性相似^[18],但 MSU 与 AMSU 由于微弱的光谱变化使得对应通道的权重函数有一定的差异^[19]。在 AMSU 和 MSU 序列的衔接方面,需要考虑并且订正这种差异。

在上述问题中,热黑体温度变化对序列变化趋势的影响最大^[10],且是目前序列均一性订正中不确定性最大的因素。UAH、RSS 和 STAR 针对上述

MSU 序列中的影响因素做了相应的订正,以尽可能地消除序列中的非气候信号。表 1 即是各组订正方法的对比。

表 1 三组 MSU 数据针对相应误差的订正方法

Table 1 The correction methods of three different kinds of MSU data

误差源		UAH	RSS	STAR
定标	黑体温度定标	NOAA 算法	NOAA 算法	NOAA 算法
	1 级辐射资料定标	NESDIS 算法	NOAA 二次非线性定标	NOAA 二次非线性定标 + SNO 交叉定标
	过赤道时间变化	依照 MSU 不同视角的平均温度是过赤道时间、纬度、季节和地表类型的函数,建立统计关系	CCM3 每小时模拟结果作为微波辐射传输模式的输入值来计算得到标准过境时间时的 MSU 通道 2 的亮温	在 RSS 订正 LECT 变化的模式方法基础上引入一个尺度因子,以更好地消除 LECT 的影响
	轨道高度衰减	赤道、中纬度、副极地地区各一条标准大气廓线,分冬夏两个季节,用模式模拟得到轨道高度未衰减时的辐射亮温	计算斜入射角度和星下点的模拟亮温,把两类亮温的差加在观测的亮温上,得到各个斜入射角度下的等效星下点入射的亮温	SNO 交叉定标方法
	热黑体温度变化引起的卫星间偏差	以至少 60 天平均的数据为单位,得到两卫星间的观测值之差与热黑体温度的统计关系	以 5 天的平均值作为一个单位(总共有 1200 个重叠的 5 天),得到两卫星间的观测值之差与热黑体温度的统计关系	SNO 交叉定标 + UAH 热黑体订正方法
	平流层效应	由 T2 不同视角的数据的组合来消除平流层作用,得到 TLT 产品	由 T2 不同视角的数据的组合来消除平流层作用,得到 TLT 产品	在 T2 产品中未考虑平流层的影响
	残差订正	以纬带平均处理卫星间残差	以纬带平均处理卫星间残差	以格点处理

3 利用 MSU 序列资料分析高空温度变化趋势的主要结果

在卫星遥感高空大气温度之前,高空温度资料主要是由探空气球探测得到的,探空序列由于时间较长,垂直分辨率较高,成为研究高空温度变化的主要资料。Angell^[20]基于全球 63 个测站 1958—1998 年的无线电探空仪观测资料得到对流层中层增暖趋势为 $0.1 \pm 0.09^\circ\text{C}/10\text{a}$,与 Throne 等^[21]利用 HadAT2 探空数据集和 Free^[22]用 RATPAC(LKS 和 IGRA 的集合)探空数据集得到对流层温度变化趋势幅度接近,得到的南半球增温速率为 $0.13 \pm 0.12^\circ\text{C}/10\text{a}$,较北半球增温速率 $0.07 \pm 0.09^\circ\text{C}/10\text{a}$ 大,而平流层底层出现明显的降温趋势 $-0.4^\circ\text{C}/10\text{a}$,另外 HadAT2 和 RATPAC 也都显示出平流层以大约 $-0.62^\circ\text{C}/10\text{a}$ 的幅度降温。那么利用 MSU 来分析近 30 年的高空大气温度变化趋势如何呢?

在对最初的 NOAA-6、NOAA-7 卫星数据的处理中,Christy 和 Spencer 得到了 1979—1984 年全球高层大气两日平均的辐射亮温,其月平均数据与美国地区的常规探空数据比较,两者之间有高达 0.9

的相关性。Spencer 等^[23]对 TIROS-N 到 NOAA-11 的 7 颗卫星 MSU 通道 2 的原始数据进行了重新处理,发现通道 2 中包含了部分平流层低层的辐射,由于平流层较强的降温趋势,使得通道 2 对对流层的观测有噪音。为了消除平流层的冷却效应,Christy 和 Spencer 组合不同视角得到对流层中下层的温度序列产品,即 T2lt。在之后的研究中,他们逐步进行了其他误差的订正,得到的 1979—2002 年全球对流层中层大气和对流层中低层大气的温度变化趋势分别为 0.02 和 $0.06^\circ\text{C}/10\text{a}$ ^[20]。需要指出的是,UAH 的对流层中层与低层大气的增温趋势与 IPCC 第四次评估报告中对于全球地表平均温度的变化趋势 $0.17^\circ\text{C}/10\text{a}$ 不一致。Santer 等^[24]基于模式模拟结果认为对流层温度的变化趋势应较地表温度变化趋势偏大,显然 UAH 数据低估了对流层温度变化的趋势。对这一问题,Fu 等^[25]认为主要是 MSU 通道 2 观测数据有平流层的辐射能量贡献,所以包含了平流层的冷却效应,从而掩盖了对流层的增温结果。尽管 Christy 和 Spencer 采用多个观测角度组合的方法来消除 MSU 通道 2 中平流层的冷却效应,但有一些学者^[26-27]分析认为这样的处理方法引入了更多的地表辐射贡献,噪音较大,可信度不高。于是 Fu 等人利用 MSU 通道

2、4 通道的线性组合来消除平流层的影响,定量地得到平流层的冷却效应为 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,并认为经过这样的订正之后,得到的对流层温度的变化与地表温度的变化更一致。

由于 UAH 版本的 MSU 数据得出的全球温度变化趋势与模式结果及地表增温的不一致,另一个科学小组 RSS 在 2002 年开始对 MSU 数据进行处理分析,以获得独立的和较为准确的 MSU 数据用于温度变化的研究^[7]。1979—2001 年 RSS 长时间序列 MSU 数据集得到的全球对流层温度的变化趋势为 $0.097 \pm 0.020\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,在引入 AMSU 数据后^[28],更新了全球对流层、平流层温度的变化趋势,应用 1979—2009 年的 MSU 数据资料得到对流层中层的变化趋势为 $0.097\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,对流层中下层为 $0.153\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,平流层为 $-0.325\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。对于全球对流层的温度变化趋势,RSS 的结果与 Prabhakara 等^[29]以及气候模式模拟^[24]得到的结果相近,而与 UAH、Grody 等^[13]的研究结果相差较大。

第三组 MSU 数据 STAR 是采用 SNO 交叉定标方法得到。Cao 等^[30]发展了 SNO(Simultaneous Nadir Overpass)交叉定标方法,利用不同 NOAA 卫星在两极区域的同步观测匹配数据来归一化星星之间的系统误差。基于 SNO 方法,Zou 等^[31]对 1987—2003 年全球海洋上 9 颗 NOAA 卫星 MSU 的通道 2 原始数据进行了定标处理,建立了第三组独立的 MSU 历史序列资料 STAR,得到海洋上空对流层大气温度变化趋势为 $0.198\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。同样地,Zou 等^[31]把 SNO 方法应用到 MSU 通道 4 上,得到的平流层温度变化趋势为 $-0.38 \pm 0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。在 2010 年的工作中,Zou 等^[32]对已有的 MSU 数据进行了更新,采用了 RSS 处理过赤道时间变化的订正方法,对陆地数据进行了再处理,最后得到 1979—2006 年全球对流层大气温度变化趋势为 $0.18 \pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,平流层温度变化趋势为 $-0.39 \pm 0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

图 2 给出了 3 组数据估计的 1979—2001 年全

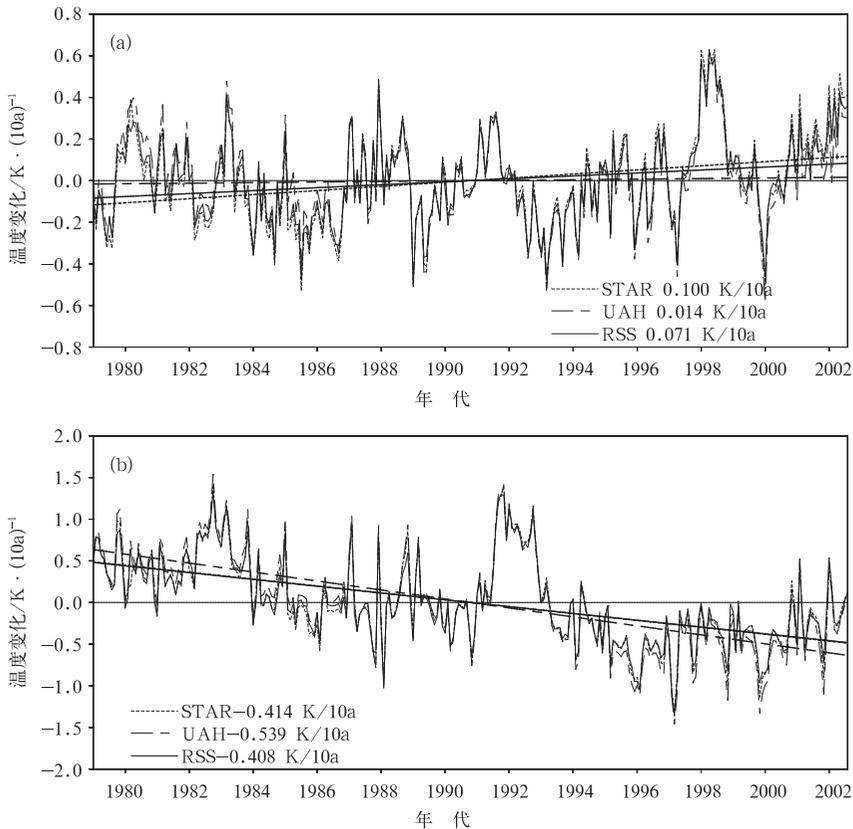


图 2 三组 MSU 数据估计的 1979—2001 年全球高空大气温度变化趋势 (a) 对流层中层, (b) 平流层低层

Fig. 2 The trend of global upper air temperature during 1979—2001 with three kinds of MSU data (a) the mid troposphere, (b) the lower stratosphere

球对流层中层和平流层低层大气温度变化趋势,从这张图中可以看出,在该时段里,UAH, RSS 和 STAR 得到的全球对流层中层和平流层低层温度的变化趋势不是很一致,其中 UAH 增温幅度最小为 $0.014^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, RSS 次之为 $0.07^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 而 STAR 增幅最大为 $0.100^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

对于 UAH, RSS 和 STAR, 许多科学家对 MSU 与其他资料进行了比较, 说明其气候研究的可行性。Hurrell 和 Trenberth 对早期的 UAH 与 ECMWF 的再分析资料^[33] 和探空资料^[34] 都进行过比较, 得出 UAH 的 MSU 序列与后两者相关性都很好, 趋势值上也有一致的结论。Basist 等^[35] 对 UAH 和 NCEP 再分析资料进行比较后也得到数据间有很好的相关性, 但在赤道、南大西洋以及南半球高纬的相关系数较低。Christy 和 Norris 在 2004 年用 UAHv5.1 版本的数据与覆盖北美、冰岛和西太平洋的 97 个探空站资料进行比较后发现, UAH 与探空的相关系数达 0.97, 对流层中下层大气趋势差为 $0.005^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。而 RSS 的大气温度变化趋势目前只与较为可信的大气海洋耦合大气环流模式 AOGCM 模拟的结果接近, 两者都说明了高空大气是以与地表相同或更大的速度增温。Ho Shu-Peng 等^[36] 以 GPS 数据为参考在平流层对 UAH, RSS 和 STAR 的分析中表明, STAR 与 GPS 的观测更一致。UAH, RSS 和 STAR 3 组 MSU 同类数据反映的大气温度变化趋势的不自洽, 与使用不同的订正方法处理非气候信号有关, 而这些订正方法孰优孰劣以及对气候趋势的定量影响还有待作进一步的深入研究, 这也是卫星数据用于气候诊断的一个重点和难点。

4 总 结

本文对 3 套 MSU 序列用于气候变化趋势的分析所必须要做的均一性方法, 以及 MSU 数据用于高空大气温度变化趋势研究的现状进行了分析比较和归纳总结, 可以得到以下结论:

(1) 已经累积 30 年的卫星 MSU 资料是气候诊断分析和气候变化研究中重要的一个信息来源。利用 MSU 资料分析得到的近 30 年对流层增温和平流层冷却趋势, 支持了 IPCC 评估报告(2001、2007 年)中关于地表增温和探空分析的结果。

(2) 对卫星资料进行重新定标和订正处理是构

建稳定可靠的 MSU 气候资料集的关键, 已知的需要考虑的订正包括定标误差、轨道高度衰减、过赤道时间变化、星上定标热黑体温度变化、平流层冷却效应、不同卫星之间的观测系统偏差和 MSU 与 AMSU 的差异等。

(3) 国际上先后的 3 套 MSU 气候数据集 UAH、RSS 和 STAR 在趋势变化上有一致的结论, 即对流层中层的温度距平呈增温趋势, 平流层呈降温趋势, 而在增温和降温的幅度上存在差异, 从 UAH 的对流层温度变化趋势较低的估计值 $0.04^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, RSS 的 $0.097^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 到 STAR 的 $0.18 \pm 0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 它们之间在对流层温度变化趋势的幅度上有较大的差异, 不同科学家采用不同的定标、订正方法是最主要的原因, 另外质量控制和数据计算过程中的细微差别, 也使得得到不同变化趋势结果。

参考文献

- [1] Santer B D. A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere[J]. *Nature*, 1996, 382: 39-46.
- [2] 候英雨, 张佳华, 延昊, 等. 利用卫星遥感资料估算区域尺度空气温度[J]. *气象*, 2010, 36(4): 75-79.
- [3] 郭艳君, 丁一汇. 近 50 年来我国探空温度序列均一化及变化趋势[J]. *应用气象学报*, 2008, 19(6): 646-656.
- [4] Seidel D J. Uncertainty in signals of large-scale climate variations in radiosonde and satellite upper-air temperature datasets[J]. *J Clim*, 2004, 17: 2225-2240.
- [5] 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.
- [6] 翟盘茂, 郭艳君. 高空大气温度变化研究[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(5): 228-232.
- [7] Spencer R W, Christy J R. Precision and radiosonde validation of satellite gridpoint temperature anomalies. Part II: A tropospheric retrieval and trends during 1979-1990 [J]. *J Clim*, 1992, 5: 858-866.
- [8] Warnke P. *Chemistry of the Natural Atmosphere*[M]. Academic press, 1988: 757.
- [9] Spencer R W, Christy J R. Precise monitoring of global temperature trends from satellite [J]. *Science*, 1990, 247: 1558-1562.
- [10] Mears C A, Schabel M C, Wentz F J. A reanalysis of the MSU channel 2 tropospheric temperature record [J]. *J Climate*, 2003, 16: 3650-3664.
- [11] Zou C Z, Goldberg M D, Cheng Z, et al. Recalibration of microwave sounding unit for climate studies using simultaneous nadir overpasses [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111, D19114, doi:10.1029/2005JD006798.
- [12] Wentz F J, Schabel M. Effects of satellite orbital decay on

- MSU lower tropospheric temperature trends[J]. *Nature*, 1998, 394:661-664.
- [13] Vinnikov K Y, Grody N C. Global warming trend of mean tropospheric temperature observed by satellites[J]. *Science*, 2003, 302:269-272.
- [14] Mears C A, Wentz F J. The effect of diurnal correction on satellite-derived lower tropospheric temperature[J]. *Science*, 2005, 309:1548-1551.
- [15] Christy J R, Spencer R W, Lobl E S. Analysis of the merging procedure for the MSU daily temperature time series [J]. *J Clim*, 1998, 11:2016-2041.
- [16] Christy J R, Spencer R W, Braswell W D. MSU tropospheric temperature: Dataset construction and radiosonde comparisons[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2000, 17:1153-1170.
- [17] Qiang Fu, Celeste M Johanson. Contribution of stratospheric cooling to satellite-inferred tropospheric temperature trends[J]. *Nature*, 2004, 429:55-58.
- [18] Mears C A, Wentz F J. Construction of the Remote Sensing Systems V3. 2 Atmospheric Temperature Records from the MSU and AMSU Microwave Sounders[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2008, 26:1040-1056.
- [19] Iacovazzi R A Jr, Cao C, Boukabara S A. Analysis of Polar-orbiting Operational Environmental Satellite NOAA-14 MSU and NOAA-15 AMSU-A relative measurement biases for climate change detection [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114, D09107, doi:10.1029/2008JD011588.
- [20] Angell J K. Difference in radiosonde temperature trend for the period 1979—1998 of MSU data and the period 1959—1998 twice as long[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27:2177-2180.
- [21] Thorne P W, Parker D E, Tett S F B, et al. Revisiting radiosonde upper air temperatures from 1958 to 2002[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110, D18105, doi: 10.1029/2004JD005753.
- [22] Free M. Creating climate reference datasets: CARDS workshop on adjusting radiosonde temperature data for climate monitoring[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83: 891-899.
- [23] Christy J R, Spencer R W, Norris W B. Error estimates of version 5. 0 of MSU-AMSU bulk atmospheric temperatures [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2003, 20: 613-629.
- [24] Santer B D, Wigley T M L, Boyle J S, et al. Statistical significance of trend differences in layer-average temperature time series[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 7337-7356.
- [25] Fu Q, Johanson C M. Stratospheric influences on MSU derived tropospheric temperature trends: A direct error analysis[J]. *J Clim*, 2004, 17:4636-4640.
- [26] Hurrell J W, Trenberth K E. Difficulties in obtaining reliable temperature trends; Reconciling the surface and satellite Microwave Sounding Unit records[J]. *J Clim*, 1998, 11: 945-967.
- [27] Hurrell J W, Brown S J, Trenberth K E, et al. Comparison of tropospheric temperatures from radiosondes and satellites; 1979—98[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2000, 81:2165-2178.
- [28] Mears C A, Wentz F J. Construction of the RSS V3. 2 Lower-Tropospheric Datasets from the MSU and AMSU Microwave Sounders[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26: 1493-1509.
- [29] Prabhakara C, Iacovazzi R, Yoo J M, et al. Global warming: Evidence from satellite observations[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27:3517-3520.
- [30] Cao C, Weinreb M, Xu H. Predicting simultaneous nadir overpasses among polar-orbiting meteorological satellites for the intersatellite calibration of radiometers [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2004, 21:537-542.
- [31] Zou C Z, Gao Mei, Goldberg M D. Error structure and atmospheric temperature trends in observations from the microwave sounding unit[J]. *J Climate*, 2009, doi:10.1175/2008JCLI2233.1
- [32] Zou Cheng-Zhi, Wang Wenhui. Stability of the MSU-derived atmospheric temperature trend. 2010. In press.
- [33] Hurrell J W, Trenberth K E. An evaluation of monthly mean MSU and ECMWF global atmospheric temperatures for monitoring climate[J]. *J Clim*, 1991, 5:1424-1439.
- [34] James W Hurrell, Simon J Brown, Kevin E Trenberth. Comparison of tropospheric temperatures derived from the NCEP/NCAR reanalysis, NCEP operational analysis, and the microwave sounding unit[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 81(9):2165-2177.
- [35] Alan N Basist, Muthuel Chelliah. Comparison of tropospheric temperatures derived from the NCEP/NCAR reanalysis, NCEP operational analysis, and the microwave sounding unit[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(7):1434-1447.
- [36] Ho Shu-peng, Zhou Xinjia, Ying Hwa Kuo. Construction of a consistent microwave sensor temperature record in the lower stratosphere using global positioning system radio occultation data and microwave sounding measurements[R]. 2010.