

中南半岛夏季逐月降水年际变化的差异性特征分析

霍佳楠¹, 任保华¹, 李超凡^{2*}, 周星妍³, 宋天元⁴

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

3 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

4 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030

* 通讯作者: lichaoan@mail.iap.ac.cn

摘要: 本文主要研究了 1979–2019 年中南半岛夏季 (6–9 月) 逐月降水的年际变化, 发现不同月份降水呈现出明显的相互独立性。尽管夏季各月降水均受到来自热带太平洋的东风异常和来自印度洋的西风异常的共同影响, 但各月引起这些环流异常的因子却明显不同。结果表明, 热带西印度洋海温异常显著影响中南半岛 6 月降水, 它通过影响辐合辐散环流来调节中南半岛附近的垂直运动, 从而导致中南半岛降水异常。7 月中南半岛降水与前冬热带中东太平洋地区海温异常联系紧密, 前冬海温通过影响西北太平洋副热带高压活动来调节中南半岛降水。而 8 月降水主要受到同期热带西太平洋和海洋性大陆附近东西偶极型海温异常的影响, 这些海温异常会通过引起局地 Hadley 环流异常和 Rossby 波来调节中南半岛降水。相对而言, 9 月没有对应明显的热带大尺度海温信号, 但中南半岛的降水主要受到台风活动的重要影响, 尤其是其东部沿海地区。本研究有助于深入认识中南半岛夏季各月降水年际变率, 为中南半岛夏季降水气候预测提供科学参考。

关键词: 中南半岛; 降水; 年际变化; 热带海气相互作用; 环流异常

文章编号 2024031C

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2405.24031

Different characteristics of the interannual variation in summer monthly precipitation over the Indochina Peninsula

Huo Jianan¹, Ren Baohua¹, Li Chaofan^{2,*}, Zhou Xingyan³, Song Tianyuan⁴

收稿日期 2024-03-21 网络预出版日期

作者简介 霍佳楠, 男, 2000 年 2 月出生, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究, E-mail: huojn@mail.ustc.edu.cn

通讯作者 李超凡 E-mail: lichaoan@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42275036, 云南大学“双一流”建设专项项目

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42275036), Special Fund of the Yunnan University “Double First-Class” Construction

1 School of Earth and Space, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

2 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of
Sciences, Beijing 100029

3 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030

* Correspondence: lichaoan@mail.iap.ac.cn

Abstract This study focuses on the interannual variation of monthly precipitation in summer (June to September) over the Indochina Peninsula from 1979 to 2019, and finds that the precipitation in different months is obviously independent of each other. Although the summer monthly precipitation is generally affected by the easterly anomalies from the tropical Pacific Ocean and the westerly anomalies from the Indian Ocean, the regulatory factors causing these circulation anomalies are obviously different. The results show that the tropical west Indian Ocean SST anomalies largely modulate the precipitation in June over the Indochina Peninsula. They regulate the vertical movement near the Indochina Peninsula by influencing the convergence and divergence circulation, and result in precipitation anomalies in the Indochina Peninsula. In July, the precipitation over the Indochina Peninsula is closely related to the SST anomalies in the tropical central and eastern Pacific region in the previous winter, which regulate the precipitation by influencing the northwest Pacific subtropical high activities. In addition, the precipitation in August is mainly affected by the simultaneous east-west dipole SST anomalies around the tropical western Pacific and Maritime Continent. These SST anomalies can regulate the precipitation in the Indochina Peninsula through local Hadley circulation anomalies and Rossby waves. Relatively, there isn't a notably significant large-scale tropical SST signal related to precipitation in the Indochina Peninsula in September. However, it is significantly affected by typhoon activities, particularly along its eastern coastal areas. This study is helpful to further understand the interannual variation of summer monthly precipitation in the Indochina Peninsula, and provides scientific reference for the summer precipitation climate forecast in the Indochina Peninsula.

Keywords: Indochina Peninsula; Precipitation; Interannual variation; Tropical air-sea interaction; Circulation anomaly

1 引言

中南半岛（ICP）绝大部分位于北纬 10°–20° 之间，处于东亚季风和南亚季风的交界面上（Cao et al. 2012; Nguyen et al., 2019），具有复杂的气候特征，是亚洲天气气候和季风的一个关键区（Yang et al., 2020）。受季风环流的影响（Yang et al., 2019），中南半岛降水主要集中在西海岸和东海岸附近，其降水变化对当地农业、经济、社会和生态系统等产生了显

著影响（施闯等, 2020; Qiu et al., 2021）。例如, 2011 年夏季, 由于受到来自东亚强季风的影响, 泰国发生了过去 50 年来最严重的洪涝灾害, 造成 800 多人死亡, 1360 万人受灾以及前所未有的经济损失（Promchote et al., 2016）。

近年来, 一些研究表明中南半岛夏季降水具有显著的年际变化。Ge et al. (2017) 研究了中南半岛夏季降水时空分布, 发现该地区降水主导模态呈现一致变化的特征。Hu et al. (2022) 发现南海夏季风爆发可以显著地影响东南亚地区 5 月的极端降水频率。Shi et al. (2022) 发现中南半岛早夏和盛夏降水的变化与中亚和中国中部的降水呈现反相关关系。另外, Leung et al. (2020) 专门强调了中南半岛 6 月降水与华南地区同期降水的反相关关系, 并强调了热带西印度洋海温对西太平洋地区环流的调控是二者反相关关系的重要来源。

中南半岛夏季降水年际变率受多种因子, 包括绕球遥相关、太平洋-日本型遥相关及热带海温异常（印度洋、太平洋、大西洋）等的影响（Deng et al., 2016; Ge et al., 2017; Yang et al., 2020; Leung et al., 2020; Ge et al., 2021; Dong et al. 2023; Hu et al. 2024）。其中, ENSO 事件是影响中南半岛降水最主要的因素之一, 其发展和衰退位相均会导致中南半岛降水异常（Nguyen-Le et al., 2015; Ge et al., 2017; Nguyen et al., 2019）。前冬拉尼娜可以通过 Walker 环流引起热带西太平洋的对流系统增强, 从而导致海洋大陆地区和中南半岛的雨季降水偏高（Zhang et al., 2002; Nguyen et al., 2019; Chhin et al., 2020; You et al., 2021）。另外, 中南半岛夏季降水变化还会受到来自热带印度洋海温强迫响应的影响（Yang et al., 2020; Ge et al., 2021）。Gao et al. (2019) 指出中南半岛的极端干旱与印度洋偶极子模态（IOD）有很大的关系, 研究提到在 IOD 正年份, 越南的极端干旱频率有所降低, 而老挝中部、柬埔寨、缅甸海沿岸的干旱却加剧。此外, 中南半岛雨季降水变化, 特别是 8-9 月, 从南海、菲律宾海域和西热带太平洋向西移动的热带气旋等过程有关（Zhang et al., 2002; Takahashi et al., 2006; Yang et al., 2020; Chen et al., 2023）。

上述研究表明中南半岛夏季降水的年际变率显著且受到多种因子的综合影响。然而大多数研究成果主要聚焦整个夏季降水年际变化和影响因子, 我们发现, 夏季各月降水的年际变化存在显著差异, 需要分月单独研究。因此, 中南半岛夏季不同月份降水年际变化特征和其调控因子具体如何? 针对这一问题, 本研究将围绕中南半岛夏季降水, 基于常规的观测和再分析资料, 分别分析夏季各月降水的年际变化特征, 探究影响各月降水年际变化的主要因素及潜在机制, 以揭示夏季各月降水年际变化存在差异的可能原因。第 2 节介绍了本文所使用的数据及方法; 第 3 节讨论了中南半岛夏季逐月降水的年际变化特征和影响各月降水的调控因子及潜在机制; 最后, 第 4 节总结了主要研究结果, 并讨论了一些尚待解决的问题。

2 数据与方法

2.1 数据

本研究使用的数据包括: (1) 全球降水气候中心 (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC) 陆地降水数据集 (Shi et al., 2022), 水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。该数据相对于英国东安格利亚大学 (UEA) 气候研究机构 (Climatic Research Unit, CRU) 的降水资料 (Harris et

al., 2014), 能够更准确刻画复杂地形下的降水变化特征(王芬等, 2013; 王丹等, 2017; 马帅等, 2022), 更接近站点实际情况; (2) 全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP) 降水数据集(Su et al., 2014), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; (3) 美国国家海洋和大气管理局(NOAA) 提供的海表温度重建数据第五版(ERSST v5) 的全球月平均数据(Huang et al., 2017), 水平分辨率为 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$; (4) 美国国家环境预测中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR) 全球逐月再分析数据集(Chen et al., 2002), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。(5) 联合台风预警中心(JTWC) 台风数据集, 每隔 6 小时一次(Zhou et al., 2019)。由于 GPCC 数据集的降水数据只更新到 2019 年, 因此本研究选择的研究时间段为 1979 年到 2019 年。

2.2 方法

本研究主要利用相关分析、回归分析、合成分析等方法探讨与中南半岛夏季逐月降水相关的大气环流和海温场异常。另外, 在检验相关分析、回归分析、合成分析等统计显著性时考虑了有效自由度, 均采用 t 检验进行显著性分析。

3 结果

3.1 中南半岛夏季逐月降水的年际变化特征

本文研究区域为中南半岛地区(9° – 21° N, 97° – 110° E), 如图 1a 黑色框所示。图 1b 为中南半岛逐月气候态平均降水。可以看出, 该地区降水从 5 月开始显著增加, 8 月达到峰值, 然后逐月减少。6 到 9 月, 中南半岛的降水量最大, 每月平均降水均超过 250mm, 分别为 267mm (6 月)、304mm (7 月)、339mm (8 月)、306mm (9 月)。6–9 月总降水量占全年总降水一半以上, 为 62.6%。此外, 中南半岛 6–9 月降水的年际变率也较大, 分别为 35mm、51mm、45mm 和 51mm。相对而言, 冬季的年际变率也相对较大, 此时中南半岛正值旱季, 降水偏少, 变化幅度因此相对较大。因此, 本文选取降水偏多的 6–9 月作为夏季, 研究中南半岛夏季逐月降水的年际变化。从 1979–2019 年 6–9 月平均降水的空间分布看(图 1a), 降水大值区主要分布在中南半岛西海岸和东海岸山脉的迎风坡地区, 包括比劳山脉和安南山脉地区。其中, 西海岸夏季平均降水高达 800mm 以上, 说明了中南半岛夏季降水分布受到地形的影响(Faikruea et al., 2020)。

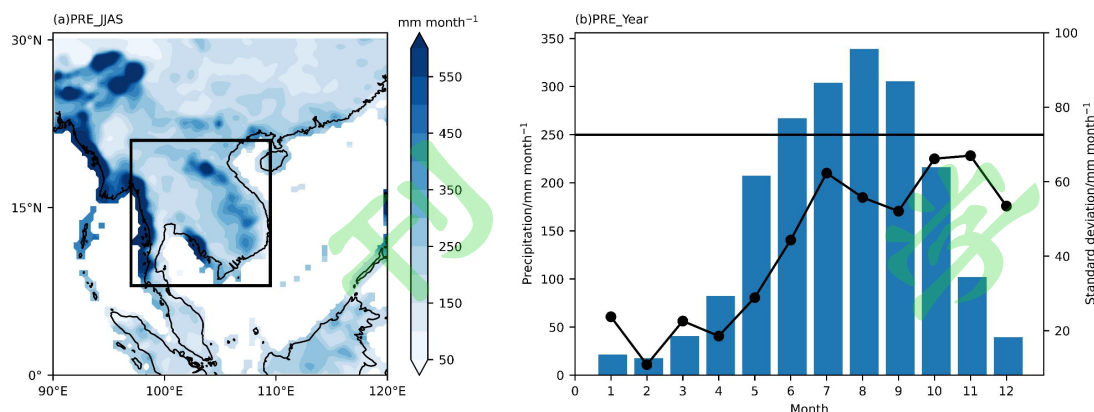


图 1 (a) 1979–2019 年中南半岛夏季平均降水的空间分布图 (单位: mm month^{-1}), 黑色方框表示研究区域 (9° – 21°N , 97° – 110°E); (b) 全年逐月平均降水 (柱状图) 和年际标准差 (实线) (单位: mm month^{-1})。Figure 1. (a) Spatial distribution of summer average precipitation in the ICP from 1979 to 2019 (unit: mm month^{-1}). The black box indicates the study area (9° – 21°N , 97° – 110°E); (b) Monthly average precipitation (bar chart) and interannual standard deviation (solid line) over years of 1979 to 2019 (unit: mm month^{-1}).

图 2 为 1979–2019 年中南半岛夏季 (6–9 月) 及其各月降水指数的标准化时间序列。其中, 中南半岛降水指数 (ICPPI) 统一定义为整个区域 (如图 1a) 平均的降水。从图中可以看出中南半岛夏季降水呈现出显著的年际变化特征, 年际变率为 52mm 。其中各月的年际变率也很明显, 在 $35\sim 51\text{mm}$ 之间。但夏季各月降水年际变化却不一致, 例如, 2019 年中南半岛夏季平均降水和 9 月降水异常较小, 但 6 月和 7 月降水明显偏少, 而 8 月的降水则偏多, 降水量高达 450mm 以上, 接近 3 个年际标准差。为验证夏季各月降水年际变化之间的差异, 我们进一步计算了夏季及其各月降水之间的相关系数 (表 1), 发现各月降水之间相关系数的绝对值均未通过信度检验 ($r < 0.15$), 表现出明显的相互独立性。此外, 7 月和 8 月与整个夏季的相关性较高, 超过了 0.5, 通过 99% 的信度检验, 说明这两个月对夏季降水的贡献率相对较大。

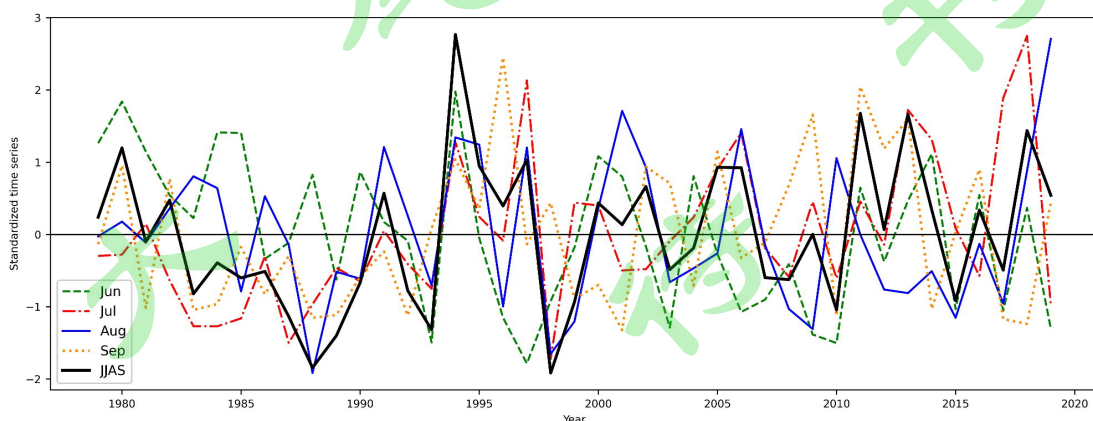


图 2 1979–2019 年中南半岛夏季及其各月平均降水的标准化时间序列。

Figure 2. Standardized time series of the ICP average precipitation in summer and each month of June - September from 1979 to 2019.

表1 中南半岛夏季（6-9月）及其各月平均降水逐年变化的相关系数（*、**分别表示通过了95%和99%的置信区间）

Table 1. Correlation coefficients of interannual variations of summer (June-September) and monthly average precipitation in the ICP. (* and ** indicate significance at the 95% and 99% confidence level by the Student's t-test.)

相关系数 r	7月	8月	9月	6~9月
6月	-0.05	0.06	-0.13	0.32*
7月	——	0.12	0.04	0.63**
8月	——	——	-0.15	0.51**
9月	——	——	——	0.47**

3.2 中南半岛夏季降水的主要调控因子

3.2.1 降水相关的环流异常

图3为降水和850hPa水平风场对中南半岛夏季各月降水的回归场。可以看出，与中南半岛降水异常相关的降水异常基本上局限于中南半岛及周围海域。其中，6月降水与南海南部地区的降水异常显著正相关，7月和9月降水主要与菲律宾海的降水异常正相关，8月和9月降水异常与海洋性大陆和赤道东印度洋附近地区的降水异常负相关。降水的变化往往与大气环流的异常变化有密切联系。从对流层低层风场可以发现（图3），中南半岛降水偏多的时候，每个月都同样对应明显的从西北太平洋地区到中南半岛上空分布的东风异常和从热带东印度洋地区到中南半岛上空的西风异常。从气候态风场来看（图略），中南半岛西部夏季主要盛行印度夏季风，西风异常增强了印度夏季风的环流异常，大量的水汽从热带印度洋向中南半岛输送，增加了中南半岛夏季降水的发生，而东风异常则会从西北太平洋带来大量水汽，影响东海岸的降水。根据上述环流特征，我们分别定义了中南半岛降水相关的东风异常指数（110-130°E，20-30°N）和西风异常指数（80-100°E，7.5-17.5°N）。这两个指数与中南半岛夏季各月降水相关系数均较高，尤其是西风异常指数与各月降水的相关系数均在0.5~0.7之间，超过了95%的置信区间。将两个风场异常指数回归到降水异常（图略），发现6-9月东风异常主要影响东海岸地区，西风异常则主要影响西海岸地区。综合而言，东西风异常均会对6-9月降水产生显著影响，且各月的低空环流场形势相似，东西风异常跟各月降水相关性均较显著。考虑到不同月份之间降水的相关性较低，这也说明了中南半岛逐月降水和低层环流的年际变化可能共同受到了不同远程调控因子的影响。

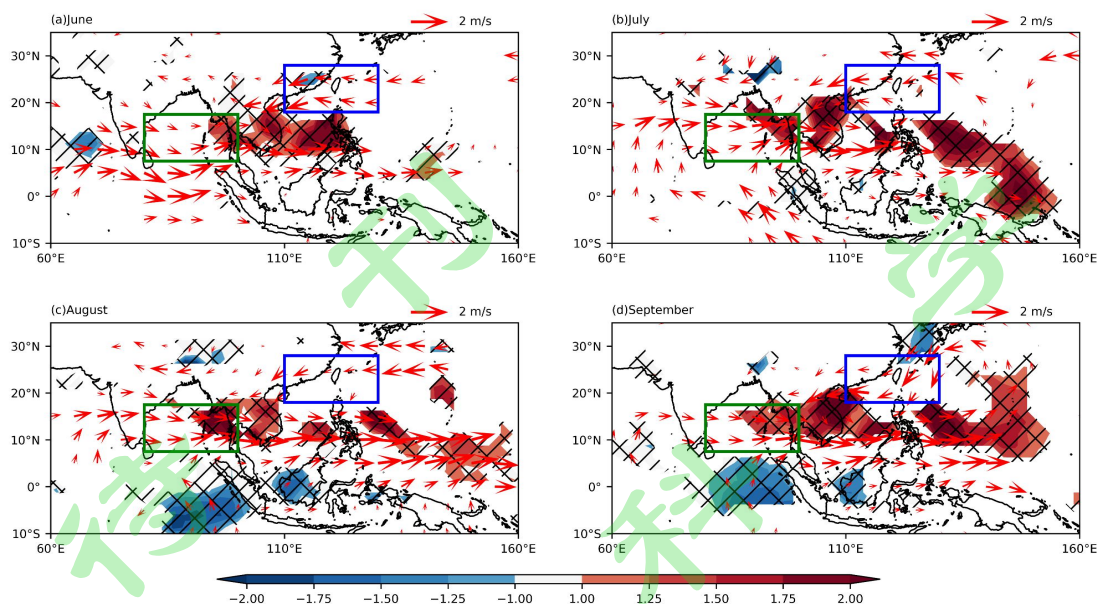


图 3 1979 至 2019 年降水异常（单位： mm day^{-1} ）和 850hPa 水平风距平场（单位： m s^{-1} ）对中南半岛降水指数回归：（a）6 月；（b）7 月；（c）8 月；（d）9 月。风场和对角线均表示 t 检验超过 95% 置信水平的区域。绿色框表示西风异常关键区（ $7.5\text{--}17.5^\circ\text{N}$, $80\text{--}100^\circ\text{E}$ ），蓝色框表示东风异常关键区（ $20\text{--}30^\circ\text{N}$, $110\text{--}130^\circ\text{E}$ ）。

Figure 3. Precipitation anomalies (unit: mm day^{-1}) and horizontal 850hPa wind anomalies (unit: m s^{-1}) regressed on the ICP rainfall index from 1979 to 2019 : (a) June; (b) July; (c) August; (d) September. The horizontal winds and diagonal lines indicate significance at the 95% confidence level by the Student's t -test. The green box indicates the westerly wind anomalies ($7.5\text{--}17.5^\circ\text{N}$, $80\text{--}100^\circ\text{E}$), the blue box indicates the easterly wind anomalies ($20\text{--}30^\circ\text{N}$, $110\text{--}130^\circ\text{E}$).

3.2.2 调制中南半岛夏季降水的主要热带海温信号

热带印度洋和西北太平洋地区的环流变化往往受到海温调控（Lu, 2001; Xie et al., 2016; Lin et al., 2018）。图 4 给出了与中南半岛夏季逐月降水相联系的海温异常分布。从图中可以看出，6 月降水与热带印度洋海温异常显著负相关，尤其是热带西印度洋（TWIO）；8 月降水与热带西太平洋和海洋性大陆附近东西偶极型的海温异常分布相关，这些区域的海温异常信号通过了 95% 的置信区间。7 月的同期海温异常与 6 月和 8 月的分布特征明显不同，主要分布在西太平洋地区，并向南北延伸至副热带地区，这可能与 ENSO 事件的演变有关（Wang et al., 2000; Chou et al., 2003）。相对而言，9 月中南半岛降水的变化没有对应明显的海温异常，后续将对其特征进行单独讨论。此外，中南半岛夏季逐月降水与大西洋海温变化相对较弱（图略）。

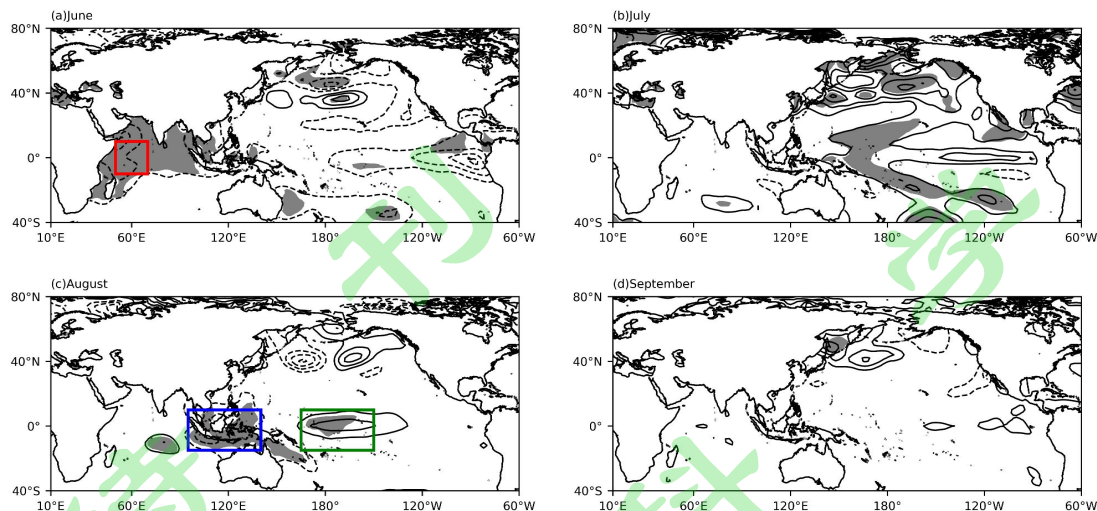


图 4 6–9 月海温异常对同期中南半岛降水指数的回归 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月; (d) 9 月。等值线间隔为 0.1°C , 省略了 0 值线。阴影表示 t 检验超过 95% 置信水平的区域。其中红色框 (10°S – 10°N , 50 – 70°E) 表示热带西印度洋影响关键区, 蓝色框 (15°S – 10°N , 95 – 140°E) 和绿色框 (15°S – 10°N , 165°E – 150°W) 分别表示海洋性大陆和热带西太平洋东西偶极型海温关键区域。

Figure 4. SST anomalies regressed on the ICP rainfall index from June to September (unit: $^{\circ}\text{C}$): (a) June; (b) July; (c) August; (d) September. The contour interval is 0.1°C and the contour line of zero is omitted. The Shading indicates significance at the 95% confidence level by the Student's t -test. The red box (10°S – 10°N , 50 – 70°E) indicates key area of influence in the tropical western Indian Ocean. The blue box (15°S – 10°N , 95 – 140°E) and the green box (15°S – 10°N , 165°E – 150°W) indicate the key areas of the dipole SST over the tropical WNP.

为了探究热带西印度洋海温异常对中南半岛 6 月降水的调制, 根据 Leung et al. (2020) 的工作, 我们将热带西印度洋区域 (10°S – 10°N , 50 – 70°E) 的平均海温异常定义为热带西印度洋海温指数。该海温指数与中南半岛 6 月降水指数的相关系数为 -0.57 , 超过了 99% 的置信度区间。从该海温指数对应的 850hPa 环流场 (图 5a) 可以看出, 当热带西印度洋海温异常增暖时, 中南半岛上空对应明显的异常反气旋, 这不利于印度夏季风携带的水汽从热带印度洋向中南半岛输送, 导致中南半岛降水的减少。此外, 通过对流层中层垂直运动和对流层高低层辐散对热带西印度洋海温异常的响应变化 (图 5b、c、d) 发现, 中南半岛地区的对流层中层有显著的下沉运动, 而热带西印度洋地区则呈现上升运动。热带西印度洋地区对流层低层对应明显的风场辐合, 而在中南半岛附近则相反, 出现明显的辐散。在对流层高层, 热带西印度洋地区和中南半岛附近地区的散度场则与低层大致相反, 与垂直运动的分布相互匹配。总的来说, 在 6 月, 热带西印度洋的海温异常可以通过调制局地辐合辐散环流来影响中南半岛上空的异常垂直运动, 进而调控该地区的降水异常。这与 Leung et al. (2020) 得到的结果一致, 即中南半岛 6 月降水主要受到热带西印度洋海温异常的调控。相对而言, 该海温异常与中南半岛上空夏季其他月份的环流和降水异常关系较弱 (图略)。

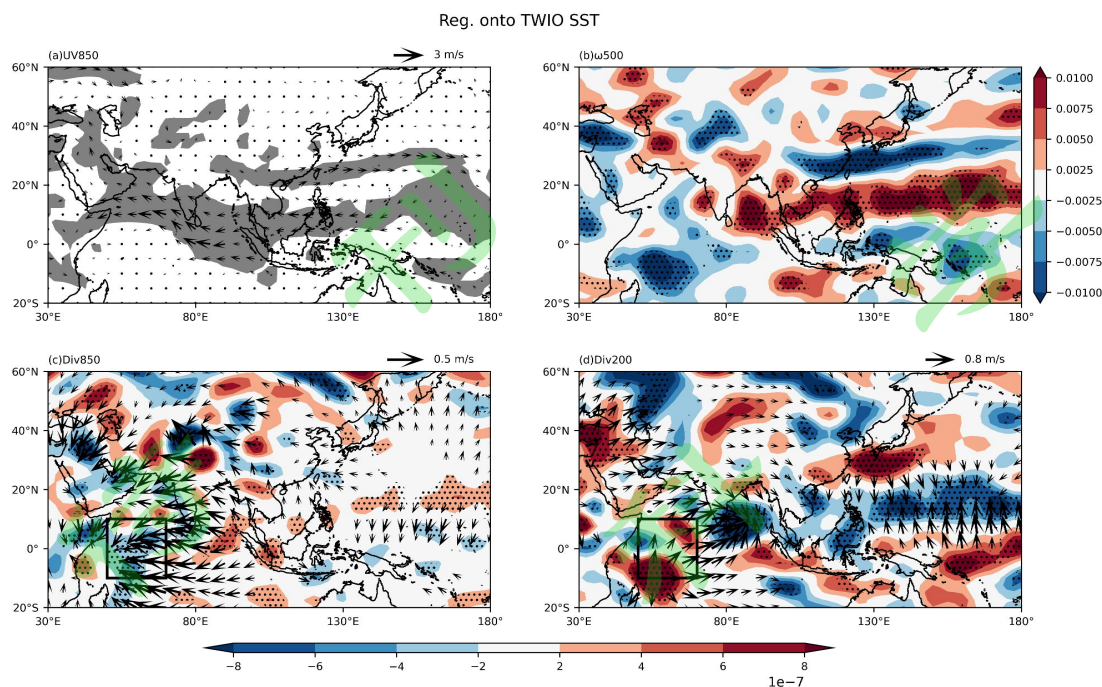


图 5 6 月水平风距平场（单位： m s^{-1} ）、散度场（单位： s^{-1} ）、辐散风（单位： m s^{-1} ）和垂直速度（单位： Pa s^{-1} ）对热带西印度洋地区海温异常指数的回归：（a）850hPa 水平风场；（b）500hPa 垂直速度；（c）850hPa 散度场和辐散风，（d）200hPa 散度场和辐散风。打点处和阴影表示 t 检验超过 95% 置信水平的区域。黑色框同图 4（a）一致。

Figure 5. Horizontal wind anomalies (unit: m s^{-1})、divergence (unit: s^{-1})、divergent winds (unit: m s^{-1}) and vertical velocity (Pa s^{-1}) regressed on the SST anomalies in the tropical western Indian Ocean in June: (a) horizontal wind anomalies at 850hPa; (b) 500hPa vertical velocity; (c) 850hPa divergence and divergent winds; (d) 200hPa divergence and divergent winds. The dots and shading indicate significance at the 95% confidence level by the Student's t -test. The black box is the same as in Figure 4. (a).

为了了解 7 月中南半岛降水的年际变化与热带海温之间的关系，将前冬季海温异常和 850hPa 环流距平场对 7 月降水指数回归分析（图 6a）。当 7 月降水较多时，前冬热带太平洋呈现显著的 La Niña 型海温分布，赤道中东太平洋观测到显著的海温负异常，西太平洋为海温正异常并呈马蹄形。同时，赤道中西太平洋上空出现低空东风异常，海洋大陆上空存在西风异常，这表明中南半岛 7 月降水的异常变化与 ENSO 的演变有关，对应前冬呈现典型的东太平洋 ENSO 型空间分布。因此，我们进一步选取 Niño-3.4 海温指数（热带中东太平洋地区（ 5°S – 5°N ， 170° – 120°W ）的平均海温异常）为研究对象，将此海温指数与 6–9 月降水做超前滞后相关分析，发现 7 月降水与前冬 Niño-3.4 海温指数相关性最大且通过了 95% 的置信区间，且 Niño-3.4 海温指数与中南半岛 7 月降水在前冬季相关性最为显著，相关系数为 -0.38。

图 6b–6e 为前冬 Niño-3.4 海温指数回归的前冬、春季、6 月以及 7 月 850hPa 环流场和降水场。可以看出，当前冬热带中东太平洋地区海温较暖时，热带中东太平洋和热带西印度

洋对应降水偏多，热带西太平洋和中南半岛附近海域降水则偏少。随着 ENSO 从前冬到夏季的持续影响，西太平洋和中南半岛附近的负降水异常有往北抬升的趋势，6 月降水异常偏弱，在 7 月（图 6e）完全覆盖了中南半岛。从对流层低层环流异常看，由于 ENSO 的影响，在前冬和春季时期（图 6b、c）热带中东太平洋和热带东印度洋低空分别存在异常西风 and 东风，同时西北太平洋地区存在异常反气旋。随着 ENSO 的持续影响，夏季气候态西太副热带高压逐渐加强北抬，7 月副高对应的异常反气旋停留在中南半岛上空，导致强烈的下沉运动，对应降水偏少。由于副高的季节内推进，对流活动中心也会随之变化。6 月和 8 月中南半岛地区没有明显的对流活动异常，导致其对应月份降水与 ENSO 没有建立起联系。由于以上结果表明，ENSO 与中南半岛夏季降水的联系主要体现在 7 月份。

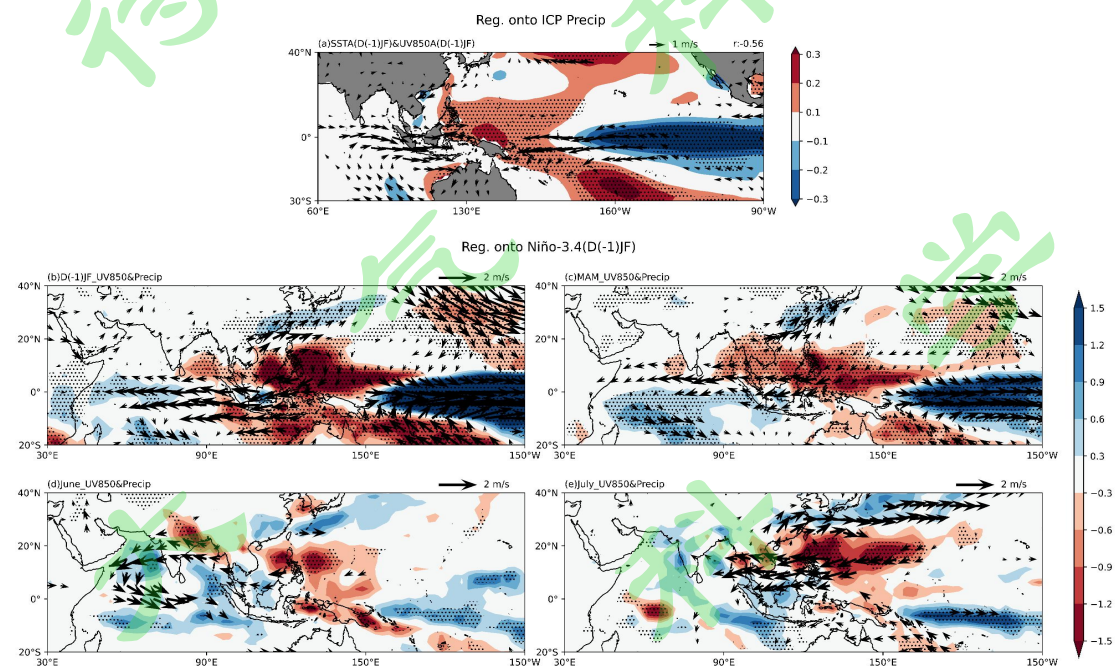


图 6 (a) 前冬季海温异常 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 850hPa 水平风距平场 (单位: m s^{-1}) 对中南半岛 7 月降水指数回归; 降水异常场 (单位: mm day^{-1}) 和 850hPa 水平风距平场 (单位: m s^{-1}) 对前冬 Niño-3.4 海温异常指数的回归: (b) 前冬季; (c) 春季; (d) 6 月; (e) 7 月。打点处表示 t 检验超过 95% 置信水平的区域。

Figure 6. (a) Pre-winter SST anomalies (unit: $^{\circ}\text{C}$) and 850hPa horizontal wind anomalies (unit: m s^{-1}) regressed on the ICP rainfall index in July. Precipitation anomalies (unit: mm day^{-1}) and 850hPa horizontal wind anomalies (unit: m s^{-1}) regressed on the Pre-winter Niño-3.4 SST anomaly index : (b) Pre-winter ; (c) Spring; (d) June; (e) July. The dots indicate significance at the 95% confidence level by the Student's t -test.

前面指出，中南半岛 8 月的降水异常主要与热带西太平洋和海洋性大陆附近东西偶极型的海温异常分布相关。参考 Li et al. (2017, 2021) 的方法，我们选取了 (15°S – 10°N , 165°E – 150°W) 和 (15°S – 10°N , 95° – 140°E) 之间的平均海温差 (图 4c)，他定义了一个西太偶极型海温指数，来表征西太平洋地区东西海温梯度。该海温指数与中南半岛 8 月降水指数的相关系数为 0.45，超过了 99% 的置信度区间。

图 7 (a) 为该海温指数对应的 850hPa 环流场。可以看到中南半岛上空存在强烈的西风异常, 这有利于大量的水汽向中南半岛输送, 这一结果与之前的研究 (图 3c) 相吻合。从对流层中层平均垂直速度看 (图 7b), 中南半岛上空存在显著的上升运动, 为中南半岛降水提供有利的动力条件, 而在 0-10°N 之间的海洋性大陆附近地区为下沉运动与 850hPa 的偏南风结合。另外, 从对流层低层的散度场来看 (图 7c), 海洋大陆区域对应显著的环流辐散和辐散风, 而在中南半岛北部以及附近海域则呈现辐合现象。对流层上层的情况正好相反 (图 7d)。以上结果说明, 中南半岛 8 月降水可以用局地 Hadley 环流的变化和赤道 Rossby 波来解释: 一方面, 海温梯度异常通过调控局地的 Hadley 环流, 使得上升支处于中南半岛附近, 下沉支位于海洋大陆海温异常处, 这种调控作用抑制了 Hadley 环流的形成, 进而影响中南半岛的降水。另一方面, 太平洋中部海温正异常增暖激发一个向西传播的赤道 Rossby 波, 这增强了中南半岛附近海域的对流活动, 从而增强该区域上空的正涡度, 形成了低空异常气旋, 然而这种正涡度又促进了沿赤道的强西风, 进一步加强东西方向上的海温梯度, 表现出一种正反馈的过程。

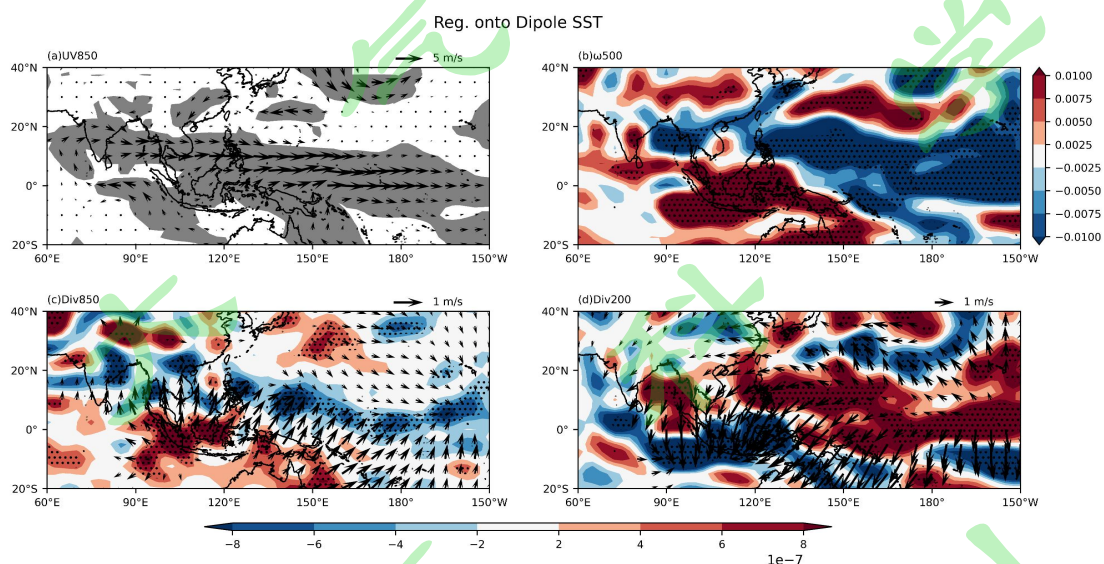


图 7 8 月水平风距平场 (单位: m s^{-1})、散度场 (单位: s^{-1})、辐散风 (单位: m s^{-1}) 和垂直速度 (单位: Pa s^{-1}) 对热带西太平洋偶极海温异常指数的回归: (a) 850hPa 水平风场; (b) 500hPa 垂直速度; (c) 850hPa 散度场和辐散风, (d) 200hPa 散度场和辐散风。打点处和阴影表示 t 检验超过 95% 置信水平的区域。

Figure 7. Horizontal wind anomalies (unit: m s^{-1})、divergence (unit: s^{-1})、divergent winds (unit: m s^{-1}) and vertical velocity (Pa s^{-1}) regressed on dipole SST anomalies in the tropical WNP in August : (a) horizontal wind anomalies at 850hPa; (b) 500hPa vertical velocity; (c) 850hPa divergence and divergent winds; (d) 200hPa divergence and divergent winds. The dots and shading indicate significance at the 95% confidence level by the Student's t -test.

考虑到不同月份中南半岛降水的独立性, 我们计算了夏季 (6-9 月) 降水分别与这 3 个

关键区海温异常指数的相关系数（表 2），可以观察到三个海温异常关键区确实只与各自研究月份的降水相关性最强，且通过了 95% 的置信区间，与中南半岛夏季逐月降水的低相关相对应。相对而言，8 月份的西太偶极型海温与 7 月降水相关略偏高，相关系数达到了 0.33，这可能是由于 ENSO 影响的同期西太地区的马蹄形海温异常（图 4b）造成的，这与 8 月降水对应的海温异常明显不同（图 4c）。

表 2 中南半岛 6-9 月各月平均降水逐年变化与 3 个海温异常关键区的相关系数(*、**分别表示通过了 95% 和 99% 的置信区间)。

Table 2. Correlation coefficients between interannual variations of monthly average precipitation in the ICP from June to September and three key SST anomalies regions(* and ** indicate significance at the 95% and 99% confidence level by the Student's *t*-test).

相关系数 r	6 月热带西印度洋海温指数	前冬 Niño-3.4 海温指数	8 月西太偶极型海温指数
6 月	-0.57**	-0.11	-0.01
7 月	0.10	-0.38*	0.33*
8 月	0.10	0.09	0.45**
9 月	0.12	-0.04	0.07

3.2.3 台风对中南半岛降水的影响

与其他夏季月份不同，9 月中南半岛降水年际变化没有伴随明显的热带海温异常（图 4d）。考虑到活跃于夏秋季的西北太平洋热带气旋（TC）也会显著影响中南半岛降水（Takahashi et al., 2015; Ge et al., 2017），我们将进一步分析台风活动的影响。

经对 6-9 月台风轨迹分布（图略）统计分析，1979-2019 年夏季共有 68 次台风登陆中南半岛，其中 6 月有 7 次，7 月和 8 月各有 16 次，9 月则高达 29 次。这表明相较于其他夏季各月，9 月中南半岛的登陆台风最多，受台风降水影响也可能最大。台风降水通常被定义为在台风有效影响半径内的记录降水量。为了计算台风引起的降水对 9 月中南半岛总降水的贡献，我们统计了 9 月的西太平洋的西行台风，选取有效影响半径为 1000km，当格点位于有效半径内时，将格点记录的降水归类为台风降水。然后将相应的降水累加得到台风 9 月总降水（Li and Zhou, 2015）。通过计算，9 月台风引起中南半岛降水占中南半岛总降水 48.1%，接近总量的一半。图 8a 为 1979-2019 年 9 月登陆中南半岛台风频数和同期降水指数。二者的相关系数达到了 0.48，超过了 95% 的置信度区间，说明中南半岛 9 月降水的年际变化与台风活动密切相关。另外，我们也计算了其他各月降水指数与同期登陆中南半岛台风频数的相关系数，分别为 0.17（6 月）、0.13（7 月）、0.22（8 月），均未通过 95% 的信度检验。这些结果表明 9 月中南半岛降水受到台风活动的显著影响。

我们进一步按照登陆台风的数量划分高值年（台风数量 2 个）与低值年（无台风登陆），对中南半岛 9 月降水异常进行合成分析（图 8b 和 8c）。可以看出，台风多寡年中南半岛降水差异显著。台风偏多年份，中南半岛降水偏多，降水最明显的区域主要集中在东海岸（图

8b)。这与 9 月降水异常大值中心集中在东海岸（图 3d）相对应，佐证了台风登陆对中南半岛 9 月降水的重要贡献。而在台风偏少年份中南半岛大部分地区以负异常为主（图 8c），处于干旱状态。

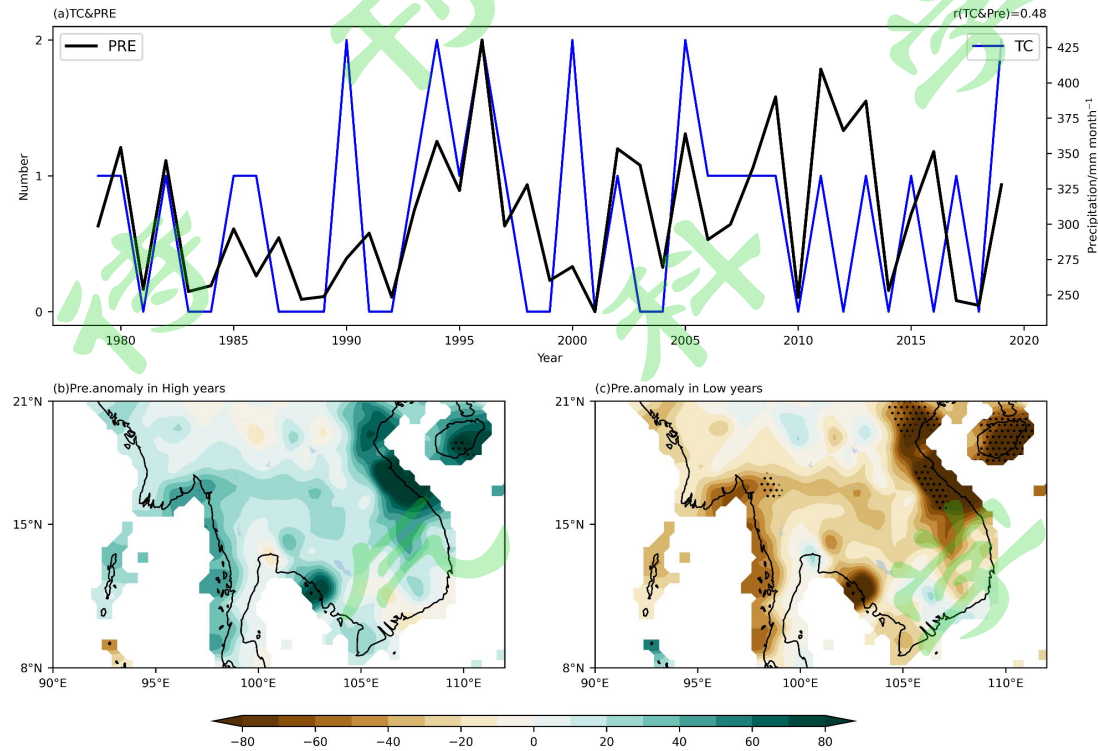


图 8 (a) 1979–2019 年 9 月登陆中南半岛台风的个数及 9 月降水时间序列；台风高值年与低值年的中南半岛 9 月降水异常空间分布（单位：mm month⁻¹）：(b) 高值年；(c) 低值年。打点处表示 *t* 检验超过 95% 置信水平的区域。

Figure 8. (a) Time series of typhoons landing numbers on the ICP and the ICP precipitation in September from 1979 to 2019; Spatial distribution of the precipitation anomalies in September over the ICP in high and low typhoon years (unit: mm month⁻¹): (b) high typhoon years; (c) low typhoon years. The dots indicate significance at the 95% confidence level by the Student's *t*-test.

4 结论

中南半岛汛期降水主要集中在 6–9 月。本文探究了 1979–2019 年中南半岛夏季逐月降水的年际变化特征和主要调控因子，发现 6–9 月降水表现出显著不同的年际变化特征。夏季逐月降水具有明显的独立性，各月相关系数绝对值均未超过 0.15。本文进一步从环流、热带海温 and 台风活动等角度揭示了调控中南半岛逐月降水的主要影响因子。

(1) 环流影响：中南半岛 6–9 月降水均受到来自热带太平洋的东风环流异常和来自印度洋的西风环流异常的共同影响。这些环流异常直接通过影响来自西太平洋和印度洋的水汽输送调控中南半岛夏季降水。

(2) 海温影响: 调控中南半岛夏季降水的海温异常逐月差异显著。6 月降水主要与热带西印度洋海温异常负相关。热带西印度洋海温异常可以通过辐合辐散环流联系西太平洋的环流异常, 调控中南半岛上空垂直运动, 从而影响其降水; 7 月降水主要与前冬 ENSO 有关, 前冬 ENSO 可以通过热带太平洋和印度洋地区的海气相互作用激发西北太平洋副热带高压地区的环流异常, 影响中南半岛的水汽输送; 8 月降水则与西北太平洋偶极型海温异常分布相联系。这种异常的海温通过调控局部地区的 Hadley 环流, 影响中南半岛上空的环流异常, 调控中南半岛 8 月降水异常。我们发现 ENSO 主要影响了 7 月中南半岛降水, 而对 6 月和 8 月并无影响, 这与副高季节内北推有关, 说明 ENSO 对中南半岛夏季降水没有持续性, 但其对整个东亚季风降水却是有持续性的。

(3) 台风影响: 台风主要影响中南半岛的 9 月降水。统计分析发现, 9 月登陆中南半岛台风数量最多, 其数量变化与 9 月降水异常显著相关。登陆台风偏多时, 东海岸的降水异常偏多; 登陆台风偏少时, 整个中南半岛均呈现干旱少雨的状态。

本研究指出了中南半岛夏季降水逐月年际变化的显著差异。然而, 值得注意的是, 中南半岛地形复杂, 地势北高南低, 多山地和高原, 这导致了中南半岛降水空间分布存在显著的地域差异 (图 1a)。不少研究揭示了地形分布对该地区夏季降水的影响 (Chang et al., 2005; Xie et al., 2006; Qi et al., 2012; Wu et al., 2016)。例如 Wang et al. (2012) 和 Wu et al. (2018) 提到中南半岛地形加强了岛上的气旋流作用, 从而加深了季风环流对降水的影响。Takahashi et al. (2015) 通过对数值模型的研究, 发现中南半岛夏季降水表现出显著的区域特征。中南半岛复杂的地形分布对中南半岛夏季不同月份降水的影响, 也是值得未来进一步探讨研究的问题。本文主要研究了热带地区远程调控因子对中南半岛夏季逐月降水年际变化的影响, 另外相关研究表明 (Lu et al., 2002; Kosaka et al., 2012; Hong et al., 2016), 中高纬度环流因子, 包括亚洲急流和丝绸之路型遥相关等, 也会通过调控对流层高层影响中南半岛夏季降水。这些系统对中南半岛逐月降水变化的影响需要在后续的研究中进一步完善。

本研究主要关注年际关系的变化, 同时我们也验证了去掉十年以上信号的结果, 与本文结论一致。从中南半岛降水的时间序列变化中 (图 2) 我们还可以看出, 该地区夏季降水还存在复杂的年代际和趋势变化特征。6 月降水明显的减少趋势, 7 月和 9 月降水在 1993 年之后呈现降水明显偏多的特征, 其变化原因亦需要未来进一步展开研究。

参考文献

- Cao J, Hu J, Tao Y, 2012. An index for the interface between the Indian summer monsoon and the East Asian summer monsoon[J]. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 117: D18108. doi:10.1029/2012JD017841
- Chang C P, Wang Z, McBride J, et al., 2005. Annual cycle of Southeast Asia—maritime continent rainfall and the asymmetric monsoon transition[J]. *J. Climate*, 18(2): 287-301. doi: 10.1175/JCLI-3257.1
- Chen A F, Huang H, Wang J, et al., 2023. An analysis of the spatial variation of tropical cyclone rainfall trends in mainland Southeast Asia[J]. *Int. J. Climatol.*, 43(13): 5912-5926. doi: 10.1002/joc.8180
- Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al., 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge

384 observations[J]. J. Hydrometeorol., 3(3): 249-266. doi:
 385 10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2
 386 Chhin R, Shwe M M, Yoden S, 2020. Time-lagged correlations associated with interannual variations of
 387 pre-monsoon and post-monsoon precipitation in Myanmar and the Indochina Peninsula[J]. Int. J. Climatol.,
 388 40(8): 3792-3812. doi: 10.1002/joc.6428
 389 Chou C, Tu J Y, Yu J Y, 2003. Interannual variability of the western North Pacific summer monsoon: Differences
 390 between ENSO and non-ENSO years[J]. J. Climate, 16(13): 2275-2287. doi: 10.1175/2761.1
 391 Deng M Y, Lu R Y, Chen W, et al., 2016. Interannual variability of precipitation in May over the South Asian
 392 monsoonal region[J]. Int. J. Climatol., 36(4): 1724-1732. doi: 10.1002/joc.4454
 393 Dong Z, Yang R, Cao J, et al., 2023. Sea surface temperature anomalies in different ocean basins affecting the
 394 interannual variations of summer precipitation in low-latitude highlands of Southeast Asia[J]. Climate Dyn.,
 395 61(11-12): 5517-5531. doi: 10.1007/s00382-023-06868-7
 396 Faikrua A, Pimonsree S, Wang L, et al., 2020. Decadal increase of the summer precipitation in Thailand after the
 397 mid-1990s[J]. Climate Dyn., 55(11-12): 3253-3267. doi: 10.1007/s00382-020-05443-8
 398 Gao Q G, Sombutmounvong V, Xiong L H, et al., 2019. Analysis of drought-sensitive areas and evolution patterns
 399 through statistical simulations of the Indian Ocean dipole mode[J]. Water, 11(6): 1302. doi:
 400 10.3390/w11061302
 401 Ge F, Zhi X F, Babar Z A, et al., 2017. Interannual variability of summer monsoon precipitation over the Indochina
 402 Peninsula in association with ENSO[J]. Theor. Appl. Climatol., 128(3-4): 523-531. doi:
 403 10.1007/s00704-015-1729-y
 404 Ge F, Zhu S P, Sielmann F, et al., 2021. Precipitation over Indochina during the monsoon transition: modulation by
 405 Indian Ocean and ENSO regimes[J]. Climate Dyn., 57(9-10): 2491-2504. doi: 10.1007/s00382-021-05817-6
 406 Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the
 407 CRU TS3 .10 Dataset[J]. Int. J. Climatol., 34(3): 623-642. doi: 10.1002/joc.3711
 408 Hong X W, Lu R Y, 2016. The meridional displacement of the summer Asian jet, silk road pattern, and tropical
 409 SST anomalies[J]. J. Climate, 29(10): 3753-3766. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0541.1
 410 Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al., 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5
 411 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons[J]. J. Climate, 30(20): 8179-8205. doi:
 412 10.1175/JCLI-D-16-0836.1
 413 Hu P, Chen W, Li Z, et al., 2022. Close linkage of the South China Sea summer monsoon onset and extreme
 414 rainfall in May over Southeast Asia: Role of the synoptic-scale systems[J]. J. Climate, 35(13): 4347-4362. doi:
 415 10.1175/JCLI-D-21-0740.1
 416 Hu P, Chen W, Chen S, et al., 2024. Revisiting the linkage between the Pacific-Japan pattern and Indian summer
 417 monsoon rainfall: The crucial role of the Maritime Continent[J]. Geophys.Res. Lett., 51(3): e2023GL106982.
 418 doi: 10.1029/2023GL106982
 419 Kosaka Y, Chowdary J S, Xie S P, et al., 2012. Limitations of seasonal predictability for summer climate over East
 420 Asia and the Northwestern Pacific[J]. J. Climate, 25(21): 7574-7589. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00009.1
 421 Leung M Y T, Zhou W, Wang D X, et al., 2020. Remote tropical western Indian Ocean forcing on changes in June

- precipitation in South China and the Indochina Peninsula[J]. *J. Climate*, 33(17): 7553-7566. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0626.1
- Li C F, Lu R Y, Chen G, 2017. Promising prediction of the monsoon trough and its implication for tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Environ. Res. Lett.*, 12(7): 074027. doi: 10.1088/1748-9326/aa71bd
- Li C F, Lu R Y, Dunstone N, 2021. Prediction of the western North Pacific subtropical high in summer without strong ENSO forcing[J]. *J. Meteor. Res.*, 35(1): 101-112. doi: 10.1007/s13351-021-0113-3
- Li R C Y, Zhou W, 2015. Interdecadal Changes in Summertime Tropical Cyclone Precipitation over Southeast China during 1960-2009[J]. *J. Climate*, 28(4): 1494-1509. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00246.1
- Lin X Z, Li C F, Lu R Y, et al., 2018. Predictable and unpredictable components of the summer East Asia-Pacific teleconnection pattern[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 35(11): 1372-1380. doi: 10.1007/s00376-018-7305-5
- Lu R Y, 2001. Atmospheric circulations and sea surface temperatures related to the convection over the western Pacific warm pool on the interannual scale[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(2): 270-282. doi: 10.1007/s00376-001-0019-z
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J, 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 54(1): 44. doi: 10.3402/tellusa.v54i1.12122
- 马帅, 李晨曦, 刘言, 等, 2022. 四套全球网格降水数据集在伊朗的适用性评估[J]. *地理研究*, 41(11): 3021-3035. Ma Shuai, Li Chenxi, Liu Yan, et al., 2022. Evaluation of the applicability of four global grid precipitation datasets in Iran[J]. *Geogr. Res. (in Chinese)*, 41(11): 3021-3035. doi: 10.11821/dlyj020211199
- Nguyen T V, Mai K V, Nguyen P N B, et al., 2019. Evaluation of summer monsoon climate predictions over the Indochina Peninsula using regional spectral model[J]. *Weather Clim. Extreme.*, 23: 100195. doi: 10.1016/j.wace.2019.100195
- Nguyen-Le D, Matsumoto J, Ngo-Duc T, 2015. Onset of the rainy seasons in the eastern Indochina Peninsula[J]. *J. Climate*, 28(14): 5645-5666. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00373.1
- Promchote P, Simon Wang S Y, Johnson P G, 2016. The 2011 great flood in Thailand: Climate diagnostics and implications from climate change[J]. *J. Climate*, 29(1): 367-379. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0310.1
- Qi L, Wang Y Q, 2012. The effect of Mesoscale Mountain over the east Indochina Peninsula on downstream summer rainfall over East Asia[J]. *J. Climate*, 25(13): 4495-4510. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00574.1
- Qiu D N, Xu H M, Deng J C, et al., 2021. Different impacts of spring tropical Atlantic SST anomalies on Eurasia spring climate during the periods of 1970-1995 and 1996-2018[J]. *Atmos. Res.*, 253: 105494. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105494
- 施闯, 张卫星, 曹云昌, 等, 2020. 基于北斗/GNSS 的中国-中南半岛地区大气水汽气候特征及同降水的相关分析[J]. *测绘学报*, 49(9): 1112-1119. Shi Chuang, Zhang Weixing, Cao Yunchang, et al., 2020. Atmospheric water vapor climatological characteristics over Indo-China region based on BeiDou/GNSS and relationships with precipitation[J]. *J. Geod. Geoinf. Sci. (in Chinese)*, 49(9): 1112-1119. doi: 10.11947/j.AGCS.2020.20200339

- Shi Y, Wu R G, Kripalani R, et al., 2022. Asian rainfall anomaly patterns associated with interannual variations of early and peak summer rainfall over the Indochina Peninsula[J]. *Int. J. Climatol.*, 42(15): 7779-7793. doi: 10.1002/joc.7677
- Su Q, Lu R Y, Li C F, 2014. Large-scale circulation anomalies associated with interannual variation in monthly rainfall over South China from May to August[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(2): 273-282. doi: 10.1007/s00376-013-3051-x
- Takahashi H G, Fujinami H, Yasunari T, et al., 2015. Role of tropical cyclones along the monsoon trough in the 2011 Thai Flood and interannual variability[J]. *J. Climate*, 28(4): 1465-1476. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00147.1
- Wang B, Wu R G, Fu X H, 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?[J]. *J. Climate*, 13(9): 1517-1536. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2
- 王丹, 王爱慧, 2017. 1901~2013 年 GPCC 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估[J]. *气候与环境研究*, 22(4): 446-462. Wang Dan, Wang Aihui, 2017. Applicability assessment of GPCC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013[J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 22(4): 446-462. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16122
- 王芬, 曹杰, 李腹广, 等, 2013. 多套格点降水资料在云南及周边地区的对比[J]. *应用气象学报*, 24(4): 472-483. Wang Fen, Cao Jie, Li Fuguang, et al., 2013. Datasets and rain gauge precipitation over Yunnan and the surrounding areas[J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 24(4): 472-483. doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2013.04.010
- Wang Z, Chang C P, 2012. A numerical study of the interaction between the large-scale monsoon circulation and orographic precipitation over South and Southeast Asia[J]. *J. Climate*, 25(7): 2440-2455. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00136.1
- Wu C H, Hsu H H, 2016. Role of the Indochina Peninsula narrow mountains in modulating the East Asian-western North Pacific summer monsoon[J]. *J. Climate*, 29(12): 4445-4459. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0594.1
- Wu C H, Huang W R, Wang S Y, 2018. Role of Indochina Peninsula topography in precipitation seasonality over East Asia[J]. *Atmosphere*, 9(7): 255. doi: 10.3390/atmos9070255
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al., 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(4): 411-432. doi: 10.1007/s00376-015-5192-6
- Xie S P, Xu H M, Saji N H, et al., 2006. Role of narrow mountains in large-scale organization of Asian monsoon convection[J]. *J. Climate*, 19(14): 3420-3429. doi: 10.1175/JCLI3777.1
- Yang Y Y, Wu R G, 2019. Seasonal variation of precipitation over the Indochina Peninsula and its impact on the South China Sea spring warming[J]. *Int. J. Climatol.*, 39(3): 1618-1633. doi: 10.1002/joc.5904
- Yang Y Y, Wu R G, Wang C H, 2020. Individual and combined impacts of tropical Indo-Pacific SST anomalies on interannual variation of the Indochina Peninsular precipitation[J]. *J. Climate*, 33(3): 1069-1088. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0262.1
- You T, Wu R G, Liu G, et al., 2021. Contribution of precipitation events with different consecutive days to rainfall

494 change over Asia during ENSO years[J]. Theor. Appl. Climatol., 144(1-2): 147-161. doi:
495 10.1007/s00704-021-03538-8

496 Zhang Y S, Li T, Wang B, et al., 2002. Onset of the summer monsoon over the Indochina Peninsula: Climatology
497 and interannual variations[J]. J. Climate, 15(22): 3206-3221. doi:
498 10.1175/1520-0442(2002)015<3206:OOTSMO>2.0.CO;2

499 Zhou X Y, Lu R Y, 2019. Interannual variability of the tropical cyclone landfall frequency over the southern and
500 northern regions of East Asia in Autumn[J]. J. Climate, 32(24): 8677-8686. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0057.1