

余锐,孙丽颖,周晓晔. 东亚夏季风对中国大陆夏季热带气旋降水的影响[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(3): 15–20.

YU Rui, SUN Liying, ZHOU Xiaoye. Impact of East Asian summer monsoon on summer tropical cyclone precipitation in mainland China[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(3): 15–20.

东亚夏季风对中国大陆夏季热带气旋降水的影响

余 锐¹, 孙丽颖², 周晓晔³

(1. 佛山市三水区气象局, 广东 佛山 528100; 2. 广州市增城区气象局, 广州 511300;

3. 安徽省气象台, 合肥 230031)

摘要: 利用中国大陆格点降水资料和热带气旋最佳路径数据集提取热带气旋降水, 在线性去除 ENSO 信号后, 研究东亚夏季风对中国大陆夏季热带气旋降水的影响。结果表明, 1979—2019 年, 中国大陆 6—8 月热带气旋降水与东亚夏季风指数呈现显著的正相关, 相关系数达到 0.53。东亚夏季风的减弱, 使得西北太平洋大部分海域对流层低层的正涡度和气旋环流增强、中层的湿度正异常和垂直上升运动增强、垂直风切变减弱, 有利于热带气旋的生成和发展; 同时, 在西北太平洋热带气旋的主要生成区对流层中层呈现气旋环流异常, 因此中国大陆沿海地区存在东风异常, 有利于引导热带气旋移向中国大陆, 使得中国大陆夏季热带气旋降水增加。研究结果说明东亚夏季风可通过调制影响热带气旋生成和路径的大尺度环境场, 进而与中国大陆夏季热带气旋降水的年际变化相联系。

关键词: 热带气旋; 降水; 东亚夏季风

中图分类号: P444

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.3.03

西北太平洋是全球热带气旋 (以下简称 TC) 最活跃的海域, 中国位于西北太平洋西北边缘, 在 TC 活跃季节经常受到 TC 的侵袭, 是全球受 TC 灾害影响最大的国家之一^[1]。此外, 热带气旋降水 (以下简称 TCP) 是许多沿海地区降水的主要组成部分^[2]。TCP 对中国东南部夏季降水的贡献率可达 20%~50%, 导致严重的洪涝灾害^[3-4]。Wang 等^[5]指出中国 TCP 空间分布呈现出明显的由内陆向沿海逐渐增强的特征。Gao 等^[6]发现近四十年中国南方地区 TCP 呈现显著增加趋势。

TCP 与 TC 的生成和移动路径密切相关。TC 生成由低层相对涡度、垂直风切变、海表温度等关键环境场所决定^[7], TC 移动路径主要受到引导气流的影响^[8-9]。这些环境条件受到许多气候因子的调制作用^[10-12]。

东亚季风是亚洲气候系统的重要组成部分, 中国地处东亚季风区, 夏季雨带位置和降水多少在很大程度上受夏季风调控。关于东亚季风对中国夏季

降水的影响, 前人已经做了大量的工作。以往研究主要集中在东亚夏季风对中国不同区域的降水总量、暴雨频次以及旱涝异常等的影响^[13-15], 但鲜有研究具体探讨其与影响中国的热带气旋及其产生的降水之间的关系。Choi 等^[16-17]研究指出东亚夏季风对西北太平洋 TC 活动有显著影响, 但研究中没有完全滤除 ENSO 信号, 并且只挑选了典型的年份做分析。

因此, 为了厘清东亚夏季风对中国大陆夏季 TCP 的调制作用, 本研究在去除 ENSO 信号的基础上, 从统计关系和物理机制两方面对两者关系进行探讨, 以期改进 TCP 预测和科学防灾减灾提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料

逐 6 h TC 资料取自中国气象局热带气旋资料中心的 CMA 最佳路径数据集^[18-19]。中国大陆格点日降水数据集来自中国气象局气象数据中心^[20], 基于

收稿日期: 2023-06-01

基金项目: 广东省气象局科学技术研究项目 (GRMC2021XQ16)、广州市气象学会科学技术研究项目 (Q202201)

第一作者简介: 余锐 (1993—), 男, 工程师, 主要从事灾害性天气研究工作。E-mail: meteoyr@163.com

质控后的台站降水数据通过薄板样条插值法得到,水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。利用英国气象局哈德来环流中心提供的月平均海温数据计算 Niño-3.4 区 ($5^\circ \text{S} \sim 5^\circ \text{N}, 170^\circ \sim 120^\circ \text{W}$) 的标准化海温距平作为 Niño-3.4 指数。风场、垂直速度、位势高度和相对湿度的月平均数据取自欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析资料,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。以上所有资料的时间跨度均为 1979—2019 年。

1.2 方法

TCP 即为 TC 有效半径范围内的降水,通常取 800~1000 km 作为 TC 有效半径 [4-5,21-23]。本文参考 Wang 等 [5,23] 的方案,选取 8° (888 km) 作为 TC 有效降水半径,同时也用其他有效半径做了对比分析,得到的结果虽然在细节上有些许差异,但大体上基本一致。TCP 识别方法首先考虑 TC 影响范围随 TC 中心移动发生变化,统计一天内落入 TC 有效范围内的格点日降水量,尽管逐 6 h TC 资料与逐日降水资料之间的不匹配可能会导致一天内某个时段的降水被误认为 TCP,但受 TC 影响时 TCP 是格点日降水量的重要组成,且对于长时间序列统计分析而言,其中的误差可以忽略不计,因此这种算法在气候尺度的研究是可行的。此外,考虑可能有多个 TC 会在同一格点上产生降水,统计时避免重复累加,因此每个格点每天只有一个 TCP 值。中国大陆夏季 TCP 定义为 6—8 月中国大陆各格点 TCP 的总和。

本研究使用的东亚夏季风指数 (East Asian summer monsoon index, $EASMI$) 由李建平和曾庆存 [24] 提出的动态标准化变率指数来定义,动态标准化变率指数计算公式如下:

$$\delta_{nm} = \frac{\|\bar{\mathbf{V}}_1 - \mathbf{V}_{nm}\|}{\|\bar{\mathbf{V}}\|} - 2 \quad (1)$$

式中, $\bar{\mathbf{V}}_1$ 为 1 月气候平均风矢量, $\bar{\mathbf{V}}$ 为 1 月和 7 月气候平均风矢量的平均, \mathbf{V}_{nm} 为第 m 年第 n 月的月平均风矢量。以东亚季风区 ($10^\circ \sim 40^\circ \text{N}, 110^\circ \sim 140^\circ \text{E}$) 850hPa 夏季 (6—8 月) 区域平均动态标准化变率指数作为 $EASMI$, 根据文献定义, $EASMI$ 值越大意味着东亚夏季风越弱。

作为热带地区最显著的年际信号, ENSO 对 TC 生成位置、强度和路径都有重要调制作用 [25-27], 同时 ENSO 也会使得东亚夏季风强度发生变化 [28-29], 因此研究前必须去除 ENSO 信号的影响。某一特定年份可能既为东亚夏季风典型年又为 ENSO 典型年, 如

果从研究年份中直接剔除 ENSO 典型年, 不仅去除 ENSO 信号, 也可能去除部分东亚夏季风信号。为了确保研究结果的可靠性, 利用公式 (2) 对 $EASMI$ 中可能存在的 ENSO 信号进行线性去除:

$$A_{\text{res}} = A - rc(A, B) \times B \quad (2)$$

式中, A 表示由前文动态标准化变率指数计算得到的 $EASMI$, B 表示夏季平均 Niño-3.4 指数, $rc(A, B)$ 表示回归系数, A_{res} 表示去除 ENSO 信号后的残差项 (即用于后续研究的 $EASMI_{\text{res}}$)。

2 结果与分析

2.1 东亚夏季风与中国大陆夏季 TCP 的关系

$EASMI_{\text{res}}$ 与中国大陆夏季 TCP 的回归场, 可以看出随着 $EASMI_{\text{res}}$ 增大 (东亚夏季风减弱), 中国东南沿海夏季 TCP 一致增多, 大值区主要分布在浙江、广东、海南等地。通过比较 $EASMI_{\text{res}}$ 与中国大陆夏季 TCP 的年际变化 (图 1), 可以看出 $EASMI_{\text{res}}$ 与 TCP 的时间序列呈现显著正相关, 相关系数达到了 0.53, 通过了显著性水平 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 即夏季 TCP 总量随着东亚夏季风减弱而明显增多。需要注意的是, 在未去除 ENSO 信号的情况下, $EASMI$ 与 TCP 的相关系数相对较小 (0.50), 这表明东亚夏季风对 TCP 的调制的确受到 ENSO 的干扰, 因此在研究中必须消除 ENSO 的影响。

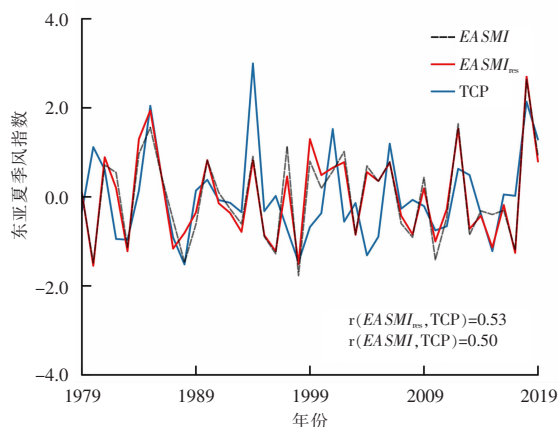


图 1 $EASMI$ 、 $EASMI_{\text{res}}$ 和中国大陆夏季 TCP 的标准化时间序列

前面利用回归分析的方法可以得到 TCP 随东亚夏季风的总体变化规律, 为了进一步验证东亚夏季风对 TCP 的影响并排除 ENSO 的干扰, 挑选东亚夏季风强弱典型年份进行对比。以 0.8 个标准差为阈值, 利用 $EASMI_{\text{res}}$ 和 Niño-3.4 指数的标准化时间

序列分别划分东亚夏季风强弱年、El Niño 事件和 La Niña 事件, 并从东亚夏季风强弱典型年份中排除 ENSO 典型年份, 得到 7 个东亚夏季风偏强年 (1980、1983、1995、1996、2003、2008、2017) 和 5 个东亚夏季风偏弱年 (1981、1990、1994、2012、2018)。表 1 给出了中国大陆夏季降水在东亚夏季风强弱典型

年份间的差异。可以看出, 中国大陆夏季降水总量在东亚夏季风强弱年差别不大, 但是东亚夏季风偏弱年的 TCP 约为偏强年的 2 倍, 并且东亚夏季风偏弱年的 TCP 占夏季降水总量的比例也明显偏大。这些都说明东亚夏季风对中国大陆夏季 TCP 有显著影响。

表 1 东亚夏季风强弱典型年份夏季降水总量和 TCP 年平均值以及两者之比

	夏季降水总量/mm	TCP/mm	TCP 占夏季降水的比例/%
东亚夏季风偏弱年	331.04	36.26	10.95
东亚夏季风偏强年	329.45	17.82	5.41

2.2 物理机制分析

Wang 等^[5,23]的研究表明, TCP 主要取决于 TC 的活动频数, 而 TC 的活动频数又取决于 TC 生成位置和路径。为了进一步探讨东亚夏季风与 TCP 之间的关系, 考察大气环流异常对东亚夏季风强度变化的响应及其对西北太平洋 TC 生成和路径的调制作用。图 2 为 $EASMI_{res}$ 与影响 TC 生成和路径的各物理量标准化距平的回归场。

晰负正负三极型分布, 即从黄海到日本以东为负涡度异常, 从南海到台湾以东为正异常, 北半球近赤道区域为负异常。中层相对湿度异常与涡度异常有着相似的分布, 但湿度正异常区域略大于涡度正异常区域 (图 2a), 中层水汽含量增大可以促进积云对流的发展, 有利于凝结潜热的释放, 为 TC 生成和发展提供能量。西北太平洋大部分海域的中层垂直速度为负异常, 表示有强烈的上升运动。200 hPa 与 850 hPa 的垂直风切变在菲律宾附近表现为正异常, 在

对流层低层绝对涡度异常从低纬到高纬呈现清

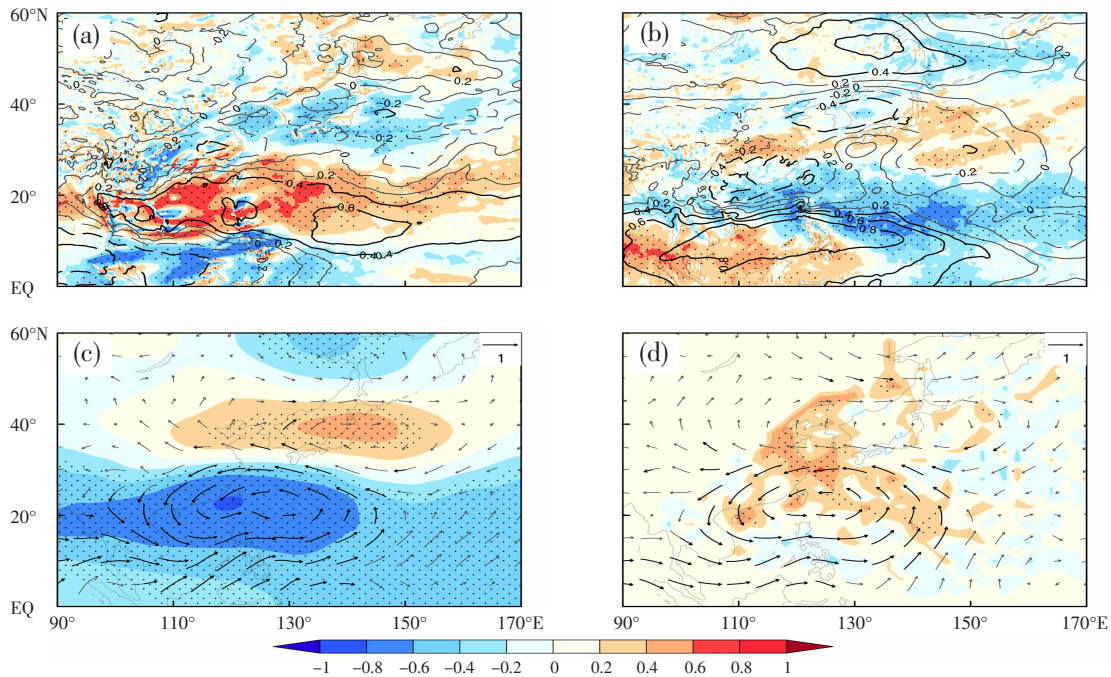


图 2 $EASMI_{res}$ 与各物理量标准化距平的回归分布

(a) 850 hPa 绝对涡度 (阴影) 和 600 hPa 相对湿度 (等值线); (b) 500 hPa 垂直速度 (阴影) 和 200 hPa 与 850 hPa 的垂直风切变 (等值线); (c) 500 hPa 位势高度 (阴影) 和 850 hPa 风场 (箭头); (d) TC 活动频数 (阴影) 和 500 hPa 风场 (箭头)。

线条或箭头加粗以及阴影打点的区域表示通过了显著性水平 $\alpha=0.05$ 的显著性检验

东亚东部区域表现为负异常(图 2b),弱的垂直风切变有利于凝结潜热的聚集和暖心结构的维持。此外,随着东亚夏季风减弱西北太平洋季风槽加强东伸,从中国南方一直延伸至 150°E 附近,西北太平洋上空对流层低层受明显的异常气旋环流控制(图 2c)。这些物理量场相互配合,有利于西北太平洋上空对流活跃,为 TC 的生成和发展创造了非常有利的环境条件。

在此基础上,进一步分析引导 TC 移动的对流层中层流场。从图 2c 可以看出,西北太平洋 TC 主要生成区上空对流层低层的异常气旋与中层的位势高度负异常相耦合,说明西太平洋副热带高压减弱。这种位势高度异常是造成对流层中层大尺度引导气流异常的主要原因,它在很大程度上调制了 TC 的移动路径^[30]。如图 2d 所示,对流层中层,东亚中纬度地区以日本附近海域为中心的反气旋环流增强,中国南海至西北太平洋西部的气旋环流增强,中国东南部及其以东广大地区上空受异常东风气流控制,引导 TC 向中国东南部移动。

利用 CMA 最佳路径数据集插值计算了 2°×2° 网格的平均 TC 活动频数如图 2d 所示,频数越大表明经过该点的 TC 越多。从图中可以看出,由于西北太平洋环境场特征有利于 TC 生成,并在引导气流的作用下西移,而且移动所经海域的环境因素有利于 TC 的发展维持不至于减弱消亡,因此夏季 TC 活动频数(综合了 TC 的生成和路径)在中国东南沿海及其以东地区呈现明显的正异常,表明 TC 在该处活动频繁,有利于中国大陆夏季 TCP 的增多。

3 结论

1979—2019 年,中国大陆夏季 TCP 受到东亚夏季风的显著调制,TCP 与 EASMI_{res} 的相关系数达到 0.53,通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,东亚夏季风的减弱使得中国东南沿海 TCP 一致增多。

东亚夏季风减弱年份,在西北太平洋上空,对流层低层涡度异常表现为经向三极模态,其中南海中部至台湾东部为正异常,与正涡度异常相匹配的是中层的湿度正异常和强烈的上升运动,东亚东部上空为垂直风切变的负异常,并且 TC 主要生成区受到异常气旋环流控制,有利于 TC 的生成和发展。对流层中层异常的东风气流在中国东南部及其以东地区盛行,有利于 TC 向中国东南部移动。因此,综合 TC 生成和移动的 TC 活动频数在中国东南部地区呈

现出明显的正异常,使得中国大陆夏季 TCP 增多。

参考文献:

- [1] PEDUZZI P, CHATENOUX B, DAO H, et al. Global trends in tropical cyclone risk[J]. *Nature climate change*, 2012, 2(4): 289–294.
- [2] REN F, WU G, DONG W, et al. Changes in tropical cyclone precipitation over China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(20).
- [3] 刘通易, 吴立广, 张娇艳, 等. 1965—2010 年 7—9 月影响中国的热带气旋降水变化趋势分析[J]. *气象学报*, 2013, 71(1): 63–75.
- [4] LI R C Y, ZHOU W. Interdecadal changes in summertime tropical cyclone precipitation over southeast China during 1960–2009[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(4): 1494–1509.
- [5] WANG L, CHEN J, WU L. Impact of winter SST anomaly in tropical Eastern Pacific on following summer tropical cyclone precipitation in China [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(2): 739–749.
- [6] GAO S, MAO J, ZHANG W, et al. Atmospheric moisture shapes increasing tropical cyclone precipitation in southern China over the past four decades [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(3): 034004.
- [7] GRAY W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. *Monthly Weather Review*, 1968, 96(10): 669–700.
- [8] HO C H, BAIK J J, KIM J H, et al. Interdecadal changes in summertime typhoon tracks[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(9): 1767–1776.
- [9] CHOI K S, CHA Y, KIM H D, et al. Possible influence of western North Pacific monsoon on TC activity in mid-latitudes of East Asia[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(1): 1–13.
- [10] 冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展[J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 364–382.
- [11] 武亮, 张宏杰, 冯涛, 等. 热带气旋与多尺度气候变异: 2018 年西北太平洋台风季概况[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(5): 581–592.
- [12] YU R, GAO S, SUN L, et al. Multiscale mechanisms for the modulation of the Pacific Meridional Mode on tropical cyclone genesis over the western North Pacific: a comparison between 2004 and 2011[J]. *Climate Dynamics*, 2022, 60(11–12): 3241–3259.
- [13] 陈发虎, 陈婕, 黄伟. 东亚夏季风减弱诱发我国西北干旱区降水增加[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(5): 824–826.

- [14] 黄玉霞, 王宝鉴, 王研峰, 等. 东亚夏季风的变化特征及其对甘肃夏季暴雨日数的影响[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 140–147.
- [15] 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 629–643.
- [16] CHOI K S, CHA Y, KIM H D, et al. Possible relationship between East Asian summer monsoon and western North Pacific tropical cyclone genesis frequency[J]. Theoretical and applied climatology, 2016, 124(1): 81–90.
- [17] CHOI J W, CHA Y, KIM J Y. Change in the tropical cyclone activity around Korea by the East Asian summer monsoon[J]. Geoscience Letters, 2017, 4(1): 1–14.
- [18] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287–301.
- [19] LU X, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690–699.
- [20] 赵煜飞, 朱江, 许艳. 近 50a 中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 414–420.
- [21] KUBOTA H, WANG B. How much do tropical cyclones affect seasonal and interannual rainfall variability over the western North Pacific? [J]. Journal of Climate, 2009, 22(20): 5495–5510.
- [22] WU X, ZHU Q, WANG C, et al. Contribution of Winter SSTA in the Tropical Eastern Pacific to Changes of Tropical Cyclone Precipitation over Southeast China[J]. Journal of Meteorological Research, 2022, 36(2): 282–291.
- [23] WANG L, WANG L, CHEN W, et al. Modulation of winter precipitation associated with tropical cyclone of the western North Pacific by the stratospheric Quasi-Biennial oscillation[J]. Environmental Research Letters, 2021(16): 5.
- [24] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系[J]. 气候与环境研究, 2005(3): 73–87.
- [25] WANG B, CHAN J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific[J]. Journal of climate, 2002, 15(13): 1643–1658.
- [26] WU M C, CHANG W L, LEUNG W M. Impacts of El Niño–Southern Oscillation events on tropical cyclone land-falling activity in the western North Pacific[J]. Journal of Climate, 2004, 17(6): 1419–1428.
- [27] CAMARGO S J, SOBEL A H. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO[J]. Journal of climate, 2005, 18(15): 2996–3006.
- [28] 冯晓伟, 孙照渤. ENSO 对东亚夏季风强度的影响[J]. 大气科学学报, 1998(2): 196–200.
- [29] 邢辰, 孔瑜, 刘飞, 等. 重建与模拟中过去 500 年厄尔尼诺和东亚夏季风关系的年代际变化[J]. 第四纪研究, 2021, 41(2): 486–496.
- [30] CHAN J C L, GRAY W M. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships[J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(10): 1354–1374.

Impact of East Asian summer monsoon on summer tropical cyclone precipitation in mainland China

YU Rui¹, SUN Liying², ZHOU Xiaoye³

(1. Sanshui Meteorological Bureau, Guangdong Foshan 528100, China; 2. Zengcheng Meteorological Bureau, Guangzhou 511300, China; 3. Anhui Meteorology Observatory, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on the grid-point precipitation data and the best track dataset of tropical cyclones, this study extracts the tropical cyclone precipitation (TCP) in mainland China and reveals a significant effect of the East Asian summer monsoon on the TCP in mainland China after removing El Niño Southern Oscillation (ENSO) signals. The results show that during the period 1979–2019, the TCP in mainland China from June to August shows a significant positive correlation of 0.53 with the East Asian summer monsoon index. The weakening of the East Asian summer monsoon has resulted in the enhancement of the positive vorticity and cyclonic circulation in the lower troposphere, positive moisture anomalies in the middle layer, and vertical upward motion, and the weakening of the vertical wind shear over most of the NW Pacific, which is favorable to the generation and development of tropical cyclones. Meanwhile, there is an anomalous mid-tropospheric cyclone over the main TC genesis region in the Northwestern Pacific ocean, meaning that an easterly anomaly dominates the coastal regions of mainland China, which is favorable for TC movement towards mainland China, resulting in an increase in the summer TCP in mainland China. Therefore, by modulating the large-scale environmental fields which affects the frequency of TC genesis and TC track, the East Asian summer monsoon can be connected with the interannual variation of the summer TCP in mainland China.

Key words: tropical cyclone; precipitation; East Asian summer monsoon