

利用 AMSU-A 亮温估测西北太平洋区域 热带气旋强度

刘 喆¹ 李万彪¹ 韩志刚² 姚志刚² 张凤英³ 朱元竞¹

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

2 北京应用气象研究所, 北京 100029

3 国家卫星气象中心, 北京 100081

摘 要 先进的微波垂直探测器 AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit)能接收到穿透一定厚度云层的微波辐射信息, 适合于分析热带气旋暖核特征。由辐射传输方程和静力学方程可知, 气旋暖核强度同中心海平面气压距平相关联。本文利用搭载于极轨气象卫星 NOAA-16/17/18 上的 AMSU-A 亮温资料, 根据 2002~2006 年之间发生在西北太平洋区域热带气旋的移动路径, 匹配出 47 个热带气旋的 183 时次个例, 并将各时次的暖核最大亮温距平同气象业务部门发布的热带气旋强度报告值建立统计回归方程。为进一步提高估测精度, 在计算亮温距平过程中, 提出用于修正扫描点分辨率不均匀所带来取样偏差的方法, 并综合利用 AMSU-A 的 7、8 双通道信息来进行估测, 利用修正后算法得到暖核亮温距平同气旋强度之间的相关系数为 0.80, 标准偏差为 12.2 hPa, 对近年来影响我国较大的两个台风(0414“云娜”和 0608“桑美”)进行个例估测, 平均偏差约 6 hPa。

关键词 AMSU-A, 西北太平洋, 热带气旋强度, 海平面气压, 暖核

文章编号 0001-5733(2008)01-0051-07

中图分类号 P407

收稿日期 2007-06-26 2007-10-29 收修定稿

Estimating the intensity of tropical cyclone in Western North Pacific basin with AMSU-A brightness temperature

LIU Zhe¹, LI Wan-Biao¹, HAN Zhi-Gang², YAO Zhi-Gang², ZHANG Feng-Ying³, ZHU Yuan-Jing¹

1 Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

2 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China

3 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) is well suited to analysis the warm core structure of tropical cyclone (TC) because certain wavelengths of microwave energy are able to penetrate the cirrus above TC. Through the radiative and hydrostatic equation, the upper tropospheric brightness temperature anomalies of TC are related to surface pressure anomalies. With the track of each TC happened in Western North Pacific basin during the 2002~2006 seasons, 47 TCs and 183 cases were collected according to the overpass of AMSU-A flown aboard NOAA-16/17/18. They were used to develop a linear statistical relationship between the warm core anomalies and the TC intensity report from operational centers. Further improvements in correlation, and intensity estimate accuracy, were possible through application of combining the information from AMSU-A channel 7 and 8 together and a proposed algorithm, which was devised to try to correct the bias from receiving warm core microwave radiation due to the unevenly distribution of AMSU-A footprints, and the correlation coefficient and standard deviation were found to be 0.80 and 12.2 hPa, respectively. Independent application of the corrected algorithm in two typhoons (0414 Ranim and 0608 Saomai), which influenced China heavily in

recent years, showed the mean absolute errors were about 6 hPa.

Keywords AMSU-A, Western North Pacific, Tropical cyclone intensity, Sea level pressure, Warm core

1 引言

热带气旋是指发生在热带洋面上中心气压极低,具有暖心性结构的天气系统,精确估测出热带气旋强度对于发布预警信号及减小灾害损失至关重要。目前,绝大多数气象业务部门利用 Dvorak 技术来估测热带气旋强度,该技术主要根据一系列经验规则和约束条件,将热带气旋在卫星云图上表现出的云系结构特征同其强度联系起来^[1]。但是,Dvorak 技术在某些云型的识别上依赖于预报员的主观性判断,它还不能完全客观地反映事实,甚至会低估那些强度发生迅速变化的气旋^[2]。除此以外,热带气旋在发展过程中,其眼区上空通常覆盖有卷云或层云,这使得主要基于可见光和红外云图识别的 Dvorak 技术无法得到气旋的内部信息,尤其是表征其强度的暖核结构特征。相对而言,波长较长的微波能穿透一定厚度的云层,而且对包括大气温度、湿度等大气参数的变化比较敏感,能反映出气旋内部的辐射信息。

在 20 世纪 70 年代初,随着加载有扫描微波辐射计 SCAMS (Scanning Microwave Spectrometer) 的极轨气象卫星发射升空,人们开始关注微波资料在热带气旋研究中的应用。Rosenkranz 等^[3]利用风云 6 号卫星上的 SCAMS 对 June 台风进行探测时,首次发现台风位于对流层中上层的暖核。Kidder 等^[4]通过进一步的研究表明,由卫星微波通道探测的暖核亮温同气旋中心海平面气压及近中心最大风速度密切相关。Velden 等^[5]利用微波垂直探测器 MSU (Microwave Sounding Unit) 探测的亮温及其反演得到的大气温度廓线来估测热带气旋强度,所得结果同气象侦察飞机实测的气旋强度值较接近。由于这些微波垂直探测器的空间分辨率较低,在很大程度上影响了最后的估测精度。1998 年,具有更多遥感通道和更高空间分辨率的 AMSU 被搭载升空, Kidder 等^[6]总结了 AMSU 在监测热带气旋上的优势,并介绍了利用 AMSU 反演温湿廓线产品计算气旋中心最低海平面气压和梯度层切向风场的方法。Demuth 等^[7]评价了 AMSU 在估测热带气旋强度上的应用,指出 AMSU 不仅能得到与 Dvorak 技术相当的估测结果,还能提供热带气旋不同等级风圈半径。

2 理论基础

热带气旋在发展初期,初始扰动触发了洋面上空气的抬升运动,暖湿气流通过潜热释放和感热方式加热上部空气,并逐渐在热带气旋中高层形成暖核;另一方面,抬升运动也使得底层中心气压下降,周围的暖湿气流不断向中心辐合上升,进一步增强暖核强度。AMSU-A 是 AMSU 的重要组成部分,它包括 12 个中心频率在氧气 56 GHz 微波吸收带附近的通道,主要用于反演从地表到高层的温度廓线。它的第 7、8 通道所对应权重函数峰值就位于 250~200 hPa 附近,在这个高度层绝大多数水滴都凝固成冰晶,而冰晶对于该波段上行微波辐射的吸收作用很小^[8]。因此,根据 AMSU-A 所测得热带气旋在对流层上层暖核的亮温值,就可以大致估测出热带气旋强度。

对于最大贡献层在对流层上层的某一特定波段,AMSU-A 接收地表辐射项很小,可以忽略不计。因此,它在第 i 通道接收到的辐射率转换成亮温 $TB(i)$ 可表示为

$$TB(i) = \int_0^{\infty} T(z)w_i(z)dz. \quad (1)$$

根据气象侦察飞机实际探测结果^[9],在同一海域热带气旋内部的气温 T 可以近似表示为 $T(r, z) = T_e + \alpha(r)T'(z)$, 其中 T_e 为气旋环境场气温, $T'(z)$ 是该海域热带气旋的平均温度距平廓线, $\alpha(r)$ 反映出气旋发展强度的大小,仅与径向距离 r 相关。代入(1)式,并忽略权重函数 $w_i(z)$ 随温度的微小变化,可得:

$$TB(i) = \int_0^{\infty} T_e(z)w_i(z)dz + \int_0^{\infty} \alpha(r)T'(z)w_i(z)dz \\ = TB_e(i) + \alpha(r) \int_0^{\infty} T'(z)w_i(z)dz. \quad (2)$$

由于热带气旋是暖性低压系统,上升气流到达一定高度后必然呈反气旋辐散流出,通常认为在对流层顶 50 hPa 气层附近不受气旋环流影响^[10],即它在热带气旋尺度范围内的高度倾向可以忽略。假设热带气旋在中心区域和最大风圈以外的环境场满足流体静力平衡,就可以利用静力学方程通过对中心和环境场的两次积分得到气旋中心海平面气压 P_s 。

的表达式：

$$\begin{aligned} \ln P_s &= \ln P_{50} + \frac{g}{R} \int_0^{H_T} \frac{dz}{T(z)} \\ &= \ln P_{50} + \frac{g}{R} \int_0^{H_T} \frac{dz}{T_e + aT'(z)} \\ &= \ln P_{50} + \frac{g}{R} \int_0^{H_T} \frac{dz}{T_e} - a(r) \frac{g}{R} \int_0^{H_T} \frac{T'(z)}{T_e^2} dz \\ &= \ln P_e - a(r) \frac{g}{R} \int_0^{H_T} \frac{T'(z)}{T_e^2} dz, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 P_e 为环境地表压强, R 为比气体常数, H_T 为热带气旋尺度范围内 50 hPa 气层的位势高度. 结合 (2) 式, 便可得到 P_s 同环境场气压以及暖核亮温梯度之间的关系式 $P_s = P_e - e^{-A\Delta TB(i)}$, 在 $-A\Delta TB(i)$ 较小的情况下, 上述关系式可写成：

$$\Delta P_s = 1 + A\Delta TB(i), \quad (4)$$

其中 $A = \frac{g}{R} \frac{\int_0^{H_T} \frac{T'(z)}{T_e^2(z)} dz}{\int_0^\infty T'(z)u(z) dz}$, 它同热带气旋所处的环

境场及所选通道的权重函数有关. 从 (4) 式可以看出: 由 AMSU-A 观测得到的暖核同环境场之间的亮温距平值同热带气旋海平面气压距平值之间线性相关.

3 资料与方法

本文利用到的资料包括搭载于 NOAA-16/17/18 卫星并经过定标定位及临边效应调整后的 AMSU-A level-1c 亮温数据, 中国气象局上海台风研究所提供的从 2002 ~ 2006 年之间热带气旋的定位和定强资料, 以及由 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料提供的海平面气压.

由于地面站接收 AMSU 资料的覆盖范围有限,

本文只对路径经过西北太平洋 $20^\circ N \sim 40^\circ N, 110^\circ E \sim 135^\circ E$ 区域范围内的热带气旋进行数据匹配分析. 由于热带气旋低层风场分布不均匀, 本文以气旋的中心最低海平面气压 (MSLP, Minimal Sea Level Pressure) 作为其强度标准. 根据热带气旋在相邻时次的定位和定强信息, 可以线性插值出 AMSU 过境时气旋的中心位置和强度. 由于热带气旋在移动过程中, 有可能配合其他天气系统出现加速或原地打转等现象, 因此, 选取距离气旋中心 100 km 范围内所有扫描点, 并将其中通道 7 亮温最大值所对应的扫描点重新作为热带气旋中心, 以消除由于插值定位所带来的偏差. 根据西北太平洋区域热带气旋在卫星云图中表现出的云系特征, 本文选取距热带气旋中心 500 km 范围内扫描点为研究对象, 将距离气旋中心 400 ~ 500 km 范围内扫描点的平均亮温作为环境场亮温值 $TB_e(i)$. 这样一来, AMSU-A 第 i 通道的亮温距平可表示为 $\Delta TB(i) = TB(i) - TB_e(i)$, 而海平面气压距平 (ΔP_s) 则为 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料提供的环境场海平面气压平均值与台风报告中 MSLP 之差.

通过分析 2002 ~ 2006 年之间发生在西北太平洋区域所有热带气旋的移动路径, 结合 AMSU-A 过境时间和扫描范围, 共匹配筛选出 47 个热带气旋 (如表 1) 的 183 时次数据. 按照国家气象局最新的热带气旋强度标准来划分, 达到热带风暴 (TS) 级别的时次个数为 39, 强热带风暴 (STS) 级别时次个数为 38, 台风 (TY) 级别时次个数为 47, 强台风 (STY) 级别时次个数为 27, 超强台风 (Super TY) 时次个数为 12, 其中最强时次个例的 MSLP 为 910 hPa, 最弱时次为 1000 hPa, 所选取个例具有一定代表性, 其强度分布如图 1 所示.

表 1 本文利用到的从 2002 ~ 2006 年热带气旋

Table 1 Tropical cyclone dataset during the 2002 ~ 2006 used in this paper

年份	热带气旋名称								
2002	浣熊	查特安	娜基莉	风神	凤凰	北冕	森拉克	黑格比	
2003	鲸鱼	莲花	浪卡	苏迪罗	伊布都	天鹅	莫拉克	艾涛	环高
	科罗旺	杜鹃	鸣蝉	彩云					
2004	妮妲	康森	电母	蒲公英	圆规	云娜	鲇鱼	艾利	桑达
	海马	蝎虎							
2005	海棠	麦莎	珊瑚	泰利	卡努	龙王			
2006	艾云尼	碧利斯	格美	派比安	桑美	宝霞	珊珊	象神	西马伦

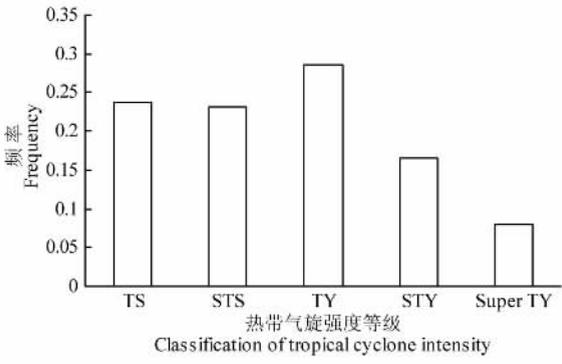


图 1 所选取时次热带气旋强度分布

Fig. 1 Distribution of the collocated cases' intensity

4 结果分析

图 2a 是利用通道 7 的亮温距平同海平面气压距平建立的统计相关图,可以看出,随着热带气旋强度的增强,亮温距平值呈现上升趋势,匹配出的总样本数 (N) 为 183, 两者的线性相关系数 (R) 为 0.68, 标准偏差 (SD) 为 16.8 hPa. 从图中还可以看出一些较强时次的亮温距平很低, 原因有可能是当时暖核的水平尺度小于扫描点的分辨率, 导致 AMSU-A 无法完全捕获暖核的辐射信息; 也有可能当时眼壁附近对流发展旺盛, 中低层的强降水对通道 7 接收到的上行微波辐射产生较强的衰减, 从而导致该通道接收到的暖核亮温值出现异常偏低. 若只选取距卫星下点 300 km 范围以内的气旋个例, 则仅能匹配出 73 个样本, 由图 2b 可以看出, 两者的相关性显著提高, 标准偏差仅为 12.6 hPa. 这表明原算法还需进一步完善改进, 才能应用于更多样本资料的估测中去.

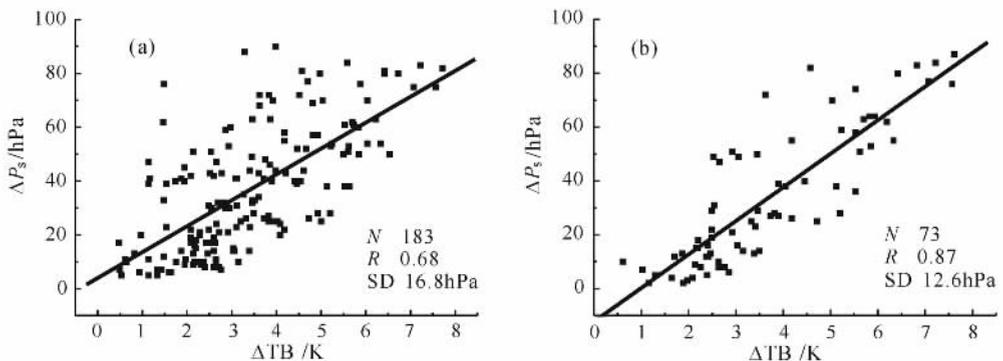


图 2 对于所有样本 (a) 及距星下点 300 km 范围内样本 (b) AMSU-A 通道 7 亮温距平同海平面气压差之间的统计关系

Fig. 2 Statistical relationship between AMSU-A channel 7 brightness temperature anomaly and sea level pressure anomaly with all cases (a) and cases within 300 km distance near nadir (b)

4.1 修正算法

4.1.1 扫描角度的修正

AMSU-A 采取横向扫描的方式, 每条扫描线包括 30 个扫描点, 在星下点附近其扫描点分辨率约为 48 km, 但随着扫描角度的增加其分辨率将逐渐变粗糙, 到扫描刈幅的临边处甚至达到 150 km. Weatherford 等^[11]利用气象侦察飞机实测资料分析了 1980~1982 年发生在西北太平洋区域热带气旋的结构特征, 发现其眼区半径介于 4~120 km 之间, 而且大多数气旋的眼区半径都小于 24 km. 假设热带气旋暖核的水平尺度局限于眼壁对流尺度范围以内, 随着气旋的发展增强, 受眼区内干空气下沉等因素影响, 暖核的水平尺度将进一步收缩^[12]. Herndon 等^[13]利用 AMSU-A 亮温资料估测了 1999~2002 年发生在大西洋区域热带气旋强度, 并用热带气旋最大风圈半径近似代替其暖核尺度, 如果将暖核尺度小于该时次 AMSU-A 扫描点分辨率的个例剔除, 发现暖核强度和海平面气压距平之间的统计相关性显著提高, 这同本文图 2b 显示的结果相一致. 因此, 对于大多数尤其是处于 AMSU-A 扫描刈幅临边处的热带气旋个例, AMSU-A 无法完全捕获其暖核信息, 导致计算出的暖核亮温距平值偏小.

为解决扫描点分辨率不均匀这一问题, Merrill^[14]针对 MSU 横向扫描特点, 综合考虑了暖核水平尺度、形状变化和扫描角度等因素的影响, 设计出一种捕获暖核信息的方法, 提高了对热带气旋强度的估测精度. Brueske 等^[15]将该原理应用于空间分辨率更高的 AMSU-A, 进一步提高了估测精度, 但该算法还依赖于 AMSU-A 以外的其他信息, 尤其是对最大风速半径等参数的变化比较敏感. 根据上述修正原理, 本文假设热带气旋暖核附近的温度场以

暖核中心为中心沿径向线性变化,设计出一种基于相邻扫描点之间亮温梯度的算法,以部分程度的修正因扫描角度带来的亮温衰减.图3是 AMSU-A 部分扫描点的分布示意图,其中黑色扫描点表示热带气旋中心所在位置,可以看出:此时 AMSU-A 接收到的热带气旋暖核辐射路径偏长,这将导致辐射衰减程度加大;此外,由于扫描点分辨率变粗糙,将影响它对暖核辐射信息的获取.若热带气旋位于更靠近临边的扫描点范围内,其暖核辐射受衰减程度会更大.假设 AMSU-A 第 i 通道所观测的扫描点亮温为 $TB_o(i)$,靠近临边处扫描点的亮温为 $TB_c(i)$,两扫描点间距为 d_{oi} ,而 d_0 为星下点扫描点分辨率,则经过扫描角度修正后,气旋中心亮温值 $TB_c(i)$ 可表示为

$$TB_c(i) = TB_o(i) + \frac{TB_o(i) - TB_c(i)}{d_0} \cdot d_{oi}, (5)$$

(5) 式右端第二项为针对扫描点分辨率不均匀所进行的修正项.可以看出:随着 AMSU-A 扫描角度的增加,暖核辐射路径越长,它所在扫描点的分辨率越粗,所需要进行的修正程度也越大.

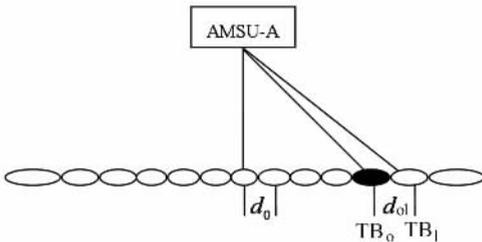


图3 AMSU-A 扫描点分布示意图

Fig.3 Explanation chart of some AMSU-A footprints' distribution

4.1.2 双通道的联合应用

AMSU-A 通道 7 的中心频率为 54.9 GHz,该通道对应的权重函数峰值高度在对流层中上层 250 hPa 附近,也就是通常人们认为的热带气旋暖核中心所在高度^[16].邱红等^[17]利用 AMSU-A 通道 7 计算了 2001~2003 年之间发生在西北太平洋区域热带气旋的暖核亮温距平,同业务部门利用 Dvorak 技术得到的强度报告值相比,两者标准偏差为 12.1 hPa,该技术假设热带气旋暖核最大强度能完全被该通道获取.但事实上,热带气旋暖核中心所在高度以及 AMSU-A 通道 7 所对应的权重函数峰值高度有可能受到以下因素的影响:

(1) 不同热带气旋的热力结构特征在垂直方向上的变化不尽相同,暖核有可能随热带气旋中心所处纬度、海域及其受其他天气系统的影响而出现异

常偏高或偏低.

(2) AMSU-A 通道对应的权重函数会受到大气温度、湿度、地表辐射率及扫描角度等因素影响,这使得它对应的峰值高度不同^[18].

除此以外,对于成熟期的热带气旋而言,其眼壁附近对流发展旺盛,中低层产生的强降水可能会导致通道 7 接收到的辐射出现异常偏低,这使得仅仅利用通道 7 亮温距平无法完全代表气旋暖核的强度.相对而言,AMSU-A 通道 8 对应的权重函数峰值位于更高的 200 hPa 附近.因此,综合利用这两个通道的辐射信息能更完整地捕获热带气旋暖核最大强度^[19].

重新分析 2002~2006 年之间的 183 个样本后发现,共有 43 个样本的通道 8 亮温值高于通道 7,占总数的 23.8%,对于达到台风以上级别强度的样本,该比例达到 36.6%,而超强台风的比例更达到 58.3%.这可能是因为随着热带气旋的发展增强,其暖核中心位置被抬升得更高,也进一步说明联合利用 7、8 双通道对于估测热带气旋尤其是处于成熟期气旋强度的必要性.

4.2 修正结果

图 4 显示了经过扫描角度修正后的统计结果,其中图 4a 仅利用了通道 7 的亮温,所得到样本的最大亮温距平同海平面气压距平之间的相关系数为 0.75,标准偏差为 13.1 hPa.图 4b 则在此基础上进一步选取了 7、8 双通道的最大亮温值,可以看出,两者的相关性有一定程度的改善.

4.3 个例分析

为了对算法进行检验,本文对近年来影响我国较大的两个台风“云娜”(0414)和“桑美”(0608)进行个例分析.首先从 2002~2006 年所有个例中分别剔除相应台风时次个例,重新建立统计回归方程来计算该台风强度.经过数据的匹配筛选后,分别得到两个台风的 5 至 6 时次资料,所得结果如图 5 所示,其中实线表示台风报告中 MSLP 随时间的演变,由于近年来没有对西北太平洋区域的热带气旋进行飞机探测,这种基于 Dvorak 技术的台风强度报告值只能作为一种相对的检验标准,圆点和三角形分别为相应时次利用修正前后算法计算出的气压值.可以看出,三者气旋强度的变化趋势上基本一致,若以台风报告为真值,则利用修正后算法得到的结果更精确,尤其是在台风处于旺盛阶段,它对两个台风估测结果的平均偏差为 5.8 hPa 和 6 hPa,较修正前分别减少 8.6 hPa 和 5.2 hPa.

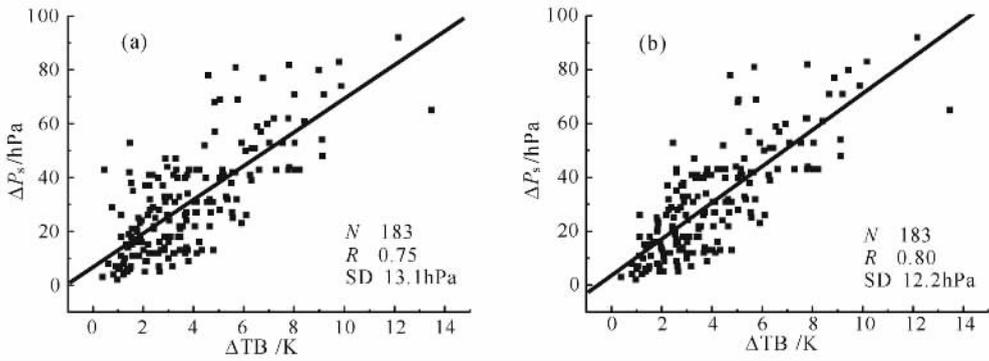


图4 仅利用 AMSU-A 通道 7 (a)及联合利用 7、8 双通道 (b)亮温距平同海平面气压距平之间的统计关系
Fig.4 Statistical relationship between AMSU-A brightness temperature anomaly and sea level pressure anomaly with channel 7 only (a) and channel 7, 8 together (b)

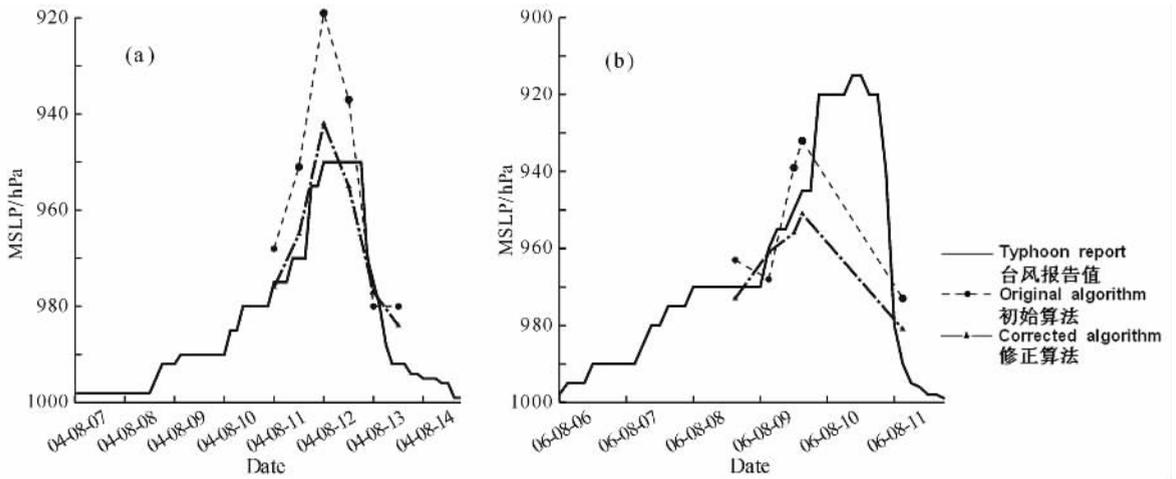


图5 算法修正前后对 0414 台风“云娜”(a)和 0608 台风“桑美”(b)的估测结果
Fig.5 Intensity estimation of 0414 typhoon Rananim (a) and 0608 typhoon Saomai (b) with original and corrected algorithm

5 结论与讨论

(1) AMSU-A 能接收到穿透热带气旋高层云系的微波辐射信息,反映出它位于对流层上层的暖核,继而估测出热带气旋的强度。相对于目前业务上广泛使用的 Dvorak 技术而言,它更加客观真实。

(2) 根据 AMSU-A 横向扫描的特点,本文设计出一种根据相邻扫描点之间亮温梯度的修正算法,它能部分程度地减少因扫描点分辨率不均匀所带来的取样偏差。

(3) 联合利用 7、8 双通道信息,尤其提高了对成熟期热带气旋强度的估测精度。

(4) 利用修正后算法得到的结果同基于 Dvorak 技术的热带气旋强度报告值相比较,相关系数达到 0.80,标准偏差为 12.2 hPa,而且对个例分析的偏差较小。

由于 AMSU-A 加载于极轨气象卫星上,还不能对热带气旋发生较频繁的中低纬度进行连续监测,这使得本文经匹配后得到的样本数目有限。除此以外,对于眼区尺度较小的台风个例,AMSU-A 分辨率过于粗糙,无法完全捕获其暖核强度信息,这直接导致最后结果出现偏差,如何解决该问题还需进一步研究。

参考文献 (References)

[1] Dvorak V. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery. *Mon. Wea. Rev.*, 1975, **103**: 420 ~ 430
 [2] Velden C S, Harper B, Wells F. The Dvorak tropical cyclone intensity estimation technique: a satellite-based method that has endured for over 30 years. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2006, **87** (9): 1195 ~ 1210
 [3] Rosenkranz P W, Staelin D H, Grody N C. Typhoon June (1975) viewed by a scanning microwave spectrometer. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**: 1857 ~ 1868
 [4] Kidder S Q, Gray W M, Vonder Haar T H. Estimating tropical

- cyclone central pressure and outer winds from satellite microwave data. *Mon. Wea. Rev.*, 1978, **106**: 1458 ~ 1464
- [5] Velden C S, Goodman B M, Merrill R T. Western North Pacific tropical cyclone intensity estimation from NOAA polar-orbiting satellite microwave data. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 159 ~ 168
- [6] Kidder S Q, Goldberg M D, Zehr R M. Satellite analysis of tropical cyclones using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**: 1241 ~ 1260
- [7] Demuth J L, Demaria M, Knaff J A, et al. Evaluation of Advanced Microwave Sounding Unit tropical-cyclone intensity and size estimation algorithms. *J. Appl. Meteor.*, 2004, **43**: 282 ~ 296
- [8] 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社, 1995. 304 ~ 345
Zhang P C, Wang Z H. Basis of Atmospheric Microwave Remote Sensing (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1995. 304 ~ 345
- [9] Kidder S Q, Gray W H, Vonder Haar V H. Tropical cyclone outer surface winds derived from satellite microwave data. *Mon. Wea. Rev.*, 1980, **108**: 144 ~ 152
- [10] Frank W M. The structure, energetics of the tropical cyclone I. Storm structure. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, **105**: 1119 ~ 1135
- [11] Weatherford C L, Gray W M. Typhoon structure as revealed by aircraft reconnaissance. Part II: structure variability. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 1044 ~ 1056
- [12] Schubert W H, Hack J J. Inertial stability and tropical cyclone development. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**: 1687 ~ 1697
- [13] Herndon D C, Velden C, Brueske K. Upgrades to the UW-CIMSS AMSU-based TC intensity estimation algorithm. Preprints: 26th Conf. on Hurricanes and Trop. Meteorology, Miami, FL, 2004. 118 ~ 119
- [14] Merrill R T. Simulation of physical retrieval of TC thermal structure using 55-GHz band passive microwave observations from polar-orbiting satellites. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 773 ~ 787
- [15] Brueske K F, Velden C S. Satellite-based tropical cyclone intensity estimation using the NOAA-KLM series Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 687 ~ 697
- [16] Hawkins H F, Rubsam D T. Hurricane Hilda, 1964 II. Structure and budgets of the hurricane on October 1, 1964. *Mon. Wea. Rev.*, 1968, **96**: 617 ~ 636
- [17] 邱红, 谷松岩, 朱元竞等. 星载微波估计热带气旋中心气压的研究. *电波科学学报*, 2004, **19**(4): 393 ~ 398
Qiu H, Gu S Y, Zhu Y J, et al. Estimation of the central surface pressure of tropical cyclone from satellite microwave data. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2004, **19**(4): 393 ~ 398
- [18] Goldberg M D, Crosby D S. The limb adjustment of AMSU-A observations: methodology and validation. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40**: 70 ~ 83
- [19] Brian K, Velden C S, Brueske K F. Tropical cyclone intensity estimation using the NOAA-KLM Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU): Part II: A multi-channel approach. Proceedings of the 25th Conf. on Hurricanes and Trop. Meteorology, San Diego, CA, 2002. 453 ~ 455

(本文编辑 何 燕)