

红外云顶亮温在西北太平洋热带气旋强度 预报中的应用*

陈佩燕^{1,2} 端义宏^{1,2} 余晖^{1,2} 胡春梅³

1 中国气象局上海台风研究所,上海,200030

2 中国气象局台风预报技术重点开放实验室,上海,200030

3 重庆市气象台,重庆,401147

摘 要

应用 GMS-5 气象卫星红外云顶亮温(TBB)资料,分析西北太平洋的热带气旋(TC)TBB、TBB 的对称和非对称分量与滞后 0—48 h TC 强度的相关关系。发现,TC 眼墙附近东南侧的 TBB、距 TC 中心半径 0.8° — 1.7° 范围内 TBB 对称分量和 1—10 波振幅之和与 0—48 h 的 TC 强度有很好的负相关关系,与滞后 24 h 的 TC 强度相关极值分别达到 -0.52, -0.59 和 -0.625。

考虑气候持续因子、天气因子及 TBB 因子,针对 1996—2002 年西北太平洋远海区域(0° — 50° N, 120° — 155° E) 热带风暴(TS)等级以上样本,建立 12、24 h 和 48 h 强度预报方程并进行独立样本检验。结果表明, 1.0° — 1.5° 环域平均的 TBB 对 12 h 强度预报的方差贡献位居第 4, TC 东南侧 TBB 的平均值和 1.1° — 1.5° 范围 TBB 极大与极小值之差对 24 h 强度预报的方差贡献分列第 3 和第 5 位。考虑 TBB 因子的回归方程对 TS 和强热带风暴(STS)的强度预报能力有较大提高,对 12 h 内强度减弱 15 m/s 以上 TC 的 12 h 预报、强度稳定 TC 的 24 h 预报和强度 48 h 增强 10 m/s 以上 TC 的 48 h 预报均有所改善。

关键词: 红外云顶亮温,非对称结构,热带气旋,强度预报。

1 引 言

现阶段,对于热带气旋(TC)强度预报缺少有效的客观方法。应用最早和最为广泛的是根据可见光和红外云图上 TC 云型和云系特征来估计及预报 TC 强度的 Dvorak 技术,在改进的客观 Dvorak 技术中^[1],用 TBB (T_{BB}) 资料确定 TC 中心的位置、眼和周边的温度,并估计 TC 参数指数。DeMaria 和 Kaplan^[2-4]用逐步回归方法建立了大西洋 TC 强度统计预报模式(SHIPS),该模式引入了从 GOES-8 红外 4 通道资料挑选的两个预报因子:200 km 范围内 $T_{BB} < -20$ 的像素个数和 100—300 km 范围内 TBB 标准偏差的平均值,在 SHIPS 的 16 个变量中,这两个因子的重要性分列第 5 和第 9 位。Gentry^[5]

曾在 1980 年讨论了 TC 强度与 TBB 的关系,认为 TBB 变化较强度早 24—36 h。Fitzpatrick^[6]将卫星资料与其他预报因子结合,提出了一个针对西北太平洋 TC 的强度预报方案,发现最显著的 TBB 预报因子是距风暴中心 444 km 范围内 $T_{BB} < -55$ 的区域。

以上研究表明,从 TBB 资料中提取的预报因子对于改善 TC 强度预报是有效的。不过以上研究都是从整体上考虑 TBB 与 TC 强度的关系,没有进一步分析 TBB 的对称、非对称结构与 TC 强度及其变化之间的关系。而 TC 往往是非对称的,其对称、非对称结构与 TC 强度变化有密切的联系。因此,本文将研究 TBB 对称、非对称分量与 TC 强度的相关关系及其在 TC 强度预报中的可能应用。此外,本文所用的 TBB 资料的空间分辨率为 0.05° ,比已有

* 初稿时间:2005 年 5 月 23 日;修改稿时间:2006 年 2 月 27 日。

资助课题:国家自然科学基金(40575030,40333025),国家科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB3J104)和上海台风研究基金。

作者简介:陈佩燕,助理研究员。研究方向:热带气旋动力学。E-mail:chenpy@mail.typhoon.gov.cn

研究所用资料的分辨率明显提高,可以更清楚地反映 TC 对流结构的变化。

2 资料和分析方法

本文所用的 TBB 资料是日本静止气象卫星 (GMS-5) 红外 (IR1) 通道资料反演得到的,单位为 $^{\circ}\text{C}$,空间分辨率为 0.05° (约 5.6 km)。TC 路径、强度资料都取自中国气象局出版的《西北太平洋热带气旋年鉴》。TC 强度用近中心最大风速来表征。研究时段为 1996—2002 年。考虑到影响近海及登陆 TC 强度的因素较复杂,分析时挑选离大陆较远的 TC 个例,其中心位置都处于图 1 所示区域。符合条件的样本总数为 2255 个。不同强度等级的样本数分布见图 2,其中台风(简称 TY)等级的个例最多,占总数的 33.6%(758 个),STS 等级的个例最少,占总数的 18.3%(412 个)。

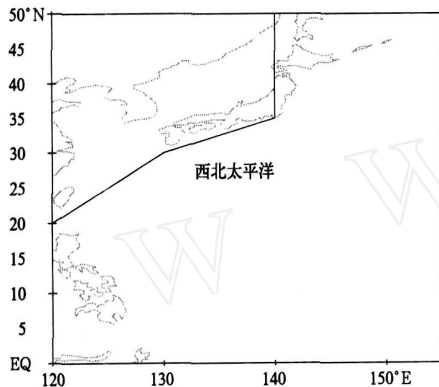


图 1 所选 TC 样本所在区域(阴影区除外)

Fig. 1 Tropical cyclone sample domain (excluding the shading area)

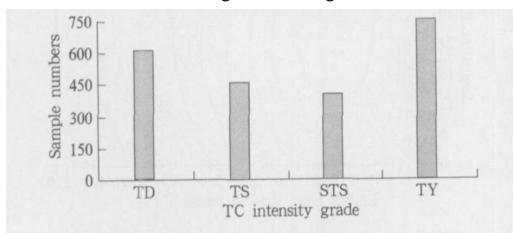


图 2 不同强度等级样本数

(TD: 热带低压, 近中心最大风速 $< 17.2 \text{ m/s}$; TS: 热带风暴, 近中心最大风速 $17.2 - 24.4 \text{ m/s}$; STS: 强热带风暴, 近中心最大风速 $24.5 - 32.6 \text{ m/s}$; TY: 台风, 近中心最大风速 $> 32.6 \text{ m/s}$)

Fig. 2 Sample sizes for different intensity categories

(TD: $v_{\max} < 17.2 \text{ m/s}$, TS: $17.2 - 24.4 \text{ m/s}$, STS: $24.5 - 32.6 \text{ m/s}$, TY: $> 32.7 \text{ m/s}$)

文中进行 TC 强度与 TBB、TBB 对称及非对称分量的相关分析时,采用随 TC 移动的坐标,以 TC 中心为极坐标原点,求半径为 r 处的切向平均即得到该半径的 TBB 对称分量(以下简称 Symtbb)。根据所用资料的分辨率,取 $r = 0.1^{\circ}$,最大半径取为 5° ,即只讨论距 TC 中心 5° 范围内的结果。原始场与 Symtbb 之差即为 TBB 非对称场。

进行谐波分析时,在半径 r 处,从正东方向开始,沿逆时针方向每 5° 取 1 点,共 72 个点组成一个序列作傅立叶分解,讨论 1—10 波振幅与同时及未来 TC 强度的相关关系。

文中时间均为世界时。

3 TBB 与 TC 强度的总体相关特征

虽然不少学者对 TBB 与 TC 强度的相关关系做过详细的分析与讨论^[4-7],但由于所用资料长度、分辨率及样本等的不同,本文仍首先讨论两者之间的总体相关性。

图 3a 是 TC 强度与 TBB 同时相关的相关系数分布。由图可见,TC 强度与大部分区域的 TBB 为负相关关系,TBB 值越低,代表 TC 对流越深厚,TC 也就越强。负相关极值 (-0.477) 位于 TC 东南象限离中心约 1° 处。TC 中心为正相关。这表明,中心点温度越高,TC 强度越强。一般来说,当 TC 较强时,其眼区是晴空区,TBB 值较高,而当 TC 较弱时,没有明显的眼区或眼区下沉气流弱,中心 TBB 值也就较低。

类似地,统计分析了 TBB 与滞后 6, 12, 18, 24, 36, 48 h TC 强度的相关,相关系数分布基本与同时相关一致。图 3b 和 3c 为 TBB 与滞后 24, 48 h TC 强度的相关系数分布,可见,随滞后时间延长,负相关显著区明显南缩西扩。相关极值所在方位略向顺时针方向移动。当滞后时间为 48 h 时,北侧离 TC 中心约 2° 以外区域的 TBB 值与 TC 强度已经没有什么显著的相关性。此外,TC 中心以南的负相关显著区明显向西侧扩展。TC 中心 TBB 值(简称 TBBc)与 TC 强度的相关系数随滞后时间延长而逐渐减小。其与滞后 18—30 h 的 TC 强度没有什么相关性,与 36 h 后的强度则有一定的负相关关系。

不同滞后时间的样本量、负相关极值及其离 TC 中心的距离列于表 1,从负相关极值看,TC 强度与前 18 h 东南象限的 TBB 负相关关系最好,达到 -0.53 ,

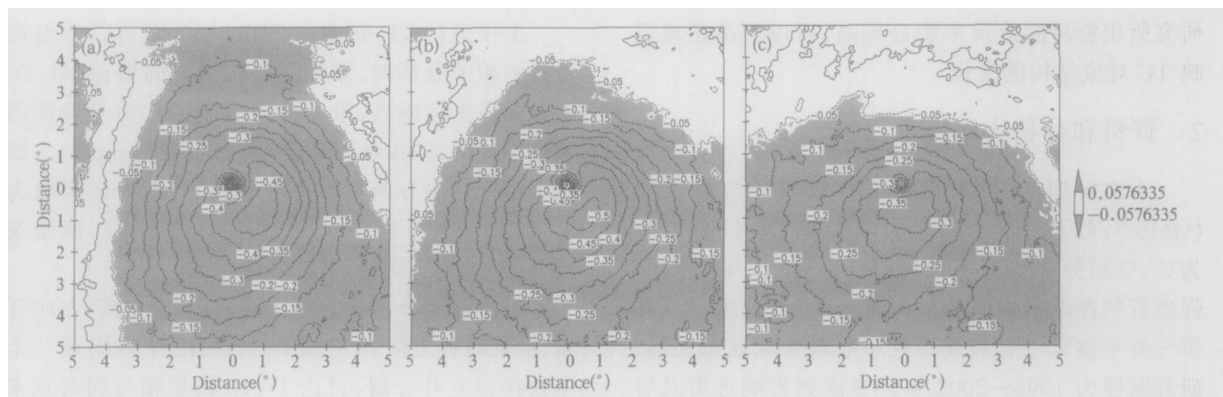


图3 TC强度与TBB的相关场

(a.同时相关,b.强度滞后24 h,c.强度滞后48 h;区域中心为TC中心。纵横坐标为离TC中心点的经纬度;等值线为相关系数,间隔为0.05,阴影区为通过置信度为99%的信度检验)

Fig. 3 Correlations of tropical cyclone intensity and its ambient equivalent black body temperature (TBB) in the northwest Pacific (The panel center is located at the center of TC, and shadings indicate the correlation coefficients (intervals: 0.05) significant at the 0.01 confidence level; a. lag=0; b. lag=24 h; c. lag=43 h)

表1 TBB与滞后0—48 h的TC强度相关的样本数、负相关系数极值及其离TC中心的距离

Table 1 Sample size and extremum of the negative correlation of TBB and the TC intensity at various time lag of 0—48 h, and the distance of extremum point to TC center

滞后时间(h)	00	06	12	18	24	36	48
样本数(个)	2255	2210	2158	2107	2055	1955	1838
负相关极值	-0.48	-0.51	-0.52	-0.53	-0.52	-0.47	-0.38
离TC中心距离(°)	1.10	1.10	1.03	1.05	1.01	1.00	0.89

此时负相关极值位置离TC中心也最远(1.05°)。在18 h内,相关极值有增大趋势,从-0.477增大到-0.53,其后略有缩小,至第48小时,相关系数极值减小为-0.38,不过仍通过99%信度检验。

以上分析表明,研究区域内的TBB值与滞后0—48 h的TC强度以显著的负相关关系为主,尤以东南象限离TC中心约1°附近区域最为明显。这种TBB与TC强度的时滞相关性意味着TBB隐含了TC强度变化的信息。

4 TBB对称分量与TC强度的相关特征

用前面介绍的方法计算得到Symtbb。该量在一定程度上代表了各半径处的平均对流情况。Symtbb和滞后0—48 h TC强度相关的样本数与表1所列相同。图4表明,除TC中心附近外,各半径处的Symtbb与TC强度均为负相关关系,即平均对流越强,TC也就越强。离TC中心约1°—1.5°的Symtbb与TC强度相关最好。以该半径为中心,相关关系向两侧逐渐减弱。从滞后相关来看,Symtbb

与滞后24 h的TC强度负相关关系最好,极值达-0.59(表2),与滞后48 h TC强度的负相关系数也达到了-0.49。

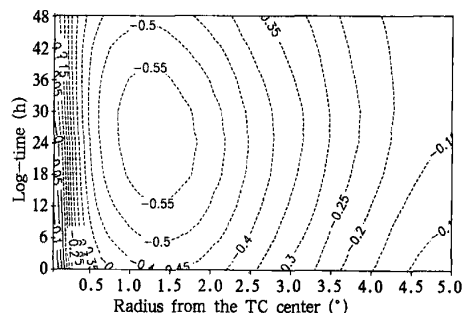


图4 Symtbb与滞后0—48 h的TC强度的相关系数(当样本数为1800时,信度达99%显著性检验的相关系数临界值为0.06)

Fig. 4 Correlation coefficient between Symtbb (the tangential mean value of TBB at radius r) and the TC intensity at various time lag of 0—48 h (As the sample size is 1800, the critical value of the correlation coefficient passing the 99% significance level is above 0.06)

表 2 Symtbb 与滞后 0—48 h TC 强度相关的负相关系数极值及其离 TC 中心的距离

Table 2 Extremums of the negative correlation coefficients between Symtbb and the TC intensity at various time lag of 0—48 h, and the distance of extremum point to TC center

滞后时间(h)	00	06	12	18	24	36	48
负相关极值	- 0.45	- 0.51	- 0.55	- 0.58	- 0.59	- 0.56	- 0.49
离 TC 中心距离(°)	1.40	1.35	1.35	1.35	1.35	1.25	1.15

Gentry^[5]建立的 TC 强度预报方程中用到了 111—333 km 平均的 TBB 值,王瑾等^[7]建立的 TC 强度客观估计算式则用到了 120 和 150 km 平均的 TBB 值。这些结果与本文的分析结果基本一致。在滞后时间上,Gentry^[5]认为 TBB 提前 TC 强度变化约 24—36 h,与本文得到的 Symtbb 与滞后 24—30 h 的 TC 强度相关较好的结果也是一致的。

由此可见 Symtbb 对未来 48 h 以内的 TC 强度变化有一定指示意义。TBB 的切向平均值在一定程度上代表了 TC 在该半径处的平均对流情况,而距中心约 1°—1.5° 范围基本上是 TC 眼墙所处位置。这意味着眼墙对流越强,当前和未来的 TC 也就越强。

5 TBB 非对称分量与 TC 强度的相关关系

由谐波分析得到的各个波动分量的振幅在一定意义上代表了 TC 非对称波动的强度。波动振幅与 TC 强度的相关关系可反映 TC 非对称程度与 TC 强度的关系。分析 1—10 波各个波数分量及 1—2, 1—3, 1—10 波振幅之和与同时及未来 TC 强度的相关关系发现,1—10 波振幅之和(简称 SA10)与 TC 强度相关性最好,因此本节将仅给出 SA10 与滞

后 0—48 h TC 强度的相关分析结果。

SA10 和滞后 0—48 h TC 强度相关分析的样本数也与表 1 一致。由图 5 可见,离 TC 中心约 0.2° 以内的 SA10 与 TC 强度为正相关关系,且离 TC 中心越近,正相关关系越好,正相关极植均出现在 TC 中心附近。在 18 h 内,TC 中心附近的正相关性相当,相关系数极值为 0.36—0.38(表 3)。24 h 后,正相关性明显减小,至 48 h 极值仅为 0.14。

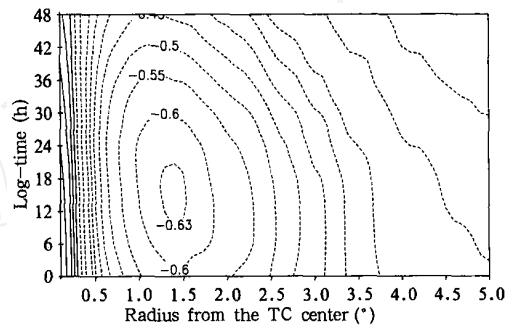


图 5 SA10 与滞后 0—48 h TC 强度的相关系数分布

Fig. 5 Correlations between SA10 (the sum of the amplitude of tangential 1 - 10 waves (SA10) of the TBB at radius r) and the TC intensity at various time lag of 0 - 48 h

表 3 SA10 与滞后 0—48 h TC 强度的相关系数极值及其离 TC 中心的距离

Table 3 Extremums of the negative/positive correlation coefficients between SA10 and the TC intensity at various time lag of 0 - 48 h, and the distance of extremum point to TC center

滞后时间(h)	00	06	12	18	24	36	48
负相关极值	- 0.59	- 0.62	- 0.64	- 0.63	- 0.63	- 0.56	- 0.45
离 TC 中心距离(°)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.2	1.1
正相关极值	0.365	0.374	0.364	0.340	0.303	0.230	0.140
离 TC 中心距离(°)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

除 TC 中心附近外,SA10 与 TC 强度为负相关,并自距 TC 中心约 1.4 半径处向内外逐渐减弱,表明 TBB 分布的非对称性越弱,当前及未来 TC 越强。SA10 与 TC 强度的负相关性以滞后 6—24 h 最好,负相关极值都低于 - 0.62。滞后 48 h 的相关系数极植仍达 - 0.45。可见,离 TC 中心约 1°—2° 范围的 SA10 对 TC 强度预报有一定的指示意义。

从以上分析看出,SA10, Symtbb 与 TC 强度的相关关系较为相似,两者都是以负相关为主,极值中心均在 1.4 附近。两者的相关程度也相当,极值都在 - 0.58 以下。不同的是 Symtbb 以滞后 18—30 h 相关最好,比 SA10 的 6—24 h 略迟。进一步的分析表明(图 6),Symtbb 与 SA10 的相关系数在随半径呈近似正弦函数的分布。3° 以内,两者正相关,极值

出现在 0.9° , 达 0.488。3 以外区域则相反, 两者为负相关关系, 且离 TC 中心越远负相关性越强, 离 TC 中心 5° 处的相关系数达 -0.51。这一结果表明, 离 TC 中心较近的区域, 平均 TBB 越强, 非对称 TBB 越弱, 而在离 TC 中心较远的区域, 平均 TBB 与非对称 TBB 的强度变化位相一致。从因子的独立性角度看, 离 TC 中心 3 附近区域的 Symtbb 与 SA10 有一定的独立性, 而 1 附近及约 4 以外区域, 两者有很大的相关性。

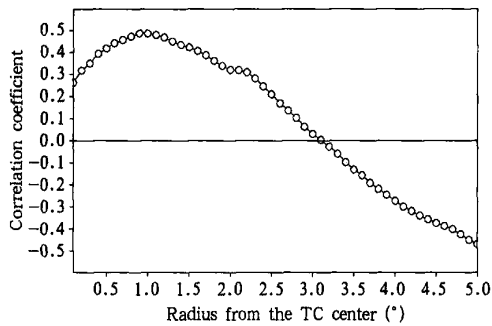


图6 SA10 与 Symtbb 的相关系数随半径的变化曲线
Fig. 6 Variation of the contemporary correlation of SA10 and Symtbb with radius

陈光华等^[8]认为 0214 号 TC“黄蜂”近海加强阶段, 风暴内核区存在的中小尺度涡旋系统呈现轴对称化的趋势, 通过非线性作用将扰动动能向基态环流转化, 对 TC 强度的维持起到了一定的作用。而中尺度涡旋系统的轴对称化过程, 通过与对称环流系统非线性相互作用, 向气旋环流提供能量, 其自身也得到维持与发展。罗哲贤^[9]用旋转适应理论, 研究了台风轴对称基流与其上叠加的非对称扰动的相互作用。认为当不同尺度的线性作用占主导时, 非轴对称扰动向基流转化, 当不同尺度的非线性作用占主导时, 轴对称环流和非轴对称扰动经历着相互演变的过程, 相互演变过程影响了台风强度的变化。SA10 一定程度上反映了扰动能量的大小, Symtbb 则一定程度上反映了 TC 轴对称的程度。SA10 减小, 中小尺度涡旋系统的扰动能量向基态环流转化, TC 轴对称化加强, Symtbb 值降低, TC 强度增强, 因此 SA10 与 TC 强度有着较好的负相关关系, 而 SA10 与 Symtbb 之间也有着较好的正相关关系。

6 其他 TBB 因子与 TC 强度的相关关系

6.1 TBB 达一定阈值的像素个数

SHIPS 模式中引入 200 km 范围内 $T_{BB} < -20$

的像素个数^[4]。针对西北太平洋台风建立的 TC 逐步回归预报方案(简称 TIPS)从红外云图中提取的最显著的预报因子是距风暴中心 444 km 范围内 $T_{BB} < -55$ 的像素个数^[6]。这两个工作表明, 一定范围内达某个温度阈值的像素个数与 TC 强度变化有着较好的关系, 并对强度预报有一定的贡献。但是 SHIPS 中用到的因子是从 GOES-8 的卫星资料中提取且针对大西洋的, 而 TIPS 是以 1983—1986 年 10 km 分辨率的静止卫星资料为依据, 在样本时段和资料分辨率上与本文均有所不同。因此, 本节对该类因子与 TC 强度的相关关系进行了分析。

计算 $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$ 和 5° 半径范围内, $T_{BB} - 10, -15, -20, -25 \dots -60$ 的像素个数与滞后 0—48 h TC 强度的相关。发现, 不同范围内不同等级 TBB 值的像素个数与 TC 强度都有着较好的正相关关系, 相关系数都通过 99% 的信度检验。从不同等级的 TBB 看, 除了 $T_{BB} - 10$ 这一等级以 3 半径内的像素个数与 TC 强度相关最好外, 其余的都以 2 半径以内最好。其中尤以 $T_{BB} - 40, -45$ 和 -50 最为显著, 它们与滞后 18—30 h TC 强度的相关系数都超过 0.6, 与滞后 48 h TC 强度的相关系数都超过 0.5 (图 7)。从不同滞后时间的相关来看, 以滞后 24 h 相关最好, 2 半径以内 $T_{BB} - 45$ 的像素个数与滞后 24 h 强度的相关系数达 0.62。可见, TBB 达一定阈值的像素个数对 TC 强度预报有很好的指示意义。

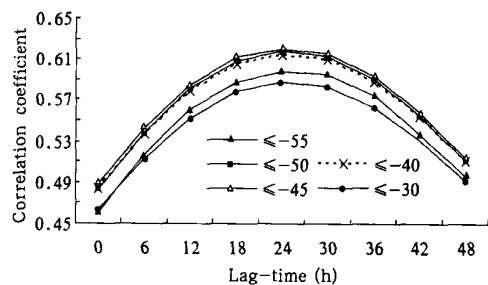


图7 2 半径范围内 $T_{BB} - 30, -35, -40, -45, -50$ 和 -55 的像素个数与滞后 0—48 h TC 强度的相关关系

Fig. 7 Correlation coefficient curves between TC intensity at various time lag of 0-48 h and pixels of the $T_{BB} - 30, -35, -40, -45, -50, -55$ within the radius of 2 degrees

6.2 TBB 极值

Bankert^[10]用 SSM/I 资料建立自动估计大西洋

TC 强度的方法时,吸取了 Velden^[1]给出的几个特征量:一是 40 km 以内 TBB 最大值,二是 24—136 km 各环 TBB 最大值中的最小值。这两个特征量考虑的是 TBB 极值与 TC 强度的关系。王瑾等^[7]在用 TBB 资料估计 TC 强度时,采用了离 TC 中心 0.3 环的最大 TBB 值、离 TC 中心 0.3°—1.3° 环的 TBB 最大值、TBBc 与离 TC 中心 0.9 环 TBB 最大值之差。本文也吸取该类因子的选择思路,计算各环带 TBB 极大值、极小值、极大值与 TBBc 之差(和)、极小值与 TBBc 之差(和)、极大值与极小值之差(和)与 TC 强度的相关系数。发现,在这几个因子中,以各环带的 TBB 极大值与 TC 强度的负相关关系较好,并以 1.1°—1.5 范围最佳。其中,1.4° 环 TBB 极大值与滞后 0—36 h TC 强度的相关系数都超过 -0.6,滞后 18 h 的相关系数达 -0.67(图 8)。各环 TBB 极大值与极小值之差及两者之和与滞后 0—48 h TC 强度的相关性相似,前者以 1.2 环相关最好,后者以 1.3 环相关最好。24 h 后,随滞后时间延长,相关性都从 -0.6 左右减弱到 -0.48 左右。各环 TBB 极小值与 TBBc 之差与滞后 0—48 h TC 强度的相关性以离 TC 中心 0.1 环最好,相关极值为 -0.43。各环 TBB 极大值与 TBBc 之差与滞后 0—48 h TC 强度的相关性以 0.6 环相关最好,相关极值为 -0.62。各环 TBB 极小值、极大值或极小值与 TBBc 之和与 TC 强度没有什么的相关关系。

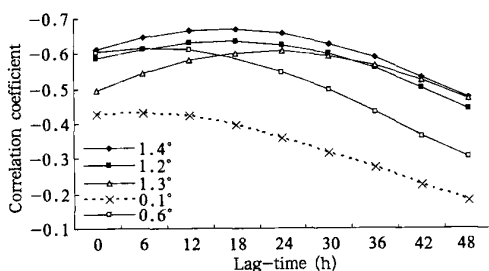


图 8 各环内 TBB 极值因子与滞后 0—48 h TC 强度的相关关系

Fig. 8 Correlation coefficient curves between TC intensity at various time lag of 0-48 h and the extremum factor of TBB (the abscissa: lag time, units: hour)

7 TBB 因子在 TC 强度预报中的应用试验

前面分析表明,东南象限 TBB 值、离 TC 中心 1°—1.5 的 Syntbb 和 SA10 等因子与滞后 0—48 h

的 TC 强度有着很好相关关系。然而,这些因子在 TC 强度预报中的有效性如何还不清楚。本节就将用逐步回归方法建立 TS 等级以上 TC 的 12, 24 和 48 h 强度预报方程,通过对比分析有无 TBB 因子的强度预报误差情况来讨论这些因子对 TC 强度预报的可能贡献。

7.1 TC 强度预报回归方程的建立

TC 强度预报方程的备选因子考虑 3 大类(表 4):

(1) 气候持续性因子,主要考虑起报时刻 TC 强度和所在位置以及他们在前 12 和 24 h 的变化量。这一类因子共 9 个,对应表 4 中的因子 1—9。

(2) 与下垫面及环境场相关的因子,共 12 个,对应表 4 中的因子 10—21。其中,高层(200 hPa)主要考虑涡动角动量通量辐合、纬向风和 TC 外区散度,中层(500 hPa)考虑了 TC 中心高度与环境高度差,低层(850 hPa)主要考虑涡度、内区散度、温度左右半圆差及最大涡度中心所在位置。另外,还考虑了 200 与 850 hPa 环境风垂直切变和 TC 未来 6 h 可能移速的纬向分量。下垫面状况,通过 TC 最大可能强度因子引入,该值由大西洋 31 a 个例得出的经验计算公式计算,具体算法详见文献[6]。涡动角动量通量辐合、纬向风、涡度、环境风垂直切变、环境高度及 850 hPa 内区散度均为 5 半径范围内的区域平均。TC 前进方向左(右)侧区域即为左(右)半圆,温度左右半圆差即为 5 半径内左右区域平均值之差。200 hPa 外区散度用 5°—10 半径区域内的平均散度来代表。

(3) 因子均从 TBB 资料中提取,共 32 个,对应表 4 中的因子 21—53。该类因子主要考虑前文分析得到的一些与 TC 强度有较好相关关系的因子,包括 TC 内区、眼壁区及外区的 SA10,眼壁区的 Syntbb、达到一定阈值的 TBB 像素个数、TBBc 等。其中东南象限 TBB 值(因子 24)用 TC 中心东侧 0.5°—1° 南侧 0.5°—0.7° 区域内的平均值表示。此外,还引用了其他学者曾采用的 TBB 因子,包括 200 km 半径内 $T_{BB} < -20$ 的像素个数^[4]、40 km 半径内 TBB 极大值^[1]、24—136 km 各环 TBB 极大值中的极小值^[1]、444 km 半径内 $T_{BB} < -55$ 的像素个数^[6]、不同范围 TBB 平均值^[5]、不同环带的 TBB 的极大值、不同环带 TBB 极大值与 TBBc 之差^[7]。

表 4 用于 TC 强度预报方程的备选因子

Table 4 Potential predictors for TC intensity forecast equations

1. 起报时刻 TC 近中心最大风速	2. 起报时刻 TC 中心所在纬度
3. 起报时刻 TC 中心所在经度	4. TC 近中心最大风速前 12 h 的变化量
5. TC 中心所在纬度前 12 h 的变化量	6. TC 中心所在经度前 12 h 的变化量
7. TC 近中心最大风速前 24 h 的变化量	8. TC 中心所在纬度前 24 h 的变化量
9. TC 中心所在经度前 24 h 的变化量	10. 200 hPa 涡动角动量通量辐合
11. 200 与 850 hPa 环境风垂直切变	12. 200 hPa 纬向风
13. 850 hPa 平均涡度	14. 850 hPa TC 内区散度
15. 200 hPa TC 外区散度	16. TC 未来 6 h 可能移速的纬向分量
17. TC 最大可能强度	18. 850 hPa 左右半圆的温度差
19. 500 hPa TC 中心高度与环境高度差	20. 850 hPa 最大涡度中心所在的经度
21. 850 hPa 最大涡度中心所在的纬度	22. 1° — 1.5° Symtbb 的平均值
23. 第 22 个因子前 24 h 平均值	24. 东南象限 TBB 值
25. 第 24 个因子前 24 h 平均值	26. 1° — 1.5° SA10 的平均值
27. 第 26 个因子前 24 h 平均值	28. 3° — 4° SA10 的平均值
29. 第 28 个因子前 24 h 平均值	30. 200 km 半径内 $T_{BB} < -20$ 的像素个数
31. 2 半径内 $T_{BB} < -45$ 的像素个数	32. 40 km 半径内 TBB 极大值 ^[1]
33. 24—136 km 半径范围内每环 TBB 极大值的极小值 ^[11]	34. 444 km 半径内 $T_{BB} < -55$ 的像素个数 ^[6]
35. 0—111 km 半径范围内 TBB 的平均值 ^[5]	36. 111—333 km 半径范围内 TBB 的平均值 ^[5]
37. 0—333 km 半径 TBB 的平均值 ^[5]	38. 0.1 半径的 SA10
39. 2 半径内 -10—30 的 TBB 像素个数	40. 0.4 半径环平均的 TBB 值 ^[7]
41. 1.2 半径环平均的 TBB 值 ^[7]	42. 1.5 半径环平均的 TBB 值 ^[7]
43. 0.3 半径环的 TBB 极大值 ^[7]	44. 0.3° — 1.3° 半径范围内的 TBB 极大值 ^[7]
45. 0.9 环 TBB 极大值与 TBBc 之差 ^[7]	46. 0.3° — 1.3° 半径范围内的 TBB 极大值与 TBBc 之差 ^[7]
47. 1.1° — 1.5° 半径范围内的 TBB 极大值	48. 1.1° — 1.5° 半径范围内 TBB 极大值与极小值之差
49. 1.1° — 1.5° 半径范围内的 TBB 极大值与 TBBc 之和	50. 0.6° — 0.8° 半径范围内 TBB 极大值与 TBBc 之差
51. 0.2 半径内 TBB 极小值与 TBBc 之差	52. 0.4° — 0.6° 半径范围的 TBB 极小值
53. TBBc	

为了有足够的独立检验样本数,用逐年“刀切法”建立逐步回归方程,并进行独立样本检验。即在所有样本中,先剔除第 1 年样本,用剩余样本建回归方程,被剔除的第 1 年样本作独立样本检验。接着,剔除第 2 年的样本,用剩余样本重建回归方程,被剔除的第 2 年样本作独立样本检验。依次类推。为了比较有无 TBB 因子对预报结果的影响,分两组进行对比试验。一组用表 4 中所有的因子建回归方程,称为有 TBB 因子组。另一组只第一、二类因子,称为无 TBB 因子组。在做引入和剔除因子的显著性检验时,置信度取 0.001。

表 5 列出的是有 TBB 因子组回归方程的样本数、复相关系数、残差及入选因子。12 h TC 强度预报方程选入的主要因子有:起报时刻 TC 近中心最大风速及其前 12 和 24 h 变化量、TC 中心所在经度前 12 h 变化量、TC 最大可能强度、500 hPa TC 中心高度与环境高度差、 1° — 1.5° 半径范围内的平均 TBB 值、0.1 半径处的 SA10、 1.1° — 1.5° 半径范围

内的 TBB 极大值与极小值之差。从方差贡献来看, 1° — 1.5° 半径范围内的平均 TBB 在各个回归方程中基本上处于第 4 位,0.1 半径处的 SA10 基本上处于第 7 位。

24 h TC 强度预报方程的入选因子主要有:起报时刻 TC 近中心最大风速及其前 12 和 24 h 变化量、TC 中心所在经度前 12 h 变化量、TC 中心所在纬度前 24 h 变化量、TC 最大可能强度、500 hPa TC 中心高度与环境高度差、TC 东南侧 TBB 平均值、 1.1° — 1.5° 半径范围内 TBB 极大值与极小值之差。从方差贡献来看,最后两个 TBB 因子在各预报方程中多处于第 3 和第 5 位。

48 h 预报,被所有回归方程都选入的 TBB 因子有 TC 东南侧 TBB 平均值的前 24 h 平滑和 200 km 半径内 $T_{BB} < -20$ 的像素个数。从方差贡献来看,后一因子的贡献在各个方程中处于第 5—7 位,而前一因子的方差贡献处于第 8—11 位。

虽然对不同预报时效、不同样本选入的 TBB 因

表 5 有 TBB 因子组回归方程的样本数、入选因子、复相关系数及残差

(表中的 1996,1997 年等对应的是剔除该年样本所建回归方程。入选因子序号所对应的因子名称见表 4)

Table 5 Sample sizes, selected factors, multiple correlation coefficients, and residuals of the stepwise regression forecast equation with TBB factor (1996 column denotes the regression equation constructed with the 1996 samples excluded, and 1997 and so on are similar; the meaning of the ordinal number in the row of selected factor is referred to Table 4)

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
样本数	1431	1535	1742	1764	1 610	1526	1528
12 h 入选因子 序号	1,4,7,11,17, 19,31,45,53	1,4,7,11,14, 17,19,22,38,48	1,6,7,17,19, 22,38,48	1,4,6,7,17, 19,22,38,47,48	1,6,7,17,19, 22,38,48	1,7,17,19, 22,38,48	1,6,7,17,19, 22,38,48
相关系数	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
残差	3.37	3.22	3.17	3.28	3.28	3.25	3.25
样本数	1375	1477	1668	1691	1546	1466	1469
24 h 入选因子 序号	1,4,6,16, 17,19,24, 48	1,4,6,7,8, 11,17,19,20, 22,25,47,48	1,6,7,11,17, 19,35,48	1,4,6,7,8, 17,19,24, 48	1,4,6,7,8, 17,19,24, 48	1,4,7,16,17, 19,20,22,26, 47,48	1,4,6,7,8, 17,19,24, 48
相关系数	0.90	0.90	0.91	0.90	0.90	0.91	0.90
残差	5.29	5.01	4.88	5.11	4.98	5.09	5.14
样本数	1203	1298	1463	1486	1358	1299	1301
48 h 入选因子 序号	4,5,9,12, 17,19,20,25, 27,30,48	3,4,6,8, 11,17,19,20, 25,27,30	3,6,7,16, 17,19,20,25, 27,30,38	1-4,6,10, 16,17,19,20, 23,25,28,30	1-4,10,12, 16,17,19,20, 23,25,28,30	1,3,4,9,10, 25,28,30	1-3,7,11,16, 17,19,20,23, 25,29,30
相关系数	0.80	0.78	0.78	0.78	0.81	0.79	0.79
残差	7.46	7.55	7.56	7.53	7.08	7.64	7.61

子不太一致,但从方差贡献来看,12 和 24 h TC 强度预报方程中,TBB 因子总能排在第 3 或第 4 位。48 h TC 强度预报方程中,有的排在第 2 位(2001,1998 年),有的排在第 5 或第 6 位。可见,TBB 因子对提高 TC 强度预报能力是有效的。

7.2 逐步回归方程选入因子的稳定性讨论

从表 5 可以看出,对于相同预报时效的回归方程,由于所用样本不同,选入的因子也不完全一致,这说明存在选入因子是否稳定的问题。若对于不同的样本,某一因子被全部或大多数回归方程选入,表明这一因子是稳定或相对稳定的,反之则是不稳定的。对于某一回归方程,若选入的因子大多是稳定或相对稳定的,则其预报结果可信度大,反之则可信度小。

对于 12 h 预报,因子 1,7,17 和 19 被所有方程(共 7 个)选入,而 22,38 和 48 被 6 个方程选入,可见这些预报因子是比较稳定的。而因子 14,31,45,47 和 52 只在某一个回归方程中出现,且方差贡献均很小。其中,因子 45 的方差贡献为 0.002,其余因子则为 0.0007—0.0008。因此 12 h 预报方程选入的主要预报因子都有较好的稳定性。

对于 24 h 预报,共有 17 个因子被不同样本方程所选入。其中,预报因子 1,4,6,7,17,19 和 48 被

6 或 7 个方程选入,而预报因子 11,16,20,22,25,26,35 和 47 只被 1—2 个方程选入。从各预报因子方差贡献来看,在各个方程中,因子 1,4,6,7,17,19 和 48 的方差贡献均较大。这表明 24 h 预报方程选入的因子也相对较稳定。

对于 48 h 预报,共有 24 个预报因子被不同样本的方程选入。其中因子 3,4,16,17,19,20,25 和 30 等被大多数方程选入,而因子 7,8,9,11,12 和 29 等只出现了 1 或 2 次。较 12 和 24 h 预报方程,在 48 h 预报方程中,出现 3 或 4 次的因子较多,如因子 1,6,10,27,28 等。因此,48 h 预报方程选入因子的稳定性不如 12 和 24 h 预报方程。

7.3 独立样本检验

对有无 TBB 因子组预报方程的独立样本检验(表 6)结果表明,有 TBB 因子组预报方程的平均绝对误差较无 TBB 因子组略小。12,24 和 48 h 的平均绝对误差分别为 2.57,4.17 和 6.67 m/s,而无 TBB 因子组分别为 2.64,4.29 和 6.92 m/s。然而,进行信度为 95% 的统计显著性检验结果表明,这两组预报试验平均绝对误差在各个预报时效均无显著差异。因此,从总体样本来看,TBB 因子的加入对 TC 强度预报并无显著的改进。

表 6 独立样本检验的样本数及平均绝对误差

Fig 6 Samples size and mean absolute errors for independent sample test (h: including TBB predictors in forecast equation; n: excluding TBB predictors)

	12 h		24 h		48 h	
	n	h	n	h	n	h
样本数	1812	1812	1723	1723	1533	1485
误差(m/s)	2.64	2.57	4.29	4.17	6.92	9.67

注:h:有 TBB 因子组,n:无 TBB 因子组。

然而,这并不能说明 TBB 因子在 TC 强度预报中完全不起作用。对起报时刻不同强度等级 TC 平均绝对误差进行比较后发现(图 9),有 TBB 因子组对 TS 的 12,24 和 48 h 平均绝对误差较无 TBB 因子组分别减小了 5.4%,8.2%和 7.8%。对于 STS,两组预报方程的 12 和 24 h 预报水平相当,有 TBB 因子组的 48 h 预报平均绝对误差则较无 TBB 因子组减少了 6.2%。两组预报方程对 TY 的平均绝对

误差在所有预报时效均基本相当。可见,TBB 因子对提高弱 TC 的强度预报能力有一定帮助,且起报时刻 TC 越弱,绝对误差减小的越多。

再比较不同强度变化幅度情况下 TBB 因子对改善强度预报的有效性(图 10)。发现,对于 12 h 预报(图 10a),有 TBB 因子组对大部分强度变化等级 TC 的平均绝对误差都较无 TBB 因子组小。最为突出的是 12 h 强度减弱 15—20 m/s 的样本(样本数为 7),平均绝对误差减小了近 4 m/s。对于 24 h 预报(图 10b),TBB 因子对 TC 强度预报的改善主要体现在强度稳定样本,即 24 h 强度变化在 -5—0 m/s 和 0—5 m/s 的样本,绝对误差分别降低了 29.6%和 23.8%。对于 48 h 预报(图 10c),加入 TBB 因子后,大部分强度变化等级 TC 预报误差都有所减小,尤其是对增强 10 m/s 以上的样本,预报能力有较大提高,强度变化为 10—15,15—20,20—25 和 25—30 m/s TC 的绝对误差分别降低了 9.0%,25.5%,26.2%和 11.2%。可见,TBB 因子可使 12 h 强度减弱 15 m/s 以上 TC,24 h 强度稳定 TC 和 48 h 预报强度增强 10 m/s 以上 TC 的强度预报能力有明显的改善。

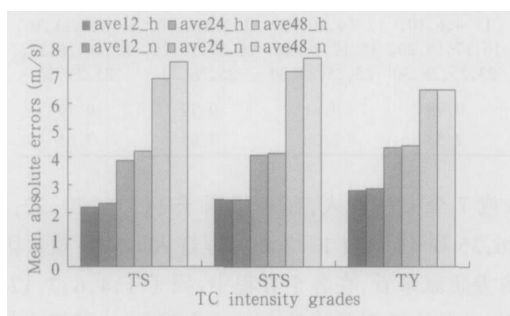


图 9 起报时刻不同 TC 强度等级的平均绝对误差比较(12,24,48 表示 12,24,48 h 预报,h(n) 表示有(无) TBB 因子组)

Fig. 9 Comparison of the mean absolute errors of predictions for TCs of different initial intensity categories (12, 24, 48: period of validity, h(n): including (excluding) TBB predictors)

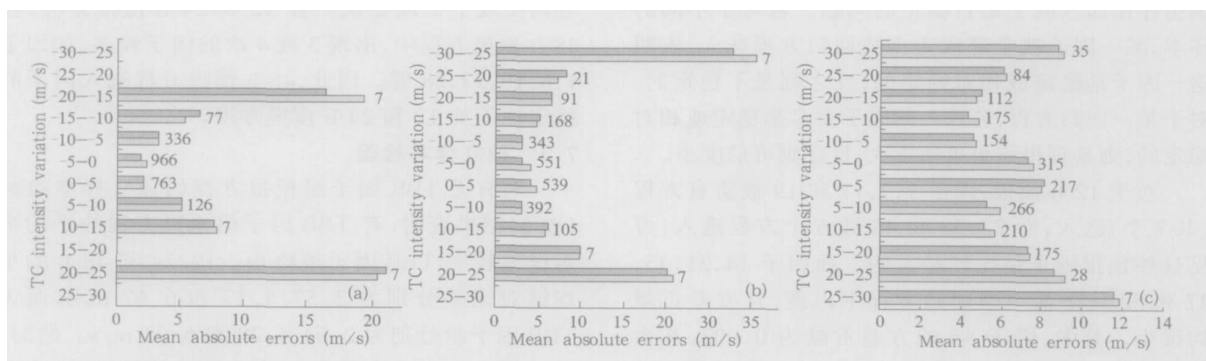


图 10 不同强度变化幅度 TC 的平均绝对误差比较(a. 12 h 预报,b. 24 h 预报,c. 48 h 预报;深色为有 TBB 因子组独立样本检验结果,浅色为无 TBB 因子组的独立样本检验结果,立柱上数字为样本数)

Fig. 10 Comparison of the mean absolute errors of predictions for TCs of different change amplitudes(a. 12-h forecast, b. 24-h forecast, c. 48-h forecast; the number above column is sample size, and the hatched/ solid column denote the independent sample test result with/ without TBB factors, respectively)

8 结论与讨论

本文应用 GMS-5 资料分析了西北太平洋 TC 强度与 TBB、TBB 的对称和非对称相关关系,并通过建立 TC 强度的统计回归预报方程讨论 TBB 因子对提高 TC 强度预报能力的有效性。主要结论如下:

(1) TC 东南侧平均 TBB、 0.8° — 1.7° 半径范围内平均 TBB 量和 SA10、2 半径内 $T_{BB} < -45$ 像素个数、 1.1° — 1.5° 半径范围内 TBB 最大值与滞后 0—48 h TC 强度有很好的负相关关系。 0.8° — 1.7° 半径范围内平均 TBB 量 (SA10) 与滞后 24 (48) h TC 强度的相关关系最好。

(2) 考虑 TBB 因子的回归方程对 TS 和强热带风暴的强度预报能力有较大提高。对 TY 等级的强度预报没有什么作用。TBB 因子对 12 h 强度减弱 15 m/s 以上样本,24 h 强度稳定样本,48 h 预报强度增强 10 m/s 以上的样本预报能力有明显的改善。

(3) 1° — 1.5° 半径的平均 TBB 值、中心附近的 SA10、 1.1° — 1.5° 半径范围内 TBB 极大与极小值之差、TC 东南侧平均 TBB 及其前 24 h 的平均值、200 km 半径内 $T_{BB} < -20$ 的像素个数等因子对 TC 12—48 h 的强度预报有一定贡献。 1° — 1.5° 半径的平均 TBB 值在 12 h 强度预报方程中的方差贡献位居第 4, TC 东南侧的 TBB 的平均值、 1.1° — 1.5° 半径范围内 TBB 极大与极小值之差在 24 h 强度预报方程中的方差贡献位居第 3 和第 5, 200 km 半径范围内 $T_{BB} < -20$ 的像素个数在 48 h 强度预报方程中的方差贡献进入前 7 位。

(4) 尽管 0.8° — 1.7° 半径范围的 SA10 与滞后 0—48 h TC 强度有很好的负相关关系,但各预报时效的方程中,该因子未被选入。

参考文献

[1] Velden C S, Olander T. Evaluation of an objective scheme to es-

timate tropical cyclone intensity from digital geostationary satellite infrared imagery. *Wea Forecast*, 1998, 13: 172-186

- [2] DeMaria, Mark, Kaplan, John. A Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic Basin. *Wea Forecast*, 1994, 9(2): 209-220
- [3] DeMaria, Mark, Kaplan, John. Sea surface temperature and the maximum intensity of atlantinc tropical cyclone. *J Climate*, 1994, 7: 1324-1344
- [4] DeMaria, Mark M Zehr, Raymond, et al. The use of GEOS Imagery in Statistical Hurricane Intensity Prediction. Preprint, 25th Conf. On Hurr. and Trop. Meteor, 29 April-3 May 2002, San Diego, Calofornia, AMS, 2002. 120-121
- [5] Gentry R Cecil, Rodgers, Edward, et al. Predicting tropical cyclone intensity using satellite-measured equivalent blackbody temperatures of cloud tops. *Mon Wea Rev*, 1980, 108(4): 445-455
- [6] Fitzpatrick, Patrick J. Understanding and forecasting tropical cyclone intensity change with the Typhoon Intensity Prediction Scheme (TIPS). *Wea Forecast*, 1997, 12(4): 826-846
- [7] 王瑾, 江吉喜. 热带气旋强度的卫星探测客观估计方法的研究. *应用气象学报*, 2005, 16(3): 285-292
Wang Jin, Jiang Jixi. An objective technique for estimating the intensity of tropical cyclones from geostationary meteorological satellite observations. *J Appl Meteor Sci*, 2005, 16(3): 285-292
- [8] 陈光华, 裘国庆. 对南海热带气旋近海加强机理个例模拟研究. *气象学报*, 2005, 63(3): 359-364
Chen Guanghua, Qiu Guoqing. A case simulation study on offshore intensification mechanism of tropical cyclone in South China Sea. *Acta Meteor Sci(in Chinese)*, 2005, 63(3): 359-364
- [9] 罗哲贤. 台风轴对称环流和非轴对称扰动非线性相互作用的研究. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(7): 686-694
Luo zhexian. The nonlinear interaction between the axisymmetric and non axisymmetric circulation of typhoon. *Science in China (D)* (in Chinese), 2003, 33: 686-694
- [10] Bankert Richard L, Tag Paul M. An automated method to estimate tropical cyclone intensity using SSM/I imagery. *J Appl Meteor*, 2002, 41(5): 461-472

APPLICATION OF EQUIVALENT BLACK BODY TEMPERATURE TO FORECAST OF TC INTENSITY IN NORTHWEST PACIFIC

Chen Peiyan^{1,2} Duan Yihong^{1,2} Yu Hui^{1,2} Hu Chunmei³

1 *Shanghai Typhoon Institute of the China Meteorological Administration, Shanghai 200030*

2 *Laboratory of Typhoon Forecast Technique/ CMA, Shanghai 200030*

3 *Chongqing Municipal Meteorological Office, Chongqing 401147*

Abstract

Using the equivalent black body temperature (TBB) data retrieved from meteorological satellite GMS-5 in 1996 - 2002, the correlation between the circular symmetric/asymmetric component of TBB and the intensity of tropical cyclone (TC) at various time lag of 0 to 48 h is analyzed for the northwest Pacific (120°E - 155°E, 0° - 50°N) with landed and near-coast samples excluded. It is found that the total TBB immediately southeast of the eyewall, the circular symmetric component and the sum of the amplitudes of tangential 1 - 10 waves (SA10) of the TBB between the radii of 0.8 and 1.7 degree, were significantly/negatively correlated with the TC intensity at various time lag from 0 to 48 h, and especially their maximum 24 h-lag correlation coefficients reached - 0.52, - 0.59, and - 0.625, respectively.

A statistical prediction scheme for TC intensity is then developed based on climatological, persistent, synoptic and TBB factors by stepwise regression technique. It is found that the variance contribution of the averaged TBB over the ring domain between radii of 1 and 1.5 degree from the TC center ranks the fourth in the equation for 12h TC intensity prediction, and those of the total TBB southeast of the eyewall and of the difference between maximum and minimum TBB in the ring domain between the radii of 1.1 and 1.5 degree rank the third and fifth in the 24 h TC intensity forecast equation, respectively. It is also shown that, with TBB factors included, following predictions are improved as compared to the scheme without TBB factors: 48 h intensity prediction for severe tropical storm (STS), 12 hours intensity prediction for tropical cyclones (TC) with a weakening rate greater than 15(m/s)/(12 h), 24 h intensity prediction for TCs with almost no intensity change, and 48 h intensity prediction for TCs intensifying faster than 10 (m/s)/(48 h).

Key words: TBB, Asymmetry structure, Intensity forecast, Tropical cyclone.