

2000年4月广东极端降水影响因子

张馨宁, 刁一娜*

中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年2月12日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

2000年4月广东发生极端降水事件, 降水量为4月气候平均值的2.5倍。本文从能量学的角度分析其影响因子。分析表明, 中纬度西大西洋极端暖海温异常, 其作为强热力强迫源, 激发出一支横跨西大西洋至东亚的准定常罗斯贝波列(“正-负-正-负”型)。该波列的能量沿西风波导向东频散, 导致下游东亚地区出现异常低压, 并显著增强其南侧的西风急流。广东位于该异常急流入口区的右侧, 高空辐散的动力强迫触发低层辐合与强烈上升运动。天气尺度分析进一步表明, 西大西洋扰动位能信号约领先广东降水5天, 能量通过“西大西洋-西亚-东亚急流-华南上升运动”的过程对降水产生影响, 并通过三次典型降水过程的合成分析得到验证。

关键词

广东, 极端降水, Rossby波, 能量学

Influencing Factors of Extreme Precipitation in Guangdong in April 2000

Xinning Zhang, Yina Diao*

College of Oceanic and Atmospheric Science, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: February 12, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

In April 2000, an extreme precipitation event occurred in Guangdong, with the precipitation reaching 2.5 times the April climate average. From an energetics perspective, the analysis of its influencing factors reveals that the anomalously warm sea surface temperatures in the mid-latitude western Atlantic acted as a strong thermal forcing source. This condition excited a quasi-stationary Rossby wave train (with a “positive-negative-positive-negative” pattern) spanning from the western Atlantic to East Asia. The energy of this wave train dispersed eastward along the westerly waveguide,

*通讯作者。

leading to an anomalous low-pressure system over downstream East Asia and significantly enhancing the westerly jet stream along its southern flank. Guangdong was situated to the right of the entrance region of this anomalous jet stream, where the dynamic forcing from upper-level divergence triggered low-level convergence and intense upward motion. Further synoptic-scale analysis indicates that the disturbance energy signal from the western Atlantic preceded the Guangdong precipitation by approximately five days. This energy influenced the precipitation through the mechanism of “western Atlantic-West Asia-East Asian jet stream-ascending motion in South China,” which was validated by composite analysis of three typical precipitation events.

Keywords

Guangdong, Extreme Precipitation, Rossby Wave, Energetics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

广东省位于中国南部,南海西北侧,地处东亚季风区。华南地区的雨季通常从4月持续到9月[1][2],并可划分为两个时期:前汛期(4月至6月)和后汛期(7月至9月)[3]-[5]。华南前汛期可进一步分为季风爆发前期和后期[6]。南海夏季风通常在5月爆发[7][8]。因此,本研究关注的4月降水属于季风爆发前期。当暖湿空气与冷空气相遇时,便产生锋面降水。因此,这一时期华南的降水主要为锋面降水[9]。先前研究表明,华南季风前期的降水可能受到遥相关的影响,例如欧洲、西西伯利亚或贝加尔湖地区的异常积雪,或上游的海气耦合系统,如北大西洋涛动[10][11]。因此,4~5月华南降水的变率主要受10~20天振荡主导,这是一种与中纬度行星尺度调整相关的季节内时间尺度。

在极端降水事件中,能量的聚集、转换、释放是核心的驱动因素。通过对大气能量学的研究可以找到区域降雨和大尺度环流之间的联系,从而提高我们对区域气候变率的认识[12]。因此本文从能量学角度进行研究,分析影响因子。

2. 数据与方法

2.1. 数据

本文使用国家气候中心提供的全国699站逐日降水数据分析广东降水,研究区域包括36个站点数据,时间范围包括1951~2024年4月;本文使用来自欧洲中期数值预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代再分析产品(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)的再分析数据分析降水动力和热力条件,时间分辨率包括逐月、逐日,原始水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,本文将数据插值成 $1^\circ \times 1^\circ$ 。变量包括大气垂直速度、气温、位势高度、水平纬向风、经向风和比湿;海温数据使用NOAA Extended Reconstructed SST V5,空间分辨率是 $2^\circ \times 2^\circ$ 。4月异常是通过减1971~2000年的气候平均值获得的。

2.2. 方法

2.2.1. 局地扰动位能理论(PPE)

局地扰动位能(perturbation potential energy, PPE)被定义为实际大气全位能与其经绝热调整到对应的

参考状态时的全位能之差[13]。PPE 代表可转化为动能的局部总势能的最大值。值得注意的是, PPE 与动能之间的耦合比传统大气有效位能(APE) [14]与动能之间的耦合更强。本文使用 PPE 一阶项, 公式为:

$$PPE_1 = \frac{1}{\gamma_d} \int_0^p T' dp \quad (1)$$

其中, p 和 p_s 分别是气压和地面气压。 $\gamma_d = g/c_p$ 表示干绝热递减率, 其中 g 为重力加速度, c_p 为定压比热容, T 表示温度异常。

2.2.2. 排序归因法(RAW)

极端事件通常由极端驱动因子所引发。基于这一前提, 排序归因法(Ranking Attribution Method, RAM) 通过最高与最低排序来识别潜在的极端驱动因子。正秩次表示从高到低排序, 负秩次则表示从最低值开始排序, 其中 1 代表历史最高值, -1 代表历史最低值[15]。

2.2.3. 波射线通量(Li-Yang WRF)

在水平非均匀基流中 Rossby 波射线追踪理论的基础上[16]-[20], 引入了水平 Rossby 波射线追踪(Li-Yang WRF)的概念来诊断 Rossby 波的局地活动和传播方向[21], 它表示单位时间内通过单位格点区域的波射线流量, 单位是 $m \cdot s^{-1}$, 以矢量的形式提供了更清晰、更精确的波活动强度和传播方向的描述。

3. 2000 年 4 月广东降水影响因子

3.1. 降水特征

根据 1951~2024 年 4 月广东降水量排序, 全省平均降水量为 423.8 毫米, 接近 4 月气候平均值(172 毫米)的 2.5 倍, 2000 年降水位于这 74 年降水排序第二位。本月主要有三次降水过程(图 1), 分别位于月初(4 月 3 日)、月中(4 月 14 日)以及月末(4 月 26 日~28 日), 其中 14 日降水达 70 毫米以上。

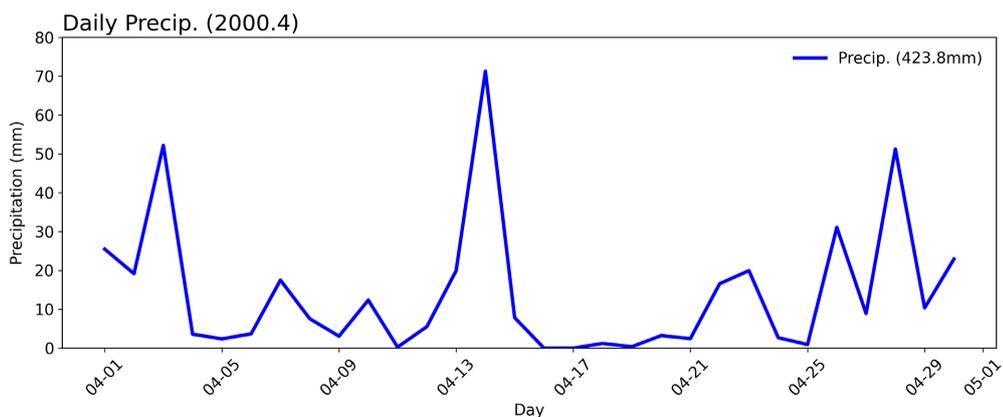


Figure 1. Daily precipitation time series for Guangdong in April 2000, unit: mm

图 1. 2000 年 4 月广东日降水时间序列, 单位: mm

3.2. 月尺度环流特征

2000 年 4 月 300 hPa 位势高度异常场呈现出显著的大尺度遥相关波列。该波列自西大西洋开始, 依次经过东大西洋、西非 - 欧洲 - 西亚地区, 直至东亚, 空间上表现为“正 - 负 - 正 - 负”的准定常罗斯贝波列(图 2(a))。其中, 位于下游的东亚负异常中心(即东亚低压)向南延伸至中国广东以北地区, 大气扰动位能异常的空间分布与位势高度异常一致。同期海温异常显示(图 2(b)), 中纬度西大西洋存在显著的暖

异常。暖海温可以通过非绝热加热过程, 有利于高空高压的形成与维持。我们将西大西洋暖海温及欧洲-西亚高 PPE 异常区域, 视为罗斯贝波的准定常波源。我们计算了 4 月平均的波作用通量, Li-Yang WRF 表示波能量的传播路径。结果表明, 波能量主要源自西大西洋波源并向东传播。能量到达东大西洋上空后发生分流: 一支(北支)向北传播至欧洲, 有助于维持该地区的高压异常; 另一支(南支)则强度更强, 其能量依次向东传播经过西亚, 最终抵达东亚, 对东亚低压的维持起着关键作用。因此上述结果表明, 该波列通过波能量传播相连接, 该波列本身即为能量传播提供了一条大尺度的波导通道。东亚低压的南侧存在着一支异常强的月平均西风急流(图 2(c)), 其急流中心位于中国东部至西太平洋沿岸上空。广东位于急流入口区右侧的高空辐散区, 有利于低层辐合进而增强上升运动, 而该高空急流的强度依赖于东亚低压的强度。由此西大西洋海温异常与广东降水之间形成了空间上的联系。

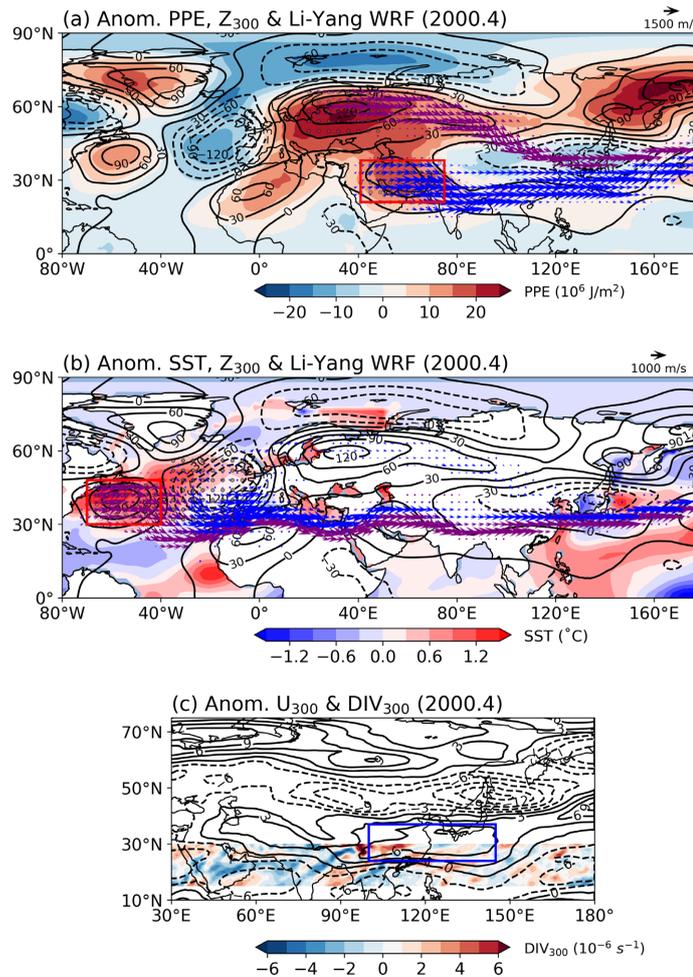


Figure 2. (a) Anomalous PPE (shading, $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$) and 300 hPa geopotential height (contours, gpm) in April 2000, with mean wave ray flux originating from the Europe (purple vectors, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and the West Asia (blue vectors, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Gray dots denote wave energy source regions. (b) Anomalies of sea surface temperature (shading, $^{\circ}\text{C}$) and 300 hPa geopotential height (contours, gpm), with mean wave ray flux originating from the eastern Atlantic (blue vectors, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and western Atlantic (purple vectors, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Gray dots denote wave energy source regions. (c) Anomalous 300 hPa zonal wind (contours, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence field (shading, 10^{-6} s^{-1} , shown only for 15°N ~ 30°N)

图 2. 2000 年 4 月 (a) 扰动位能异常(填色, $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$), 300 hPa 位势高度异常(等值线, gpm), 源自欧洲(紫色矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和西亚(蓝色矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的平均波射线通量, 其中灰点表示波能量源区; (b) 海表面温度异常(填色, $^{\circ}\text{C}$), 300 hPa 位势高度异常(等值线, gpm), 源自东大西洋(蓝色矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和西大西洋(紫色矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的平均波射线通量, 其中灰点表示波能量源区; (c) 300 hPa 纬向风异常(等值线, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及其散度场异常(填色, 10^{-6} s^{-1} , 仅显示 15°N ~ 30°N 范围)

3.3. 日尺度环流特征

基于上述月尺度的准定常波列以及波能量的传播, 我们进一步分析了在天气尺度上的逐日演变特征。通过计算 4 月的逐日指数, 包括东亚急流指数(图 2(c)蓝色方框区域内平均的 300 hPa 纬向风速), 广东上空的 500 hPa 垂直速度与降水指数, 以及西大西洋(图 2(b)红色方框区域, 30°~48°N, 40°~70°W)和西亚(图 2(a)红色方框区域, 21°~38°N, 41°~75°E)区域平均扰动位能指数。相关分析表明(图 3), 西大西洋能量异常约领先广东降水 5 天达到最大相关, 表明上游能量信号可在周尺度上影响下游降水; 西亚扰动位能与东亚急流的相关表明同期是显示显著相关, 表明上升运动对急流的快速响应; 东亚急流在领先 3 天时影响广东上升运动, 后者与降水增强近乎同步, 表明上升运动的增强不仅有助于降水增加, 也促进扰动位能向动能的转换。因此西大西洋和西亚的能量异常可通过直接的动力路径调制对流层高层急流, 进而影响降水。

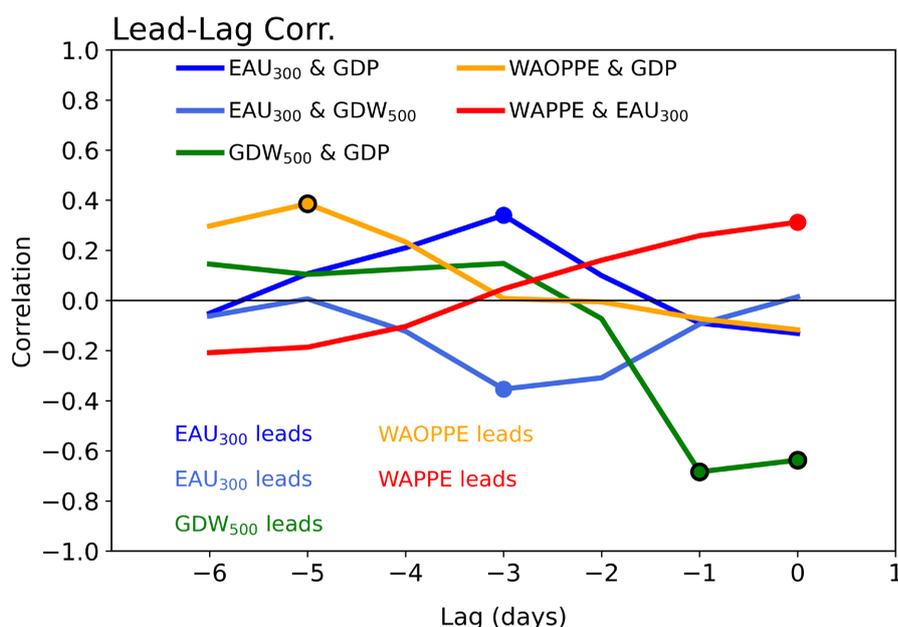


Figure 3. Lead-lag correlations between the daily variabilities of: the PPE of West Atlantic (WAOPPE, the average PPE in in red box area in Figure 2(b)) and Guangdong precipitation (GDP, yellow line); the PPE of West Asia (WAPPE, the average PPE in red box area in Figure 2(a)) and East Asian 300 hPa zonal wind (EAU₃₀₀, the average 300 hPa zonal wind speed within the blue box area in Figure 2(c), red line); EAU₃₀₀ and GDP (dark blue line); EAU₃₀₀ and the average 500 hPa vertical velocity over Guangdong (GDW₅₀₀, light blue line); GDW₅₀₀ and GDP (green line). Dotes/black circled dotes denotes significant values at the 90%/95% confidence levels

图 3. 逐日变率的超前滞后相关系数: 西大西洋扰动位能(WAOPPE, 即图 2(b)红色方框区域平均的扰动位能)与广东降水(GDP, 黄色线); 西亚扰动位能(WAPPE, 即图 2(a)红色方框区域平均的扰动位能)与东亚 300 hPa 纬向风(EAU₃₀₀, 即图 2(c)蓝色方框区域平均的 300 hPa 纬向风速, 红线); EAU₃₀₀与广东降水(深蓝线); EAU₃₀₀与广东上空平均的 500 hPa 垂直速度(GDW₅₀₀, 浅蓝线); GDW₅₀₀与 GDP(绿色线); 圆点/黑色圆圈圆点分别表示达到了 90%/95%显著性水平

基于上述机制, 我们进一步针对三次典型降水过程(P1, P2, P3)进行合成分析, 分别绘制了降水峰值日(记为第 0 天)及其前第 3 天(-3 天)的 300 hPa 位势高度异常与西风急流分布。合成结果显示, 在降水发生前第 3 天(图 4(a)), 西亚高压与东亚低压已显著建立, 低压南侧的西风急流明显加强, 这与月平均环流异常结构特征一致; 至降水发生日(图 4(b)), 整个波列系统相较前期略向东移, 广东北侧出现一条更为集中的急流带, 为降水发生提供了持续的高空辐散动力条件。同时, 低层环流与水汽辐合的合成分析表明(图 5), 在降水前第 1 天至当天, 850 hPa 风场在广东附近呈现气旋性环流, 其北侧的干冷偏北气流与来

自南海的暖湿气流在广东地区辐合, 形成显著的低层水汽辐合中心; 该辐合配合高空急流入口区右侧的辐散, 共同导致垂直上升运动进一步增强, 最终触发降水。

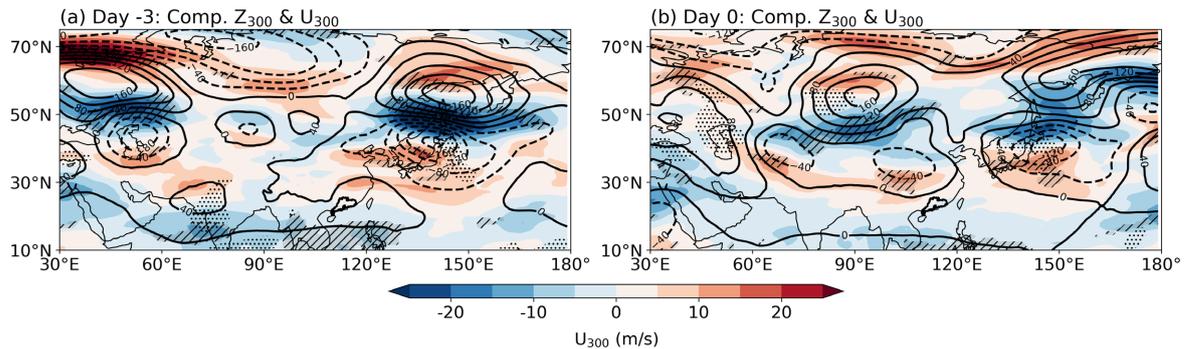


Figure 4. Composite of 300 hPa geopotential height anomalies (contours, gpm) and 300 hPa zonal wind anomalies (shading, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) for periods P1, P2, and P3 on day-3 (a) and day 0 (b) relative to the date of maximum precipitation. Dotted and hatched areas indicate that the geopotential height anomalies and zonal wind anomalies, respectively, denote significant values at the 95% confidence levels

图 4. P1, P2 和 P3 期在最大降水日前第 3 天(a) 和第 0 天(b) 的 300 hPa 位势高度异常(等值线, gpm)和 300 hPa 纬向风异常(填色, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)合成, 点状和斜线区域表示位势高度异常和纬向风异常达到了 95%显著性水平

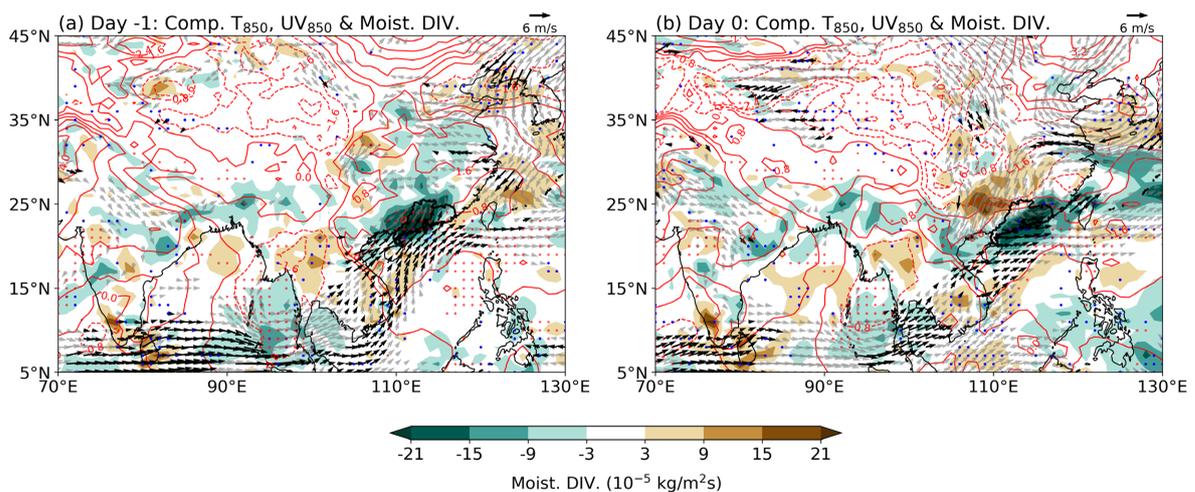


Figure 5. Composite of vertically integrated (1000~850 hPa) moisture flux divergence anomalies (shading, $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 850 hPa temperature anomalies (contours, $^{\circ}\text{C}$) and wind anomalies (vectors, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) for periods P1, P2, and P3 on day-1 (a) and day 0 (b) relative to the date of maximum precipitation. Vectors and dotted areas indicate significant values at the 95% confidence levels

图 5. P1, P2 和 P3 期在最大降水日前第 1 天(a)和第 0 天(b)的垂直积分(1000~850 hPa)水汽通量散度异常(填色, $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、850 hPa 温度异常(等值线, $^{\circ}\text{C}$)及风场异常(矢量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。箭头和点状区域表示达到了 95%显著性水平

3.4. 影响因子排序归因

我们将 2000 年 4 月海表面气温, 300 hPa 位势高度以及纬向风在 1951~2000 年共 50 年中进行排序, 结果表明中纬度西大西洋的海温以及位势高度强度均位于 50 年中的第一名(图 6(a), 图 6(b)), 即极暖的海温作为波源通过波能的传播形成并维持波列。在位势排序的空间图中(图 6(b)), 我们可以很明显的看到“西大西洋 - 东大西洋 - 西非 - 西亚 - 东亚”这支波列的空间分布以及各高低压中心的强度。并且在东亚低压的南侧, 存在一支极强的西风急流(图 6(c)), 这一配置表明, 源自西大西洋的异常热力强迫, 通过激发行星尺度的罗斯贝波列, 不仅能调制下游的准定常波列, 还可通过对急流的影响, 进一步强化下游

的动力环境, 影响此次极端降水。

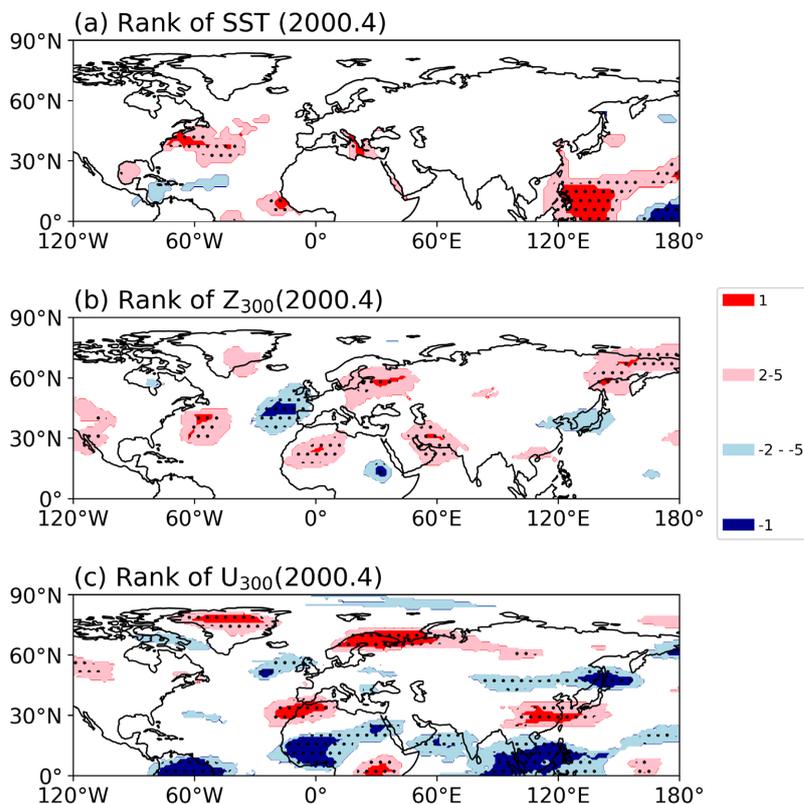


Figure 6. (a) Ranking of sea surface temperature in April 2000 compared to the same period from 1951 to 2000. (b and c) Same as (a), but for (b) 300 hPa geopotential height; and (c) 300 hPa zonal wind, respectively. The value of 1 indicates the highest rank, while -1 indicates the lowest rank. Dotted areas indicate significant values at the 95% confidence levels

图 6. (a) 2000 年 4 月海温在同期 1951~2000 年排序, (b) 和(c)同(a), 但为 300 hPa 位势高度和纬向风排序。1 表示排名第一, -1 表示排名最后

4. 总结

本文对 2000 年 4 月广东发生的极端降水事件(1951~2025 年 74 年中降水量排名第 2 位), 分析影响因素, 得到以下结论:

(1) 2000 年 4 月全省平均降水量为 424 毫米, 为 4 月气候平均值(172 毫米)的 2.5 倍, 主要有三次降水过程。

(2) 中纬度西大西洋的极端暖海温异常, 通过激发并向东频散的罗斯贝波列, 调制东亚急流, 并在广东地区的高空急流入口区右侧产生持续的动力强迫, 在充沛的水汽配合下, 形成降水。

参考文献

- [1] Ding, Y. (1992) Summer Monsoon Rainfalls in China. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II*, **70**, 373-396. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.70.1b_373
- [2] Gao, L., Huang, J., Chen, X., Chen, Y. and Liu, M. (2017) Risk of Extreme Precipitation under Nonstationarity Conditions during the Second Flood Season in the Southeastern Coastal Region of China. *Journal of Hydrometeorology*, **18**, 669-681. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0119.1>
- [3] Ma, W., Huang, W., Yang, Z., Wang, B., Lin, D. and He, X. (2018) Dynamic and Thermodynamic Factors Associated with Different Precipitation Regimes over South China during Pre-Monsoon Season. *Atmosphere*, **9**, Article 219.

- <https://doi.org/10.3390/atmos9060219>
- [4] Ding, Y. and Wang, Z. (2008) A Study of Rainy Seasons in China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **100**, 121-138. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0299-2>
- [5] Gu, W., Wang, L., Hu, Z., Hu, K. and Li, Y. (2018) Interannual Variations of the First Rainy Season Precipitation over South China. *Journal of Climate*, **31**, 623-640. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0284.1>
- [6] Jiang, Z., Zhang, D., Xia, R. and Qian, T. (2017) Diurnal Variations of Presummer Rainfall over Southern China. *Journal of Climate*, **30**, 755-773. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0666.1>
- [7] Xie, A., Chung, Y., Liu, X. and Ye, Q. (1998) The Interannual Variations of the Summer Monsoon Onset over the South China Sea. *Theoretical and Applied Climatology*, **59**, 201-213. <https://doi.org/10.1007/s007040050024>
- [8] Wang, B., LinHo., Zhang, Y. and Lu, M. (2004) Definition of South China Sea Monsoon Onset and Commencement of the East Asia Summer Monsoon. *Journal of Climate*, **17**, 699-710. <https://doi.org/10.1175/2932.1>
- [9] Fang, Y., Ke, W., Wen, C., Soi Kun, F. and Ka Cheng, L. (2010) Temporal Variations of the Frontal and Monsoon Storm Rainfall during the First Rainy Season in South China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **3**, 243-247. <https://doi.org/10.1080/16742834.2010.11446876>
- [10] Wu, R. and Kirtman, B.P. (2007) Observed Relationship of Spring and Summer East Asian Rainfall with Winter and Spring Eurasian Snow. *Journal of Climate*, **20**, 1285-1304. <https://doi.org/10.1175/jcli4068.1>
- [11] 邵太华, 张耀存. 冬季北大西洋涛动对中国春季降水异常的影响[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1225-1233.
- [12] Tennant, W.J. and Reason, C.J.C. (2005) Associations between the Global Energy Cycle and Regional Rainfall in South Africa and Southwest Australia. *Journal of Climate*, **18**, 3032-3047. <https://doi.org/10.1175/jcli3464.1>
- [13] 李建平, 高丽. 扰动位能理论及其应用——扰动位能的概念、表达及其时空结构[J]. 大气科学, 2006(5): 834-848.
- [14] Lorenz, E.N. (1955) Available Potential Energy and the Maintenance of the General Circulation. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **7**, 157-167. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v7i2.8796>
- [15] Sun, Y., Li, J., Wang, H., Li, R. and Tang, X. (2023) Extreme Rainfall in Northern China in September 2021 Tied to Air-Sea Multi-Factors. *Climate Dynamics*, **60**, 1987-2001. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06439-2>
- [16] 李艳杰, 李建平. 水平非均匀基流中行星波的传播[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 361-371.
- [17] Li, Y., Li, J., Jin, F.F. and Zhao, S. (2015) Interhemispheric Propagation of Stationary Rossby Waves in a Horizontally Nonuniform Background Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **72**, 3233-3256. <https://doi.org/10.1175/jas-d-14-0239.1>
- [18] Li, Y., Feng, J., Li, J. and Hu, A. (2019) Equatorial Windows and Barriers for Stationary Rossby Wave Propagation. *Journal of Climate*, **32**, 6117-6135. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0722.1>
- [19] Zhao, S., Li, J. and Li, Y. (2015) Dynamics of an Interhemispheric Teleconnection across the Critical Latitude through a Southerly Duct during Boreal Winter. *Journal of Climate*, **28**, 7437-7456. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00425.1>
- [20] Zhao, S., Li, J., Li, Y., Jin, F. and Zheng, J. (2018) Interhemispheric Influence of Indo-Pacific Convection Oscillation on Southern Hemisphere Rainfall through Southward Propagation of Rossby Waves. *Climate Dynamics*, **52**, 3203-3221. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4324-y>
- [21] Yang, Y. and Li, J. (2025) Novel Monsoon Indices Based on Vector Projection and Directed Angle for Measuring the East Asian Summer Monsoon. *Climate Dynamics*, **63**, Article No. 210. <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07696-7>