

张森,覃丹宇,邱红,2017. 基于 FY-3C/MWTS-II 数据估计西北太平洋热带气旋强度[J]. 气象,43(5):573-580.

基于 FY-3C/MWTS-II 数据估计 西北太平洋热带气旋强度^{*}

张 森 覃丹宇 邱 红

中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,国家卫星气象中心,北京 100081

提 要: 文章利用 FY-3C 新型微波温度计(MWTS-II)数据估计发生在西北太平洋的热带气旋强度。首先对与热带气旋最强暖核位置相重合的通道 5~8 进行临边订正,取得了较好的效果,订正偏差均小于各通道的探测灵敏度;之后利用热带气旋微波亮温距平分布分析了热带气旋在对流层中、上层的增暖特征,发现热带气旋中心的增暖强度、形状特征与热带气旋的强度相关,强度较强的气旋中心增温较强,其暖核结构清楚而完整;最后利用通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值建立了热带气旋强度估计模型,独立样本检验的标准偏差为 13.0 hPa,进行扫描角度修正后的标准偏差为 12.0 hPa,引入纬度因子后的标准偏差为 11.1 hPa,估计精度得到一定程度的改善。

关键词: 风云三号卫星,新型微波温度计,暖核,热带气旋强度

中图分类号: P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.05.006

Estimating Intensity of Tropical Cyclone over the Western North Pacific Based on FY-3C/MWTS-II Data

ZHANG Miao QIN Danyu QIU Hong

Key Lab of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,
National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: A technique for estimating tropical cyclone (TC) intensity over the Western North Pacific utilizing FY-3C Microwave Temperature Sounding (MWTS-II) data was developed. First, the limb-adjustment was conducted to correct the data of Channels 5–8 to the values they would have in a vertical view, and the corrected deviations were all smaller than the instrument sensitivity. Then the radiance anomaly (core value minus an average environmental value) was used to analyze the characteristics of the TC warm core, and the magnitude and shape feature of the warm core were found related to the TC intensity. As TC intensity gets stronger, the magnitude increases and the shape feature gets clearer and more complete. Finally, an estimation model was established using the maximum radiance anomaly of Channel 6 and Channel 7. The standard deviation was 13.0 hPa. After the correction of the bias resulted from the unevenly distribution of MWTS-II footprints, the standard deviation was reduced to 12.0 hPa, and, then further reduced to 11.1 hPa after the latitude was taken into account.

Key words: FY-3, microwave temperature sounding, warm core, tropical cyclone intensity

* 国家重点研发计划重点专项(2016YFA0600101)和国家自然科学基金青年基金项目(41605028)共同资助

2016 年 1 月 15 日收稿; 2017 年 2 月 10 日收修定稿

第一作者:张森,主要从事微波遥感技术研究. Email:zhangmiao@cma.gov.cn

通信作者:覃丹宇,主要从事卫星天气研究. Email:qindy@cma.gov.cn

引 言

热带气旋是影响我国的重要灾害性天气系统之一(向纯怡等,2016),其活动所带来的灾害性天气破坏性非常大(殷明等,2016),而海上热带气旋定强主要是利用 Dvorak(1975;1984)技术,即利用可见光和红外云图上的热带气旋云系和云型特征来估计热带气旋强度,但该方法的客观性较差,因此之后的 DD(digital Dvorak)(Zehr,1989)、ODT(objective Dvorak technique)(Velden et al,1991)、AODT(advanced objective Dvorak technique)(Olander et al,2002)和 ADT(advanced Dvorak technique)(Olander and Velodey,2007)方法,使 Dvorak 技术逐步实现了客观化并成功地应用于各个业务部门,取得了较好的应用效果。但热带气旋眼区上空通常覆盖有卷云或层云,使得主要基于可见光和红外云图识别的 Dvorak 技术无法得到热带气旋的内部信息,而被动微波探测可以穿透上层卷云,探测到卷云下的中低层热带气旋结构特征(张森等,2015)。

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。Rosenkranz et al(1978)利用雨云 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 et al(1978;1980)通过进一步的研究表明,利用辐射传输方程和热力学方程,可以把热带气旋暖核亮温距平同气旋中心海平面气压联系起来,并建立了计算热带气旋外围风场的算法。Velden et al(1991)利用微波垂直探测器 MSU(microwave sounding unit)反演得到的大气温度廓线,建立了利用 250 hPa 温度距平估测热带气旋强度的方法,所得结果同气象侦察飞机实测的气旋强度值较接近。但相对于热带气旋暖核尺度而言,这些微波垂直探测器的空间分辨率仍较低。1998 年新一代极轨气象卫星发射升空,其上搭载的 AMSU 具有更多的遥感通道和更高的空间分辨率,国内外学者(Kidder et al,2000;Spencer and Braswell,2001;Brueske and Velden,

2003;王瑾和江吉喜,2005;邱红等,2004;2007)利用 AMSU 探测的亮温及其反演的温湿廓线产品,研究了热带气旋热力结构特征,发展了计算热带气旋中心最低海平面气压和梯度层切向风场的方法,均取得了较好的效果。

风云三号(FY-3)系列气象卫星是我国第二代极轨气象卫星,2013 年 9 月 23 日我国成功发射 FY-3C 星,新型微波温度计(MWTS-II)是其搭载主要载荷之一。本文主要针对发生在西北太平洋的热带气旋,利用 2013 年 9 月 30 日至 2014 年匹配出的 29 个热带气旋的 210 时次个例,分析热带气旋暖核结构特征,并利用热带气旋的中心增暖,建立热带气旋强度估计方法。

1 数据及其处理方法介绍

1.1 数据介绍

搭载于 FY-3C 卫星上的 MWTS-II 是周期自定标的全功率型被动微波辐射计,扫描周期为 8/3 s,每扫描线观测 90 个地球视场,提供星下点分辨率为 33 km 的大气温度垂直分布信息。MWTS-II 有 13 个地表和氧气探测通道,频率位于 50~60 GHz,可以探测地面至 6 hPa 的大气温度状态,具体通道特征见表 1。采用美国 1976 标准大气模式计算 MWTS-II 的权重函数,如图 1 所示。权重函数由于受到大气温度、湿度、地表辐射率及扫描角度等因素影响,峰值高度会略有变化(刘喆等,2008),而热带气旋中心暖核最强的位置大约在对流层上部 250 hPa 层附近,因此从图 1 可以看出:通道 5~8 的权重高度大约与热带气旋最强的暖核位置相重合。

本研究使用的 MWTS-II/L1 亮温数据由国家卫星气象中心业务处理生成,通过国家卫星气象中心风云卫星遥感数据服务网(<http://satellite.cma.gov.cn/portalsite/default.aspx>)下载;2013—2014 年发生在西北太平洋的热带气旋位置和强度信息使用的是日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)发布的热带气旋最佳路径(best track)数据集(<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>)。

表 1 MWTS-II 各通道特征

Table 1 Characteristics of MWTS-II channels

| 通道序号 | 中心频率/GHz | 带宽/MHz | 动态范围/K | 灵敏度/K | 定标精度/K | 主波束效率/% |
|------|-----------------------------|--------|--------|-------|--------|---------|
| 1 | 50.3 | 180 | 3~340 | 1.5 | 1.5 | >90 |
| 2 | 51.76 | 400 | 3~340 | 0.9 | 1.5 | >90 |
| 3 | 52.8 | 400 | 3~340 | 0.9 | 1.5 | >90 |
| 4 | 53.596 | 400 | 3~340 | 0.9 | 1.5 | >90 |
| 5 | 54.40 | 400 | 3~340 | 0.9 | 1.5 | >90 |
| 6 | 54.94 | 400 | 3~340 | 0.9 | 1.5 | >90 |
| 7 | 55.50 | 330 | 3~340 | 0.9 | 1.5 | >90 |
| 8 | 57.290344(f_0) | 330 | 3~340 | 0.9 | 1.5 | >90 |
| 9 | $f_0 \pm 0.217$ | 78 | 3~340 | 1.5 | 1.5 | >90 |
| 10 | $f_0 \pm 0.3222 \pm 0.048$ | 36 | 3~340 | 1.5 | 1.5 | >90 |
| 11 | $f_0 \pm 0.3222 \pm 0.022$ | 16 | 3~340 | 2.3 | 1.5 | >90 |
| 12 | $f_0 \pm 0.3222 \pm 0.010$ | 8 | 3~340 | 3.0 | 1.5 | >90 |
| 13 | $f_0 \pm 0.3222 \pm 0.0045$ | 3 | 3~340 | 4.5 | 1.5 | >90 |

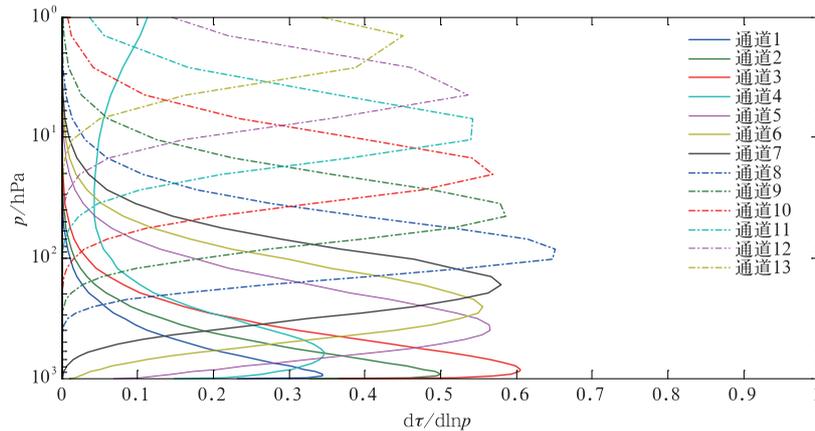


图 1 权重函数

Fig. 1 Weighting functions

1.2 临边订正

随着扫描角度增大,探测路径大气质量增加, MWTS-II 通道 5~8 的亮温逐渐降低,即产生了临边变暗现象,导致对于热带气旋的探测受影响,必须将不同扫描位置观测亮温订正到垂直观测情况。本文通过在不同的扫描位置建立垂直探测辐射量(扫描位置 45 和 46 的平均值)与不同通道倾斜探测统计关系进行临边订正,临边订正公式为:

$$T_{i0} = a_{ij} + \sum_i a_{i'j} T_{i'j} \quad (1)$$

式中, T 是亮温, a 是订正系数, i 是通道, j 是扫描位置, i' 是关联通道, 0 代表垂直观测情况, 本研究的关联通道为该通道及与其权重高度相邻的上下两个通道, 例如: 对通道 6 进行临边订正时的关联通道为通道 5、通道 6 和通道 7。

首先收集各通道 $82^\circ\text{S} \sim 82^\circ\text{N}$ 的亮温数据, 并将

数据以 2° 为间隔分成 82 个纬度带, 再进一步将数据分成洋面数据和陆地数据, 分别计算各通道 90 个扫描位置洋面和陆地的 82 个纬度带平均值, 并利用公式 (Wark, 1993) 对数据进行平滑处理。

$$T(z) = d_0 + d_1 [\sec(z) - 1] + d_2 [\sec(z) - 1]^2 \quad (2)$$

式中, T 是亮温, d 是平滑系数, z 是观测天顶角, 最后通过统计回归方法得到各通道 90 个扫描位置的临边订正系数。本文利用 2014 年 7 月 1 个月的数据计算临边订正系数, 并利用 2014 年 1 月 1—5 日 5 d 的数据对临边订正结果进行检验。

图 2 给出了通道 5~8 临边订正前后各扫描位置的平均亮温。从图中可以看出, 临边订正前随着扫描角度的增大, 亮温逐渐降低, 最大的降温可达 20 K 左右, 但临边订正后的亮温基本不随扫描位置变化; 进一步计算临边订正后通道 5~8 各扫描位置

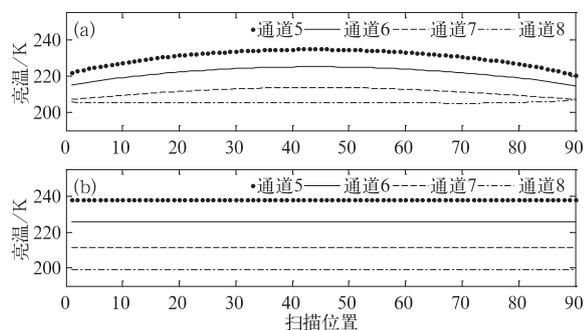


图 2 通道 5~8 临边订正前(a)和临边订正后(b)各扫描位置的平均亮温

Fig. 2 Mean unadjusted (a) and adjusted (b) brightness temperatures of Channels 5-8 as a function of beam position

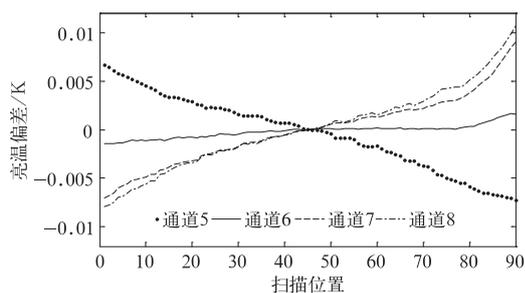


图 3 临边订正后通道 5~8 各扫描位置与垂直扫描位置亮温的偏差

Fig. 3 Deviation of limb adjusted brightness temperatures from nadir for Channels 5-8

与垂直扫描位置(扫描位置 45 和 46 的平均值)亮温的偏差(图 3),可以看出,各通道各扫描位置亮温的偏差均在 ± 0.012 K,远远小于各通道的探测灵敏度(0.9 K),说明订正效果较好,临边订正后的亮温可以用于分析热带气旋暖核结构特征。

2 热带气旋暖核结构特征及其与热带气旋强度的相关性

2.1 热带气旋暖核结构特征

本文以热带气旋中心最低海平面气压作为其强度标准,首先利用最佳路径(best track)数据插值得到热带气旋中心位置,然后选取距离热带气旋中心 100 km 范围内所有扫描点,并将其中通道 6 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,最后以 6 个纬度作

为环境场边界(Kidder et al, 2000),计算以热带气旋中心为圆心, 6° 和 8° 为半径的同心圆圈之间亮温的平均值,作为热带气旋环境场平均亮温,将临边订正后的 MWTS-II 数据减去环境场平均亮温,得到热带气旋微波亮温距平分布,据此分析热带气旋在对流层中上层的增暖特征。

以 2014 年发生在西北太平洋的两个强度不同的热带气旋为例。图 4 和图 5 分别是热带气旋浣熊[7 月 7 日 00:26(世界时,下同)]和麦德姆(7 月 21 日 12:56)的亮温距平图,两幅图中的(a)~(d)分别是 MWTS-II 通道 5~8 的亮温距平。“浣熊”是 2014 年西北太平洋超强台风之一,卫星观测时气旋中心海平面最低气压大约为 925 hPa;而“麦德姆”则是相对较弱的气旋之一,当时气压大约为 965 hPa。从两个气旋的亮温距平图像上可以看出,通道 5 的亮温距平由于受到眼墙区强对流形成的冰相降水粒子散射衰减作用影响,只在中心较小的范围显示出增暖;通道 6 的亮温距平热带气旋中心增温最强,暖核表现清楚而且完整,“浣熊”增温超过 5 K,“麦德姆”则不到 3 K;通道 7 的亮温距平热带气旋中心增温范围减小,但强度依然较强,“浣熊”的增暖幅度仍超过 5 K,而“麦德姆”则只有 2 K 左右;通道 8 的亮温距平浣熊的增暖范围进一步减小,但仍有 3 K 增暖,而“麦德姆”与环境场相比则几乎没有差异。从上面的分析可以得出:热带气旋中心的增暖强度、形状特征与热带气旋的强度相关,强度较强的气旋,中心增温较强,其暖核结构清楚而完整,与邱红等(2007)的结论一致。

2.2 热带气旋中心增暖与热带气旋强度的相关性

2.1 节仅给出了两个个例,通过大量的个例分析发现,随着气旋个例不同,中心最强增温可能出现在通道 6 或通道 7 中,收集 2013 年 9 月 30 日至 2014 年发生在西北太平洋的热带气旋数据,共得到样本 210 个,其中 2013 年 53 个,2014 年 156 个。利用收集到的这些数据分析通道 6、通道 7 最强亮温距平及通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值与气旋强度的相关性(图 6),从图中可以看出:随着气旋中心亮温距平的升高,气旋中心海平面气压下降、气旋加强,表明气旋中心亮温距平与强度存在较强的相关性。

通道 6 最强亮温距平与气旋强度的相关系数为 -0.81 ,通道 7 最强亮温距平与气旋强度的相关系

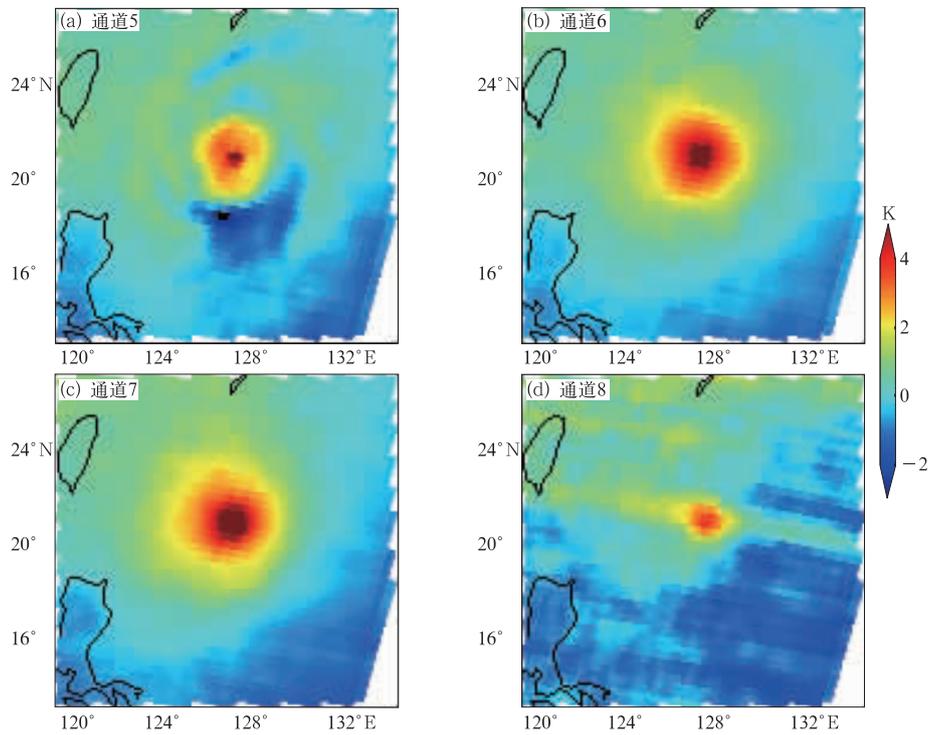


图 4 2014 年 7 月 7 日 00:26 UTC 热带气旋浣熊的 MWTS-II 通道 5~8 的亮温距平图像

Fig. 4 The brightness temperature anomalies of tropical cyclone Neoguri from Channels 5-8 of MWTS-II at 00:26 UTC 7 July 2014

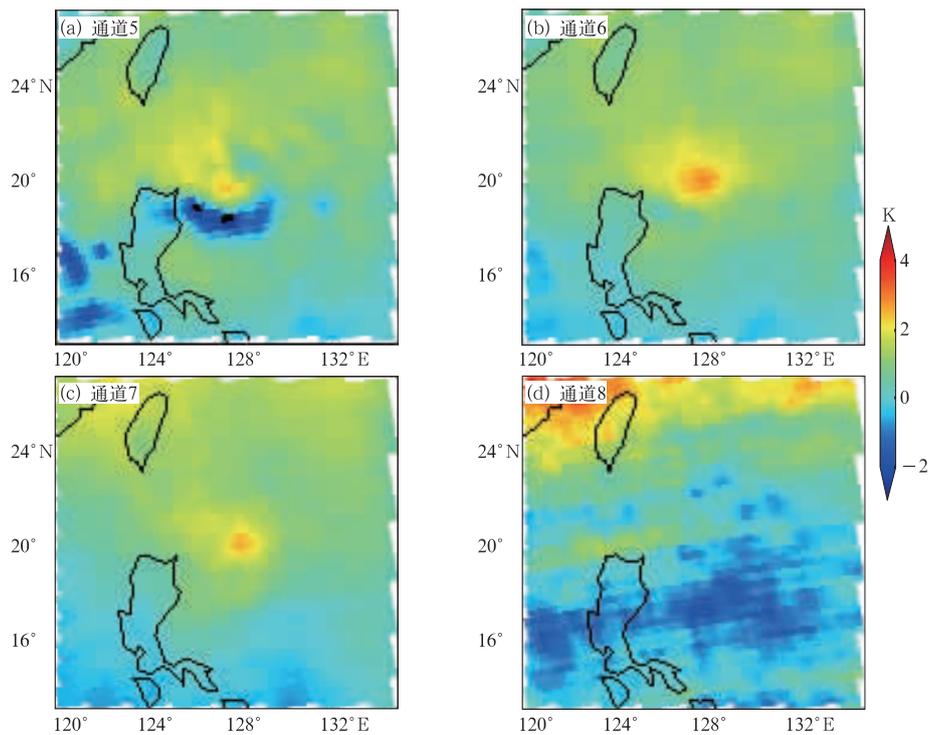


图 5 2014 年 7 月 21 日 12:56 UTC 热带气旋麦德姆的 MWTS-II 通道 5~8 的亮温距平图像

Fig. 5 The brightness temperature anomalies of tropical cyclone Matmo from Channels 5-8 of MWTS-II at 12:56 UTC 21 July 2014

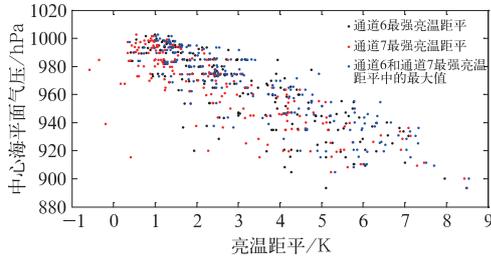


图 6 最强亮温距平与气旋中心海平面气压的关系

Fig. 6 Correlation between maximum brightness temperature anomaly and minimum sea level pressure

数为 -0.83 ,通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值与气旋强度的相关系数为 -0.88 ,因此通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值与气旋强度的相关性最好,这与 Brian et al (2002) 综合利用 54.94 GHz(通道 6)和 55.50 GHz(通道 7)的辐射信息能更完整地捕获热带气旋暖核最大强度的结论一致。因此本文将利用通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值作为回归因子,建立强度估计算式。

3 热带气旋强度估计

3.1 强度算式的建立及独立样本检验

利用通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值作为回归因子,将收集到数据的 2/3 作为统计样本,建立强度估计算式如下:

$$\hat{f} = b_0 + b_1 x \quad (3)$$

式中, \hat{f} 为估计的热带气旋中心海平面气压, x 为通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值, b 为回归系数, b 取值见表 2。

将收集到数据的另外 1/3 作为检验样本,进行独立样本检验,标准偏差为 13.0 hPa。估计的热带气旋中心海平面气压与最佳路径数据集热带气旋中心海平面气压之间的散点图如图 7 所示,从图中可以看出:点基本分布在对角线附近,说明此方法的估计效果较好,但也存在一些偏差较大的点,分析发现这些点大多处于扫描刈幅临边处,3.2 节将对此问题做进一步的研究。

3.2 扫描角度修正试验及其误差分析

在扫描刈幅临边处,MWTS-II的跨轨扫描方式

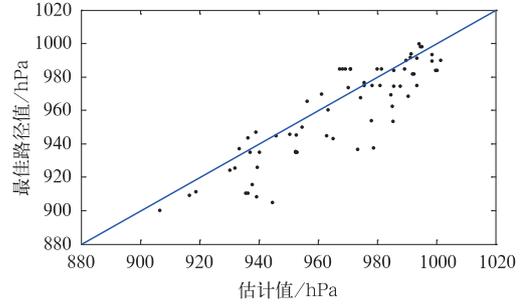


图 7 估计的热带气旋中心海平面气压与最佳路径数据集热带气旋中心海平面气压对比图

Fig. 7 Scatter plot of estimated central pressure of tropical cyclone and the central pressure from best track dataset

导致空间分辨率随探测角增大而变低,暖核区域往往小于辐射计分辨率,使得 MWTS-II 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。采用刘喆等(2008)提出的修正方法对扫描角度进行修正,即假设 MWTS-II 第 i 通道所观测的扫描点亮温为 $TB_0(i)$,靠近临边处扫描点的亮温为 $TB_1(i)$,两扫描点间距为 d_{01} ,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

$$TB_c(i) = TB_0(i) + \frac{TB_0(i) - TB_1(i)}{d_0} d_{01} \quad (4)$$

对扫描角度进行修正后,用 3.1 节同样的统计样本及强度估计算式建立模型,回归系数见表 2,并用同样的独立样本进行检验,标准偏差为 12.0 hPa,与扫描角度修正前的标准偏差 13.0 hPa 相比,精度得到一定程度的提高。

3.3 引入纬度因子的试验及其误差分析

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,热带气旋中心所在纬度可能会对其暖核特征产生一定的影响,比如随着纬度的增加,海表温度逐渐降低,会影响热带气旋中心暖核的发展强度。因此,将热带气旋中心所在处的纬度作为一个因子引入回归算式中,用 3.1 节同样的统计样本重新计算,估计算式如下:

$$\hat{f} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (5)$$

式中, \hat{f} 为估计的热带气旋中心海平面气压, x_1 为通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值, x_2 为热带气旋中心所在处的纬度, b 为回归系数, b 取值见表 2。用同样的独立样本进行检验,标准偏差为

表 2 回归系数及估计误差

Table 2 Regression coefficients and estimated deviation

| | 扫描角度修正前 | | 扫描角度修正后 | | 引入纬度因子后 | | |
|----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|-------|
| | b_0 | b_1 | b_0 | b_1 | b_0 | b_1 | b_2 |
| 回归系数 | 1006.77 | -12.19 | 1007.07 | -11.78 | 1001.05 | -11.98 | 0.34 |
| 标准偏差/hPa | 13.0 | | 12.0 | | 11.1 | | |

11.1 hPa,与纬度因子引进前的标准偏差12.0 hPa相比,精度进一步得到了提高。

3.4 个例分析

选取 2014 年第 19 号台风黄蜂(Vongfong)为例,估计其发展过程中的气旋强度变化,时间序列如图 8 所示,从图中可以看出,由估计模型得到的热带气旋中心海平面气压与最佳路径数据集热带气旋中心海平面气压十分接近,估计效果较好,其中第 11 个点和第 12 个点在进行了扫描角度修正后估计偏差显著减小,由原来的 16.9 和 22.7 hPa 分别减少到了 6.0 和 5.9 hPa,且纬度因子的引入对估计结果有一定的修正作用,使估计值更加接近最佳路径值。

4 结论与讨论

本文利用 2013 年 9 月 30 日至 2014 年的 FY-

3C/MWTS-II 数据,针对发生在西北太平洋的热带气旋,分析热带气旋暖核结构特征,并利用热带气旋的中心增暖,建立热带气旋强度估计方法。得出如下结论:

(1) FY-3C/MWTS-II 通道 5~8 的权重高度与热带气旋最强的暖核位置相重合,利用统计方法对通道 5~8 进行临边订正的订正效果较好,订正偏差均小于各通道的探测灵敏度。

(2) 利用通道 6 和通道 7 最强亮温距平中的最大值建立的估计模型估计效果较好,独立样本检验的标准偏差为 13.0 hPa,进行扫描角度修正后的标准偏差为 12.0 hPa,引入纬度因子后的标准偏差为 11.1 hPa,估计精度有一定程度的改善。

由于极轨气象卫星区域观测时间分辨率较低,有微波资料时段的限制,在建立回归模型时热带气旋样本数还不够多,造成回归算式的概括率和代表性不够完善,因此下一步将继续扩大热带气旋样本数,对回归模型进行优化。另外,除了空间分辨率不

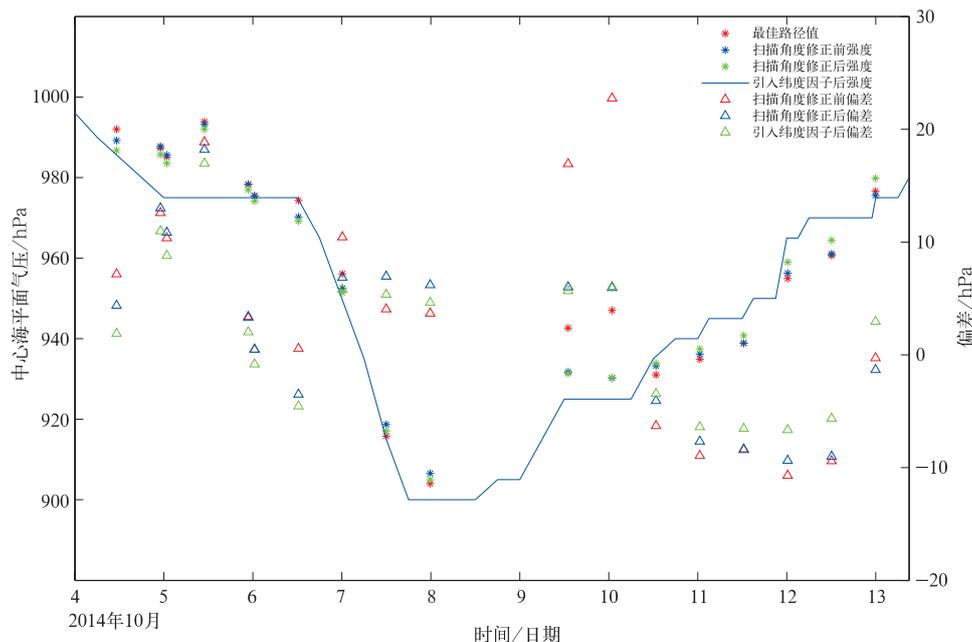


图 8 估计的热带气旋中心海平面气压与最佳路径值的时间序列比较

Fig. 8 Comparison of time changes between estimated central pressure and the central pressure from best track data of tropical cyclones

均匀引起的误差外,辐射计噪声、临边订正精度、暖核垂直位置的变化、暖核高度与权重函数高度不一致、暖核区域未在扫描波束中心以及云和降水的影响等均会对估计结果造成误差。Merrill(1995)针对这些误差源,设计出一种捕获暖核信息的最优算法,提高了热带气旋强度的估计精度,这也是本研究需要进一步开展的工作。虽然 FY-3C/ MWTS-II 已经停止业务运行,但我国即将发射的 FY-3D 星上装载有相同的 MWTS-II 仪器,本研究对其应用是一种非常有益的尝试。

参考文献

- 刘喆,李万彪,韩志刚,等,2008. 利用 AMSU-A 亮温估测西北太平洋区域热带气旋强度[J]. 地球物理学报,51(1):51-57.
- 邱红,方翔,谷松岩,等,2007. 利用 AMSU 分析热带气旋结构特征[J]. 应用气象学报,18(6):810-820.
- 邱红,谷松岩,朱元竞,等,2004. 星载微波估计热带气旋中心气压的研究[J]. 电波科学学报,19(4):393-398.
- 王瑾,江吉喜,2005. AMSU 资料揭示的不同强度热带气旋热力结构特征[J]. 应用气象学报,16(2):159-169.
- 向纯怡,吴立广,田伟,等,2016. 多平台热带气旋表面风场资料在台风结构分析中的应用[J]. 气象,42(11):1315-1324.
- 殷明,肖子牛,李崇银,等,2016. 2015 年西北太平洋热带气旋活动特征及强 El Nino 现象对其影响的初步分析[J]. 气象,42(9):1069-1078.
- 张森,邱红,方翔,等,2015. 基于风云三号微波成像仪的热带气旋强度的多元统计估计方法研究[J]. 热带气象学报,31(1):87-94.
- Brian K, Velden C S, Brueske K F, 2002. Tropical cyclone intensity estimation using the NOAA-KLM Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU): Part II: A multi-channel approach[R]. Proceedings of the 25th Conf on Hurricanes and Trop Meteorology, San Diego, CA:453-455.
- Brueske K F, Velden C S, 2003. Satellite-based tropical cyclone intensity estimation using the NOAA-KLM series advanced microwave sounding unit (AMSU)[J]. Mon Wea Rev, 131(4):687-697.
- Dvorak V F, 1975. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery[J]. Mon Wea Rev, 103(5):420-430.
- Dvorak V F, 1984. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data[R]. NOAA Tech Rep NESDIS, 11:47.
- Olander T L, Velden C S, 2007. The advanced Dvorak technique: continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery[J]. Wea Forecasting, 22(2):287-298.
- Olander T L, Velden C S, Turk M A, 2002. Development of the advanced objective Dvorak technique (AODT)-current progress and future directions[C]//25th Conf On Hurricanes and Trop Meteorology. Amer Meteor Soc:585-586.
- Kidder S Q, Goldberg M D, Zehr R M, 2000. Satellite analysis of tropical cyclones using the advanced microwave sounding unit (AMSU)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 81(6):1241-1260.
- Kidder S Q, Gray W M, Vonder H T H, 1978. Estimating tropical cyclone central pressure and outer winds from satellite microwave data[J]. Mon Wea Rev, 106(10):1458-1464.
- Kidder S Q, Gray W H, Vonder H V H, 1980. Tropical cyclone outer surface winds derived from satellite microwave data[J]. Mon Wea Rev, 108(2):144-152.
- Merrill R T, 1995. Simulations of physical retrieval of tropical cyclone thermal structure using 55-GHz band passive microwave observations from polar-orbiting satellites[J]. J Appl Meteor, 34(4):773-787.
- Rosenkranz P W, Staelin D H, Grody N C, 1978. Typhoon June (1975) viewed by a scanning microwave spectrometer[J]. J Geophys Res, 83(C4):1857-1868.
- Spencer R W, Braswell W D, 2001. Atlantic tropical cyclone monitoring with AMSU-A: estimation of maximum sustained wind speeds[J]. Mon Wea Rev, 129(6):1518-1532.
- Velden C S, Goodman B M, Merrill T, 1991. Western North Pacific tropical cyclone intensity estimation from NOAA polar-orbiting satellite microwave data[J]. Mon Wea Rev, 119(1):159-168.
- Velden C S, Olander T, Zehr R, 1998. Development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity from digital geostationary satellite infrared imagery[J]. Wea Forecasting, 13:172-186.
- Wark D Q, 1993. Adjustment of TIROS operational vertical sounder data to a vertical view[R]. NOAA Tech Rep NESDIS, 64.
- Zehr R, 1989. Improving objective satellite estimates of tropical cyclone intensity[C]//Extended Abstracts, 18th Conf. On Hurricane and Tropical Meteorology, San Diego, CA. Amer Meteor Soc:25-28.