

欧阳婧怡, 黄菲, 许士斌, 等. 1949—2019年影响山东的热带气旋时空分布及极端降水和大气环流异常[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(4): 1-10.

OUYANG Jingyi, HUANG Fei, XU Shibin, et al. Spatial and temporal distribution of tropical cyclones affecting Shandong as well as the extreme precipitations and atmospheric circulation anomalies from 1949 to 2019 [J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(4): 1-10. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.001. (in Chinese)

1949—2019年影响山东的热带气旋时空分布 及极端降水和大气环流异常

欧阳婧怡¹, 黄菲^{1,2}, 许士斌¹, 曹倩¹

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室和海洋高等研究院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 使用中国气象局热带气旋资料中心的热带气旋最佳路径数据集和 NCEP/NCAR 再分析资料提供的月平均数据, 对北上影响山东的热带气旋(tropical cyclone, TC)及其造成的极端降水进行统计分析, 并揭示了有利于 TC 北移影响山东的大气环流特征。结果表明: 影响山东的 TC 主要出现于6—9月, 其中盛夏时节(7、8月)TC 对山东影响最大; TC 影响山东时, 强度主要为台风及以下等级, 或已发生变性; TC 会引发山东极端降水事件, TC 极端降水多出现在夏秋季(7—9月), 其中8月的占比最大, 9月次之, TC 降水在极端降水事件中的占比约为 10%, 但年际变化大, 有些年份占比达 60%以上, 特别是 1990 年以来 TC 对极端降水的贡献显著增强; 影响山东的 TC 主要生成于西北太平洋, 多为转向型路径; 当 500 hPa 位势高度异常场呈太平洋-日本遥相关型的正位相时, TC 更易北上影响山东, 此时西北太平洋副热带高压位置偏北, 其外围气流会引导 TC 北上转向, 对华东地区造成影响; 850 hPa 上, 南海至西北太平洋存在异常气旋式环流, 对流活跃, 夏季风环流和季风槽加强, 有利于 TC 的生成和发展, 同时, 华东、华南上空有异常上升运动, 涡度增大, 垂直风切变减小, 水汽充沛, TC 登陆后强度能得到较好的维持。

关键词: 热带气旋; 山东; 极端降水; 大气环流; 太平洋-日本遥相关型; 季风槽

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)04-0001-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.001

Spatial and temporal distribution of tropical cyclones affecting Shandong as well as the extreme precipitations and atmospheric circulation anomalies from 1949 to 2019

OUYANG Jingyi¹, HUANG Fei^{1,2}, XU Shibin¹, CAO Qian¹

(1. Physical Oceanography Laboratory, CIMST/Institute of Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract Based on the tropical cyclone best track dataset from the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Data Center and the monthly reanalysis data from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), this paper analyzes the northward moving tropical cyclones (TC) that affect Shandong and the extreme precipitation caused by them, also

收稿日期: 2021-08-02; 修订日期: 2021-08-05

基金项目: 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD12); 国家自然科学基金项目(41975061, 42075024)

第一作者: 欧阳婧怡, 女, 硕士研究生, 主要从事极端天气气候变化等方向的研究, ouyangjy1997@163.com。

通信作者: 黄菲, 女, 博士, 教授, 主要从事大尺度海气相互作用、极地气候变化和气候动力学等研究, huangf@ouc.edu.cn。

reveals the atmospheric circulation characteristics that are favorable for TCs to move northward and influence Shandong. The results show that the TCs affecting Shandong mainly occur from June to September, with the greatest impact in midsummer (July and August). When TCs affect Shandong, their intensity levels are mainly typhoon or below, or extratropical transition occurred. These TCs can cause extreme precipitation events in Shandong, most of which occur in summer and autumn (July-September), with the largest proportion in August and the second in September. The proportion of extreme precipitation events caused by TCs is about 10% of total, but its interannual variation is large, reaching more than 60% in some years. Especially, the contribution of TC to extreme precipitations in Shandong has significantly increased since 1990. The TCs affecting Shandong are mainly generated in the northwest Pacific, and most of them have a turning path. When there is a positive phase of the Pacific-Japan (PJ) teleconnection pattern at 500 hPa geopotential height anomaly field, TC is more likely to move northward and affect Shandong. At this time, the position of the northwest Pacific subtropical high is northward, while the airflow on its southwest edge can lead TC to move northward, affecting east China. It is conducive to the generation and development of TC when there are abnormal cyclonic circulations over the South China Sea and the northwest Pacific at 850 hPa, with active convection and enhanced summer monsoon circulation and monsoon trough. Moreover, the abnormal ascending motion, increased vorticity, reduced vertical wind shear, and abundant water vapor over east and south China are conducive to maintaining the strength of TC after landing.

Key words tropical cyclones; Shandong province; extreme precipitation; general circulation; Pacific-Japan teleconnection pattern; monsoon trough

引言

热带气旋(tropical cyclone, TC)是一种发生在热带或副热带洋面上深厚的低压涡旋系统,其所伴随的大风和强降水常会引起山洪暴发、水坝决堤、风暴潮、泥石流等灾害,进而造成人员伤亡和经济损失。平均每年有7~8个TC在我国登陆^[1],包括山东在内的我国大部分季风区都会受到TC的影响^[2-3]。

TC降水有着影响范围广、强度大的特点。除了受TC本身环流结构的影响外,TC降水的分布与强度还会受到中纬度其他天气系统^[4-6]、下垫面强迫等诸多因素的影响^[7-8]。通过前人的个例分析可以发现山东虽位于中纬度地区,却也常受北上TC的影响,夏季多有TC降水出现。孙兴池等^[9]发现北上TC能与西风槽或者副热带高压相互作用,为山东地区带来降水。1818号台风“温比亚”及其残骸与中纬度天气系统结合在山东引发了持续时间较长的特大暴雨,造成直接经济损失215.13亿元^[10];1509号强热带风暴“灿鸿”与冷空气结合,给山东半岛东部海岸带来了暴雨天气过程^[11];1006号台风“狮子山”和1319号台风“天兔”在高空北支槽、台风倒槽以及切变线的影响下,在山东半岛产生了大

暴雨^[12]。由此看来,TC不仅会在华南和东南沿海地区造成重大的经济损失,还会给中纬度地区带来严重的灾害。

山东位于我国东部沿海,易受北上TC的影响。以往的研究主要是对影响山东的TC个例进行分析,并未进行系统的统计分析。因此本文将对影响山东的TC进行统计,并对它们的时空分布特征以及有利于TC北上影响山东的大尺度环流场进行分析。

1 资料和方法

所使用的台风数据来自于中国气象局热带气旋资料中心的CMA最佳路径数据集^[13-14],包含1949年以来西北太平洋(含南海,赤道以北,180°E以西)海域每6h的TC的位置和强度。大气环流资料来自美国国家环境预报中心和大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)的逐月再分析数据集,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,其包含位势高度、湿度、风向和风速等气象要素。1961—2019年间的降水数据来自山东的79个气象台站。

将中心位于山东500 km范围以内的TC视为

影响山东的 TC；中心进入山东地区的 TC 视为途经山东的 TC。在以上两类 TC 的影响下，山东所出现的降水视为 TC 降水。

采用阈值法对山东夏秋季（7—9 月）的极端降水进行挑选，把山东各台站的非零日降水量由小到大依次排序，将概率谱密度大于等于 95% 分位数的日降水视为极端降水，这其中由 TC 影响所造成的降水事件视为 TC 极端降水事件。

本文主要采用了相关分析、合成分析、t 检验等方法对影响山东的 TC 降水进行分析研究。

2 影响山东 TC 的时空变化特征

对 1949—2019 年间生成于西北太平洋上的 TC 进行统计（图 1），结果表明影响山东的 TC 有 169 个，其中途经山东的有 53 个。平均每年约有 2.38 个 TC 影响山东，0.75 个 TC 途经山东。途经山东的 TC 个数约占影响山东的总 TC 数的 30%，这表明影响山东的大部分 TC 并没有发生在山东登陆的情况，它们主要是通过外围螺旋雨带或是与其他天气系统结合，对山东造成影响。

由季节分布（图 2a）来看，影响山东的 TC 主要出现在 6—9 月，8 月达到峰值。盛夏时节（7、8 月）影响山东的 TC 最多。由强度（图 2b）来看，TC 影响

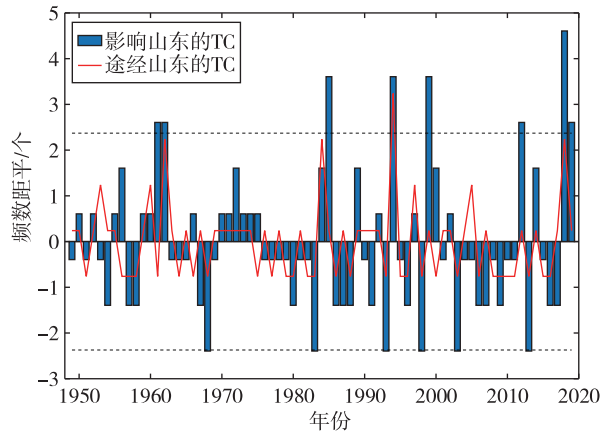


图 1 1949—2019 年间影响山东的 TC 频数距平时间序列（上下两条虚线分别代表时间序列的 ± 1.5 倍标准差）

Fig.1 Time series of TC frequency anomalies affecting Shandong during 1949–2019 (the upper and lower dashed lines represent ± 1.5 standard deviation of the time series)

山东时的强度多在台风及以下，热带风暴出现的频次最高，其次为强热带风暴，鲜少有 TC 在影响山东时仍保持着强台风的强度。此外，约有 20% 的 TC 在北上的过程中发生了变性。总体来看，TC 影响山东时的强度并不是特别大，但其所带来的降水和灾

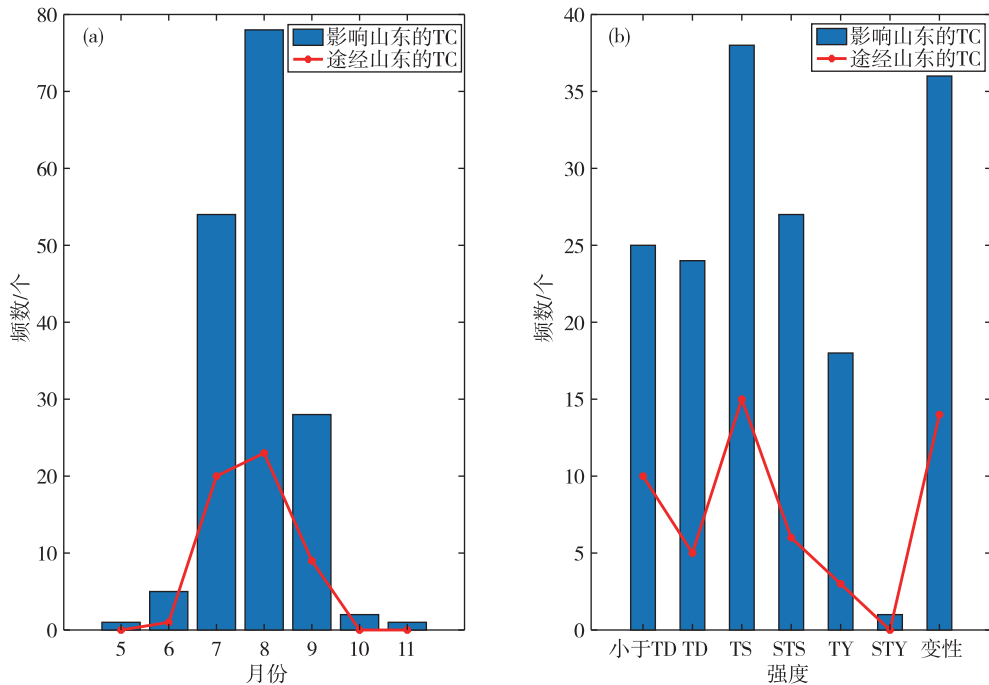


图 2 1949—2019 年影响山东的 TC 个数的月变化 (a) 和 TC 影响山东时的强度分布 (b; TD: 热带低压, TS: 热带风暴, STS: 强热带风暴, TY: 台风, STY: 强台风)

Fig.2 Monthly variation of the number of TC affecting Shandong (a) and the intensity distribution of TCs affecting Shandong (b; TD: tropical depression, TS: tropical storm, STS: severe tropical storm, TY: typhoon, STY: strong typhoon) during 1949–2019

害却不容小觑。

对以上各强度 TC 的路径进行了统计,结合图 3 来看,6 类不同强度的 TC 路径相似,多为转向型。从生成源地上来看,影响山东的 TC 主要生成于菲律宾以东,20°N 以南的海面上。与其他类型的 TC 相比,强度在热带低压及以下的 TC 出现西行路径的频次会更多一些,且有少量 TC 生成于南海(图 3a、b)。此类 TC 强度弱、生命周期短,因此活动范围相对较小且偏南,主要出现在 40°N 以南的区域。

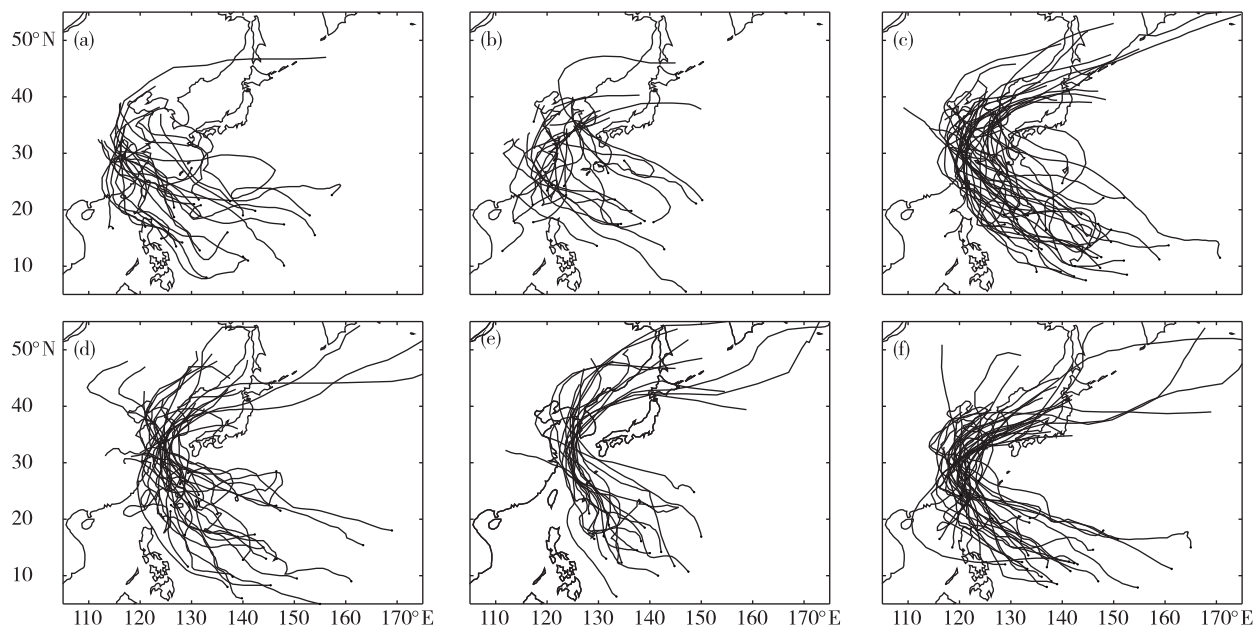


图 3 1949—2019 年影响山东的 TC 路径(a.强度小于热带低压的 TC,b.热带低压,c.热带风暴,d.强热带风暴,e.强度在台风及其以上的 TC,f.发生变性的 TC)

Fig.3 The paths of TCs affecting Shandong from 1949 to 2019 (a. TC with intensity less than tropical depression, b. tropical depression, c. tropical storm, d. severe tropical storm, e. TC with intensity above typhoon, f. TC with extratropical transition)

3 影响山东的 TC 极端降水特征

TC 伴随的强降水会对山东的夏季降水产生重要影响。使用阈值法对山东极端降水事件进行筛选,进一步分析 TC 降水在山东极端降水事件中的占比。

由季节(图 4a)来看,TC 极端降水多出现在夏秋季(7—9月),其中 8 月的占比最大,9 月次之,与 TC 频数在 8 月最多 7 月次之的变化特征略有不同,表明 9 月影响山东的 TC 较少,但造成极端降水的可能性较大。

在年际变化(图 4b)上,夏秋季 TC 降水在极端降水事件中的占比约为 10%,但年际变化大,部分年份 TC 降水的占比可达 60%。其与图 1 中 TC 频

而强度在热带风暴及以上的 TC 活动区域明显北扩,大部分 TC 在北移过程中发生转向,最后能行至我国东北地区、韩国以及日本一带,对中纬度沿海地区造成影响(图 3c—e)。总体来看,南海 TC 北上影响中纬度地区的 TC 个例比较少。生成于西北太平洋上的 TC 在登陆前能在海上移动较长的距离,它们从海洋上汲取的能量更多,强度更强,生命周期更长,北上影响中纬度地区的概率也更大。

数的时间序列有显著的正相关关系,相关系数可达 0.54(通过了 95%的显著性检验),表明影响山东的 TC 偏多时,TC 极端降水事件出现的概率也随之提高。近 30 a 来,TC 极端降水事件出现的概率显著增加。值得注意的是,当极端降水筛选阈值由 95% 提升至 99% 时(图 4c),TC 降水在极端降水事件中的比值有明显的提高,个别年份可达 100%。这说明,TC 降水在强极端降水事件中的占比更大,TC 能带来强度较大、灾害性更强的极端降水。20 世纪 90 年代后,TC 在强极端降水中的比重增加,其对山东夏季降水的影响加强。

将 1961—2019 年各台站 TC 暴雨大于 50 mm 的部分进行累加,得到夏季 TC 暴雨的累计降水图(图 5)。从空间上(图 5a)来看,TC 暴雨主要发生

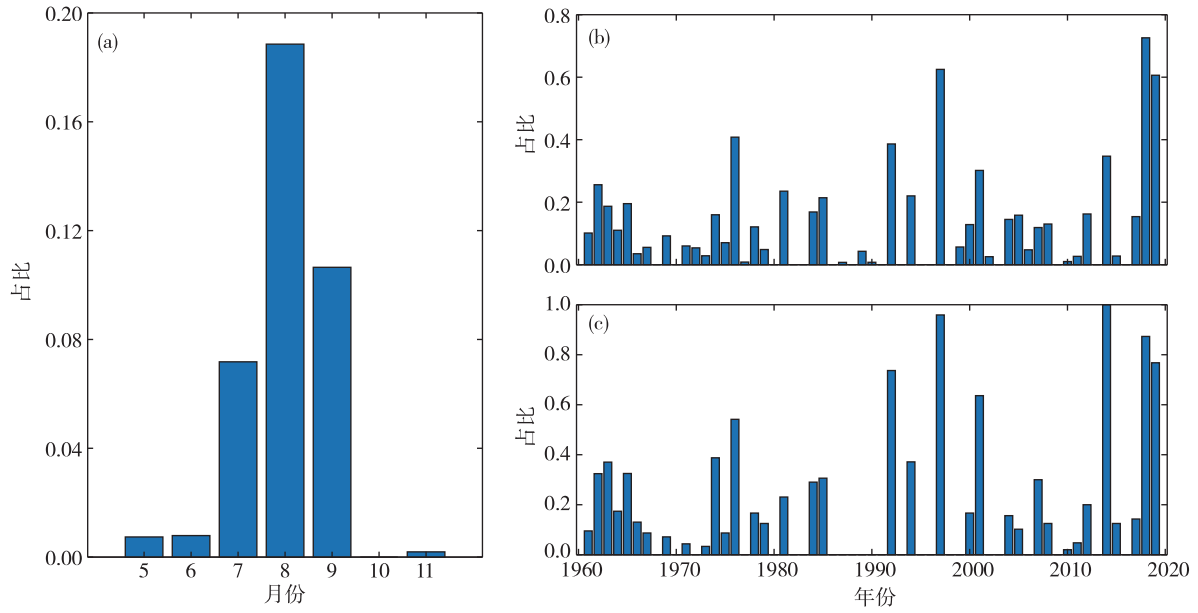


图 4 1949—2019 年阈值为 95% 条件下 TC 极端降水占比的逐月分布(a)、一定阈值条件下 7—9 月 TC 极端降水占比的
 实际分布(b.阈值为 95%,c.阈值为 99%)

Fig.4 Monthly distribution of the proportion of extreme precipitation caused by TC under the threshold of 95% (a), the interannual
 distribution of the proportion of extreme precipitation caused by TC in July-September under the threshold (b. threshold is
 95%, c. threshold is 99%) during 1949–2019

在山东的中东部,沿海地区如青岛、威海等地区累
 计降水量最大。从时间上来看,8 月 TC 降水强度最
 大(图 5c),这与 8 月影响山东的 TC 数量较多有关。
 与 9 月(图 5d)相比,7 月 TC 降水范围明显向西部
 内陆扩展(图 5b),累计降水量也偏高。7、8 月,TC
 对山东的影响更为频繁,能对山东大部分区域的降
 水造成影响,因此下文将着重分析 7、8 月有利于 TC
 北上的大尺度环流场特征。

4 大尺度环流场特征

根据图 1 中影响山东的 TC 时间序列,将 TC 频
 数超过 ± 1.5 倍标准差的年份视为正负位相异常年。
 针对正负位相年的 7、8 月气象要素平均场进行合
 成,探究有利于 TC 北移影响中纬度地区的环流场
 特征。筛选出的正位相年有 8 年,分别为:1961、
 1962、1985、1994、1999、2012、2018 和 2019 年;
 负位相年有 6 年,分别为:1968、1983、1993、1998、2003

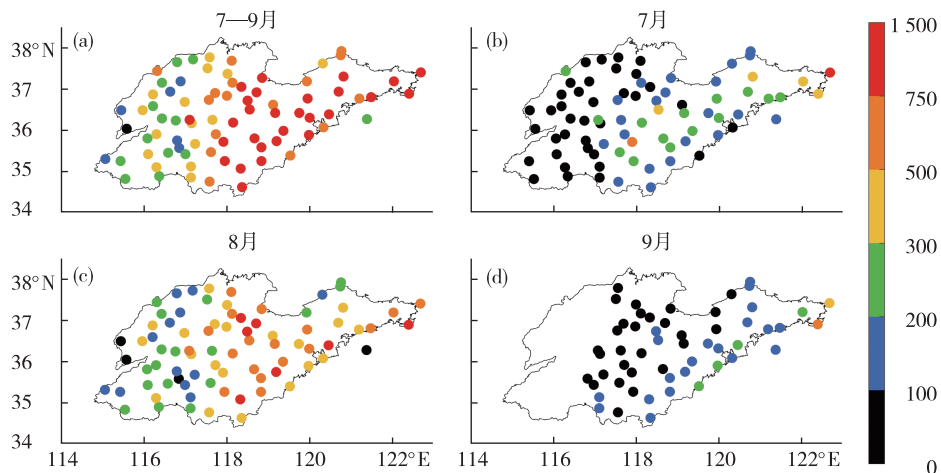


图 5 山东各月 TC 暴雨累计降水量(a. 7—9 月,b. 7 月,c. 8 月,d. 9 月;色阶,单位:mm)空间分布

Fig.5 The distribution of accumulated precipitation of heavy rain caused by TCs in Shandong during different periods (a. from July
 to September, b. July, c. August, d. September; color scale, units: mm)

和2013年。

4.1 对流层中层位势高度场

图6为正负位相年间的500 hPa位势高度距平场。从图上来看,在正位相年间(图6a),菲律宾以北有显著的位势高度负异常,日本及其以东洋面上位势高度增大,对应太平洋-日本(Pacific-Japan, PJ)遥相关型(以下简称“PJ波列”)^[15]。受PJ波列的影响,西北太平洋副热带高压(以下简称“副高”)北抬,其南侧的东风有利于TC向西移动,对华东地区造成影响。此外,受到副高外围气流的引导,TC多为转向型路径,更易北上影响中纬度地区。CHOI et al.^[16]指出当PJ波列呈正位相时,西北太平洋上会有更多的TC生成,TC的生成位置将向西北方移动,受异常环流系统的影响,TC更易北上且强度较强。负位相年间(图6b),东亚沿岸的位势高度异常中心呈经向型分布,自南向北呈“正-负-正”的形势分布,为东亚-太平洋(East Asia-Pacific, EAP)遥相关模态^[17]的负位相。此时的西太副高加强且西伸,所处位置偏南,华南地区受副高控制,因此负位相年间影响我国的TC数量偏少,少有转向型路径的TC出现,没有TC可以北上影响山东地区。

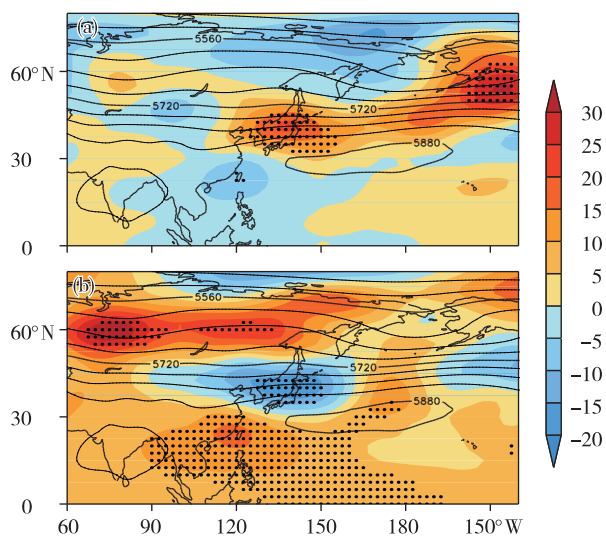


图6 正负位相下500 hPa位势高度距平合成场(色阶,单位:gpm)和气候平均态(等值线,单位:gpm)(a.正位相,b.负位相;黑色打点区域为通过95%显著性检验区域)

Fig.6 Geopotential height anomaly composites (color scale, units: gpm) and climate mean fields (contour, units: gpm) at 500 hPa during different phases (a. positive phase, b. negative phase; black dotted areas denote passing the significance test at 95% level)

4.2 对流层低层大气环流

结合850 hPa的流场(图7a)和涡度场(图7b)来看,正位相年间,日本东部出现有异常的反气旋式环流,对应副高的北抬。南海和西北太平洋上有异常的气旋式环流和涡度的正异常。受其影响该地区上升运动加强,对流活跃,有利于TC的形成、维持和加强,此时影响我国的TC频数可能会有所增大。TC的强度越强,其所持续的时间也就越久,北上影响山东的可能性也就越大。同时,副高西南侧存在涡度的正异常区。TC受副高外围气流的引导,易途经该涡度正异常区,可使TC强度加强。

负位相年间(图7c),东亚沿岸有异常波列出现,我国南部存在异常的反气旋式环流与西伸的副高相对应。此时,副高较强且位置偏南,受副高外围气流的引导,TC易呈西行路径,不易北上,主要对我国南部地区造成影响。日本上空存在有一个异常的气旋式环流,其西侧的偏北风阻碍TC向北移动,因此负位相年间几乎没有TC会北上影响山东。另外,南海和西北太平洋受异常反气旋的控制,对流活动减弱,不利于该区域TC的生成。同时出现在东南沿海和菲律宾以东洋面上的相对涡度负异常也阻碍了TC的发展和维持(图7d)。

4.3 高低空源汇场

由850 hPa和200 hPa的速度势和散度风场(图8)对比可知,以热带和副热带为热源热汇中心的大气源汇场均呈现出高低空相反的行星尺度环流特征。正位相年间(图8a、b),全球中低纬度大气环流呈现出南北半球反对称的超长波特征,大气的热源(辐散)热汇(辐合)异常中心向中纬度扩张。印度洋和太平洋间存在一个异常的大气环流。亚澳季风区的印度洋和东亚-西太平洋上空有东北-西南向的异常源、汇中心,东亚-西太平洋地区存在低空辐合高空辐散,上升运动加强,印度洋地区则为高空辐合低空辐散的下沉气流,有利于加强亚洲夏季风的季风环流,季风槽加强,有利于TC的生成和发展。

负位相年间(图8c、d),大气源汇场主要呈东西向海陆定常两波的分布特征,大气的热源(辐散)热汇(辐合)中心主要集中在赤道上空。热带太平洋中部存在异常的高空辐合、低空辐散,下沉运动增强,其两侧则为低空辐合高空辐散,加强了热带太平洋地区的沃克环流,季风环流减弱,不利于TC的生成和加强。此时TC的强度可能会偏弱,维持时间缩短,登陆后将迅速消散,不利于TC的北上进而

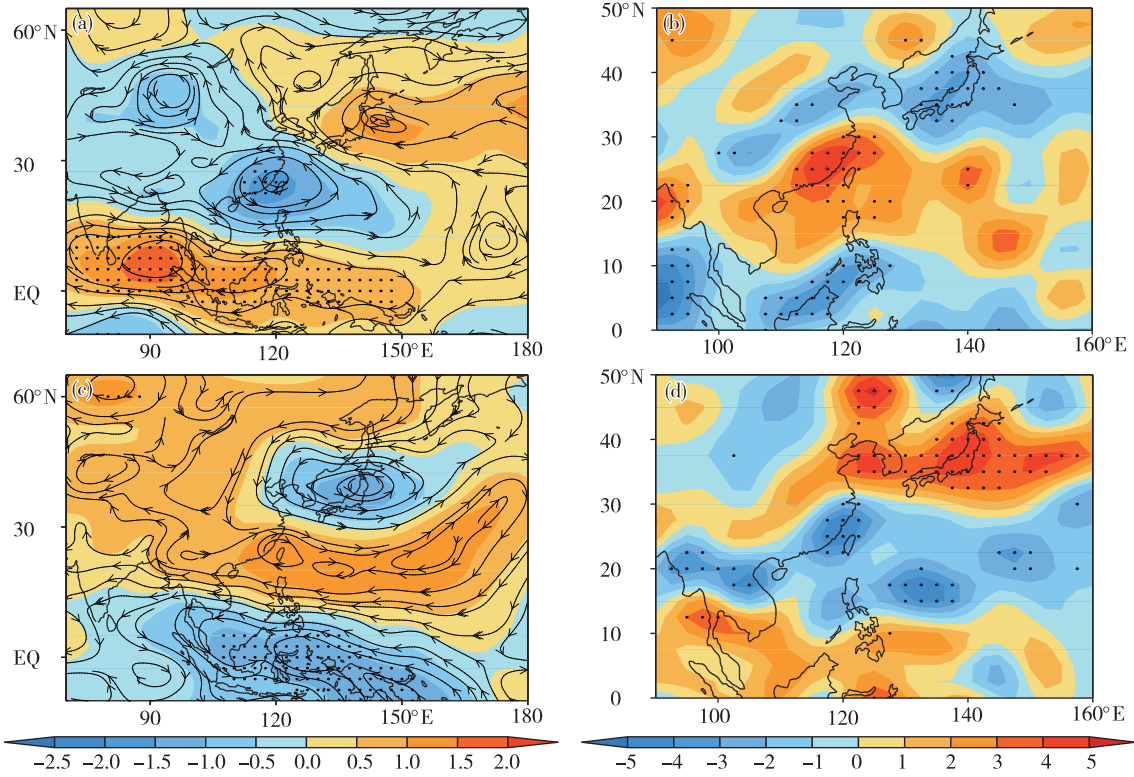


图 7 正负位相下流函数距平 (色阶, 单位: $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 和 850 hPa 旋度风 (a. 正位相, c. 负位相; 箭头) 以及 850 hPa 相对涡度距平 (b. 正位相, d. 负位相; 色阶, 单位: 10^{-6} s^{-1}) 合成场 (黑色打点区域为通过 95% 显著性检验区域)

Fig.7 Composites of stream function anomaly (color scale, units: $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) and vorticity wind anomaly at 850 hPa (a. positive phase, c. negative phase; arrow) and relative vorticity anomaly at 850 hPa (b. positive phase, d. negative phase; color scale, units: 10^{-6} s^{-1}) during different phases (black dotted areas denote passing the significance test at 95% level)

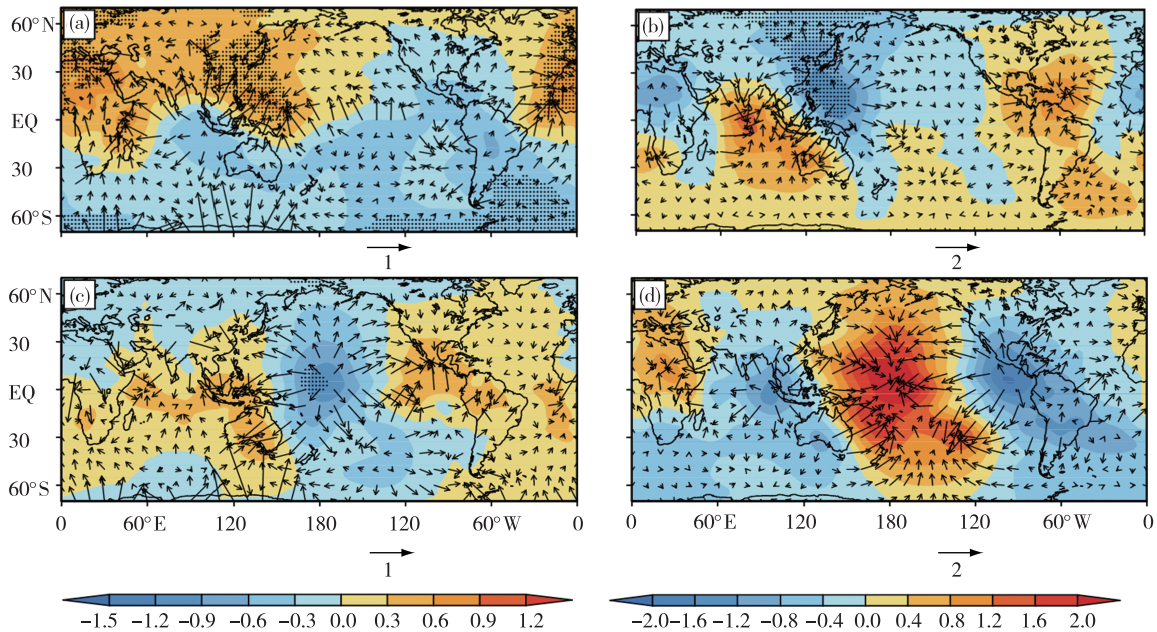


图 8 正负位相下 850 hPa (a. 正位相, c. 负位相) 和 200 hPa (b. 正位相, d. 负位相) 速度势 (色阶, 单位: $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 和散度风 (箭头, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 距平合成场 (黑色打点区域为通过 95% 显著性检验区域)

Fig.8 Composites of velocity potential (color scale, units: $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence wind (arrow, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) anomalies at 850 hPa (a. positive phase, c. negative phase) and 200 hPa (b. positive phase, d. negative phase) during different phases (black dotted areas denote passing the significance test at 95% level)

影响山东。

4.4 水汽输送

结合水汽通量异常场(图9a)来看,在TC频繁北上影响山东的年份里,华南上空出现异常的气旋式环流,对应季风槽的加强,其从孟加拉湾上带来大量水汽,在华南上空辐合。同时,副高西南侧的东南气流从西北太平洋上带来充沛的水汽,华东上空水汽条件良好,有利于TC的维持和发展。结合水汽通量的速度势场(图9c)来看,正位相年里,菲

律宾以东的洋面上有异常的水汽辐合,这些水汽主要来自于印度洋。西北太平洋上充沛的水汽为TC的形成与发展提供更有利的环境条件。负位相年间的水汽场则与正位相年的情况完全相反(图9b),在华南上空出现异常的反气旋式环流,季风槽减弱。此外,15°N一带存在异常向西的水汽输送,西北太平洋南部对应有水汽的辐散,TC生成源地的水汽条件变差,不利于TC的形成与发展。

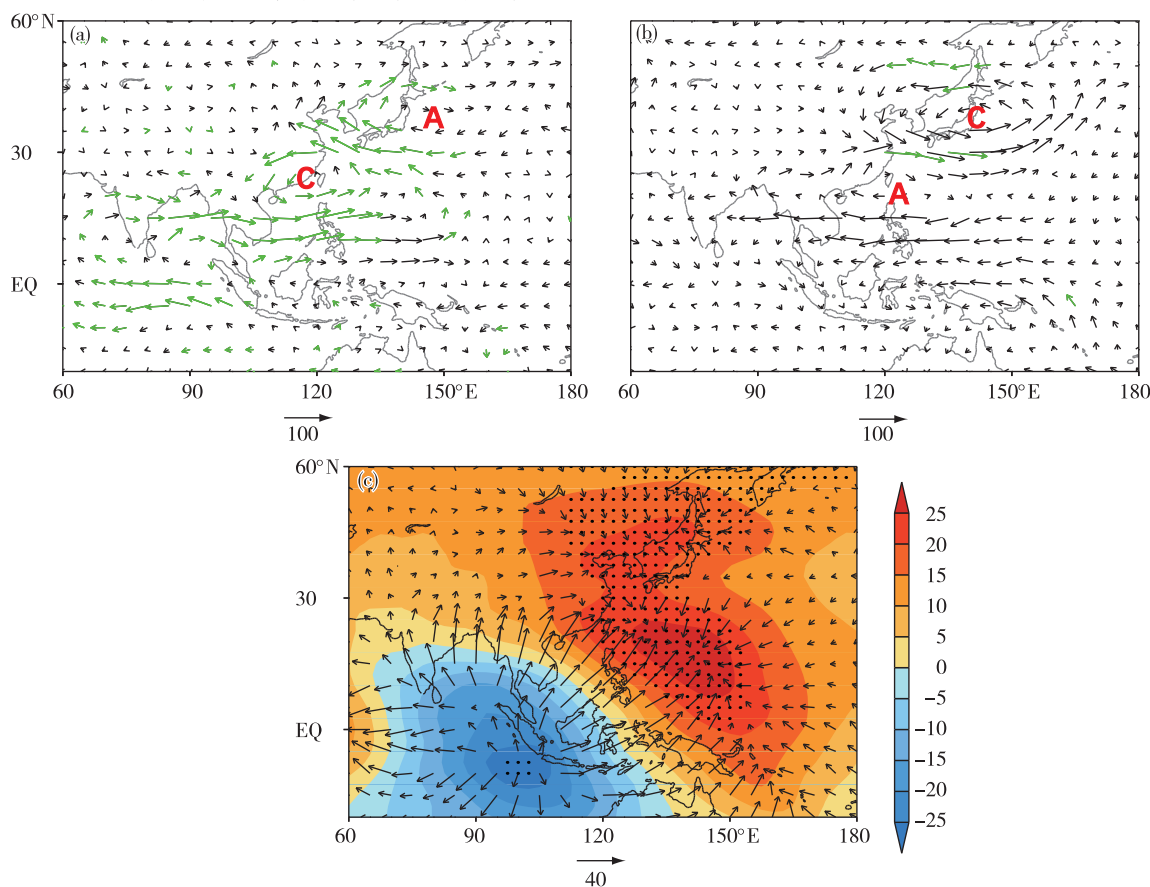


图9 正负位相下整层(地面至300 hPa)水汽通量异常场(a.正位相,b.负位相;箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;绿色箭头为通过90%显著性检验的区域)、正位相整层水汽通量速度势异常场(色阶,单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)和整层水汽通量异常散度分量(c;箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;黑色打点区域为通过95%显著性检验区域)

Fig.9 Composites of water vapor flux anomaly (a. positive phase, b. negative phase; arrow, units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; green arrows denote passing the significance test at 90% level) in the whole layer (from surface to 300 hPa) during different phases, potential function (color scale, units: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) and convergence and divergence (arrow, units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) of water vapor flux anomaly in the whole layer during the positive phase (black dotted areas denote passing the significance test at 95% level)

4.5 垂直风切变和高空急流

将200 hPa的风场减去850 hPa的风场,得到垂直风切变场。由垂直风切变的异常场(图10a、c)来看,正位相年里,东南沿海和东亚的中纬度地区存在垂直风切变的负异常,此时的环境场有利于TC的维持和加强。TC登陆我国后强度将得到维持,其

北移影响山东的概率增大。负位相年里,以上几个地区都出现了垂直风切变的异常增强,使得TC难以维持。途经我国的TC强度会大大衰减,迅速消散,其北上影响中纬度的可能性降低。

此外,正负位相年间的东亚西风急流也出现了明显的差异(图10b、d)。正位相年,西风急流出现

明显北移,气候态急流轴的南侧有 300 hPa 纬向风的减弱。纬向风减弱的区域与垂直风切变异常减少的区域相吻合。高空西风的减弱导致了垂直风切变的减弱,进而对 TC 活动造成影响。YU et al.^[18]指出当东亚西风急流所处位置偏北时,西北太

平洋上会存在有利于 TC 生成与发展的环境场,有异常的东风引导气流出现,利于更多 TC 西移在我国登陆。负位相年间,西风急流南移,东亚中纬上空纬向风加强,使得垂直风切变加强,不利于 TC 的维持。

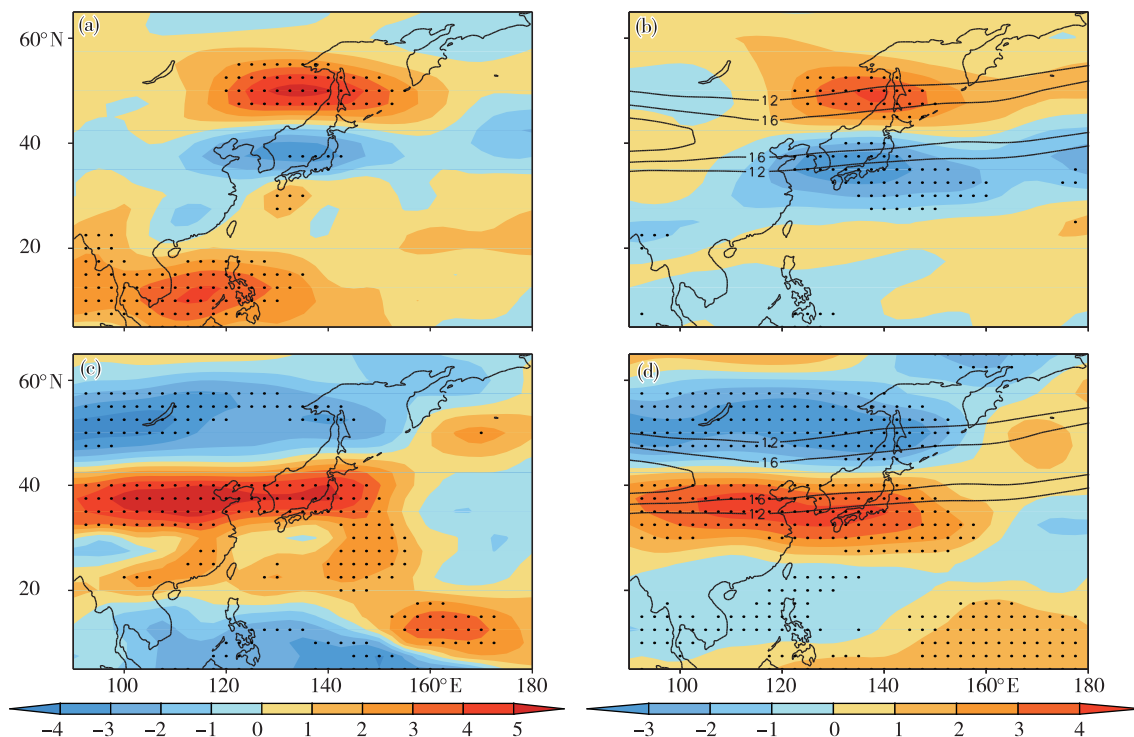


图 10 正负位相下 200 hPa—850 hPa 的垂直风切变异常场(a.正位相,c.负位相;色阶,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、300 hPa 纬向风距平场(色阶,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和气候态(b.正位相,d.负位相;等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(黑色打点区域为通过 95%显著性检验区域)

Fig. 10 Composites of vertical wind shear anomaly of 200 hPa—850 hPa (a. positive phase, c. negative phase; color scale, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 300 hPa zonal wind anomaly (color scale, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and climate state (b. positive phase, d. negative phase; contour, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) during different phases (black dotted areas denote passing the significance test at 95% level)

5 结论

本文使用了中国气象局热带气旋资料中心的 CMA 最佳路径数据集、NCEP/NCAR 的逐月再分析资料,对北上影响山东的 TC 进行统计,对其时空分布特征进行分析,初步揭示了有利于 TC 北移影响山东地区的环流场异常形势,得到的结论如下:

1) 影响山东的 TC 主要出现于 6—9 月,盛夏时节(7、8 月)影响山东的 TC 最多。TC 影响山东时,强度大多在台风及以下,或已发生变性。影响山东的 TC 主要生成于西北太平洋,多为转向型路径。

2) TC 对山东夏季降水有重要贡献,TC 降水在强极端降水事件中有着更高的比例,这表明 TC 常常会带来强度更强、灾害性更严重的极端降水。从

空间分布上来看,TC 暴雨主要出现在山东中东部和沿海地区。7、8 月降水强度更大、范围更广,向内陆扩展。

3) 7—8 月 500 hPa 位势高度距平场上东亚地区有 PJ 波列正位相、菲律宾以北地区存在异常的气旋式环流时,TC 更易北移影响山东。此时西北太平洋副热带高压位置偏北,受其外围气流引导,TC 易出现转向型路径对山东地区造成影响。850 hPa 上,南海和西北太平洋上空有异常气旋式环流,受其影响该地区对流活跃,有利于 TC 的形成与发展。此外,西北太平洋上空季风槽的增强,水汽辐合,有利于 TC 的维持与加强。同时华东华南上空有异常上升运动,涡度增大,垂直风切变减小,水汽充沛,TC 登陆后强度能得到较好的维持。负位相年间,

500 hPa 环流场呈 EAP 的负位相。副高位置偏南, 加强且西伸, TC 易呈西行路径, 主要对华南地区造成影响。850 hPa 上, 南海和西北太平洋受异常的反气旋式环流控制, 对流减弱, 不利于 TC 的生成。我国南部受副高控制, 涡度减小, 垂直风切变增大, 水汽条件较差, 季风槽减弱, 不利于 TC 的维持, 因此少有 TC 北上影响山东。

参考文献:

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-3.
- [2] 杨慧, 任福民, 杨明仁. 不同强度热带气旋对中国降水变化的影响[J]. 地球科学进展, 2019, 34(7): 747-756.
- [3] WANG L C, YANG Z N, GU X H, et al. Linkages between tropical cyclones and extreme precipitation over China and the role of ENSO[J]. *Int J Disaster Risk Sci*, 2020, 11(4): 538-553.
- [4] 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 台风远距离暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报, 2011, 27(2): 264-270.
- [5] 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 热带气旋远距离暴雨的研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 717-727.
- [6] 程正泉, 陈联寿, 刘燕, 等. 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, 2007, 18(4): 427-434.
- [7] 陈联寿, 许映龙. 中国台风特大暴雨综述[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 3-10.
- [8] 张希帆, 黄菲, 许士斌, 等. 弱台风影响下中国大暴雨事件发生频次的统计特征[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 11-18.
- [9] 孙兴池, 吴炜, 孙莎莎. 登陆北上山东台风暴雨非对称分布的成因对比分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 55-63.
- [10] 郑怡, 杨晓霞, 孙晶. 台风“温比亚”(1818)造成山东极端强降水的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 106-115.
- [11] 刘奕辰, 周伟灿, 常煜, 等. 山东半岛东海岸一次台风暴雨的成因研究[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1684-1695.
- [12] 周淑玲, 王科, 闫淑莲, 等. 山东半岛两次秋季台风远距离大暴雨的特征分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(2): 84-93.
- [13] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2014, 31(2): 287-301.
- [14] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38(4): 690-699.
- [15] NITTA T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1987, 65(3): 373-390.
- [16] CHOI K S, WU C C, CHA E J. Change of tropical cyclone activity by Pacific - Japan teleconnection pattern in the western North Pacific[J]. *J Geophys Res*, 2010, 115(D19114): 1-13.
- [17] HUANG R H, LI W J. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia [C]. *Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia*, Chengdu, 1987: 40-51.
- [18] YU J H, XUE H X, SONG J. Tropical cyclone potential hazard in Southeast China and its linkage with the East Asian westerly jet[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 2017, 53(2): 295-304.