

# 风云三号B星微波温度探测仪观测资料的质量评估

王祥<sup>1</sup> 邹晓蕾<sup>2</sup>

(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)

**摘要:** 继新一代气象极轨卫星上午窗口星风云三号A星于2008年5月27日成功发射以后, 下午窗口星风云三号B星在2010年11月5日成功发射。搭载于风云三号卫星上的微波温度探测仪(MWTS, MicroWave Temperature Sounder)有4个通道, 分别与先进微波探测仪(AMSU-A, Advanced Microwave Sounding Unit-A)的3, 5, 7和9通道相对应。通过与模式模拟亮温以及NOAA-18 AMSU-A同频率观测亮温的对比, 评估了风云三号B星MWTS观测资料的质量。研究发现, MWTS通道3和AMSU-A通道7的观测偏差有较强的纬度依赖性; MWTS通道4的观测资料在约30°—40°N的狭窄纬度带上受到了严重污染; 并且, 通道4的扫描偏差不对称, 第4个像元的偏差全球系统性地高于其他临近像元。造成这些异常偏差的可能原因包括卫星天线旁瓣污染和未知来源的信号干扰。为了将MWTS观测应用于数值天气预报, 提出了一个质量控制算法剔除通道4的异常观测资料。

**关键词:** 风云三号B星, 微波遥感, 微波温度探测仪

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.004

## Quality Assessments of Chinese FengYun-3B Microwave Temperature Sounder (MWTS) Measurements

Wang Xiang<sup>1</sup>, Zou Xiaolei<sup>2</sup>

(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)

**Abstract:** Following the successful launch of the first polar-orbiting morning-configured satellite, FY-3A, on May 27, 2008, in a new Fengyun three (FY-3) series, the second afternoon-configured polar-orbiting satellite (FY-3B) was launched on November 5, 2010. The four-channel Microwave Temperature Sounder (MWTS) was onboard both FY-3A/B satellites, with designed channel frequency similar to channels 3, 5, 7, and 9 of the Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A). This study assesses the quality of the brightness temperature measurements from FY-3B MWTS by comparing them with numerical weather prediction (NWP) model simulations and NOAA-18 AMSU-A measurements with the same frequencies. A strong latitudinal dependent bias is found for both MWTS channel 3 and AMSU-A channel 7. At channel 4, the brightness temperatures are contaminated within a small latitudinal zone (~30°—40°N) of the Northern Hemisphere. It is also found that the MWTS channel 4 bias is strongly asymmetric across the scan and the fourth field of view (FOV4) of channel 4 is globally and systematically warmer than its neighboring FOVs. These anomalous biases may arise from sidelobe effect and interferences of the signal transmitted from some unknown sources. A quality control algorithm is developed to remove the anomalous data at MWTS channel 4 for its applications in NWP.

**Keywords:** FengYun-3B (FY-3B), Microwave remote sensing, Microwave Temperature Sounder (MWTS).

### 1 引言

2010年11月5日, 中国极轨卫星风云系列的第二颗卫星下午窗口星风云三号B星成功进入近极地约

830km高度轨道, 轨道倾角98.75°, 过赤道地方时大约下午2时。与风云三号A星一样, 风云三号B星也携带了11种探测仪器。其中, 微波温度探测仪(MWTS)具有4个通道, 中心频率分别是50.3, 53.59, 54.94和57.29GHz, 位于氧气吸收带上。这4个通道与美国NOAA-15之前的系列卫星上装载的微波探测仪通道很相似, 和AMSU-A的通道3, 5, 7, 9有相同的中心频率。

MWTS、AMSU-A以及搭载在美国最新极轨气象卫星Suomi NPP卫星上的先进技术微波探测仪(ATMS)可以相互补充, 为业务应用提供稳定的数

收稿日期: 2013年4月3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

表1 FY-3B MWTS 仪器特性

通道		频率 (GHz)		带宽 (MHz)		NE $\Delta$ T (K)	
AMSU-A	MWTS	AMSU-A	MWTS	AMSU-A	MWTS	AMSU-A	MWTS
3	1	50.30		180		0.40	0.5
5	2	53.596 $\pm$ 0.115		2 $\times$ 170		0.25	0.4
7	3	54.94		400		0.25	0.4
9	4	57.29		330		0.25	0.4
通道		星下点分辨率 (km)		权重函数峰值 (hPa)		轨道宽度 (km)	
AMSU-A	MWTS	AMSU-A	MWTS	AMSU-A	MWTS	AMSU-A	MWTS
3	1	48	62	surface	surface	2300	2250
5	2	48	62	700	700	2300	2250
7	3	48	62	270	300	2300	2250
9	4	48	62	90	70	2300	2250

据支持。美国联合极轨卫星系统 (JPSS, Joint Polar Satellite System) 卫星的延迟发射会导致NPP和JPSS之间的任务空白, 这空白将长达21个月<sup>[1]</sup>。如果能利用好MWTS观测资料, 就可以很好地填补这段时间的空白。通过MWTS观测与数值天气预报模式结果的偏差以及仪器之间的交叉定标来了解这些仪器的性能, 对天气和气候的应用研究有很重要的作用。

风云三号A星 MWTS观测资料与模式模拟亮温的比较, 表明MWTS的偏差随观测亮温的变化而变化<sup>[1]</sup>, 这种偏差的温度依赖性是由MWTS通道中心频率漂移引起的<sup>[2, 3]</sup>。本文也是通过风云三号B星MWTS观测和模式模拟亮温的差来检验观测资料的质量。通过比较, 可以发现观测的异常和定标的不足, 这是将MWTS应用于数值天气预报和气候研究必不可少的步骤。

本文结构如下: 第2部分简要介绍风云三号B星微波温度探测器观测和模式模拟; 第3部分描述对风云三号B星MWTS观测资料评估的数值结果, 其中包括全球偏差、标准差和依赖于扫描角的偏差, 微波温度探测器通道4观测异常与冷空计数值异常有关, 与纬度相关的微波温度探测器通道3的偏差; 第4部分提出了剔除受污染资料的质量控制方法; 第5部分为文章结论。

## 2 MWTS观测和模式模拟亮温

### 2.1 MWTS 和 AMSU-A 资料

本文以2011年4, 6和7月风云三号B星MWTS和NOAA-18 AMSU-A的1B级观测亮温作为研究资料。表1给出了这两种仪器的主要参数。MWTS的4个通道的中心频率分别是50.30, 53.596 $\pm$ 0.115, 54.94和57.29GHz。其中通道1是窗区通道, 通道2~4的权重函数峰值分别位于700, 300和70hPa。MWTS完成一条扫描线需要16s, 沿每条扫描线上只有15个探测视场, 仅为AMSU-A的一半。MWTS星下点分辨率约为

62km, 轨道宽度2250km, 而AMSU-A星下点分辨率为48km, 轨道宽度2300km。MWTS通道1的仪器误差为0.5K, 其余通道是0.4K, 略高于AMSU-A的仪器误差。AMSU-A通道3仪器误差为0.4K, 通道5, 7和9的仪器误差为0.25K。

### 2.2 模式模拟亮温

美国卫星资料同化联合中心开发的快速辐射传输模式CRTM及其在各种大气和地表参数条件下的衍生产品<sup>[4, 5]</sup>可以用于模拟MWTS和AMSU-A的亮温值。CRTM模式的输入参数包括美国国家环境预报中心和全球预报系统的大气压强, 对应层次上的温湿廓线, 地表温度, 10m风速风向等地表参数, 以及仪器的天顶角和扫描角。该全球预报系统的6h预报场具有1°经纬度的水平分辨率, 垂直方向26层, 模式层顶气压为10hPa。

## 3 数值结果

### 3.1 偏差和标准差

由于数值天气预报模式预报的云水变量场存在一定的不确定性, 因此想要将此云水廓线作为CRTM的输入变量, 精确模拟受降水云污染的观测资料几乎是不可能的。为了减小这些所谓“坏资料”在统计全球偏差和标准差中的影响, 本文采用了一种简单的双权重质量控制方法来剔除这些“坏资料”。

观测和模拟的差与其双权重平均  $\mu_{bw} = \overline{T_b^{obs} - T_b^{model}{}^{bw}}$  的差超过双权重标准差的Z倍, 则称该观测值为离群值, 质量控制就是挑出离群点的过程<sup>[6]</sup>, 即

$$\frac{T_b^{obs} - T_b^{model} - \mu_{bw}}{STD_{bw}} \geq Z \quad (1)$$

其中, “Z”称为Z评分 (Z-score)。

图1显示了2011年4, 6, 7月的MWTS通道3和4以及AMSU-A通道7和9质量控制前后的月平均全球亮温偏差和标准差。MWTS通道4和AMSU-A通道9的Z-score值取为2, 而MWTS通道3和AMSU-A通道7的

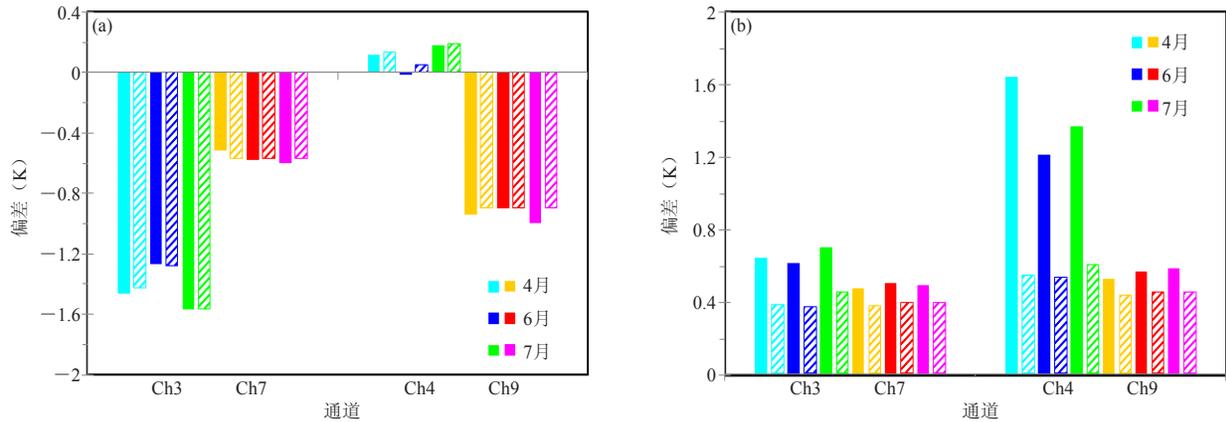


图1 2011年4, 6, 7月的风云三号B星 MWTS通道3和4以及NOAA-18 AMSU-A通道7和9在质量控制前后的观测减去模拟亮温的全球偏差 (a) 和标准差 (b)

Z-score值设为1.5。MWTS通道3和4的离群点分别占资料总量的10.6%和15.7%；而AMSU-A通道7和9分别为8.6%和10.2%。MWTS通道3的负全球偏差大约为AMSU-A通道7全球偏差的两倍。MWTS通道4是正偏差，而AMSU-A是负偏差。质量控制前，MWTS两个通道的标准差都大于AMSU-A对应通道，而质量控制后，它们的标准差相当。

图2说明了MWTS和AMSU-A大气探测通道全球偏差和标准差的纬度依赖性。从图中可以明显看出在降轨阶段，MWTS通道4在40°N附近有较大的正偏差，而且所有纬度带的标准差都高于AMSU-A通道9。下文详

细分析了MWTS通道4的异常偏差来源。

图3是2011年4月2—8日30°S—30°N之间的MWTS和AMSU-A观测、模拟以及观测减去模拟的差的平均值随扫描角的变化。跨轨迹横扫的一个重要特点是观测值会随着扫描角的变化而变化，这是因为卫星探测仪器到探测视场的光学路径随扫描角的增大而增大，大气吸收增多，从而导致权重函数的峰值上移。MWTS通道3和AMSU-A通道7的权重函数峰值大约在300hPa，大气温度随高度增加而降低，使得通道3和7的观测亮温随扫描角的增大而减小。而MWTS通道4和AMSU-A通道9的权重函数峰值大约为90hPa，在

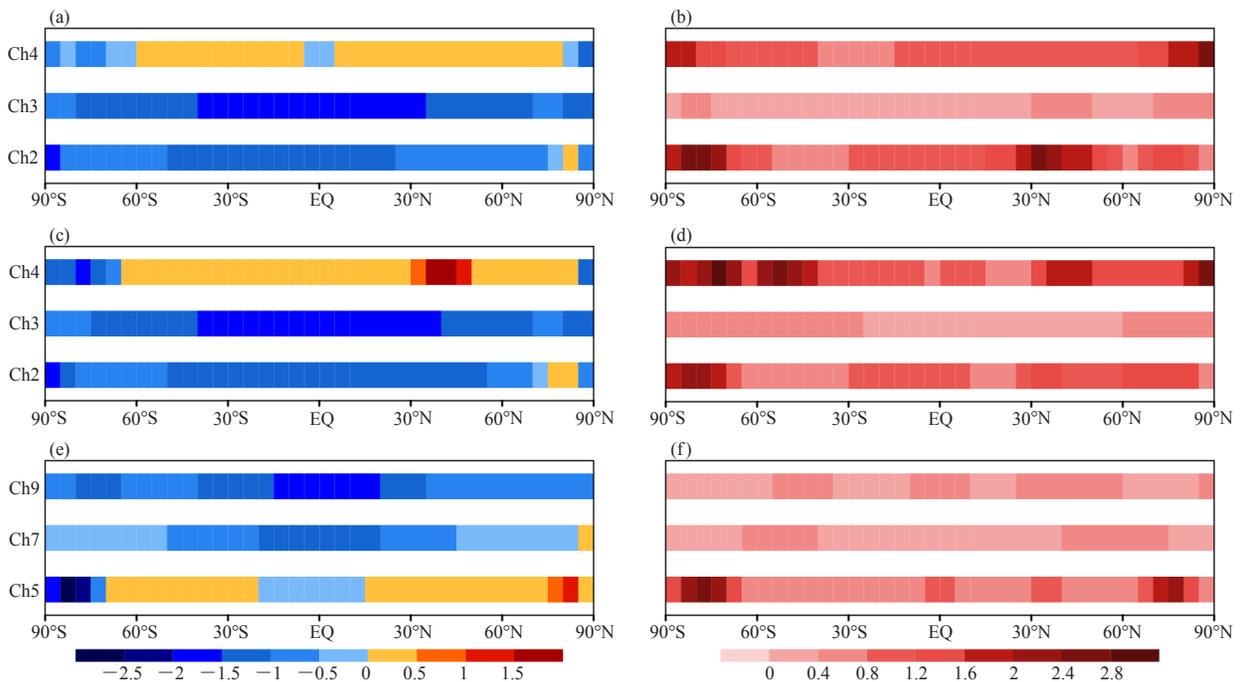


图2 2011年4月所有观测减模拟在5°的纬度带上的计算出的随纬度变化的偏差 (a, c, e) 和标准差 (b, d, f) (a-b) 是MWTS通道2~4的升轨阶段的资料；(c-d) 是MWTS通道2~4降轨阶段的资料；(e-f) 是AMSU-A通道5, 7, 9所有资料

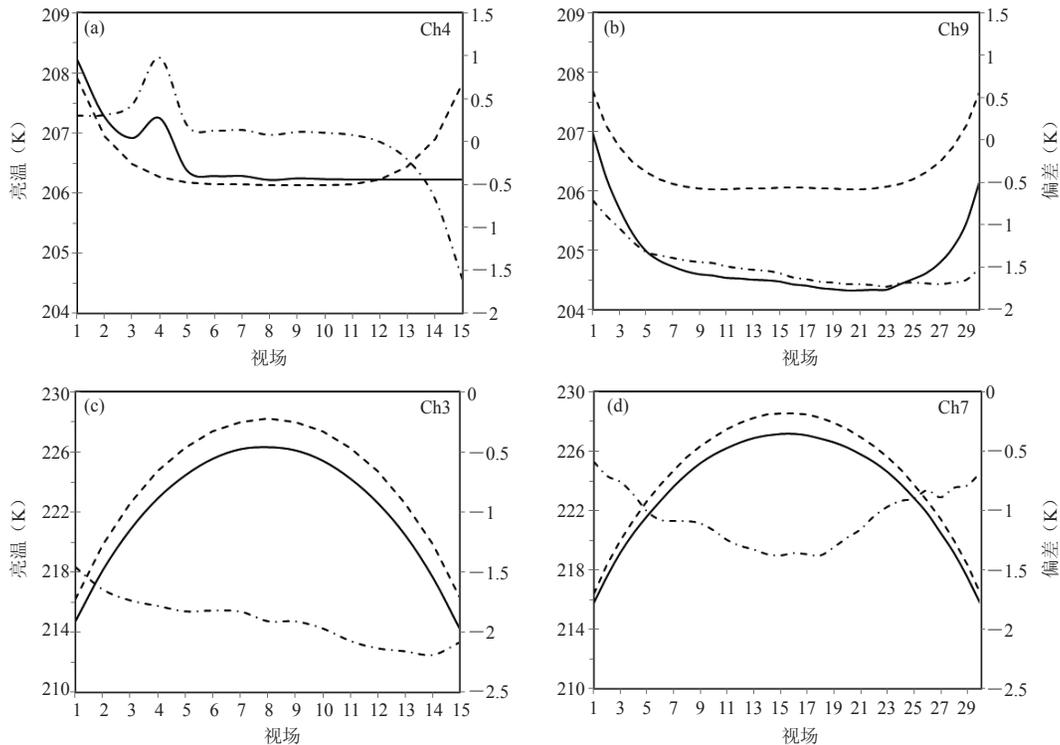


图3 2011年4月2—8日30°S—30°N之间MWTS通道3, 4 (a, c) 以及AMSU-A通道7, 9 (b, d) 的所有观测 (实线)、模拟亮温 (虚线) 以及它们的差 (点划线) 的平均值随扫描视场的变化

平流层低层, 温度随高度增加而递增, 所以观测亮温随扫描角增大而增大。另外, 还需要注意的两个特征是: (1) MWTS通道4的第4个观测视场亮温异常偏高; (2) MWTS通道4在扫描线末端的观测存在非对称性。所有通道的观测减去模拟的扫描偏差都是非对称的。

### 3.2 MWTS 通道 4 的异常观测

图4是任意选取3天的MWTS通道4观测减去模拟的亮温差的全球分布。所有3个月内降轨阶段的观测减去模拟的差在北半球的一个狭窄的纬度带上始终异常偏高 (偏高2~3K)。而且这个异常正偏差发生的纬度带在4月比6月、7月偏高。图5分别给出了升轨 (下午2时)、降轨 (上午2时) 阶段MWTS通道4观测减去模拟的偏差在2°的纬度带上的日变化。由图可见, 这个异常的正偏差每天都存在。

上文提到图3中另一个特征是通道4第4个观测视场的偏差全球系统性地高于临近视场的偏差, 这种偏差也反映了亮温偏差分布具有扫描角依赖性。为了清楚地说明第4个视场的异常偏差来自于观测, 图6给出了2011年4月2日25°S—25°N之间观测、模拟及观测减去模拟的差。可以看到, 无论升轨还是降轨, 第4个视场的观测都异常高于模拟亮温值。同时可以看到, 模拟的亮温值关于扫描角十分对称, 而观测是非对称的, 扫描线开始的视场观测值比末端的观测值要高

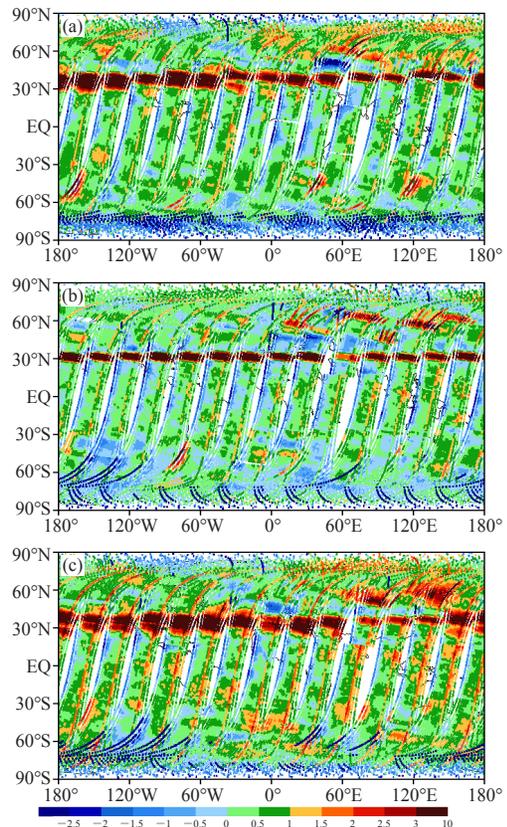


图4 风云三号B星MWTS通道4的观测减去模拟亮温的差的全球分布图: (a) 2011年4月30日; (b) 2011年6月30日; (c) 2011年7月30日

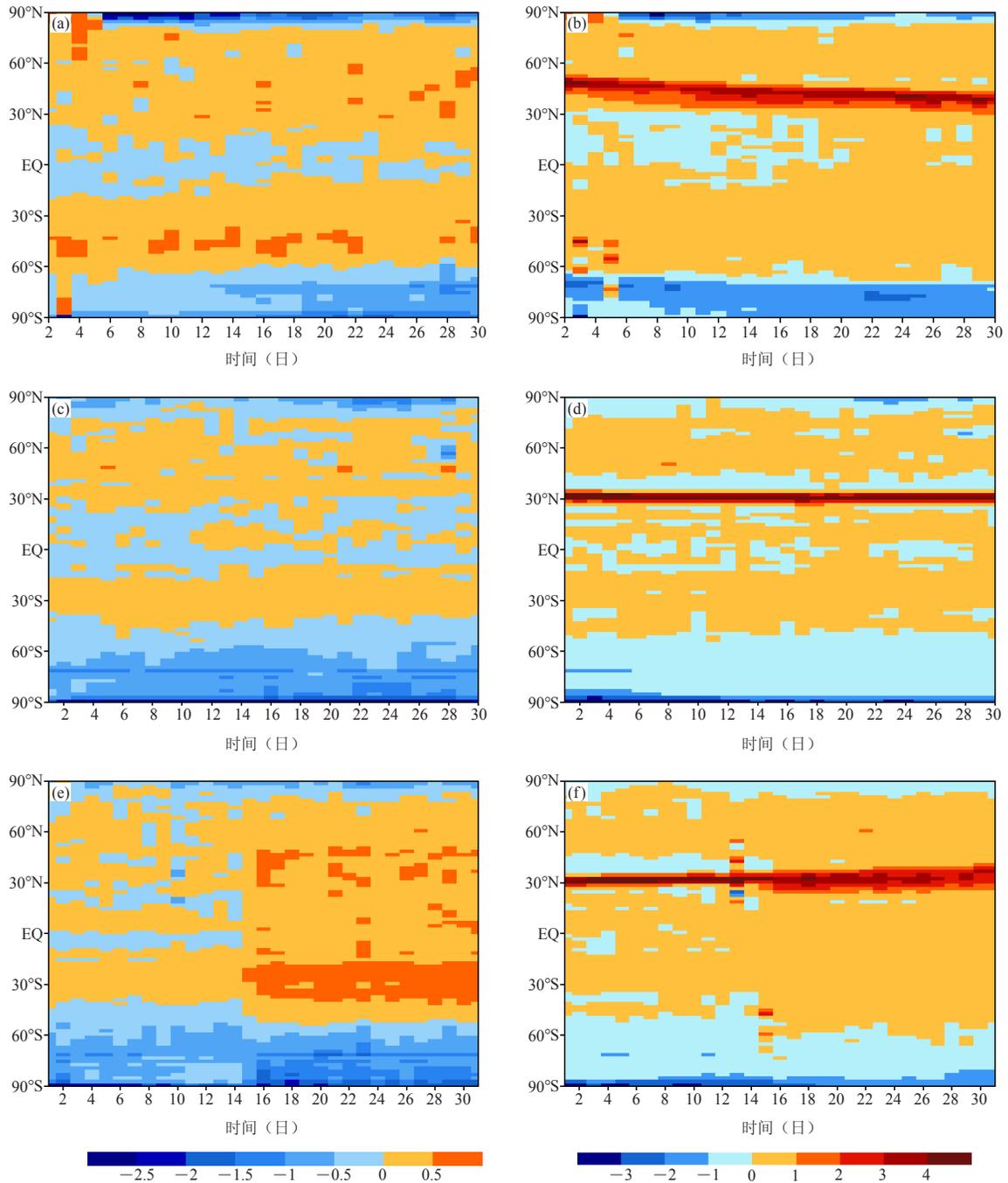


图5 风云三号B星MWTS通道4的观测减去模拟的偏差在 $2^{\circ}$ 纬度带上在升轨 (a, c, e) 和降轨 (b, d, f) 阶段的日变化: (a, b) 2011年4月; (c, d) 2011年6月; (e, f) 2011年7月

1~2K。同样，图7给出了观测减去模拟的偏差随视场的日变化，证实了第4视场异常偏暖的持续性，同时还说明了视场14和15存在异常的冷偏差。第4个观测视场的异常偏差在2011年7月最强。

MWTS通道4扫描偏差非对称性可能是受到卫星天线旁瓣的影响。因为天线旁瓣效应对地面目标和其他的发射源（如卫星平台本身）的亮温差十分敏感，

如果发射源的温度比地面目标低，扫描线末端的观测亮温可能会低。至于第4视场的观测异常，可能是其他仪器的发射频率干扰造成的。但这些是否是真正的原因还有待继续研究。

### 3.3 MWTS 通道 3 和 AMSU-A 通道 7 偏差的纬度依赖性

图8是2011年4月2日MWTS通道3和AMSU-A通道

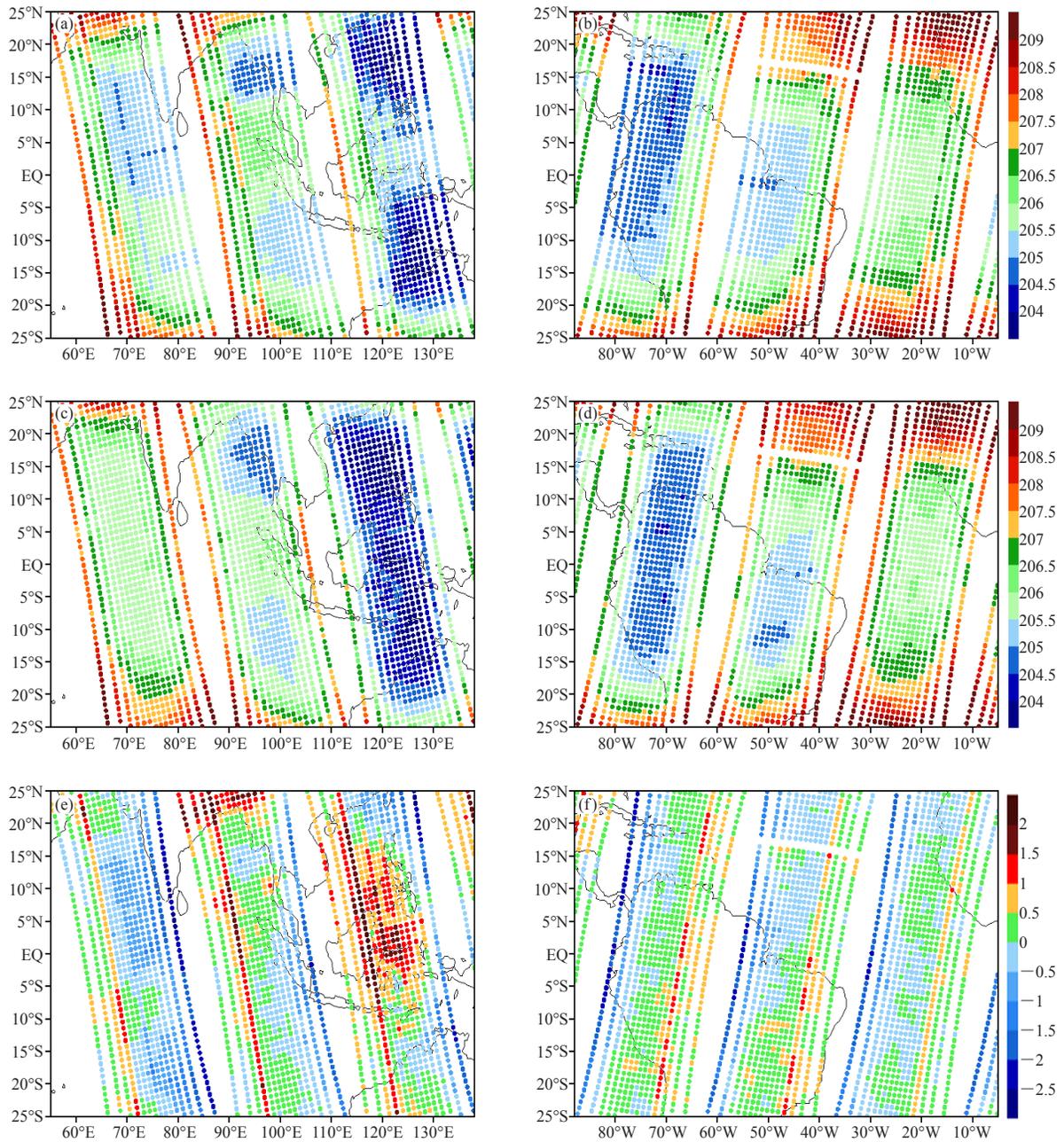


图6 2011年4月2日MWTS通道4的其中3条轨道低纬部分的观测亮温 (a, b), 模拟亮温 (c, d) 以及观测减去模拟的差 (e, f) 在升轨 (a, c, e) 和降轨 (b, d, f) 阶段的分布

7的观测减去模拟的亮温差的全球分布。很显然，与AMSU-A通道7相比，MWTS通道3的扫描偏差的非对称性更明显。MWTS通道3和AMSU-A通道7在中低纬都是负偏差，而在高纬呈现了部分正偏差。图9是观测减去模拟的亮温差随纬度变化的散点图，从图中同样可以看出偏差存在很强的纬度依赖性。赤道附近的偏差比极区低了约 $1^{\circ}$ 。

图10a是2011年4月2日06时（世界时）对流层顶的气压，图10b是对流层顶气压和MWTS通道3的权

重函数峰值气压的差。由图可见，气压差在中低纬为负，而在高纬为正。图8中的MWTS通道3的偏差和图10b中的气压差表现出了很高的相关性。为了阐明MWTS通道3偏差的纬度依赖性，图11给出了视场 $1\sim 8$ 的权重函数峰值以及对流层顶的高度随纬度的变化。由图可见，从赤道到中纬度 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}$ ，权重函数峰值高度低于对流层顶高度，并且跟扫描角大小有关。近星下点视场观测更多的贡献来自对流层，而从

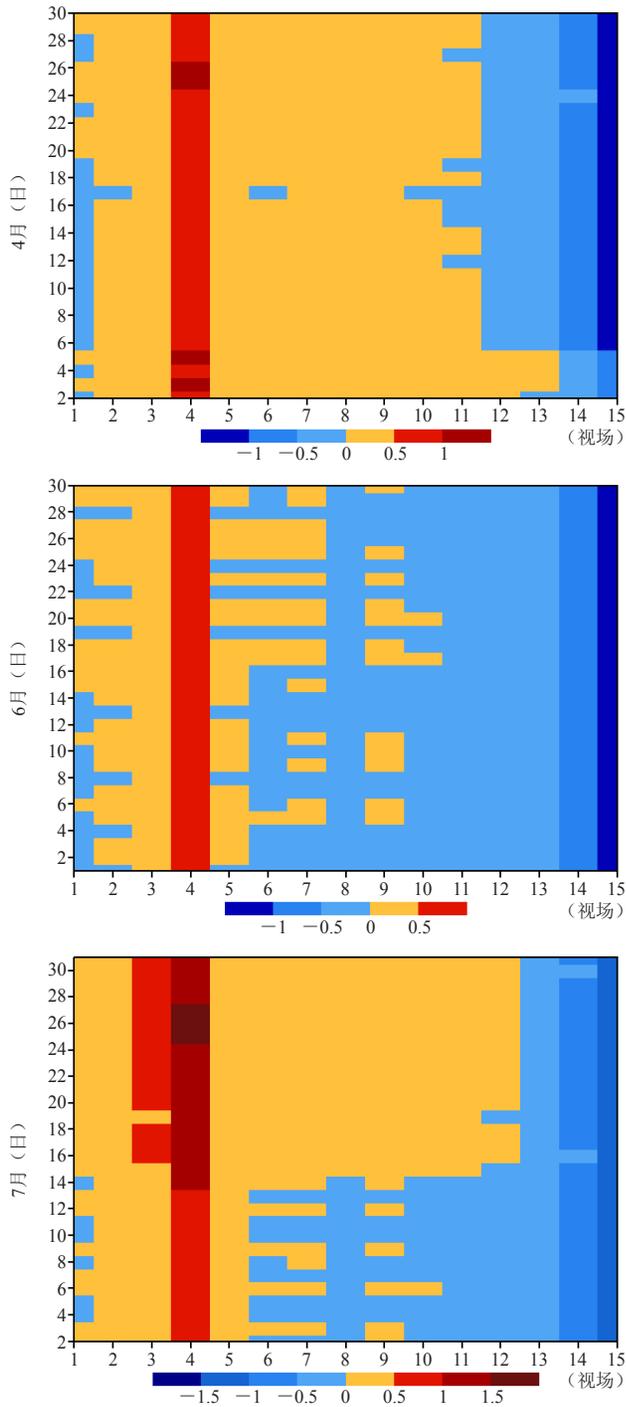


图7 2011年4, 6, 7月MWTS通道4在不同观测视场上全球观测亮温偏差的日变化

高度之上, 说明通道3的观测贡献主要来自平流层。MWTS通道3和AMSU-A通道7的这种偏差分布样式很可能反映了6h预报场廓线得到的观测减去模拟的偏差在对流层高层和平流层低层符号相反。美国环境预报中心全球预报系统的6h预报场在对流层顶处的垂直分辨率比较低, 这很有可能会导致对流层顶以下通道的冷偏差。

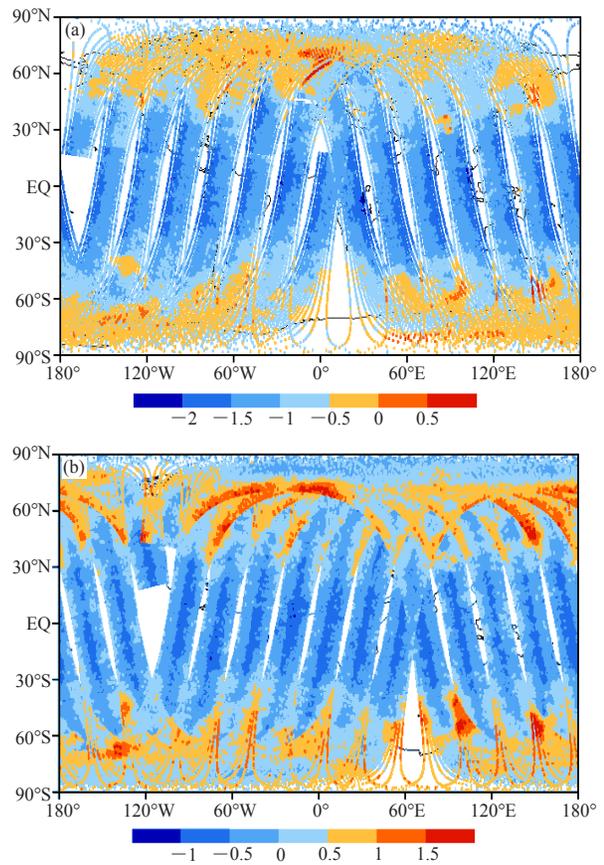


图8 2011年4月2日MWTS通道3 (a) 和AMSU-A通道7 (b) 的观测减去模拟的亮温差的全球分布

## 4 质量控制算法

### 4.1 冷空计数值污染

下面进一步分析北半球中纬度异常暖偏差的来源。为简便起见, 仅仅以2011年4月2日前5条轨道为例。图12比较了MWTS通道4和AMSU-A通道9的观测亮温、模式模拟亮温以及观测减去模拟亮温的差。两个通道模拟亮温的整体特征类似, 主要区别在于MWTS的观测亮温在40°N附近高于AMSU-A的观测以及MWTS的模拟亮温, 而在南半球极区低于AMSU-A和MWTS模拟亮温。

MWTS是自定标辐射计。参考冷空和内部黑体的观测, 采用两点定标方程进行实时在轨定标。在研究北半球中纬度通道4暖偏差来源的过程中, 发现这个纬度带上的扫描线的冷空计数值系统地高于正常值(图13)。风云三号B星MWTS仪器供应商以及中国气象局国家卫星气象中心MWTS仪器定标团队也正在调查通道4出现观测异常的原因, 希望最终可以开发和建立一套订正方案, 使之可以应用于数值天气预报。但是当下, 提出来如下的控制方法来标记和剔除受污染的观测资料。

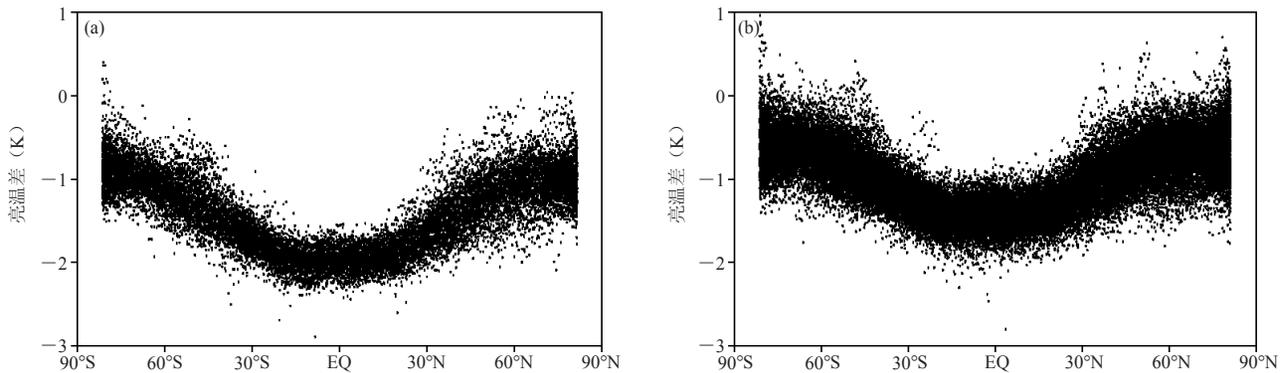


图9 2011年4月2—5日MWTS通道3 (a) 和AMSU-A 通道7 (b) 星下点观测减去模拟的亮温差随纬度的变化

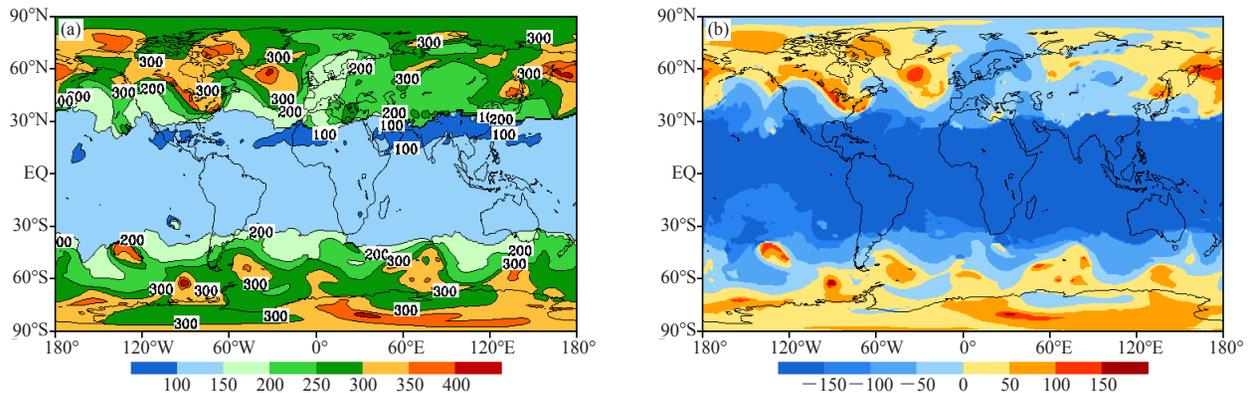


图10 2011年4月2日06时(世界时)对流层顶的气压(a)和对流层顶的气压与MWTS通道3的权重函数峰值气压的差(b)

## 4.2 质量控制

目标观测辐射值 $R_s$ 可以由如下两点定标方程得到<sup>[7]</sup>:

$$R_s = R_w + \frac{C_s - \bar{C}_w}{G} + \mu \frac{(C_s - \bar{C}_w)(C_s - \bar{C}_c)}{G^2} \quad (2)$$

其中,  $R_w$ 是定标黑体的辐射,  $C_s$ 是目标观测体的辐射计数值(地球或大气),  $\bar{C}_c$ 和 $\bar{C}_w$ 分别是连续几条扫描线的冷暖定标辐射计数值的加权平均值, 增益变量 $G$ 定义如下:

$$G = \frac{\bar{C}_w - \bar{C}_c}{R_w - R_c} \quad (3)$$

其中,  $R_c$ 是冷空目标体的辐射, 其对应冷空温度2.73K。

不同通道的非线性定标项系数 $\mu$ 在3个不同仪器温度的值可以通过最小二乘拟合方法得到, 其余仪器温度上的 $\mu$ 值可以由这3个值插值获得。

从式(2)和式(3)可以看到冷体计数值的变化会影响增益变量 $G$ 。如果测得的冷空辐射计数值异常高(即受到外部源的污染, 比如月光污染), 则 $G$ 将下降。因此提出一种经验的控制方法来去除相对小的 $G$ 。图14是图12中5条轨道的 $G$ 随纬度的变化。升降轨分别用蓝色和红色实线表示, 傅里叶变换的前3个谱

重构的 $G$ 用黑色实线表示。该质量控制剔除了小于重构的 $G$ 减去0.5的差的观测(见图15a和b中绿色点)以及大于重构的 $G$ 加上0.8的差的观测资料(图15a和b中紫色点)。根据图15a中MWTS通道4观测和模拟亮度

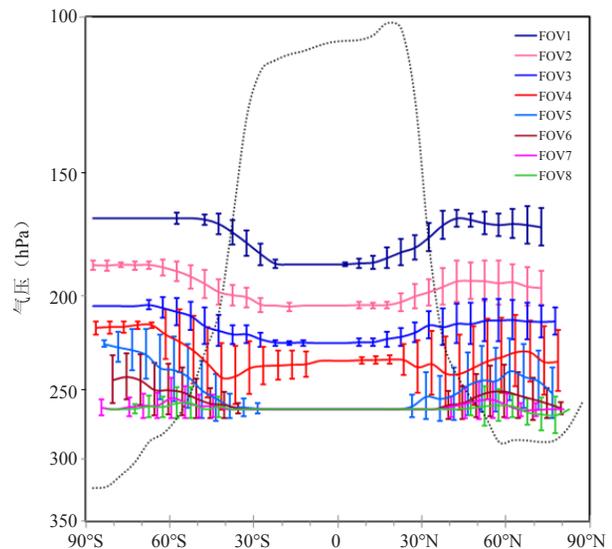


图11 2011年4月2日06时(世界时)MWTS通道3视场1~8的权重函数峰值的平均值(实线)与标准差(垂直线表示1倍标准差)随纬度的变化。黑色虚线反映了对流层顶的气压随纬度的变化

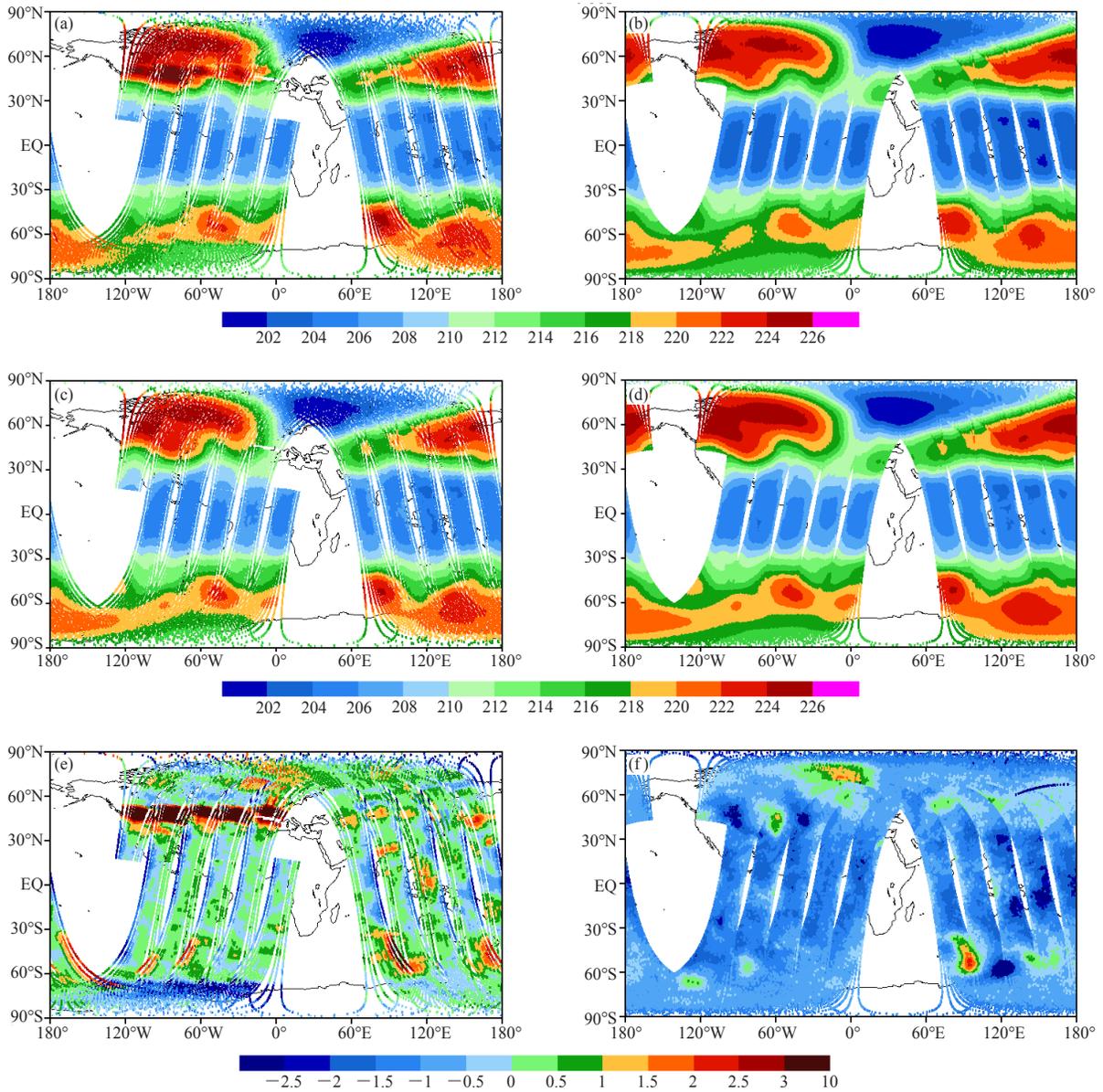


图12 2011年4月2日MWTS通道4 (a, c, e) 和AMSU-A通道9 (b, d, f) 前5条轨道的观测亮温 (a, b)、模拟亮温 (c, d) 以及观测减去模拟亮温差 (e, f) 的全球分布

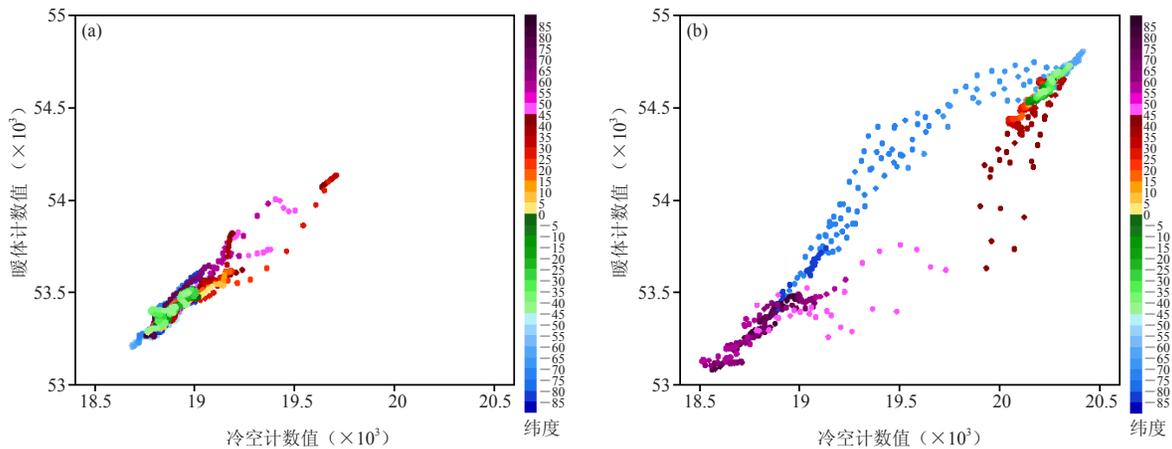


图13 2011年4月2日MWTS通道4前5条轨道定标暖体计数值与冷空计数值分别在升轨 (a) 和降轨 (b) 阶段的散点图

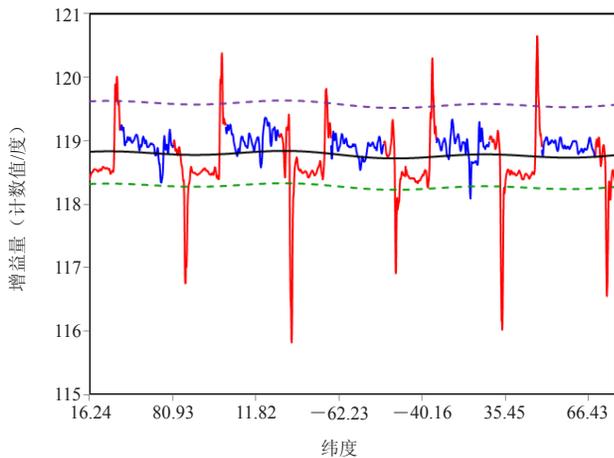


图14 2011年4月2日MWTS通道4前5条轨道(见图12)观测增益量随纬度的变化,升降轨阶段分别用蓝色和红色实线表示。黑色曲线是用傅里叶变换的前3个谱重构的增益量。紫色和绿色虚线分别表示在重构的增益量基础上加0.8计数值/度和减去0.5计数值/度

的散点分布,剔除了所有视场14和15的资料。最后根据Z-score值进一步去掉了用蓝色点表示的Z-score大于2的观测值。图15c是质量控制后可以应用于数值天气预报的观测资料。

为了检验用增益变量 $G$ 做质量控制的优越性,绘制了Z-score在 $-2\sim 2$ 之间的观测分布(图16a)以及在 $G$ 的基础上质量控制去掉的但没有能在图16a中去掉的观测的分布(图16b)。因此,证实了使用变量 $G$ 来对MWTS通道4的观测做质量控制的有效性。

## 5 总结和结论

风云三号是风云一号系列卫星之后的第二代极轨气象卫星。风云三号B星是该系列中第二颗研究与实验卫星,并且将以每两年发射一颗卫星的速度再发射5颗风云三号极轨系列气象卫星,旨在提供环境监测资料。MWTS是载于风云三号A/B星上一个

主要的探测仪器。NOAA-18和风云三号B星都是下午窗口极轨卫星,并且越赤道地方时也很接近,所以用NOAA-18 AMSU-A的观测资料检验MWTS的仪器性能是一个理想的选择。本文比较分析了4,6,7月的MWTS, AMSU-A观测以及模拟亮温。主要发现包括:(1) MWTS的4个通道的观测资料总体上与NOAA-18 AMSU-A的对应通道观测相当;(2) MWTS通道4的冷体计数值在北半球中纬度的异常跳跃引起了观测资料的暖偏差;(3) MWTS通道4第4个视场的观测亮温呈现全球系统性偏暖;(4) 第14和15观测视场的观测亮温异常偏冷;(5) MWTS通道3和AMSU-A通道7观测减去模拟的偏差都存在很强的纬度依赖性。为了有效地将MWTS观测应用于数值天气预报和气候研究,提出了简单的质量控制方法剔除上述有问题的观测资料。

NOAA-18和MetOp-A (Meteorological Operational Satellite) 分别于2005年5月20日、2006年10月19日发射成功。结合两颗卫星,探测器AMSU-A一天可以提供4次全球大气温度垂直廓线和地表参数。类似地,结合风云三号A/B星也可以得到每天4次的全球观测。NOAA-18, 19和MetOp-A卫星观测资料在天气预报和气候研究中起到了十分重要的作用并将继续发挥重要作用。但是自2010年8月起, MetOp-A AMSU-A的通道7出现故障,由于MWTS通道3与AMSU-A通道7具有相同的中心频率,并且MetOp-A和风云三号A星的地方时非常接近,所以可以用MWTS通道3的资料来替代AMSU-A通道7。同样,风云三号B星MWTS的资料可以作为NOAA-18 AMSU-A的备份。

卫星生命期是有限的,使用卫星交叉定标,可以将风云三号A/B星的观测与34年的MSU/AMSU-A资料相链接<sup>[8,9]</sup>,延长MSU气候资料集。我们需要进一步

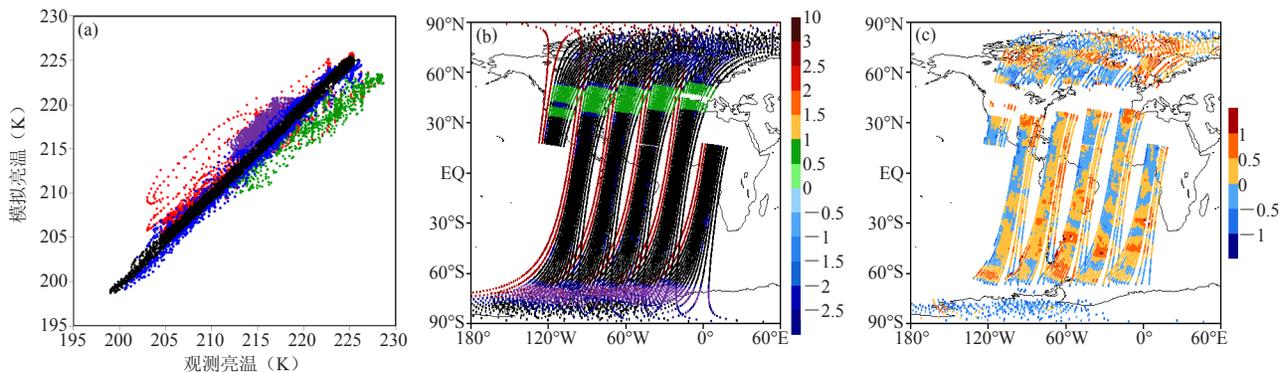


图15 (a) 2011年4月2日MWTS通道4前5轨(见图12)的观测亮温与模拟亮温的散点图。绿色、紫色、红色和蓝色分别表示增益量相对小(图14中绿色线以下),相对大(图14中紫色线以上),大扫描角的视场(视场14和15)以及被Z-score标记出的离群点;(b)是(a)中所有资料点的空间分布;(c)是(a)和(b)中黑色资料点的观测减去模拟亮温的差的空间分布

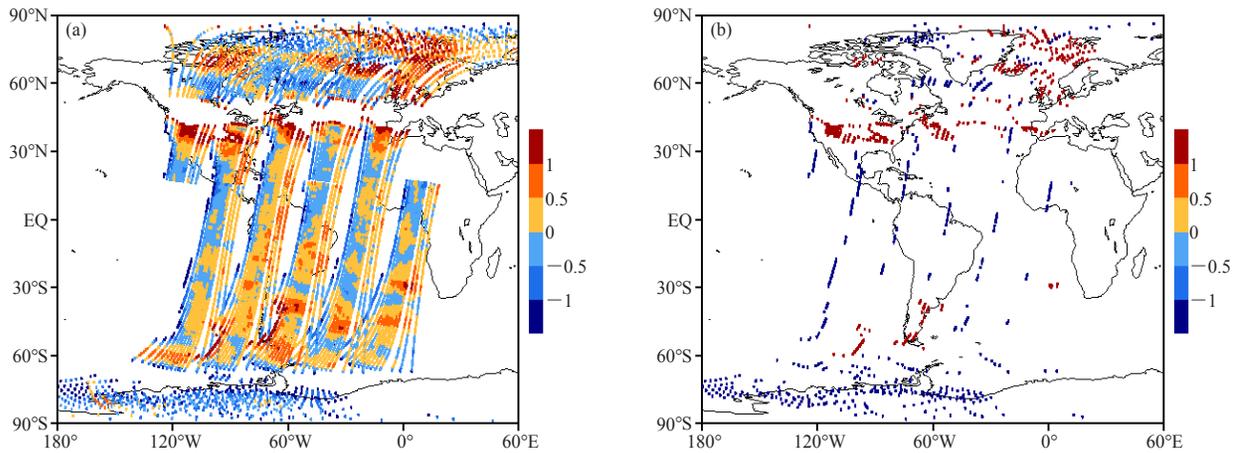


图16 (a) MWTS通道4的观测减去模拟亮温差的Z-score在-2~2之间的所有资料的空间分布; (b) 在图15c中去掉的而仍然存在于图16a中的观测的空间分布

分析和评估风云三号B星MWTS资料, 使得MWTS在天气与气候监测预报中的效益最大化。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] Wang X, Zou X, Weng F, et al. Using NWP models to remove frequency shift induced bias in FY-3A MWTS measurements. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, in press.
- [3] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. Characterizing the FY-3A microwave temperature sounder using the ECMWF MODEL. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, 28: 1373-1389.
- [4] Weng F. Advances in radiative transfer modeling in support of satellite data assimilation. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 3799-3807.
- [5] 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.
- [6] Zou X, Zeng Z. A quality control procedure for GPS radio occultation data. *J Geophys Res*, 2006, 111: D02112.
- [7] Mo T. Calibration of the advanced microwave sounding unit-A radiometers for NOAA-L and NOAA-M. NOAA Technical Report NESDIS, 1999.
- [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: 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: 1153-1170.