

SR型与EAP型“结合模态”对2020年江淮入梅初期强降水

的影响

郭紫薇 王黎娟

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

摘要 利用 ERA5 逐日再分析资料和中国气象局提供的逐日站点降水资料, 分析了丝绸之路型 (Silk-Road, SR) 与东亚-太平洋型 (East Asia-Pacific, EAP) 遥相关的“结合模态”对 2020 年江淮梅雨入梅的影响, 结果表明“结合模态”可以触发江淮流域的持续性降水。2020 年 6 月初, 负 SR 型 (Silk-Road) 和正 EAP 型 (East Asia-Pacific) 同时出现, 并且位相差达到 6 月份最大值, 二者协同作用下导致 2020 年入梅时间异常偏早。主要表现为: (1) 负 SR 型引起西风急流加速, 促使急流入口区南侧的江淮流域上空出现强的高层辐散。(2) 负 SR 型有利于南亚高压东移, 正 EAP 型有利于西太平洋副热带高压西移, 二者相向而行。负 SR 型和正 EAP 型于 6 月 9 日位相差达最大, 此时南亚高压和西太副高重叠于 120° E 左右, 有利于江淮流域持续性降水。(3) 低层东亚中、低纬度有一对与正 EAP 型相关的异常“气旋-反气旋”环流, 使低空 (20~35°N, 100~125°E) 盛行强西南气流, 中纬度的偏北气流有利于干冷空气向南输送, 与西南暖湿气流汇合于江淮流域上空, 带来强烈的水汽辐合, 也使得大气的局地上升运动更为强烈。

关键词 江淮梅雨 SR 型与 EAP 型“结合模态” 西太平洋副热带高压 南亚高压 水汽通量

文章编号 2021215C

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21215

The impact of the “combined modality” of SR and EAP on the heavy precipitation in the early stage of Meiyu in the Yangtze-Huai River region in 2020

GUO Ziwei, WANG Lijuan

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

收稿日期 2021-11-15 网络预出版日期

作者简介 郭紫薇, 女, 1998 年 8 月出生, 硕士, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: gzw1061188039@163.com

通讯作者 王黎娟, E-mail: wljfw@163.com

资助项目 国家自然科学基金 (41975085) 和国家重点研发计划项目 (2019YFC1510004)

Funded by National Natural Science Foundations of China (41975085) and the National Key R&D Program of China(2019YFC1510004).

Abstract Using the daily reanalysis data of ERA5 and the daily stations data of precipitation provided by the China Meteorological Administration, the influence of the “combined modality” of the Silk-Road Pattern(SR) and the East Asia-Pacific Pattern(EAP) teleconnection on the heavy precipitation in the early stage of Meiyu in the Yangtze-Huai River region in 2020 is analyzed, it shows that the “combined modality” can trigger continuous precipitation in the Yangtze-Huai River region. At the beginning of June 2020, the negative-phases SR(Silk-Road) and the positive-phases EAP(East Asia-Pacific) appeared at the same time, and the phase difference reached the maximum value in June. The synergy of the two lead to an abnormally early time for the Meiyu in 2020. The main manifestations are as follows: (1) The negative-phases SR causes the acceleration of the westerly jet, which promotes strong high-level divergence over the Yangtze-Huai River region on the south side of the jet stream entrance area. (2) The negative-phases SR is conducive to the eastward movement of the South Asian High, and the positive-phases EAP is conducive to the westward movement of the Western Pacific Subtropical High, and the two move towards each other. The negative-phases SR and the positive-phases EAP had the largest difference on June 9. At this time, the South Asian High and the West Pacific Subtropical High overlapped at about 120°E, which is conducive to continuous precipitation in the Yangtze-Huai River region. (3) There is a pair of anomalous “cyclone-anticyclone” circulations related to the positive-phases EAP in the middle and low latitudes of low-level East Asia, which makes the low altitude (20~35°N, 100~125°E) prevailing strong southwest airflow. The northerly airflow at mid-latitudes is conducive to the transportation of dry and cold air to the south. It merges with the warm and humid southwest airflow over the Yangtze-Huai River region, bringing about strong water vapor convergence and making the local upward movement of the atmosphere more intense.

Key words Meiyu in the Yangtze-Huai River region, “combined modality” of Silk-Road pattern and East Asia-Pacific pattern, Western Pacific Subtropical High, South Asian High, water vapor flux

1 引言

在全球变暖的背景下，世界各地频繁出现极端天气事件，对社会发展和生态环境造成严重的影响。其中，持续性极端降水的发生不仅会带来严重的洪涝灾害，还会造成社会经济损失。江淮流域在我国占据重要地位，其特殊的气候和地理要素使得该区域旱涝灾害频发，严重程度也常为全国之首（姚秀萍等，2008；高守亭等，2018）。入梅的早迟、梅雨期长短和梅雨量的丰枯都会对江淮流域的夏季气候状态产生严重影响（梁萍等，2007）。江淮流域的旱涝灾害主要发生在6~8月，台风活动和梅雨异常是其主要成因，其中6~7月的旱涝灾害大部分是由梅雨异常引起的（齐庆华，2019；赵思雄，2019）。因此，关于江淮梅雨异常的研究一直备受关注，是我国大气科学领域的重点和热点问题。

梅雨易受多种大尺度环流形势影响，是东亚气候系统成员之一（丁一汇，2019；傅云飞等，2020；许乐心等，2017；翟盘茂等，2016）。研究表明中纬度西风急流、西太副高、中高纬度阻高等环流系统的变化均对我国梅雨带有直接影响，副高短期变异对极端降水、区域性强降水的大尺度环流形势起决定性作用（杜银等，2009；胡亮等，2010；张琴等，2011；陆日宇和黄荣辉，1998；张庆云和郭恒，2014），西太平洋副热带高压的南北摆动与东西进退、南亚高压的东进北抬、沃克环流位置及强度的不同及其南侧水汽输送的变化都会造成江淮流域降水的差异（李勇等，2017；钱代丽和管兆勇，2020；张耀存和曾鸿阳，2020）。

东亚夏季风环流系统表现出明显的 EAP 型 (East Asia-Pacific) 波列 (Huang et al., 2007; 黄荣辉等, 2016; Li et al., 2016)。Chen and Zhai (2015) 将江淮地区持续性极端降水与 EAP 波列联系起来, 指出西太平洋副热带高压的西伸加强、中纬度低压槽的加深和高纬鄂霍次克海阻塞高亚的建立和维持同时发生时, 会促使中高纬的干冷空气与低纬暖湿气流强烈交绥, 触发江淮地区持续性极端降水的发生。随后, 有研究指出东亚夏季风的强弱和江淮流域夏季降水的多寡均可以利用 EAP 指数来表征, 发现 EAP 指数的正(负)位相有利于(抑制)江淮流域夏季降水的发生 (陆日宇和黄荣辉, 1998; 闵锦忠等, 2005; Wang et al., 2018)。也有研究表明, EAP 型的发展和维持经常伴随着高层沿西风急流的 SR 型 (Silk-Road) 波列 (Huang et al., 2012; Wang and Wang, 2018)。SR 波列作为北半球夏季对流层高层沿着西风急流的环球型大气遥相关的欧亚部分, 对欧亚大陆的天气与气候有着显著影响 (Ding and Wang, 2007)。陶诗言和卫捷 (2006) 的研究指出 SR 波列可以通过调控南亚高压和副热带西风急流的位置, 进而影响我国东部的降水异常, 在 SR 型的负位相期间, 我国江淮地区降雨显著偏多, 其余地区降水量相较气候水平偏少。

SR 和 EAP 遥相关波列与梅雨的开始及结束、梅雨带的北移及停滞、强降水过程的发生及维持有良好的对应关系 (Li et al., 2015; 陆日宇等, 2013)。梅雨期包括西太平洋副热带高压、高层东亚西风急流和低空西南风急流在内的多个季风环流子系统均经历了与 SR 和 EAP 相关的周期性振荡 (Chen and zhai, 2014)。我们的前期研究指出, SR 型与 EAP 型遥相关常在初夏同时出现 (即“结合模态”), 且两者会相互促进, 对梅雨期降水有显著影响 (Wang and Wang, 2018)。在东亚夏季降水的年际变率中, SR 和 EAP 波列的同时作用尤其在 6、7 月份更加明显, 两者会相互促进, 对梅雨期降水有显著影响 (Wang et al., 2018)。SR 和 EAP 遥相关波列与梅雨的开始及结束、梅雨带的北移及停滞、强降水过程的发生及维持有良好的对应关系 (陆日宇等, 2013)。正是由于 SR 型与 EAP 型之间的可能相互作用, 使得利用二者来表征、监测和预测东亚地区夏季降水异常的不确定性增大。因此, 本文旨在基于逐日平均数据, 针对 SR 和 EAP 型之间的内在联系和相互作用展开研究, 探索二者对江淮流域夏季持续性极端降水的协同影响过程及其演变特征, 为大气遥相关如何协同作用于江淮流域持续性极端降水提供新的理解和认识。

2020 年夏季江淮流域出现数十年不遇的超强梅雨, 有研究认为主要是因为入梅时间相对往年异常偏早, 导致梅雨期偏长, 累计降水量偏多 (刘芸芸和丁一汇, 2020; 张芳华等, 2020)。为什么 2020 年江淮流域入梅异常偏早? 早梅雨是否与负 SR 型和正 EAP 型的协同出现有关? SR 型与 EAP 型“结合模态”对入梅期间的持续性降水过程有何影响? 本文将聚

焦这些问题分析 SR 型与 EAP 型协同变化对 2020 年江淮流域入梅的影响。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用的资料包括观测资料和再分析资料，具体如下：

(1) 中国气象局提供的全国 753 站逐日降水量资料。本文选取江淮流域 ($28^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 124^{\circ}\text{E}$) 作为研究区域。

(2) ERA5 的逐日再分析资料，包括位势高度、温度场、湿度场、经向风场、纬向风场、垂直速度场等物理量，水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，垂直方向上从 10hPa ~ 1000hPa，共 17 层，时段为 1981 ~ 2020 年 6 ~ 7 月。

2.2 方法

(1) 江淮流域代表站的选取

参考梁萍等 (2010) 对降水区域的划分方法，挑选江淮流域代表站。在全国气象观测 753 个站中选取 ($28^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 124^{\circ}\text{E}$) 之间 (剔除高山站黄山站)、连续无缺测且资料时间跨度较长的大陆 66 个站点。把 66 个站点中梅汛期 (6 ~ 7 月) 降水量标准差最大的站点安庆站作为基本站，选取与基本站的降水正相关程度较高的站点作为代表站，最终选取了 36 个代表站点。

(2) SR 指数 (SRI) 与 EAP 指数 (EAPI) 的定义

SR 指数：将 ($40^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$) 作为 EOF 分解对象区域，对 200hPa 标准化位势高度异常进行 EOF 分解，第一模态呈现出纬向排列的 “+ - +” 型分布，方差贡献率为 12.34% (图 1a)。以这三个空间中心点作为基本点计算 SR 指数。计算公式为：

$$SRI = \frac{[H(60^{\circ}\text{E}, 45^{\circ}\text{N}) - H(100^{\circ}\text{E}, 40^{\circ}\text{N}) + H(135^{\circ}\text{E}, 40^{\circ}\text{N})]}{3} \quad (1)$$

其中，H 为三个基本点的标准化 200hPa 位势高度异常。

EAP 指数：将 ($100^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ}\text{N} \sim 75^{\circ}\text{N}$) 作为 EOF 分解对象区域，对 500hPa 标准化位势高度异常进行 EOF 分解，第一模态呈现出经向排列的 “+ - +” 型分布，方差贡献率为 18.56% (图 1b)。以这三个空间中心点作为基本点计算 EAP 指数。计算公式为：

$$EAPI = \frac{[H(125^{\circ}\text{E}, 20^{\circ}\text{N}) - H(130^{\circ}\text{E}, 45^{\circ}\text{N}) + H(140^{\circ}\text{E}, 70^{\circ}\text{N})]}{3} \quad (2)$$

其中，H 为三个基本点的标准化 500hPa 位势高度异常。

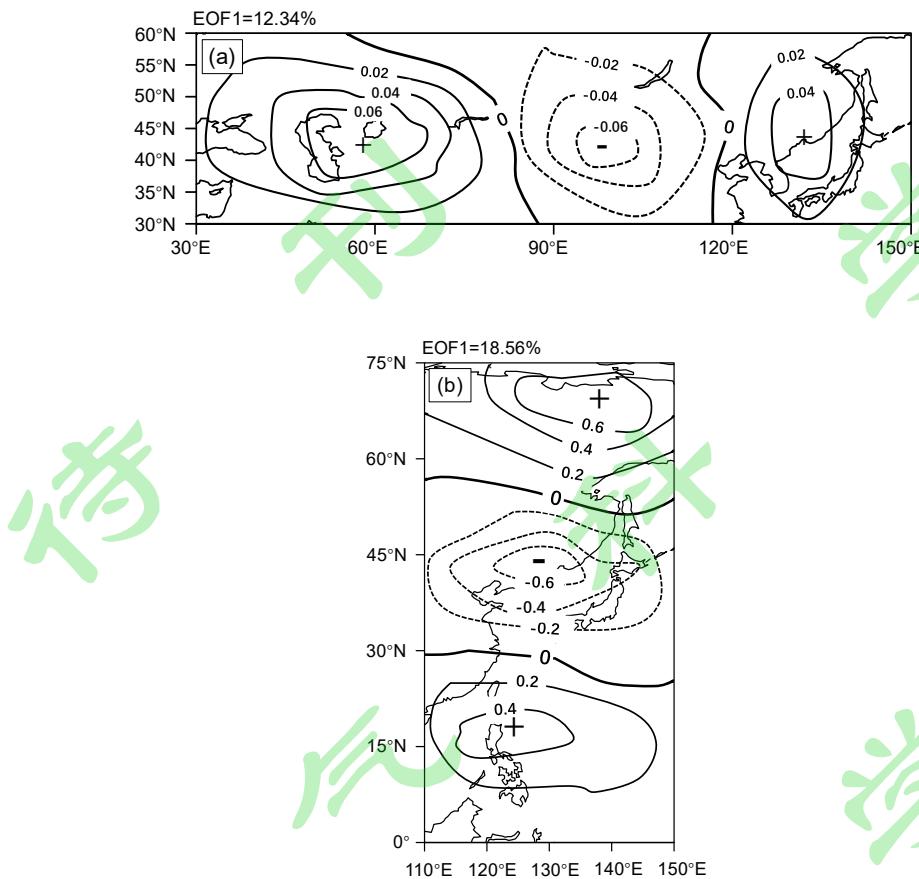


图 1 1981~2020 年夏季 (6~8 月) 标准化位势高度异常的 EOF 分解第一模态的空间分布[等值线, 实(虚)线表示正(负)数值]: (a) 200hPa; (b) 500hPa。“+”“-”“+”表示选取的基本点, 左上角数值表示方差贡献率

Fig. 1 Spatial distribution of the first mode of EOF decomposition of normalized geopotential height anomalies in the summer of 1981-2020 (June-August) [contours, solid (dotted) lines indicate positive (negative) values]: (a) 200hPa; (b) 500hPa. “+”, “-” and “+” indicate the selected basic points, and the value in the upper left corner indicates the variance contribution rates

3 2020 年江淮流域梅雨期降水概况

根据国家气候中心的报告 (Guo et al., 2021), 2020 年我国江淮流域于 6 月 1 日入梅, 8 月 2 日出梅, 梅雨期 62 天, 梅雨期总雨量达 759.2 毫米。据统计, 2020 年入梅较常年偏早 7 天, 出梅较常年偏晚 15 天, 梅雨期较常年偏长 22 天, 梅雨量较常年偏多 1.2 倍, 总降水量和持续时间均为 1961 年以来历史第一位 (周天军等, 2021)。2020 年梅雨具有入梅早, 出梅晚, 梅雨期持续时间长, 梅雨量大, 雨带南北跨度大, 极端降水事件频发等特点, 是一次破纪录的梅雨事件 (刘芸芸和丁一汇, 2020)。

根据 2020 年 6 月 6 日 ~ 6 月 10 日的累积降水距平分布可以看出 (图 2), 由于 2020 年入梅较早, 整体来看在江淮流域绝大部分区域都出现了正距平, 局部区域 (113° E ~ 118° E, 29° N ~ 31° N) 甚至超过了 1 个标准差, 说明 2020 年 6 月初已入梅, 且 6 月 6 日 ~ 6 月

10 日降水较往年明显异常偏多。

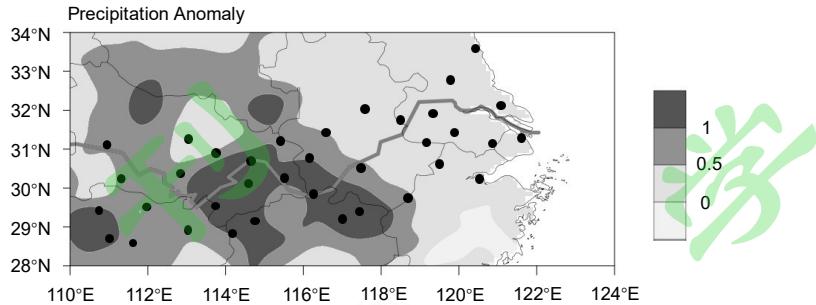


图 2 2020 年 6 月 6 日~6 月 10 日总降水量与多年平均的标准化距平（阴影）。36 个代表站点用黑点标出

Fig. 2 The normalized anomaly between the total precipitation from June 6 to June 10, 2020 and multi-year average total precipitation from June 6 to June 10 (shading). 36 representative stations are marked with black dots

由 6 月 SRI、EAPI 与降水距平的逐日演变可以发现（图 3），2020 年 6 月共出现了 4 次 SRI 负位相且 EAPI 正位相的过程，均伴随降水正距平，但 6 月 6 日~10 日这段过程中 SRI 与 EAPI 的正负位相差是最大的，降水正距平也最为明显，且刚好在入梅阶段。SRI/EAPI 于 6 月 9 日达到最小/最大值，降水距平也超过了 1 个标准差。因此选取 6 月 6 日~10 日为研究时段，6 月 9 日为峰值日，记为 0 天，前 n 天记为-n 天，后 n 天记为+n 天，探究 2020 年入梅偏早是否与负 SR 与正 EAP “结合模态”有关。

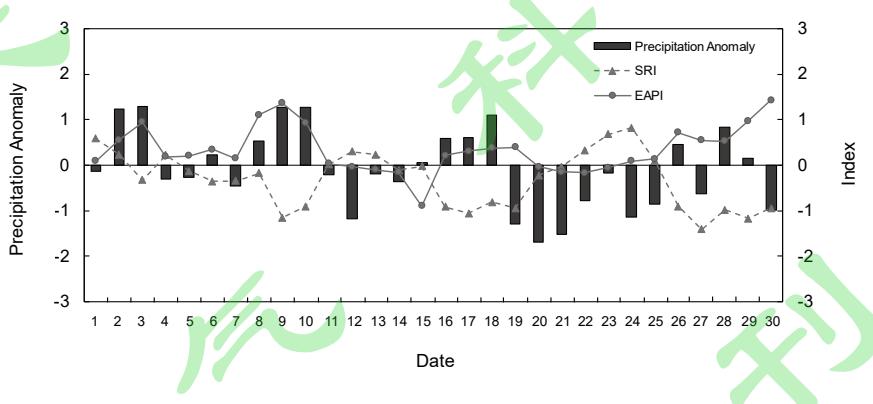


图 3 2020 年 6 月逐日降水量与多年平均降水量的标准化距平（柱状）与 SRI（虚线，三角）/EAPI（实线，圆形）。研究时段用虚线框出

Fig. 3 The normalized anomaly between daily precipitation and multi-year average precipitation in June 2020 (black bars) and SRI (dotted line, triangle)/EAPI (solid line, circle). The study period is framed by dotted lines

4 入梅期 SR 与 EAP “结合模态”期间的环流特征

4.1 高层环流特征

在对流层高层（200hPa），-3 天，SRI 为负，EAPI 为正，二者已经出现反位相。我国东

部沿海地区至日本一带开始出现气旋式环流异常，此时南亚高压东边界位于 120° E 附近（图 4a），降水距平由负转正。-1 天，SRI 与 EAPI 反位相差加大，贝加尔湖西侧的气旋式环流异常和蒙古高原的反气旋式环流异常已经形成，我国东部沿海地区至日本一带的气旋式环流异常也有所增强，南亚高压东伸至 120° E 以东（图 4b）。0 天，SRI 与 EAPI 位相差最大，上述三个环流异常都明显加强，南亚高压进一步增强并东伸，促使南亚高压东北侧的偏北气流控制江淮流域上空，有利于中纬度异常气旋加深，强度达到整个周期的最大值（图 4c），与此同时降水距平也达到最大值（图 3）。+1 天，SRI 和 EAPI 位相差开始减小，环流异常开始减弱，南亚高压也开始西退（图 4d）。+2 天，SRI 和 EAPI 十分接近，有出现位相正负转变的趋势。贝加尔湖西侧的气旋式环流异常和蒙古高原的反气旋式环流异常再次明显减弱，南亚高压已经退回至 120° E 以西（图 4e）。+3 天，位相发生转变，变为正 SRI 和负 EAPI，导致气旋式异常和反气旋式异常消失（图 4f），降水距平为显著负值（图 3）。-1 ~ +2 天沿着西风急流可以识别出“气旋-反气旋-气旋”型，标志着“结合模态”中 SR 型的发展与维持（图 4b-e）。

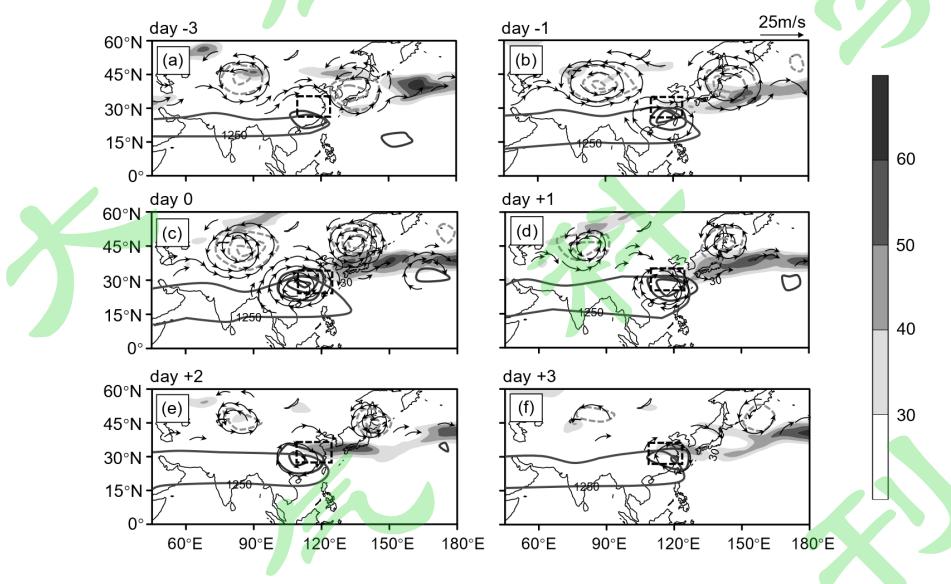


图 4 “结合模态”期间 (day-3~day+3) 的 200hPa 水平风场异常 (矢量, 单位: m/s)、标准化位势高度异常 [等值线, 分别为 ± 0.5 , ± 1.0 , ± 1.5 个标准差, 实(虚)线表示正(负)数值]和纬向风速 (阴影, 单位: m/s)。粗实线 (1250 dagpm) 为 200hPa 南亚高压, 江淮流域用虚线框出

Fig. 4 200hPa horizontal wind field anomaly (vector, units: m/s) and normalized geopotential height anomaly [contour lines, respectively $\pm 0.5, \pm 1.0, \pm 1.5$ standard deviations, the solid (dotted) line represents the positive (negative) value] and the zonal wind speed (shading, units: m/s) during the “combined modality” period (day-3~day+3). The thick solid line (1250 dagpm) represents the 200 hPa South Asia High, The Yangtze-Huai River region is framed by solid lines

从 200hPa 辐散风和涡度场的演变可以看出，江淮流域上空出现高层辐散，并伴有相应的正速度势中心，在正速度势中心偏北侧出现正涡度中心（图 5）。-3 天，速度势中心和涡度中心起源于我国东部沿海地区（图 5a）。-1 天，由于 SRI 和 EAPI 位相差逐渐加大，两个中心略有东移且强度增强，高层辐散风场也有所发展（图 5b）。0 天，伴随着 SRI 和 EAPI 位相差达到最大，正速度势中心和正涡度中心达到最强，高层辐散也显著增强（图 5c）。与负 SR 型有关的我国东部沿海地区至日本一带的异常气旋西南侧偏北气流向江淮流域输送正涡度平流，从而使得高层辐散中心得以维持，高层辐散有利于该地区垂直运动的发展，有利于降水的发生。+1 天，正速度势中心已东移出海，江淮流域上空的高层辐散略有减弱（图 5d）。+2 天，由于西风急流的减弱和来自中高纬度涡度平流的耗散，高层辐散和正速度势中心均东移至 130° E 以东，强度显著减弱（图 5e）。+3 天，随着 SRI 和 EAPI 符号发生反转，高层辐散基本已经减弱至消失（图 5f），不再利于江淮流域降水。

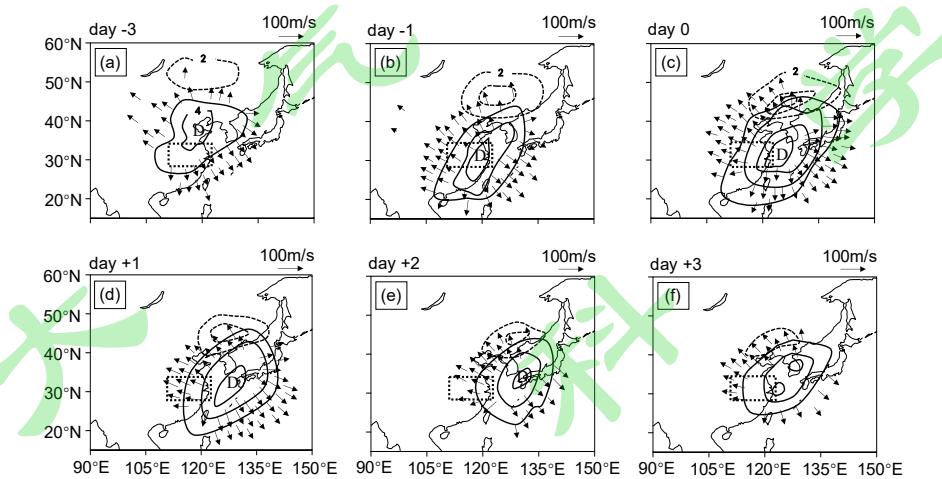


图 5 “结合模态”期间 (day-3 ~ day+3) 的 200hPa 辐散风 (矢量, 单位: m/s)、速度势 (实线, 单位: $10^6\text{m}^2/\text{s}$, 范围: $2 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6\text{m}^2/\text{s}$, 间隔 $2 \times 10^6\text{m}^2/\text{s}$) 和正涡度场 (虚线, 单位: $10^{-6}/\text{s}$, 范围: $2 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}/\text{s}$, 间隔 $2 \times 10^{-6}/\text{s}$)。江淮流域用虚线框出，“D”表示高层辐散中心

Fig. 5 200hPa divergent wind (vector, units: m/s) and velocity potential (solid line, range: $2 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6\text{m}^2/\text{s}$, interval: $2 \times 10^6\text{m}^2/\text{s}$) and positive vorticity field (dotted line, range: $2 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}/\text{s}$, interval: $2 \times 10^{-6}/\text{s}$) during the “combined modality” period (day-3 ~ day+3). The Yangtze-Huai River region is framed by dotted lines, the “D” means divergent center of upper-level

4.2 中层环流特征

在对流层中层 (500hPa)，从-3 天开始，在水平风场异常上就已经开始出现从低纬到高纬的“反气旋-气旋-反气旋”型，标志着“结合模态”中正 EAP 型的发展和维持（图 6a）。-1 天，三个环流异常中心加强，在负 SR 型波列影响下南亚高压开始东伸，与此同时，正

EAP 型波列有利于副高向西延伸， 15° N 的西边界达到 120° E，南亚高压东边界与副高的西边界在东亚沿岸相遇并叠加（图 6b）。副高和南亚高压的叠加被广泛视作东亚地区夏季降水的重要前兆信号（陈丽娟等, 2019; 单幸等, 2020）。0 天，从低纬到高纬的三个环流异常中心强度都达到最大，副高和南亚高压继续相向而行，南亚高压与副高的空间重合范围也达到最大，且在我国东南沿海稳定维持，为江淮流域持续性降水的发生提供有利环流条件。负 SR 与正 EAP 型的协同出现有利于南亚高压和副高的纬向相互接近、相遇和稳定维持，触发江淮流域出现远强于气候平均状态的降水量，尤其当 SRI 与 EAPI 位相差最大时（即 0 天）作用最明显（图 3）。除此之外，在 500hPa 还可以发现自 $(140^{\circ}$ E, 45° N) 至 $(120^{\circ}$ E, 30° N) 存在低压槽活动，在 0 天达到最深，引导中纬度的干冷空气向江淮流域入侵，降水达到最强（图 6c）。+1 天，副高和南亚高压开始朝着相反方向分离，三个环流异常中心开始减弱，此时降水还在持续，但强度有所减弱（图 6d）。+2 天，由于 SRI 和 EAPI 位相差显著减小，南亚高压基本已经退回到 120° E 以西，几乎与副高分离，同时环流也有所减弱，降水也显著减少（图 6e）。+3 天，SRI 变为正，EAPI 变为负，副高退回至 120° E 以东，环流中心明显减弱并东移，江淮流域 6 月上旬的持续性降水也趋于结束（图 6f）。

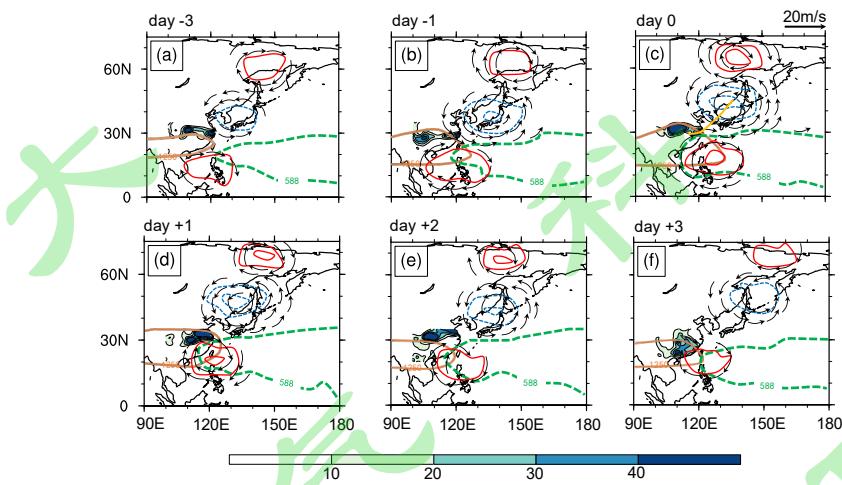


图 6 “结合模态”期间 (day-3 ~ day+3) 的 500hPa 标准化位势高度异常场[等值线, 分别为 ± 0.5 , ± 1.0 个标准差, 实 (虚) 线表示正 (负) 数值]和逐日降水量 (阴影, 单位: mm) 和 500hPa 风场异常 (矢量, 单位: m/s)。橙色粗实线表示 200hPa 南亚高压 (1250 dagpm), 绿色粗虚线表示 500hPa 副高 (588 dagpm), 黄色实线表示槽线

Fig. 6 The 500hPa normalized geopotential height anomaly field [contour lines, respectively ± 0.5 , ± 1.0 standard deviations, the solid (dotted) line represents the positive (negative) value] and daily precipitation (shading, units: mm) and 500hPa wind field anomaly (vector, units: m/s) during the “combined modality” period (day-3 ~ day+3). The thick orange solid line represents the 200hPa South Asia High (1250 dagpm), the thick green dashed line represents the 500hPa Western Pacific Subtropical High (588 dagpm), Yellow solid lines indicate trough line

由图4和图6所示，在“结合模态”期间，200hPa和500hPa位势高度异常场上分别可以看到经向的“+ - +”和纬向的“- + -”波列结构，即典型的“负SR”型和“正EAP”型。另外，在200hPa和500hPa的水平风场异常上分别可以看到明显的“气旋-反气旋-气旋”和“反气旋-气旋-反气旋”，中纬度的气旋和负位势高度异常中心一致，表明SR和EAP型“结合模态”对持续性降水过程有影响。

5 入梅期 SR 与 EAP “结合模态” 期间的水汽条件和垂直运动

在对流层低层（850hPa），东亚沿岸中纬度地区从-3天开始出现异常的“反气旋-气旋”，此时副高位于 120° E以东（图7a）。-1天，环流开始逐渐加强，由于副高进一步加强西伸，低纬度反气旋环流异常的北侧盛行低层西南气流，将充沛的水汽输送至江淮流域一带，导致江淮流域出现正水汽通量异常（图7b），说明负SR与正EAP型波列协同变化期间的水汽输送主要归功于低纬异常反气旋北侧的西南气流。0天，SRI与EAPI位相差达到最大，伴随着中纬度异常气旋发展，盛行在江淮流域上游的 45° N偏北气流显著增强，引导低层中高纬度的干冷空气注入到江淮流域上空，与低纬的西南暖湿气流汇合（图7c），造成江淮流域降水（图6c）。+1天，SPI和EAPI位相差开始减小，环流异常减弱，副高开始东移，江淮流域上空水汽输送也在减弱（图7d），标志着降水减弱（图6d）。+2天，环流异常进一步减弱，副高继续向东移动，江淮流域上空几乎没有水汽输入，降水趋于终结（图7e）。+3天，SRI和EAPI位相正负已经转变，副高退回至 120° E，由于环流异常的显著减弱，江淮流域上空没有水汽来源，导致此次降水过程结束（图7f）。

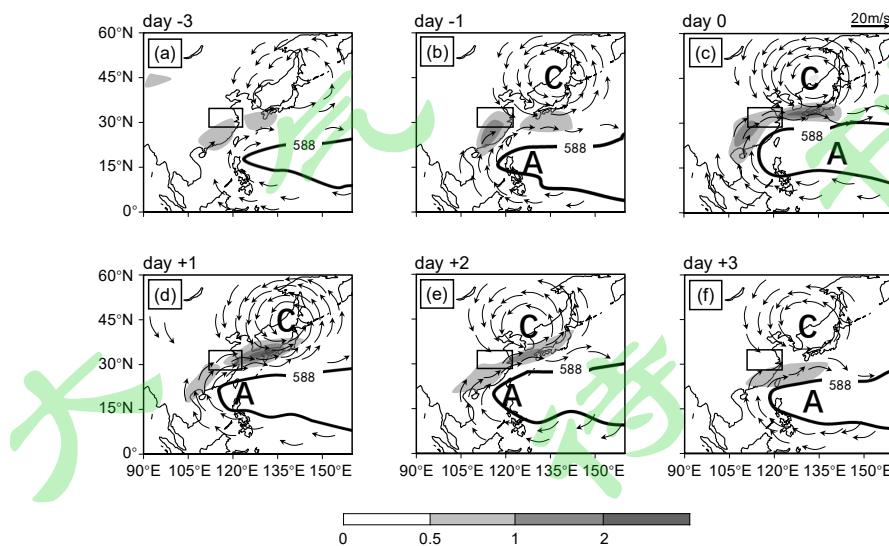


图7 “结合模态”期间（day-3~day+3）的850hPa水平风场异常（矢量，单位：m/s）和标准化整层水汽通量异常（阴影）。粗实线为副高，江淮流域用方框框出

Fig. 7 The 850hPa horizontal wind field anomaly (vector, units: m/s) and the normalized whole-layer water vapor flux anomaly (shading) during the “combined modality” period (day-3 ~ day+3). The thick solid line is the Western Pacific Subtropical High, the Yangtze-Huai River region is framed by a box

负 SR 和正 EAP 型协同发生期间，江淮流域以南和以北地区均有异常下沉运动，在东亚地区还存在着一支经向排列的“- + -”非绝热加热异常中心，且非绝热加热异常与垂直速度几乎呈现反位相分布（图 8）。-3 天，经向排列的非绝热加热异常中心开始形成（图 8a）。-1 天，异常中心显著增强，垂直运动也随之增强（图 8b）。0 天，三个异常中心达到周期中最大强度，相对应的垂直运动也达到最强（图 8c），此时垂直运动、副高偏北侧的低层西南气流和高层东北侧的偏北气流在东亚地区上空共同形成一个强大的异常垂直热力环流圈，对江淮流域夏季降水的发展与维持有着非常重要的影响（图 6c）。+1 天，向江淮流域输送的水汽通量以及相应的水汽通量辐合均显著衰减，尽管 35° N 以北的非绝热冷却异常的减弱导致相应的下沉运动减弱（图 8d），垂直环流圈依然维持江淮流域上空上升运动的发展，降水持续但强度有所减弱（图 6d）。+2 天，非绝热加热异常中心逐渐减弱，使得沿着准静止梅雨锋的暖空气上升运动相应减弱（图 8e），导致江淮流域降水减少（图 6e）。+3 天，由于指数符号发生变化，副高的迅速东撤和异常“反气旋-气旋”环流的减弱东移使得低空西南急流减速，致使向江淮流域输送的水汽通量以及相应的水汽通量辐合均显著衰减，非绝热加热异常中心也逐渐消亡殆尽，在江淮流域上空消失，使得沿着准静止梅雨锋的暖空气上升运动相应减弱（图 8f），导致江淮流域持续性极端降水的终结（图 6f）。

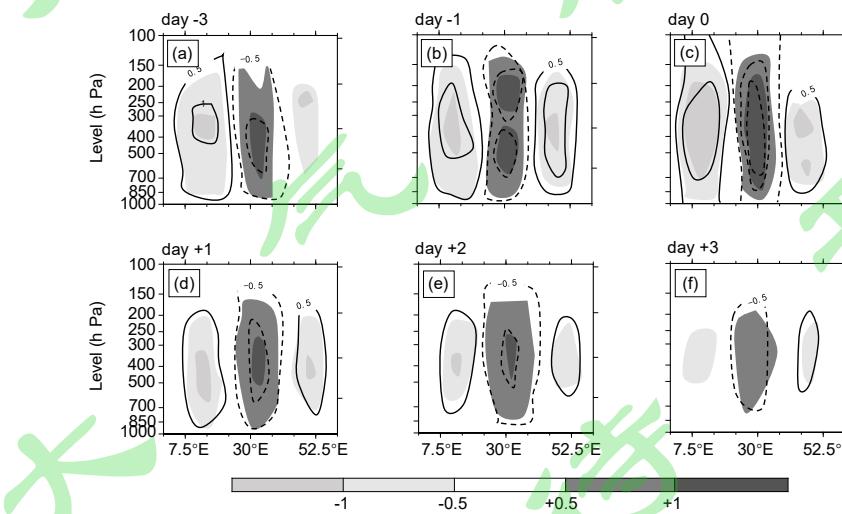


图 8 “结合模态”期间 (day-3 ~ day+3) 纬向平均 ($110\text{--}124^{\circ}$ E) 的垂直速度[等值线, 单位: hPa/s, 实(虚)线表示下沉(上升)]和非绝热加热(阴影, 单位: K/day)。

Fig. 8 The vertical velocity of the zonal average (110~124°E) during the “combined modality” period (day-3~day+3) [contour lines, units: hPa/s, the solid (dashed) line represents sink (ascent) and non-adiabatic heating [shading, units: K/day, positive (negative) value is non-adiabatic heating (non-adiabatic cooling)].

由图 7 和图 8 可以看出, 负 SR 与正 EAP 型“结合模态”期间, 江淮流域不仅有充沛的水汽输送, 垂直运动也更为强烈, 说明负 SR 和正 EAP 型的协同出现有利于江淮流域持续性降水发生, 进一步表明了“结合模态”对 2020 年江淮流域入梅偏早的影响。

6 结论与讨论

本文采用 ERA5 逐日再分析资料和中国气象局提供的逐日站点降水资料, 针对负 SR 型与正 EAP 型“结合模态”对 2020 年江淮流域入梅的影响进行了研究和分析, 讨论了 2020 年江淮流域入梅时间偏早的原因及其和 SR 型与 EAP 型“结合模态”的关系。主要结论如下:

(1) 2020 年 6 月初, 负 SR 型和正 EAP 型同时出现, SRI 与 EAPI 在 6 月 9 日位相差达到最大, 此时降水为正距平且标准差为最大值。表明负 SR 和正 EAP “结合模态”导致 2020 年入梅时间偏早并触发江淮流域的持续性降水。

(2) “结合模态”前期, 对流层高层西风急流逐渐向南伸展并稳定维持在江淮流域北侧, 负 SR 型引起西风急流加速, 促使急流入口区南侧的江淮流域上空出现强的高层辐散。对流层中层, 西太平洋副热带高压在正 EAP 型的影响下开始向西移动。“结合模态”维持期间, 随着负 SR 型波列的发展, 东亚中纬度异常气旋的加深使西风急流进一步加速, 也进一步使江淮流域上空的高层辐散加强。另外, 负 SR 型维持下, 南亚高压东伸至 120° E, 在南亚高压东北侧有偏北气流产生, 使得中纬度异常气旋更强, 进而使得从中高纬度向江淮流域的正涡度平流加强。这不仅利于高层辐散的发展与稳定维持, 也给江淮流域的降水提供了条件。对流层中层, 副高在正 EAP 型影响下持续西移, 与南亚高压相向而行, 最终二者重叠于对江淮流域降水有利的位置。

(3) “结合模态”发生期间, 与正 EAP 型相关的一对异常的“气旋-反气旋”环流出现在东亚中、低纬度地区。低纬度反气旋带来了低空丰富的西南暖湿气流, 向江淮流域输送强劲的水汽。与此同时, 中纬度气旋西南侧的偏北气流有利于干冷空气向南输送, 与西南暖湿气流汇合于江淮流域上空, 带来强烈的水汽辐合, 上升运动更为强烈。

本文讨论了负 SR 与正 EAP “结合模态”对 2020 年江淮流域入梅的影响, 发现此次异常入梅与“结合模态”的出现有一定关系。我们前期对 1979-2015 年间 24 次“结合模态”

的合成分析也表明负 SR 型和正 EAP 型的结合确实可以触发江淮流域持续性降水（Wang et al., 2018; Wang and Wang, 2018）。但是两类波列为什么会反相维持？其大气内部能量学转化有何特征？与热带海温异常等外强迫有何关系？以及二者对江淮流域梅雨期降水强度和持续时间的相对贡献如何？这些问题仍有待于进一步研究。



参考文献 (References)

- 陈丽娟, 赵俊虎, 顾薇, 等. 2019. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J]. 应用气象学报, 30(04): 385-400. Chen L J, Zhao J H, Gu W, et al. 2019. Advances of research and application on major rainy seasons in China[J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 30(04): 385-400. doi:10.11898/1001-7313.20190401
- Chen Y, Zhai P M. 2014. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in Central-Eastern China[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140(682): 1467-1478. doi:10.1002/qj.2231
- Chen Y, Zhai P M. 2015. Synoptic-scale precursors of the East Asia/Pacific teleconnection pattern responsible for persistent extreme precipitation in the Yangtze River Valley[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141(689): 1389-1403. doi:10.1002/qj.2448
- Ding Q H, Wang B. 2007. Intraseasonal teleconnection between the summer Eurasian wave train and the Indian Monsoon[J]. Journal of Climate, 20(15): 3751-3767. doi:10.1175/JCLI4221.1
- 丁一汇. 2019. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. 暴雨灾害, 038(5): 395-406. Ding Y H. 2019. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 038(5): 395-406. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.001
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2009. 东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响[J]. 大气科学, 33(3): 581-592. Du Y, Zhang Y C, Xie Z Q. 2009. Location Variation of the East Asia Subtropical Westerly Jet and Its Effect on the Summer Precipitation Anomaly over Eastern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(3): 581-592. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.15
- 傅云飞, 罗晶, 王东勇, 等. 2020. 夏季江淮地区降水的气候变化研究进展[J]. 暴雨灾害, 39(04): 317-324. Fu Y F, Luo J, Wang D Y, et al. 2020. A review of studies on climate change of summer precipitation in the Jianghuai region[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 39(4): 317-324. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.001
- 高守亭, 周玉淑, 冉令坤. 2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学, 42(04): 833-846. Gao S T, Zhou Y S, Ran Y K. 2018. A Review on the Formation Mechanisms and Forecast Methods for Torrential Rain in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(04): 833-846. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17277
- Guo Y Y, Zhang R J, Wen Z P, et al. 2021. Understanding the role of SST anomaly in extreme rainfall of 2020 Meiyu Season from an interdecadal perspective[J]. Science China Earth Sciences, 64(10): 1619-1632. doi:10.1007/s11430-020-9762-0
- 胡亮, 李耀东, 何金海. 2010. 东亚热带季风与副热带季风降水特征研究的回顾与展望[J]. 热带气象学报, 26(06): 813-818. Hu L, Li Y D, He J H. 2010. Review of and outlook on the study of precipitation associated with East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26(06): 813-818. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.06.023

- 黄荣辉, 皇甫静亮, 刘永, 等. 2016. 西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和台风活动影响过程及其机理的最近研究进展[J]. 大气科学, 40(5): 877-896. Huang R H, Huangfu J L, Liu Y, et al. 2016. Progress in Recent Research on the Processes and Physical Mechanisms Involved in the Influence of the Western Pacific Warm Pool on the Monsoon Trough and Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(5): 877-896. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15251
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, Processes, and Causes of the Spatio-temporal Variabilities of the East Asian Monsoon System[J]. Adv. Atmos. Sci., 29(5): 910-942. doi:10.1007/s00376-012-2015-x
- Huang R H, Chen J L, Huang G. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China[J]. Adv. Atmos. Sci., 24(6): 993-1023. Doi:10.1007/s00376-007-0993-x
- Li C F, Lin Z D. 2015. Predictability of the summer East Asian upper-tropospheric westerly jet in ENSEMBLES multi-model forecasts[J]. Adv. Atmos. Sci., 32(12): 1669-1682. doi:10.1007/s00376-015-5057-z
- Li L, Zhai P M, Chen Y, et al. 2016. Low-Frequency Oscillations of the East Asia-Pacific Teleconnection Pattern and Their Impacts on Persistent Heavy Precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. Journal of Meteorological Research, 30(04): 459-471. doi:10.1007/s13351-016-6024-z
- 李勇, 金荣花, 周宁芳, 等. 2017. 江淮梅雨季节强降雨过程特征分析[J]. 气象学报, 75(5):717-728. Li Y, Jin R H, Zhou N F, et al. 2017. An analysis on characteristics of heavy rainfall processes during the Meiyu season in Jianghuai region[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(5): 717-728. doi:10.11676/qxb2017.052
- 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 influence factors of China Meiyu[J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27(4): 464-471. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2007.04.018
- 梁萍, 丁一汇, 何金海, 等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究[J]. 大气科学, 34(02): 418-428. Liang P, Ding Y H, He J H, et al. 2010. A Study of Determination Index of Regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe Basin[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(02): 418-428. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.15
- 刘芸芸, 丁一汇. 2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象, 46(11): 1393-1404. Liu Y Y, Ding Y H. 2020. Characteristics and Possible Causes for the Extreme Meiyu in 2020[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(11): 1393-1404. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.001
- 陆日宇, 黄荣辉. 1998. 东亚-太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响[J]. 大气科学, 22(5): 727-734. Lu R Y, Huang R H. 1998. Influence of East Asia/Pacific Teleconnection Pattern on the Interannual Variations of the Blocking Highs over the Northeastern Asia in Summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22(5): 727-734. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.05.07

- 陆日宇, 林中达, 张耀存. 2013. 夏季东亚高空急流的变化及其对东亚季风的影响[J]. 大气科学, 37(2): 331-340. Lu R Y, Lin Z D, Zhang Y C. 2013. [J]. Variability of the East Asian upper-troposphere jet in summer and its impacts on the East Asian monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(2): 331-340. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12310
- 闵锦忠, 李春, 吴凡. 2005. 夏季热带西太平洋对流与长江中下游降水关系的研究[J]. 大气科学, 29(6): 947-954. Min J Z, Li C, Wu P. 2005. A Study of the Relationship Between Summer Tropical Convection over the Western Pacific and the Rainfall in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(6): 947-954. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.06.10
- 齐庆华. 2019. 中国东部降水的极端特性及其气候特征分析[J]. 热带气象学报, 35(06): 742-755. Qi Q H. 2019. The climatological features and peculiarities of precipitation over Eastern China[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 35(06): 742-755. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.067
- 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(05): 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(05): 649-660. doi:10.3969 /2020jms.0078
- 单幸, 周顺武, 王美蓉, 等. 2020. 在 ENSO 不同位相下青藏高原春季感热对华南盛夏降水的影响[J]. 热带气象学报, 36(01): 60-71. Shan X, Zhou S W, Wang M R. 2020. Effects of spring sensible heat in the Tibetan plateau on midsummer precipitation in South China under ENSO[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 36(01): 60-71. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2020.007
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳[J]. 应用气象学报, 17(5): 513-525. Tao S Y, Wei J. 2006. The Westward, Northward Advance of the Subtropical High over the West Pacific in Summer[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17(5): 513-525. doi:10.11898/1001-7313.20060509
- Wang C, Wang L J. 2018. Combined Effects of Synoptic-Scale Teleconnection Patterns on Summer Precipitation in Southern China[J]. Atmosphere, 9(4): 154-173. doi:10.3390/atmos9040154
- Wang L J, Wang C, Guo D. 2018. Evolution mechanism of synoptic-scale EAP teleconnection pattern and its relationship to summer precipitation in China[J]. Atmospheric Research, 214: 150-162. doi:10.1016/j.atmosres.2018.07.023
- 许乐心, 张人禾, 齐艳军. 2017. 长江中游和下游夏季降水季节内振荡的差异[J]. 大气科学, 41(6): 1125-1140. Xu L X, Zhang R H, Qi Y J. 2017. Differences in Intraseasonal Summer Rainfall Oscillation between the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(6): 1125-1140. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.17112

- 姚秀萍, 吴国雄, 刘还珠. 2008. 与 2003 年梅雨期西太副高东西向运动有关的热带上空东风带扰动的结构和演变特征[J]. 热带气象学报, 24(1): 20-26. Yao X P, Wu G X, Liu H Z. 2008. Structural and evolution characteristics of the Easterlies vortex over the tropical region relating to the East-West shift of the subtropical anticyclone over the western Pacific ocean in the Meiyu period 2003[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24(1): 20-26. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.01.003
- 翟盘茂, 李蕾, 周伯铨, 等. 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al. 2016. Progress on Mechanism and Prediction Methods for Persistent Extreme Precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27(5): 631-640. doi:10.11898/1001-7313.20160511
- 张芳华, 陈涛, 张芳, 等. 2020. 2020 年 6-7 月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J]. 气象, 46(11): 1405-1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F. 2020. Extreme Features of Severe Precipitation in Meiyu Period over the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Basin in June-July 2020[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(11): 1405-1414. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.02
- 张琴, 姚秀萍, 寿绍文. 2011. 梅雨期西太平洋副热带高压异常东退与东风带扰动关系的合成诊断分析[J]. 大气科学, 35(1): 29-40. Zhang Q, Yao X P, Shou S W. 2011. The Composite Analysis of the Relationship between the Abnormal Retreat of the Subtropical Anticyclone over the Western Pacific Ocean and the Easterlies Vortex in Meiyu Period[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 35(1): 29-40. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.03
- 张庆云, 郭恒. 2014. 夏季江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究[J]. 大气科学, 38(04): 656-669. Zhang Q Y, Guo H. 2014. Circulation Differences in Anomalous Rainfall over the Yangtze River and Huaihe River Valleys in Summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(04): 656-669. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13240
- 张耀存, 曾鸿阳. 2020. 东亚高空急流协同变化研究新进展[J]. 气象科学, 40(05): 617-627. Zhang Y C, Zeng H Y. 2020. Recent progresses in the studies of the East Asian jet streams[J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 40(05): 617-627. doi: 10.3969/2020jms.0070
- 赵思雄. 2019. 我国暴雨机理与预报研究进展及其相关问题思考[J]. 暴雨灾害, 38(05): 422-430. Zhao S X. 2019. Progress in mechanism study and forecast for heavy rain in China in recent 70 years[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 38(05): 422-430. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.004
- 周天军, 任俐文, 张文霞. 2021. 2020 年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究[J]. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1637-1649. Zhou T J, Ren L W, Zhang W X. 2021. Anthropogenic influence on extreme Meiyu rainfall in 2020 and its future risk[J]. Scientia Sinica(Terrae) (in Chinese), 51(10): 1637-1649. doi:10.1360/ SSTe-2020-0325