

马圆,余锦华,方珂,等.大气环状模对夏季中国大陆登陆热带气旋频数气候变化的影响.气象科学,2020,40(2):264-269.

MA Yuan, YU Jinhua, FANG Ke, et al. Impacts of atmospheric circumglobal teleconnection variation on the frequency of landfall tropical cyclone on the mainland China during summer. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(2): 264-269.

## 大气环状模对夏季中国大陆登陆 热带气旋频数气候变化的影响

马圆<sup>1,2</sup> 余锦华<sup>1</sup> 方珂<sup>1</sup> 董晓云<sup>1</sup>

(1 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/大气科学学院,南京 210044; 2 内蒙古自治区气候中心,呼和浩特 010051)

**摘要** 采用1949—2016年7—8月美国国家环境预报中心及大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料与中国气象局(CMA)上海台风所整编的热带气旋最佳路径数据集,研究大气环状模(Circumglobal Teleconnection, CGT)与中国大陆地区登陆热带气旋(Tropical Cyclone, TC)频数气候变化的关系。定义200 hPa经向风经验正交展开(EOF)的第一模态为CGT,其时间系数为环状模指数(Circumglobal Teleconnection Index, CGTI)。CGT在北半球中纬度地区有5个异常中心,CGTI在1949—2016年呈明显的下降趋势,且存在一个2~3 a的周期振荡。CGT与大尺度环流异常存在密切的联系。研究表明:CGTI与中国大陆登陆TC频数气候变率具有显著的正相关,即CGTI表现为正异常时,登陆中国大陆的TC频数增加,反之减少。当CGT表现为正位相时,东亚副热带西风急流增强,急流南侧的反气旋切变增强,使TC登陆过程的活动区域200 hPa的辐散增强,此外,对流层高层Rossby波能量向南传播增强,形成波通量辐合,导致东风异常,产生了东风异常的引导气流和纬向风垂直切变,东风切变使得切变减小,增加了TC登陆中国大陆的可能性。

**关键词** 环状模; 年际变率; 登陆TC频数

分类号: P434

doi: 10.3969/2018jms.0085

文献标识码: A

### Impacts of atmospheric circumglobal teleconnection variation on the frequency of landfall tropical cyclone on the mainland China during summer

MA Yuan<sup>1,2</sup> YU Jinhua<sup>1</sup> FANG Ke<sup>1</sup> DONG Xiaoyun<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/ School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2 Inner Mongolia Regional Climatic Center, Hohhot 010051, China)

**Abstract** The NCEP/NCAR reanalysis data and the tropical cyclone best-track data which is compiled by Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration from 1949 to 2016 are used to study the relationship between atmospheric Circumglobal Teleconnection (CGT) and the frequency of landfall Tropical Cyclone (TC) on the mainland China during summer. Based on the Empirical Orthogonal Function (EOF) of 200 hPa meridional wind, CGT is defined by the first EOF pattern and its time factor is defined as Circumglobal Teleconnection Index (CGTI). CGT has five anomalous centers in middle latitudes of the Northern Hemisphere. CGTI shows a downward trend from 1949 to 2016 and has a periodic variation lasting two to three years. CGT is closely related to large-scale

收稿日期(Received): 2018-07-17; 修改稿日期(Revised): 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41730961; 41575083; 41575108)

通信作者(Corresponding author): 余锦华(YU Jinhua). jhyu@nuist.edu.cn

circulation anomalies. The result shows that there is negative correlation between CGTI and the TC frequency. In other words, the TC frequency is increasing during negative anomalous years, and vice versa. When CGT shows positive phase, the East Asian subtropical westerly jet intensifies, and the enhancement of anticyclonic shear on the southern side of the jet stream strengthens the divergence at 200 hPa around TC activity area during its landing process. Moreover, the intensification of Rossby wave energy propagating southward in troposphere leads to the convergence of wave flux, and therefore easterly anomaly appears in the corresponding region. Both of the above results in the easterly anomalous steering flow and vertical shear of zonal wind, thus increasing the possibility of TC landing in mainland China.

**Key words** circumbglobal teleconnection; interannual variability; frequency of landfall tropical cyclone

## 引言

大气环状模(Circumbglobal Teleconnection, CGT)是指出现在北半球夏季中纬度地区呈纬向波状分布的大气遥相关,是热带—中高纬度遥相关的主要模式。近年来引起了极大关注。CGT在空间上表现为纬向五波结构,且这5个中心均位于西风急流的波导处,并沿着西风急流传播。在这5个中心里,除了位于印度西北地区的中心表现为显著的斜压结构外,其余4个中心均呈现出明显的正压结构<sup>[1]</sup>。ZHANG, et al<sup>[2]</sup>发现CGT不仅存在明显的年际尺度变化,还存在明显的年代际尺度变化。已有研究表明,CGT年际尺度变化与印度夏季风的年际变率以及春季青藏高原的异常加热存在密切的关联<sup>[1-2]</sup>。大西洋多年代际振荡可能会引起CGT的年代际尺度变化<sup>[3]</sup>。

我国地处太平洋西岸,常年遭受来自西北太平洋热带气旋(Tropical Cyclone, TC)的侵袭,是世界上受TC影响最严重的国家之一。TC在登陆过程中产生的灾害性天气现象,给我国东南沿海地区的经济和居民的生命财产安全带来了不可估量的危害<sup>[4]</sup>。TC路径的变化和登陆位置主要由环境引导气流控制<sup>[5-6]</sup>,其与热带、中高纬度大气环流可能都有紧密关联。Li, et al<sup>[7]</sup>研究指出1975—2014年在中国东部登陆的TC频数增加,而在南部登陆的TC频数减少。这是因为我国东南部存在一个异常气旋性环流,对近几十年来大尺度环境引导气流产生了影响,气旋性环流东北侧的东南气流有利于TC在我国东部登陆,而气旋环流南侧的西风气流不利于TC在我国南部登陆。张庆云等<sup>[8]</sup>认为东亚夏季环流的年际和年代际变化对登陆我国TC活动有十分重要的影响。夏季200 hPa风场上南亚高压中心的位置偏北,热带西太平洋地区上空的东风急流加

强,中层西太平洋副热带高压脊线位置偏北,低层东亚夏季风环流偏强,登陆我国TC频数偏多。垂直风切变会影响TC结构和强度的维持,从而影响TC能否登陆及其路径特征<sup>[9-14]</sup>。海表温度异常会通过环流,进而影响TC的路径和登陆频数<sup>[15-16]</sup>。TC环流与大尺度环流的相互作用影响TC路径和登陆频数<sup>[17]</sup>。

TC能否登陆,不仅与环境引导气流有关,而且与TC登陆过程环境场的影响有关。如果环境场使TC快速衰减,在登陆前消亡,则不利于TC登陆。影响TC登陆的环境引导气流及其环境场与活动于中高纬度的CGT是否存在关联?其物理机制又是怎样?基于此,本文将利用1949—2016年夏季(7—8月)观测及再分析数据研究CGT与登陆我国东南沿海地区TC频数气候变化的关系及可能机理,研究结果有助于提高认识热带—中高纬度相互作用对TC登陆活动的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文使用美国国家环境预报中心及大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料中风场和位势高度场的逐日和逐月资料,时间跨度为1949—2016年,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。该资料集包含1 000~10 hPa共17层等压面数据。

TC资料选用中国气象局(CMA)上海台风研究所整编的CMA热带气旋最佳路径数据集以及登陆热带气旋信息<sup>[18]</sup>([tcdata.typhoon.org.cn](http://tcdata.typhoon.org.cn))。该数据集包括TC每6 h定位时次的经纬度、中心最低气压、近中心最大风速等信息,时间长度为1949—2016年。

本文研究的登陆TC为每年7、8月于我国大陆地区登陆的TC,判断TC登陆的依据是CMA登陆热带气旋信息。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 $E$ 矢量的计算

Hoskins, et al<sup>[19]</sup> 提出在准地转无辐散条件下表征水平面的波动特征的诊断量  $E$  矢量,其计算公式为:

$$E = (\overline{v'^2 - u'^2}, -\overline{u'v'}) \quad (1)$$

式中:  $u'$  和  $v'$  分别表示纬向风和经向风的瞬变纬向扰动,即  $u' = u - \bar{u}$ ,  $v' = v - \bar{v}$ ,  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  分别为日平均纬向风和经向风,  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  为各自的纬向平均。式中的上划线表示 7—8 月的平均。

本文将通过  $E$  矢量辐合辐散特征与平均纬向气流变化的关系,即  $E$  矢量辐合(辐散)将引起纬向西风减弱(增强)<sup>[20]</sup>,来认识 CGT 如何影响 TC 登陆活动。

### 1.2.2 引导气流的计算

引导气流为 850~300 hPa 之间各等压层风速的权重平均,计算公式为:

$$V_{steer} = \frac{\int_{850}^{300} \rho V dz}{\int_{850}^{300} \rho dz} \quad (2)$$

### 1.2.3 线性趋势的检测

线性趋势采用 Mann<sup>[21]</sup> 提出的一种非参数统计检验方法。

对于气候序列  $x_i$ , 在  $i$  时刻 ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ), 有

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_j > x_i; \\ 0 & x_j \leq x_i. \end{cases} \quad (3)$$

计算统计量:

$$Z = \frac{4}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} r_i - 1 \quad (4)$$

显然,对于递增直线,  $Z = 1$ , 对于递减直线,  $Z = -1$ ,  $Z$  值在  $-1 \sim 1$  之间变化给定显著性水平  $\alpha$ , 假定  $\alpha = 0.05$ , 则判据

$$Z_{0.05} = 1.96 \left[ \frac{4n+10}{9n(n-1)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

若  $|Z| > Z_{0.05}$ , 则认为变化趋势是显著的<sup>[22]</sup>。

## 2 CGT 的气候变化特征

对 1949—2016 年 7、8 月 200 hPa 的经向风 ( $20^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ ,  $0^\circ \sim 150^\circ \text{E}$ ) 进行 EOF 分解,得到的第一空间模态定义为 CGT,并定义图 1a 所示的空间分布为 CGT 的正位相。CGT 在北半球中纬度地区存

在 5 个中心,且这 5 个中心正负相间,呈现出明显的沿  $40^\circ \text{N}$  附近的纬向分布特征,该纬带正是 7—8 月亚洲西风急流轴所在,符合 CGT 波沿急流轴传播的特征。当 CGT 表现为正位相时,欧洲西部、中亚和日本 200 hPa 北风异常,俄罗斯等东欧地区和中国内陆则表现为显著的南风异常,这样的环流形势有利于在我国东南沿海地区形成反气旋性环流,反气旋环流南侧为东风异常,这一高层的东风异常会对大尺度引导气流产生重要影响。

图 1b 显示,CGTI 在 1980s 存在一个转折点,1980s 之前 CGTI 有上升的趋势,进入 1980s 之后则转变为下降趋势。通过对 CGTI 的整体进行趋势检测,CGTI 在 1949—2016 年呈显著的下降趋势,通过了  $\alpha = 0.05$  的信度水平,这一特征表明,图 1a 的 CGT 模态强度在近 68 a 具有线性减弱趋势,表示 CGT 的 5 个中心强度会减弱,即中高纬经向风的扰动将减弱,包括位于我国东南沿岸异常反气旋南侧的东风异常会减弱。

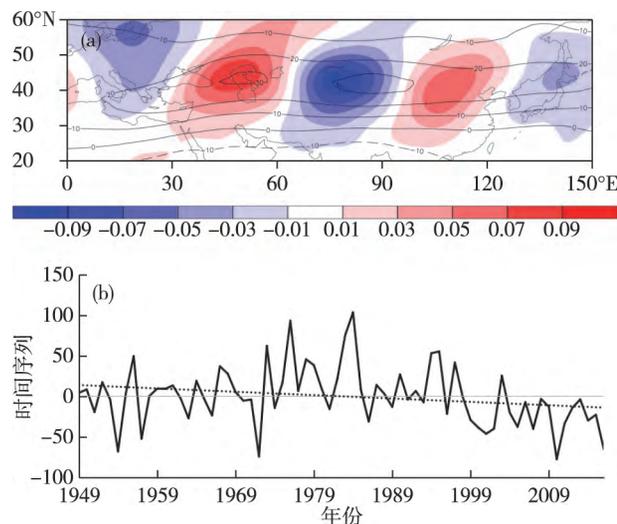


图 1 1949—2016 年 7、8 月 200 hPa 纬向风的气候态 (a, 等值线, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、200 hPa 经向风 EOF 展开的第一空间模态 (a, 阴影) 及对应的时间序列 (b, 虚线为趋势线)  
Fig.1 200 hPa zonal wind (a, contour, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and leading EOF pattern (a, shade) and associated temporal series (b) to 200 hPa meridional wind in July and August during 1949—2016

图 2 对 1949—2016 年 CGTI 进行功率谱分析,发现 CGTI 存在一个 2~3 a 的周期,且周期显著。

为了研究 CGT 与大尺度环流异常的关系,图 3 给出了 200 hPa 速度势以及 850 hPa 风场对 CGTI 的回归,表示当 CGTI 变化一个标准差时变量变化的值。如图 3a 所示,200 hPa 速度势对 CGTI 的回归中心呈纬向正—负(或是负—正)相间分布,其中正异常回归中心主要位于地中海北部、西西伯利亚

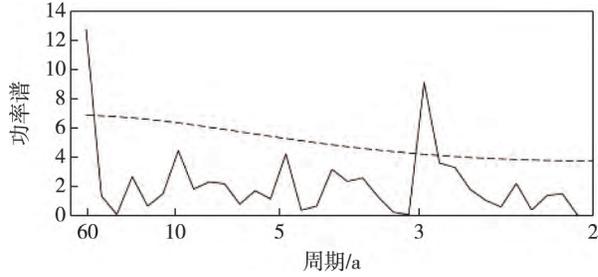


图2 CGTI的功率谱  
(虚线表示  $\alpha=0.05$  信度水平的 Markov 红噪声检验)  
Fig.2 The power spectrum of CGTI( Dotted line indicates the Markov red noise test at 95% confidence level)

平原以及我国东南部和日本列岛,即 CGT 正位相对应上述区域 200 hPa 辐散,而欧洲东部和亚洲中部对流层高层辐合。

850 hPa 风场变化显著的区域主要在乌拉尔山脉以南,当 CGT 表现为正位相时,乌拉尔山脉出现一个气旋性环流,山脉西南侧为显著的西北气流,东南侧出现显著的东北气流。

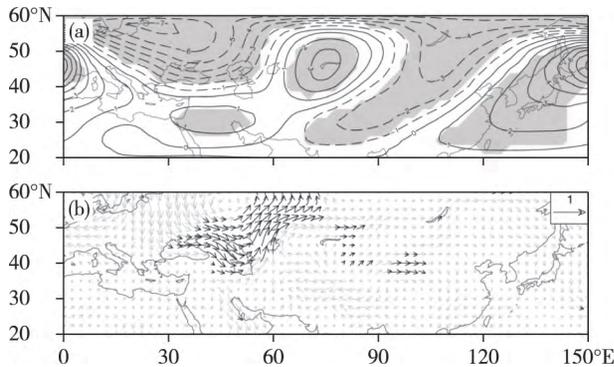


图3 200 hPa 速度势 (a, 单位:  $10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和 850 hPa 风场 (b, 单位:  $10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 对 CGTI 的回归分布 (阴影区域和黑色箭头表示通过  $\alpha=0.1$  置信度水平)  
Fig.3 Monthly anomalies of 200 hPa vertical velocity (a, unit:  $10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 850 hPa wind (b, unit:  $10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), regressed upon the CGTI( The shade and black arrows indicates anomalies significant at the 90% level)

### 3 CGT 与登陆我国大陆热带气旋频数气候变化的关联

图 4 给出了 1949—2016 年在我国东南沿海地区登陆 TC 频数和 200 hPa 经向风之间相关系数的空间分布,可见,TC 登陆频数与 200 hPa 经向风的相关分布表现出明显的纬向结构,这种分布与 CGT 的空间结构非常相似,均表现出正负相间分布,且与 CGT 具有相同的中心区域,两空间场的相关系数为 0.72,其中正相关系数的大值区位于东亚以及黑海东部和里海地区,负相关系数的大值区主要位于中亚和日本地区,即东亚地区对流层上层出现南风

异常,日本列岛出现北风异常的年份,登陆我国东南沿海的 TC 频数较其他年份偏多。

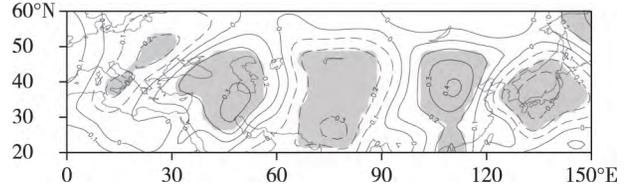


图4 登陆中国大陆 TC 频数和 200 hPa 经向风的相关分布 (阴影区表示通过  $\alpha=0.1$  置信度水平的区域)  
Fig.4 Correlation distribution between the frequency of TC landfall on the mainland of China and 200 hPa meridional wind (The shading indicates anomalies significant at the 90% level)

上述的结果表明,登陆 TC 活动的变化与 200 hPa 经向风的变化是显著相关的。那么登陆 TC 频数是否也和 CGT 之间存在联系呢?

图 5 是 1949—2016 年在我国东南沿海地区登陆的 TC 频数时间序列,可见,登陆 TC 频数具有显著的下降趋势,通过了  $\alpha=0.05$  信度水平。登陆我国大陆 TC 频数的线性下降趋势可能与 CGTI 的线性减小趋势具有密切的关系,因为 CGT 模态的减弱将通过减弱 TC 登陆活动区域的东风异常,减小东风引导气流和东风切变,从而减小 TC 登陆的机会,并使 TC 登陆过程,更易衰减。

CGT 和登陆我国大陆 TC 频数的关联,不仅表现在线性趋势上,同时表现在年际变化时间尺度上,去除线性形势后,得到二者的相关系数为 0.31,通过  $\alpha=0.05$  信度水平,这说明在年际时间尺度上,当 CGT 表现出正位相时,登陆我国东南沿海地区的 TC 频数增加。

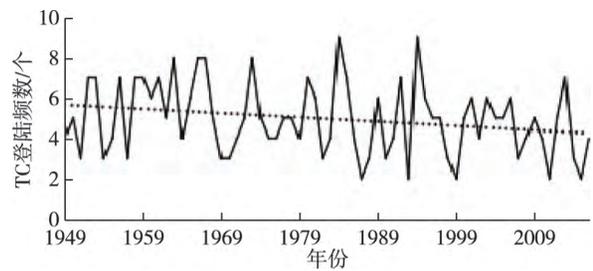


图5 登陆中国大陆的 TC 频数 (虚线为趋势线)  
Fig.5 TC frequency of landfall on the mainland of China (The dotted line indicates the trend)

为了解释 CGTI 与 TC 登陆频数存在正相关的原因,本文应用合成分析的方法进行研究。首先,对 CGTI 的正、负异常年进行筛选,定义 CGTI 大于一个标准差的年份为正异常年,小于一个负标准差的年份为负异常年,表 1 给出了挑选出的正、负异常年,其中正异常年共有 11 个,负异常年有 10 个。通

过筛选,正异常年平均每年有 6.3 个 TC 登陆,负异常年平均每年有 4.2 个 TC 登陆,正异常年登陆的 TC 频数远多于负异常年,且这种差异通过了 99% 的置信度水平。

表 1 CGTI 的正、负异常年

Table 1 The positive and negative anomalous years of CGTI

正异常年 (CGTI > 1 $\sigma$ )	1956、1967、1973、1976、1978、1979、1983、 1984、1994、1995、1997 年
负异常年 (CGTI < -1 $\sigma$ )	1954、1957、1972、2000、2001、2002、 2005、2007、2010、2016 年

为了解释 TC 登陆频数产生差异的原因,图 6a 给出了引导气流的合成差场,发现我国东南沿海地区的引导气流表现为东南风异常,有利于 TC 在我国大陆登陆。但是这一区域的引导气流异常并未通过显著性检验。图 6b 给出了纬向风垂直切变的合成差场,我国东部地区存在明显的东风切变,说明在这一区域,正异常年较负异常年具有更强的东风切变。根据前人的研究,东风切变有利于 TC 强度和结构的维持,从而有利于 TC 登陆过程的维持,这说明纬向风的垂直切变可能是影响登陆 TC 频数的因素。

图 6a 进一步对 200 hPa 纬向风的合成差场进行分析发现,纬向风与纬向垂直风切变的合成差场具有相似分布特征,这表明 200 hPa 纬向风的变化是引起纬向风垂直切变变化的主要因素。此外,在(45°N, 120°E)附近纬向风的正异常中心表明,在 CGTI 正异常年,副热带急流显著强于 CGTI 负异常年。

CGT 表示热带与中纬度相互作用的大气遥相关波列,其沿波导 200 hPa 纬向风急流轴传播(图 1a)。在 CGTI 正异常年,东亚对流层上层副热带急流显著强于 CGTI 负异常年(图 6a),急流南侧的反气旋切变增强,辐散增强,对流增强(图 3a)。另一方面,  $E$  矢量表示的 Rossby 波能量向南传播增强,在 TC 登陆活动区域产生  $E$  矢量的异常辐合(图 6c)。根据 Hoskins, et al<sup>[19]</sup> 的平均流—波动相互作用动力理论,  $E$  矢量的异常辐合将减小平均的纬向西风,产生东风异常。上述的共同作用,一方面产生了异常的东风引导气流,另一方面形成了有利于登陆过程 TC 维持的环境条件,从而增加了 TC 登陆我国大陆的可能性。

## 4 结论

本文对 1949—2016 年 7、8 月 200 hPa 经向风

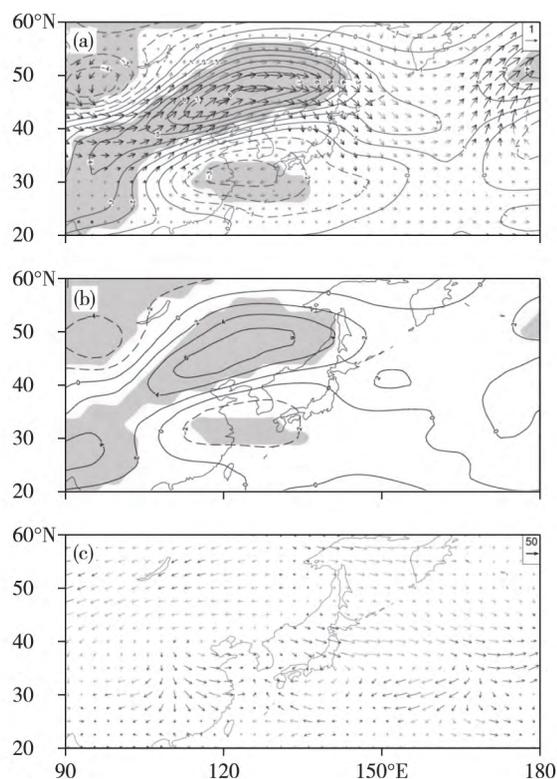


图 6 200 hPa 纬向风(a, 等值线, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ )、引导气流(a, 箭头, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ )、纬向垂直风切变(b)和 200 hPa  $E$  矢量(c, 单位:  $m^2 \cdot s^{-2}$ ) 在 CGTI 正、负异常年的合成差场(阴影区和黑色箭头表示通过  $\alpha=0.1$  置信度水平的区域)

Fig.6 Composite difference of zonal wind at 200 hPa (a, contour, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ), steering flow (a, arrow, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) and zonal wind vertical wind shear (b, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) and 200 hPa  $E$  vector (c, unit:  $m^2 \cdot s^{-2}$ ) during positive CGTI years from negative ones (unit:  $m/s$ , the shading and black arrows indicates anomalies significant at the 90% level)

进行 EOF 分解,得到的第一空间模态定义为 CGT 空间结构,其对应的时间序列为 CGTI,研究了在西北太平洋 TC 登陆最频繁的 7、8 月,CGT 与我国东南沿海地区 TC 登陆频数的关系,得出了以下结论:

(1) CGT 在北半球中纬度地区表现为明显的纬向波状的分布特征,CGTI 在 1949—2016 年整体呈显著的下降趋势,且存在一个 2~3 a 的周期。另外,CGTI 可能还存在一个 60 a 左右的周期,但这一周期可能并不可靠。

(2) 我国东南沿海地区 TC 登陆频数和 200 hPa 经向风之间存在密切的联系,其相关分布与 CGT 的空间分布十分相似。TC 登陆频数的线性减小趋势可能与 CGT 的线性减弱趋势有关。在年际时间上,CGTI 与 TC 登陆频数存在显著的正相关,即当 CGT 表现为正位相时,登陆我国东南沿海地区的 TC 频数增加,反之减少。

(3) CGT 正位相与负位相的合成分析显示,当

CGT 表现为正位相时,我国东部及西北太平洋地区的纬向风垂直切变表现为明显的东风异常,这种异常是由于 CGT 沿副热带急流传播,急流南侧的反气旋性切变使该区域 200 hPa 纬向风出现东风异常,同时 Rossby 波能量向南传播增强导致东风异常加强,异常东风切变有利于 TC 登陆过程的维持,使登陆 TC 频数增加。

### 参 考 文 献

- [1] DING Qinghua, WANG Bin. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J. Climate*, 2005, 18: 3483-3505.
- [2] ZHANG Jie, JIANG Yuanchun, CHEN Haishan, et al. Double-mode adjustment of Tibetan Plateau heating to the summer circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere. *Int. J. Climatol.*, 2018, 38(2): 663-676.
- [3] WU Bo, ZHOU Tianjun, LI T. Impacts of the Pacific-Japan and circumglobal teleconnection patterns on the interdecadal variability of the East Asian summer monsoon. *J. Climate*, 2016, 29(9): 3253-3271.
- [4] ZHANG Qiang, WU Liguang, LIU Qiufeng. Tropical cyclone damages in China 1983—2006. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2009, 90(4): 489-495.
- [5] Gray W M. Hurricanes: their formation, structure, and likely role in the tropical circulation // Shaw D B. *Meteorology over the Tropical Oceans*. Bracknell, UK: Royal Meteorological Society, 1979: 155-218.
- [6] Chan J C L. The physics of tropical cyclone motion. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2005, 37(1): 99-128.
- [7] Li R C Y, ZHOU Wen, SHUN C M, et al. Change in destructiveness of landfalling tropical cyclones over China in recent decades. *J. Climate*, 2017, 30(9): 3367-3379.
- [8] 张庆云, 彭京备. 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响. *大气科学*, 2003, 27(1): 97-106.  
ZHANG Qingyun, PENG Jingbei. The interannual and interdecadal variations of East Asian summer circulation and its impact on the landing typhoon frequency over China during summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2003, 27(1): 97-106.
- [9] Gray W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1968, 96(10): 669-700.
- [10] Tuleya R E, Kurihara Y. A numerical study on the effects of environmental flow on tropical storm genesis. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, 109(12): 2487-2506.
- [11] Baik J J, Paek J S. Relationship between vertical wind shear and typhoon intensity change, and development of three-predictor intensity prediction model. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 2001, 79(2): 695-700.
- [12] Frank W M, Ritchie E A. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129(9): 2249-2269.
- [13] Chan J C L. Decadal variations of intense typhoon occurrence in the western North Pacific. *Proc. Roy. Soc. A*, 2008, 464(2089): 249-272.
- [14] Gray W M. The mutual variation of wind, shear, and baroclinicity in the cumulus convective atmosphere of the hurricane. *Mon. Wea. Rev.*, 1967, 95(2): 55-73.
- [15] 宋攀, 钟中, 齐琳琳, 等. 局地海表温度异常影响热带气旋路径的模拟研究. *气象科学*, 2017, 37(6): 735-741.  
SONG Pan, ZHONG Zhong, QI Linlin, et al. A numerical study on the influence of abnormal local sea surface temperature on the track of tropical cyclone. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2017, 37(6): 735-741.
- [16] 杨亚新, 江静. 赤道中东太平洋表层水温异常与热带气旋活动的统计关系. *气象科学*, 2008, 28(6): 637-643.  
YANG Yaxin, JIANG Jing. The impacts of sea surface temperature anomaly in the equatorial central and eastern Pacific on tropical cyclone in north-west Pacific. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2008, 28(6): 637-643.
- [17] 朱哲, 钟中, 哈瑶. 江淮梅雨与梅雨期西北太平洋热带气旋的关系. *气象科学*, 2017, 37(4): 522-528.  
ZHU Zhe, ZHONG Zhong, HA Yao. Relationship between typhoon cyclone during Meiyu period over the Northwest Pacific and Jianghuai Meiyu. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2017, 37(4): 522-528.
- [18] YING Ming, ZHANG Wei, YU Hui, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2014, 31(2): 287-301.
- [19] Hoskins B J, James I N, White G H. The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems. *J. Atmos. Sci.*, 1983, 40(7): 1595-1612.
- [20] 孙照渤, 朱伟军. 大气环流动力学. 北京: 气象出版社, 2016.  
SUN Zhaobo, ZHU Weijun. *Atmospheric General Circulation Dynamics*. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 2016.
- [21] Mann M E. On smoothing potentially non-stationary climate time series. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31: L07214.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999.  
WEI Fengying. *Modern climate statistical diagnosis and prediction technology*. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 1999.