

2020 年长江中下游地区梅汛期强降水特征及其与对流层上层斜压

Rossby 波的关系

孙思远^{1,2,3} 管兆勇¹

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

3 国家气象中心, 北京 100081

摘要 2020年梅汛期(6-7月)长江中下游地区发生了严峻的汛情。2020年梅雨期长度和强度均远超历史平均水平。本文利用逐日NCEP/NCAR再分析资料和全球降水量网格数据集,研究了本次梅汛期降水特征及其与对流层上层斜压波动活动的联系。结果表明:本次梅汛期,长江中下游地区的总降水量和降水异常大值区位于安徽南部,共有7次连续的降水过程发生。长江中下游地区在对流层中低层辐合、高层辐散,且该地区上空有强的异常上升运动,有利于异常强降水的发生发展。同时,水汽自孟加拉湾和中国南海地区输送至长江中下游地区,为强降水的发生提供了充足水汽。利用小波分析该地区的逐日降水标准化时间序列时,发现其存在2-4天和6-14天的显著周期。高频(2-14天)扰动所显示的Rossby波动在对流层上层表现出向下游频散的特征,波动源于贝加尔湖附近。波扰动能量和通量所显示的波动向下游的传播过程与波包的传播过程较为一致,分别源于地中海和贝加尔湖附近的波扰动能向东或向东南频散至长江中下游地区,有利于该地区扰动加强并进而有利于强降水的发生和维持。以上结果加深了人们对2020年超长“暴力梅”成因的认识并可为有效预测类似事件提供线索。

关键词 梅雨 Rossby 波 长江中下游地区 2020 年

文章编号 2021006B

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21006

Features of heavy precipitation in the middle and lower reaches of Yangtze River during the Meiyu period of 2020 and its relationship with baroclinic Rossby wave in the upper troposphere

Sun Siyuan^{1,2,3} and Guan Zhaoyong¹

收稿日期 2021-01-11; **网络预出版日期**

作者简介 孙思远, 女, 1994年出生, 主要从事气候动力学研究。E-mail: sunsy@nuist.edu.cn

通讯作者 管兆勇, E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划重点专项2019YFC1510201, 公益性行业(气象)科研专项GYHY201406024, 江苏省PAPD项目

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2019YFC1510201), China Meteorological Administration Special Public Welfare Research Fund (Grant GYHY201406024), PAPD project of Jiangsu Province

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/ International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Center for Earth System Modeling and Prediction of CMA (CEMC), China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Abnormal heavy precipitation during the Meiyu period (June-July) in 2020 brings great economic property losses and human casualties to the middle and lower reaches of the Yangtze River, and the length and intensity of precipitation in this Meiyu period are far exceeded the historical average. Using daily NCEP/NCAR reanalysis data and CPC global daily precipitation data, the features of heavy precipitation and its relationship with baroclinic Rossby wave in the upper troposphere is investigated in this paper. The results show that the total precipitation and precipitation anomalies in the middle and lower reaches of the Yangtze River are located in the southern part of Anhui Province, and there are seven consecutive precipitation processes. In the middle and lower reaches of the Yangtze River, there is convergence in the middle and lower troposphere accompanied by dispersion in the upper troposphere, and there is strong anomalous upward motion over the region, which is favorable to the development of anomalous heavy precipitation. At the same time, water vapor is transported from the Bay of Bengal and the South China Sea to the middle and lower reaches of the Yangtze River, which provides sufficient water vapor for the occurrence of heavy precipitation. When the standardized time series of daily precipitation in this region were analyzed by using wavelets, significant cycles of 2-4 day and 6-14 day are found. The Rossby fluctuations shown by high frequency (2-14 day) perturbations exhibit a downstream dispersion in the upper troposphere, with fluctuations originating near Lake Baikal. The propagation process of the fluctuations downstream shown by the wave disturbance energy and flux is more consistent with that of the wave packet. The wave disturbances originating near the Mediterranean Sea and Lake Baikal, respectively, can disperse eastward or southeastward to the middle and lower reaches of the Yangtze River. The energy transmitted to the middle and lower reaches of the Yangtze River favors the intensification of the disturbance in this region and thus the occurrence and maintenance of heavy precipitation. The above results improve the understanding of the causes of the super-long "violent Meiyu" in 2020 and may provide clues for effective prediction of similar events.

Keywords Meiyu, Rossby wave, The middle and lower reaches of the Yangtze River, Year 2020

1 引言

梅雨是东亚夏季风向北推进时于我国东部地区产生的现象。梅雨通常发生于初夏（6月中旬至7月上旬），其在雨季的降水量级、分布、持续时间及雨带移动方面有特殊表现（Wang and Lin, 2002；俞亚勋等，2013；陈艳丽等，2016；唐玉和李栋梁，2020），且存在较大的年际和年代际变化（魏凤英和谢宇，2005；梁萍等，2018）。长江中下游地区梅汛期降水

在 1970s/1980s 和 1990s/2000s 存在两次转折, 分别是少梅期向多梅期、多梅期向少梅期的转变(蒋薇和高辉, 2013; 柏玲等, 2015), 同时, 有研究发现该地区梅雨期长度通常与梅雨期的降水量成正比(郝志新等, 2009)。2020 年梅雨季持续时间(62 天), 与 2015 年并列, 是 1961 年以来历史最长的梅雨季。超长梅汛期(6-7 月)使得我国遭遇了 1998 年以来最为严峻的汛情, 洪涝灾害致使 28 个省份 7000 多万人次受灾。受持续性的强降水影响, 中央气象台自 6 月 2 日至 7 月 11 日连续发布暴雨预警, 长江流域在梅汛期更是发生了 3 次编号洪水, 洪水严重地威胁了长江中下游地区人民生命和财产安全。幸运的是, 由于三峡水利工程的建成、近年河湖调蓄能力的上升以及各部门的联合部署, 2020 年梅汛期的受灾损失要远小于 1998 年。尽管如此, 为了进一步提高梅汛期强降水的预报能力, 并为防灾减灾提供技术支持, 具体分析 2020 年梅汛期强降水的成因仍是十分必要的。

前人针对长江中下游地区梅汛期强降水的成因已展开了大量工作。东亚夏季风系统的配置对梅汛期的持续时间和降水强度均有很大影响(Li et al, 2001; 梁萍和何金海, 2007; 丁婷和高辉, 2020)。例如, 南海夏季风弱年, 长江中下游地区多雨(吴尚森等, 2003); 西太平洋副热带高压(西太副高)异常对长江中下游地区的梅雨期降水量亦有很大的影响(钱代丽和管兆勇, 2020), 西太副高强度的增强(陈菊香等, 2006)和位置的异常偏西(邓汗青和罗勇, 2013)可能会触发异常偏多的降水。梅汛期降水强度和位置还与梅雨锋及锋面上的中尺度系统活动有关, 对流单体的列车效应易造成持续性的降水异常(赵玉春, 2011; 赵宇等, 2018), 而梅雨锋生强度的年际变化与梅雨发生时间也较为一致(侯俊和管兆勇, 2013)。此外, 青藏高原对流系统的东移和西南低涡的触发, 对梅雨锋地区强降水十分有利(傅慎明等, 2011; Li et al, 2020)。吴志伟等(2006)分析梅汛期降水和前期春季南半球年际模态时, 发现两者存在很好的正相关, 而前期春季南半球年际模态又与东亚大气环流异常联系密切。还有学者研究发现, 全球海温与长江中下游地区梅雨在不同时间尺度上的相关性较好, 且较长时间尺度的相关更为显著(周丽和魏凤英, 2006); 处于发展位相的 El Niño 事件通常有利于长江中下游夏季降水偏多, 同期的河套地区和印度中部地区降水偏少(Zhang et al, 2020); 祁莉等(2014)在分析前期西太平洋暖池和长江中下游地区夏季降水时, 发现两者的显著负相关超前 2 个季节。

除了上述研究所揭示的梅雨的成因和影响因子, 长江中下游地区降水异常与对流层上层斜压 Rossby 波活动的联系也有尤为密切的联系(Bueh et al, 2008; 杨宁等, 2020)。斜压 Rossby 波及其在一定条件下组织成的波包是中纬度高影响天气变化的重要预报因子和制造者。Rossby 波的下流发展等理论也被广泛应用(陶诗言等, 2010), Rossby 波及斜压波包通常沿高空副热带急流较为连贯的传播, 斜压波包可能为下游地区提供异常降水所需的扰动能量(刘思佳等, 2018)。以 1998 年为例, 长江流域的强降水配合着更为频繁、维持时间更久的波包活动(谭本植和潘旭辉, 2002), 且与梅雨较弱的 1997 年相比, 1997 年的波包活动没有明显上游效应(梅士龙和管兆勇, 2009)。叶德超等(2019)以 2016 年为例得到

类似的结论，发现 2016 年长江中下游地区强降水与斜压波包存在信息传递，是导致当年梅雨期强降水发生的成因之一。而影响长江中下游地区梅汛期各次强降水过程的 Rossby 波源有所不同（李慧等，2019），但大多源于上游地区。此外，在年际和年代际尺度上，Rossby 波列对长江中下游地区降水的影响分别表现出局地性和连续性，且扰动能量对该地区的影响也有很大不同（李明刚等，2016）。

综上所述，已有众多针对上游波包活动对位于下游的长江中下游地区梅汛期降水异常的影响的相关研究，但 2020 年该地区梅汛期强降水是否仍与对流层上层 Rossby 波活动有关，还需进一步明确，这也有助于验证前人的相关结论并为未来梅汛期强降水的预报预测提供线索。

2 资料和方法

本文的研究时段为 2020 年梅汛期，使用的资料有：

- （1）NCEP/NCAR 逐日再分析资料，使用的变量有经向风、纬向风、垂直速度、位势高度、比湿等，资料水平空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ；
- （2）NCEP/Climate Prediction Center 全球逐日降水量网格数据集（CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation），资料水平空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ；
- （3）国家气候中心公布的西太副高脊线位置的逐日变化序列。

各变量的异常定义为该变量与其气候平均值之间的偏差，并采用 1981 - 2010 年共 30 年的平均值作为气候平均（逐日气候场）。采用 Morlet 小波分析方法（Torrence and Compo, 1998）和 Lanczos 滤波器（Duchon, 1979），在分析时间序列的周期特征后对变量进行带通滤波。

中纬度对流层上层（300hPa）斜压波的典型波数具有年际差异（Ye et al, 2019），因而在分析波包前，需要先确定 2020 年扰动经向风或滤波后的经向风的纬向波数。之后采用 Hilbert 变换来做包络分析（Zimin et al, 2003），波包络的表达式为 $Ve = \text{abs}(v' + i * \hat{v}')$ ，其中 v' 表示 300hPa 的扰动经向风或滤波后的经向风， $\hat{v}'$ 表示 v' 的 Hilbert 变换，所得的 Ve 则表示波包参数。

波作用通量是诊断 Rossby 波能传播的有力工具。Takaya and Nakamura（2001）推导了三维波作用通量，可以用来对大气 Rossby 波扰动能量的传播特征进行诊断（Nishii and Nakamura, 2005），其水平分量在 p 坐标中的表达式为：

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_r + \mathbf{C}_U M, \quad (1)$$

$$\mathbf{W}_r = \frac{p}{2|\mathbf{U}|} \begin{bmatrix} U(\psi_x'^2 - \psi' \psi_{xx}') + V(\psi_x' \psi_y' - \psi' \psi_{xy}') \\ U(\psi_x' \psi_y' - \psi' \psi_{xy}') + V(\psi_y'^2 - \psi' \psi_{yy}') \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中， $\mathbf{U} = (U, V)^T$ 为基本流场， ψ' 为准地转扰动流函数， $\mathbf{W}_r$ 为波扰动能量通量，其散度为负时，表示波作用通量 $\mathbf{W}$ 因能量辐合而增大，反之（散度为正）表示 $\mathbf{W}$ 因能量辐散而减

弱。

3 2020 年梅汛期降水时空特征和环流背景特征

2020 年我国梅汛期降水主要集中在长江流域，大值中心位于安徽南部，总降水量超过 1400mm（图 1a，等值线），其中安徽黄山地区连续降水日数突破历史极值。从降水异常场中（图 1a，阴影）则可以看出，在华南、华北东部和东北东南部降水异常偏少，在长江流域和东北北部降水异常偏多，降水异常偏多的大值中心同样位于安徽南部，降水量偏多超过 900mm，因此，本文选择降水量和降水正异常的大值中心[29.25°N - 32.25°N，114.75°E - 119.25°E]作为主要研究区域（图 1a，橘色矩形框，记为 Box-A）。从垂直环流异常场（图 1b）中可以看出，在 15°N 附近的对流层上层 300hPa 为异常场的正值中心，对应较强的下沉运动，而在长江中下游地区 30°N 附近的对流层中层为负值中心，说明此处有较强的上升运动，有利于强降水的发生。同时，从整层积分（地面至 300hPa）的水汽通量散度场（图 1c）中可以看出，水汽从孟加拉湾和中国南海传送到长江中下游地区，并在此处汇聚，这为强降水的发生提供了足够的水汽条件。

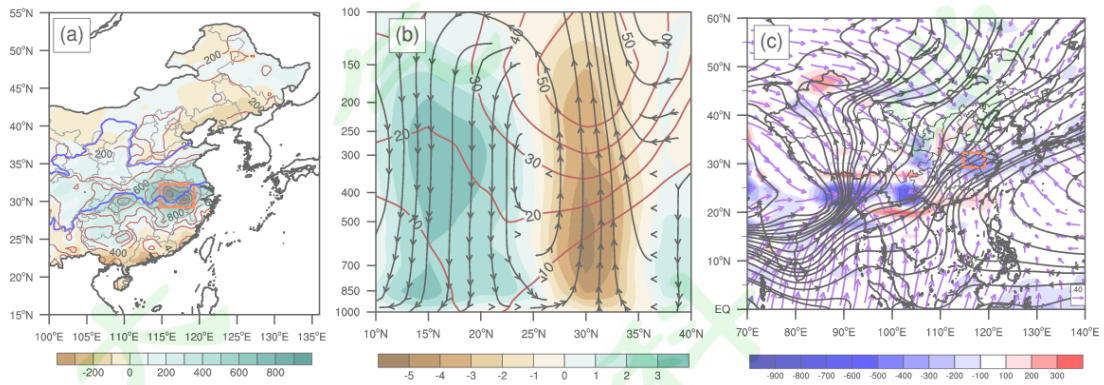


图 1 2020 年梅汛期 (a) 中国东部地区总降水量（等值线，单位：mm）和降水距平（阴影，单位：mm），蓝色粗实线为长江黄河；(b) [112.5°E - 120°E] 经向平均的经向环流异常场（流线）、位势高度异常场（等值线，单位：m）和垂直速度异常场（阴影，单位： 10^{-2} Pa/s）的垂直剖面图；(c) 整层积分的水汽通量散度（阴影，单位： 10^6 Kg/s）及其辐散分量（箭头，单位：Kg/(m·s)）和旋转分量（流线，单位：Kg/(m·s)）。(a) 和 (c) 中的橘色矩形框为本文所选的研究范围。

Fig.1 (a) Total precipitation (contours, unit: mm) and precipitation anomalies (shaded, unit: mm) in eastern China during the Meiyu period of 2020, with the thick blue solid line for the Yangtze River and Yellow River; (b) anomalous meridional circulation (streamlines), anomalous geopotential height (contours, unit: m), and anomalous vertical velocity (shaded, unit: 10^{-2} Pa/s) in vertical profiles; (c) water vapor flux dispersion (shaded, unit: 10^6 Kg/s) and its radiative dispersion component (arrows, unit: Kg/(m·s)) and rotational component (streamlines, unit: Kg/(m·s)) for the whole-layer integral. The orange rectangular boxes in (a) and (c) are the selected study areas in this paper.

从 Box-A（即长江中下游地区降水的主体区域）区域平均的降水时间序列中，可以发现该地区明显的降水过程有 7 次（图 2a），且自 6 月 1 日至 7 月 31 日，梅汛期的 7 次降水过程较为连续，因而造成了长江中下游地区严重的洪涝灾害。西太副高的脊线位置在 8 月初北

跳，此时雨带离开长江中下游地区，华北东北地区进入汛期。选择每次降水过程降水量级最大的那天作为极值日（表 1），极值日的平均总降水量与其前一日相比明显增强，同样也在安徽南部存在大值中心，最大值超过 45mm/d（图 2b），这一结论也进一步证明了我们所选区域的合理性。此外，发生在 7 月的最后两次降水过程的极值日与长江 2 号（7 月 17 日）和 3 号洪水（7 月 26 日）有较好的对应，虽然长江流域 1 号洪水当日（7 月 2 日）的降水量也较大，但此次过程的极值日在 7 月 5 号（表 1）。

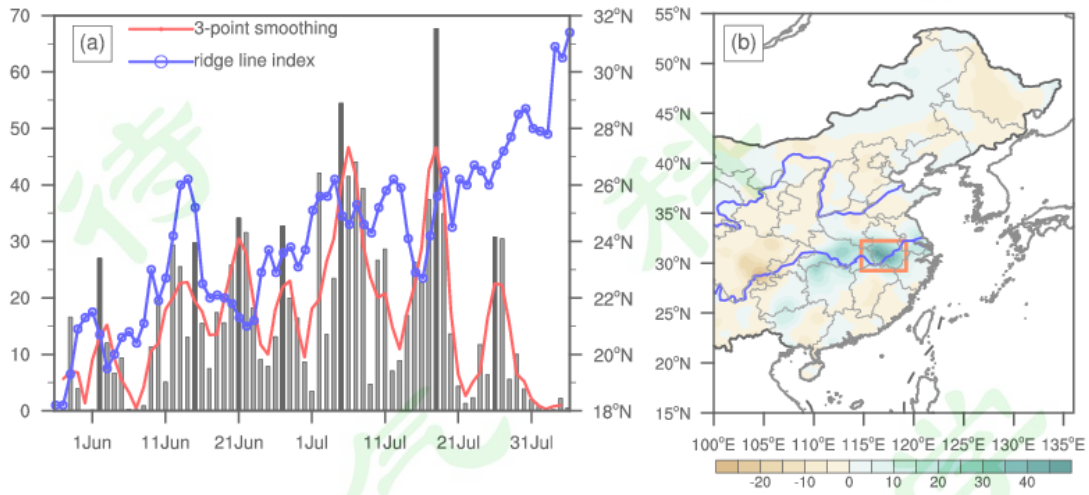


图 2 2020 年梅汛期 (a) 长江中下游地区区域平均的逐日降水（左侧纵坐标轴，单位：mm）和西太副高的脊线位置（右侧坐标轴，蓝色实线）的时间序列，其中 (a) 中红色实线表示三点滑动平均，黑色柱状为每次过程的极值日；(b) 极值日与其前一日降水量之差的分布（单位：mm/d），橘色矩形框为本文所选的研究范围。

Fig.2 The time series of (a) the regional average of daily precipitation (left Y-axis, unit: mm) and the position of the ridge of the western Pacific paramount (right Y-axis, blue solid line) in the middle and lower reaches of the Yangtze River during the Meiyu period of 2020, where (a) the red solid line in (a) indicates the three-point sliding average, and the black bar is the extreme day of each process; (b) the distribution of the difference between the extreme day and its precipitation of the previous day (unit: mm/d). The orange rectangular box is the research range selected in this paper.

表 1 长江中下游地区区域平均的 7 次降水过程极值日的日期、降水量和西太副高的脊线位置
Table.1 Dates of 7 extremes of precipitation and the corresponding amount precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River, as well as the ridge location of the Western Pacific Subtropical High

次序	日期	降水（mm）	脊线位置（°N）
1	6 月 2 日	26.97	20.7
2	6 月 15 日	29.75	25.2
3	6 月 21 日	34.14	21.3
4	6 月 27 日	32.68	23.6
5	7 月 5 日	54.45	24.9
6	7 月 18 日	67.70	25.6
7	7 月 26 日	30.77	26.7

环流异常决定了持续性强降水的分布。由图 3a - c 可以看出，对流层低层的异常环流在中国东部地区自南向北呈“反气旋 - 气旋 - 反气旋”的水平分布，位于西太平洋的异常反气旋则可能携源自中国南海的水汽为长江中下游地区提供异常强降水所需的充足水汽，此外，长江中下游地区低空盛行异常西南风（图 3a）；在对流层中上层，中国南方地区则主要受异常反气旋性环流控制，长江中下游地区上空盛行偏西风（图 3b、c）。长江中下游地区在对流层中低层有明显的辐合，在对流层上层有明显的辐散，而利于异常上升运动的形成和维持。高空亚洲西风急流带呈东西走向（图 3d），连贯性好且西风带中的西风较强，轴线位于 37.5°N 附近。在里海和日本海附近分别有明显的西风大值区，对应的是急流入口区和出口区。整体而言，高空的环流形势利于 Rossby 波及其在一定条件下组织成的波包沿这条波导向下游传播（Ambrizzi and Hoskins, 1997）。

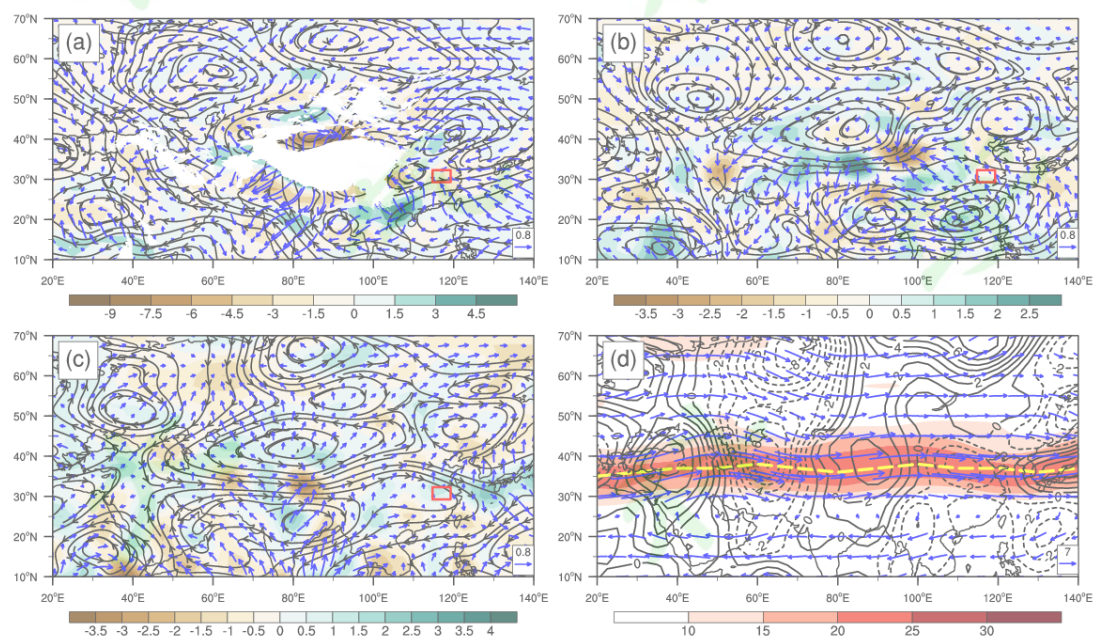


图 3 2020 年梅汛期 (a) 850hPa、(b) 500hPa、(c) 300hPa 高度上异常旋转风场（流线，单位： m/s ）、辐散风场（箭头表示通过 90% 信度 t 检验，单位： m/s ）和散度（阴影，单位： 10^{-6}s^{-1} ）分布以及 (d) 300hPa 高度上的环流场，(d) 中阴影为纬向风，等值线为经向风，箭头为流场（单位： m/s ），黄色虚线为急流轴。

Fig.3 The anomalous circulations at (a) 850hPa, (b) 500hPa, (c) 300hPa, and (d) the circulation at 300hPa during Meiyu period of 2020. Shown in (a, b, c) are the divergence (shaded, unit: 10^{-6}s^{-1}), rotational component (streamlines, unit: m/s), divergent component (arrows, unit: m/s) of the anomalous winds. Shown in (d) are the latitudinal wind (shaded, unit: m/s), the meridional wind (contours, unit: m/s), the arrow is the flow field (unit: m/s), and the yellow dashed line is the westerly jet-stream axis.

为进一步了解扰动变化过程，需对 7 次过程极值日（day0，表 1）及其前后 4 天的环流场进行合成分析。在极值日前后四天的 850hPa 合成环流距平场中可以看出：在 day-4 时，Box-A 受反气旋性环流控制，在 Box-A 的西北侧有一气旋性环流，该地区上空主要为西南

风（图 4a）；在 day-3 和 day-2 时，Box-A 受气旋性环流控制，上空主要为西北风或偏北风（图 4b 和 4c），气旋性环流中心西移减弱；在 day-1 时，Box-A 受中心位于菲律宾群岛的反气旋性环流控制，上空主要为西南风（图 4d）；在 day0 时，Box-A 南侧受中心位于中国南海的反气旋性环流影响，北侧受中心位于外兴安岭附近的气旋性环流影响，反气旋环流中心与前一日相比有明显的增强北抬，同时，气旋性环流中心局地增强显著，在 Box-A 上空存在西北风和西南风的辐合（图 4e）；在 day+1 和 day+2 时，Box-A 受中心位于中国东北的气旋性环流控制，上空主要为西南风（图 4f 和 4g），气旋性环流中心有明显南移；在 day+3 时，Box-A 受中心位于朝鲜半岛的气旋性环流影响，环流中心继续南移，上空主要为东北风（图 4h）；在 day+4 时，Box-A 受中心位于黄海附近的反气旋性环流控制，上空主要为偏东风（图 4i）。

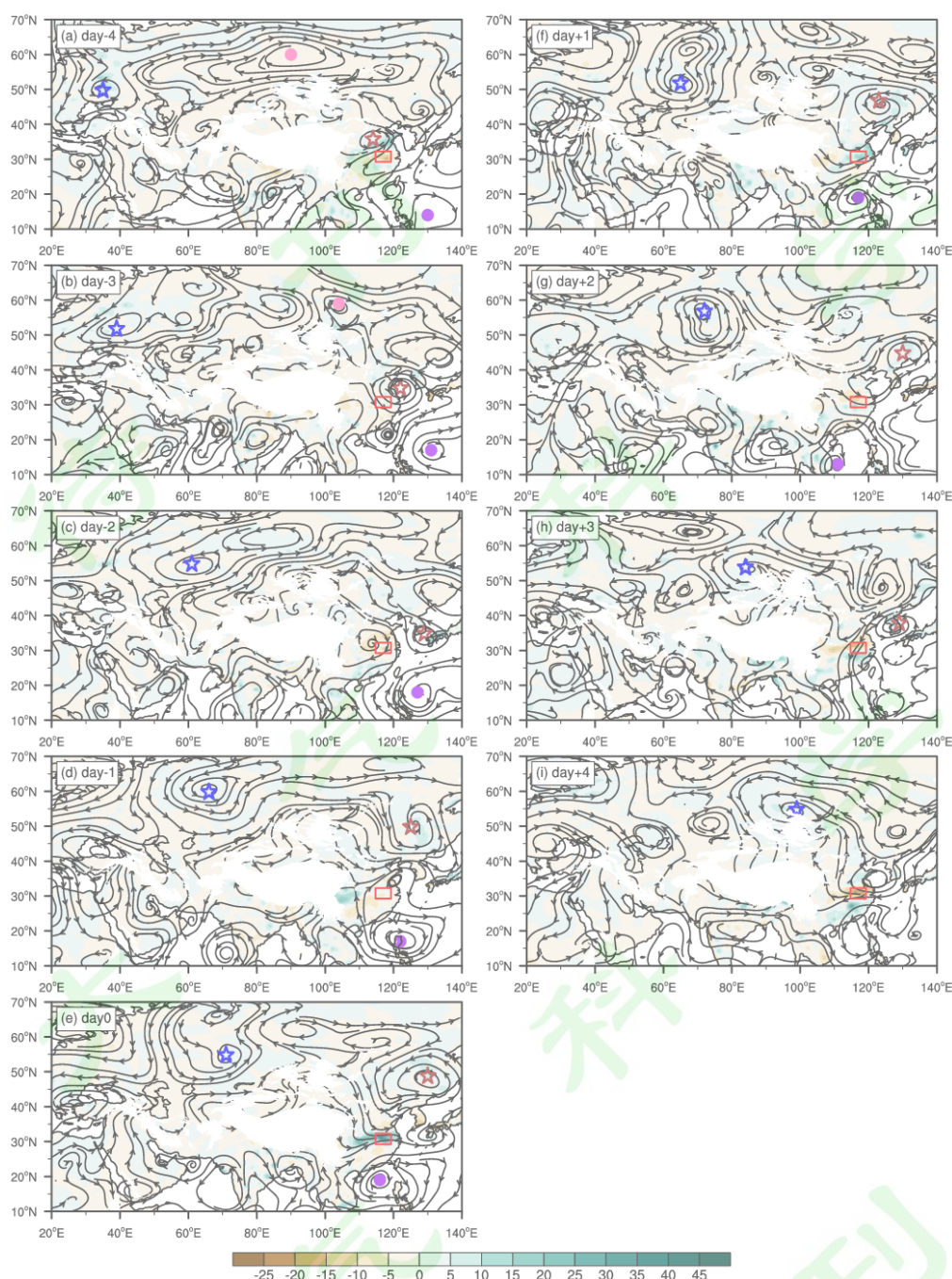


图 4 极值日前后 4 天 850hPa 上合成环流距平场（流线，单位：m/s）和降水距平场（阴影，单位：mm）
Fig.4 Composites of circulation anomalies (streamlines, unit: m/s) and precipitation anomalies (shaded, unit: mm) over 850hPa at 4 days before and after the extreme day

概括起来, 850hPa 上位于低纬度菲律宾附近的异常反气旋(图 4 中的紫色圆点)在 day-4 至 day+4 的 9 天时间里存在逐步且连续的西伸过程, 中高纬度 (50°N - 60°N) 处存在异常反气旋(图 4 中粉色圆点)东移, 后被同样逐渐东移的异常气旋(图 4 中蓝色星形)取代。而 Box-A 区域处于异常气旋(图 4 中棕色星形)或反气旋(图 4 中的紫色圆点)的边缘, 但在 day0 当日, Box-A 上空有明显的西北风和西南风的辐合, 这种环流分布有利于西风辐合型锋生的加强(易兵等, 1991; Hou and Guan, 2013), 进而利于强降水的发生。

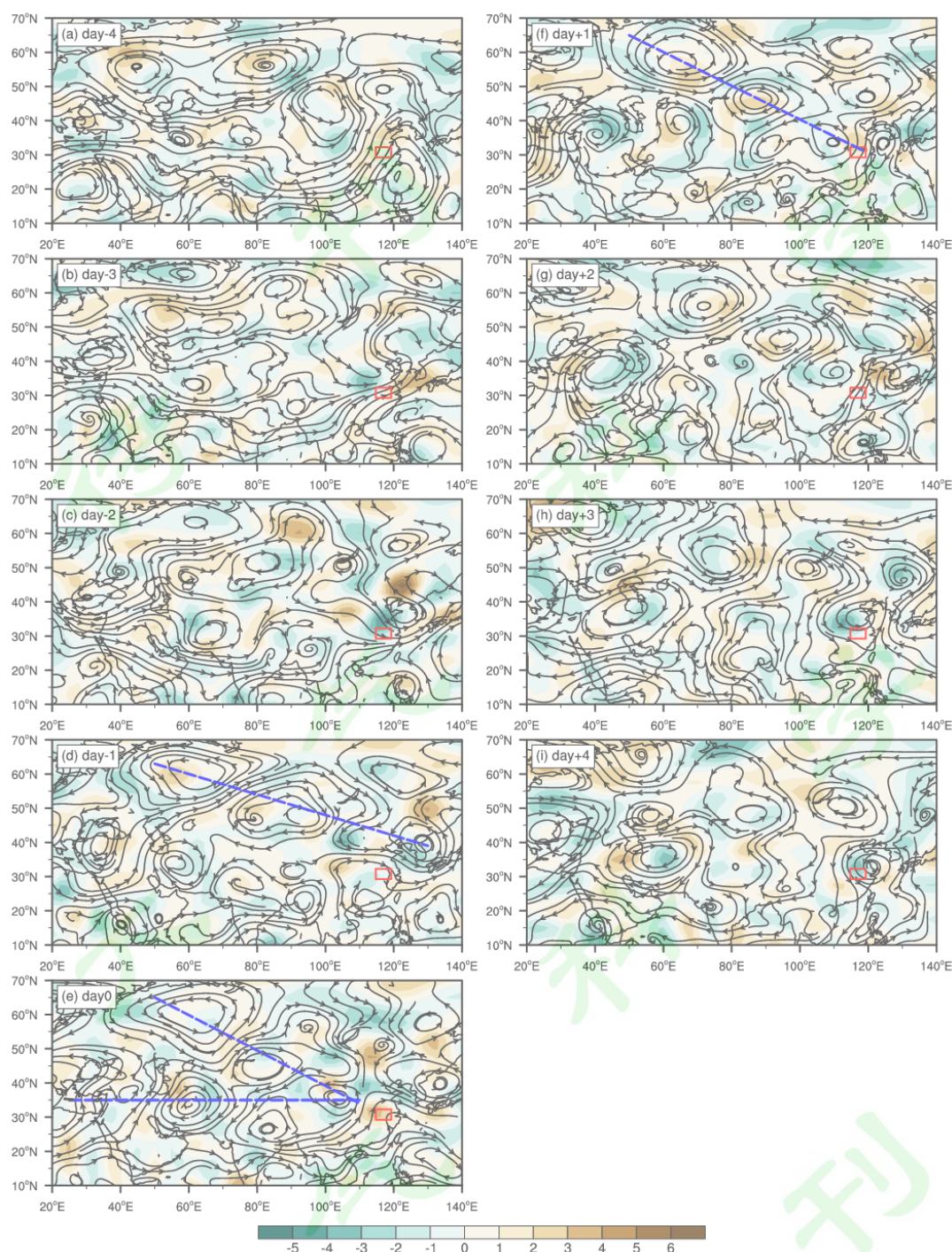


图5 极值日前后4天300hPa上合成环流距平场(流线,单位: m/s)和风场的散度距平场(阴影,单位: 1/s)

Fig.5 Composites of circulation anomalies (streamlines, unit: m/s) and divergence anomalies of the wind field (shaded, unit: 1/s) over 300hPa at 4 days before and after the extreme day

在300hPa上,极值日前后四天异常环流变化的主要特征表现为:在day-4至day-2时,Box-A地区上空由西南风转为偏西风,Box-A在day-4受中心位于台湾地区的反气旋性环流和中心位于贝加尔湖西南侧的气旋性环流影响,反气旋环流和气旋环流中心在day-3和day-2持续减弱并向东南方向移动(图5a-c);在day-1时,Box-A受反气旋性环流影响,上空主要为偏西风(图5d);在day0时,Box-A受中心位于西太平洋的反气旋性环流控制,上

空主要为西南风（图 5e）；在 day+1 至 day+2 时，Box-A 地区上空主要为西北风，Box-A 在 day+1 受中心位于黄海的反气旋性环流(东侧)和中心位于黄土高原附近的气旋性环流(西侧)的共同影响，反气旋环流中心和气旋性环流中心随后分别东移至日本海和江淮地区（图 5f - g）；在 day+3 和 day+4 时，Box-A 受中心位于江淮地区的气旋性环流控制，上空由偏西风转为西南风（图 5h - i）。

在极值日前后四天的降水距平场和 300hPa 风场的散度距平场中可以看出：在 day-4 至 day-1 和 day+2 至 day+4，降水均呈负距平；在 day0 至 day+1，降水呈正距平。相应地，Box-A 上空 300hPa 风场在 day-4 至 day-1 和 day+2 至 day+4 期间辐合，而在 day0 至 day+1 有显著的辐散。高空辐散有利于强上升运动的形成，进一步利于该地区强降水的发生发展。

整体而言，Box-A 地区上空在整个降水过程中受斜压性环流的控制，对流层高低层环流系统存在明显的东移过程，与降水过程的变化较好的一致性。特别的，降水主要集中在 day0 和 day+1。此外，还可以注意到图 5 所示的对流层上层异常环流在 day-1 至 day+1 的三天时间里，存在着自西北向东南排列的“气旋 - 反气旋 - 气旋”样的波列状扰动异常（图 5 中蓝色虚线所示），在中纬度 35°N 附近亦存在这种波列状的扰动环流结构。

4 与长江中下游地区梅汛期强降水相关的 Rossby 波活动特征

对梅汛期长江中下游地区区域平均的逐日标准化降水序列进行功率谱分析，可以发现其在不同时段存在 2 - 4 天和 6 - 14 天的显著周期（图 6a 和 6b）。随后，对逐日资料进行滤波处理，根据 Lanczos 带通滤波器得到 2 - 14 天的高频分量，进而更有针对性地分析对流层上层 Rossby 波活动的特征。

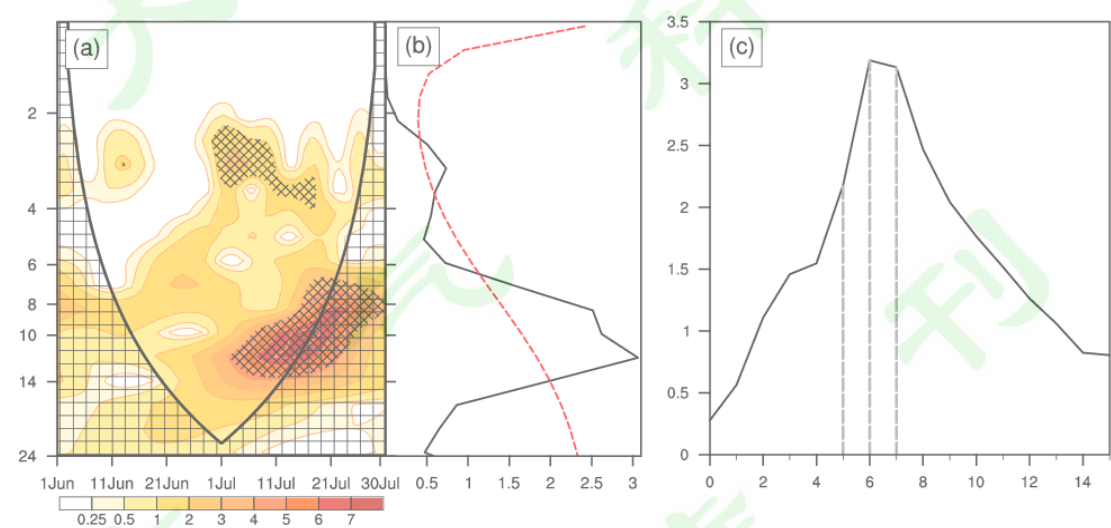


图 6 长江中下游地区区域平均的逐日标准化降水的 Morlet 小波功率谱分析（a，图中阴影区域为功率谱值，打点区域为通过 0.1 信度水平的红噪声检验，网格线处为边界效应）、时间平均功率谱（b，图中红色虚线为红噪声检验）以及 300hPa 高频经向风场在 30°N - 60°N 纬带上的功率谱（c），横轴为波数，纵轴为功率谱值

Fig.6 Morlet wavelet power spectrum analysis of the standardized daily regional average precipitation over the

middle and lower reaches of the Yangtze River (a, the shaded area in the figure is the power spectrum value, and the dotted area is the red noise test passing the 0.1 confidence level, with boundary effects at the grid lines), the time-averaged power spectrum (b, the red dotted line in the figure is the red noise test), and the power spectrum of the 300hPa high-frequency meridional wind field over [30°N - 60°N] (c). The horizontal axis in (c) is the number of waves and the vertical axis is the power spectrum value

2020 年梅汛期对流层上层斜压波的典型波数为 5 - 7 波（图 6c），使用 Hilbert 变换从高频经向风 v' 中提取出斜压波包参数 Ve ，利用一点相关和回归等方法对该参数进行分析（Chang and Yu, 1999），明确 2020 年梅汛期强降水期间 300hPa 高度上波包与波能的传播过程。图 7 给出了该地区波列 v' 和波包 Ve 的一点相关关系（图 7 阴影和等值线），其中选择梅汛期降水极值中心（30°N，117.5°E）作为基点（图 1a）。由图可见，波列在整个传播过程中明显向下游频散，波包向下游频散则主要始于 -1d。

当空间场超前于基点 3 天（-3d）时，波列的负相关中心位于贝加尔湖西侧、正相关中心位于贝加尔湖附近，此时，还可以在基点附近观察到前次过程的结束。-2d 时，波列的正负相关中心均明显增强，负相关中心有显著的南移，正相关中心则有显著的向东移动。-1d 时，波列的正负相关中心持续增强并南移，而波包的正相关中心位于基点上游地区（35°N，110°E）附近。0d 时，波列的正相关中心向东南方向移动至基点处，负相关中心也持续向东南方向移动；同时，波包正相关中心移动至基点。+1d 时，波列和波包减弱东移。波作用通量 W_r 进一步显示出波扰动能量向下游频散的过程，与波列的频散特征较为一致。可以发现，在 -3d 时的波能传播为上次过程的结束，当日在上游地区的地中海附近有明显的能量辐散，相对于基本气流，Rossby 波波能向东和向东南方向频散。在 -2d 时，波能辐散中心位于地中海和黑海附近，与前一日相比，波能中心略向东移，同时贝加尔湖附近也有明显的波能向东和向东南的频散。尤其是在 -1d 至 +1d 更为清楚，特别是在 0d 时两支波扰动能量对下游地区有明显的影响。此外，根据波列的相关中心位置，可以大致推算出 2020 年梅汛期 Rossby 波的相速度约为 4°lon./d，而群速度约为 10°lon./d，群速度明显大于相速度。

已有研究发现，波包活动在 1998 年和 2016 年同样发生在长江流域的极端梅汛期期间主要起源于里海和黑海附近（梅士龙和管兆勇，2009；叶德超等，2019）。看上去，这与 2020 年波包活动的源地不同，但一致的是，波包活动均沿高空西风急流自上游地区向下游频散，对下游地区的极端强降水事件产生一定影响。

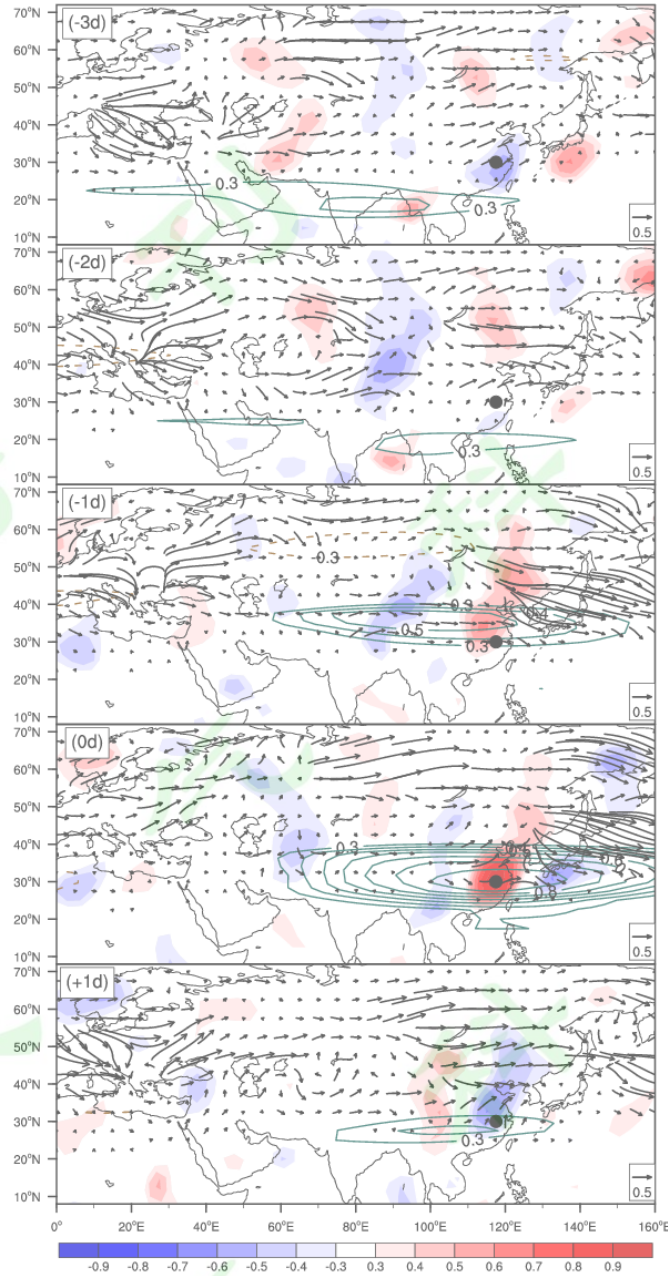


图 7 长江中下游地区 Box-A 梅汛期 300hPa 基点处 v' (阴影) 和 Ve (等值线) 与相应的整个场在 -3d 至 +1d 的一点相关以及相应的对基点 h' 回归的波作用通量 W_r (箭头, 单位: m^2/s^2)。相关系数 ≥ 0.3 即为通过 90% 的显著性检验, 阴影和等值线间隔为 0.1, 绿色等值线为正相关, 棕色等值线为负相关, 黑色实心圆点为基点。

Fig.7 One-point correlations of v' (Ve) at base point of Box-A in the middle and lower reaches of Yangtze River with the v' (Ve) at 300hPa in the whole field, and the corresponding wave action fluxes (arrows, unit: m^2/s^2) for the regression of h' at the base point. The time-lags are set in range from -3d to +1d. Contour intervals of correlations for both v' and Ve are 0.1. The correlation coefficient of 0.3 is found to be the value at 90% confidence level using a t -test. The solid green line is the positive correlation, the dashed brown line is the negative correlation, and the solid black dot is the base point.

准地转扰动流函数 ψ' 相对于由其纬向梯度表示的扰动经向风而言，其空间变化更为平滑。为进一步揭示波包活动特征，这里使用 ψ' 进行 Hilbert 变换提取出波包络 ψ_e ，再利用一点相关对 ψ' 和 ψ_e 进行分析，仍可得到相似结论（图 8）。由图可见，波包向下游的移动则主要始于-2d，波包的正负相关中心沿经向传播明显，波包的相关中心自西北向东南移动，整个传播过程维持约 4 天。

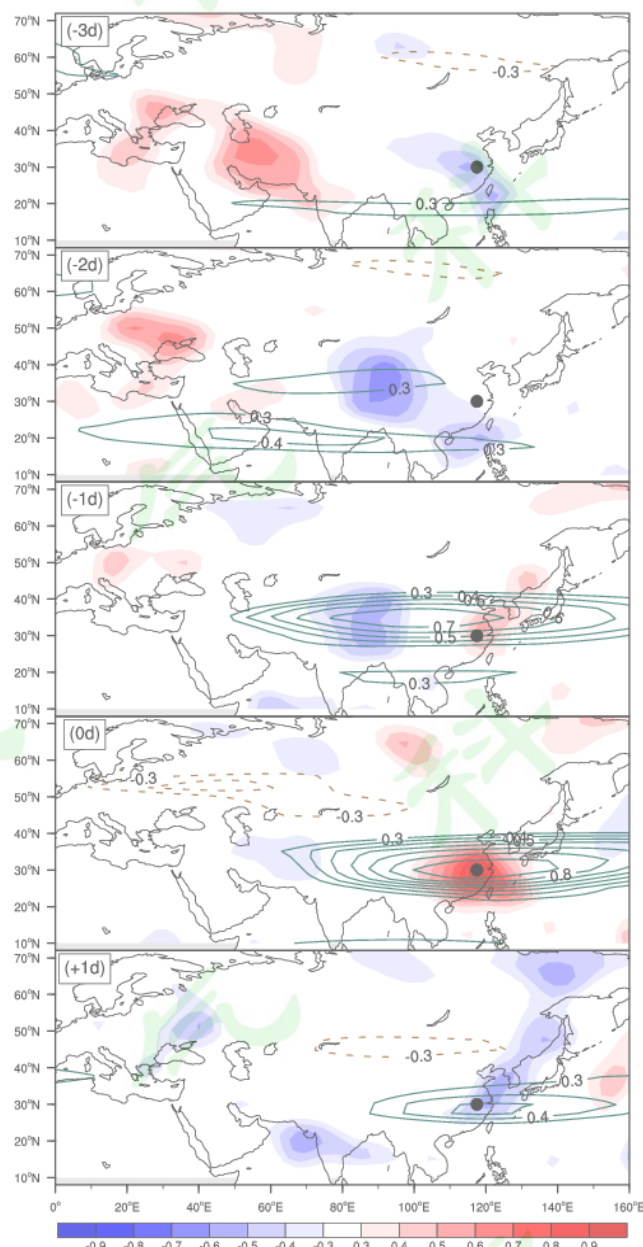


图 8 长江中下游地区 Box-A 梅汛期 300hPa 基点处 ψ' （阴影）和 ψ_e （等值线）与相应的整个场在-3d 至+1d 的一点相关。相关系数 ≥ 0.3 即为通过 90%的显著性检验，阴影和等值线间隔为 0.1，绿色等值线为正相关，棕色等值线为负相关，黑色实心圆点为基点。

Fig.8 One-point correlations of ψ' (ψ_e) at base point of Box-A in the middle and lower reaches of Yangtze River with the ψ' (ψ_e) at 300hPa in the whole field. The time-lags are set in range from -3d to +1d.

Contour intervals of correlations for both ψ' and ψ_e are 0.1. The correlation coefficient of 0.3 is found to be the value at 90% confidence level using a t -test. The solid green line is the positive correlation, the dashed brown line is the negative correlation, and the solid black dot is the base point.

5 总结

本文利用再分析资料对长江中下游地区 2020 年超长“暴力梅”的降水特征和环流与波活动特征进行了分析, 得到以下结论:

(1) 2020 年梅汛期强降水致使长江中下游地区出现了严重的暴雨洪涝灾害, 降水和降水异常大值中心位于安徽南部, 在梅汛期(6-7 月)共有 7 次降水过程, 其中 6 月发生 4 次, 7 月有 3 次过程。该地区梅汛期的 61 天内, 降水时间序列主要存在 2-4 天和 6-14 天的变化周期。

(2) 2020 年梅汛期长江中下游地区在对流层中低层辐合、高层辐散, 且该地区上空有较强的异常上升运动, 为异常强降水提供了有利的动力条件。同时, 位于西太平洋的异常反气旋携源于孟加拉湾和中国南海地区的水汽在长江中下游地区汇集, 为异常强降水提供了有利的水汽条件。长江中下游地区 7 次降水过程中, 该地区上空受斜压性环流控制, 环流系统逐步东移, 与降水过程的变化相对应。

(3) 2020 年梅汛期长江中下游强降水与对流层上层斜压 Rossby 波活动关系密切。梅汛期高空亚洲西风急流带连贯性好且西风较强, 为上游高频波列和波包向下游传播提供了通道。2020 年梅汛期对流层上层 300hPa 的波作用通量表现出波动有明显的下游频散, 波能传播路径分别有两支, 其中一支源于地中海附近, 另外一支源于贝加尔湖附近, 均能为下游地区的异常强降水带来扰动能量。波动起源于上游贝加尔湖附近, 由西北向东南移动至长江中下游地区, 但值得注意的是, 高频波动的沿经向传播特征要更为显著, 这与 1998 年夏季波包的传播路径有所差异(梅士龙和管兆勇, 2009)。采用准地转扰动流函数作为参数分析波活动时, 亦可见波动沿自西北-东南路径移至长江中下游地区。

要说明的是, 导致 2020 年梅汛期降水异常的成因复杂: 首先, 造成超长梅汛期的原因可以归结为西太副高的基本稳定, 而这一稳定的副高结构主要是由其第一模态和第三模态引起的(钱代丽和管兆勇, 2020); 其次是低频过程, 这里主要包含准双周振荡和 40-90d 振荡; 第三是 Rossby 波包活动; 第四, 当然还有中小尺度过程等等。本文仅从对流层上层 Rossby 波活动的角度出发进行探究, 关于 2020 年梅汛期降水形成的全部机理还需进行更多、更深入的研究。此外, 通过 v' 或 ψ' 获得的波包参数, 理论上可用于监测波包的移动, 从而可为强降水过程监测和预报提供依据, 然而, 关于开发探测波包传播的前兆指数和技术有待未来进一步展开。

致谢: 再分析资料取自 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (<https://www.noaa.gov/>); 西太副高指数取自国家气候中心 (<http://cmdp.ncc-cma.net/cn/>); 文中插图使用 NCL 软件绘制。谨致谢忱!

参考文献

- Ambrizzi T, Hoskins B J. 1997. Stationary Rossby-wave propagation in a baroclinic atmosphere [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123(540): 919-928. doi: 10.1002/qj.49712354007
- Bueh C, Shi N, Ji L, et al. 2008. Features of the EAP events on the Medium-Range Evolution Process and the Mid- and High-Latitude Rossby Wave Activities during the Meiyu Period [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 53(4): 610-623. doi:10.1007/s11434-008-0005-2
- Chang E K M, Yu D B. 1999. Characteristics of Wave Packets in the Upper Troposphere. Part I: Northern Hemisphere Winter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56(11): 1708-1728. doi:10.1175/1520-0469(1999)056<1708:cowpit>2.0.co;2
- Duchon C E. 1979. Lanczos Filtering in One and Two Dimensions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18(8): 1016-1022. doi:10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2
- Hou J, Guan Z Y. 2013. Climatological characteristics of frontogenesis and related circulations over East China in June and July [J]. *Acta. Meteor. Sinica*, 27(2): 144-169. doi:10.1007/s13351-013-0202-z
- Li L, Zhu C W, Zhang R H, et al. 2020. Roles of the Tibetan Plateau vortices in the record Meiyu rainfall in 2020 [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, e1017. doi:10.1002/asl.1017
- Li S L, Ji L R, Lin W T, et al. 2001. The maintenance of the blocking over the Ural Mountains during the second Meiyu period in the summer of 1998 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(1): 87-105. doi:10.1007/s00376-001-0006-4
- Nishii K, Nakamura H. 2005. Upward and downward injection of Rossby wave activity across the tropopause: A new aspect of the troposphere-stratosphere dynamical linkage [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131(606): 544-563. doi:10.1256/qj.03.91
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58(6): 608-627. doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2
- Torrence C, Compo G P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79(1): 61-78. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2
- Wang B, Lin H. 2002. Rainy Season of the Asian-Pacific Summer Monsoon [J]. *J. Climate*, 15(4): 386-398. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0386:RSOTAP>2.0.CO;2
- Ye D C, Guan Z Y, Jin D C. 2019. Climatic features of summertime baroclinic wave packets over Eurasia and the associated possible impacts on precipitation in southern China [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 20(4): e889. doi:10.1002/asl.889
- Zhang M K, Jin D C, Liu X, et al. 2020. Asia precipitation tripole during boreal summer: Anomalous water vapor transport along the “Southern Silk Road” [J]. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.6681
- Zimin A V, Szunyogh I, Patil D J, et al. 2003. Extracting envelopes of Rossby wave packets [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131(5): 1011-1017. doi:10.1175/1520-0493(2003)131<1011:eeorwp>2.0.co;2

- 柏玲, 陈忠升, 赵本福. 2015. 集合经验模态分解在长江中下游梅雨变化多尺度分析中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 24(3): 482-488. Bai L, Chen Z S, Zhao B F. 2015. Application of ensemble empirical mode decomposition method in multiscale analysis of Meiyu in middle-lower reaches of Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (in Chinese), 24(3): 482-488.
- 陈菊英, 冷春香, 程华琼. 2006. 江淮流域强暴雨过程对阻高和副高逐日变化的响应关系[J]. 地球物理学进展, 21(3): 1012-1022. Chen J Y, Leng C X, Cheng H Q. 2006. The ural blocking high anomalous daily variation impact on the heavy rainfall in the yangtze river basin and Huai River basin [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 21(3): 1012-1022. doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2006.03.048
- 陈艳丽, 宋洁, 李崇银. 2016. 梅雨雨带北跳过程研究[J]. 大气科学, 40(4): 703-718. Chen Y L, Song J, Li C Y. 2016. A Study on Northward Jump of the Meiyu Rainbelt [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40(4): 703-718. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1601.15258
- 邓汗青, 罗勇. 2013. 近 50 年长江中下游春季和梅雨期降水变化特征[J]. 应用气象学报, 24(1): 23-31. Deng H Q, Luo Y. 2013. Continuous Spring and Meiyu Rainfall in the Mid-lower Reaches of the Yangtze During the Past 50 Years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 24(1): 23-31. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.01.003
- 丁婷, 高辉. 2020. 2019 年夏季东亚大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象, 46(1): 129-137. Ding T, Gao H. 2020. Atmospheric Circulation in East Asia in Summer 2019 and Its Influence on Climate of China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 46(1): 129-137. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.013
- 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 2011. 梅雨期青藏高原东移对流系统影响江淮流域降水的研究[J]. 气象学报, 69(4): 581-600. Fu S M, Sun J H, Zhao S X, et al. 2011. A study of the impacts of the eastward propagation of convective cloud systems over the Tibetan Plateau on the rainfall of the Yangtze-Huai River basin [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69(4): 581-600. doi: 10.11676/qxxb2011.051
- 郝志新, 李明启, 郑景云, 等. 2009. 长江中下游地区梅雨与旱涝的关系[J]. 自然科学进展, 19(8): 877-882. Hao Z X, Li M Q, Zheng J Y, et al. 2009. The relationship between Meiyu and drought and flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 19(8): 877-882. doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2009.08.012
- 侯俊, 管兆勇. 2013. 华东地区 6-7 月锋生的气候学特征及环流结构[J]. 气象学报, 71(1): 1-22. Hou J, Guan Z Y. 2013. Climatic features of frontogenesis in East China and their related circulation patterns during the early summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 71(1): 1-22. doi:10.11676/qxxb2013.001
- 蒋薇, 高辉. 2013. 21 世纪长江中下游梅雨的新特征及成因分析[J]. 气象, 39(9): 1139-1144.

- Jiang W, Gao H. 2013. New Features of Meiyu over Middle-Lower Reaches of Yangtze River in the 21st Century and the Possible Causes [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 39(9): 1139-1144. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.09.008
- 李慧, 陆尔, 翟盘茂, 等. 2019. Rossby波和热带对流活动对2010年6月梅雨发生前后我国东部两次强降水过程的影响[J]. *大气科学学报*, 42(6): 824-834. Li H, Lu E, Zhai P M, et al. 2019. The impact of Rossby waves and the tropical convection activities on two precipitation events occurring before and during the June 2010 Meiyu period [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 42(6): 824-834. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170321001
- 李明刚, 管兆勇, 梅士龙. 2016. 夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和Rossby波活动的联系[J]. *大气科学*, 40(6): 1199-1214. Li M G, Guan Z Y, Mei S L. 2016. Interannual and Interdecadal Variations of Summer Rainfall Duration over the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River in Association with Anomalous Circulation and Rossby Wave Activities [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40(6): 1199-1214. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15257
- 梁萍, 陈丽娟, 丁一汇, 等. 2018. 长江梅雨的长期变率与海洋的关系及其可预报性研究[J]. *气象学报*, 76(3): 379-393. Liang P, Chen L J, Ding Y H, et al. 2018. Relationship between long-term variability of Meiyu over the Yangtze River and ocean and Meiyu's predictability study [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 76(3): 379-393. doi:10.11676/qxxb2018.009
- 梁萍, 汤绪, 柯晓新, 等. 2007. 中国梅雨影响因子的研究综述[J]. *气象科学*, 27(4): 464-471. Liang P, Tang X, Ke X X, et al. 2007. Review of study on influencing factors of China Meiyu [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 27(4): 464-471. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2007.04.018
- 刘思佳, 金荣花, 肖天贵, 等. 2018. 夏季东亚副热带西风急流高频斜压波波包分布特征[J]. *气象*, 44(3): 372-381. Liu S J, Jin R H, Xiao T G, et al. 2018. Distribution of East Asian Subtropical Westerly Jet High Frequency Baroclinic Wave Packet in Summer [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 44(3): 372-381. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.03.004
- 梅士龙, 管兆勇. 2009. 1998年长江中下游梅雨期间对流层上层斜压波包的传播[J]. *热带气象学报*, 25(3): 300-306. Mei S L, Guan Z Y. 2009. Propagation of baroclinic wave packets in upper troposphere during the Meiyu period of 1998 over middle and lower reaches of Yangtze River valley [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 25(3): 300-306. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.03.007
- 祁莉, 王晓芳, 何金海, 等. 2014. 前期西太平洋暖池热含量异常影响长江中下游夏季降水的可能途经[J]. *地球物理学报*, 57(6): 1769-1781. Qi L, Wang X F, He J H, et al. 2014. The approach of the previous anomalous heat content in the western Pacific warm pool affecting

- the summer rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal Geophysics* (in Chinese), 57(6): 1769-1781. doi:10.6038/cjg20140609
- 钱代丽, 管兆勇. 2020. 梅雨季西太平洋副热带高压异常主要模态及其对东亚降水的可能影响[J]. 气象科学, 40(5): 649-660. Qian D L, Guan Z Y. 2020. Principal modes of the Western Pacific Subtropical High anomaly and their possible impacts on precipitation in East Asia during Meiyu season [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 40(5): 649-660. doi:10.3969/2020jms.0078
- 谭本旭, 潘旭辉. 2002. 1998 年夏季北半球斜压波活动与长江流域洪涝灾害分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 38(3): 354-364. Tan B K, Pan X H. 2002. Baroclinic Waves of Northern Hemisphere and Yangtze River Flood in the Summer of 1998 [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)* (in Chinese), 38(3): 354-364. doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2002.03.010
- 唐玉, 李栋梁. 2020. 江淮梅雨与东亚副热带夏季风进程变异的关系[J]. 气象科学, 40(2): 169-179. Tang Y, Li D L. 2020. The relationship between the Meiyu in the Yangtze-Huaihe Region and the variation of the East Asian subtropical summer monsoon process [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 40(2): 169-179. doi:10.3969/2018jms.0103
- 陶诗言, 卫捷, 梁丰, 等. 2010. Rossby 波的下流效应引发我国高影响天气的分析[J]. 气象, 36(7): 85-97. Tao S Y, Wei J, Liang F, et al. 2010. Analysis of High Impact Weather Induced by the Downstream Effect of Rossby Waves [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 36(7): 85-97. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.7.015
- 魏凤英, 谢宇. 2005. 近百年长江中下游梅雨的年际及年代际振荡[J]. 应用气象学报, 16(4): 492-499. Wei F Y, Xie Y. 2005. Interannual and interdecadal oscillations of Meiyu over the middle-lower reaches of the Yangtze River for 1885-2000 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 16(4): 492-499. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.04.010
- 吴尚森, 梁建茵, 李春晖. 2003. 南海夏季风强度与我国汛期降水的关系[J]. 热带气象学报, 19(S1): 25-36. Wu S S, Liang J Y, Li C H. 2003. Relationship between the intensity of south China Sea summer monsoon and the precipitation in raining seasons in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 19(S1): 25-36. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2003.z1.003
- 吴志伟, 何金海, 韩桂荣, 等. 2006. 长江中下游梅雨与春季南半球年际模态(SAM)的关系分析[J]. 热带气象学报, 22(1): 79-85. Wu Z W, He J H, Han G R, et al. 2006. The relationship between Meiyu in the mid- and lower reaches of the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 22(1): 79-85. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.01.012
- 杨宁, 金荣花, 肖天贵, 等. 2020. 夏季沿亚洲副热带西风急流 Rossby 波传播及其与我国降水异常的联系[J]. 气象, 46(1): 1-14. Yang N, Jin R H, Xiao T G, et al. 2020. Propagation of Rossby Wave Along Asian Subtropical Westerly Jet in Summer and Its Impact on Anomaly

- of Precipitation in China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 46(1): 1-14. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.001
- 叶德超, 管兆勇, 孙思远, 等. 2019. 2016 年梅雨期间长江中下游强降水与对流层上层斜压波包的关系[J]. *气象学报*, 77(1): 73-83. Ye D C, Guan Z Y, Sun S Y, et al. 2019. The relationship between heavy precipitation in the middle and lower reaches of Yangtze River and baroclinic wave packets in the upper troposphere during the Meiyu period of 2016 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 77(1): 73-83. doi:10.11676/qxxb2018.038
- 易兵, 乔全明, 张立. 1991. 梅雨锋生过程的诊断分析[J]. *大气科学*, 15(2): 92-100. Yi B, Qiao Q M, Zhang L. 1991. Diagnosis of frontogenesis of Meiyu front [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 15(2): 92-100.
- 俞亚勋, 王式功, 钱正安, 等. 2013. 夏半年西太副高位置与东亚季风雨带(区)的气候联系[J]. *高原气象*, 32(5): 1510-1525. Yu Y X, Wang S G, Qian Z A, et al. 2013. Climatic Linkages between SHWP Position and EASM Rainy-Belts and-Areas in East Part of China in Summer Half Year [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 32(5): 1510-1525. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00033
- 赵宇, 裴昌春, 赵光平, 等. 2018. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统的组织特征和触发条件分析[J]. *大气科学学报*, 41(6): 807-818. Zhao Y, Pei C C, Zhao G P, et al. 2018. Analysis of organization modes and initiation conditions of a heavy-rain-producing mesoscale convective system along a Meiyu front [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 41(6): 807-818. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20161229001
- 赵玉春. 2011. 梅雨锋对引发暴雨的中尺度对流系统发生发展影响的研究[J]. *大气科学*, 35(1): 81-94. Zhao Y C. 2011. Impacts of Meiyu Front upon the Initiation and Development of Mesoscale Convection Systems Producing Rainstorms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35(1): 81-94. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.07
- 周丽, 魏凤英. 2006. 近百年全球海温异常变化与长江中下游梅雨[J]. *高原气象*, 25(6): 1111-1119. Zhou L, Wei F Y. 2006. Relationships between the Meiyu in the Mid-and Lower-Reaches of Changjiang River and the Global SST Anomalies during the Last 100 years [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 25(6): 1111-1119. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.06.019