

用数值天气预报模式评估风云三号A星微波温度计资料的质量

王祥¹ 邹晓蕾² 翁富忠³ 游然⁴

(1 南京信息工程大学资料同化研究与应用中心, 南京 210044; 2 佛罗里达州立大学地球海洋大气科学系, 美国;
3 美国国家海洋大气管理局环境卫星资料信息服务中心, 美国; 4 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 搭载在风云三号A星上的微波温度计 (MWTS) 有4个通道。通道1~4 的中心频率分别为50.3, 53.6, 54.9和57.3GHz。Lu等^[1]指出风云三号A星成功进入轨道后, 3个高层通道 (通道2~4) 的中心频率发生了漂移。Zou等^[2]指出通道2~4的资料偏差随温度变化而变化。本文指出风云三号A星微波温度计资料偏差对温度的依赖性是由频率漂移引起的, 并提出了解决这些资料在数值预报和气候研究应用中的相应措施。对于数值预报而言, 只要在快速辐射传输模式中采用逐线积分模式和漂移后的频率产生一套新系数, 就可以使用该快速辐射传输模式做资料同化。为了要把风云三号A星微波温度计资料接到NOAA系列和欧洲卫星相应仪器资料, 可以用快速辐射传输模式估计由频率漂移引起的偏差, 并将此偏差从观测中减去。本文利用2010年一年MetOp-A/NOAA-18微波温度计 (AMSU-A) 与风云三号A星微波温度计在南北两极的星下点同时过境处 (SNO) 资料, 证明了该方法的可行性。

关键词: 风云三号A星, 频率漂移, 微波温度计

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.003

An Assessment of the FY-3A Microwave Temperature Sounder Using the NCEP Numerical Weather Prediction Model

Wang Xiang¹, Zou Xiaolei², Weng Fuzhong³, You Ran⁴

(1 Center of Data Assimilation for Research and Application, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, Florida State University, USA
3 National Environmental Satellite, Data and Information Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA
4 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The MicroWave Temperature Sounder (MWTS) on FY-3A has four channels with designed band central frequencies of 50.3, 53.6, 54.9, and 57.3 GHz, respectively. Lu et al.^[1] found that the central frequency for three upper level sounding channels shifted after the satellite launch into orbit. This study confirms the findings Lu et al. using a different numerical weather prediction (NWP) model and a different radiative transfer model. Furthermore, it is shown that the strong temperature dependence of MWTS $O-B^{DF}$ biases found in our earlier work is mostly induced by these frequency shifts, where O represents MWTS observations and B^{DF} is model simulations. The mean difference of brightness temperature simulations with (B^{SF}) and without (B^{DF}) incorporating the frequency shifts into the radiative transfer model resembles the $O-B^{SF}$ biases. For NWP applications of FY-3A MWTS data, it is sufficient to generate new fast radiative transfer model coefficients that incorporate the new passband parameters, and the resulting MWTS $O-B^{shifted}$ biases become constant as those of MetOp-A/NOAA-18 AMSU-A data. For climate applications, the FY-3A MWTS brightness temperatures adjusted by subtracting $B^{SF}-B^{DF}$ match quite well with the MetOp-A/NOAA-18 AMSU-A data at the simultaneous nadir overpass locations in both the Arctic and Antarctic.

Keywords: FengYun-3A (FY-3A), frequency shift, Micro-Wave Temperature Sounder (MWTS)

收稿日期: 2013年4月15日; 修回日期: 2013年6月21日
第一作者: 王祥 (1983-), Email: xiangw83@gmail.com
通信作者: 邹晓蕾 (1960-), Email: xzou@fsu.edu
资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2010CB951600); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY200906006); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

1 引言

风云三号 (FY-3) 是中国发射的一系列气象极轨卫星^[3-5], 计划每两年发射一颗, 共发射7颗卫星。前两颗研究与实验卫星——风云三号A和B星已分别于2008年5月27日和2010年11月5日成功进入轨道。风云三号A星是上午窗口星, 而风云三号B星是下午窗口星。两颗卫星上都装载了以下11种仪器: (1) 可见

光和红外扫描辐射计；(2)中分辨率光谱成像仪；(3)红外分光计；(4)微波温度计；(5)微波湿度计；(6)微波成像仪；(7)紫外臭氧垂直探测仪；(8)紫外臭氧总量探测仪；(9)地球辐射探测仪；(10)太阳辐射检测器；(11)空间环境探测器。微波温度计在数值预报和气候研究中的作用十分显著。本文对2010年一整年的风云三号A星的微波温度计观测资料的质量进行了评估。

风云三号A星的微波温度计(MWTS)是跨轨道横扫辐射仪,有4个通道,其中心频率和NOAA-15之前的系列卫星上微波探测仪的4个通道频率相当,与NOAA15-18以及MetOp-A上微波温度计的通道3,5,7,9的中心频率一样^[3]。Zou等^[2]借助美国环境预报中心全球预报系统的6h预报场和欧洲中心的数值预报系统,将MWTS的观测资料与NOAA-18 AMSU-A的观测做了比较研究。文献[1]和[6]都发现MWTS通道2~4的中心频率在卫星发射后发生漂移;MWTS偏差随温度变化而变化。将MWTS资料同化进数值预报模式的一个重要的前提条件是观测资料的偏差必须是无偏的或者全球一致的^①。文本对依赖温度变化的资料偏差做了订正,使得(i)风云三号A星MWTS的观测资料可以同化到数值预报模式中去;(ii)MWTS观测可以与NOAA和欧洲中心业务卫星上的微波温度计资料进行链接,建立更长时间的气候资料集。

如今,数值预报模式的分析场和预报场质量已经相当高,并且快速辐射传输模式也已经能够精确模拟非窗区通道,如MWTS通道2~4,大扫描角和高地形的观测除外。模拟的亮温可以作为观测的参考值来评估新仪器的性能^[7]。观测与模拟之间的偏差不但可以用来诊断仪器的观测异常,而且可以辅助卫星之间的交叉定标,为气候研究服务。当前,超过30年的微波温度计全球卫星资料广泛应用于气候研究^[8-14]。结合7颗风云三号卫星上MWTS观测,只要这些仪器的在轨性能良好,就可以将微波气候数据资料集延长至2020年以后。

2 AMSU-A和MWTS仪器参数

2005年5月20日,下午窗口卫星NOAA-18成功进入高度为854km,倾角为98.74°的近极地太阳同步轨道,该卫星携带了微波温度计、微波湿度计、先进的高分辨率辐射计、高分辨率红外辐射计以及太阳紫外臭氧垂直探测仪。次年12月19日,上午窗口卫星MetOp-A成功进入高度为817km,倾角为98.7°的近

极地太阳同步轨道。MetOp-A同样携带了美国提供的AMSU-A仪器,以及其他一些仪器,为气象业务和气候研究提供资料。

2008年5月27日,下午窗口星风云三号A星发射成功,轨道高度为836km,倾角为98.75°。与AMSU-A类似,MWTS也是跨轨道横扫辐射仪,但是只有4个通道。MWTS与AMSU-A应用了同样的定标技术^[15]。

MWTS的1~4通道分别对应了NOAA-18和MetOp-A AMSU-A 15个通道中的3,5,7和9四个通道,它们的中心频率相同。同AMSU-A一样,MWTS扫描角范围也是 $\pm 48.3^\circ$,而MWTS星下点像元的分辨率是62km,比AMSU-A的48km星下点分辨率粗一些。MWTS轨道宽度(2250km)略小于AMSU-A的2300km。MWTS每条扫描线上仅有15个像元,为AMSU-A的一半,但是完成一条MWTS扫描线需要的时间(16s)却是AMSU-A的2倍。MWTS的仪器误差高于AMSU-A(表1)。关于这两种仪器更多的细节可以参考文献[3,4,15-17]。

Lu等^[1]发现MWTS受通道中心频率漂移和辐射计非线性的影响,并且借助逐线积分模式和欧洲中心的数值预报场,利用最小二乘拟合法估计出了中心频率漂移量。通道2,3和4分别漂移了60,80,83MHz(表1)。本文研究了2010年一年的MWTS资料受频率漂移影响后的偏差分布的特征,并提出解决办法使资料仍然可以应用于数值预报和气候研究。

MWTS受频率漂移影响的对流层高层和平流层低层通道的中心频率位于氧气吸收带上,这些通道亮温可以用于反演大气温度廓线。因为MetOp-A和风云三号A都是上午窗口星,并且过赤道地方时仅相差约半个小时,所以用MetOp-A的AMSU-A观测资料评估MWTS资料的质量是很理想的选择。但是,MetOp-A AMSU-A通道7从2008年8月开始出现了无法解决的问题^②。因此,本文中MWTS通道3与NOAA-18 AMSU-A通道7比较,而MWTS通道4与MetOp-A AMSU-A通道9比较。

表1 风云三号A星MWTS与AMSU-A相应通道的仪器特征

通道号	中心频率		仪器误差 (K)	
	MWTS AMSU-A	MWTS & AMSU-A 初始设计 (GHz)	MWTS 频率漂移 (MHz)	MWTS AMSU-A
1	3	50.30	无	0.5 0.40
2	5	53.596 \pm 0.115	60	0.4 0.25
3	7	54.940	80	0.4 0.25
4	9	57.290	83	0.4 0.25

① 常数偏差容易减掉

② <http://www.oso.noaa.gov/poesstatus/componentStatusSummary.asp?spacecraft=2&subsystem=1>

表2 CRTM 2.02版本的输入变量

参数	输入	单位
大气廓线		
气压	全球预报系统 6h预报场	hPa
温度		K
水汽混合比		g/kg
地表参数		
地表温度	全球预报系统 6h预报场	K
10m的风速		m/s
10m的风向		

3 模拟全球亮温

3.1 辐射传输模式

美国卫星资料同化联合中心(JCSDA)开发的快速辐射传输模式(CRTM)可以模拟微波、红外等多种辐射仪器(如AMSU-A, MWTS等)。它包含了大气吸收,水汽和气溶胶的吸收及散射,海洋、陆地、雪和冰等地表发射及反射的辐射。这些分量都用来计算传感器的亮温。CRTM支持很多传感器,包括过去、现在以及将来的仪器,涵盖了微波、红外和可见光波段。最初CRTM版本v1发布于2004年,从那以后不断地得以改进和扩展。本文中用的是2010年发布的新版本v2.0.2。

CRTM v2.0.2版本包含4个主模块,用于计算大气透过率、地表发射率和反射率、云和气溶胶的光学性质以及辐射传输方程的解。在计算大气透过率的模块中,有多个计算透过率的算法,允许不同的算法共存。地表发射率和反射率计算模块包含4个子模块分别用于计算海洋、陆地、雪盖和冰4种地表类型。在云和气溶胶的吸收与散射模块中,有6种云类型和8种气溶胶类型的光学性质。最后在解辐射传输的模块中解辐射传输方程。详细内容可以参考文献[18, 19]。

3.2 借助数值预报模式进行比较

AMSU-A和MWTS测量的是特定频率大气层顶的微波辐射。对MWTS通道3和4在微波频率的辐射吸收和发射量主要是对流层高层及平流层低层温度的函数。垂直温度廓线不同,则辐射率或亮温不同。然而,将风云三号A星MWTS和NOAA-18/MetOp-A AMSU-A的全球观测直接进行比较是不可能的,因为除了南北两极的狭窄区域会出现两颗卫星下点同时经过同一个地点(SNO)外,其余地方都不会出现这样的情况。例如,在2010年整年中,仅仅匹配上数千个SNOs(见表4和5)。

本文中,将基于美国环境预报中心(NCEP)全球预报系统(GFS)的6h预报场资料模拟得到的全球亮温作为参考值或“真值”来比较MWTS和AMSU-A

表3 CRTM 2.02版本的其他输入参数

参数		输入	
大气廓线			
臭氧	任意正值(对微波仪器)(单位:ppvm)		
地表参数			
参数	输入	参数	输入
陆地覆盖率	陆地(1.0),其他(0.0)	土壤湿度	默认(0.05g·cm ⁻³)
水面覆盖率	水(1.0),其他(0.0)	冠层水含量	默认(0.05g·cm ⁻³)
雪面覆盖率	雪(1.0),其他(0.0)	植被比例	默认(0.3)
冰面覆盖率	冰(1.0),其他(0.0)	土壤温度	默认(283.0K)
陆地类型	默认(沙地)	雪温度	默认(263.0K)
水类型	默认(海水)	雪厚度	默认(50.0mm)
雪类型	默认(新雪)	雪密度	默认(0.2g·cm ⁻³)
冰类型	默认(新冰)	雪粒子尺寸	默认(2.0mm)
盐度	默认(33.0ppmv)	冰温度	默认(263.0K)
冰厚度	默认(0.9g·cm ⁻³)	冰厚度	默认(10.0mm)
几何参数			
纬度	[-90, 90]	仪器方位角	默认(0)
经度	[0, 360]	太阳天顶角	默认(100.0)
仪器天顶角	卫星资料	太阳方位角	默认(0)
仪器扫描角	[-48.3°, 48.3°]	通量天顶角	默认(扩散角度)

两种仪器的观测资料的质量。表2和表3分别列出了输入CRTM的大气垂直廓线和地表参数。所用的6h预报场的水平分辨率是1°×1°,垂直方向26层,层顶气压为10hPa。分别对两种仪器观测减去模拟亮温的偏差进行了检验,并且将它们的偏差进行了比较。

4 数值结果

4.1 频率漂移引起的偏差的分布特征

Zou等^[2]将2010年1月的风云三号A星MWTS资料和NOAA-18 AMSU-A资料进行了比较研究。与AMSU-A不同,MWTS的亮温偏差具有明显的纬度和温度依赖性。这种偏差的存在使得MWTS资料无法直接应用于数值预报模式中。为了弄清楚产生这种偏差的根源并找出解决办法,本文将资料的时间周期延长到2010年一年。

Zou等^[2]指出,MWTS资料偏差可能来源于以下几个方面:(1)定标算法没有很好地表征出非线性项;(2)MWTS在轨定标黑体受太阳光污染;(3)MWTS仪器频率漂移。Lu等^[1]指出了频率漂移是造成偏差随纬度和温度变化而变化的最重要的因素,并对通道2,3,4的漂移量做了仔细分析。本文用美国环境预报中心的数值预报模式同样证实了频率漂移是造成观测偏差随温度和纬度变化的主要原因。

首先用相同的6h预报场作为CRTM的输入值,分别模拟了MWTS通道频率漂移前后的亮温。频率漂移前后的亮温差的分布特征随时间变化。图1是2010年每个月的前5天MWTS通道4频率漂移前后的亮温差散点图。由图可见每个月的偏差都有很强的温度和纬度

表4 风云3号A星与NOAA-18星下点同时过境处匹配资料总数，匹配的时空标准分别为60km和60s

1月	10 th	22 th	30 th			
	36	38	2			
2月	3 th	15 th	16 th	18 th	27 th	28 th
	30	46	20	8	18	42
3月	11 th	12 th	23 th	24 th		
	10	19	9	36		
4月	5 th	17 th	29 th			
	30	39	4			
5月	11 th	23 th	24 th			
	11	27	4			
6月	4 th	5 th	13 th	16 th	17 th	29 th
	10	8	4	3	28	27
7月	11 th	23 th				
	35	29				
8月	4 th	16 th	29 th			
	19	22	15			
9月	9 th	10 th	22 th			
	6	21	23			
10月	4 th	9 th				
	23	32				
11月	9 th	10 th	23 th	25 th		
	8	4	19	8		
12月	4 th	15 th	16 th	28 th	30 th	
	33	30	37	37	4	

表5 风云3号A星与MetOp-A星下点同时过境匹配资料总数，匹配的时空标准分别为60km和60s

1月	1 th	2 th	3 th			
	38	441	101			
2月	4 th	6 th	24 th	25 th		
	72	53	423	37		
3月	19 th					
	3					
4月	17 th	18 th	19 th	21 th	22 th	
	19	429	51	31	48	
5月						
6月	9 th	10 th	11 th	15 th	18 th	
	114	294	11	30	113	
7月	2 th	6 th	23 th			
	6	10	290			
8月	2 th	18 th	25 th			
	12	87	261			
9月	24 th	25 th	26 th	27 th	30 th	
	55	99	21	46	10	
10月	8 th	19 th	29 th			
	10	4	4			
11月	17 th	18 th	19 th			
	181	101	190			
12月	3 th	21 th	29 th			
	2	8	2			

依赖性。频率漂移引起的偏差的变化在模拟的亮温范围内可以达到好几度。在相同的温度范围，不同的纬度，偏差也不同。与南半球相比，MWTS通道4的偏差在北半球对频率漂移更敏感。除3，10，11和12月以外，南半球中高纬的偏差对温度的依赖性比较小。频率漂移同时也造成了南北半球的冬季和南半球8月模拟的亮温的变化比较大。

与通道4类似，通道3的频率漂移同样造成资料偏差随温度和纬度变化而变化（图2）。频率漂移引起的偏差在南半球1—3月随温度的增加而增大，11和12月随温度的增加而减小，其他月份变化不明显，北半球基本都随温度的增加而增大。

4.2 MWTS 观测在数值预报中的应用

图3和4分别是2010年每个月的风云三号A星MWTS通道4和3的星下点观测减去模拟亮温的差的全球变化。MWTS观测与初始设计频率下模拟的亮温值的差，与漂移频率下模拟的亮温值的差以及AMSU-A星下点观测与模拟亮温的差分别对应图3和4的左，中，右。左图中的偏差存在强烈的纬度和温度依赖性。与图1和2相比，可以发现MWTS观测与初始设计频率下模拟的亮温值的差的分布特征和量级，与频率漂移前后模拟亮温值的差十分相似。因此可以断定，频率漂移是造成风云三号A星 MWTS偏差随温度变化而变化的主要原因，这和文献[1]的观点一致。

如果在CRTM模式中考虑已知的频率漂移量（表1），MWTS的偏差将不会随纬度和温度的变化而变化（图3和4中），这类似于MetOp-A AMSU-A的偏差（图3和4右）。

为了阐明MWTS偏差的温度纬度依赖性，图5a给出了用美国标准大气廓线得到的MWTS通道3和4在频率漂移前后的权重函数，图5b和c分别是通道4和3频率漂移后和漂移前模拟的亮温的偏差随纬度的月平均变化。跟频率漂移前相比，漂移后通道4的权重函数向上移动，产生了正的亮温偏差（即漂移后亮温与漂移前亮温的差为 0.31° ）。而漂移后通道3的权重贡献却比漂移前贡献小，这就导致了 0.2° 的负亮温差。所以频率漂移引起的纬度依赖性偏差主要是因为漂移前后的频率对不同大气层敏感程度不一样。

图6是2010年MWTS通道3，4的观测资料与漂移前模拟亮温差，频率漂移后与漂移前模拟亮温的差，观测资料与漂移后模拟亮温差以及NOAA-18 AMSU-A与MetOp-A AMSU-A的观测与模拟亮温的差的月平均偏差和标准差。MWTS通道4频率漂移前后的亮温偏差是正偏差，与观测和漂移后的亮温偏差的符号相反。而MWTS通道3频率漂移前后的亮温偏差与观测和漂移后的亮温偏差符号一致，都是负偏差。在CRTM中考虑了频率漂移后的MWTS通道3和4的偏差和标准差与AMSU-A相应通道的偏差标准差相当，且

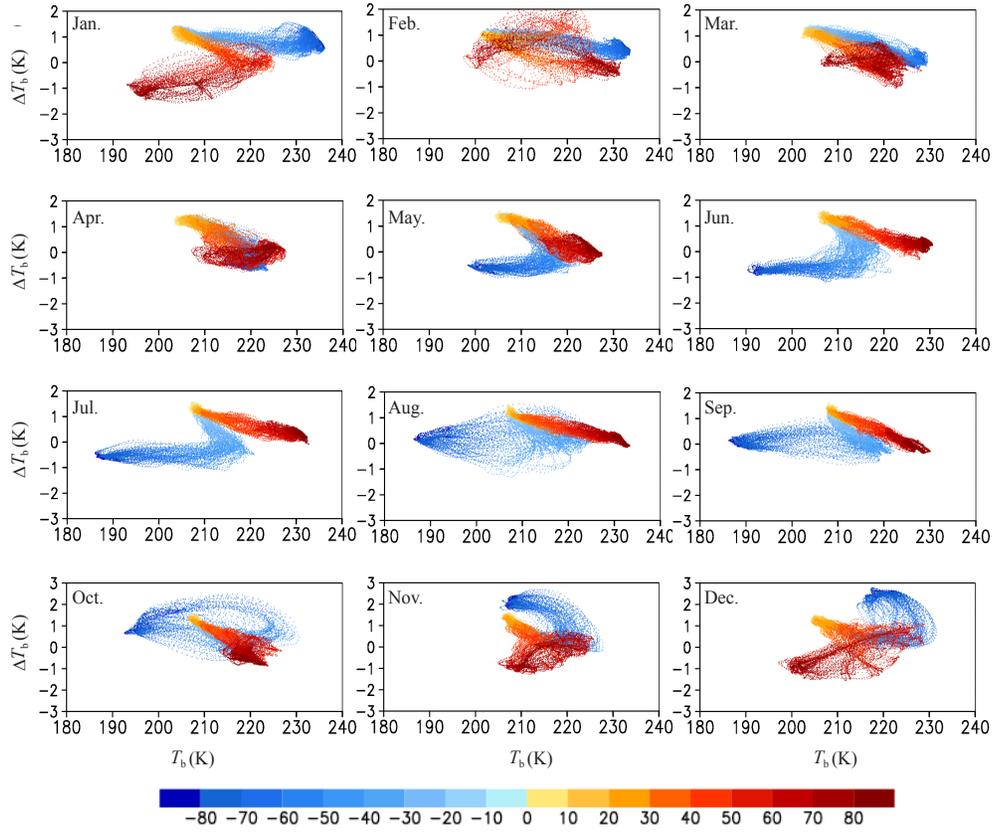


图1 2010年每月1—5日MWTS通道4频率漂移前后的模拟亮温的差随观测亮温的变化

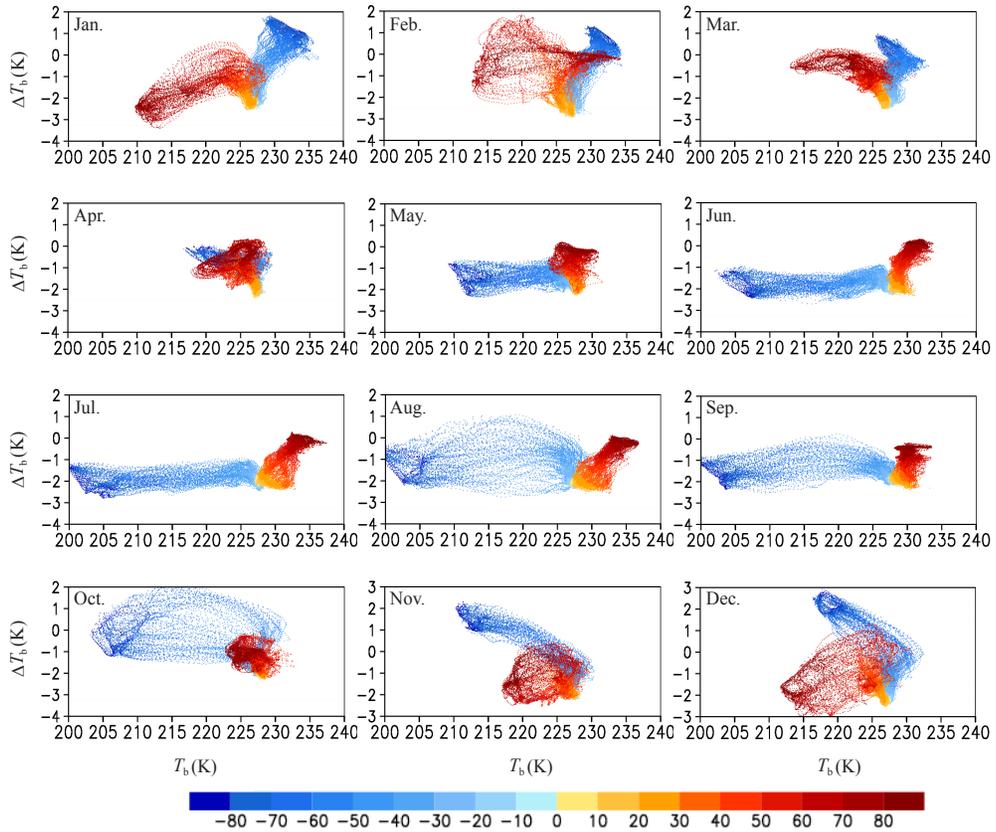


图2 2010年每月1—5日MWTS通道3频率漂移前后的模拟亮温的差随观测亮温的变化

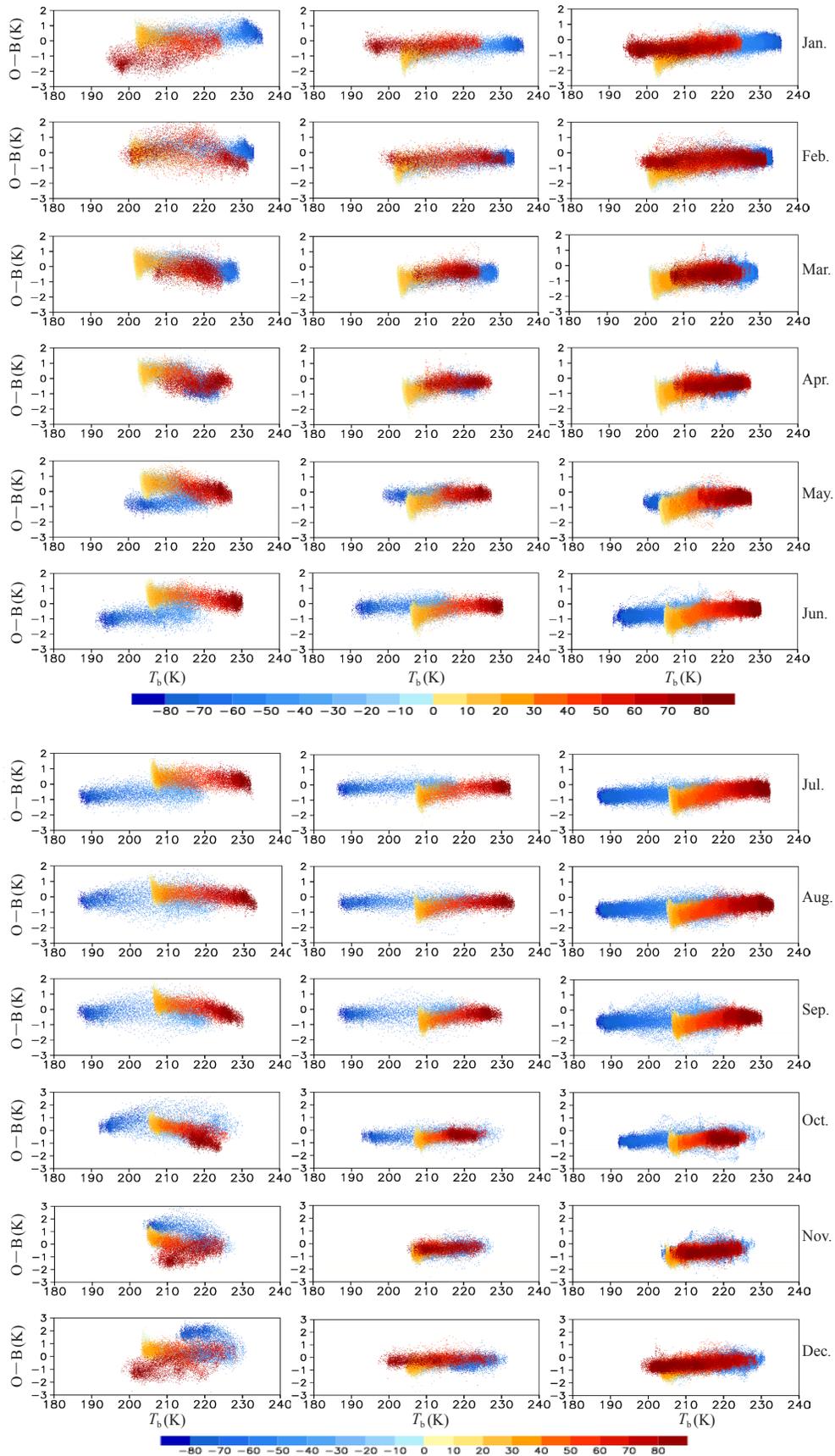


图3 2010年每月1—5日MWTS通道4的星下点观测亮温与频率漂移前(左)后(中)的模拟亮温的差以及MetOp-A AMSU-A通道9的星下点观测与模拟亮温的差随观测亮温的变化(右)

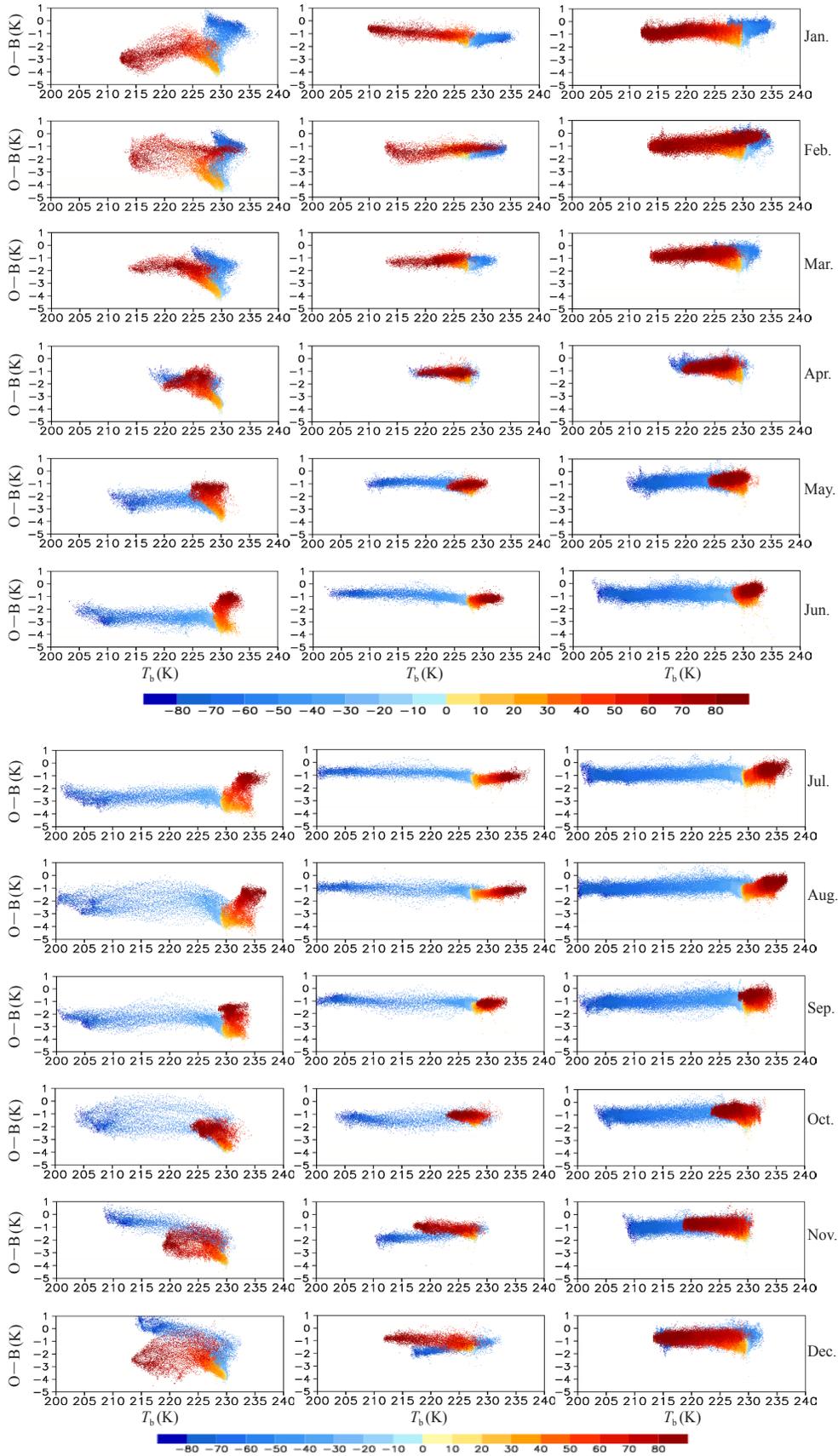


图4 2010年每月1—5日MWTS通道3的星下点观测亮温与频率漂移前(左)后(中)的模拟亮温的差以及NOAA-18 AMSU-A通道7的星下点观测与模拟亮温的差随观测亮温的变化(右)

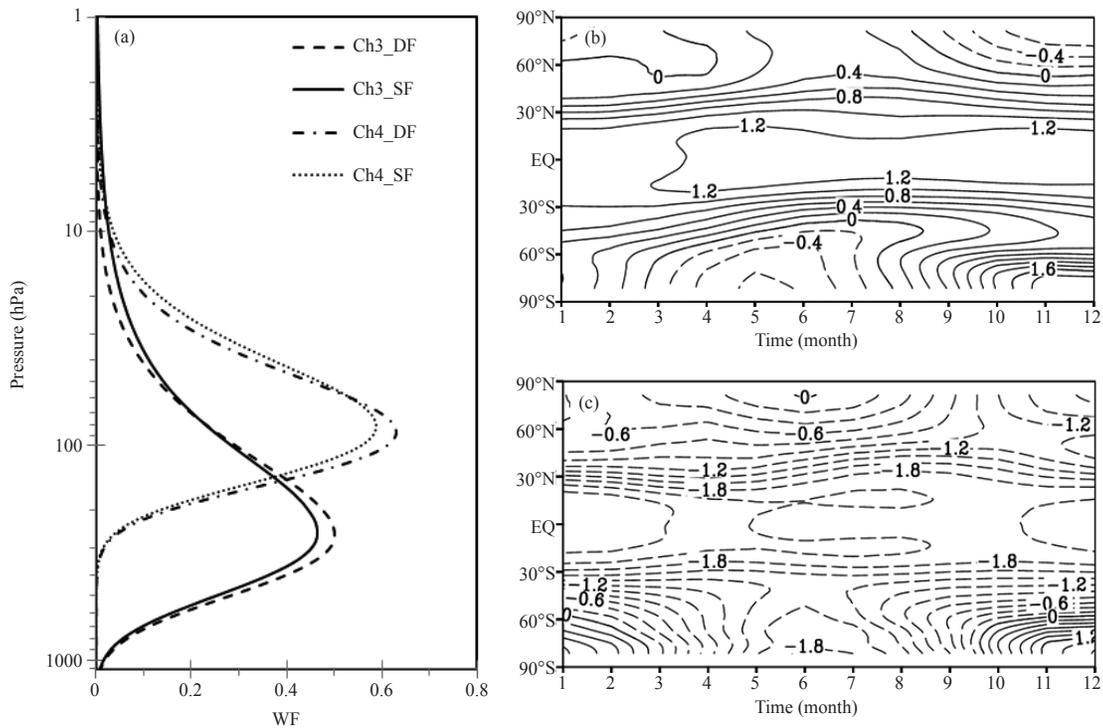


图5 用美国标准大气计算的风云三号A星MWTS通道3和4在频率漂移前后的权重函数 (a), 以及MWTS通道4 (b) 和通道3 (c) 的频率漂移前后模拟亮温的差在 1° 的纬度带上的月平均偏差

两种仪器的偏差和标准差都比较小。所以在辐射传输模式中考虑了通道的频率漂移, 就可以将MWTS的观测资料同化到数值天气预报模式中。

MWTS通道2的频率漂移量是3个通道中最小的一个。图7是2010年1月1—5日通道2的观测与频率漂移前后模拟亮温的差的散点图。为了避免陆地地表发生率的影响, 图7中仅仅统计了海洋上的资料。由图可见, MWTS通道2的频率漂移对观测资料的影响比较小, 但却是不可忽视的。

4.3 MWTS 观测在气候中的应用

同数值天气预报相比, 卫星仪器定标在监测气候变化和再分析资料同化上的作用就显得更加重要, 也更具挑战性。卫星定标包括卫星发射前实验室定标、在轨定标和发射后定标。卫星进入轨道之后, 发射前的定标系数可能会变化, 这样新的定标问题将随之产生。监测气候变化的卫星定标要求比捕捉到每天天气波动的要求要高得多^[20]。要想把卫星观测资料应用到气候研究, 必须进行卫星间的交叉定标。对风云三号A星而言, 仪器的频率漂移是卫星发射后定标的问题之一。尽管在CRTM中引入频率漂移量, 可以成功地将MWTS资料应用于数值预报模式, 但是为了将其应用于气候研究, 还必须对MWTS观测资料做一些偏差订正。

尽管每颗卫星的生命期有限, 一般为5~10a, 但是通过链接交叉定标后的卫星观测资料已经获得了自1978年以来的微波观测仪气候数据资料库。迄今为止, 已经有3个不同的研究团队分别建立了自己的MSU/AMSU高层温度气候数据资料库, 包括阿拉巴马大学的亨茨维尔^[10, 21], 遥感系统^[10, 11], 以及卫星应用与研究^[14, 22-24]3个团队。MSU/AMSU-A气候数据资料库不但已经用来研究全球大气温度趋势和变化^[8-14], 还用于气候模式的输入量^[25]。

风云三号A星MWTS 4个通道的中心频率在漂移前与AMSU-A 4个通道3, 5, 7, 9的中心频率完全一样。MetOp-A和风云三号A星都是上午窗口卫星, 并且越赤道地方时仅差半个小时, 所以一旦定标合适, MWTS资料可以用于建立气候资料数据库, 尤其是当MetOp-A上AMSU-A仪器出现故障的时候。实际上从2010年8月之后, MetOp-A AMSU-A的通道7就失效了。但是为了将MWTS应用于气候数据资料库, 必须解决频率漂移的问题。所以我们考虑借助数值预报模式来订正MWTS观测资料。既然AMSU-A的观测和MWTS的观测频率不同, 就不能简单地将MWTS观测链接到AMSU-A上。取而代之, 通过减去频率漂移前后的亮温差来订正MWTS观测, 得到订正后的观测。为了检验这种订正方法的有效性, 我们比较

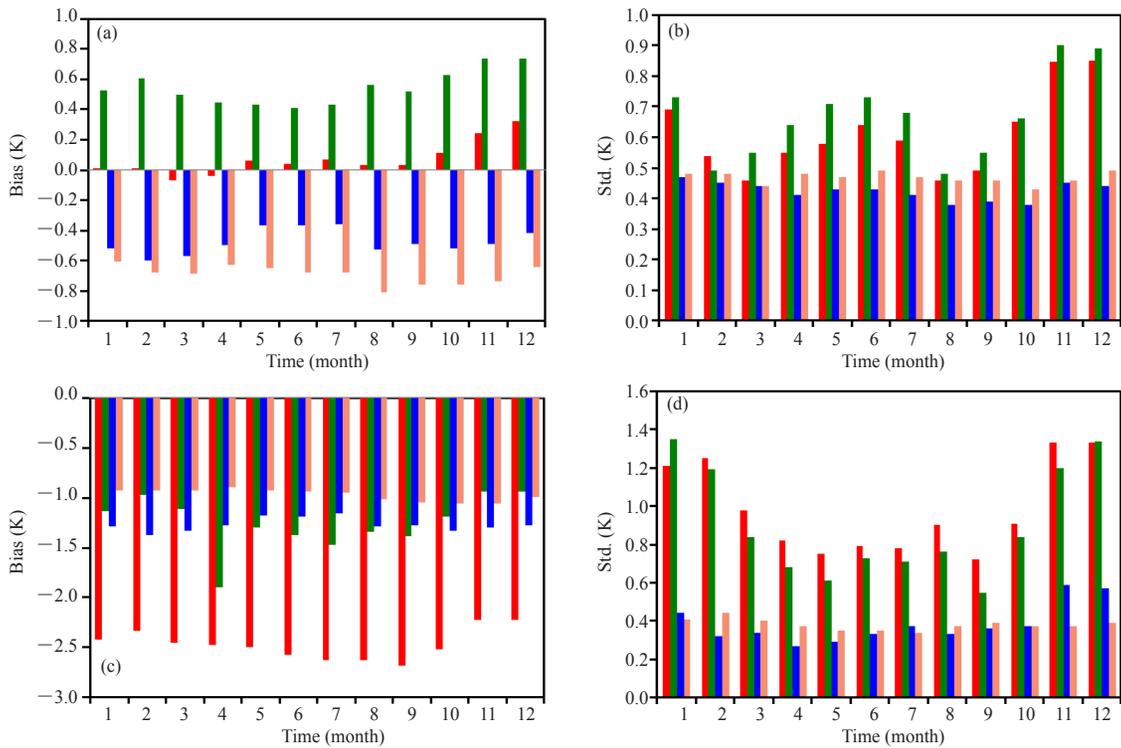


图6 2010年MWTS观测减去频率漂移前模拟亮温（红色），频率漂移后减频率漂移前模拟亮温（绿色），观测减去频率漂移后模拟亮温（蓝色）以及AMSU-A观测减去模拟亮温（粉红）的差的月平均偏差（左）和标准差（右）
（a~b）MWTS 通道4和AMSU-A通道9；（c~d）MWTS通道3和AMSU-A通道7

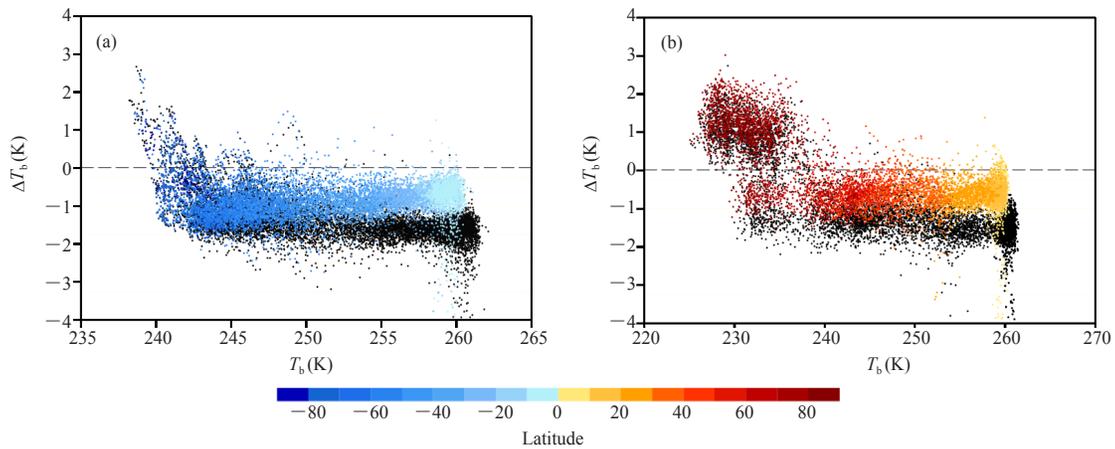


图7 2010年1月1—5日MWTS通道2海洋上的观测与频率漂移前（黑色）后（彩色）的模拟亮温的差随观测亮温的变化
（a）南半球；（b）北半球

了AMSU-A观测和频率漂移订正前后的MWTS观测的差的纬向平均（图8和9），这是因为在全球范围内MWTS资料 和NOAA-18 AMSU-A 资料之间不能直接进行像元对像元的比较。可以看出AMSU-A观测和频率漂移订正前的纬向平均偏差（图8，9左）随纬度温度变化，与（图3，4左）类似，只是符号相反。经过订正之后，AMSU-A观测与MWTS观测的平均偏差对纬度和温度的依赖性明显降低。

仅仅用星下点同时过境处匹配上的数据来检验上述订正方法的有效性算是一种更严格的检验方法。2010年一年内，南北极区附近分别仅有1930和1777个匹配上的点（表4和5）。图10和11分别是MetOp-A AMSU-A通道9和风云三号A星MWTS通道4的订正前后的观测亮温差以及NOAA-18 AMSU-A通道7和MWTS通道3订正前后的观测亮温差。频率漂移订正前，AMSU-A通道9和MWTS通道4的差相当大，并且

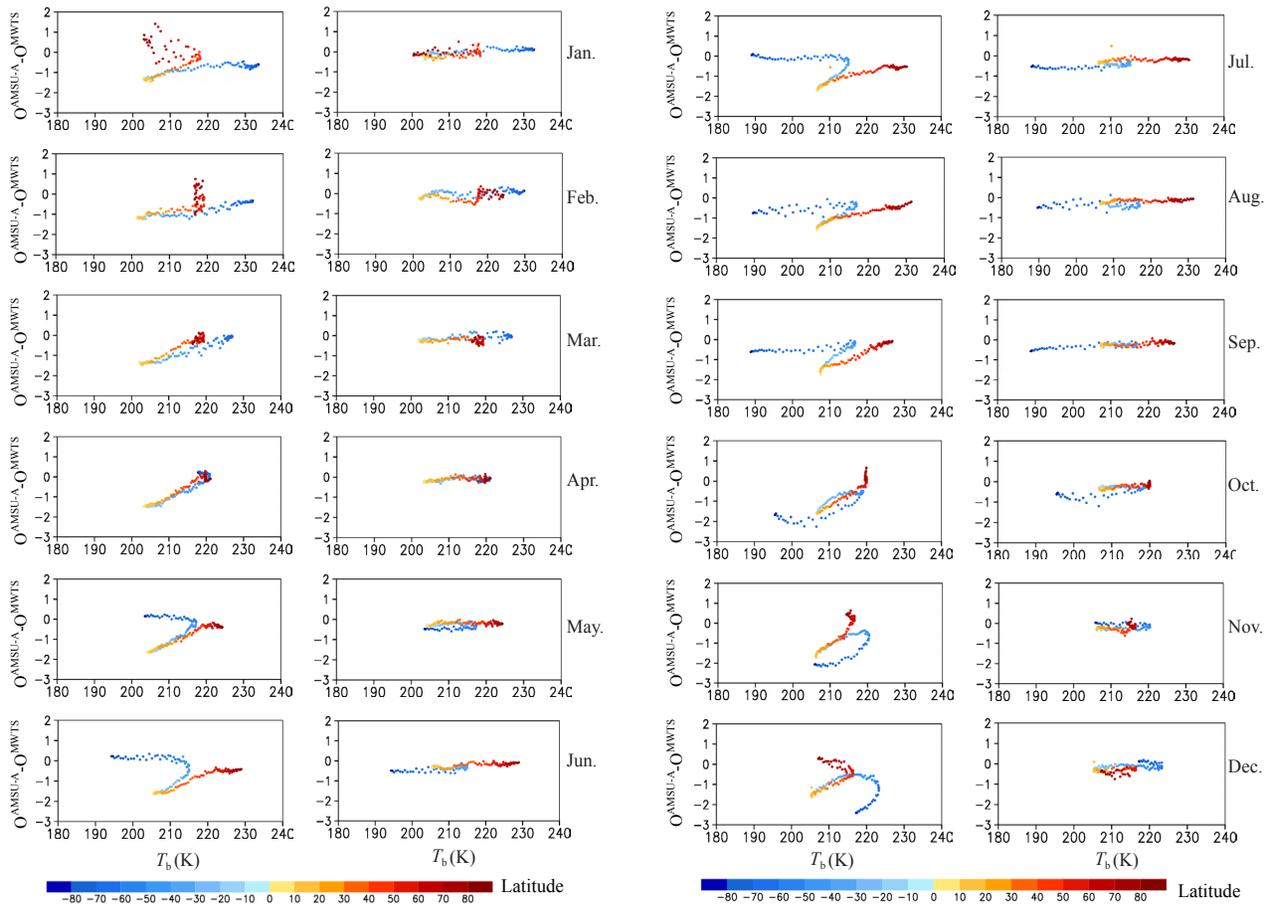


图8 2010年每个月的AMSU-A通道9的观测与MWTS通道4的观测在1°的纬度带上的平均偏差（左图没有对MWTS通道4的观测做频率漂移引入的偏差的订正，而右图做了偏差订正）

有明显随温度变化而变化的特性。然而，订正后这两个通道的亮温差的温度依赖性几乎去掉了。AMSU-A通道7和MWTS通道3的结果类似。但是这两种仪器观测亮温的差随温度的增加仍有很小的增加量，这很可能是受MWTS的非线性订正残差的影响。在MWTS资料应用于气候研究之前，需要做进一步研究来解决这个问题。

图12是2010年南北半球内所有星下点同时过境处配对点的亮温差在频率漂移订正前后的偏差和标准差。由图可见订正之后，南北半球的通道4的偏差大约都是-0.2°，而通道3的偏差大约都为0.4°，并且两个通道的标准差都小于0.5°。

需要注意的是，一年的星下点同时过境处配对资料或许并不足以描述MWTS和AMSU-A的亮温偏差的特征。以后会用更长时间的MWTS观测资料对此偏差做进一步检验。将MWTS资料应用于气候研究的另一个可行性方法是进行资料同化，更新辐射传输模式的系数就可以解决掉频率漂移的影响，然后由MWTS反演的温度就不会受频率漂移引入的偏差的影响。

4.4 非线性项对偏差的影响

卫星辐射计MWTS通道3和4两个通道探测的大气氧气吸收发射的辐射率以计数值的形式记录下来。实际地球像元的辐射率是计数值的二次函数，可以用两点定标方程^[15]来表示：

$$R_c = R_w + (R_w - R_c) \left(\frac{C_e - \overline{C_w}}{C_w - \overline{C_c}} \right) + \mu (R_w - R_c)^2 \frac{(C_e - \overline{C_w})(C_e - \overline{C_c})}{(C_w - \overline{C_c})^2} \quad (1)$$

其中 C_e 、 C_c 和 C_w 分别是地球像元，冷空和定标黑体的计数值； $\overline{C_c}$ 和 $\overline{C_w}$ 是相邻5条扫描线上的 C_c 和 C_w 的平均值，目的是为了去掉随机噪声； R_e 、 R_c 和 R_w 是相应的辐射率。式（1）中前两项是两点定标算法的线性项，第三项为非线性项。

图13是AMSU-A通道9和MWTS通道4的非线性定标项在2°的纬度带上随观测亮温的变化。AMSU-A和MWTS的非线性项量级都随观测亮温的减小而增大。但是，MWTS通道4非线性项为-2.2°，大约是

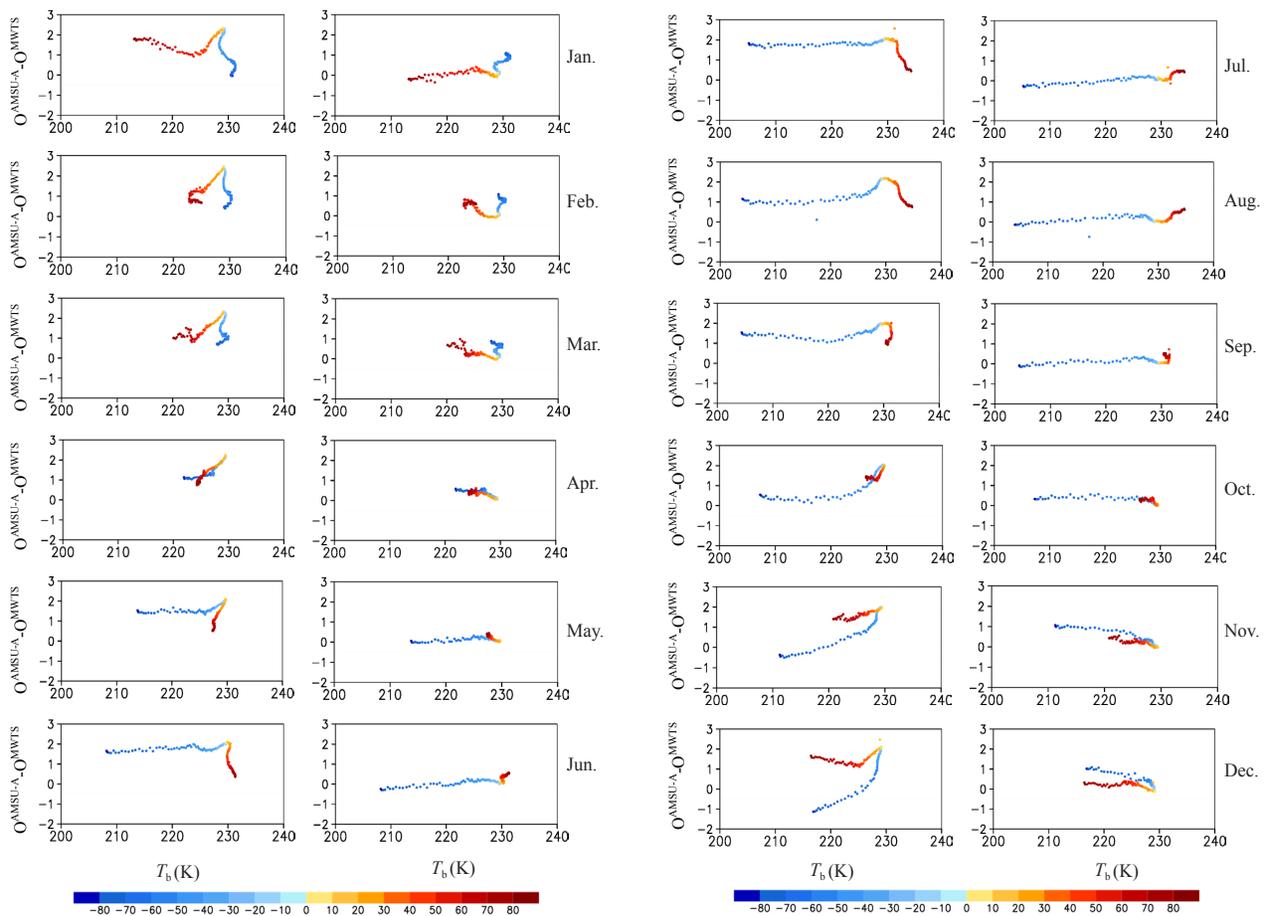


图9 2010年每个月的AMSU-A通道7的观测与MWTS通道3的观测在1°的纬度带上的平均偏差（左图没有对MWTS通道3的观测做频率漂移引入的偏差的订正，而右图做了偏差订正）

AMSU-A通道9的两倍。MWTS和AMSU-A通道的非线性项都是根据 R_0 减去线性项来计算的，图14给出了散点图。它们的值都随亮温的增大而增加，但是增加的速度有所区别。MWTS通道4和3的斜率分别为0.016与0.019；而AMSU-A通道9的斜率分别为0.01与0.012。MWTS非线性项的量级差不多为AMSU-A的两倍。

图15是2010年1月1—5日MWTS观测与考虑频率漂移前后模拟的亮温差分别在线性定标与非线性定标下的散点图。由图可见，非线性定标对全球偏差的影响不同于频率漂移。非线性定标不改变全球偏差的分布特征，而仅仅是将整个偏差分布特征向下平移。

5 总结与结论

本文和文献[1]的共同点是证实了风云3号A星进入轨道之后，MWTS通道2, 3, 4的中心频率发生了漂移。卫星发射后，仪器出现异常并不是罕见的现象。关键是要理解这些异常，分析出根源，找到方法解决问题，使得观测资料仍然可用。例如，自2004年早期以来，NOAA-15 AMSU-A的通道6开始出现异常，仪器的测量精度开始退化。Zou等^[26]通过采用

NOAA-15和18交叉定标技术，发现NOAA-15通道6的频率也出现了显著的漂移。

本文阐明了如何通过将数值预报模式输出作为精确辐射传输模式CRTM的输入来订正频率漂移引起的观测异常。首先，说明了MWTS频率漂移造成观测偏差的温度依赖性。用美国环境预报中心全球预报系统的输出场作为CRTM的输入场来模拟MWTS观测亮温。MWTS通道3和4的观测减模拟的差散点图揭示了偏差的温度和纬度依赖性，而相应的AMSU-A通道的偏差却不随温度或纬度变化而变化。并且2010年全年偏差都有温度和纬度依赖性，这就排除或降低了定标源受到污染的可能性。其次，说明了全球偏差的温度依赖性主要是由频率漂移引起的，并且可以通过在CRTM中考虑已知的漂移量来减小偏差。这就保证了MWTS的观测资料可以应用到数值预报模式。第三，将美国环境预报中心全球预报系统6小时预报场作为CRTM的输入变量，分别模拟频率漂移前后的观测亮温，借助它们的差来订正MWTS观测亮温。订正后的MWTS观测亮温与相应的AMSU-A的通道观测亮温能

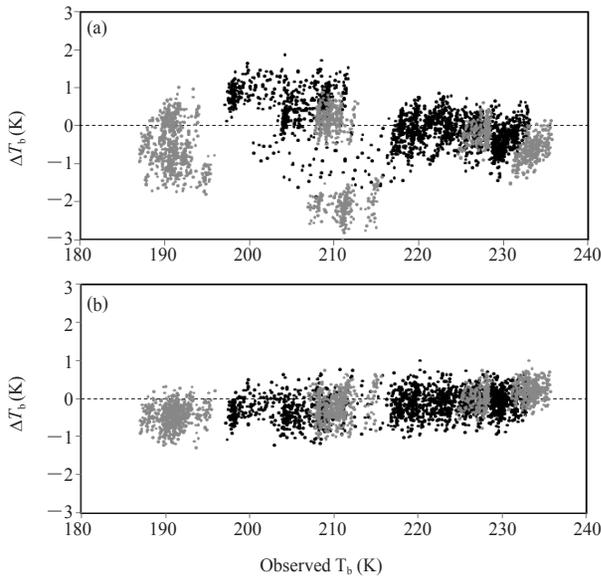


图10 2010年MetOp-A AMSU-A通道9与风云三号A星MWTS通道4在南北极星下点同时过境处匹配上的观测资料的亮温差随MWTS通道4观测亮温的变化 (a) 对MWTS通道4频率漂移引入的偏差订正前; (b) 对MWTS通道4频率漂移引入的偏差订正后

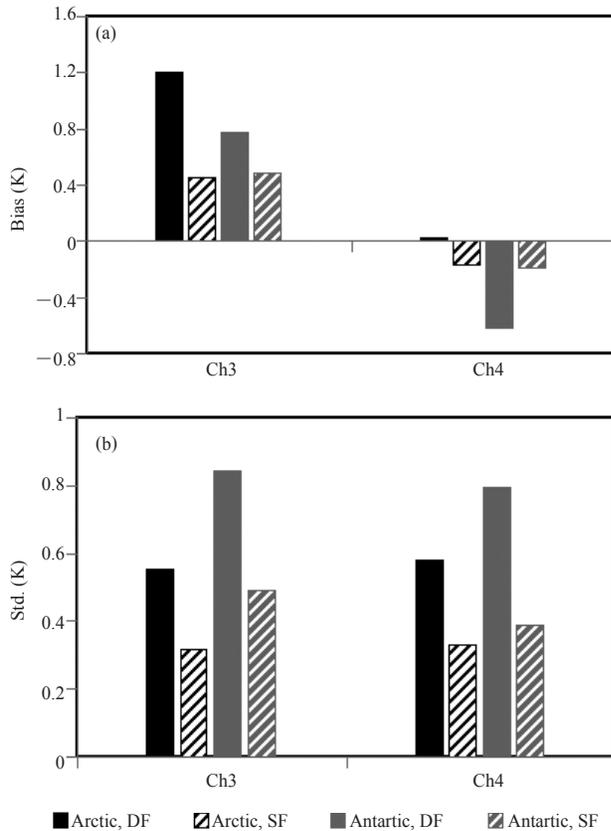


图12 2010年NOAA-18 AMSU-A通道7与风云3A星MWTS通道3, 以及MetOp-A通道9与MWTS通道4在南北极星下点同时过境处匹配上的资料的观测亮温差的偏差 (a) 与标准差 (b) (实柱与虚柱表示对频率漂移引入的观测资料的偏差的订正前后)

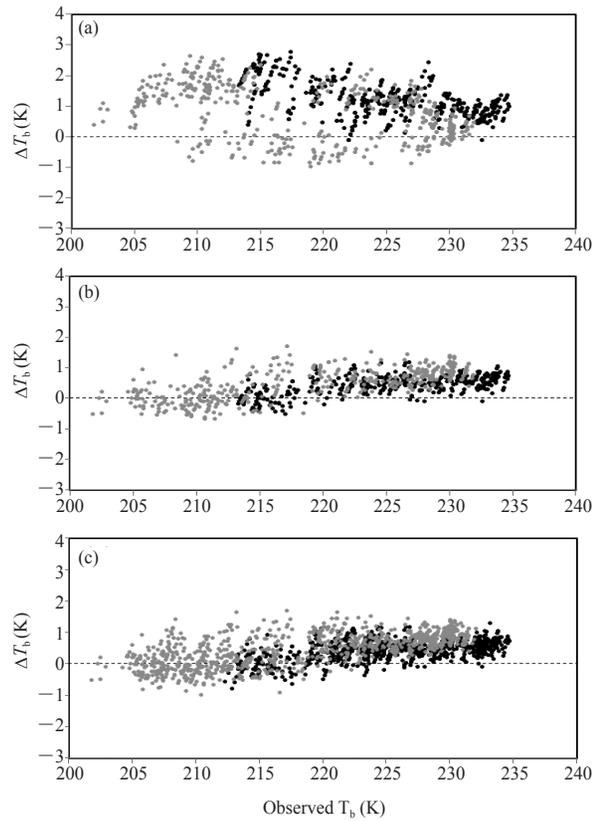


图11 2010年NOAA-18 AMSU-A通道7与风云3A星MWTS通道3在南北极星下点同时过境处匹配上的观测资料的亮温差随MWTS通道4观测亮温的变化 (a) 对MWTS通道4频率漂移引入的偏差订正前; (b) 对MWTS通道4频率漂移引入的偏差订正后; (c) 和 (b) 相似, 只是匹配的时间标准放宽到120s。

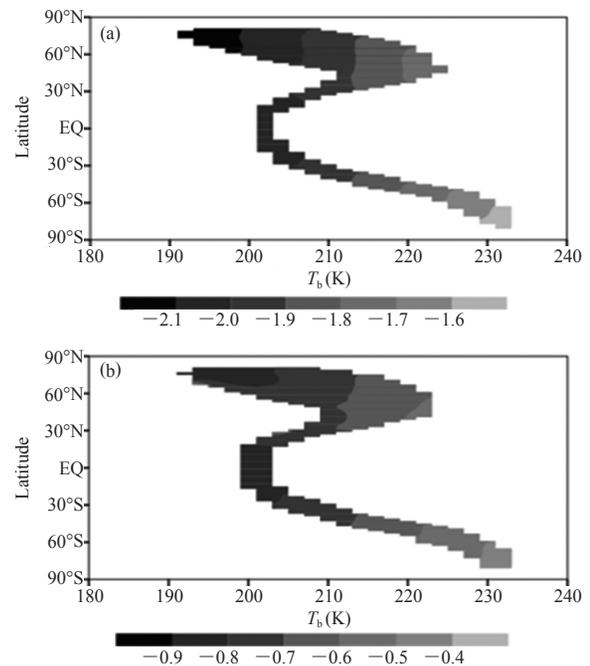


图13 MWTS通道4 (a) 和AMSU-A通道9 (b) 在2°的纬度带上的非线性定标项随观测亮温的变化

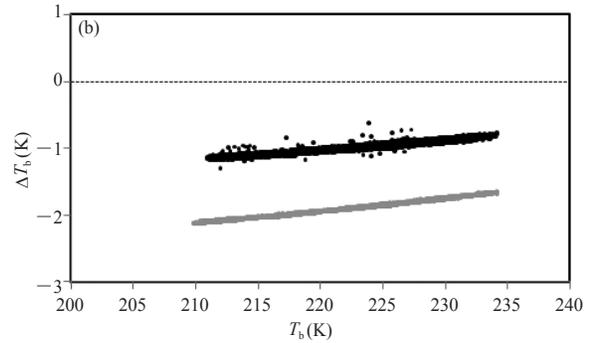
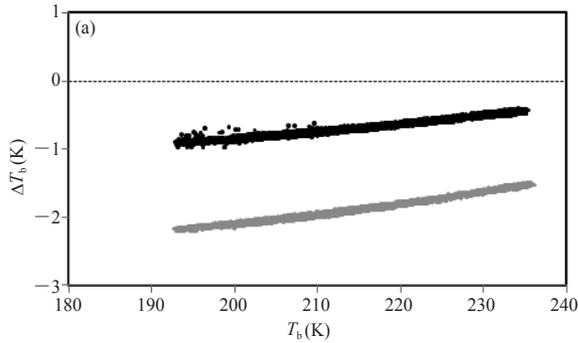


图14 风云3A MWTS通道4 (灰色)和MetOp-A AMSU-A通道9 (黑色)的非线性定标项随观测亮温的变化 (a), 以及风云3A MWTS通道3 (灰色)和NOAA-18 AMSU-A通道7 (黑色)的非线性定标项随观测亮温的变化 (b)

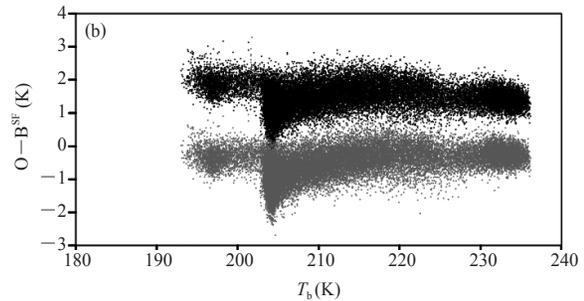
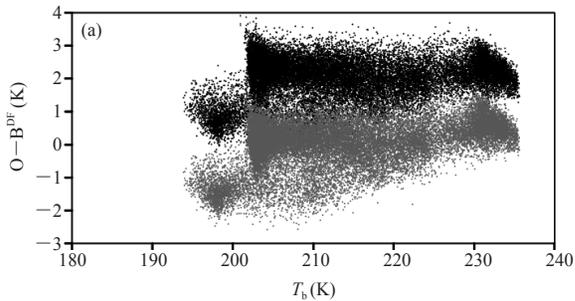


图15 2010年1月1—5日MWTS通道的观测减去频率漂移前 (a)后 (b)的模拟亮温的差随观测亮温的变化 (观测资料的线性与非线性定标分别用黑色与灰色表示)

够很好的匹配, 这可以通过MWTS和AMSU-A之间的星下点同时过境配对资料的零平均偏差来证实。今后将会通过更长时间的资料来验证此调整方法的有效性。

了解MWTS偏差的特性是将风云三号卫星资料应用于数值预报和气候研究的重要步骤。风云三号观测资料可以链接到NOAA MSU/AMSU时间序列上, 建立长期的气候数据库, 用于气候监测。本文还进一步阐述了数值预报背景场 (如6h预报场) 在表征新仪器发射后在轨性能方面的有效性。

参考文献

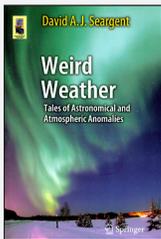
- [1] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. Characterizing the FY-3A Microwave Temperature Sounder Using the ECMWF model. *J Ocean Atmos Tech*, 2011, 28(11): 1373-1389.
- [2] Zou X, Wang X, Weng F, et al. Assessments of Chinese FengYun microwave sounder (MWTS) measurements for weather and climate applications. *J Ocean Atmos Tech*, 2011, 28: 1206-1227.
- [3] Dong C, Yang J, Zhang W, et al. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(10): 1531-1544.
- [4] Yang J, Dong C, Lu N, et al. Chinese new generation of polar-orbiting satellites FY-3. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4): 501-509.
- [5] Zhang P, Yang J, Dong C, et al. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3: 367-373.
- [6] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. An initial evaluation of FY-3A satellite data. *ECMWF Technical Memorandum*, 2011, 641.
- [7] Bell W, Candy B, Atkinson N, et al. The assimilation of SSMIS

- radiances in numerical weather prediction models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(4): 884-900.
- [8] Christy J R, Spencer R W, Lobl E S. Analysis of the merging procedure for the MSU daily temperature time series. *J Climate*, 1998, 11(8): 2016-2041.
- [9] Christy J R, Spencer R W, Braswell W D. MSU tropospheric temperatures: Dataset construction and radiosonde Comparisons. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(9): 1153-1170.
- [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 Technol*, 2003, 20(5): 613-629.
- [11] Mears C A, Schabel M C, Wentz F J. A reanalysis of the MSU channel 2 tropospheric temperature record. *J Climate*, 2003, 16(22): 3650-3664.
- [12] Mears C A, Wentz F J. Construction of the remote sensing systems V3.2 atmospheric temperature records from the MSU and AMSU microwave sounders. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(6): 1040-1056.
- [13] Vinnikov K Y, Grody N C. Global warming trend of mean tropospheric temperature observed by satellites. *Science*, 2003, 302(5643): 269-272.
- [14] Zou C Z, Gao M, Goldberg M D. Error structure and atmospheric temperature trends in observations from the microwave sounding unit. *J Climate*, 2009, 22(7): 1661-1681.
- [15] Mo T. Calibration of the advanced microwave sounding unit-A radiometers for NOAA-L and NOAA-M. *NOAA Technical Report NESDIS 1999*, 92: 53.
- [16] Mo T. Prelaunch calibration of the advanced microwave sounding unit-A for NOAA-K. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1996, 44(8): 1460-1469.
- [17] Mo T. Postlaunch Calibration of the NOAA-18 Advanced Microwave Sounding Unit-A. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 1928.
- [18] Weng F. Advances in radiative transfer modeling in support of

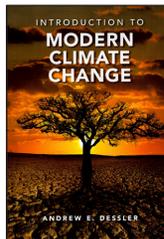
- satellite data assimilation. J Atmos Sci, 2007, 64(11): 3799-3807.
- [19] Han Y, Weng F, Liu Q, et al. A fast radiative transfer model for SSMIS upper atmosphere sounding channel. J Geophys Res, 2007, 112, D11121, doi: 10.1029/2006JD008208.
- [20] Ohring G, Wielicki B, Spencer R, et al. Satellite instrument calibration for measuring global climate change. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(9): 1303-1313.
- [21] Spencer R W, Christy J R. Precise monitoring of global temperature trends from satellites. Science, 1990, 247(4950): 1558-1562.
- [22] Zou C Z, Goldberg M D, Cheng Z, et al. Recalibration of microwave sounding unit for climate studies using simultaneous nadir overpasses. J Geophys Res, 2006, 111, D19114, doi: 10.1029/2005JD006798.
- [23] Zou C Z, Wang W. Stability of the MSU-derived atmospheric temperature trend. J Atmos Oceanic Technol, 2010, 27(11): 1960-1971.
- [24] Yan B, Weng F. Intercalibration Between Special Sensor Microwave Imager/Sounder and Special Sensor Microwave Imager. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46(4): 984-995.
- [25] Dee D P, Uppala S. Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis. Q J R Meteorol Soc, 2009, 135(644): 1830-1841.
- [26] Zou C Z, Wang W. Intersatellite calibration of AMSU-A observations for weather and climate applications. J Geophys Res, 116, D23113, doi: 10.1029/2011JD016205.

新书架 NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



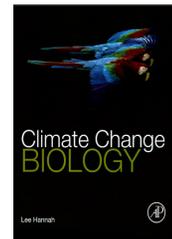
Weird Weather: Tales of Astronomical and Atmospheric Anomalies
《奇异的天气：天文和大气异常的故事》
编著者：David A.J. Seargent
出版者：Springer
出版年：2012



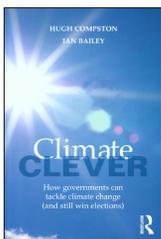
Introduction to Modern Climate Change
《现代气候变化介绍》
编著者：Andrew E. Dessler
出版者：Cambridge University Press
出版年：2012



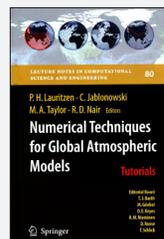
Challenges and Opportunities in Agrometeorology
《农业气象学的机遇与挑战》
编著者：S.D. Attri等
出版者：Springer
出版年：2011



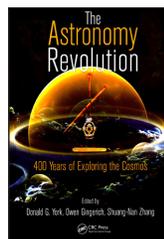
Climate Change Biology
《气候变化生物学》
编著者：Lee Hannah
出版者：Academic Press
出版年：2011



Climate Clever: How Governments Can Tackle Climate Change (and Still Win Elections)
《气候精明者：政府如何应对气候变化（并仍能在选举中胜出）》
编著者：Hugh Compston 等
出版者：Routledge
出版年：2012



Numerical Techniques for Global Atmospheric Models
《全球大气模式数值技术》
编著者：P.H. Lauritzen 等
出版者：Springer
出版年：2011



The Astronomy Revolution: 400 Years of Exploring the Cosmos
《天文学革命：宇宙探索400年》
编著者：Donald G. York 等
出版者：Taylor & Francis Group
出版年：2011



《全球变暖》（第四版）
编著者：John Houghton
译者：戴晓苏等译，丁一汇译校
出版者：气象出版社
出版年：2013