

# 南海与西北太平洋地区夏季热带气旋潜在生成指数的改进

陶丽<sup>①②\*</sup> 张艺帆<sup>①</sup> 王学兵<sup>③</sup>

① 南京信息工程大学 大气科学学院 江苏 南京 210044;

② 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室 江苏 南京 210044;

③ 中宁县气象局 宁夏 中卫 751200

\* 联系人 E-mail: taoli@nuist.edu.cn

2017-12-28 收稿 2018-05-11 接受

国家重点研发计划项目(2016YFA0600402); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

**摘要** 现阶段使用的热带气旋潜在生成指数(Genesis Potential Index, GPI)在气候场的空间分布上能很好地拟合热带气旋的生成情况,但在热带气旋的年际变化拟合上效果很差。本研究考虑了相对涡度在热带气旋年际变化拟合上的重要作用,并以此为出发点,尝试改善GPI在西北太平洋地区的拟合效果。基于对1979—2011年美国联合飓风警报中心提供的热带气旋最佳路径数据和NCEP/NCAR再分析资料数据集的研究,将之前GPI中的绝对涡度项替换为修正过的相对涡度项。科氏力项仍然保留;将南海(100°~120°E, 5°~25°N)与西北太平洋地区(120°~180°E, 5°~40°N)热带气旋生成的差异性也纳入了考量,并在这两个区域分别构建GPI公式,改善了对热带气旋生成的气候分布模拟。除此之外,较之已存的GPI指数,改进后的GPI还很大程度提高了GPI对热带气旋生成年际变化的拟合效果,特别是对弱热带气旋年际变化的拟合效果有了显著提升。

**关键词**  
热带气旋;  
年际变化;  
潜在生成指数;  
西北太平洋

热带气旋(Tropical Cyclone, 简称TC)是一种具有暖心结构的气旋性涡旋,一般产生于热带海洋面上。西北太平洋海域平均每年约有26个热带气旋生成,7~8个热带气旋登陆我国,受热带气旋影响的区域占国土面积二分之一,且近年来台风灾害越发严重(程正泉等,2007; Zhang et al., 2009; 蔡菁等,2017; 王毅等,2019)。

研究热带气旋生成频数的主要方法之一是通过分析与热带气旋生成密切相关的大尺度环境因子,从而对热带气旋活动进行研究(Gray, 1979; Ryan et al., 1992; Royer et al., 1998; Bister, 2002; Emanuel and Nolan, 2004; Zhang et al., 2009; Murakami and Wang, 2010; 周伟灿等, 2015; 钱伊恬和徐邦琪, 2016; 金爱浩等, 2018; 李艳等, 2019),因为大尺度环境因子可以影响热带气旋的形成、发展与移动等各个方面(Emanuel, 1987)。

热带气旋潜在生成指数(Genesis Potential Index, GPI)最早由Gray在1979年提出,用包含海洋热能、科氏参数在内的若干动力因子与热力因子构建了一个热带气旋生成的经验指数。但很快指出,因为海表温度持续上升,不能适用于所有气候研究,有其局限性(Ryan et al., 1992; Royer et al., 1998)。

Emanuel(1995)提出了一个全新的概念—热带气旋最大潜在强度(Maximum Potential Intensity, MPI),后来Bister(2002)进一步发展了这个理论,构建了一个经验函数来定量计算热带气旋的最大潜在强度。

在这一理论的基础上,Emanuel and Nolan(2004)对Gray的指数进行了改进。新指数涉及了850 hPa绝对涡度、600 hPa相对湿度、850 hPa和200 hPa的垂直风切变和最大潜在强度。这一指数

引用格式: 陶丽,张艺帆,王学兵. 2020.南海与西北太平洋地区夏季热带气旋潜在生成指数的改进[J].大气科学学报, 43(4): 603-616.

Tao L, Zhang Y F, Wang X B. 2020. Improvement of genesis potential index for western North Pacific tropical cyclones [J]. Trans Atmos Sci, 43(4): 603-616. doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20171228001. (in Chinese).

比起 Gray(1979)的经验指数,一定程度上修正了前者不能适用于气候研究的局限性,并适用于不同的气候背景,称之为 EN2004 指数。

此后, Murakami and Wang(2010)对 GPI 再次进行改进。考虑到平均垂直运动在热带气旋形成中的作用,故将其加入 GPI 的构建。改进后的 GPI 可以更好地表征 TC 频数的空间分布,尤其在东太平洋提升显著。文中称之为 MW2010 指数。

Emanuel(2010)、赵军平等(2012)指出,南海与西北太平洋地区存在一定程度的地理差异。不同区域内,相关环境因子影响热带气旋生成的机制和程度都不尽相同。赵军平等(2012)提出了在南海(100°~120°E, 5°~25°N)和西北太平洋(120°~180°E, 5°~40°N)分别构建热带气旋潜在生成指数(GPI)。

Bruyère et al.(2012)的研究表明,在北大西洋热带气旋年际变化的重现上,最大潜在强度与高低层垂直风切要比湿度项与涡度项表现更好,他们在此基础上构建了一个新的指数 CGI(Cyclone Genesis Index),用来表征北大西洋热带气旋的生成。该指数只由最大潜在强度与高低层垂直风切构成,在表征热带气旋的季节性变化上效果显著。

Zhang et al.(2010)利用海洋再分析资料提出了一个全新的 GPI 公式,此公式包括 1 000 hPa 绝对涡度、海洋上部混合层平均温度、海表辐射和 26 °C 等温线深度这几个因子。这一公式舍弃了传统的几个大气大尺度环境因子,主要着眼于海洋环境因子。这一 GPI 主要针对整个西北太平洋的区,在 TC 的空间分布拟合上取得了不错的效果。

热带气旋生成频数不仅仅受局地因子的影响,还受到遥相关型的控制。Zhao and Wang(2016)探讨了太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)对 ENSO 的影响,通过研究不同位相的 PDO 与 ENSO 之间的关系,得出当 ENSO 被作为预报热带气旋活动的一个预报因子时, PDO 的位相也应该纳入考量的结论。

现在较常使用的 GPI,其空间分布与观测资料有一定的差异,年际变化上与观测资料有着相当明显的差异(陈联寿和丁一汇,1979; Camargo et al., 2007a; Zhang et al., 2010)。之所以会出现这样的问题,其一是因为以往的研究大都着眼全球统一进行指数构建,没有考虑西北太平洋地区的独特性。西北太平洋热带气旋生于暖池,相比于 SST,其受 ENSO 与季风槽等因素的影响更大(陈联寿和丁一

汇,1979; Chang et al., 1996; Wang and Chan, 2002),这一点与大西洋明显不同。其二,现有的研究可能考虑到 GPI 作为一个气候概念存在,因此在年际变化的拟合上没有做太多要求,从而导致效果不佳。本研究将着力改善这两点。

## 1 资料与方法

使用美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warming Center, JTWC)提供的热带气旋最佳路径数据集(热带气旋每 6 h 一次的经纬度和最大风速)。研究对象选取热带风暴(TS)强度以上的热带气旋。具体方法是:利用 1979 年—2011 年夏季 7—9 月的 JTWC 热带气旋最佳路径资料,将一个热带气旋的发展过程中第一次达到热带风暴强度时的经纬度记作该热带气旋的生成位置,频数记一次,全部统计完成后,将统计资料插值到 2.5°×2.5°的网格上,并作平滑处理。文中强热带气旋定义为 TC 最大风速大于等于 114 knots,并记作 TC45,弱热带气旋定义为 TC 最大风速大于等于 35 knots,小于 114 knots,并记作 TC123。

大尺度环境因子的资料使用的是 NCEP/NCAR 再分析资料月平均数据集,分辨率为 2.5°×2.5°,主要包括 850 hPa 相对涡度,600 hPa 相对湿度,高空各层温度与风场,500 hPa 垂直速度等。

文中的海表面温度数据使用了来自 Hadley 中心的全球逐月平均再分析海温数据,分辨率为 1°×1°。

## 2 现有 GPI 拟合效果

现阶段最常使用的 GPI 为 Emanuel and Nolan(2004)构建的 EN2004 指数,以及 Murakami and Wang(2010)构建的 MW2010 指数。公式如下:

$$I_{GP-EN2004} = (10^5 |\eta|)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h_{Rh}}{50}\right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^3 (0.1V_s + 1)^{-2} \quad (1)$$

$$I_{GP-MW2010} = (10^5 |\eta|)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h_{Rh}}{50}\right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^3 (0.1V_s + 1)^{-2} \left(\frac{-\omega + 0.1}{0.1}\right) \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为 850 hPa 绝对涡度;  $h_{Rh}$  为 600 hPa 相对湿度;  $V_{pot}$  为最大潜在强度;  $V_s$  为 200 hPa 与 850 hPa 之间水平风速垂直切变,  $\omega$  为 500 hPa 垂直平均风速。

图 1 为整个西北太平洋区域 1979—2011 年夏

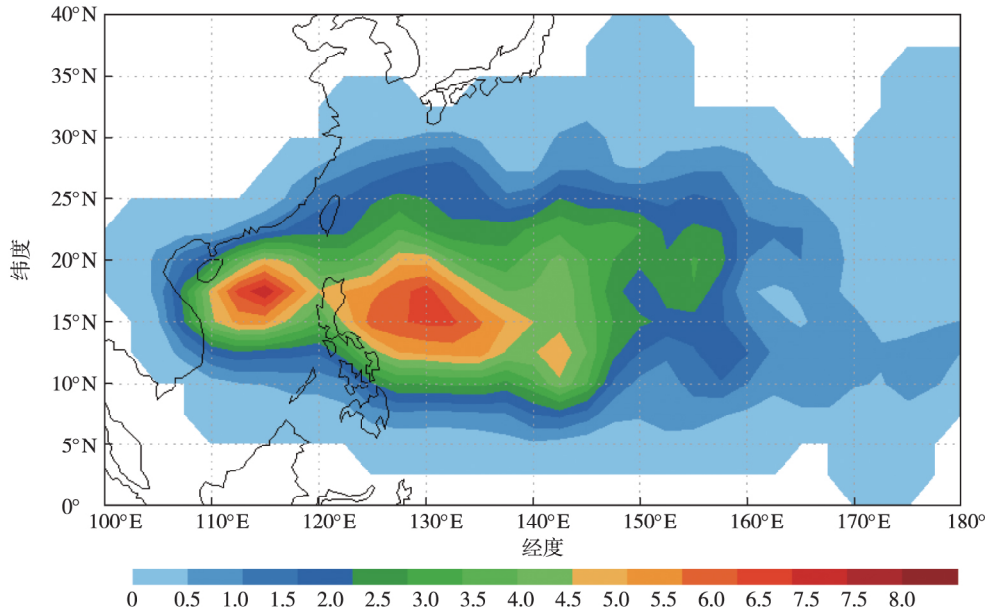


图1 1979—2011年7—9月西北太平洋热带气旋生成空间分布情况

Fig.1 Climatological distribution of the JAS-mean TC genesis frequency in the western North Pacific (WNP) for the period of 1979—2011 based on the best-track data

季(7—9月)热带气旋生成频数的空间分布,绝大多数的热带气旋生成位于 $5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ ,其集中生成区位于 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 、 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 。从图像来看,热带气旋的生成源地主要有两个,中心分别位于( $130^{\circ}\text{E}$ ,  $15^{\circ}\text{N}$ )和( $110^{\circ}\text{E}$ ,  $15^{\circ}\text{N}$ )。这与前人研究(陈世荣, 1990)中所提到的热带气旋三源地,菲律宾海盆,马里亚纳群岛两侧洋面以及南海海盆是一致的。

运用上文提到的两种现有GPI模拟出的热带气旋生成频数的空间分布情况如图2a、2c所示,其时间拟合曲线如图2b、2d所示,表1为各GPI与实际台风频数相关系数的计算结果。GPI的时间变率由( $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ,  $5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ )区域范围平均所得。这样选取区域平均范围的原因在于,GPI的年际变化数据对比的是整个西北太平洋区域总热带气旋生成频数,因此区域平均范围应尽可能涵盖有热带气旋生成的全部地区,故取( $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ,  $5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ )。

EN2004指数可以表征TC在西北太平洋区域内的空间分布,但存在明显不足。主要表现在南海海盆的热带气旋中心丢失,同时菲律宾海盆的大值中心偏移,从( $130^{\circ}\text{E}$ ,  $15^{\circ}\text{N}$ )偏移至( $140^{\circ}\text{E}$ ,  $15^{\circ}\text{N}$ )。EN2004指数在( $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ,  $5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ )区域内与观测资料的空间相似程度达到了0.56。而在时间相关方面,EN2004指数拟合程度很差,时间相关系数为-0.10,呈负相关趋势。之所以出现这样的问

题,原因可能是EN2004公式中最大潜在强度的指数过大所导致。由于全球变暖,海表面温度逐年稳步升高,从而导致最大潜在强度随之升高,因而EN2004指数一直呈现上升趋势,且上升趋势越来越强,但整个西北太平洋实际热带气旋生成频数呈现出的是波动上升,并于1994年后逐年下降的态势,因此导致了GPI指数在时间拟合上与观测资料出现了较大差异。

Murakami and Wang(2010)对EN2004指数进行了改进,加入了平均垂直运动项,这一指数被简称为MW2010指数。MW2010指数在对热带气旋生成频数的大值中心的拟合上效果有所提升,南海海盆中心可在空间分布图像上可以被捕捉到,且生成频数的模拟结果更加接近实际,但菲律宾海盆处的热带气旋中心仍然偏移,且南海海盆中心不甚明显,MW2010指数在( $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ,  $5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ )区域内与观测资料的空间相似度达到0.67,但在此区域MW2010指数与热带气旋生成频数的年际变化的时间相关系数仍为负相关(-0.08),仍有不足。

考虑到MW2010指数的改进目的原本是基于东太平洋和大西洋热带气旋生成频数构建的,而EN2004指数也不是基于西北太平洋地区构建的,因此,本文使用Emanuel and Nolan(2004)所提出的构建热带气旋潜在生成指数的方法,对这两个指数在整个西北太平洋地区进行修正,修正结果如下:

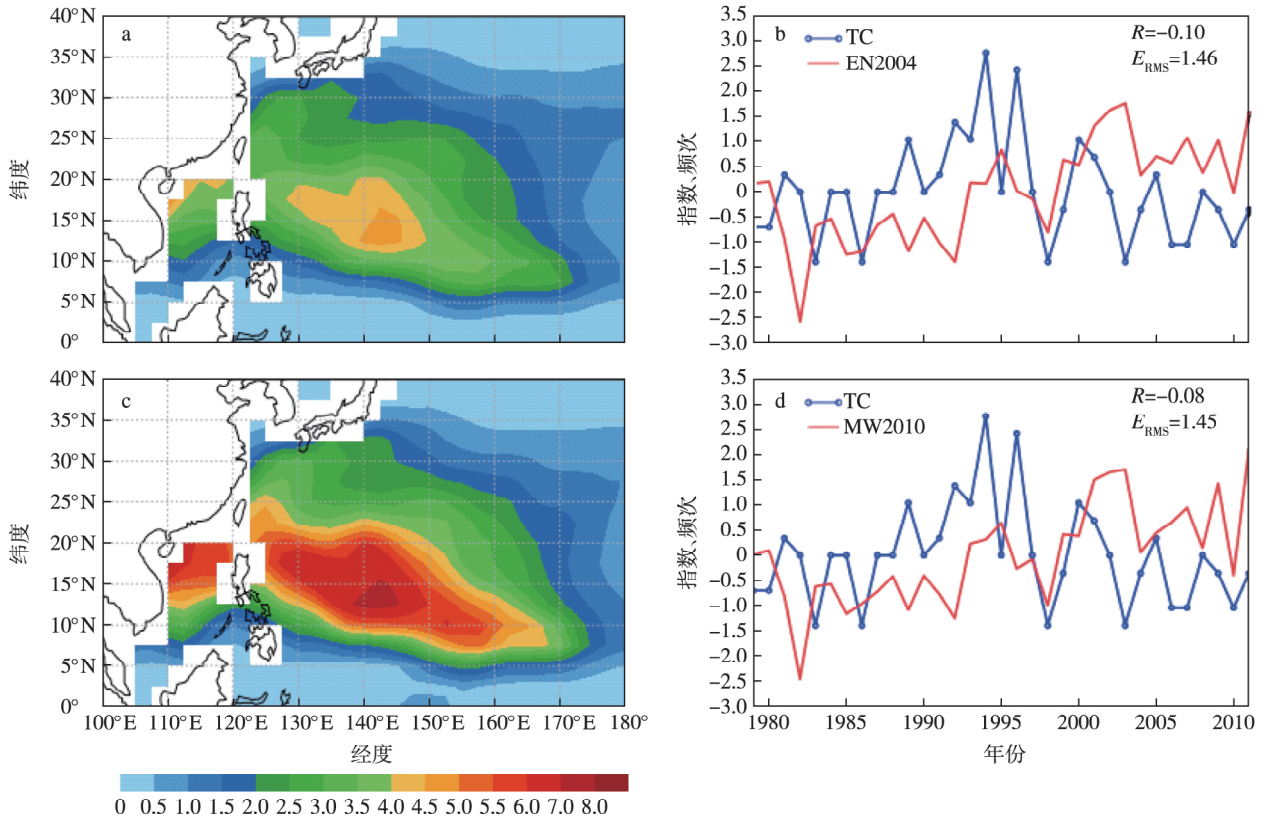


图2 两种现有 GPI 的拟合结果: (a) EN2004 指数拟合的热带气旋空间分布; (b) 标准化后的(100°~180°E, 5°~30°N) 区域平均 EN2004 指数(红线)与热带气旋生成频次(蓝线)的年际变化; (c) MW2010 指数拟合的热带气旋空间分布; (d) 标准化后的(100°~180°E, 5°~30°N) 区域平均 MW2010 指数(红线)与热带气旋生成频次(蓝线)的年际变化 ( $R$  表示相关系数  $E_{RMS}$  表示均方根误差)

Fig.2 Climatological distributions of the JAS-mean TC genesis frequency based on (a) EN2004 and (c) MW2010 for the period of 1979—2011 in the WNP and (b, d blue) the normalized interannual variation of the JAS-mean TC genesis frequency, and (b, red) the JAS-mean EN2004, (d, red) MW2010 averaged in the domain(5°—30°N, 100°—180°E)

表1 四种现有 GPI 的各项指数及其与观测资料的空间相关系数、时间相关系数

Table 1 Spatial and time correlation of each index in four GPIs and the best-track data

GPI 指数	$\eta$	$h_{Rh}$	$V_{pot}$	$V_s$	$\omega$	空间相关系数	时间相关系数
EN2004	1.5	3	3	-2		0.60	-0.10
MW2010	1.5	3	3	-2	1	0.66	-0.08
EN2004_wp	1.5	3	3.5	-1		0.71	-0.11
MW2010_wp	1	1.5	2.5	-0.5	3	0.75	0.09

$$I_{GP-EN2004\_wp} = (10^5 |\eta|)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h_{Rh}}{50}\right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^{\frac{7}{2}} (0.1V_s + 1)^{-1} \quad (3)$$

$$I_{GP-MW2010\_wp} = (10^5 |\eta|)^1 \left(\frac{h_{Rh}}{50}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^{\frac{5}{2}} (0.1V_s + 1)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{-\omega + 0.1}{0.1}\right)^3 \quad (4)$$

修正结果如图3所示。

修正 EN2004 指数(记作 EN2004\_wp)与原来的指数相比,大值中心更加明显,但热带气旋生成中心偏移和时间拟合不佳的情况并没有改善。从各环境因子的系数来看,EN2004\_wp 指数中,最大潜在强度的指数增大,垂直风速切变的系数减小,这一指数的空间拟合程度为 0.66,时间拟合程度为 -0.11,较原指数并无提升。修正 MW2010 指数(记作 MW2010\_wp)在空间拟合上达到了 0.75,效果很好。其年际变化相似程度则只有 0.09。这一指数

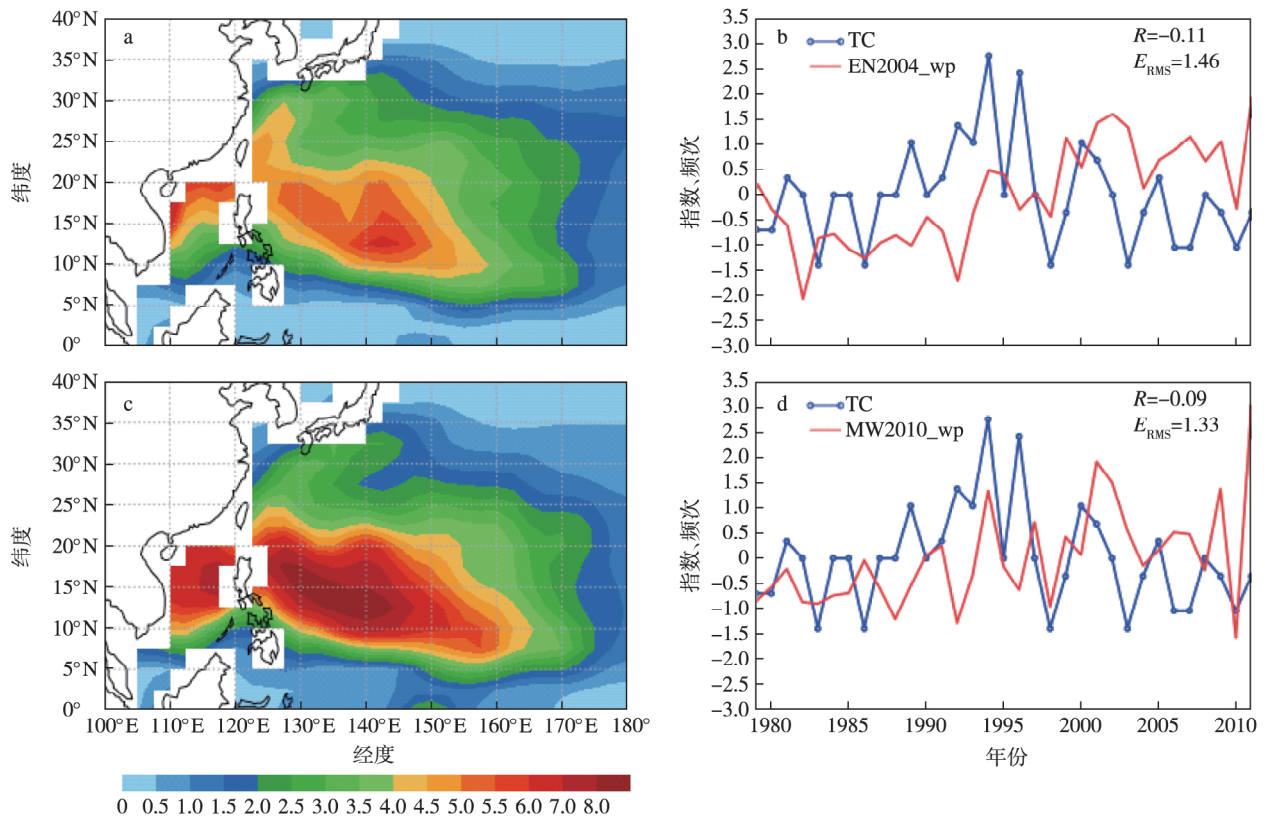


图3 修正后的两种 GPI 指数拟合结果: (a) EN2004\_wp 指数拟合的热带气旋空间分布; (b) 标准化后的(100°~180°E, 5°~30°N) 区域平均 EN2004\_wp 指数与热带气旋生成频数的年际变化; (c) MW2010\_wp 指数拟合的热带气旋空间分布; (d) 标准化后的(100°~180°E, 5°~30°N) 区域平均 MW2010\_wp 指数与热带气旋生成频数的年际变化 ( $R$  表示相关系数  $E_{RMS}$  表示均方根误差)

Fig.3 Climatological distributions of the JAS-mean TC genesis frequency based on (a) EN2004\_wp and (c) MW2010\_wp for the period of 1979—2011 in the WNP and (b, d, blue) the normalized interannual variation of the JAS-mean TC genesis frequency and the (b, red) JAS-mean EN2004\_wp and (d, red) MW2010\_wp averaged in the domain(100°—180°E, 5°—30°N)

的修正过程主要表现为垂直运动项的指数被明显放大。

修正前后两种指数的各因子系数参看表 1。可以看到,在时间拟合方面,GPI 指数还有着明显的不足,亟待改进。

### 3 GPI 指数改进

#### 3.1 大尺度环境因子分析

整个西北太平洋及南海区域在 1979—2011 年的夏季(7—9 月)共计生成了 463 个热带气旋,其中 76 个生于南海,387 个生成于西北太平洋,分别占总数的 16.3%和 81.7%。前人研究(李雪等,2010)表明,两区域 TC 频数年际变化的相关系数不足 0.10,因此可以将二者作为独立个体进行分析。

Wu and Zhao(2012)将热带气旋生成的前提条件总结为:低层一定的地转偏向力、广阔的高温海洋面、上下层较小的垂直风速切变和合适的环境流场,

再结合前文提到的两种现存 GPI,选取了以下大尺度环境因子作为研究对象:850 hPa 绝对涡度、850 hPa 相对涡度、600 hPa 相对湿度、500 hPa 垂直速度、最大潜在强度和 200 hPa 与 850 hPa 之间的水平风速垂直切变。

表 2 为南海和西北太平洋两个区域内的多年平均的 7—9 月环境因子与观测到的多年平均 7—9 月 TC 生成数量的空间相关情况。

南海区域范围取(100°~120°E, 0°~25°N),西北太平洋区域范围取(120°~180°E, 0°~40°N),以 120°E 为分界线的原因,前人已有说明(李雪等,2010)。从表 2 中可以看到,某些大尺度的环境因子在两个区域呈现出完全相反的相关,主要包括绝对涡度、相对湿度与最大潜在强度。其他因子,即垂直风速切变、平均垂直风速与相对涡度,在两个地区虽然存在数值上的差异,但相关性保持一致。而涡度、相对湿度和最大潜在强度都是热带气旋生成必须的

因素,这一点更加确定了分区域构建 GPI 的必要性。

表 2 7—9月南海与西北太平洋区域各环境因子与热带气旋生成频数气候场的空间相关系数( $\xi$ 为相对涡度  $f$  为科氏参数)

Table 2 Spatial correlation coefficients between the climatological distribution of the JAS-mean TC genesis frequency and climatological distributions of the JAS-mean parameters in the South China Sea and WNP ( $\xi$  is the relative vorticity  $f$  is the coriolis parameter)

环境因子	南海	西北太平洋	南海-西北太平洋
$\eta$	0.75	-0.2	0.06
$h_{Rh}$	-0.4	0.34	0.2
$V_{pot}$	-0.5	0.4	0.27
$V_s$	-0.62	-0.27	-0.25
$\omega$	-0.4	-0.56	-0.46
$\xi$	0.73	0.58	0.6
$\xi+0.25f$	0.76	0.44	0.53

### 3.1.1 大尺度环境因子和 TC 的空间关系

Murakami and Wang(2010)构建的 GPI 包括了 850 hPa 绝对涡度、200 hPa 与 850 hPa 风垂直切变和 500 hPa 垂直风速,最大潜在强度和 600 hPa 相对湿度。图 4 为环境因子的气候平均场与历年 TC 的位置关系,其中图 4a—e 为 MW2010 中提到的五种因子,图 4f 为相对湿度。每一个红点代表一个 TC 生成。

由图 4a 可见,绝对涡度的气候平均场在南海海盆处有一小槽,而在西北太平洋区域为较平直的直线,这一处不同于表 2 中所展示的在两个区域绝对涡度与热带气旋频数相关关系相反这一特征是契合的。弱的正的绝对涡度和一定的地转偏向力可以维持气流辐合并促使其逆时针偏转,最终发展为强大的水平涡旋。由图 5 可见,大部分格点上绝对涡度和热带气旋频数的时间相关系数通过了 0.05 信度的显著性水平检验。

由图 4b、4c 可见,大部分热带气旋产生在相对湿度大值区和潜在强度大值区。该区域的海水蕴藏着较大的热量,可以通过海气相互作用,为底层大气提供充足的暖湿空气,从而导致强烈的上升运动。但在南海地区却非如此。可以看到,TC 在整个西北太平洋地区集中生成于最大潜在强度大值区,而在南海地区则集中于最大潜在强度小值区,与表 2

所示一致,相对湿度与最大潜在强度在南海区域与热带气旋频数表现为负相关,而在西北太平洋区域表现为正。

强烈的上升运动意味着强烈的对流活动。由图 4e 可知,热带气旋主要生成在  $\omega$  负值区,即强对流区。这与表 2 中关于  $\omega$  的计算结果一致。结合图 5 可以看到  $\omega$  在时间相关方面存在相当的区域通过了 0.05 信度的显著性水平检验,但这些区域有些北偏,并不在热带气旋的主要生成区。

垂直风切变较小可以保证暖洋面持续加热同一气柱,从而加快暖心结构的形成。可以看到,热带气旋集中生成在垂直风切变较小的位置,即(120°~160°E, 10°~25°N)。垂直风速切变的时间相关情况与垂直速度类似,且这两个因子在南海与西北太平洋地区不存在相关性相反的情况。

相对湿度在南海与西北太平洋地区相关情况都较好,且相关性一致,从图 4 可以看到,台风主要集中在相对湿度正值区,观测到的台风频数大值中心也正是相对涡度的正值中心,拟合效果良好。

### 3.1.2 大尺度环境因子与 TC 的时间关系

图 5 为各空间格点上 1979—2011 年 7—9 月大尺度环境因子与插值后的热带气旋生成频数的时间相关系数分布。

可以直观地看到,整个西北太平洋区域内通过 0.05 信度的显著性水平检验。地区最大的大尺度环境因子是相对湿度,因为  $f$  不随时间变化,所以绝对涡度与 TC 生成频数的时间相关分布图与相对湿度一致。即相对湿度更能够表征 TC 生成的时间变化情况。

其次是垂直风切、相对湿度和垂直运动,都有相当部分的区域通过了 0.05 信度的显著性水平检验。五个大尺度环境因子中,只有最大潜在强度几乎没有区域可以通过 0.05 信度的显著性水平检验,其原因是整个西北太平洋海温较高。不论在哪,最大潜在强度基本都能满足 TC 生成所需要的条件,因此其年际变化并不会影响到热带气旋的生成频数。

### 3.2 构建新的 GPI

结合前文的分析,我们运用线性拟合和指数转换等方法,构建了全新的 GPI 公式。改进后的 GPI ( $I_{GP-scs}$ ) 计算公式如下:

$$I_{GP-scs} = 0.14 (10^5 |\xi + 0.25f|)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{h_{Rh}}{50}\right)^{-4} \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^{-\frac{7}{2}} \left(\frac{-\omega+0.1}{0.1}\right)^8 (0.1V_s+1)^{-\frac{3}{2}f^{\frac{1}{4}}} \quad (5)$$

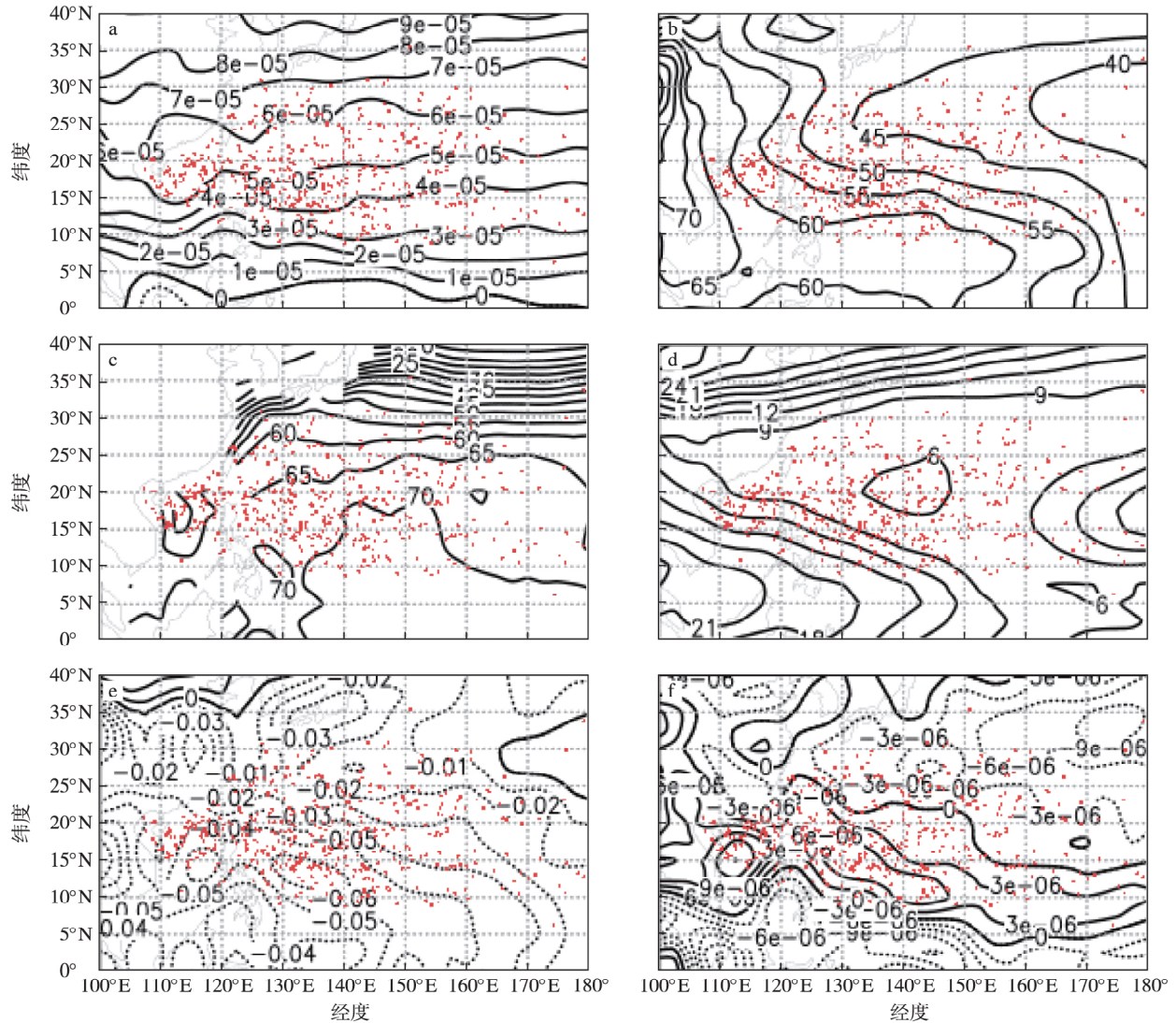


图4 7—9月环境因子(等值线)和TC的位置(红点)关系:(a)绝对涡度(单位:  $s^{-1}$ );(b)相对湿度(单位: %);(c)最大潜在强度(单位:  $m \cdot s^{-1}$ );(d)垂直风切(单位:  $m \cdot s^{-1}$ );(e)垂直运动(单位:  $Pa \cdot s^{-1}$ );(f)相对涡度(单位:  $s^{-1}$ )

Fig.4 Distributions of the JAS-mean parameters( contours) and TC genesis positions( red dots) in the WNP: (a) absolute vorticity at 850 hPa( unit:  $s^{-1}$ ); (b) relative humidity at 600 hPa( unit: %); (c) MPI( unit:  $m \cdot s^{-1}$ ); (d) vertical wind shear between 200 and 850 hPa( unit:  $m \cdot s^{-1}$ ); (e) vertical p-velocity at 500 hPa( unit:  $Pa \cdot s^{-1}$ ) and (f) relative vorticity at 850 hPa( unit:  $s^{-1}$ )

$$I_{GP-wnp} = 0.24 \left( 10^5 | \xi + 0.25f | \right)^1 \left( \frac{h_{Rh}}{50} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{V_{pot}}{70} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{-\omega + 0.1}{0.1} \right)^3 \left( 0.1V_s + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} f^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

新公式中用  $\xi + 0.25f$  (简称  $vf$ ) 代替了 850 hPa 绝对涡度,主要出于两个方面的考虑。一方面,前文已经提到,绝对涡度在相当大的区域内呈现出平直直线式的空间分布,在这种情况下绝对涡度很难表征热带气旋的空间分布,在表 2 中也可以看到,绝对涡度在西北太平洋地区空间相关性仅为 -0.2,在整个南海-西北太平洋地区也只有 0.06,效果不如相

对涡度。另一方面,如果直接用相对涡度应用于计算的过程,会存在一些问题,因为相对涡度有正有负,在构建 GPI 的过程中存在对数转换的步骤,因此不能直接使用正负值交替出现的相对涡度资料。于是我们对其进行了变换处理,在绝对涡度的基础上缩小了地转涡度的量级,从而起到突出相对涡度的作用。变换后的相对涡度项在研究区域的大部分格点上都为正值,这样做不仅保存了相对涡度的良好相关性,也使统计学运算能够顺利进行。

在前文提到的大尺度环境因子之外,公式中还出现了地转涡度项,加入这一项的目的在于,希望通

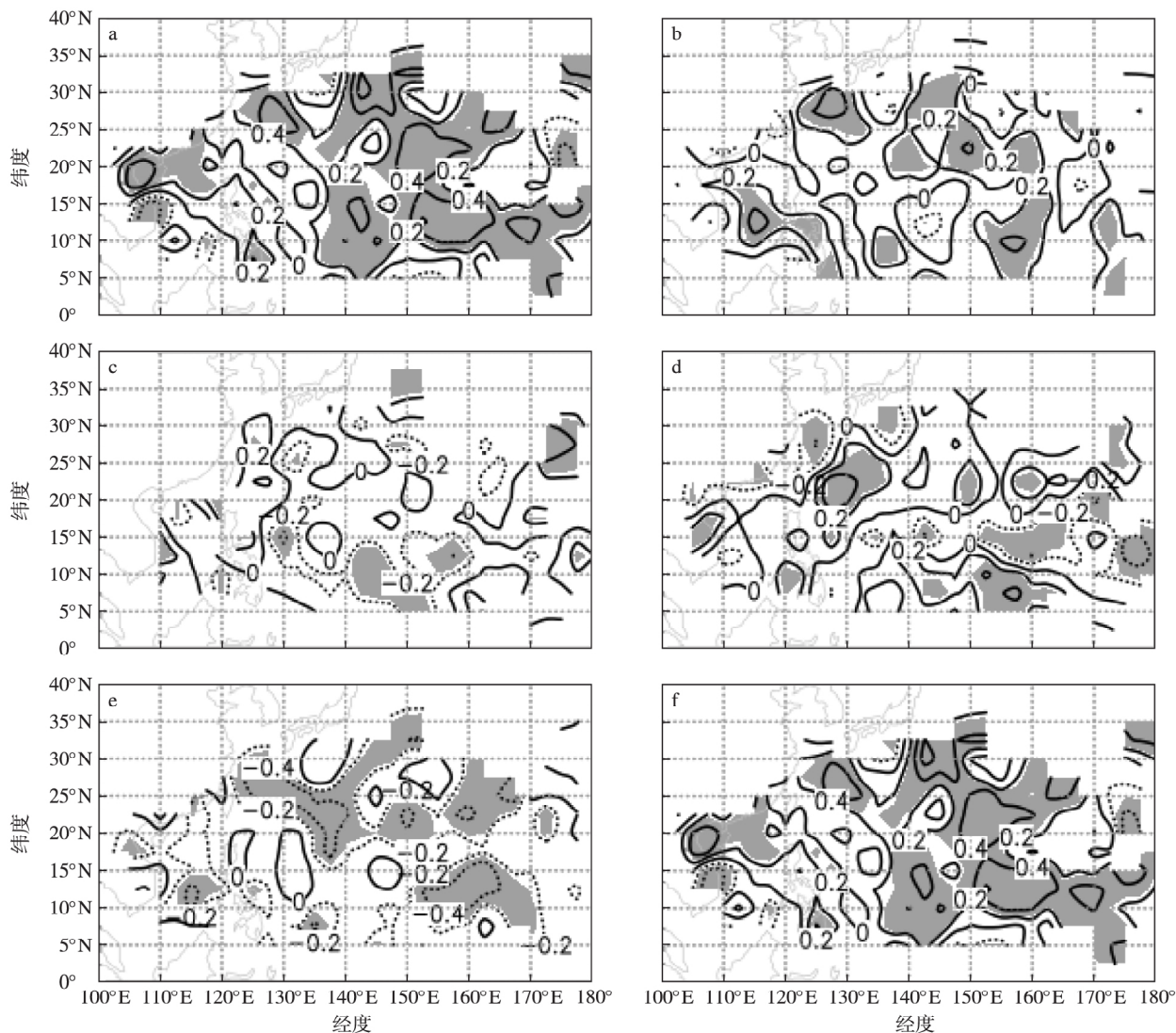


图5 1979—2011年7—9月大尺度环境因子与TC生成频数的时间相关分布:(a)绝对涡度;(b)相对湿度;(c)最大潜在强度;(d)垂直风切;(e)垂直运动;(f)相对涡度(图中阴影部分表示通过0.05信度检验区域)

Fig.5 Distribution of correlation coefficients between large-scale atmospheric factors and TC genesis frequency averaged in JAS during the period of 1979—2011 in each  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  grid box: (a) absolute vorticity (b) relative humidity at 600 hPa (c) MPI (d) vertical wind shear between 200 and 850 hPa (e) vertical p-velocity at 500 hPa and (f) relative vorticity; the shaded area exceeds the 0.05 confidence level

过地转涡度控制热带气旋出现在  $5^{\circ}\text{N}$  以北的位置,用于弥补绝对涡度项中损失的地转涡度的作用,即保证在靠近赤道地区 ( $5^{\circ}\text{N}$  以南) 模拟出尽可能少的气旋。

新的 GPI 模拟出的热带气旋生成空间分布如图 6 所示,我们计算了这一指数在 ( $5^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ} \sim 180^{\circ}\text{E}$ ) 区域内与 TC 生成频数分布密度的空间相似程度,达到了 0.79,在原有基础上有了很大提升。方程中各因子指数正负号代表了该因子与 TC 生成频数的相关关系,与图 2 的计算结果完全一致。该公式中的最大潜在强度项的指数比之 EN2004 和

MW2010 指数有了明显缩小,在西北太平洋区域由 3 缩减为 1.5,这也与我们期望达到的效果一致。

对比观测资料的空间分布(图 1)情况,南海海盆中心清晰可见,菲律宾海盆中心位置确切无误,马里亚纳群岛两侧洋面上也有较弱的大值中心,空间拟合效果良好。美中不足的是,在主要生成区之外,新指数的拟合结果在 ( $130^{\circ} \sim 140^{\circ}\text{E}$ ,  $30^{\circ}\text{N}$ ) 和 ( $150^{\circ}\text{E}$ ,  $5^{\circ}\text{N}$ ) 存在较多的冗余部分,考虑为相对涡度作用过于突出导致。时间拟合方面,该指数与观测资料的时间相关系数为 0.17,提升明显。

### 3.3 新指数的检验

为了更深入检验新 GPI 的在时间上的改进效



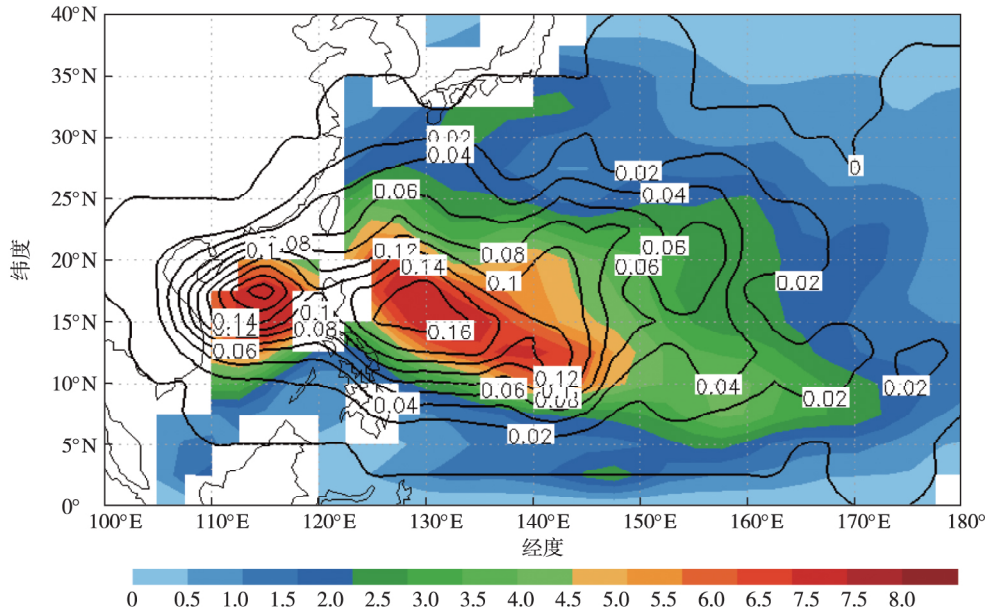


图 6 GPI\_re 模拟结果的空间分布情况(阴影部分为模拟结果,等值线为观测 TC 生成频数)

Fig.6 Climatological distribution of the JAS-mean GPI\_re( shaded) and observed TC genesis frequency ( contours) in the WNP

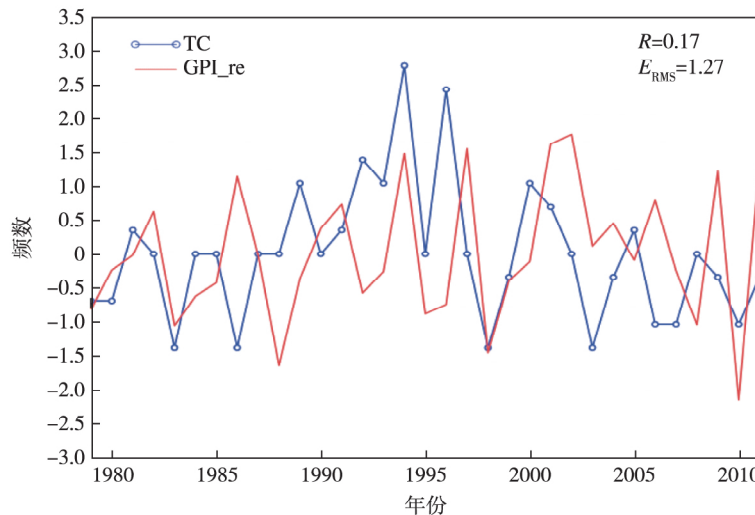


图 7 GPI\_re 模拟结果(蓝线)与观测 TC(红线)年际变化情况( $R$  表示相关系数,  $E_{RMS}$  表示均方根误差)

Fig.7 Normalized interannual variation of the JAS-mean TCGF( blue) and gpi\_re ( red) averaged in the domain ( 100°—180°E, 5°—30°N)

果,首先检验 GPI\_re 的季节性变化,其与观测资料的变化曲线如图 8 所示。

首先从相关系数上来看,三种指数与观测资料的相关情况都很理想,且能够表征热带气旋频数随季节产生的变化。但从折线的走向来看,EN2004 指数与 MW2010 指数拟合的结果中,热带气旋频数都从 5 月开始进入急速上升的阶段,在 7 月或 8 月达到峰值,这一点和实际情况有所不同。而 GPI\_re 在这一点上表现良好,热带气旋频数从 6 月激增,8

月达到峰值。美中不足的是,新 GPI 拟合所得的峰值偏小。

为了对新指数的进行进一步的检验,考虑到强弱类热带气旋在整个西北太平洋地区存在生成条件差异和空间分布差异,这里分别检验 GPI 对强弱类热带气旋的拟合效果。

从图 9 中可以看到,不论哪种 GPI,对 TC45(即强热带气旋)的拟合能力都要明显强于 TC123(即弱热带气旋)。MW2010\_wp 对 TC45 的拟合相似

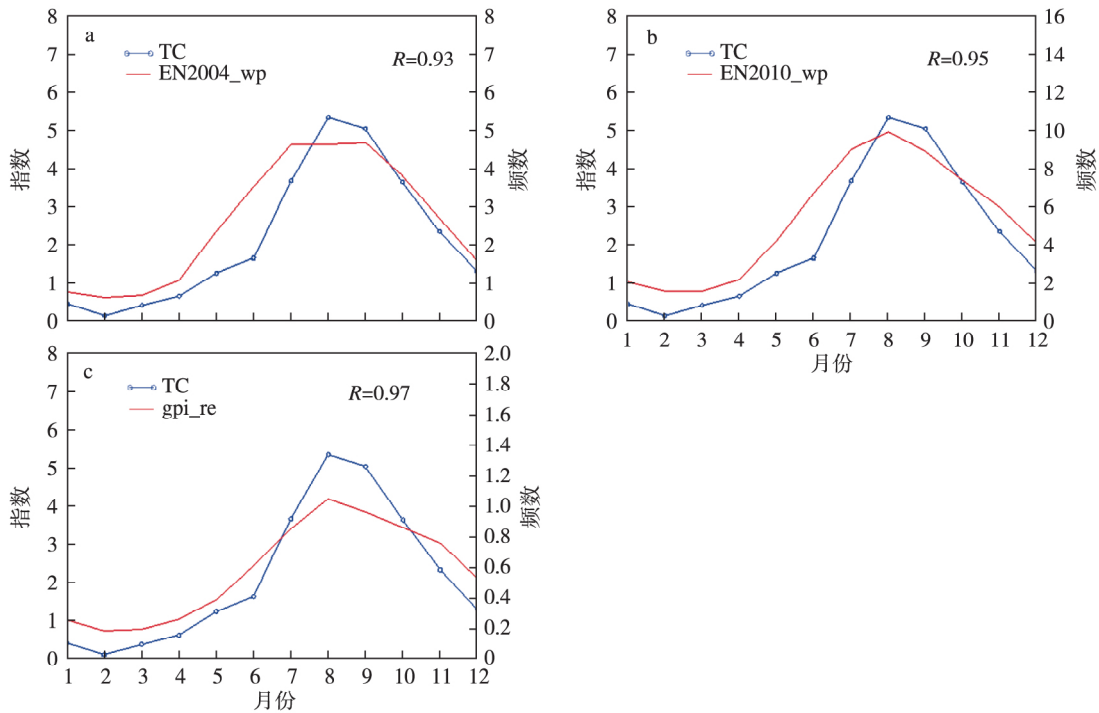


图8 各 GPI 指数(红线)与 TC 频数(蓝线)季节性变化( $R$ 表示相关系数): (a) EN2004\_wp 指数; (b) MW2010\_wp 指数; (c) GPI\_re  
 Fig.8 Annual cycle of the observed TC genesis frequency in the WNP( blue) and GPIs( red): (a) EN2004\_wp; (b) MW2010\_wp; (c) GPI\_re( red)

程度达到了 0.40, 通过了 0.05 的信度检验, 而新构建的 GPI 更是达到了 0.41, 其与 TC45 生成在年际变化上显著相关。而在对 TC123 的拟合上, 二者则呈现出了显著负相关, 效果最差的 EN2004\_wp 指数与 TC 频数的时间相关达到了 -0.27。但哪怕如此, GPI\_re 也呈现出 0.06 的正相关系数, 足以证明上述改动确实提升了 GPI 在整个西北太平洋地区的拟合效果。同时, 我们也提出了一个问题, 为什么针对全部热带气旋进行拟合的指数可以出色地拟合 TC45 的时间变化, 却在 TC123 的拟合上效果极差? 是否可以用 GPI 模拟弱热带气旋的生成? 这些有待进一步的研究。

接下来对 GPI\_re 在 ENSO 尺度上的模拟进行检验。研究表明, 西北太平洋地区热带气旋的年际变化和 Niño3.4 区( 170° ~ 120°W, 5°S ~ 5°N) 的海表面温度异常密切相关( Wang and Chan, 2002)。许多研究( Chan, 2000; Zhao et al., 2010) 采用利用百分位法( Camargo et al., 2007b) 来定义 La Niña 和 El Niño 年, 运用此方法, 从 1979—2011 年中挑选出的 El Niño 年分别为 1987、1991、1997、2002、2004 年, La Niña 年则为 1988、1998、1999、2010 年。

1979—2011 年 7—9 月整个西北太平洋的热带

气旋生成频数的空间分布在 El Niño 和 La Niña 事件年的差值分布如图 7a 所示, 可看出正负区域分布非常明显, 东南区域差值为正, 西北为负, 这也就说明, El Niño 年的夏季, 东南区域会出现热带气旋生成频数激增的现象, 对应西北区域频数减少。La Niña 年则反之。

图 10 为几种 GPI 模型下, El Niño 和 La Niña 事件年 TC 生成频数的气候平均差值场, 实际 TC 频数如图 10a 所示, GPI\_re 模拟结果如图 10b 所示。观测结果的正值中心位于( 150°E, 10°N), 负值中心位于( 125°E, 20°N), 对比 EN2004\_wp 和 MW2010\_wp( 图 10c、10d) 可以看到, GPI\_re 基本可以模拟观测情况, 西北东南象限分隔明显, 正值中心基本准确, 负值中心部分缺失, 但基本位置保持一致, 且该指数模拟结果与实际观测结果的空间相似程度达到 0.6。而 EN2004\_wp 与观测资料的相似程度为 0.58, 该指数虽然也表现出了明显的东南-西北向间隔, 但正负中心都偏离观测中心较远, 其正值中心( 170°E, 10°N) 过于偏东, 负值中心( 130°E, 30°N) 过于偏北。MW2010\_wp 指数正值中心位置较为准确, 且空间相关系数达到 0.66, 但其负值中心( 130°E, 25°N) 的偏差较 GPI\_re 更远。

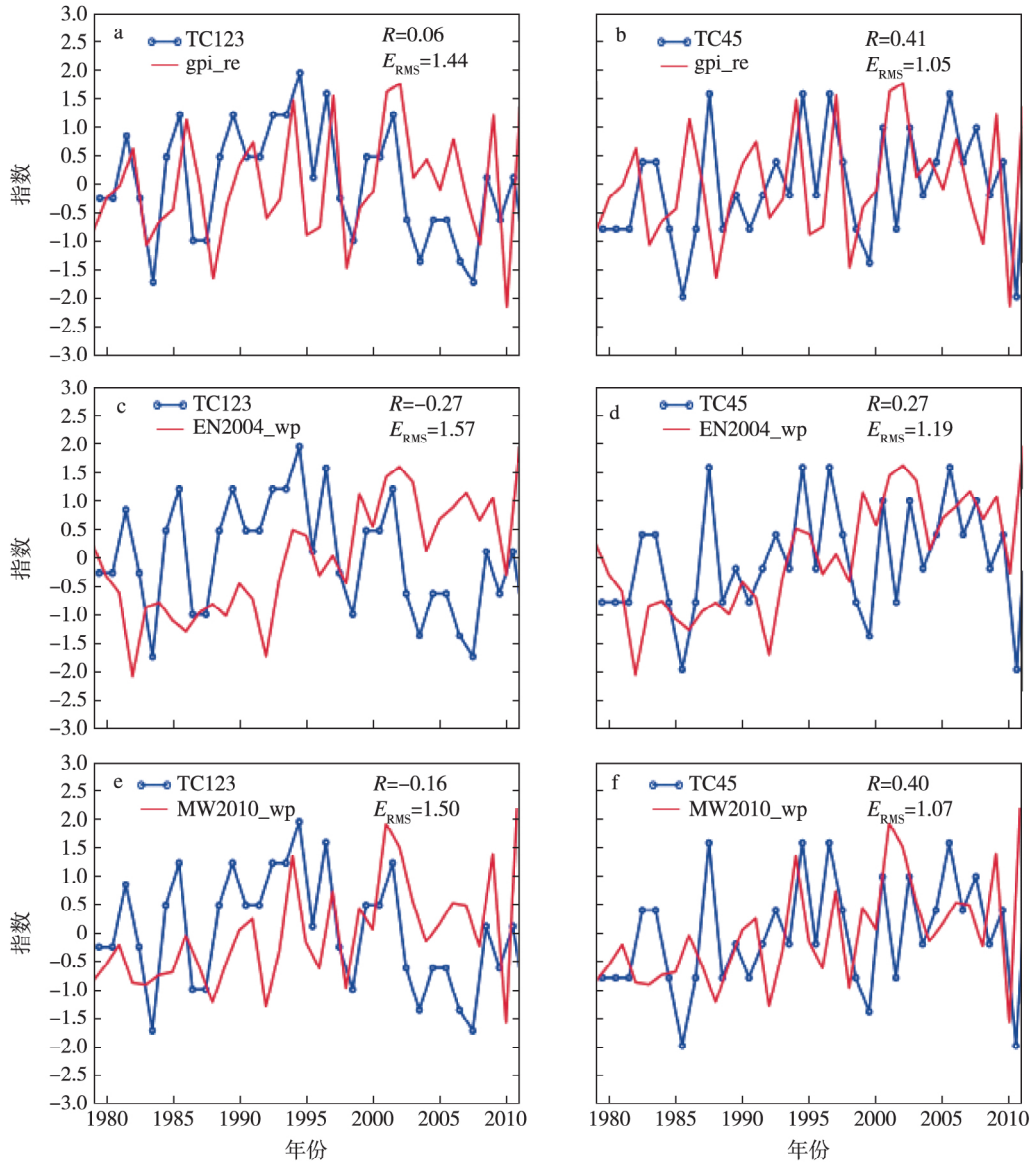


图9 标准化后的7—9月各GPIs与强(TC45)、弱类(TC123)热带气旋的 annual 变化( $R$ 表示相关系数; $E_{RMS}$ 为均方根误差): (a) GPI\_re与TC123; (b) GPI\_re与TC45; (c) EN2004\_wp与TC123; (d) EN2004\_wp与TC45; (e) MW2010\_wp与TC123; (f) MW2010\_wp与TC45

Fig.9 Normalized interannual variation of the JAS-mean intense (categories 4 and 5) and weak (categories 1, 2, 3 and tropical storm) TC genesis frequency and GPIs: (a) GPI\_re and TC123; (b) GPI\_re and TC45; (c) EN2004\_wp and TC123; (d) EN2004\_wp and TC45; (e) MW2010\_wp and TC123; (f) MW2010\_wp and TC45

## 4 结论与讨论

1) 由南海区域( $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ,  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ )与西北太平洋区域( $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ,  $5^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ )大尺度环境因子与TC生成频数的相关关系不尽相同为出发点,对GPI进行了改进,如公式(3)、(4)。各因子的系数表示了该区域的观测资料与该因子的正负相关关系。

2) 在空间拟合上,修改所得的GPI\_re在对整个

西北太平洋热带气旋生成的拟合上有较大优势,它不仅对该区域内生成的热带气旋的空间分布拟合良好(相关系数为0.79),还可以体现ENSO尺度上热带气旋的分布特征。

3) 在时间拟合上,现阶段广泛应用的GPI指数与本文改进的指数对较强类TC有着非常好的拟合效果,但对较弱类TC效果极差,从而导致了整个南海-西北太平洋的时间拟合不佳。尽管如此,GPI\_re在时间拟合上仍表现出较好的优越性,与观测资

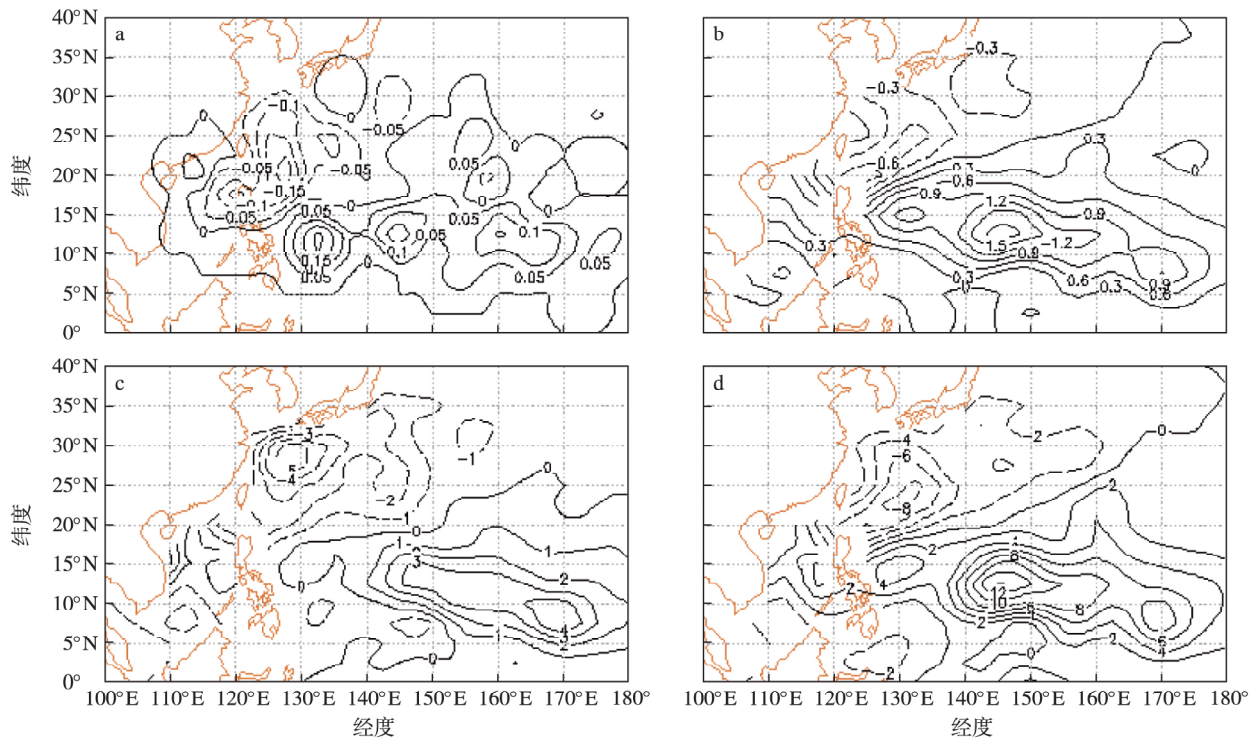


图 10 7—9月观测热带气旋生成频数与 GPI 拟合结果在厄尔尼诺与拉尼娜年的差值空间分布: (a) 观测资料; (b) GPI\_re; (c) EN2004\_wp; (d) MW2010\_wp

Fig.10 Spatial distributions of the differences in the JAS mean TC genesis frequency between El Niño years and La Niña years in the WNP: (a) observation; (b) GPI\_re; (c) EN2004\_wp; (d) MW2010\_wp

料的相关系数从原来的负相关提升到 0.17, 较现有 GPI 有很大提高。

4) 在已经完成的工作基础上, GPI 仍有很大可以继续改进的空间。一方面, 最大潜在强度对热带气旋生成的空间表征能力尚可, 但时间表征能力不佳, 因此我们需要针对热力因子进行进一步研究, 以

求找到更合适的热力因子。另一方面, 能够影响热带气旋生成的因素并不止大尺度的环境因子, 也受到遥相关型控制。是否可以通过一些转换, 将遥相关信号转变成随局地变化的因子纳入 GPI 的构建中, 这将是下一步的研究重点。

### 参考文献(References)

Bister M, 2002. Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity 1. Interannual to interdecadal variability [J]. *J Geophys Res*, 107 (D24): 4801.

Bruyère C L, Holland G J, Towler E, 2012. Investigating the use of a genesis potential index for tropical cyclones in the North Atlantic basin [J]. *J Climate*, 25 (24): 8611-8626.

蔡菁, 吴立广, 赖巧珍, 等, 2017. 台风“苏拉”登陆福建后降水的非对称成因分析 [J]. *大气科学学报*, 40 (6): 814-822. Cai J, Wu L G, Lai Q Z, et al., 2017. Analysis of the precipitation asymmetries of typhoon Saola after its landfall on Fujian Province [J]. *Trans Atmos Sci*, 40 (6): 814-822. (in Chinese)

Camargo S J, Emanuel K A, Sobel A H, 2007a. Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis [J]. *J Climate*, 20 (19): 4819-4834.

Camargo S J, Robertson A W, Gaffney S J, et al., 2007b. Cluster analysis of typhoon tracks. Part II: large-scale circulation and ENSO [J]. *J Climate*, 20 (14): 3654-3676.

Chan J C L, 2000. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events [J]. *J Climate*, 13 (16): 2960-2972.

Chang C P, Chen J M, Harr P A, et al., 1996. Northwestward-propagating wave patterns over the tropical western north Pacific during summer [J]. *Mon Wea Rev*, 124 (10): 2245-2266.

陈联寿, 丁一汇, 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 64-145. Chen L S, Ding Y H, 1979. An introduction to the western Pacific ty-

- phoon [M]. Beijing: Science Press 64-145. (in Chinese).
- 陈世荣, 1990. 西北太平洋的热带风暴源地[J]. 气象, 16(2): 23-27. Chen S R, 1990. Source regions of tropical storms over Northwest Pacific Ocean [J]. Meteor Mon, 16(2): 23-27. (in Chinese).
- 程正泉, 陈联寿, 刘燕, 等. 2007. 1960—2003 年我国热带气旋降水的时空分布特征[J]. 应用气象学报, 18(4): 427-434. Cheng Z Q, Chen L S, Liu Y et al. 2007. The spatial and temporal characteristics of tropical cyclone-induced rainfall in China during 1960—2003 [J]. Q J Appl Meteor, 18(4): 427-434. (in Chinese).
- Emanuel K A, 1987. The dependence of hurricane intensity on climate [J]. Nature, 326(6112): 483-485.
- Emanuel K A, 1995. Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model in incorporating eye dynamics [J]. Atmos Sci, 52(22): 3969-3976.
- Emanuel K A, 2010. Tropical cyclone activity downscaled from NOAA-CIRES Reanalysis, 1908—1958 [J]. J Adv Model Earth Syst, 2: 1.
- Emanuel K A, Nolan, 2004. Tropical cyclone activity and the global climate system // 26th conference on hurricanes and tropical meteorology, Amer Meteor Soc, 240-241.
- Gray W, 1979. Hurricanes: their formation, structure and likely role in the tropical circulation // Shaw DB. Meteorology over the Tropical Oceans. Bracknell: Royal Meteorological Society, 155-218.
- 金爱浩, 曾刚, 余晔, 等. 2018. 南亚高压与西太平洋副热带高压经纬向位置配置对中国东部夏季降水的影响[J]. 热带气象学报, 34(6): 806-818. Jin A H, Zeng G, Yu Y et al. 2018. Effects of latitudinal and longitudinal positions of South Asia high and western Pacific subtropical high on the summer precipitation over East China [J]. J Trop Meteor, 34(6): 806-818. (in Chinese).
- 李雪, 任福民, 杨修群, 等. 2010. 南海和西北太平洋热带气旋活动的区域性差异分析[J]. 气候与环境研究, 15(4): 504-510. Li X, Ren F M, Yang X Q et al. 2010. A study of the regional differences of the tropical cyclone activities over the South China sea and the western North Pacific [J]. Clim Environ Res, 15(4): 504-510. (in Chinese).
- 李艳, 符彩芳, 金茹. 2019. 西北太平洋近赤道热带气旋生成的特征分析[J]. 大气科学学报, 42(5): 695-704. Li Y, Fu C F, Jin R, 2019. Analysis of near-equatorial tropical cyclone genesis in the western North Pacific [J]. Trans Atmos Sci, 42(5): 695-704. (in Chinese).
- Murakami H, Wang B, 2010. Future change of North Atlantic tropical cyclone tracks: projection by a 20-km-mesh global atmospheric model [J]. J Climate, 23(10): 2699-2721.
- 钱伊恬, 徐邦琪. 2016. 2015 年西北太平洋台风季提早展开: 2015/2016 超级厄尔尼诺的影响[J]. 大气科学学报, 39(6): 788-800. Qian Y T, Hsu P C, 2016. Early onset of the typhoon season over the western North Pacific in 2015: Influence of the 2015/2016 super El Niño event [J]. Trans Atmos Sci, 39(6): 788-800. (in Chinese).
- Ryan B F, Watterson I G, Evans J L, 1992. Tropical cyclone frequencies inferred from Gray's yearly genesis parameter: validation of GCM tropical climates [J]. Geophys Res Lett, 19(18): 1831-1834.
- Royer J F, Chauvin F, Timbal B et al. 1998. A GCM study of the impact of greenhouse gas increase on the frequency of occurrence of tropical cyclones. Climatic Change, 38(3): 307-343.
- Wang B, Chan J C L, 2002. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western north Pacific [J]. J Climate, 15(13): 1643-1658.
- 王毅, 张晓美, 杨寅, 等. 2019. 1617 号鲑鱼台风登陆后引发不同性质暴雨的成因对比分析[J]. 大气科学学报, 42(2): 245-254. Wang Y, Zhang X M, Yang Y et al. 2019. Comparative analysis of causes of different types of heavy rainfall induced by typhoon Megi (1617) after landing [J]. Trans Atmos Sci, 42(2): 245-254. (in Chinese).
- Wu L G, Zhao H K, 2012. Dynamically derived tropical cyclone intensity changes over the western North Pacific [J]. J Climate, 25(1): 89-98.
- Zhao H K, Wang C Z, 2016. Interdecadal modulation on the relationship between ENSO and typhoon activity during the late season in the western North Pacific [J]. Clim Dyn, 47(1/2): 315-328.
- Zhao H K, Wu L G, Zhou W C, 2010. Assessing the influence of the ENSO on tropical cyclone prevailing tracks in the western North Pacific [J]. Adv Atmos Sci, 27(6): 1361-1371.
- 赵军平, 吴立广, 赵海坤. 2012. 西北太平洋热带气旋潜在生成指数的改进[J]. 气象科学, 32(6): 591-599. Zhao J P, Wu L G, Zhao H K, 2012. Improvement of tropical cyclone genesis potential index in the western North Pacific Basin [J]. Sci Meteor Sin, 32(6): 591-599. (in Chinese).
- Zhang Q, Wu L G, Liu Q, 2009. Tropical cyclone damages in China 1983—2006 [J]. Bull Amer Meteor Soc, 90(4): 489-495.
- Zhang Y, Wang H J, Sun J Q et al. 2010. Changes in the tropical cyclone genesis potential index over the western North Pacific in the SRES A2 scenario [J]. Adv Atmos Sci, 27(6): 1246-1258.
- 周伟灿, 沈海波, 赵海坤. 2015. 热带季节内振荡对西北太平洋台风生成的大尺度环境的影响[J]. 大气科学学报, 38(6): 731-741. Zhou W C, Shen H B, Zhao H K, 2015. Effect of tropical intraseasonal oscillation on large-scale environment of typhoon genesis over the northwestern Pacific [J]. Trans Atmos Sci, 38(6): 731-741. (in Chinese).

## Improvement of genesis potential index for western North Pacific tropical cyclones

TAO Li<sup>1 2</sup> ZHANG Yifan<sup>1</sup> ,WANG Xuebin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Atmospheric Sciences Nanjing University of Information Science & Technology Nanjing 210044 China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Meteorological Disaster (NUIST) Ministry of Education Nanjing 210044 China;

<sup>3</sup>Zhongning County Meteorological Bureau Zhongwei 751200 China

The previous genesis potential index (GPI) can be applied to accurately simulate the climate distribution of tropical cyclone (TC) genesis yet performs poorly in the simulation of interannual variation of TC genesis. The present study attempts to improve the GPI over the western North Pacific (WNP) by considering the important impact of relative vorticity on interannual variation of TC genesis. Based on the best-track data from the Joint Typhoon Warning Center and NCEP/NCAR reanalysis data from 1979 to 2011, we substitute the absolute vorticity in the previous GPI with a modified relative vorticity. The Coriolis factor remains intact. The difference of tropical cyclone formation between the South China Sea (SCS) and WNP is also considered, and the GPI for the SCS (5°—25°N, 100°—120°E) and WNP (5°—40°N, 120°—180°E) are respectively developed. The modified GPI is shown to improve the simulation of the climate distribution of TC genesis. Moreover, compared with the previous GPI, the modified GPI greatly improves the simulation of the interannual variation of TC genesis, in particular in regard to weak tropical cyclones.

**tropical cyclone; interannual variation; genesis potential index; western North Pacific**

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20171228001

(责任编辑:袁东敏)