

基于 FY-2E 卫星 CIBLE 定标结果的 台风客观定强效果评估

王新, 郭强*

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要:利用自主研发的风云二号(FY-2)基于月球辐射校正的内黑体定标(CIBLE, Calibration of Inner Blackbody Corrected by Lunar Emission)方法,采用台风Dvorak卫星客观定强技术,分别选用2012年夏季定标平稳变化期、秋季星蚀期的强台风、超强台风过程,进行了FY-2E红外波段的CIBLE定标结果、交叉定标(GSICS, Global Space-based Inter-Calibration System)结果、日本MTSAT定标结果的台风客观定强分析.结果表明,CIBLE方法能够正确反映FY-2E在轨定标斜率的日变化和年变化,确保了FY-2E/CIBLE与MTSAT定标结果估算的各级别台风强度稳定一致.特别在FY-2E秋季星蚀期,明显提高了台风夜间定强的准确率,与GSICS定标相比,台风中心最大风速误差减小了14 m/s,极大促进了台风强度监测预报水平的提升.

关键词:内黑体定标;定标斜率时变特征;Dvorak台风客观定强技术

中图分类号:P405;P412.27 **文献标识码:**A

Performance evaluation of objective tropical cyclone intensity determination with FY-2E/CIBLE results

WANG Xin, GUO Qiang*

(National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China)

Abstract: By using the self-developed calibration of inner blackbody corrected by lunar emission (CIBLE) results of Fengyun-2 (FY-2) satellite, tropical cyclones (TC) intensity was estimated objectively with Dvorak technology. Several strong and super strong TCs happened in 2012 summer and autumn were selected, when FY-2 lay in the stages of the smooth variation of calibration and the acutely variation one occurred in satellite eclipse period, respectively. As the comparative datum, both MTSAT satellite calibration and FY-2E cross-calibration result were used for the analysis. The results show that CIBLE method can accurately describe the diurnal and annual variation of FY-2E on-orbit calibration slopes, which is the main contributor to the consistent estimations of TC intensity between CIBLE and MTSAT in each intensity stage. Particularly, during the autumn eclipse period, the diurnal variation of calibration slope greatly improves the accuracy of strong typhoon intensity determination even at night. The maximal error of the wind speed in typhoon center has been reduced by 14 m/s, which is believed to be a significant promotion for the TC intensity prediction.

Key words: inner blackbody calibration, calibration slope temporal-variable characteristics, Dvorak technology

PACS: 92.60.Nv

引言

台风强度监测预报信息,对防灾减灾部门做出适应级别的预警决策有重要的指导意义^[1].多年来卫星观测对于台风监测预报已成为不可或缺的手

段,台风强度预报水平的提高与卫星技术的进步密不可分^[1-2].自20世纪70年代,一直沿用基于静止卫星资料的Dvorak技术进行台风强度客观估计^[2-3],Dvorak技术方法的关键步骤包括测量台风中心与深对流之间的距离、估算密闭云区强对流的

收稿日期:2014-1-22,修回日期:2014-05-28

Received date: 2014-1-22, revised date: 2014-05-28

基金项目:国家自然科学基金(41105029,41275034,41375068,91338203)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41105029,41275034,41375068,91338203)

作者简介(Biography):王新(1980-),女,内蒙古呼伦贝尔市人,高级工程师,博士,主要研究领域为卫星资料在天气中的定量应用. E-mail: xinwang@cma.gov.cn

*通讯作者(Corresponding author):E-mail: guoqiang@cma.gov.cn

面积和位置以及估算台风眼区与主体云系周边的温度距平等^[4],这些定量计算步骤都直接依赖于卫星红外波段数据的辐射标定,特别是低温端的高精度准确标定.

2012 年 7 月以来,国家卫星气象中心风云二号(FY-2)卫星业务定标工作组,自主研发了基于月球辐射校正的内黑体定标(CIBLE, Calibration of Inner Blackbody Corrected by Lunar Emission)方法,陆续应用于我国 FY-2 系列卫星可见红外扫描辐射计(VISSR, Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)的红外波段在轨辐射定标^[5-6], CIBLE 定标方法使 FY-2 彻底摆脱了以往完全依赖与国外极轨卫星替代比对的定标模式,形成了 FY-2 卫星在轨绝对辐射定标新格局,尤其是大幅提高了红外波段低温端标定的精度,在 2012 至 2014 年台风监测业务应用中发挥了重要作用.

本文利用 Dvorak 台风强度估计方法,分析了 FY-2E/CIBLE 定标结果在夏季、秋季星蚀期的变化趋势在台风过程中的定强准确程度,以及对定强误差减小的正效应,给出了 FY-2E/CIBLE 定标结果的质量评估结果,为卫星资料在台风中的定量应用提供了有用参考.

1 CIBLE 定标方法介绍

2012 年 7 月以来,国家卫星气象中心业务定标工作组自主研发了 CIBLE 定标新方法,以实验室定标结果为基准,以在轨月球定标和内黑体定标为核心,通过星地间不同等级辐射基准间的传递,初步建立了具有自主知识产权的红外波段在轨辐射基准.其基本原理是,利用 FY-2 卫星 VISSR 内黑体观测结果进行在轨辐射定标;同时,利用月球表面光学稳定性高的特性进行在轨辐射定标的系统性偏差校正.该方法突破了 FY-2 卫星 VISSR 随环境温度场频繁变化的辐射响应高精度标定难题,可精确描述 VISSR 定标参数日内、日间频繁变化的特性^[6]. CIBLE 方法分别于 2012 年 7 月、2013 年 3 月和 5 月,在 FY-2F/2E/2D 星上业务应用.经 2012 年至 2013 年全年测试,红外波段定标精度较以往显著提高,定标误差可达 0.5 K@300 K、2~3 K@220 K,这为 FY-2 系列卫星在天气预报中的定量化应用奠定了基础.

2 台风客观定强方法

上世纪 70 年代开始, Vernon Dvorak 提出了基

于可见光和红外卫星图像中云型特征来客观估算台风强度的定量分析技术,该技术在全球台风预报业务中沿用至今.图 1 所示是 Dvorak 定强技术流程,主要包括:确定台风云系中心、根据估算和多步骤的测量分别形成 DT(Data T)指数、MET(Model T)指数和 PT(Pattern T)指数,并应用规则确定 FT(Final T)指数和 CI(Current Intensity)指数,CI 指数是全球用于台风强度指导报发布的定量化强度指数.其中 DT 和 PT 指数是基于卫星红外波段增强技术,通过计算不同灰度亮温阈值的云系面积等一系列规则最终获得.阈值分段标准见表 1.

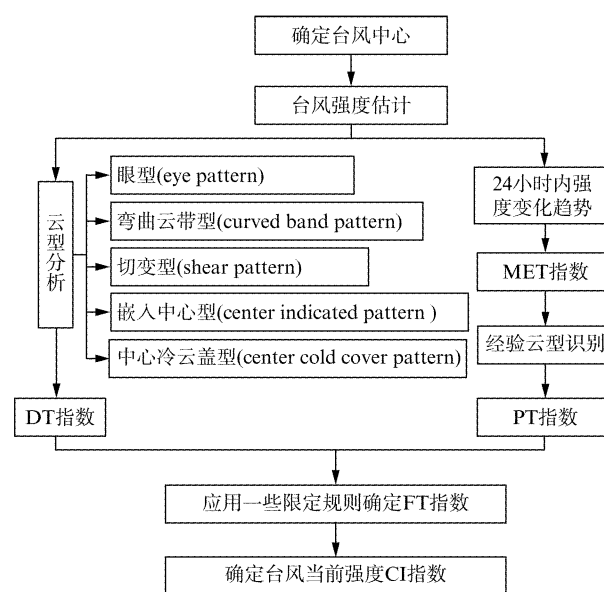


图 1 Dvorak 技术的关键分析步骤

Fig. 1 The key steps of Dvorak technology

表 1 BD 增强的亮温阈值表(引自 Dvorak, 1984^[4])

Table 1 Working sheet of Dvorak brightness temperature scale (from Dvorak, 1984)

GRAY SHADE CODE(Vernon F. Dvorak, April 1984)			
Code	Description	Temperature Range(degree C)	Temperature Range(degree K)
WMG	Warm Medium Gray	> +9	> +282
OW	Off White	+9 to -30	+282 to +243
DG	Dark Gray	-31 to -41	+242 to +232
MG	Medium	-42 to -53	+231 to +220
LG	Light Gray	-54 to 63	+219 to 210
B	Black	-64 to 69	+209 to 204
W	White	-70 to -75	+203 to +198
CMG	Cold Medium Gray	-76 to -80	+197 to +193
CDG	Cold Dark Gray	< = -81	< = +192

CI 指数在实际业务中还需进一步与台风中心最大风速和海平面气压对应起来,我国通用的台风业务标准中 CI 指数和台风强度的映射关系如表 2

所示,当 CI 达到 2.5 时,强度达到热带风暴;CI 达到 4.0 时,强度达到台风;CI 超过 5.5,强度达到超强台风.

表 2 Dvorak 分析的 CI 指数与实况强度的对应表
Table 2 Lookup table of Current Intensity Index from Dvorak technology and typhoon intensity

台风强度	CI 指数	中心最大风速 (knots)	/(m/s)	平均海平面气压 /hPa
初始扰动	1.0	25	13	
热带低压	1.5	25	13	1004
	2.0	20	15	1001
热带风暴-强热带风暴	2.5	25	18	997
	3.0	45	23	989
	3.5	55	28	984
台风-强台风	4.0	65	33	978
	4.5	77	39	969
	5.0	90	46	959
超强台风	5.5	102	52	948
	6.0	115	59	933
	6.5	127	65	920
	7.0	140	72	906
	7.5	155	79	984
	8.0	170	87	882

3 应用与分析

3.1 FY-2E/CIBLE 定标结果在夏季台风客观定强中的效果评估

卫星测量辐射亮度与观测计数值(或称灰度值)一般呈线性关系,定标斜率的大小直接影响卫星定标结果,即同一计数值,定标斜率较大所对应的辐射亮度也较大.因此,随着定标斜率的增大或减

小,同一计数值对应的亮温也随着增大或减小,原理示意图见图 2.

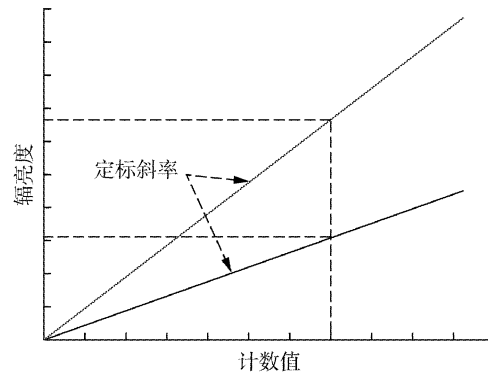


图 2 定标斜率物理意义示意图
Fig. 2 Schematic of the calibration slope

以 1203 号强台风玛娃为例,在 2012 年 6 月 1 日—6 月 5 日期间 FY-2E/CIBLE 定标斜率(以下简称 S_{CIBLE})、FY-2E/GSICS 定标斜率(以下简称 S_{GSICS})时序特征如图 3 所示.显然, S_{CIBLE} 具有小时间间隔的高频次斜率变化,昼夜变化相对量不大,这与 FY-2E 自身仪器性能相符,即在 FY-2E 星退出春季星蚀期后,VISSR 红外波段定标斜率将逐日快速上升,直到夏至前后达到最大,文中选取的正是定标斜率平稳变化且即将进入最大值的时间段.而 S_{GSICS} 在该段时间内没有日变化仅在 6 月 5 日有一次跳变,且在该台风过程中 S_{GSICS} 整体较 S_{CIBLE} 偏小.

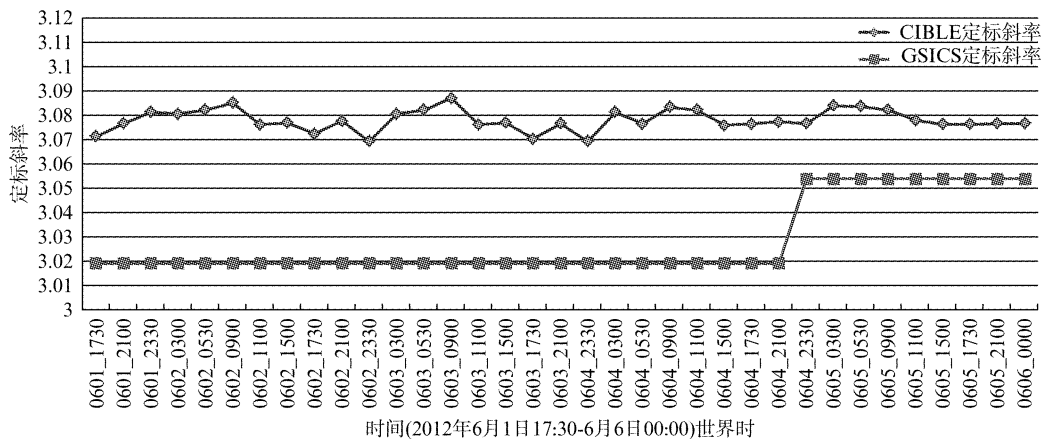


图 3 1203“玛娃”台风过程 FY-2E/CIBLE 和 FY-2E/GSICS 定标斜率时序变化图
Fig. 3 FY-2E CIBLE and GSICS calibration slope time series during 1203 typhoon life

基于 Dvorak 客观定强技术,分别利用 FY-2E/CIBLE、FY-2E/GSICS、MTSAT 定标结果,进行玛娃台风整个生命史 CI 指数分析,分别定义为 CI_{CIBLE} 、 CI_{GSICS} 和 CI_{MTSAT} ,三种数据 CI 指数结果见图 4,图中

最大风速曲线是中央气象台对“玛娃”台风业务定强结果,对照表 2 将各时次业务定强最大风速换算为 CI 指数,与 CI_{MTSAT} 一致.图中所示的三种数据 CI 结果表现出如下特征: 1) 在整个台风过程中,

CI_{CIBLE} 与 CI_{MTSAT} 结果完全吻合,在台风发展到强台风阶段,也表现出一致对应性(图 4 中红色线与蓝色线基本重合);2)而在台风强度增强过程中, CI_{GSICS} 与 CI_{MTSAT} 误差逐渐加大, $CI_{GSICS} - CI_{MTSAT}$ 最大达到 1.0,时间段为 6 月 3 日 18:00 时(UTC),对照表 2 可知,玛娃实际强度指数 $CI_{MTSAT} = 4.5$,处于强台风且继续增强时段,但依据 $CI_{GSICS} = 5.5$ 确定的强度,玛娃已经加强为超强台风.这样的 CI 误差,相对应的风速误差高达 14 m/s,确定的台风强度明显偏强,并影响了台风强度级别的判别.

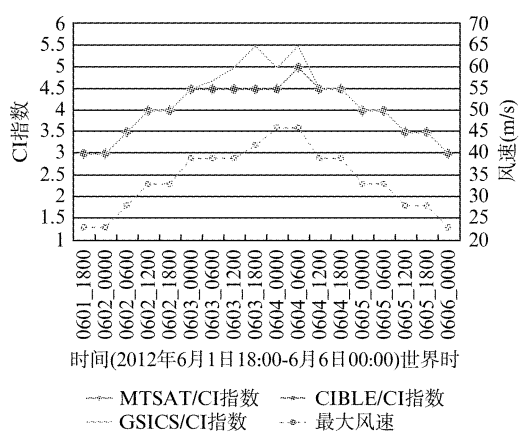


图 4 1203 号“玛娃”强台风过程 CI 指数时序变化图
Fig. 4 Current Intensity index time series of 1203 strong typhoon

通过三种数据对台风主体云系结构的差异分析该时次 CI_{GSICS} 产生较大误差的原因(图 5),主要可从两方面来分析其原因,其一在于围合在台风眼区周围的中心强对流云系:GSICS 结果面积明显较 MTSAT 结果面积偏大,在经向和纬向分别偏大约 0.5° ;其二在于外围螺旋云带的形状:MTSAT 结果和 CIBLE 确定的外围螺旋云带(图中黄色包络区域)不连续,南侧与东北侧外云带断开,参与 CI 指数估算的云带不足 0.2 环(图 5(a)、(b)),而 GSICS 结果显示的外螺旋云带连续,参与 CI 指数估算的云带达 0.45 环.上述两方面原因,导致该时次($CI_{FY-2/GSICS} - CI_{MTSAT}$)达 1.0(图 5(c)).

上述两方面误差原因,均与红外波段低温端亮温过低的定标结果直接相关,台风内部各亮温阈值范围内像素点个数的时序分布统计特征表明(图 6):能够指示台风内核强对流强度的 $T_{BB} < 192$ K 和 $T_{BB} < 198$ K 范围,在图 6(a)、(b)红色虚线框所示的台风增强阶段有强对流的爆发,GSICS 定标结果显示的这两个阈值范围内的像素点较 MTSAT 和

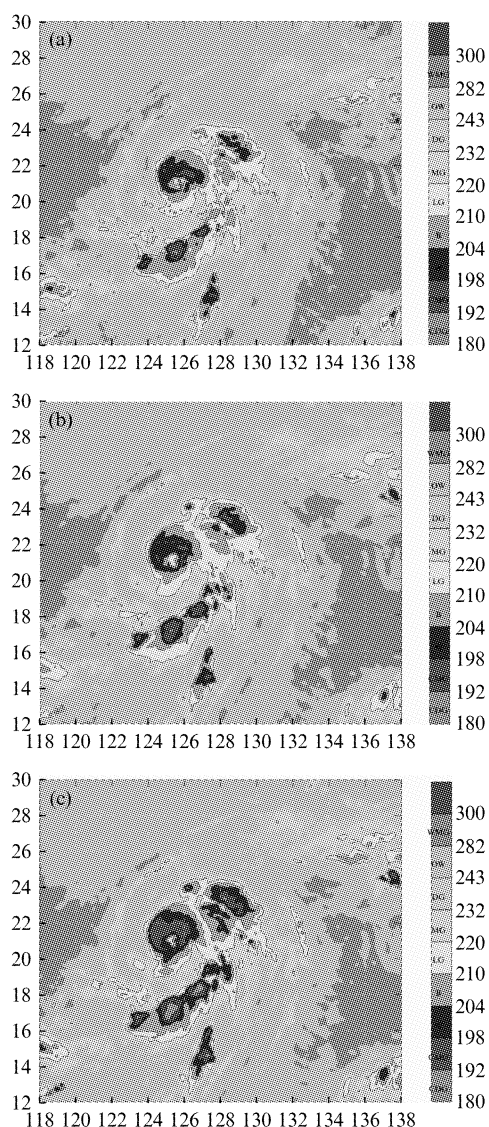


图 5 2012 年 6 月 3 日 18:00(UTC)三种定标结果反映的强台风“玛娃”结构

Fig. 5 1203 typhoon cloud structure using the three different calibration method in 18:00 3rd June, 2012 (UTC) (a) MTSAT, (b) FY-2E/BCAL, (c) FY-2E/GSICS

CIBLE 结果明显偏多.而主要用于指示台风外围螺旋云带形状和分布特征的 $T_{BB} < 210$ K 和 $T_{BB} < 220$ K 范围,在这个过程中,三种数据结果较为接近,但在 6 月 3 日 06:00 ~ 18:00 期间(图 6(c)红色虚线框所示), $T_{BB} < 210$ K 像素点个数 GSICS 较 MTSAT 和 CIBLE 偏多,是导致图 5(c)中外螺旋云带面积明显偏大的原因.

3.2 FY-2E/CIBLE 秋季星蚀期定标结果在台风客观定强中的效果评估

FY-2E 卫星在 9 ~ 10 月中旬进入秋季星蚀期,昼夜温差大且不稳定,导致红外波段定标结果日变

化. 图中黑色、灰色虚线分别是 9 月 23 日~30 日的 FY-2E/CIBLE 和 GSICS 定标斜率 S_{CIBLE} 、 S_{GSICS} 随时间的变化, 显然, S_{GSICS} 没有昼夜变化, 仅在 9 月 29 日有一次跃变, 而 S_{CIBLE} 指示出定标斜率昼夜变化, 最大相对变化达 4%, 较 S_{GSICS} 更符合 FY-2E 卫星本身性能特点.

与 3.1 中玛娃强台风分析方法类似, 进行杰拉华超强台风过程强度指数 CI 分析, 并与中央气象台的实际强度估计进行比较, 结果如图 8 所示, 其中蓝、红、绿色线分别是 CI_{MTSAT} 、 CI_{CIBLE} 和 CI_{GSICS} , 可见: 台风强度达到超强台风以后 ($CI = 5.5$), 无论是增强还是减弱, 均表现出 $CI_{GSICS} - CI_{MTSAT} \geq 0$, 即 GSICS 定标结果将台风强度估计偏强, 尤其是在 $CI > 6.0$ 的时段, CI_{GSICS} 与 CI_{MTSAT} 最大偏差达 1.0, 最大风速偏差达 14 m/s, 这对于超强台风来说, 强度的过强估计, 会带来由于防御级别过高导致的过度预警, 造成不必要的人力和物力浪费.

对应图 7、图 8 的两个虚线框时段, CIBLE 定标结果的昼夜变化显著降低了 CI 指数在夜间的估计误差, 使得台风强度误差明显减小, 较 GSICS 更为正确反映台风强度变化. 以图 7、图 8 红色虚线框所示的时段中 9 月 25 日 21:00 时 (UTC) 为例, 图 9 显示了该时次三种数据的云系结构, 可见由于低温端

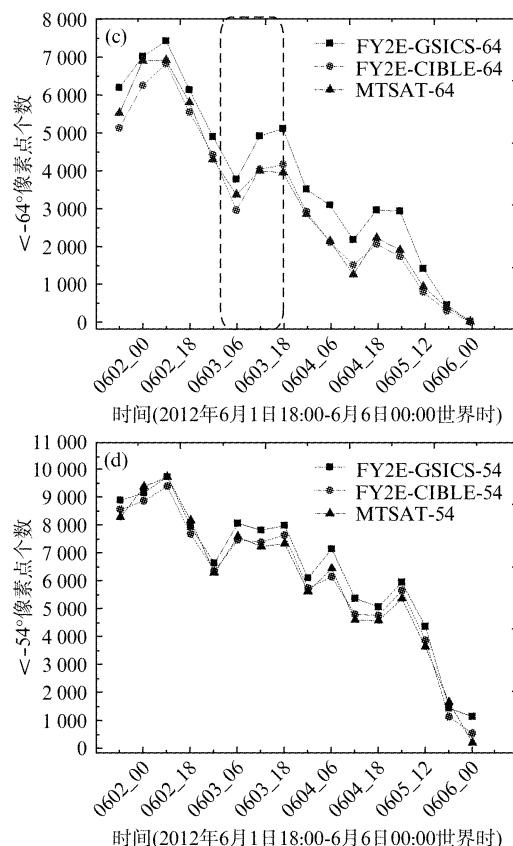
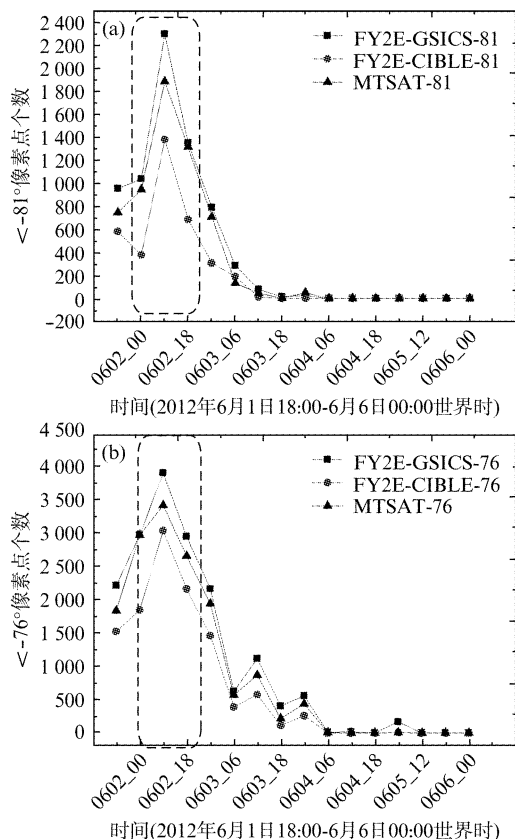


图 6 1203 强台风“玛娃”过程台风主体云系亮温阈值像素点个数统计 (a) $< -81^\circ\text{C}$, (b) $< -76^\circ\text{C}$, (c) $< -64^\circ\text{C}$, (d) $< -54^\circ\text{C}$

Fig. 6 Areas statistics of different brightness temperature threshold in typhoon inner core during 1203 typhoon life (a) $< -81^\circ\text{C}$, (b) $< -76^\circ\text{C}$, (c) $< -64^\circ\text{C}$, (d) $< -54^\circ\text{C}$

亮温估计偏低, 9(c) 表现的 GSICS 定标结果估计的台风内核和外云带面积均偏大, 而 MTSAT 和 CIBLE 结果基本相同. 相类似地也表现在另外一个时段, 如图 10 所示, 东北侧与东南侧外云带是否相连, 是导致 CI_{GSICS} 与 CI_{MTSAT} 出现较大误差的主要原因.

4 结果与讨论

采用 Dvorak 卫星台风客观定强方法, 通过 MTSAT 星、FY-2E 星 CIBLE 定标、GSICS 定标结果在台风过程强度指数计算结果的比较分析, 开展了 CIBLE 定标结果的应用效果评估.

结果显示:

1) 在夏季 FY-2E 定标斜率平稳变化期, 对台风各强度级别, CIBLE 定标结果估算出的台风强度 CI 与 MTSAT 估算结果稳定一致, 而 FY-2/GSICS 对台风的估算结果, 当台风发展为强台风至超强台风阶段, 与 MTSAT 偏差明显增大;

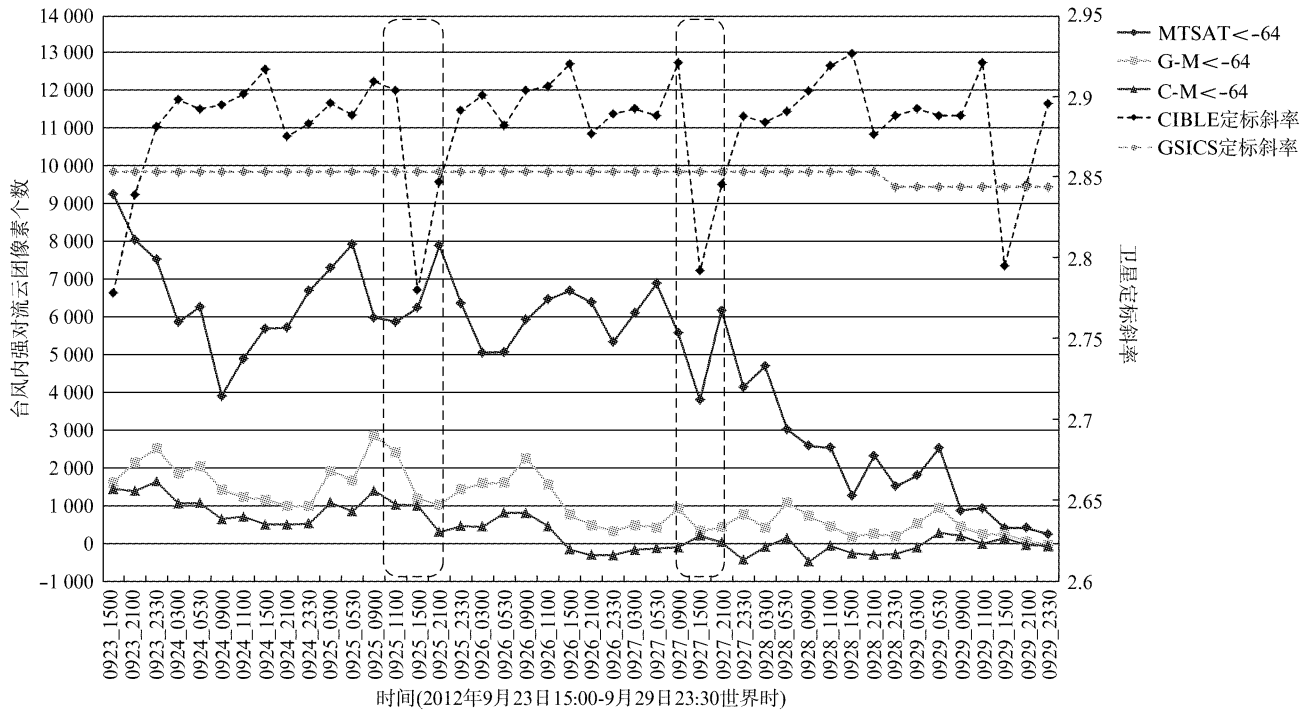


图7 1217“杰拉华”超强台风过程 CIBLE 和 GSICS 定标斜率及云带强对流像素个数偏差时序变化图
 Fig. 7 The time series of FY-2E CIBLE and GSICS calibration slope and statistics bias of convection in cloud bands during 1217 typhoon life

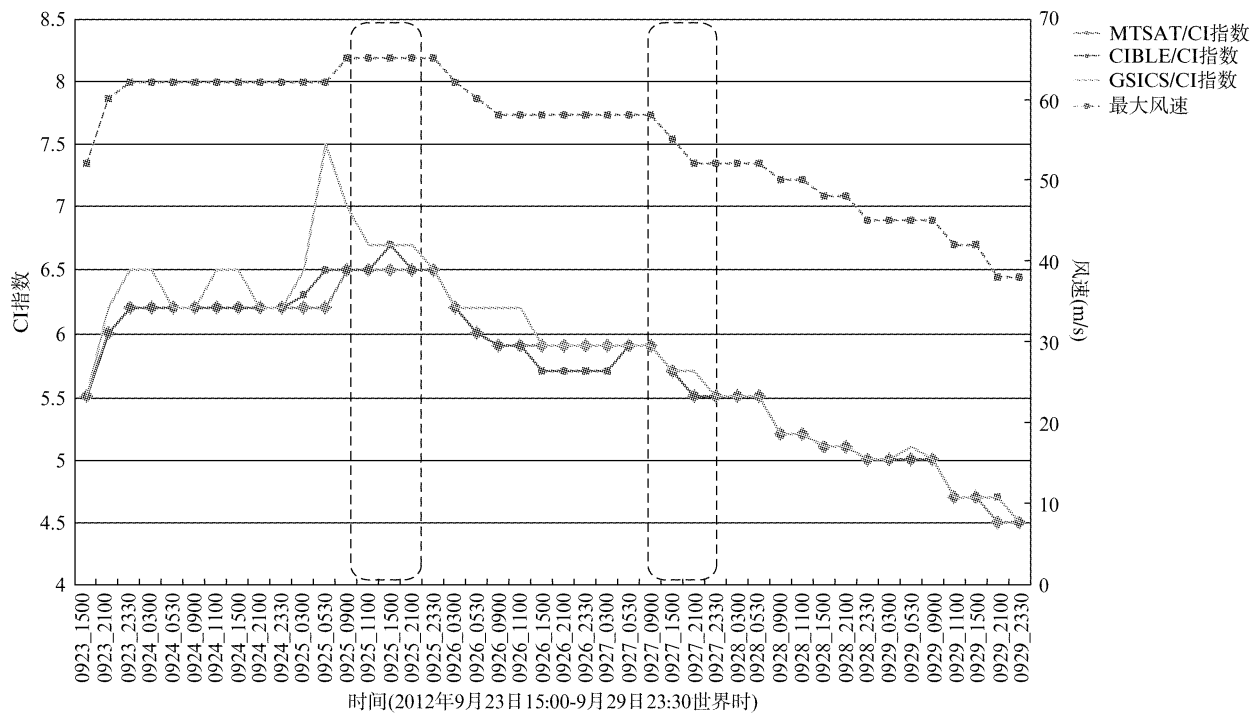


图8 1217号“杰拉华”超强台风过程 CI 指数时序变化图
 Fig. 8 Current Intensity index time series of 1217 supper typhoon

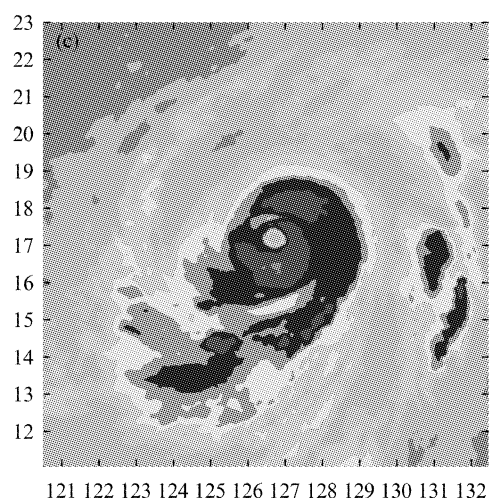
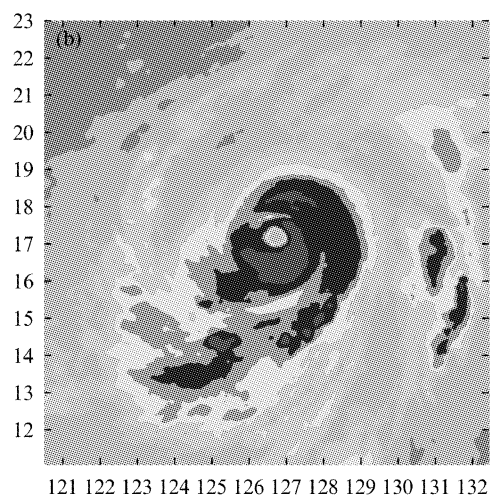
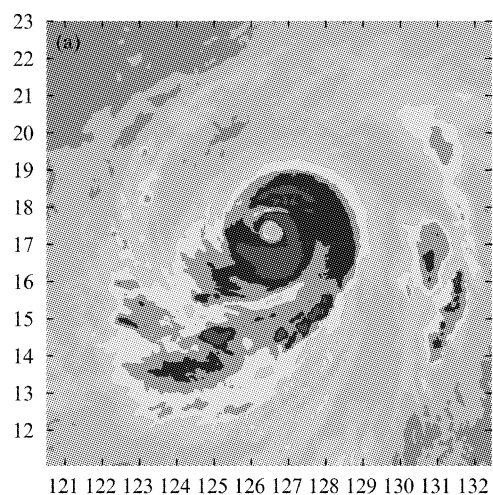


图9 2012年9月25日21:00(UTC)三种定标结果反映的超强台风“杰拉华”结构 (a) MTSAT, (b) FY-2E/CIBLE, (c) FY-2E/GSICS

Fig. 9 1217 supper typhoon cloud structure using the three different calibration method in 21: 00 25th September, 2012(UTC). (a) MTSAT, (b) FY-2E/CIBLE, (c) FY-2E/GSICS

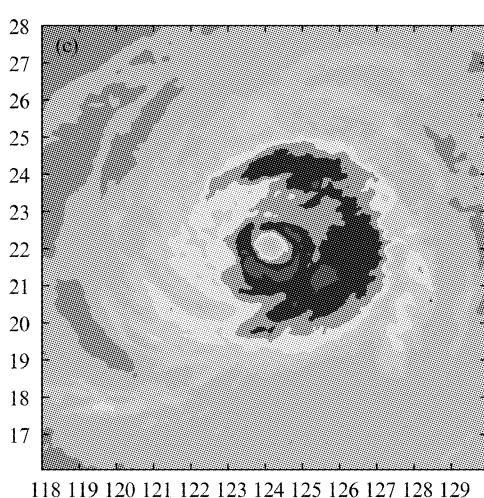
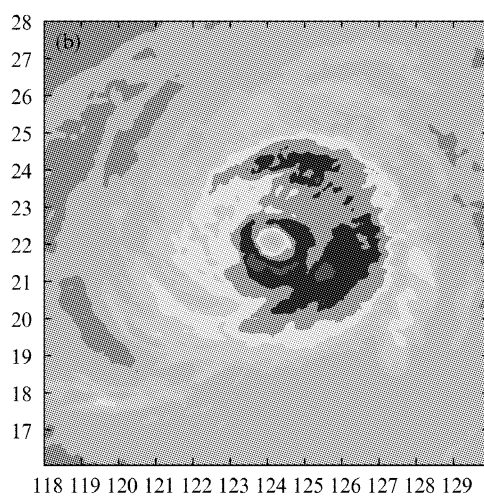
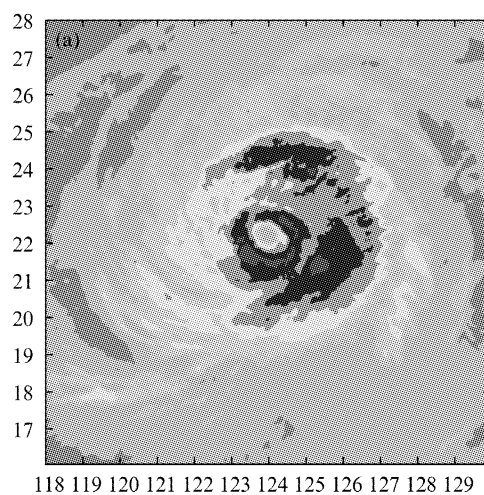


图10 2012年9月27日21:00(UTC)三种定标结果反映的超强台风“杰拉华”结构 (a) MTSAT, (b) FY-2E/CIBLE, (c) FY-2E/GSICS

Fig. 10 1217 supper typhoon cloud structure using the three different calibration method in 21: 00 27th September, 2012(UTC). (a) MTSAT, (b) FY-2E/CIBLE, (c) FY-2E/GSICS

2) 在台风发展过程中, 三套数据对于台风各级别间的变转折点指征, CIBLE 与 MTSAT 稳定一致, 而 FY-2/GSICS 过高估计台风强度, 造成台风级别由台风向强台风跃变时间点提前;

3) GSICS 定标更新周期较长, 造成距离定标变更时刻较远的时间段, 台风强度 CI 估计与 MTSAT 偏差增大, 而 FY-2/CIBLE 定标变化连续, 能更准确地表现台风强度增强或减弱的趋势;

4) 当卫星进入星蚀期后(9 月份以后), GSICS 方法无法正确反映定标斜率的昼夜变化, 造成台风定强结果夜间误差明显偏大. 而 CIBLE 方法能够准确表现星蚀期定标昼夜化. CIBLE 方法在夜间定标准确率显著提高, 这在很大程度上克服了夜间台风强度预报不连续的难题; 确保了台风强度估计准确度在日内稳定可靠;

5) CI 指数时间序列(每 3 小时一次)定量统计结果表明: 在强台风和超强台风时段, CI_{GSICS} 与 CI_{MTSAT} 最大误差可达到 1.0, 相对应的风速误差高达 14 m/s, 对台风强度估计过高; 而在所有台风级别时段, CI_{CIBLE} 与 CI_{MTSAT} 最大误差稳定维持在 0.5 以内, 对台风强度级别判识影响小.

5 结论

应用 FY-2E/CIBLE 定标数据结果, 采用 Dvorak 方法对 2013 年我国 10 个达超强台风级别的编号台风进行强度客观估计, 统计结果发现: 在台风以下级别的强度估计误差小于 0.3, 强台风至超强台风级别估计误差小于 0.5, 在超强台风的估计误差也

仅在个别时次达到 0.5, 与日本气象厅、美国联合台风警报中心业务定强结果误差减小, 也促进了 FY-2E 星自身性能的进一步提高. 另外, 定标结果可信度的显著提高, 也将提高 FY-2E 卫星应用效能, 因为使用定标准确的 FY-2E 卫星观测结果进行我国近海台风的定强分析预报业务, 其较 MTSAT 卫星更靠近星下点, 观测结果的几何形变更小, 数据探测更接近台风实况, 将更大程度发挥 FY-2E 卫星作用.

References

- [1] QIAN Chuan-Hai, DUAN Yi-Hong, MA Su-Hong. The current status and future development of China operational typhoon forecasting and its key technologies [J]. *Advances in Met S&T* (钱传海, 端义宏, 马素红, 等. 我国台风业务现状及其关键技术, *气象科技进展*) 2012, 2(5): 36-43.
- [2] LIU Zhe, WANG Xin, LI Wang-Biao, et al. Progresses in estimation of tropical cyclone intensity with Dvorak Technique [J]. (刘喆, 王新, 李万彪, 等. Dvorak 技术估测热带气旋强度研究进展, *气象科技*) 2007, 35(4): 453-457.
- [3] DVORAK V F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery [J]. *Mon Weather Rev*, 1975, 103(5): 420-430.
- [4] DVORAK V F. Tropical cyclone intensity analysis using satellite [G]//NOAA Technical Report NESDIS 11, 1984.
- [5] GUO Qiang, CHEN Bo-Yang, YANG Chang-Jun, et al. On-orbit radiometric calibration for water-vapor band of FY-2 satellite [J]. *J. of Infrared Millim. Wave* (郭强, 陈博洋, 杨昌军, 等. 风云二号卫星水汽波段在轨辐射定标新方法, *红外与毫米波学报*) 2012, 31(6): 523-527.
- [6] GUO Qiang, CHEN Bo-Yang, ZHANG Yong, et al. Progress in On-orbit Radiometric Calibration Technology for Fengyun-2 Satellite [J]. *Advances in Met S&T* (郭强, 陈博洋, 张勇, 等. 风云二号卫星在轨辐射定标技术进展, *气象科技进展*) 2013, 3(6): 6-12.