

孔蕴淇,范伶俐,李俊杰.两类厄尔尼诺事件对登陆中国热带气旋的影响[J].海洋气象学报,2020,40(4):77-88.
KONG Yunqi, FAN Lingli, LI Junjie. Effects of two types of El Niño events on tropical cyclones landing in China[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4): 77-88. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.009. (in Chinese)

两类厄尔尼诺事件对登陆中国热带气旋的影响

孔蕴淇^{1,2}, 范伶俐^{1,2}, 李俊杰^{1,2}

(1.南方海洋科学与工程广东省实验室,广东 湛江 524088; 2.广东海洋大学海洋与气象学院,广东 湛江 524088)

摘要: 利用上海台风研究所整编的1951—2016年西北太平洋热带气旋最佳路径数据集, NCEP/NCAR再分析资料和NOAA的COBE-SST再分析资料,按照热带气旋生成区域将热带气旋分为南海热带气旋与西北太平洋热带气旋两类,采用合成分析等统计学方法探讨了热带气旋活动盛期,登陆中国的热带气旋对东部型和中部型厄尔尼诺(El Niño)事件的响应。结果表明,热带气旋活动盛期,南海热带气旋在两类El Niño事件下生成频数差异不大;东部型El Niño存续期南海热带气旋登陆中国比率较中部型El Niño时偏低,登陆时强度较中部型偏弱。中部型El Niño存续期间,西北太平洋热带气旋生成频数比东部型El Niño时的频数偏高,而登陆中国热带气旋较东部型偏少,登陆时热带气旋强度较东部型偏弱;但两类El Niño事件期间西北太平洋热带气旋在中国的登陆率差异没有通过显著性检验。与中部型El Niño事件相比,在东部型El Niño事件期间,西北太平洋海面温度偏低,对流层中部水汽条件较差,对流层低层涡度异常偏低,同时在热带气旋较为集中生成的海域存在沃克(Walker)环流的异常下沉气流,西太平洋副热带高压偏强偏东偏南,共同导致登陆中国热带气旋频数偏少。

关键词: 厄尔尼诺; 热带气旋; 南海; 西北太平洋; 登陆台风

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)04-0077-12

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.009

Effects of two types of El Niño events on tropical cyclones landing in China

KONG Yunqi^{1,2}, FAN Lingli^{1,2}, LI Junjie^{1,2}

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhanjiang 524088, China; 2. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract In this study, the CMA-STI Best Track Dataset for Tropical Cyclones over western North Pacific from 1951 to 2016, NCEP/NCAR reanalysis data, and COBE-SST dataset of NOAA are used. According to tropical cyclone genesis fields, the tropical cyclones are divided into two types: tropical cyclones in the South China Sea and tropical cyclones in western North Pacific. The response of tropical cyclones landing in China during their active period to the Eastern Pacific (EP) type and Central Pacific (CP) type El Niño is investigated by means of synthetic analysis and other statistical methods. The results show the frequency of tropical cyclones in the South China Sea under the two types of El Niño events has little difference during the tropical cyclones' active period. The rate of the South China Sea

收稿日期:2020-05-24; 修订日期:2020-09-05

基金项目:国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项(2018YFC1506002);广东海洋大学大学生省级创新性实验项目(CXXL2019044);南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目(ZJW-2019-08)

第一作者:孔蕴淇,女,本科生,主要研究方向为海气相互作用,381259565@qq.com。

通信作者:范伶俐,女,博士,教授,主要研究方向为海气相互作用,fanlingli@126.com。

tropical cyclones landing in China for the duration of EP type El Niño is lower and the intensity is weaker than that during CP type El Niño. For the duration of CP type El Niño, the frequency of tropical cyclone formation in western North Pacific is higher than that during EP type El Niño, but the tropical cyclone landfall in China is less and the tropical cyclone intensity is weaker than that during EP type El Niño. However, the difference in the landing rates of tropical cyclones generated over western North Pacific in China during the two types of El Niño events does not pass the significance test. Compared with CP type El Niño events, during EP type El Niño events, the combined action of low sea surface temperature in western North Pacific, poor water vapor conditions in the central troposphere, unusually low vorticity in the lower troposphere, abnormal downdraft in Walker circulation in the sea areas with more tropical cyclone genesis, and the subtropical high over western North Pacific which is more eastward southward, leads to fewer tropical cyclones landing in China.

Key words El Niño; tropical cyclone; the South China Sea; western North Pacific; landing typhoon

引言

西北太平洋是全球热带气旋生成和活动最为频繁的区域,热带气旋的登陆给社会经济和人们的生活造成巨大影响。厄尔尼诺(El Niño)事件期间的大尺度环流对西北太平洋热带气旋活动产生重大影响,前人^[1-6]研究结果指出 El Niño 年将导致台风活动减少。

王小玲和宋文玲^[7]指出 ENSO (El Niño - Southern Oscillation, 厄尔尼诺-南方涛动)事件对登陆热带气旋有预报指示意义,7—9月热带海洋维持 El Niño 状态,对当年登陆热带气旋有明显影响。GRAY^[8]指出 El Niño 年对台风生成频数的影响与台风生成的区域有关。不同类型 El Niño 事件对西太平洋热带气旋有不同影响^[9],中部型 El Niño 事件发生时比东部型 El Niño 年季风槽偏强、偏北,热带气旋生成频数偏多,生成位置更加偏北、偏西。曹智露等^[10]指出超强台风源地及频数变化由 ENSO 事件通过改变关键区低层相对涡度以及海面温度导致。El Niño 事件发生时将导致西北太平洋(含南海)台风发生频数及在我国沿岸登陆台风的频数均比常年偏少^[11-13]。另外,热带气旋登陆受到同时期大气环流形势的制约,还与其他多个环境因子存在明显的相关^[14]。

El Niño 事件对南海和西北太平洋热带气旋的影响也存在差异。郝赛和毛江玉^[15]比较了南海台风与西北太平洋台风的季节变化差异,指出在 El Niño 事件期间,热带气旋穿越南海所在经度带路径频数为负距平,而西北太平洋经度带则相反。CHEN and TAM^[16]研究了夏季和秋季 ENSO Modoki 和 ENSO 事件对西北太平洋台风频率的不同影响,

指出在东太平洋增温型 El Niño 事件发生的年份,西北太平洋上热带气旋生成位置偏南、偏东,南海上空热带气旋生成少;而中太平洋型增温型 El Niño 发生时则相反。

考虑到 El Niño 事件对热带气旋生成频数和登陆中国频数的影响与热带气旋生成的区域有关,将中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)西北太平洋热带气旋数据分为南海热带气旋以及除南海外的西北太平洋热带气旋两大类,讨论 1951—2016 年期间不同类型的 El Niño 事件对这两大类热带气旋生成频数、生成位置和登陆中国热带气旋频数、热带气旋登陆强度的影响。所得统计结果可为登陆我国热带气旋的短期气候预测提供有益的信息。同时对不同类型 El Niño 事件期间环境场,采用合成分析法,解释东部型和中部型 El Niño 事件对登陆中国热带气旋的影响机制。

1 资料和方法

1.1 数据来源

采用数据包括由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)联合制作的 NCEP/NCAR 再分析资料集,由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的基于百年观测的海面温度评估(Centennial Observation Based Estimates of Sea Surface Temperature, COBE-SST)数据集,中国气象局上海台风研究所(Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, CMA-STI)整编的 CMA-STI 西北太平洋热带气旋(含南海,赤道以

北,东经 180°以西)最佳路径数据集。

1.2 热带气旋事件统计

某些热带气旋活动中,热带气旋会出现主中心和副中心,CMA-STI 西北太平洋热带气旋最佳路径数据集中将热带气旋的副中心定义为与其主热带气旋分离或诱发的环流中心。所统计的热带气旋登陆仅指第一次登陆,以及有双中心的热带气旋登陆时,主中心登陆,记为一次登陆;主中心和副中心都有登陆,以主中心登陆为主,记为一次登陆;主中心没登陆,副中心登陆,也记为一次登陆。

在 CMA-STI 数据集中,将南海热带气旋定义为集中形成在中国南海中部偏东的海面上(5°~23°N, 105°~120°E)的热带气旋。同时定义 120°E 以东形成的热带气旋,是指除南海热带气旋以外的热带气旋,即西北太平洋热带气旋。所选资料的覆盖时段为 1951—2016 年 El Niño 事件的发生时期,共 600 个月。

1.3 El Niño 事件类型的确定

根据国家标准 El Niño/La Niña 事件判别方法:

事件过程中 I_{EP} 的绝对值达到或超过 0.5 °C 且持续至少 3 个月,判定为东部型事件;事件过程中 I_{CP} 的绝对值达到或超过 0.5 °C 且持续至少 3 个月,判定为中部型事件。其中,

$$I_{EP} = I_{NINO3} - \alpha \times I_{NINO4} \quad (1)$$

$$I_{CP} = I_{NINO4} - \alpha \times I_{NINO3} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, I_{EP} 为东部型厄尔尼诺指数, I_{CP} 为中部型厄尔尼诺指数, I_{NINO3} 为 NINO3 指数, I_{NINO4} 为 NINO4 指数,它们的单位均为 °C。若 $I_{NINO3} \times I_{NINO4} > 0, \alpha = 0.4$;若 $I_{NINO3} \times I_{NINO4} \leq 0, \alpha = 0$ 。若事件过程同时存在,相互转换,则整个事件的类型以事件峰值所在类型为准。借鉴 ENSO 历史事件表,将 1951—2016 年的 El Niño 事件分为东部型 El Niño 事件(Eastern Pacific type El Niño, 记为“EP 型 El Niño 事件”)以及中部型 El Niño 事件(Central Pacific type El Niño, 记为“CP 型 El Niño 事件”)。1951—2016 年共发生了 13 次 EP 型 El Niño 事件以及 6 次 CP 型 El Niño 事件,如表 1 所示。同时,正常年指剔除 El Niño 事件和 La Niña 事件的年份(以下简称“正常年”)。

表 1 1951—2016 年 El Niño 事件发生时间及持续时间

Table 1 Time of occurrence and duration of El Niño events from 1951 to 2016

EP 型 El Niño 事件		CP 型 El Niño 事件	
起止时间	持续时间	起止时间	持续时间
1951 年 8 月—1952 年 1 月	6 个月	1968 年 10 月—1970 年 2 月	17 个月
1957 年 4 月—1958 年 7 月	16 个月	1977 年 9 月—1978 年 2 月	6 个月
1963 年 7 月—1964 年 1 月	7 个月	1994 年 9 月—1995 年 3 月	7 个月
1965 年 5 月—1966 年 5 月	14 个月	2009 年 6 月—2010 年 4 月	11 个月
1972 年 5 月—1973 年 3 月	11 个月	2002 年 5 月—2003 年 3 月	7 个月
1976 年 9 月—1977 年 2 月	6 个月	2004 年 7 月—2005 年 1 月	11 个月
1979 年 9 月—1980 年 1 月	5 个月		
1982 年 4 月—1983 年 6 月	15 个月		
1986 年 8 月—1988 年 2 月	19 个月		
1991 年 5 月—1992 年 6 月	14 个月		
1997 年 4 月—1998 年 4 月	13 个月		
2006 年 8 月—2007 年 1 月	6 个月		
2014 年 10 月—2016 年 4 月	19 个月		

1.4 K-means 聚类方法原理

热带气旋源地的统计采用 K-means 聚类方法。K-means 聚类方法认为两个对象的距离越近,其相似度就越大,采用距离作为相似性的评价指标。首先确定输入量 k ,采用均方差作为标准测度函数,然后将 n 个数据对象划分为 k 个聚类,使得同一聚类中的对象相似度较高,而不同聚类中的对象相似度较小。

通过统计热带气旋的生成频数、生成位置、登陆频数、登陆强度等数据,统计对比两类 El Niño 事件下的差异,采用合成分析方法,对两类事件下各气象要素以及海面温度作出相应的距平差值场进行分析,探究 El Niño 事件对热带气旋的影响机理。

2 两类 El Niño 事件下热带气旋月均生成数

对 1951—2016 年两类 El Niño 事件发生期间各

月热带气旋生成个数进行统计,其中,热带气旋月均生成数占比,是指 El Niño 事件存续期间各月份的月均生成数占全年热带气旋生成总数的百分比,如图 1 所示。

如图 1a 所示,在南海,无论 EP 型还是 CP 型 El Niño 事件期间,1—4 月均无热带气旋生成。热带气旋生成的时间主要集中在 7—10 月,约占全年的

68%。如图 1b 所示,对于西北太平洋而言,在 El Niño 事件期间,全年均有机会会有热带气旋生成。与南海相似的是,热带气旋生成频数在 7—10 月明显大于其他月份。因此,认为在 El Niño 事件期间,南海以及西北太平洋的“热带气旋活动盛期”均为 7—10 月。下文将以热带气旋活动盛期(7—10 月)展开讨论。

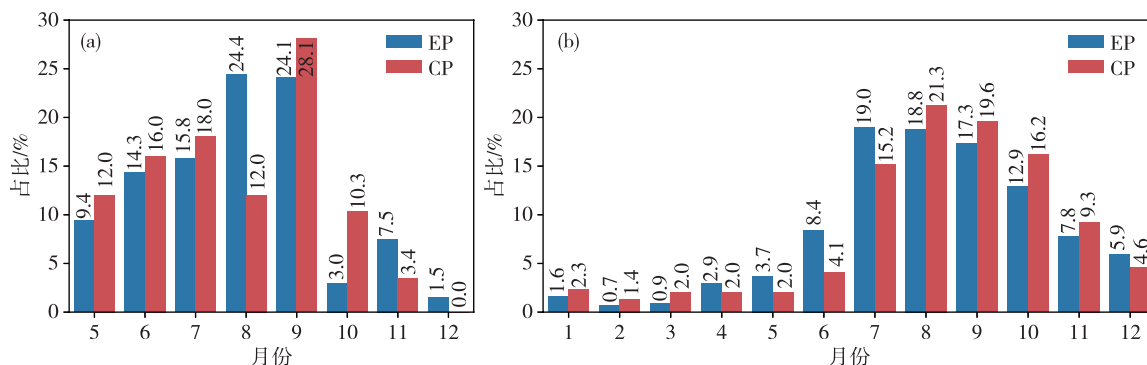


图 1 EP 型与 CP 型 El Niño 事件期间南海(a)和西北太平洋(b)热带气旋月均生成数占比

Fig.1 Proportion of monthly mean tropical cyclones generated in the South China Sea (a) and western North Pacific (b) during EP type and CP type El Niño events

3 热带气旋活动盛期 7—10 月两类 El Niño 事件对登陆中国热带气旋源地的影响

将 1951—2016 年登陆中国的热带气旋简称为

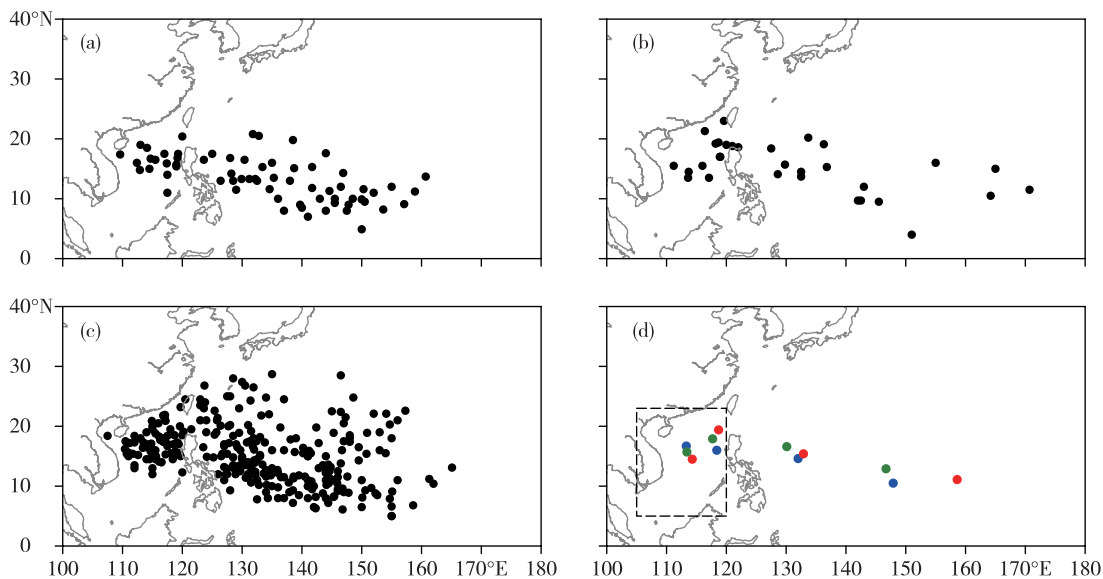


图 2 两类 El Niño 事件及正常年下登陆中国热带气旋生成源地空间分布图(a. EP 型 El Niño 事件时期, b. CP 型 El Niño 事件时期, c. 正常年时期, d. 以上三种热带气旋在两个区域的 K 均值聚合分布结果($k=2$); 黑色虚线框内为南海热带气旋源地聚合结果, 其他为西北太平洋热带气旋源地聚合结果, 蓝色圆点代表 EP 型 El Niño 事件, 红色圆点代表 CP 型 El Niño 事件, 绿色圆点代表正常年)

Fig.2 Spatial distribution of tropical cyclone genesis landing in China under two types of El Niño events and in normal years (a. EP type El Niño event, b. CP type El Niño event, c. normal years, d. K-mean aggregation distribution results of the above three tropical cyclones in two regions ($k=2$); black dotted box for aggregation results of tropical cyclone sources over the South China Sea and others for aggregation results of tropical cyclone sources in western North Pacific, blue dot for EP type El Niño event, red dot for CP type El Niño event, green dot for normal years)

登陆热带气旋。7—10 月, 两类 El Niño 及正常年下登陆中国热带气旋的生成源地分布情况如图 2a—c 所示, 图 2a—c 用于支持图 2d 的聚类结果。

从图 2d 中可以看出,对于西北太平洋热带气旋,两类 El Niño 事件发生时,登陆热带气旋生成的位置均比正常年偏东偏南。EP 型 El Niño 事件比 CP 型 El Niño 事件的登陆热带气旋生成源地偏南偏西。对于南海热带气旋而言,在南海东北部,CP 型 El Niño 事件的登陆热带气旋生成源地比正常年偏北,EP 型 El Niño 事件比正常年偏南;在南海中部则恰好相反。

4 热带气旋活动盛期两类 El Niño 期间南海热带气旋生成及登陆情况

为探究南海热带气旋与西北太平洋热带气旋在不同类型 El Niño 事件期间登陆中国的区别,突显两类事件对热带气旋的影响,在 El Niño 事件期间提

取 1951—2016 年热带气旋活动盛期(7—10 月)热带气旋的数据以及正常年 7—10 月热带气旋的数据,并对热带气旋生成及登陆情况进行统计,南海热带气旋的统计结果见表 2。在国家标准 El Niño/La Niña 事件判别方法中,El Niño/La Niña 事件的最小时间单位为月。表 2 中的总生成(登陆)数是指发生在 7—10 月的各类型事件中,南海热带气旋生成(登陆)总数;月均生成(登陆)数为南海热带气旋总数除以 7—10 月内各类事件发生的总月数,表中“占比”指南海热带气旋生成(登陆)数与含南海在内的整个西北太平洋生成(登陆)热带气旋数之比。登陆率为同类型事件下,南海热带气旋登陆总数与生成总数的比值;强度为离登陆点最近的数据点 2 min 平均近中心最大风速。

表 2 El Niño 事件期间热带气旋活动盛期(7—10 月)南海热带气旋活动情况

Table 2 Tropical cyclone activity in the South China Sea during tropical cyclones' active period (from July to October) under El Niño event

事件类型	南海热带气旋生成数			南海热带气旋登陆数				
	总数/ 个	月均/ (个·月 ⁻¹)	占比/ %	总数/ 个	月均/ (个·月 ⁻¹)	登陆率/ %	强度/ (m·s ⁻¹)	占比/ %
EP 型	37	0.725	14.9	17	0.333	45.9	18.88	25.8
CP 型	15	0.714	13.9	12	0.571	80.0	20.33	38.7
正常年	135	0.978	16.9	70	0.507	51.9	19.89	24.6

分析表 2 可以初步得出两类 El Niño 事件对热带气旋活动盛期南海热带气旋的影响。首先,对于南海生成的热带气旋,66 a 来热带气旋活动盛期,El Niño 事件期间南海上生成的热带气旋均比正常年少,其中 EP 型 El Niño 事件期间偏少 0.253 个·月⁻¹,CP 型 El Niño 事件期间偏少 0.264 个·月⁻¹,这与杨亚新^[17]的结论基本一致。对比两类 El Niño 事件期间生成的热带气旋,结果表明:CP 型 El Niño 事件期间比 EP 型 El Niño 事件期间生成的热带气旋数量偏少 0.011 个·月⁻¹,没有通过显著性检验,因此热带气旋活动盛期两类 El Niño 事件发生时南海热带气旋生成频数存在非显著差异。

其次,对于登陆中国的南海热带气旋,66 a 来热带气旋活动盛期,EP 型 El Niño 事件期间热带气旋登陆率比正常年偏少 6.0%,而 CP 型 El Niño 事件期间热带气旋登陆率却比正常年偏多 28.1%,CP 型 El Niño 事件期间热带气旋登陆率比 EP 型 El Niño 事件期间偏多 34.1%。因此,通过分析两类 El Niño 事件期间登陆中国的热带气旋登陆率可知,在热带气旋活动盛期,EP 型 El Niño 事件的发生不利

于南海热带气旋登陆中国,但在 CP 型 El Niño 事件发生时,有利于南海热带气旋在中国的登陆。

第三,就南海热带气旋登陆强度来说,66 a 来热带气旋活动盛期,EP 型 El Niño 事件期间南海热带气旋登陆强度为 18.88 m·s⁻¹,CP 型 El Niño 事件期间南海热带气旋登陆强度为 20.33 m·s⁻¹,正常年南海热带气旋登陆强度为 19.89 m·s⁻¹,均为热带风暴级别。EP 型 El Niño 事件期间登陆强度比正常年偏弱 1.01 m·s⁻¹,而 CP 型 El Niño 事件期间登陆强度却比正常年偏强 0.44 m·s⁻¹,比 EP 型 El Niño 事件偏强 1.45 m·s⁻¹。即 CP 型 El Niño 事件期间,南海热带气旋登陆强度较 EP 型 El Niño 事件期间登陆强度偏强。

5 热带气旋活动盛期两类 El Niño 事件期间西北太平洋热带气旋生成及登陆情况

同理,对西北太平洋热带气旋进行了统计。对于西北太平洋热带气旋,表 3 中的总生成(登陆)数是指发生在 7—10 月的各类型事件中,西北太平洋热带气旋生成(登陆)的总数;月均生成(登陆)数为

西北太平洋热带气旋总数除以7—10月内各类事件发生的总月数,“占比”指西北太平洋热带气旋生成(登陆)数与含南海在内的整个西北太平洋生成(登陆)热带气旋数之比。登陆率为同类型事件下,西

北太平洋热带气旋登陆总数与生成总数的比值;强度为离登陆点最近的数据点的2 min平均近中心最大风速。

表3 El Niño事件期间热带气旋活动盛期(7—10月)西北太平洋热带气旋活动情况

Table 3 Tropical cyclone activity in western North Pacific during tropical cyclones' active period (from July to October) under El Niño event

事件类型	西北太平洋热带气旋生成数			西北太平洋热带气旋登陆数				
	总数/ 个	月均/ (个·月 ⁻¹)	占比/ %	总数/ 个	月均/ (个·月 ⁻¹)	登陆率/ %	强度/ (m·s ⁻¹)	占比/ %
EP型	211	4.137	85.1	49	0.961	23.2	33.29	74.2
CP型	93	4.429	86.1	19	0.905	20.4	30.26	61.3
正常年	666	4.826	83.1	214	1.551	32.1	32.88	75.4

分析表3可以初步得出两类El Niño事件对热带气旋活动盛期西北太平洋热带气旋的影响。首先对于西北太平洋生成的热带气旋,1951—2016年热带气旋活动盛期,与南海热带气旋类似的是,El Niño事件发生期间西北太平洋上生成的热带气旋均比正常年偏少,其中EP型El Niño事件期间偏少0.689个·月⁻¹,CP型El Niño事件期间偏少0.398个·月⁻¹,说明剔除南海后,统计结果与王小玲和宋文玲^[7]的结论基本一致。对比两类El Niño事件期间的热带气旋生成情况,却发现与南海区域的热带气旋的差异,EP型El Niño事件发生期间比CP型El Niño事件发生期间生成的热带气旋数量偏少0.291个·月⁻¹,即热带气旋活动盛期,EP型El Niño事件比CP型El Niño事件更不利于西北太平洋热带气旋生成。

其次,对于登陆中国的西北太平洋热带气旋,1951—2016年热带气旋活动盛期,两类El Niño事件期间热带气旋登陆率均比正常年偏少,其中,EP型El Niño事件期间偏少8.9%,而CP型El Niño事件偏少11.7%。对比两类事件的热带气旋登陆情况,与南海热带气旋相反,CP型El Niño事件期间热带气旋在中国的登陆率比EP型El Niño事件期间热带气旋登陆率偏少2.8%,差异没有通过显著性检验。即El Niño事件的发生,不利于西北太平洋热带气旋登陆中国,但是两类El Niño事件期间西北太平洋热带气旋在中国的登陆率差异没有通过显著性检验,因此仅仅由登陆频数的角度来看,两类El Niño事件对登陆中国的西北太平洋热带气旋影响不显著。

第三,西北太平洋热带气旋登陆强度,恰好与

南海热带气旋相反,在此66年来的热带气旋活动盛期,EP型El Niño事件期间西北太平洋热带气旋登陆强度为33.29 m·s⁻¹,达到台风级别,CP型El Niño事件期间西北太平洋热带气旋登陆强度为30.26 m·s⁻¹,达到强热带风暴级别,正常年西北太平洋热带气旋登陆强度为32.88 m·s⁻¹,达到台风级别。EP型El Niño事件期间比正常年偏强0.41 m·s⁻¹,而CP型El Niño事件期间西北太平洋热带气旋登陆强度却较正常年偏弱2.62 m·s⁻¹,较EP型El Niño事件期间偏弱3.03 m·s⁻¹,即CP型El Niño事件期间西北太平洋热带气旋登陆强度比EP型El Niño事件期间登陆强度偏弱。

6 机理探究

上述数据统计结果表明两类El Niño事件和登陆中国热带气旋有密切的联系。通常热带气旋的活动受海面温度、对流层中层水汽条件等热力学因子以及低层相对涡度、垂直风切变等动力学因子影响^[18-20]。通过合成分析方法,分析热带气旋活动盛期(7—10月),两类El Niño事件期间海面温度距平、850 hPa流场、相对涡度、700 hPa比湿、500 hPa位势高度、沃克(Walker)环流等气象要素的差值场,可以清楚反映两类El Niño事件下热带气旋背景场的差异。

6.1 海面温度

已有研究说明,由于西太平洋暖池处于冷状态时,西北太平洋的热带气旋移动路径偏东,影响中国的热带气旋个数偏少^[21]。在El Niño年,西太平洋有东暖西冷的海面温度异常特征,即西太平洋暖池明显异常偏冷,呈现负距平,而在东太平洋暖水

堆积呈现出正距平^[22]。由图 3 可见,在 1951—2016 年西北太平洋热带气旋活动盛期,在含南海的整个西太平洋海域内两类 El Niño 事件期间海面温度异常(sea surface temperature anomaly, SSTA)差值(EP 型-CP 型)均为负值,而在东太平洋海域内为正值。可以看出在 EP 型 El Niño 事件期间,海面温度在东太平洋异常增暖幅度要大于 CP 型 El Niño 事件,同时,在西太平洋,负值的最大差值出现在 140°~180°E 海域,且通过 90% 的置信水平。即 EP 型 El

Niño 事件发生时,在西太平洋大部分海域海面温度基本比 CP 型 El Niño 事件发生时低。这是因为 EP 型 El Niño 事件发生时海水向西运输的能力较 CP 型小,暖海水在东太平洋堆积,故而在西太平洋西部海水异常偏冷,在西北太平洋海域的东部异常偏暖效应强于 CP 型 El Niño 事件。由于西太平洋海水 EP 型 El Niño 事件相对于 CP 型 El Niño 事件更冷,冷效应更加明显,故热带气旋生成所需要的热量条件较差。

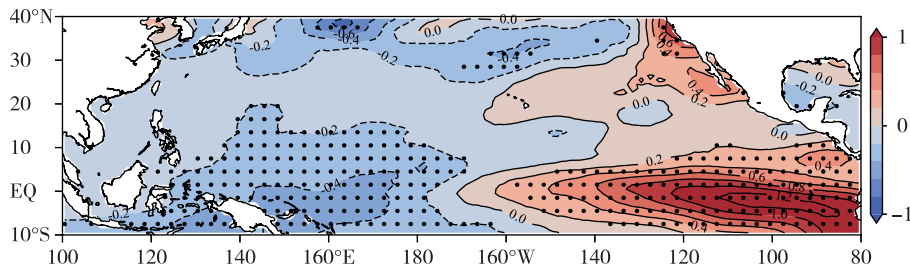


图 3 1951—2016 年西北太平洋热带气旋活动盛期 SSTA 差值场(EP 型-CP 型)(单位:℃,打点区为通过 90% 置信水平的区域,填色为 SSTA 差值)

Fig.3 SSTA difference field (EP type minus CP type) in tropical cyclones' active period in western North Pacific from 1951 to 2016 (units: °C, dotted area denotes passing the significance test at 90% level, colored area for SSTA difference)

在 EP 型 El Niño 事件发生时,相对于 CP 型 El Niño 事件热带气旋生成的个数更少,受到生成个数的限制,又将导致登陆中国的个数也更少。同时由于海面温度的位置分布差异导致 EP 型 El Niño 事件发生时,较 CP 型 El Niño 事件热带气旋生成源地偏东偏南,与上文总结的结论相一致。

6.2 对流层中层水汽条件

用 700 hPa 比湿作为判断对流层中层水汽条件的判据。在对流层中层湿度大的区域,有利于上升浮力和潜热释放的维持。因为大气中层湿度较低时,对流易受到干空气的侵蚀而减弱,同时气柱内总水汽的辐合量减少,释放的潜热量减少。对流层

中层湿度较高的地区有利于热带气旋的形成,如果对流层中层湿度较低,热带气旋一般不会形成^[23]。

通过图 4 可以看出,在 1951—2016 年热带气旋活动盛期,EP 型 El Niño 事件期间,在西太平洋中部大部分海域均比 CP 型 El Niño 事件期间异常偏干,表现为在 10°~20°N, 145°~155°E 海域中比湿距平相差 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。特别是在西太平洋中部赤道附近南北约 10 纬度, 140°~160°E 的海域,两类 El Niño 事件期间 700 hPa 的比湿距平差异较大,通过 90% 的置信水平,最大差值达 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,水汽条件同样导致 EP 型 El Niño 事件发生期间热带气旋生成个数相对于 CP 型 El Niño 事件更少,因而

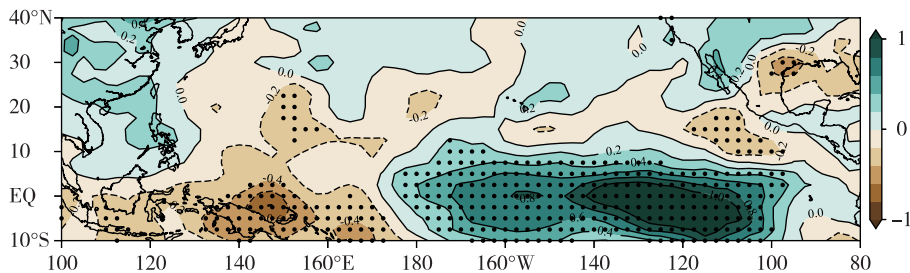


图 4 1951—2016 年 700 hPa 西北太平洋热带气旋活动盛期比湿距平差值场(EP 型-CP 型)(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,打点区为通过 90% 置信水平的区域,填色为比湿距平差值)

Fig.4 Specific humidity anomaly difference field (EP type minus CP type) at 700 hPa in tropical cyclones' active period in western North Pacific from 1951 to 2016 (units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, dotted area denotes passing the significance test at 90% level, colored area for specific humidity anomaly difference)

导致登陆中国的个数也更少。而在南海区域以及西太平洋海域东南部 $0^{\circ} \sim 10^{\circ} \text{N}$, $175^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}$, 情况则相反, EP 型 El Niño 事件较 CP 型 El Niño 事件更湿, 但差异不显著。两类 El Niño 事件期间中层大气比湿的位置分布差异同样可以解释 EP 型 El Niño 事件发生时较 CP 型 El Niño 事件热带气旋生成源地偏东偏南。

6.3 1 000 hPa 涡度场

热带气旋的生成位置主要分布在大气低层相对涡度大的区域。低层空气团的摩擦以及低层水汽的辐合加强, 有利于热带气旋在该区域生成。通过图 5a、b 可以看出, 在 1951—2016 年西北太平洋热带气旋活动盛期, 当 EP 型或 CP 型 El Niño 事件发生时, 在南海区域以及较多热带气旋生成的 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $120^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$ 的海域上, 大气低层均有涡度的正异常, 有助于产生辐合运动, 而且正涡度异常最大值均达到 $8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 对比正涡度异常最大值出现

的位置, 可以发现 EP 型 El Niño 事件期间正涡度异常中心位置位于 150°E 附近海域, CP 型 El Niño 事件期间正涡度异常中心位于 $130^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$ 的海域, EP 型 El Niño 事件期间正涡度异常中心比 CP 型 El Niño 事件期间范围偏小。图 5c 表明, 在 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $120^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$ 的海域上涡度距平的差值为负值, 即 EP 型 El Niño 事件期间与发生 CP 型 El Niño 事件相比, 涡度异常偏低, 且在西太平洋中部 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $125^{\circ} \sim 135^{\circ} \text{E}$ 以及 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $145^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$ 差异显著, 通过 90% 置信水平。但在西太平洋东部赤道以北至 10°N , $160^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}$ 涡度距平差值为正值, 且差异通过 90% 置信水平。因此, 在 EP 型 El Niño 事件期间, 西太平洋西部涡度异常较 CP 型小, 西太平洋东部涡度异常较 CP 型大。由于正涡度异常为热带气旋的生成提供了十分有利的动力条件, 因此可以解释 EP 型 El Niño 事件期间较 CP 型热带气旋生成源地偏东偏南且 EP 型 El Niño 事件期间不利于台风生成。

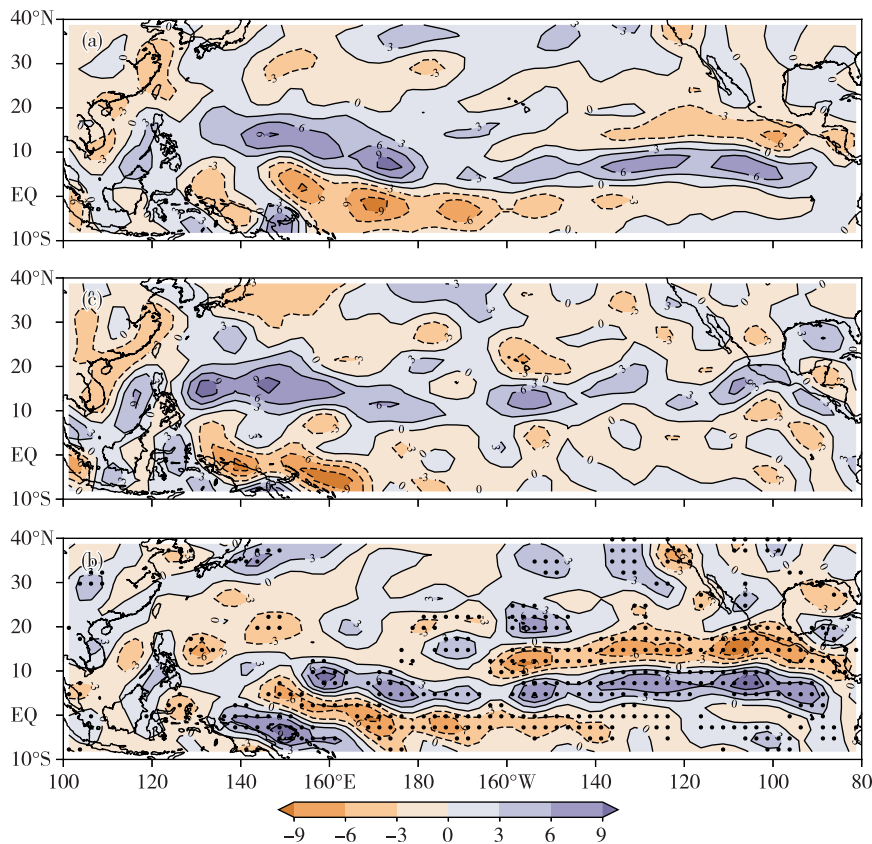


图 5 1951—2016 年西北太平洋热带气旋活动盛期 1 000 hPa 涡度距平 (a. EP 型 El Niño 事件期间, 填色为涡度距平; b. CP 型 El Niño 事件期间, 填色为涡度距平; c. 两类事件的差值场 (EP 型 - CP 型), 填色为涡度距平差值; 单位: 10^{-6} s^{-1} , 打点区为通过 90% 置信水平的区域)

Fig.5 Vorticity anomaly of 1 000 hPa in tropical cyclones' active period in western North Pacific from 1951 to 2016 (a. EP type El Niño event, colored area for vorticity anomaly; b. CP type El Niño event, colored area for vorticity anomaly; c. difference field of the two types of events (EP type minus CP type), colored area for vorticity anomaly difference; units: 10^{-6} s^{-1} , dotted area denotes passing the significance test at 90% level)

6.4 Walker 环流

当 El Niño 事件发生时,西太平洋对流活动受到抑制,Walker 环流减弱,将不利于热带气旋的生成和活[7]。由图 6a—h 来看,EP 型和 CP 型 El Niño 事件期间,在西太平洋海域都存在一个与 Walker 环流方向相反的距平环流,在西太平洋西部有异常下沉支,西太平洋东部有异常上升支。且 EP 型 El Niño 事件正距平较中部型偏东,这与 EP 型 El Niño

事件的增温中心偏东相一致。上升气流有利于凝结潜热的释放,为热带气旋的生成提供能量,由于 EP 型和 CP 型 El Niño 事件期间存在这种反 Walker 距平环流,使得 Walker 环流在西太平洋的位于 100°~140°E 的上升支减弱,不利于热带气旋在西太平洋的生成,故较正常年,EP 型和 CP 型 El Niño 事件西太平洋热带气旋生成频数偏低,生成位置偏东。

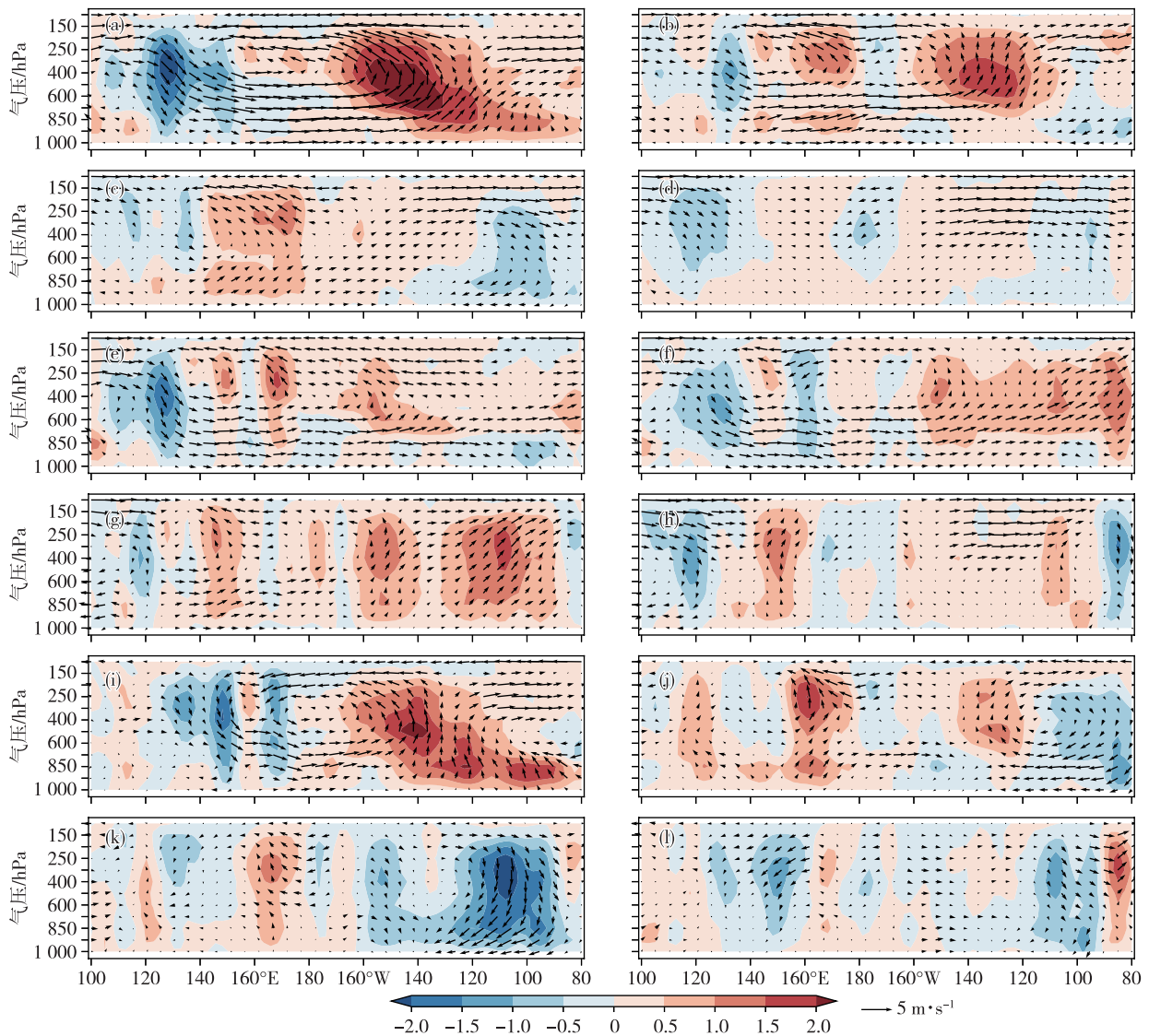


图 6 1951—2016 年西北太平洋热带气旋活动盛期 Walker 环流中 EP 型(a/b/c/d)与 CP 型(e/f/g/h) El Niño 事件纬向平均风场距平场和纬向平均距平差值场(EP 型-CP 型;i/j/k/l)(矢量箭头为纬向风与垂直速度的合成风场,填色表示垂直速度($\times 1\ 000$),单位: $m \cdot s^{-1}$; a/e/i. $0^\circ \sim 5^\circ N$, b/f/j. $5^\circ \sim 10^\circ N$, c/g/k. $10^\circ \sim 15^\circ N$, d/h/l. $15^\circ \sim 20^\circ N$)

Fig.6 Zonal mean wind anomaly of EP type (a/b/c/d) and CP type (e/f/g/h) El Niño events and zonal mean anomaly difference field (EP type minus CP type; i/j/k/l) in Walker circulation during tropical cyclones' active period in western North Pacific from 1951 to 2016 (vector arrow for resultant wind of zonal wind and vertical velocity, colored area for vertical velocity ($\times 1\ 000$), units: $m \cdot s^{-1}$; a/e/i. $0^\circ \sim 5^\circ N$, b/f/j. $5^\circ \sim 10^\circ N$, c/g/k. $10^\circ \sim 15^\circ N$, d/h/l. $15^\circ \sim 20^\circ N$)

由图 6k、l 分析 EP 型与 CP 型 El Niño 事件期间环流场差值,可以看出热带气旋活动盛期,EP 型 El

Niño 事件发生时,在西太平洋中部海域 $130^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{N}$, 即 EP 型 El Niño 事件的台风源地处,较 CP 型 El Niño 事件有异常下沉气流,抑制了台风生成发展所需要的辐合上升气流,因此,在西太平洋上 EP 型 El Niño 事件的发展条件较 CP 型更差,更不利于生成。

热带气旋生成的必要条件是有初始扰动,西太平洋热带气旋大多数是由热带辐合带中的扰动发展起来的,当 El Niño 发生时, Walker 环流减弱,会

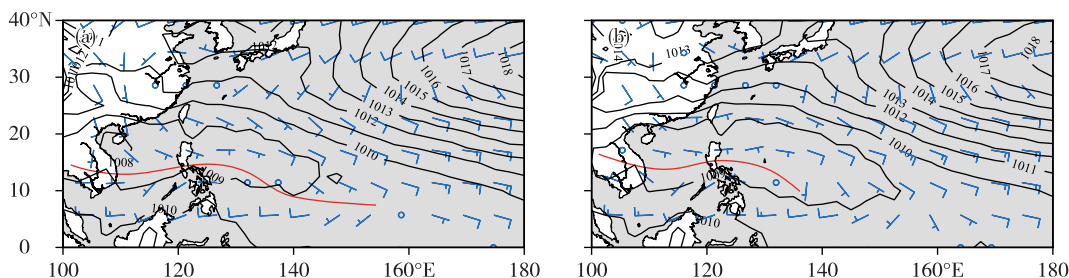


图7 1951—2016年西北太平洋热带气旋活动盛期平均季风槽(a. EP型El Niño事件期间,b. CP型El Niño事件期间;等值线表示海平面气压场,单位:hPa,风矢表示850 hPa风场,红色线为季风槽的槽线)

Fig.7 Mean monsoon trough during tropical cyclones' active period in western North Pacific from 1951 to 2016 (a. EP type El Niño event, b. CP type El Niño event; contour for sea-level pressure, units: hPa, wind barb for wind field at 850 hPa, red line for trough line of monsoon trough)

6.5 500 hPa 环流形势

热带气旋是低压系统,其移动主要受500 hPa引导气流的控制,且向有利于自身发展的地区移动(即气压相对较低地区)。

在1951—2016年西北太平洋热带气旋盛期,由500 hPa位势高度距平角度(图8a)分析,对比两类事件的差别可以发现,无论是CP型发生时,还是EP型发生时,我国东南沿海地区都为正距平,不利于热带气旋登陆中国,这与El Niño事件发生时较正常年登陆中国热带气旋数较少相一致。但由图8b可以看出,两类El Niño事件下500 hPa位势高度场的差异不大,故此因子可能不是导致两类事件下热带气旋活动差异的主要原因。

西北太平洋副热带高压(以下简称“副高”)位置对登陆我国的热带气旋路径有很大影响^[24-26]。由引导气流角度(图8c)分析,登陆热带气旋与西太平洋副高的关系甚为复杂,如果副高异常偏东,热带气旋则会沿副高西侧引导气流转向,不利于登陆。EP型El Niño事件发生时,西太平洋副热带高压偏强偏东偏南,不利于热带气旋登陆;CP型El Niño事件发生时,西太平洋副高偏西偏北,有利于热带气旋在中国登陆。这与上文CP型El Niño事件较EP型El Niño事件更有利于热带气旋的登陆

造成热带辐合带偏南且不活跃,使得西太平洋热带气旋生成所需的初始扰动减少,因此不利于热带气旋形成^[19]。讨论1951—2016年西北太平洋热带气旋活动盛期两类El Niño事件的季风槽位置,图7为海平面气压场及850 hPa风场图,对比图7a与图7b,可以看出EP型El Niño事件期间季风槽位置较CP型El Niño事件期间偏南,初始扰动减少,不利于台风生成。综上分析,EP型El Niño事件期间比CP型El Niño事件期间在西太平洋生成的热带气旋频数少。

相对应。由流场差值(图8d)显示,在热带气旋路径多经过的南海和菲律宾东部海域上的风向均与台风登陆需要的运动方向不同,导致台风偏离登陆路径,所以EP型El Niño事件比CP型El Niño事件更不利于热带气旋登陆中国。

结合以上的分析,除了500 hPa位势高度距平场,在1951—2016年西北太平洋热带气旋盛期,两类El Niño事件下海面温度场、对流层中层水汽条件、1000 hPa涡度场及Walker环流的差异均将导致EP型El Niño事件发生时较CP型El Niño事件的热带气旋生成源地偏东偏南,在EP型El Niño事件发生的时候相对于CP型El Niño事件的热带气旋生成个数更加得少,受到生成个数的限制,又将导致登陆中国的个数也更加得少,与上文总结的结论相一致。

最后,简单讨论影响热带气旋登陆强度时的原因。结合上述背景场,在1951—2016年西北太平洋热带气旋盛期,对于EP型El Niño来说,由图3可以看出该时期西北太平洋海面温度较CP型El Niño明显异常偏低,大尺度的环流条件发生改变,继而导致低层相对涡度在该区域出现异常偏低,大气的低层空气团通过摩擦辐散,同时低层有较差的水汽条件,不利于热带气旋在该区域生成。因此,热带

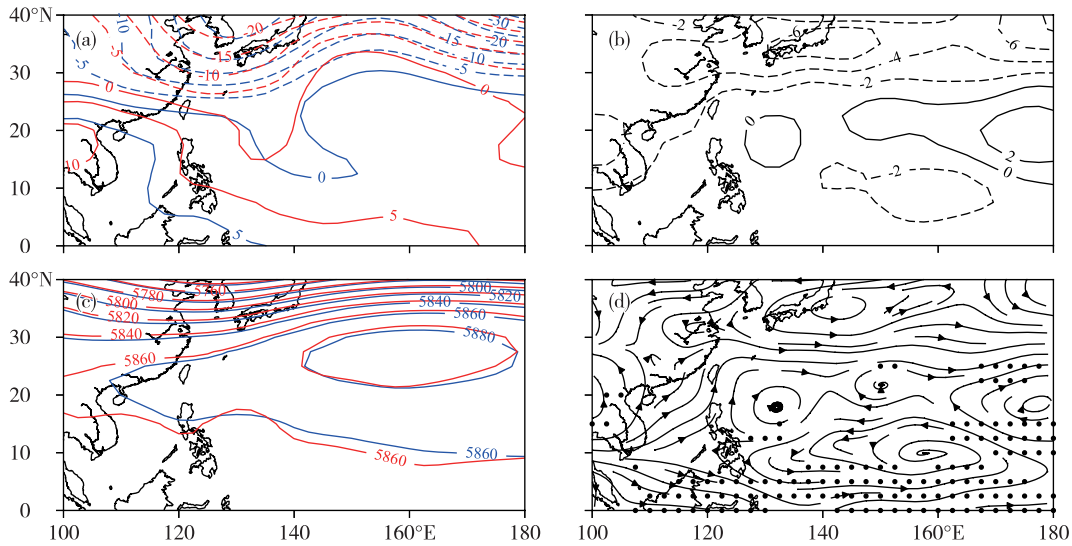


图8 1951—2016年西北太平洋热带气旋盛期两类 El Niño 事件下 500 hPa 高度距平场(a)、高度差值场(EP 型-CP 型;b)、平均高度场(c)和流场距平差值场(EP 型-CP 型;d) (等值线单位:gpm, 蓝线为 EP 型 El Niño 事件期间, 红线为 CP 型 El Niño 事件期间, 打点区为通过 90% 置信水平的区域)

Fig.8 Geopotential height anomaly field (a), geopotential height difference field (EP type minus CP type; b), mean geopotential height field (c), and flow anomaly difference field (EP type minus CP type; d) at 500 hPa under two types of El Niño events during tropical cyclones' active period in western North Pacific from 1951 to 2016 (units of contour: gpm, blue line for EP type El Niño event, red line for CP type El Niño event, dotted area denotes passing the significance test at 90% level)

气旋源地较 CP 型 El Niño 时偏东。这又会导致其登陆中国的路径更长, 即热带气旋在洋面活动的持续时间更久, 此过程中吸收的热量相对更多, 这与 EP 型 El Niño 存续期间西太平洋热带气旋登陆中国强度更强的数据统计结果相一致。

7 结论与讨论

1) 无论是 EP 型 El Niño 事件还是 CP 型 El Niño 事件, 南海以及西北太平洋热带气旋在 7—10 月生成的比例最高。

2) 对于生成于西北太平洋的热带气旋来说, 两类 El Niño 事件相比, EP 型 El Niño 事件发生时, 热带气旋生成的位置比 CP 型 El Niño 事件偏南偏西; 对于南海区域而言, 由两个聚类区域显示出的规律也不一样, 在南海东北部海域, EP 型 El Niño 发生时比 CP 型 El Niño 事件偏南, 在南海中部海域则恰好相反。

3) 南海热带气旋在热带气旋活动盛期, 两类 El Niño 事件下生成频数差异不大。EP 型 El Niño 事件期间登陆率较低, 南海热带气旋登陆强度偏弱; CP 型 El Niño 事件期间, 南海热带气旋登陆率较高, 热带气旋登陆强度偏强。

4) 西北太平洋热带气旋在热带气旋活动盛期,

EP 型 El Niño 事件期间生成频数较低, 在中国的登陆率略高于 CP 型 El Niño 事件, 但差异不显著, 登陆强度偏强; CP 型 El Niño 事件发生时虽生成频数较高, 但登陆率略低于 EP 型 El Niño 事件, 登陆强度偏弱。

5) 合成分析表明, 在 EP 型 El Niño 事件期间, 西北太平洋海面温度较 CP 型 El Niño 事件期间偏低, 热量条件较差, 对流层中部水汽条件较差, 对流层低层涡度异常偏低, 不利于辐合, 动力条件也较差, 同时在热带气旋较为集中生成的海域对应 Walker 环流的异常下沉气流, 因此 EP 型 El Niño 事件发生时不利于热带气旋生成, 且生成源地偏东偏南, 导致其登陆中国的路径更长, 持续时间更久, 吸收的热量相对更多, 登陆强度更强。另外, 从引导气流来说, EP 型 El Niño 事件发生时, 西太平洋副热带高压偏强偏东偏南, 也说明不利于热带气旋登陆中国。合成分析结果与数据统计结果相符。尚未完整地对环境因子进行讨论, 登陆热带气旋还与其他多个环境因子存在明显的相关^[27], 之后还要考虑多个影响因子与登陆我国热带气旋的关系。

参考文献:

[1] 何敏, 宋文玲, 陈兴芳. 厄尔尼诺和反厄尔尼诺事件与西

- 北太平洋台风活动[J].热带气象学报,1999,15(1):18-26.
- [2] 邓自旺,屠其璞,冯俊茹,等.我国登陆台风频率变化与太平洋海表温度场的关系[J].应用气象学报,1999,10(增刊):55-61.
- [3] 冯利华.中国登陆热带气旋与太平洋海表温度的关系[J].地理学报,2003,58(2):209-214.
- [4] 陈世发,查轩.1951~2016年 ENSO 对登陆广东省热带气旋的影响[J].应用海洋学学报,2018,37(1):26-34.
- [5] 刘冬梅,王杏. ENSO 对西北太平洋台风活动的影响[J].科技创新与应用,2016(26):13-14.
- [6] 赵振国,蒋伯仁,陈国珍,等. ENSO 事件对中国气候的可能影响[J].山东气象,2000,20(1):4-12.
- [7] 王小玲,宋文玲. ENSO 与登陆我国热带气旋的关系研究[J].热带气象学报,2009,25(5):576-580.
- [8] GRAY W M. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences [J]. *Mon Wea Rev*, 1984, 112(9):1649-1668.
- [9] 张宏杰,武亮,黄荣辉.两类 El Niño 型对西北太平洋季风槽及热带气旋生成的可能影响[J].气候与环境研究,2018,23(2):150-160.
- [10] 曹智露,胡邦辉,杨修群,等. ENSO 事件对西北太平洋热带气旋影响的分级研究[J].海洋学报,2013,35(2):21-34.
- [11] 许武成,马劲松,王文.关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述[J].气象科学,2005,25(2):212-220.
- [12] 许映龙,黄奕武.2015年西北太平洋和南海台风活动特征及主要预报技术难点[J].海洋气象学报,2017,37(1):31-41.
- [13] 王海平,董林.2019年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,2020,40(2):1-9.
- [14] 王咏梅,李维京,任福民,等.影响中国台风的气候特征及其与环境场关系的研究[J].热带气象学报,2007,23(6):538-544.
- [15] 郝赛,毛江玉.西北太平洋与南海热带气旋活动季节变化的差异及可能原因[J].气候与环境研究,2015,20(4):380-392.
- [16] CHEN G H, TAM C Y. Different impacts of two kinds of Pacific Ocean warming on tropical cyclone frequency over the western North Pacific [J]. *Geophys Res Lett*, 2010, 37(1):70-75.
- [17] 杨亚新.1949~2003年南海热带气旋的发生规律[J].上海海事大学学报,2005(4):16-19.
- [18] 胡皓,端义宏.南海热带气旋迅速加强环境场因子的影响分析[J].热带气象学报,2016,32(3):299-310.
- [19] 高晓梅,秦增良,马守强,等.影响山东的热带气旋与西太平洋副热带高压的关系[J].山东气象,2008,28(2):1-5.
- [20] 高晓梅,江静,袁俊鹏,等.影响山东热带气旋的频数与太平洋海温的关系[J].山东气象,2009,29(2):8-14.
- [21] 陈光华,黄荣辉.西北太平洋暖池热状态对热带气旋活动的影响[J].热带气象学报,2006,22(6):527-532.
- [22] 李晓惠,徐峰,陈虹颖,等.1980—2016年西太平洋暖池与 ENSO 循环过程的相关分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):85-94.
- [23] 黄荣辉,陈光华.西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究[J].气象学报,2007,65(5):683-694.
- [24] 王磊,陈光华,黄荣辉.影响登陆我国不同区域热带气旋活动的大尺度环流定量分析[J].大气科学,2009,33(5):916-922.
- [25] 殷明,肖子牛,李崇银,等.2015年西北太平洋热带气旋活动特征及强 El Niño 现象对其影响的初步分析[J].气象,2016,42(9):1069-1078.
- [26] 杨吕玉慈,吴立新.西北太平洋热带气旋活动的年际变化及其与大尺度背景场的关系[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(5):11-20.
- [27] 钟元,余晖,王东法.环境场对东海登陆热带气旋陆地路径的影响[J].热带气象学报,2006,22(4):313-320.