

2020 年江淮流域超强梅雨年际异常的驱动因子分析

赵俊虎¹ 张涵² 左金清¹ 熊开国³ 陈丽娟^{1,4*}

1 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 中国气象局-南京大学气候预测研究联合实验室, 北京 100081

2 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

3 武汉区域气候中心, 武汉 430074

4 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘要 利用观测诊断和数值模拟相结合的方法, 研究了2020年江淮流域6~7月超强梅雨年际异常的环流特征和驱动因子。结果表明: (1) 2020年梅雨期长度和江淮流域总降水量均为1961年以来第一位, 超强梅雨主要与西北太平洋异常反气旋(WNPAC)的异常偏强和异常西伸有关, WNPAC为江淮流域梅雨期持续的强降水提供了充沛的水汽来源; (2) 2019年11月~2020年3月, 赤道中东太平洋发生一次弱的中部型El Niño事件, 本次事件持续时间短、强度偏弱, 不足以激发和维持2020年梅雨期异常偏强的WNPAC, 而春、夏季热带印度洋和热带北大西洋海温异常持续偏暖是WNPAC异常偏强和西伸的主要驱动因子; (3) 热带印度洋暖海温在其东部的西太平洋激发出大气Kelvin波响应, 造成了纬向风变化的不均匀分布, 通过埃克曼抽吸, 抑制了局地对流活动, 驱动了WNPAC的生成; 而热带北大西洋暖海温则引起局地对流活动增强, 导致热带北大西洋上空上升运动和热带中部太平洋下沉运动增强, 在西北太平洋上空激发异常的低空反气旋; 热带印度洋和热带北大西洋暖海温对2020年6~7月WNPAC异常偏强均有显著的正贡献。

关键词: 超强梅雨, 西北太平洋异常反气旋, El Niño, 热带印度洋, 热带北大西洋

中图分类号: P448 **文献标识码:** A

文章编号: doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2104.21011

收稿日期: 2021-1-24; **网络预出版日期:**

资助信息: 国家自然科学基金项目(42075017、41975102、41875093、41705074 和 41805061), 科技部重点研发计划(2018YFC1506005 和 2018YFC1506006), 2021 年中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033) 共同资助

作者简介: 赵俊虎, 男, 1985 年出生, 高级工程师, 主要从事短期气候预测研究. E-mail: zhaojh@cma.gov.cn

通讯作者: 陈丽娟, 女, 1970 年出生, 研究员, 国家级首席预报员, 主要从事短期气候预测研究. E-mail: chenlj@cma.gov.cn

What drives the super strong precipitation over the Yangtze-Huaihe Valley in Meiyu periods of 2020?

Junhu Zhao¹, Han Zhang², Jinqing Zuo¹, Kaiguo Xiong³, LiJuan Chen^{1,4*}

1 Laboratory for Climate Studies, CMA-NJU Joint Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

3 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

4 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

ABSTRACT

Record-breaking rainfalls occurred over Yangtze-Huaihe River Basin (YHRB) in China during Meiyu Period (June-July, JJ) of 2020, causing severe floods and disasters. These rainfall anomalies were closely linked to the extremely strong anomalous anticyclone over the western North Pacific (WNPAC), which favored convergence of water vapor over YHRB. This study argued what have driven the record-breaking rainfalls and WNPAC in Meiyu periods of 2020. A weak Central-Pacific El Niño rapidly decayed in spring and developed to a La Niña in late summer, while sea surface temperature (SST) in the tropical Indian Ocean (TIO) and tropical northern Atlantic (TNA) was considerably high from previous winter to summer. We revealed that the weak decaying El Niño alone was not sufficient to maintain the strong WNPAC in JJ of 2020, whereas the long-lasting warm SST anomalies in the TIO and TNA prominently contributed to the enhancement and westward shift of the WNPAC. The TIO warming intensifies the WNPAC through the eastward propagation of Kelvin waves and/or modulating the Hadley circulation. The TNA warming can force a westward-extending overturning circulation over the Pacific-Atlantic Oceans, with a sinking branch over the central tropical Pacific, which suppresses the convection activity over there and in turn gives rise to the WNPAC. The TIO and TNA warming contributed significantly to the extremely strong WNPAC in JJ of 2020.

Keywords Super strong Meiyu precipitation, El Niño, WNP anomalous anticyclone, tropical Indian Ocean, tropical Northern Atlantic

1 引言

“梅雨”，是人们比较熟悉的天气、气候现象，指每年6~7月在中国江淮流域、朝鲜半岛南部（称为Changma）和日本中南部（称为Baiu）出现的以持续多雨为主要特征的天气、气候现象，是东亚夏季风季节性北推过程中的重要产物，也是影响东亚、尤其是我国的最重要天气、气候过程之一（Akiyama, 1984; Tao and Chen, 1987; 魏凤英和宋巧云, 2005; 吴志伟等, 2006; 范可, 2006; 丁一汇等, 2007; 赵俊虎等, 2018a; Ding et al. 2020）。入梅过早，对江淮流域农作物的收割非常不利；入梅过晚，或出现空梅，则会引起大范围干旱（如1934、1958、1978年）；梅汛期雨日集中、雨量大、持续时间长，易出现持续性大暴雨、洪涝灾害，不但对农作物有很大影响，对流域和湖泊等水利管理、人民生命财产也有很大威胁（如1954、1991、1998、1999、2016年）（陆尔和丁一汇, 1996; 李维京, 1999; 袁媛等, 2017; 赵俊虎等, 2018b; 孙树鹏等, 2020）。因此，加强梅雨异常的机理诊断和预测方法研究、及早做出较准确的梅汛期预报，可为国家防汛抗旱提供科学依据（何金海等, 2006; 封国林等, 2015; 王会军等, 2018）。

2020 年我国江淮流域遭遇了超强梅雨，入梅偏早、出梅偏晚、梅汛期长、梅雨量异常偏多，其中梅汛期长度和梅雨量均超过 1998 年，位列 1961 年以来第一位（陈涛等, 2020）。梅汛期共经历了 11 轮强降水过程，降水强度大，被媒体称为“暴力梅”；持续的暴雨引起长江和淮河等江河多次洪峰，给江淮流域带来严重的洪涝灾害（张芳华等, 2020），引起社会各界和气象学者的广泛关注。张芳华等（2020）、陈涛等（2020）、刘芸芸和丁一汇（2020）和 Liu 等（2020）根据观测事实，分别从天气、次季节等不同尺度，多层次剖析此次超强梅雨季的特征，并开展对比分析，进一步根据大尺度环流系统演变、天气系统特征、强降水极端性等研判其异常成因，研究结论可为今后类似梅雨年的诊断和预测、梅雨暴雨预报和检验等提供有益启发。

但从季节预测信号的角度，还需要进一步分析 2020 年江淮流域超强梅雨的下垫面异常驱动因子。在影响梅雨的众多气候因子中，ENSO 无疑是最重要的因子之一（Zhang et al., 1999; Wang et al., 2000, 2002; Wu et al., 2003; 梁萍等, 2007, 2018; 陈丽娟等, 2013）。超强或强的 El Niño 衰减年夏季，东亚夏季风偏弱，西太平洋副热带高压（西太副高）和低层反气旋偏强、位置偏西，易导致江淮流域

梅雨异常偏强。例如 1998 年和 2016 年 (Tim et al., 2017; 袁媛等, 2017; 赵俊虎等, 2018b)。国家气候中心监测显示: 2019 年 11 月至 2020 年 3 月, 赤道中东太平洋发生一次弱的中部型 El Niño 事件, 持续 5 个月, 峰值强度仅为 0.60°C , 为 1981 年以来持续时间最短、强度最弱的一次 El Niño 事件。1981 年以来还有三次弱的 El Niño 事件, 2004 年 7 月至 2005 年 1 月、2006 年 8 月至 2007 年 1 月、2018 年 9 月至 2019 年 6 月, 而这三次 El Niño 事件衰减年夏季江淮流域并未出现强梅雨。那么, 2020 年江淮流域超强梅雨的异常成因是什么? 下垫面异常驱动因子及其影响途径是什么? 这些问题值得进一步研究。

本文拟在 2020 年梅雨降水观测和历史资料诊断分析的基础上, 利用气候模式开展敏感性试验, 验证 2020 年 6~7 月梅雨异常的驱动因子及其机理。所得研究结论将有助于进一步加深对江淮流域梅雨异常的机理认识, 为梅汛期的季节预测提供参考依据。

2 资料与方法

本文所用资料主要包括: 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 发布的全球逐月大气环流再分析资料, 分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$, 垂直方向从 1000~10 hPa 共 17 层等压面 (Kalnay et al., 1996), 1978 年之前再分析资料存在较大的系统性偏差 (Wu et al., 2005), 故本文选取 1979 年之后资料进行研究。海表温度 (以下简称海温或 SST) 资料来自 Hadley 中心 (HadISST, Reynolds et al., 2002), 水平空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, 资料长度为 1870~2020 年。

降水观测资料为中国气象局国家气象信息中心提供的 2374 站逐日降水资料。Niño3.4 指数、西太副高指数来自国家气候中心 (<http://ncc.cma.gov.cn/cn>)。热带印度洋 SST 异常 (SSTA) 指数 (TIO, tropical Indian Ocean) 和热带北大西洋 SSTA 指数 (TNA, tropical North Atlantic) 分别定义为 (15°S – 15°N , 40° – 120°E) 和 (EQ – 20°N , 70°W – 0°E) 区域平均的 SSTA。西北太平洋异常反气旋 (WNPAC, western North Pacific anomalous anticyclone) 强度指数定义为 850hPa (10° – 25°N , 115° – 150°E) 区域平均的流函数 (Zuo et al., 2019)。文中前冬指的是上一年 12 月至当年 2 月, 春季为当年 3~5 月。变量的气候值均为 1981~2010 年的 30 年平均值。

ENSO 事件判别根据 Ren et al. (2018) 对厄尔尼诺/拉尼娜事件确定。简单

概述如下：Niño3.4指数3个月滑动平均的绝对值达到或超过0.5℃、且至少持续5个月，判定为一次ENSO事件，满足ENSO事件判定的最早（晚）月份为事件的起始（结束）月份，持续时间为ENSO事件起始直至结束的总月数。事件过程中，Niño3.4指数3个月滑动平均的绝对值达到最大的时间和数值分别定义为事件的峰值时间和峰值强度，ENSO事件强度以事件的峰值代表其强度。

本文采用美国通用大气环流模式（Community Atmosphere Model version 5.3, CAM5.3），该模式与通用陆面模式CLM4.0相耦合，模式水平分辨率为1.9°×2.5°。已有研究表明，CAM5.3能够较好地模拟出热带印度洋和热带大西洋海温异常对西北太平洋和东亚气候的影响（任宏昌等，2017；Li et al., 2018；Zuo et al., 2019）。本文共设计了两组敏感性试验（表1），分别用于分析热带印度洋和热带北大西洋SSTA对2020年6～7月WNPAC和我国江淮流域梅雨的影响。每组敏感性试验包含50个集合样本，下边界强迫为2020年强迫区域的观测海温，积分时段为5～7月，初始场来自于控制试验。控制试验的下垫面强迫是气候平均的观测海温和海冰，共运行60年，前10年丢弃。由于大气环流模式普遍存在对观测大气环流异常程度模拟不足的问题（Kang et al., 2002），故在敏感性试验中海温异常强迫设置为实际观测的1.5倍。

表 1 控制试验和敏感性试验设计

Table 1 Boundary forcing and target regions for the numerical experiments

名称	下边界强迫	强迫区域
控制试验	气候态的观测海温和海冰	全球
TIO2020	2020年5-7月观测海温	热带印度洋（20°S–20°N, 40°E–120°E）
TNA2020	2020年5-7月观测海温	热带北大西洋（EQ–20°N, 70°W–0°E）

3 2020 年超强梅雨的极端性

按照中国气象局对中国梅雨（包括江南梅雨、长江中下游梅雨和江淮梅雨）的监测业务规范（赵俊虎等，2018a），2020年中国梅雨的持续阶段为6月1日～8月1日，梅雨持续时间长达62天，较常年（40天）偏长22天，与2015年并列为1961年以来历史最长梅雨年（陈涛等，2020；刘芸芸和丁一汇，2020）。图1为2020年中国东部6～7月累积降水量及其距平百分率的空间分布。由图可见，从淮河、

长江中下游和江南北部的广大区域在梅雨期累计降水量普遍达500mm以上,长江中下游沿江区域为降水量的大值中心,超过800mm,局部地区超过1400mm(图1a)。江南中北部至江淮的大部分地区降水偏多,其中江淮流域大部地区偏多5成以上,湖北东部、安徽南部和浙江西北部等地偏多1倍以上(图1b),降水异常偏多导致上述地区发生严重汛情。为度量整个江淮流域梅雨量的年际变化,计算了1961~2020年6~7月江淮流域(28°~34°N, 110°~123°E, 407个站点)区域平均的降水量,结果如图1(c)所示。2020年梅雨季节江淮流域平均降水量为689.71mm, 标准化指数高达3.76, 为1961年以来历史最高。

图 1 2020 年 6~7 月 (a) 累计降水量 (单位: mm) 和 (b) 降水距平百分率 (单位: %) 的空间分布, (c) 1961~2020 年 6~7 月江淮流域区域平均降水量的标准化序列

Fig.1 (a) Accumulated precipitation (unit: mm) and (b) precipitation anomalies (unit: %) in June–July 2020, (c) Standardized time series of regionally averaged precipitation in Yangtze–Huaihe River Basin (YHRB, 28 °–34 °N, 110 °–123 °E, see the box in (a)).

2020年江淮流域超强梅雨在降水强度上也呈现出明显的极端性特征。图2给出了2020年6~7月中雨以上量级降水(日降水量 $\geq 10.0\text{mm}$)日数(图2a)及其距平(图2b)的空间分布。由图可见,长江中下游地区中雨以上量级降水日数普遍在10天以上,较常年偏多6天以上,湖北东部、安徽南部和浙江西北部等地降水日数高达20天以上,较常年偏多10天以上。大雨量级以上降水(日降水量 $\geq 25.0\text{mm}$)日数和暴雨量级以上降水(日降水量 $\geq 50.0\text{mm}$)日数空间分布(图略)也有类似的特征。图2(c)进一步给出了1961~2020年6~7月江淮流域区域平均不同量级日降水量日数的年际变化。2020年江淮流域区域日平均降水量 $\geq 10.0\text{mm}$ 、 $\geq 25.0\text{mm}$ 和 $\geq 50.0\text{mm}$ 的日数分别为16.6天、9.2天和4.1天,较常年平均分别偏多7.2天、4.5天和1.8天,均为1961年以来第一位。张芳华等(2020)对2020年梅雨期不同等级雨日的分析也表明,该年中雨、大雨、暴雨、大暴雨及以上站次均为1961年以来同期最多,且后三种等级偏多更为显著。综合可见,2020年江淮流域的超强梅雨具有较强的极端性,打破历史纪录。

图 2 2020 年 6~7 月 (a) 日降水量大于 10mm 的日数及其 (b) 距平的空间分布, (c) 1961~2020 年 6~7 月江淮流域区域平均不同量级日降水量日数的时间序列

Fig.2 Spatial distribution of (a) the rainy days with precipitation ≥ 10 mm/day and (b) their anomalies in June–July 2020, and (c) time series of rainy days with precipitation more than 10 mm/day, 25 mm/day and 50 mm/day, respectively. Contours in (a) denote 20 days.

4 2020 年超强梅雨相联系的大尺度环流异常

图3给出了2020年6~7月对流层中层、低层大气环流及整层水汽输送的异常特征。500hPa位势高度场上, 欧亚中高纬度呈“两脊一槽”型, 乌拉尔山及以西地区和俄罗斯远东地区为高压脊, 巴尔喀什湖至贝加尔湖地区为大范围的低压槽, 西太副高异常偏强、偏西 (图3a)。低层850hPa距平风场上, 西北太平洋菲律宾及其以东地区为异常偏强的反气旋距平环流, 我国海岸线以东的流函数为正异常, 流函数中心与反气旋中心基本吻合 (图3b), 表明WNPAC异常偏强。青藏高原东侧和西北地区东部分别为偏西风 and 偏西北风异常, 中国东北南部和朝鲜半岛为偏东北风异常, 西路冷空气和东路冷空气分别南下至长江流域上游和中下游地区, 与WNPAC西北侧的暖湿气流在江淮流域辐合 (图3c), 为江淮流域梅雨期降水异常偏多提供了热力动力条件。

从1979~2020年6~7月江淮流域区域平均的降水量标准化指数回归的大气环流距平场 (图4) 可见, 对流层中层的500 hPa位势高度场 (图4a)、低层的850 hPa水平风场和流函数距平场 (图4b)、以及整层水汽通量和散度场 (图4c), 均与2020年6~7月的环流型高度相似, 尤其是在西北太平洋地区大部超过95%的置信水平。显示影响江淮流域6~7月降水的主要环流系统为对流层中层的西太副高和低层的WNPAC, 尤其是WNPAC直接影响低层的水汽输送条件。

图 3 2020 年 6~7 月平均的大气环流场: (a) 500 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: gpm) 及其距平场 (阴影), 蓝色等值线表示气候平均的 5880gpm 等值线, (b) 850hPa 风场 (矢量箭头, 单位: m s^{-1}) 和流函数 (阴影, 单位: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), (c) 整层水汽通量 (矢量箭头, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 和散度 (阴影, 单位: $10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 3 Atmospheric circulation patterns in June–July 2020. (a) 500-hPa geopotential height (contour; unit: gpm) and anomalies (shading), (b) horizontal wind (UV850, vector; unit: m s^{-1})

and stream function (shading; unit: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) anomalies at 850 hPa, and (c) the anomalies of vertically integrated (surface to 300mb) water vapor flux (vectors; $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and water vapor divergence (shadings; $10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) in June–July 2020.

图 4 1979~2020 年 6~7 月江淮流域区域平均降水量标准化指数回归的大气环流场: (a) – (c) 同图 3, 打点区和蓝色箭头均表示达到 95% 的置信水平

Fig. 4 Same as in Fig. 3, but for the simultaneous regressions of the atmospheric circulation anomalies against the normalized time series of June–July rainfall in the YHRB (YHRBRI) during 1979–2020. The dots and blue vectors indicate significance at the 95% confidence level.

从西太副高各指数的年际变化可见, 2020 年 6~7 月西太副高平均强度为 1979 年以来第二位, 仅次于 2010 年, 低层 WNPAC 强度为 1979 年以来第一 (图 5), 西太副高西伸脊点偏西 17 个经度, 也为 1979 年以来第二位, 仅次于 2010 年; 6 月西太副高脊线偏北 0.8°N , 7 月偏南 0.4°N , 西太副高脊线前期偏北后期偏南, 有利于入梅偏早、梅雨带在江淮流域长时间稳定维持。

WNPAC 是东亚梅雨系统的关键成员, 异常偏强的 WNPAC 可为江淮流域梅雨提供充沛的水汽, 是梅雨期出现强降水的必要条件 (Tao and Chen, 1987; Lu, 2001; 张庆云和陶诗言, 1999; 张庆云等, 2003)。在 El Niño 衰亡期的夏季, WNPAC 是联系热带中东太平洋 El Niño 信号与东亚夏季气候异常的主要纽带 (Chang et al., 2000; Wu et al., 2010; Chung et al., 2011; Li et al., 2017), 偏强的 WNPAC 容易导致江淮流域降水显著增加。由此可见, 2020 年 6~7 月异常偏强的 WNPAC 是造成江淮流域超强梅雨的最重要、最直接的环流系统。

图 5 1979~2020 年 6~7 月江淮流域平均降水量标准化序列 (灰色柱状) 和同期西太副高强度 and WNPSH 标准化指数时间序列。小括号里面数字为降水量与环流指数的相关系数, 上标 * 和 ** 分别表示达到 95% 和 99% 的置信水平。

Fig. 5 Normalized time series of the YHRBRI (bars), the western North Pacific Subtropical High index (WNPSH, blue solid box) and WNPAC index (red dotted line) in June–July from 1979 to 2020. Numbers in brackets denote correlation coefficient with the YHRBRI. * and ** indicate significance at the 95% and 99% confidence level, respectively.

5 2020 年超强梅雨的驱动因子分析

2020 年 6~7 月西北太平洋副热带地区长时间受异常反气旋环流控制, WNPAC 强度破历史纪录、且异常西伸, 一方面导致中国江淮流域发生超强梅雨, 另一方面导致西北太平洋长达两个月没有台风生成, 为历史罕见。历史资料显示, 强或超强 El Niño 衰减年夏季, WNPAC 往往异常偏强, 例如 1998 年、2010 年和 2016 年; 而弱的 El Niño 衰减年夏季, WNPAC 并未出现异常偏强, 例如 2005 年、2007 年和 2019 年 (图 5a)。

2019 年和 2020 年连续出现两次相似的弱中部型 El Niño 事件。两次事件的时间分别为 2018 年 9 月至 2019 年 6 月 (峰值为 11 月, 峰值强度为 1.0°C)、2019 年 11 月至 2020 年 3 月 (峰值为 11 月, 峰值强度为 0.6°C)。后一次仅持续 5 个月 (图 6), 为 1981 年以来持续时间最短、强度最弱的一次 El Niño 事件。2019 年夏季 WNPAC 并未异常偏强 (标准化指数为 0.62), 江淮流域 6~7 月降水偏少 5.4%; 而 2020 年夏季 WNPAC 异常偏强 (标准化指数为 3.11), 江淮流域 6~7 月降水偏多 78.9%。那么 2020 年 6~7 月 WNPAC 强度破历史纪录的驱动因子是什么? 从 SSTA 演变可见, 2020 年前冬赤道中太平洋 SSTA 大于 0.5°C , 而东太平洋为 $0\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ (图 6a); 春季海温偏暖有所减弱 (图 6b); 6~7 月赤道中东太平洋海温转为偏冷, 热带东南太平洋 SSTA 小于 -0.5°C (图 6c); 2020 年 4 月 Niño3.4 指数为 0.56°C , 5 月迅速降低至 -0.27°C (图 6d)。即 2020 年 El Niño 事件强度低于 2019 年, 衰减速度也较快。可见 2020 年弱中部型 El Niño 事件无法完全解释 WNPAC 异常偏强的状况。

研究表明除 El Niño 以外, 西北太平洋、海洋性大陆、热带印度洋、热带北大西洋等关键区域海温异常和局地海气相互作用对北半球夏季 WNPAC 年际变化具有明显的局地或远程影响, 是 WNPAC 年际变化的重要驱动因子(周天军等, 2004; Li et al. 2005; Yang et al. 2007; Xie et al. 2009; 徐志清和范可, 2012; Wang et al. 2013; 黄刚等, 2016; Wang et al., 2019; Zuo et al., 2019; 段欣好等, 2020)。监测显示, 热带印度洋、热带北大西洋以及北太平洋 ($30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$) 海温从 2020 年前冬至 6~7 月一直维持偏暖(图 6a~c)。从 2018 年 9 至 2020 年 8 月, Niño3.4 指数、TIO 指数和 TNA 指数 24 个月的演变可见, 2018 年 11 月之后 Niño3.4 指数总体呈现波动下降趋势, 而 TIO 指数和 TNA 指数则波动中上升, 二者分别在

2020 年 4 月和 3 月达到最大值，这种变化体现了两次 El Niño 持续地“放电”，而 TIO 和 TNA 则持续地“充电”。

图 6 2020 年 (a) 前冬、(b) 春季和 (c) 6~7 月 SST 距平 (单位: °C), (d) 2018 年 9 月至 2020 年 8 月 Niño3.4 指数、TIO 指数和 TNA 指数 (单位: °C) 的演变

Fig.6 SSTAs (unit: °C) in (a) DJF, (b) MAM, and (c) JJ of 2020, and (d) time series of the Niño3.4 index, TIO index and TNA index (unit: °C) from September 2018 to August 2020

热带印度洋和热带北大西洋春夏季 SSTA 持续暖异常，是否为夏季 WNPAC 的驱动因子？图 7 给出了 6~7 月平均的 WNPAC 指数回归的前冬至 6~7 月的 SSTA。除了北太平洋以外，回归的 SSTA 空间演变与 2020 年非常类似，前冬热带中东太平洋、热带印度洋和热带北大西洋海温偏暖（图 7a）；春季 SSTA 空间型类似前冬特征，但热带中东太平洋暖海温减弱，而热带北大西洋暖海温明显增强（图 7b）；6~7 月 SSTA 空间型有明显转变，热带中东太平洋海温转为偏冷，而热带印度洋和热带北大西洋海温维持偏暖，强度较春季略有减弱（图 7c）。2020 年北太平洋 SST 异常偏暖可能与太平洋年代际振荡（PDO）为负位相有关，而 PDO 负位相背景下西太副高往往偏弱偏北，不利于长江中下游降水偏多（朱益民和杨修群，2003）。因此，2020 年北太平洋 SST 异常偏暖不是 WNPAC 异常偏强的主要影响因子。

图 7 1979~2020 年 6~7 月平均的 WNPAC 强度指数回归的 SSTAs (单位: °C)。(a) 前冬，(b) 春季，(c) 6~7 月，网格区表示达到 95%的置信水平

Fig. 7 Regressions of SSTAs (unit: °C) in (a) previous winter (December–February, DJF), (b) March–May (MAM), and (c) June–July (JJ) against the JJ WNPAC index for the period 1979–2020. Cross-hatching denotes significance at the 95% confidence level.

从上一年的 9 月至当年 8 月各月 SST 指数与 6~7 月平均的 WNPAC 指数的超前一滞后相关系数（图 8）可以清楚地看出，上一年 9 月至当年 4 月逐月 Niño3.4 指数与 WNPAC 呈显著的正相关，达到 99% 的置信水平，5~8 月转为负相关；上一年 10 月至当年 8 月逐月 TIO 指数与 WNPAC 呈显著的正相关，12 月及之后大部分月份达

到99.9%的置信水平；2~8月逐月TNA指数与WNPAC呈显著的正相关，均达到99.9%的置信水平，其中6月相关系数高达0.69。即从前冬至夏季，赤道中东太平洋海温对6~7月WNPAC的影响逐步减弱，而春夏季热带印度洋和热带北大西洋海温异常对6~7月WNPAC的影响逐步加强。

图 8 1979~2020 年 6~7 月 WNPAC 指数与海温指数的超前滞后相关（粗线和圆点分别表示达到 99%和 99.9%的置信水平）

Fig. 8 Lead-lag correlations of the JJ WNPAC with the Niño3.4, TIO, and TNA indices for the period 1979–2020. Bold lines and dot lines indicate the 99% and 99.9% confidence level.

Zuo et al. (2019) 通过观测和数值模式实验研究了热带北大西洋海温对WNPAC的影响，研究表明晚春至秋季热带北大西洋海温与WNPAC有显著的正相关，前者超前WNPAC 1~2月时相关最显著，且这种关系独立于ENSO。图9给出了1979~2020年前冬Niño3.4指数、5~7月平均的TIO指数和TNA指数与6~7月平均的WNPAC指数的散点图。首先，从前冬Niño3.4指数来看，其与6~7月平均的WNPAC指数有显著的正相关关系（相关系数为0.36），13个El Niño衰减年有12年WNPAC偏强，而8个弱的El Niño衰减年仅有3年WNPAC标准化指数大于1.0，包括2020年（图9a）。其次，5~7月平均的TIO指数与6~7月平均的WNPAC指数的相关更高（相关系数为0.54，与Niño3.4的偏相关为0.43），TIO指数大于0的22年中有13年WNPAC正异常，其中有12年为El Niño衰减年（图9b），表明与El Niño衰减相联系的热带印度洋暖海温年夏季WNPAC易偏强，即体现了印度洋的容器效应。5~7月平均的TNA指数与6~7月平均的WNPAC指数的相关最高（相关系数为0.68，与Niño3.4的偏相关为0.63），TNA指数大于0的20年中有12年WNPAC正异常，其中有6年为El Niño衰减年（图9c），而非El Niño衰减年的6年中，2008年和2013年TIO指数为负异常，WNPAC标准化指数大于1.0，表明热带北大西洋海温异常及其对WNPAC的影响相对独立于El Niño。

图 9 1979~2020 年海温指数和 6~7 月 WNPAC 指数的散点图，（a）前冬 Niño3.4 指数，（b）5~7 月平均的 TIO 指数，（c）5~7 月平均的 TNA 指数，紫色方框和红点表示 El Niño 衰减年夏季，右下角数字表示相关系数，小括号中数字为与 Niño3.4 的偏相关

Fig 9. Scatter plots of the JJ WNPAC and (a) DJF Niño3.4 index, (b) MJJ TIO index, (c) MJJ TNA index during 1979–2020. The purple box and red dots represent the summer of El Niño decay years. The number in the lower right corner represents the correlation coefficient between WNPAC and SST index, and the number in braces represents the partial correlation with Niño3.4.

众多研究也表明，El Niño在秋、冬季达到峰值，并对热带印度洋和热带北大西洋进行“充电”，El Niño春夏季衰减后其对大气环流的影响也减弱，而此时热带印度洋和热带北大西洋开始“放电”，完成El Niño对气候影响的“接力”作用。热带印度洋海温偏暖时，对流偏强，并通过湿绝热调整过程激发东传的Kelvin波，进而通过埃克曼抽吸抑制了西太暖池对流，使得WNPAC加强、西伸，这一过程称为印度洋电容器效应（Yang et al., 2007; Xie et al. 2009; Wu et al., 2009）。热带北大西洋海温偏暖则有利于春季至秋季局地对流活动增强，导致热带北大西洋上空上升运动和热带中部太平洋下沉运动增强，后者在西北太平洋上空激发异常的低空反气旋（Hong et al., 2014, 2015; Zuo et al., 2019）。图10给出了2020年6~7月平均的850hPa和200hPa速度势距平和辐散风距平。热带印度洋和热带北大西洋暖海温异常加强了局地热带辐合带上的对流活动，使得热带大西洋—印度洋对流层低层产生异常辐合（图10a），加强了局地整层的上升运动，而对流层高层则为异常辐散（图10b），进而加强了热带中西太平洋对流层高层的异常辐合与下沉运动，西太平洋对流层低层形成反气旋式环流异常响应（图3b）。以上综合分析表明，热带印度洋和热带大西洋海温异常均对El Niño衰减年WNPAC异常有重要影响，2020年6~7月WNPAC异常偏强主要是春、夏季热带印度洋和热带大西洋海温二者持续偏暖共同驱动的结果。

图 10 2020 年 6~7 月平均的 (a) 850hPa, (b) 200hPa 速度势距平 (阴影, 单位: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 和辐散风距平 (箭头, 单位: m s^{-1})

Fig.10 Velocity potential (Contours and shadings, unit: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) and divergent wind (vectors, unit: m s^{-1}) anomalies at (a) 850 hPa and (b) 200hPa in JJ of 2020.

6 驱动因子影响的数值模式试验

为验证上一节的诊断分析结果,分别以2020年观测的热带印度洋海温和热带北大西洋海温驱动CAM5.3模式,进行了两组敏感性试验(表1)。模式响应定义为敏感性试验和控制试验集合平均的差值。

图11给出了TIO 2020试验中6~7月平均降水、850hPa风场和流函数异常对热带印度洋海温异常强迫的响应。可以看到,热带印度洋大部分区域降水显著偏多(图11a),表明下垫面暖海温异常有利于上空对流的增强。同时,赤道印度洋至中太平洋为显著的东风异常,西北太平洋受反气旋异常环流控制(图11b),其西侧的偏南风异常则有利于水汽输送到我国江淮流域至日本南部,导致降水偏多(图11a)。这表明,热带印度洋暖海温异常通过激发东传的Kelvin波,导致WNPAC得到维持和增强(Xie et al., 2009, 2016),进而引起我国江淮流域至日本的超强梅雨(图7a)。

图 11 热带印度洋海温强迫的 2020 年 6~7 月平均的 (a) 降水距平 (单位: mm/d) 和 (b) 850hPa 风场 (矢量箭头, 单位: m s^{-1}) 和流函数 (阴影, 单位: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 距平 (a) 中圆点和 (b) 中绿色箭头均表示达到 95% 的置信水平

Fig. 11 Differences in (a) precipitation (unit: mm d^{-1}) and (b) horizontal wind (vector; unit: m s^{-1}) and stream function (shading; unit: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa in JJ in response to the TIO SSTA forcing obtained from the CAM5.3 model experiment. Dots in (a) and blue vector in (b) represent precipitation and wind anomalies that are significant at the 95% confidence level, respectively.

图12给出了TNA 2020试验中6~7月平均降水、850hPa风场和流函数、850hPa和200hPa速度势异常对热带北大西洋海温异常强迫的响应。结果显示,热带北大西洋降水显著偏多(图12a),表明对流活动增强,对流层低层为异常辐合、高层为异常辐散气流(图12c)。同时,在热带中太平洋形成高层异常辐合与下沉运动,抑制了该地区的对流活动,进而在其西侧的副热带西北太平洋对流层低层激发出反气旋异常环流响应(图12b),这与前人研究(Hong et al., 2014, 2015; Zuo et al., 2019)所得结论一致。

图 12 热带北大西洋海温强迫的 2020 年 6~7 月平均的 (a) 降水距平 (单位: mm d^{-1}), (b) 850hPa 风场 (矢量箭头, 单位: m s^{-1}) 和流函数 (阴影, 单位: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 异常, (c) 850hPa 和 (d) 200hPa 速度势 (单位: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 异常, 其他同图 11。

Fig. 12 Differences in (a) precipitation (mm d^{-1}), (b) horizontal wind (vector; unit: m s^{-1}) and stream function (shading; unit: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa, velocity potential anomalies (unit: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) at (c) 850hPa and (d) 200hPa in JJ in response to the TNA SSTA forcing obtained from the CAM5.3 model experiment. Others are same as in Fig.11.

7 结论和讨论

2020年6~7月, 我国江淮流域发生超强梅雨, 梅雨期降水强度大、范围广、持续时间长, 江淮流域梅雨期累积降水量为1961年以来之最。因此, 本文结合历史资料诊断分析和数值模式敏感性试验, 揭示了2020年江淮流域超强梅雨的成因和主要的驱动因子, 得到以下结论:

(1) 2020年6~7月, 西太副高和对流层低层WNPAC的异常偏强是同期江淮流域超强梅雨最重要、最直接的原因。强大且稳定的WNPAC引导海洋上的水汽向江淮流域输送, 同时中高纬度西路冷空气和东路冷空气活动频繁, 冷暖空气在江淮流域辐合, 导致梅雨期持续时间偏长、强降水过程偏多。

(2) 2019年11月至2020年3月发生一次El Niño事件, 是1981年以来持续时间最短、强度最弱的中部型事件。历史资料中, 弱的El Niño衰减年江淮流域梅雨量总体为正常至偏少。2020年发生的弱中部型El Niño事件, 其对WNPAC和江淮梅雨强度的贡献是有限的。从前冬至夏季, 热带印度洋和热带北大西洋持续偏暖, 二者通过海气相互作用, 共同导致2020年6~7月异常偏强的WNPAC, 是2020年江淮流域梅雨异常偏强的重要驱动因子。

(3) 热带印度洋主要通过“电容器效应”影响夏季WNPAC, 即印度洋暖海温异常通过激发东传的Kelvin波, 抑制了西太暖池对流, 进而维持并加强WNPAC; 热带北大西洋海温异常则主要通过热带纬向环流(Walker环流)影响夏季WNPAC, 暖海温有利于局地对流活动增强, 导致热带北大西洋上空上升运动和热带中部太平洋下沉运动增强, 后者激发WNPAC (图13)。

图 13 2020 年 6~7 月江淮流域超强梅雨形成的驱动因子及物理过程示意图

Fig.13 Schematic diagram describing what drives the super strong precipitation over the Yangtze-Huaihe Valley in Meiyu periods of 2020

Ding et al. (2021) 和 Zhou et al. (2021) 也强调了热带印度洋暖海温持续异常对2020年江淮流域超强梅雨的影响,而本文通过诊断分析和数值模拟,揭示了弱El Niño衰减年,热带印度洋和热带北大西洋海温异常对2020年江淮流域超强梅雨年际异常的综合影响,充实了2020年梅雨异常偏强的原因,为季节预测提供参考。

近年来,三大洋泛热带气候的相互作用受到了学者们的关注,热带三大洋作为一个整体,是一个紧密相连的系统,三者之间通过“大气桥”、“海洋桥”(例如印度尼西亚贯穿流)形成复杂的正反馈或负反馈(Cai et al., 2019; Li et al., 2019; Wang, 2019),并通过海气相互作用对全球气候产生影响。与2020年相反,2018年为La Niña衰减年,但是东亚夏季风异常偏强,研究显示热带印度洋、北大西洋海温的协同作用对江淮降水异常偏少起到显著作用(Chen et al., 2019),说明三大洋对局地气候综合影响的重要性,相关研究还需要进一步加强。此外,青藏高原积雪也是WNPAC和江淮梅雨的重要影响因子(张顺利和陶诗言, 2001; Ren et al., 2016; 段安民等, 2018),但高原积雪与El Niño对梅雨的影响存在复杂性(陈烈庭, 2001; 王妍凤等, 2017)。因此,在利用El Niño研究和预测东亚夏季气候、尤其是梅雨的异常时,需要综合考虑海洋、积雪等信号的作用。

致谢: 特别感谢国家气候中心封国林研究员、中科院大气物理研究所戴新刚研究员在研究过程中提供的指导和帮助。

参考文献 (References)

- Akiyama T. 1984. A medium scale cloud cluster in a Baiu front, Part I: Evolution process and fine structure [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 62: 485–504.
- Cai W J, Wu L X, Lengaigne M, et al. 2019. Pan-tropical climate interactions [J]. Science 363: eaav4236. doi: 10.1126/science.aav4236
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: roles of the subtropical ridge [J]. J. Climate, 13: 4310–4325. doi: https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4310:IAIVOT>2.0.CO;2
- Chen L J, Gu W, Li W J. 2019. Why is the East Asian summer monsoon extremely strong in 2018? —

- Collaborative effects of SST and snow cover anomalies [J]. *J. Meteor. Res.*, 33(4): 593–608. doi: 10.1007/s13351-019-8200-4
- Chung P-H, Sui C-H, Li T. 2011. Interannual relationships between the tropical SST and summertime subtropical anticyclone over the western North Pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D13111. doi:10.1029/2010JD015554
- Ding Y H, Liang P, Liu Y J, et al. 2020. Multiscale variability of Meiyu and its prediction: A new review [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD031496. <https://doi.org/10.1029/2019JD031496>
- Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z Z. 2021. The record-breaking Meiyu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies. *Adv Atmos Sci.* doi:10.1007/s00376-021-0361-2 .
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for the heat induced tropical circulation [J]. *Q. J. Meteorol. Soc.*, 106: 447–462. <https://doi.org/10.1002/qj.49710644905>
- Hong C-C, Chang T-C, Hsu H-H. 2014. Enhanced relationship between the tropical Atlantic SST and the summertime western North Pacific subtropical high after the early 1980s [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119: 3715–3732. <https://doi.org/10.1002/2013JD021394>
- Hong C-C, Lee M-Y, Hsu H-H, et al. 2015. Tropical SST forcing on the anomalous WNP subtropical high during July–August 2010 and the record-high SST in the tropical Atlantic [J]. *Climate Dyn.*, 45: 633–650. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2275-5>
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kang I S, Jin K, Wang B, et al. 2002. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs [J]. *Climate Dyn.*, 19: 383–395.
- Li J P, Zheng F, Sun C, et al. 2019. Pathways of Influence of the Northern Hemisphere Mid-high Latitudes on East Asian Climate: A review [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 36(9): 902–921.
- Li T, Tung Y-C, Hwu J-W. 2005. Remote and local SST forcing in shaping Asian-Australian monsoon anomalies [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83(2): 153–167.
- Li Tim, Wang Bin, Wu Bo, et al. 2017. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El Niño: A review [J]. *J. Meteor. Res.*, 31(6): 987–1006. doi: 10.1007/s13351-017-7147-6
- Li W J, Ren H C, Zuo J Q, et al. 2018. Early summer southern China rainfall variability and its oceanic drivers [J]. *Climate Dyn.*, 50: 4691–4705. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3898-0>
- Liu B Q, Yan Y H, Zhu C W, et al. 2020. Record-breaking Meiyu rainfall around the Yangtze River in 2020 regulated by the subseasonal phase transition of the North Atlantic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2020GL090342
- Lu R Y. 2001. Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79(3): 771–783. doi:10.2151/jmsj.79.771
- Ren H C, Li W J, Ren H L, et al. 2016. Distinct linkage between winter Tibetan Plateau snow depth and early summer Philippine Sea anomalous anticyclone [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 17: 223–229. doi: 10.1002/asl.646
- Ren H L, Lu B, Wan J H, et al. 2018. Identification standard for ENSO events and its application to climate monitoring and prediction in China [J]. *J. Meteor. Res.*, 32: 923–936, doi: 10.1007/s13351-018-8078-6
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Clim* 15: 1609–1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2)
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. New York: Oxford University Press, 60–92.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East climate? [J]. *J. Climate*, 13(9): 1517–1536. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2)
- Wang B, Zhang Q. 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous

- anticyclone is established during El Nino development [J]. *J. Climate*, 15(22): 3252–3265. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<3252:PEATPI>2.0.CO;2
- Wang Bin, Xiang Baoqiang, June-Yi Lee. 2013. Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions [J]. *Proc Natl Acad Sci*. 110(8): 2718–2722.
- Wang C Z. 2019. Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective [J]. *Climate Dyn.*, 53: 5119–5136. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04930-x>
- Wang L, Liu Y, Zhang Y, et al. 2019. Time-varying structure of the wintertime Eurasian pattern: role of the North Atlantic sea surface temperature and atmospheric mean flow [J]. *Climate Dyn.*, 52 (3–4), 2467–2479. doi: 10.1007/s00382-018-4261-9.
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the Western North Pacific anomalous anticyclone during the El Nino decaying summer [J]. *J. Climate*, 23(11): 2974–2986. doi: 10.1175/2010JCLI3300.1
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate [J]. *J. Climate*, 22(11): 2992–3005. doi: 10.1175/2008JCLI2710.1
- Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P. 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia [J]. *J. Climate*, 16: 3742–3758.
- Wu R G, Kinter III J L, Kirtman B P. 2005. Discrepancy of interdecadal changes in the Asian region among the NCEP-NCAR reanalysis, objective analyses, and observations [J]. *J. Climate*, 18 (15): 3048–3067. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI3465.1>
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22(3): 730–747, doi:10.1175/2008JCLI2544.1
- 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.
- Yang J, Liu Q, Xie S-P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L02708. doi:10.1029/2006GL028571
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 16(2): 229–241. doi: 10.1007/BF02973084
- Zhou Z Q, Xie S P, Zhang R H. 2021. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 118(12): 1–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022255118>
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2019. Remote forcing of the northern tropical Atlantic SST anomalies on the western North Pacific anomalous anticyclone [J]. *Climate Dyn.*, 52: 2837–2853. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4298-9>
- 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. *应用气象学报*, 24(5): 521–532.
- Chen Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 24(5): 521–532. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.002.
- 陈烈庭. 2001. 青藏高原异常雪盖和ENSO在1998年长江流域洪涝中的作用 [J]. *大气科学*, 25(2): 184–192.
- Chen Lieting. 2001. The role of the anomalous snow cover over the Qinghai-Xizang Plateau and ENSO in the great floods of 1998 in the Changjiang River Valley [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25(2): 184–192. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2001.02.04
- 陈涛, 张芳华, 于超, 等. 2020. 2020 年 6—7 月长江中下游极端梅雨天气特征分析 [J]. *气象*, 46(11): 1415–1426.
- Chen Tao, Zhang Fanghua, Yu Chao, et al. 2020. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River Basin during June-July 2020 [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 46(11): 1415–1426. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.003

- 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 2007. 东亚梅雨系统的天气—气候学研究 [J]. 大气科学, 31(6): 1082–1101. Ding Yihui, Liu Junjie, Sun Ying, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1082–1101, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.05.
- 段安民, 肖志祥, 王子谦. 2018. 青藏高原冬春积雪和地表热源影响亚洲夏季风的研究进展 [J]. 大气科学, 42(4): 755–766. Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wang Ziqian. 2018. Impacts of the Tibetan Plateau winter/spring snow depth and surface heat source on Asian summer monsoon: A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 755–766. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17247
- 段欣好, 薛峰, 郑飞. 2020. El Niño衰减年夏季西太平洋副热带高压的季节内变化 [J]. 大气科学, 44(6): 1364–1376. Duan Xinyu, Xue Feng, Zheng Fei. 2020. Intraseasonal variation of the western Pacific subtropical high during the El Niño decaying summers [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1364–1376. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19196
- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49(3): 672–679. Fan Ke. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River Valley [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49(3): 672–679. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.03.009
- 封国林, 赵俊虎, 杨杰, 等. 2015. 中国汛期降水动力—统计预测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1–330. Feng Guolin, Zhao Junhu, Yang Jie, et al. 2015. The Study on Dynamical and Statistical Prediction on Summer Precipitation over China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–330.
- 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响 [J]. 科学通报, 51(23): 2803–2809. He Jinhai, Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, et al. 2007. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu [J]. Chinese Science Bulletin, 52(5): 671–679. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2006.23.016
- 黄刚, 胡开明, 屈侠, 等. 2016. 热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾 [J]. 大气科学, 40(1): 121–130. Huang Gang, Hu Kaiming, Qu Xia, et al. 2016. A review about Indian Ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(1): 121–130. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143.
- 李维京. 1999. 1998年大气环流异常及其对中国气候异常的影响 [J]. 气象, 25(4): 20–25. Li Weijing. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 25(4): 20–25, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.1999.04.004.
- 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 Ping, Tang Xu, Ke Xiaoxin, 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
- 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 Ping, Chen Lijuan, Ding Yihui, et al. 2018. Relationship between long-term variability of Meiyu over the Yangtze River and ocean and Meiyu’s predictability study [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(3): 379–393. doi:10.11676/qxxb2018.009
- 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 Yunyun, Ding Yihui. 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 46(11): 1393–1404. Doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.001
- 陆尔, 丁一汇. 1996. 1991年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡 [J]. 气象学报, 54(6): 730–736. Lu Er, Ding Yihui. 1996. Low frequency oscillation in East Asia during the 1991 excessively heavy rain over Changjiang-Huaihe River Basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54(6): 730–736. doi:10.11676/qxxb1996.075
- 任宏昌, 左金清, 李维京. 2017. 1998年和2016年北大西洋海温异常对中国夏季降水影响的数值模拟研究 [J].

- 气象学报, 75(6): 877–893. Ren Hongchang, Zuo Jinqing, Li Weijing. 2017. Role of the North Atlantic SST anomalies in the 1998 and 2016 summer floods in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 75(6): 877–893. doi:10.11676/qxxb2017.063
- 孙树鹏, 封国林, 郑志海, 等. 2021. 2016 年梅雨持续性强降雨期间大气环流稳定分量研究 [J]. *大气科学*. Sun Shupeng, Feng Guolin, Zheng Zhihai, et al. 2021. Study on the stable components of atmospheric circulation during the continuous heavy rainfall of Meiyu in 2016 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19167
- 王会军, 孙建奇, 郎咸梅, 等. 2008. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果 [J]. *大气科学*, 32(4): 806–814. Wang Huijun, Sun Jianqi, Lang Xianmei, et al. 2008. Some new results in the research of the interannual climate variability and short-term climate prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32(4): 806–814. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.09
- 王妍凤, 孙旭光, 杨修群. 2017. 积雪在 El Niño 影响东亚夏季气候异常中的作用 [J]. *地球物理学报*, 60(9): 3325–3337. Wang Yanfeng, Sun Xuguang, Yang Xiuqun. 2017. Role of snow depth in the influence of El Niño on summer climate anomalies over East Asia [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(9): 3325–3337. doi: 10.6038/cjg20170905
- 魏凤英, 宋巧云. 2005. 全球海表温度年代际尺度的空间分布及其对长江中下游梅雨的影响 [J]. *气象学报*, 63(4): 477–484. Wei Fengying, Song Qiaoyun. 2005. Spatial distribution of the global sea surface temperature with interdecadal scale and their potential influence on Meiyu in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63(4): 477–484, doi:10.11676/qxxb2005.047.
- 吴志伟, 何金海, 李建平, 等. 2006. 长江中下游夏季旱涝并存及其异常年海气特征分析 [J]. *大气科学*, 30(4): 570–577. Wu Zhiwei, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. The summer drought-flood coexistence in the middle and lower reaches of the Yangtze River and analysis of its air-sea background features in anomalous years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30(4): 570–577. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.03
- 徐志清, 范可. 2012. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程 [J]. *大气科学*, 36(5): 879–888. Xu Zhiqing, Fan Ke. 2012. Possible process for influences of winter and spring Indian Ocean SST anomalies interannual variability mode on summer rainfall over eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36(5): 879–888.
- 袁媛, 高辉, 李维京, 等. 2017. 2016年和1998年汛期降水特征及物理机制对比分析 [J]. *气象学报*, 75(1): 19–38. Yuan Yuan, Gao Hui, Li Weijing. 2017. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 75(1): 19–38. doi:10.11676/qxxb2017.019
- 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雨的极端性特征 [J]. *气象*, 46(11): 1405–1414. Zhang Fanghua, Chen Tao, Zhang Fang, et al. 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June–July 2020 [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 46(11): 1405–1414. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.003
- 张庆云, 陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究 [J]. *气象学报*, 57(5): 539–548. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 57(5): 539–548, doi:10.11676/qxxb1999.052.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. *大气科学*, 27(6): 1018–1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River Valley and its associations with the circulations over East Asian during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27(6): 1018–1030. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.06
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. *大气科学*, 25(3):

- 372–390. Zhang Shunli, Tao Shiyan. 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(3): 372–390. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07
- 赵俊虎, 陈丽娟, 熊开国. 2018a. 基于新监测指标的江南入梅早晚的气候特征及影响系统分析 [J]. 气象学报, 76(5): 680–698. Zhao Junhu, Chen Lijuan, Xiong Kaiguo. 2018a. Climate characteristics and influential systems of Meiyu to the south of the Yangtze River based on the new monitoring rules [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(5): 680–698. doi:10.11676/qxxb2018.025
- 赵俊虎, 陈丽娟, 王东阡. 2018b. 2016年我国梅雨异常特征及成因分析 [J]. 大气科学, 42(5): 1055–1066. Zhao Junhu, Chen Lijuan, Wang Dongqian. 2018b. Characteristics and causes analysis of abnormal meiyu in China in 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(5): 1055–1066. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17170
- 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 2004. 印度洋对 ENSO 事件的响应: 观测与模拟 [J]. 大气科学, 28(3): 357–373. Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, et al. 2004. Indian Ocean response to ENSO: observation and air-sea coupled model simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(3): 357–373. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.04
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61(6): 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61(6): 641–654.

附图

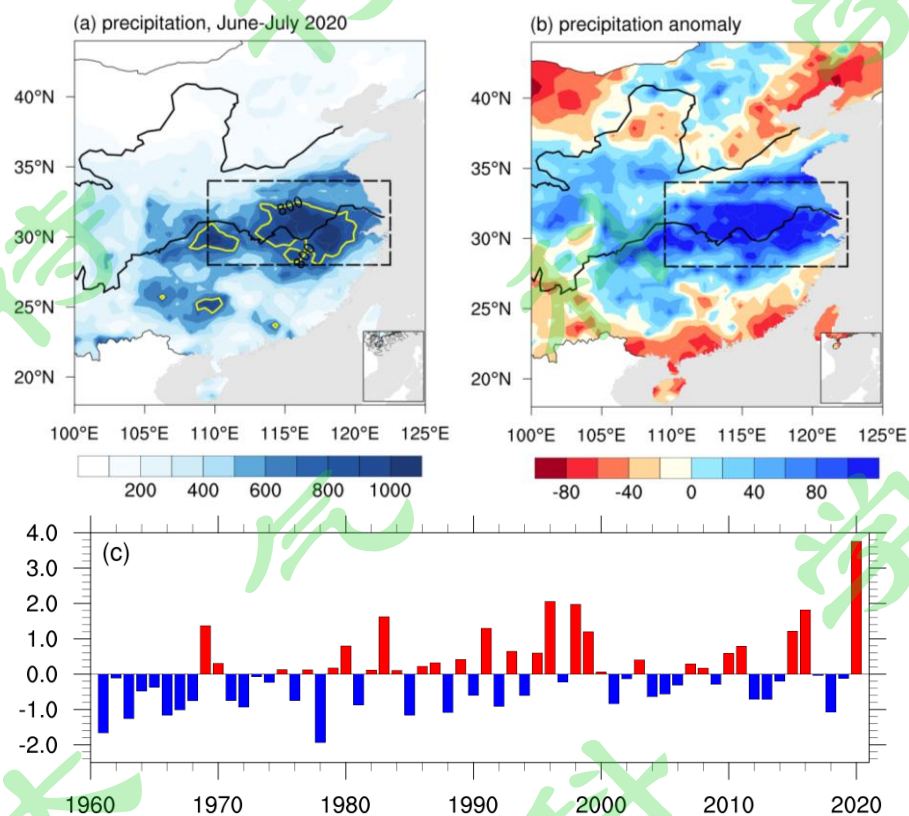


图 1 2020 年 6~7 月 (a) 累计降水量 (单位: mm) 和 (b) 降水距平百分率 (单位: %) 的空间分布, (c) 1961~2020 年 6~7 月江淮流域区域平均降水量的标准化序列

Fig.1 (a) Accumulated precipitation (unit: mm) and (b) precipitation anomalies (unit: %) in June-July 2020, (c) Standardized time series of regionally averaged precipitation in Yangtze-Huaihe River Basin (YHRB, 28 °-34 °N, 110 °-123 °E, see the box in (a)).

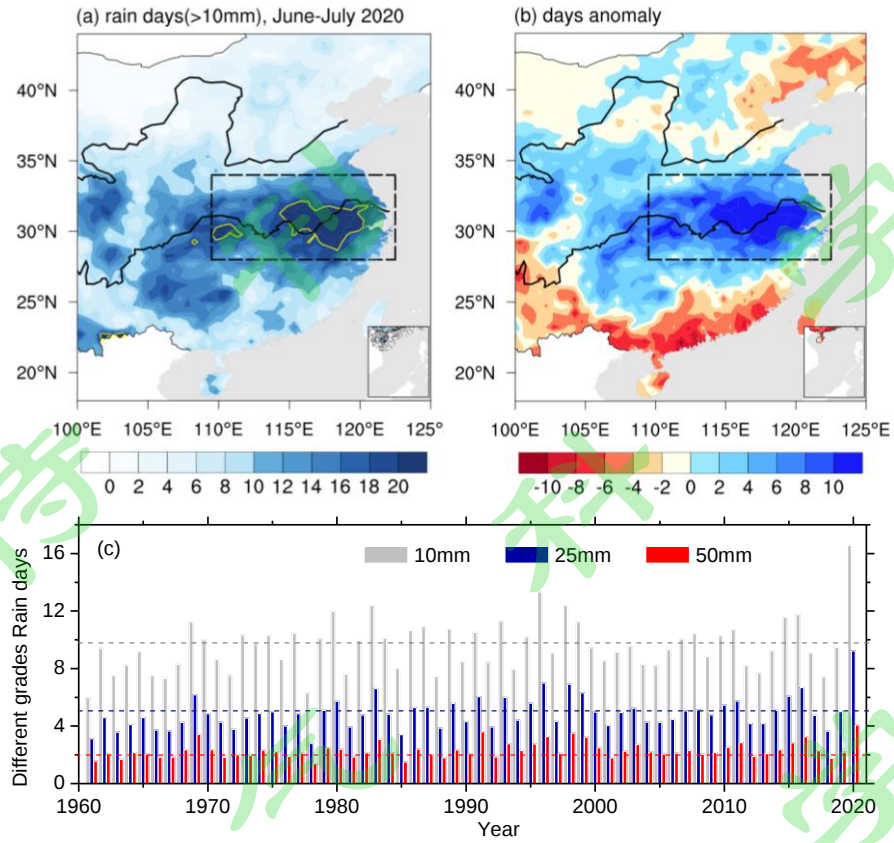
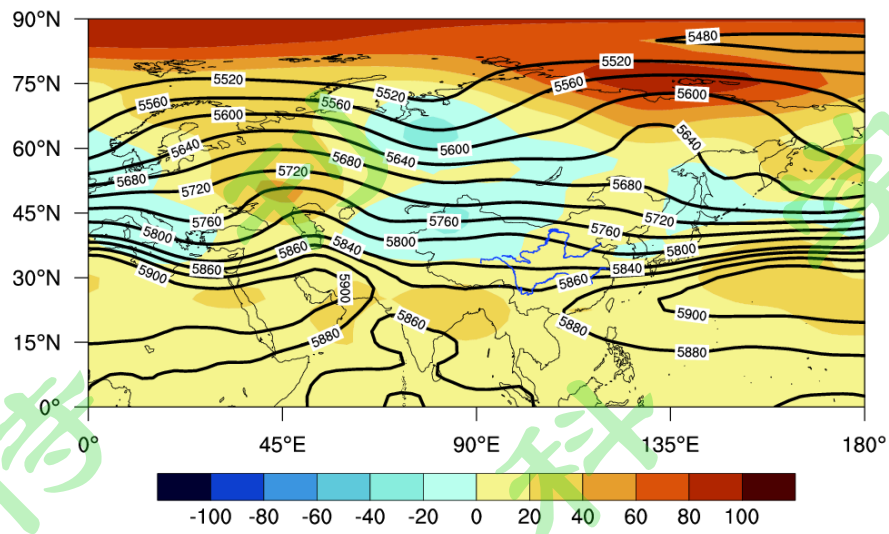


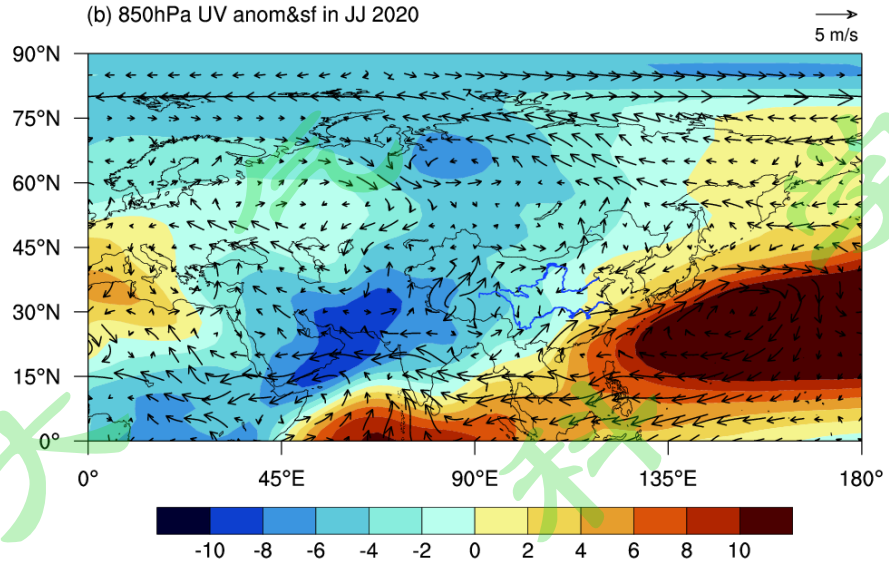
图 2 2020 年 6~7 月 (a) 日降水量大于 10mm 的日数及其 (b) 距平的空间分布, (c) 1961~2020 年 6~7 月江淮流域区域平均不同量级日降水量日数的时间序列

Fig.2 Spatial distribution of (a) the rainy days with precipitation ≥ 10 mm/day and (b) their anomalies in June-July 2020, and (c) time series of rainy days with precipitation more than 10 mm/day, 25 mm/day and 50 mm/day, respectively. Contours in (a) denote 20 days.

(a) H500&anomaly in JJ 2020



(b) 850hPa UV anom&sf in JJ 2020



(c) WV&IFVQ anomaly in JJ 2020

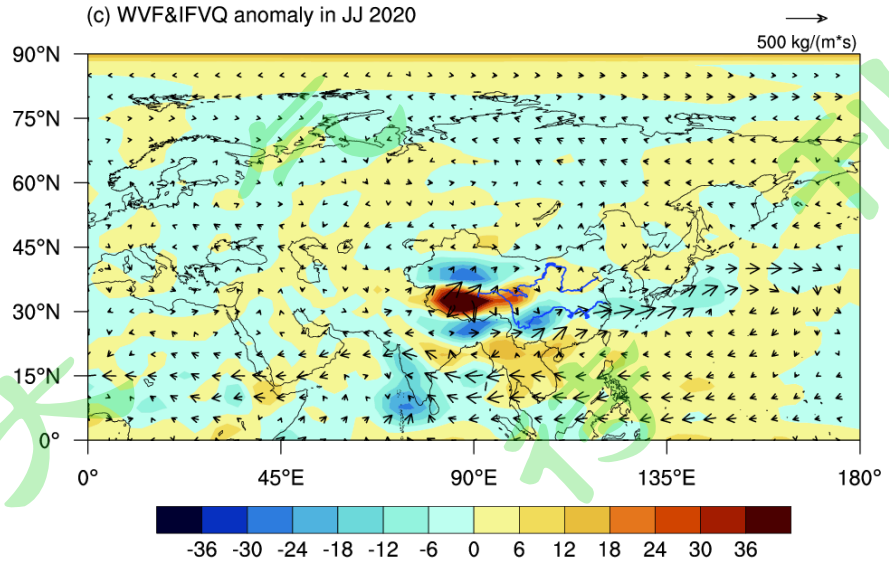


图 3 2020 年 6~7 月平均的大气环流场：（a）500 hPa 位势高度场（等值线，单位：gpm）及其距平场（阴影），蓝色等值线表示气候平均的 5880gpm 等值线，（b）850hPa 风场（矢量箭头，单位： m s^{-1} ）和流函数（阴影，单位： $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ），（c）整层水汽通量（矢量箭头，单位： $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）和散度（阴影，单位： $10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）

Fig. 3 Atmospheric circulation patterns in June-July 2020. (a) 500-hPa geopotential height (contour; unit: gpm) and anomalies (shading), (b) horizontal wind (UV850, vector; unit: m s^{-1}) and stream function (shading; unit: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) anomalies at 850 hPa, and (c) the anomalies of vertically integrated (surface to 300mb) water vapor flux (vectors; $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and water vapor divergence (shadings; $10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) in June-July 2020.

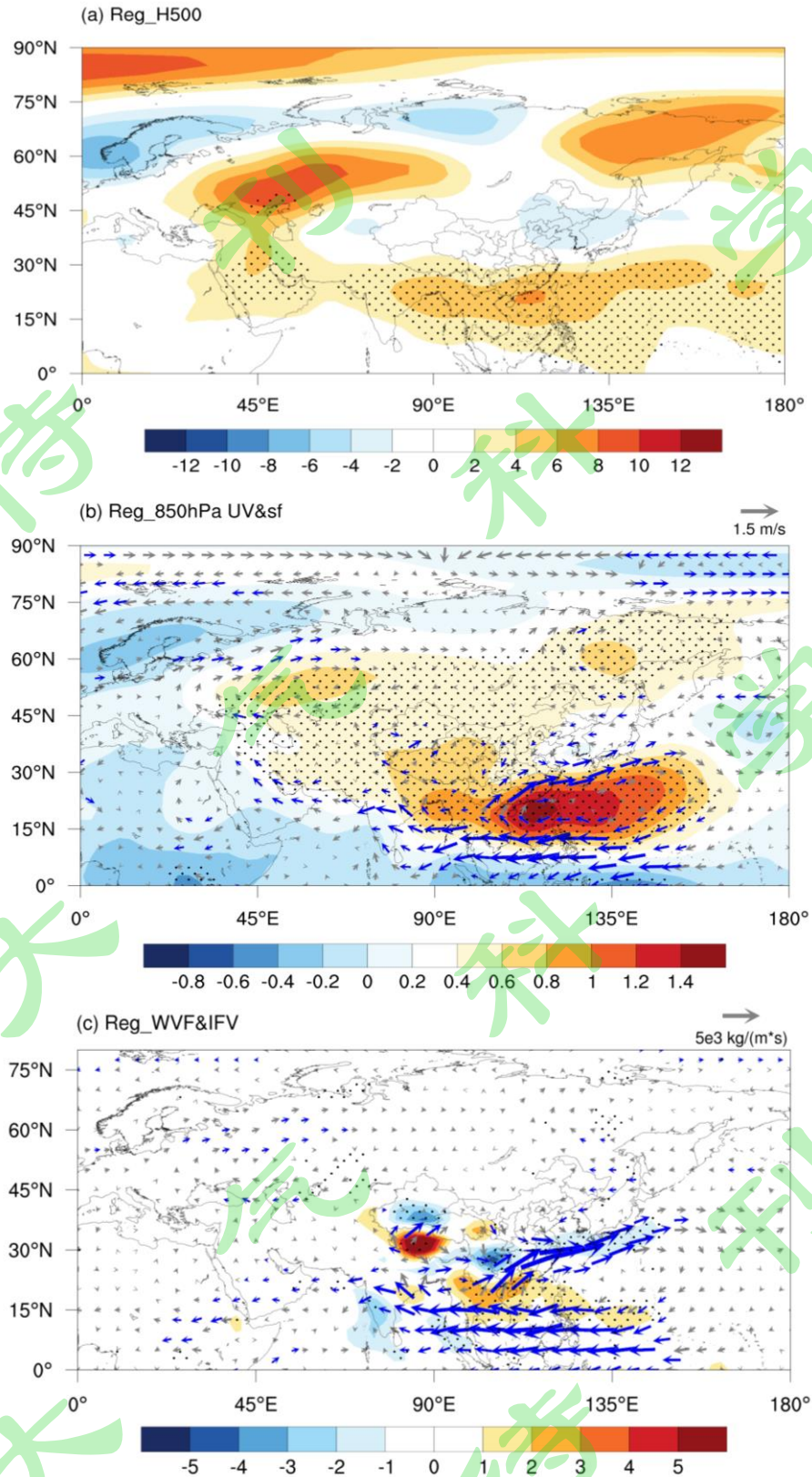


图 4 1979~2020 年 6~7 月江淮流域区域平均降水量标准化指数回归的大气环流场: (a) – (c) 同图 3, 打点区和蓝色箭头均表示达到 95% 的置信水平

Fig. 4 Same as in Fig. 3, but for the simultaneous regressions of the atmospheric circulation

anomalies against the normalized time series of June–July rainfall in the YHRB (YHRBRI) during 1979–2020. The dots and blue vectors indicate significance at the 95% confidence level.

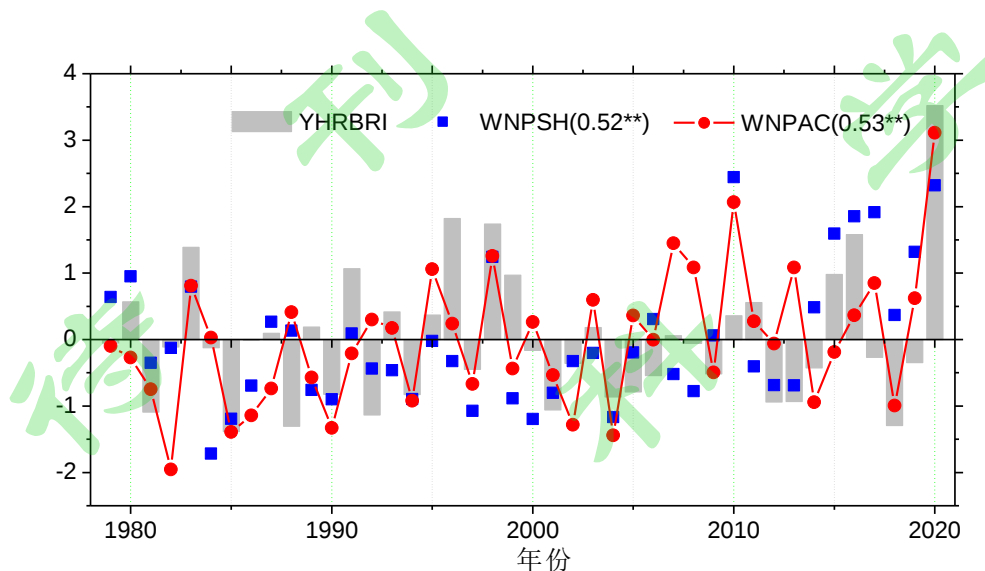


图 5 1979~2020 年 6~7 月江淮流域平均降水量标准化序列（灰色柱状）和同期西太副高强度和 WNPSH 标准化指数时间序列。小括号里面数字为降水量与环流指数的相关系数，上标*和**分别表示达到 95%和 99%的置信水平。

Fig. 5 Normalized time series of the YHRBRI (bars), the western North Pacific Subtropical High index (WNPSH, blue solid box) and WNPAC index (red dotted line) in June–July from 1979 to 2020. Numbers in brackets denote correlation coefficient with the YHRBRI. * and ** indicate significance at the 95% and 99% confidence level, respectively.

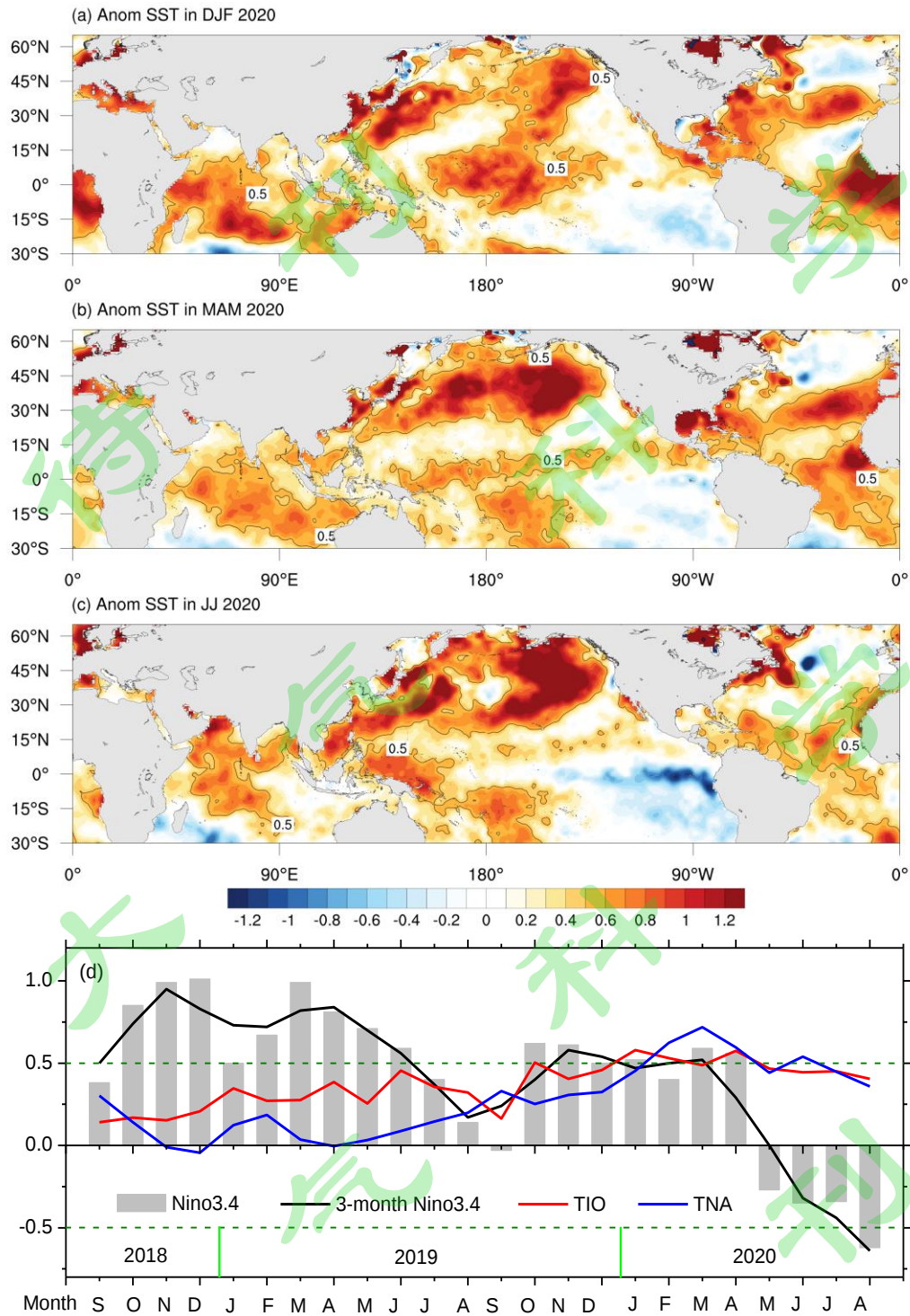


图 6 2020 年 (a) 前冬、(b) 春季和 (c) 6~7 月 SST 距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$) , (d) 2018 年 9 月至 2020 年 8 月 Niño3.4 指数、TIO 指数和 TNA 指数 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的演变

Fig.6 SSTAs (unit: $^{\circ}\text{C}$) in (a) DJF, (b) MAM, and (c) JJ of 2020, and (d) time series of the Niño3.4 index, TIO index and TNA index (unit: $^{\circ}\text{C}$) from September 2018 to August 2020

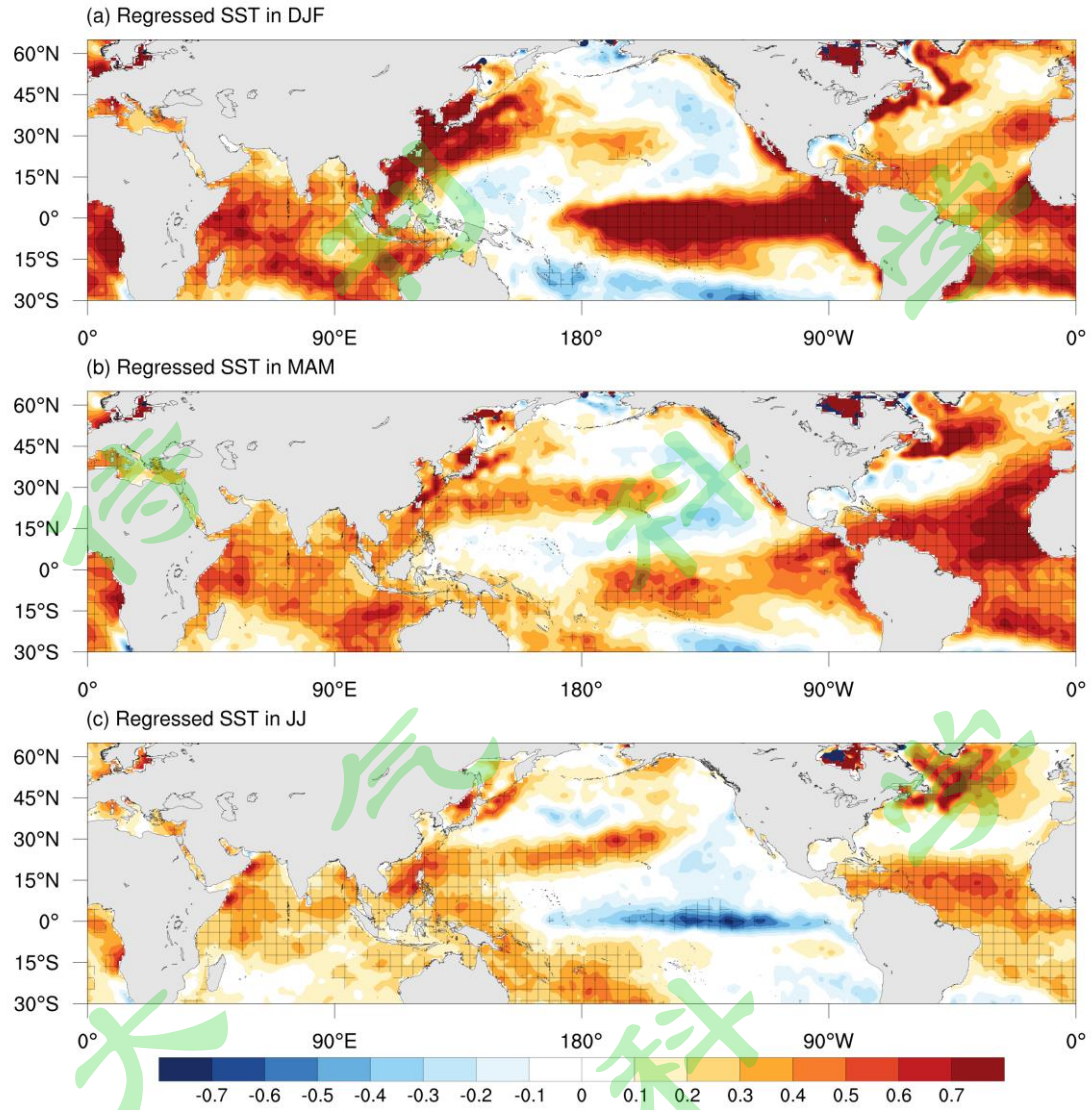


图 7 1979~2020 年 6~7 月平均的 WNPAC 强度指数回归的 SSTAs (单位: $^{\circ}\text{C}$)。(a) 前冬, (b) 春季, (c) 6~7 月, 网格区表示达到 95% 的置信水平

Fig. 7 Regressions of SSTAs (unit: $^{\circ}\text{C}$) in (a) previous winter (December–February, DJF), (b) March–May (MAM), and (c) June–July (JJ) against the JJ WNPAC index for the period 1979–2020. Cross-hatching denotes significance at the 95% confidence level.

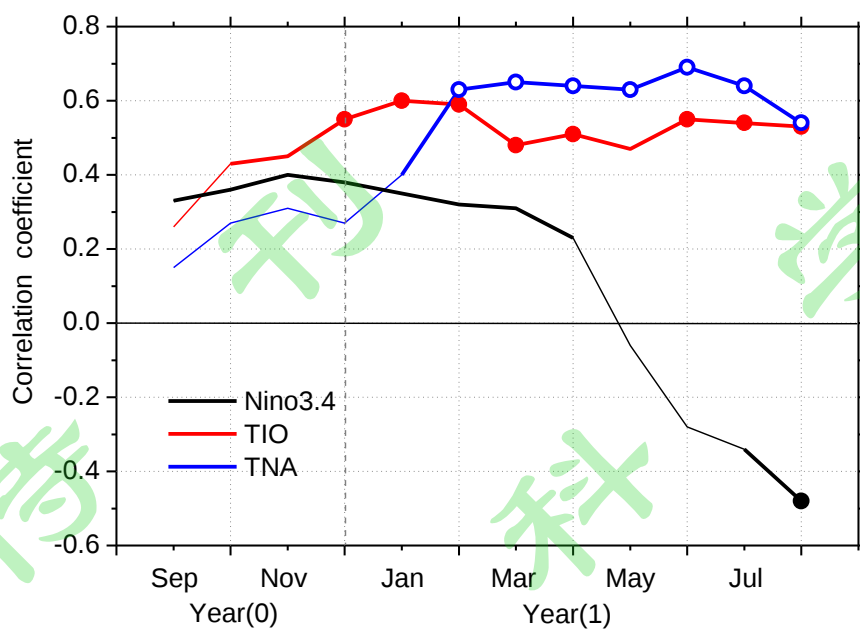


图 8 1979~2020 年 6~7 月 WNPAC 指数与海温指数的超前滞后相关(粗线和圆点分别表示达到 99%和 99.9%的置信水平)

Fig. 8 Lead-lag correlations of the JJ WNPAC with the Niño3.4, TIO, and TNA indices for the period 1979–2020. Bold lines and dot lines indicate the 99% and 99.9% confidence level.

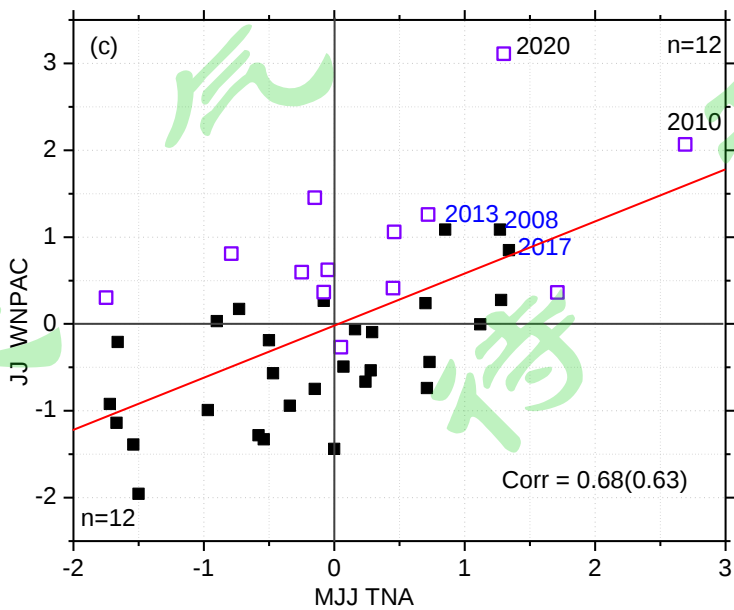
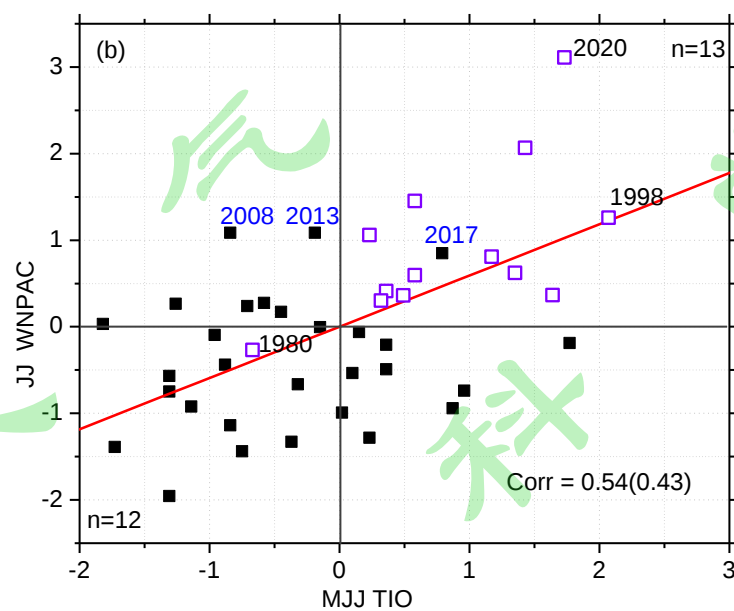
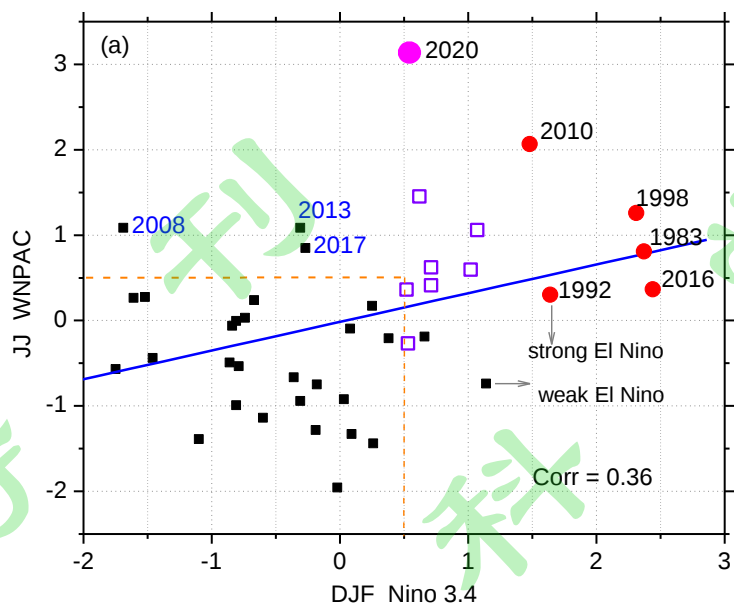


图 9 1979~2020 年海温指数和 6~7 月 WNPAC 指数的散点图，（a）前冬 Niño3.4 指数，（b）5~7 月平均的 TIO 指数，（c）5~7 月平均的 TNA 指数，紫色方框和红点表示 El Niño 衰减年夏季，右下角数字表示相关系数，小括号中数字为与 Niño3.4 的偏相关

Fig 9. Scatter plots of the JJ WNPAC and (a) DJF Niño3.4 index, (b) MJJ TIO index, (c) MJJ TNA index during 1979–2020. The purple box and red dots represent the summer of El Niño decay years. The number in the lower right corner represents the correlation coefficient between WNPAC and SST index, and the number in braces represents the partial correlation with Niño3.4.

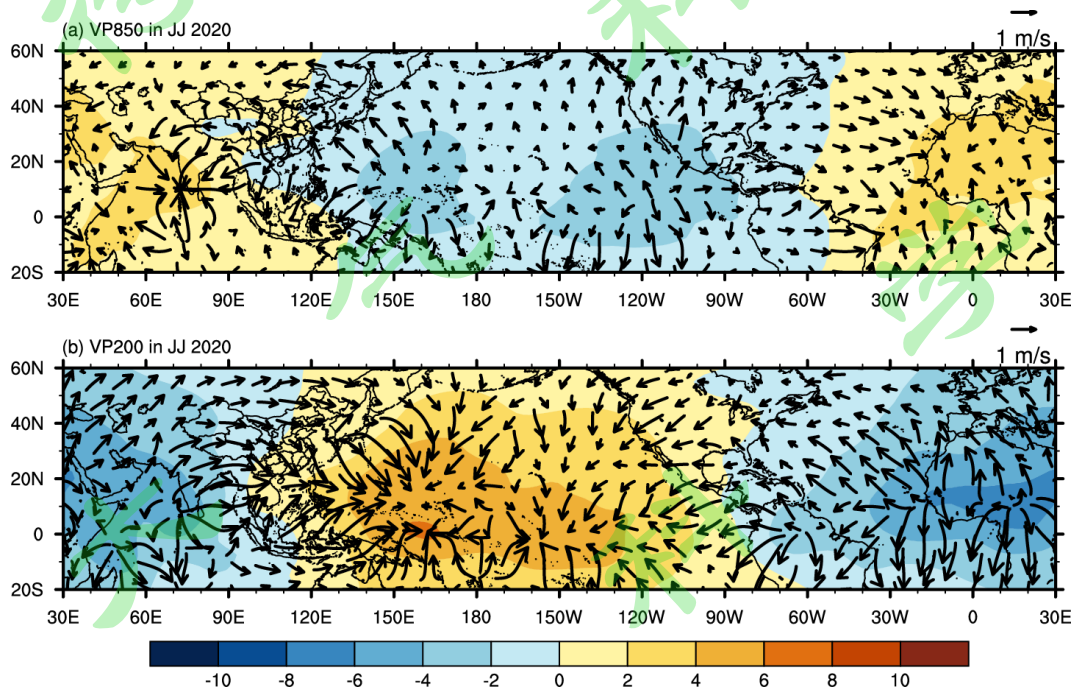


图 10 2020 年 6~7 月平均的（a）850hPa，（b）200hPa 速度势距平（阴影，单位： $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）和辐散风距平（箭头，单位： m s^{-1} ）

Fig.10 Velocity potential (Contours and shadings, unit: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) and divergent wind (vectors, unit: m s^{-1}) anomalies at (a) 850 hPa and (b) 200hPa in JJ of 2020.

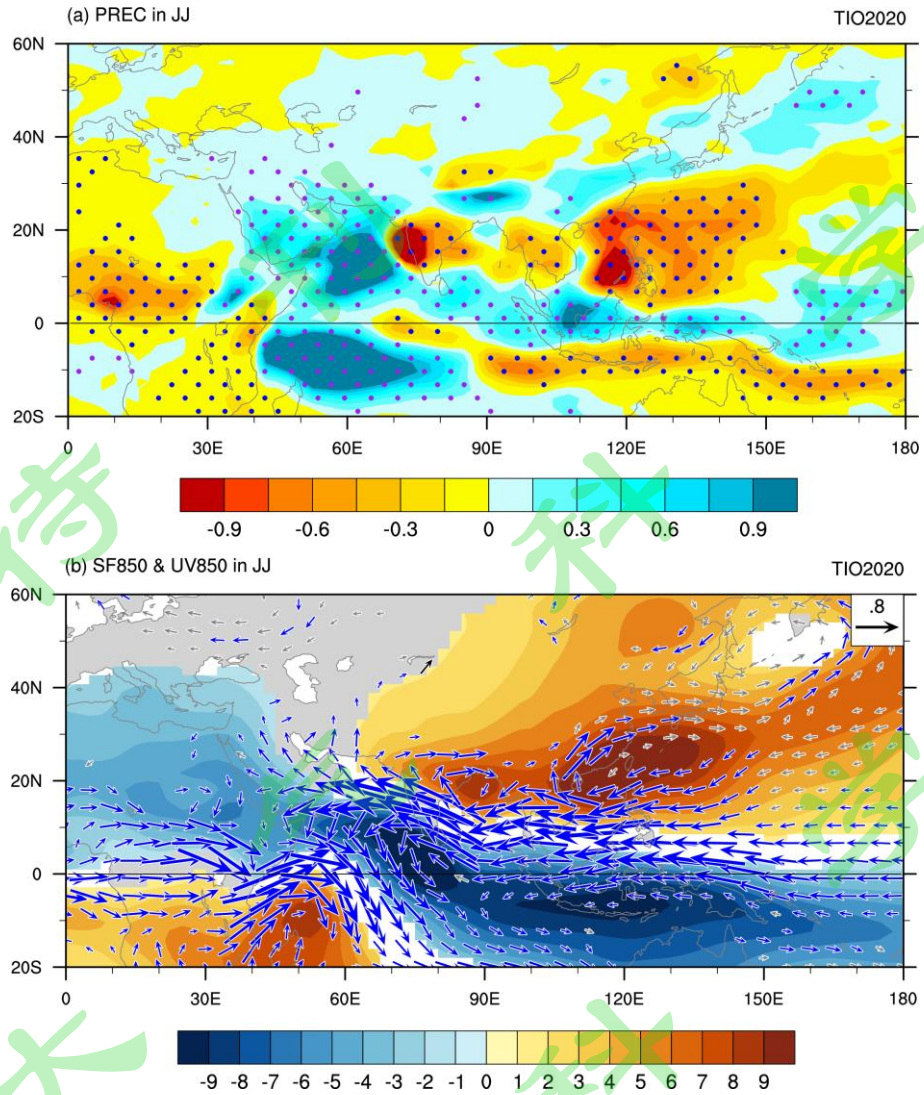


图 11 热带印度洋海温强迫的 2020 年 6~7 月平均的 (a) 降水距平 (单位: mm/d) 和 (b) 850hPa 风场 (矢量箭头, 单位: m s^{-1}) 和流函数 (阴影, 单位: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 距平 (a) 中圆点和 (b) 中绿色箭头均表示达到 95% 的置信水平

Fig. 11 Differences in (a) precipitation (unit: mm d^{-1}) and (b) horizontal wind (vector; unit: m s^{-1}) and stream function (shading; unit: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa in JJ in response to the TIO SSTA forcing obtained from the CAM5.3 model experiment. Dots in (a) and blue vector in (b) represent precipitation and wind anomalies that are significant at the 95% confidence level, respectively.

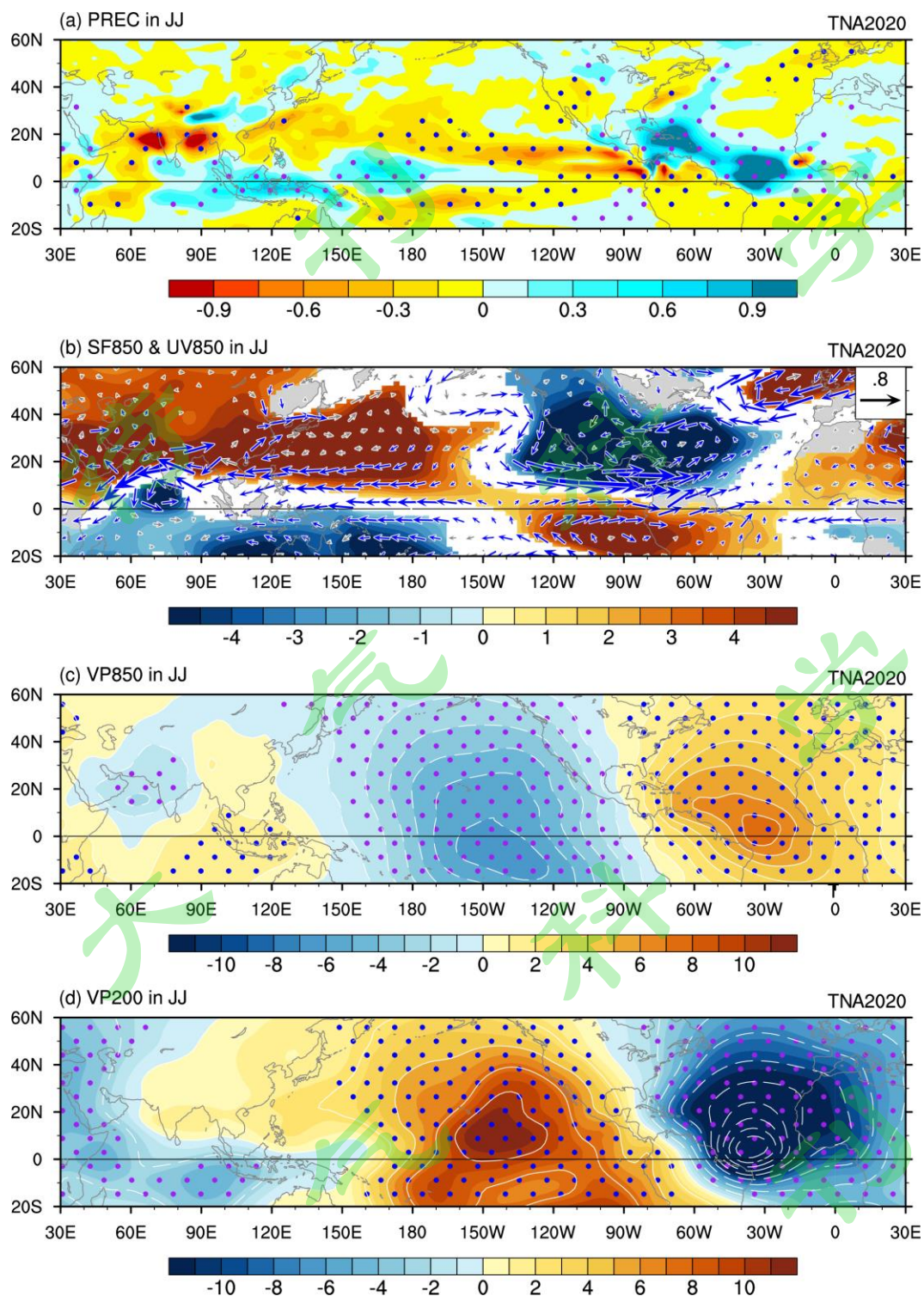


图 12 热带北大西洋海温强迫的 2020 年 6~7 月平均的 (a) 降水距平 (单位: mm d^{-1}), (b) 850hPa 风场 (矢量箭头, 单位: m s^{-1}) 和流函数 (阴影, 单位: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 异常, (c) 850hPa 和 (d) 200hPa 速度势 (单位: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 异常, 其他同图 11。

Fig. 12 Differences in (a) precipitation (mm d^{-1}), (b) horizontal wind (vector; unit: m s^{-1}) and stream function (shading; unit: $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa, velocity potential anomalies (unit: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) at (c) 850hPa and (d) 200hPa in JJ in response to the TNA SSTA forcing obtained from the

CAM5.3 model experiment. Others are same as in Fig.11.

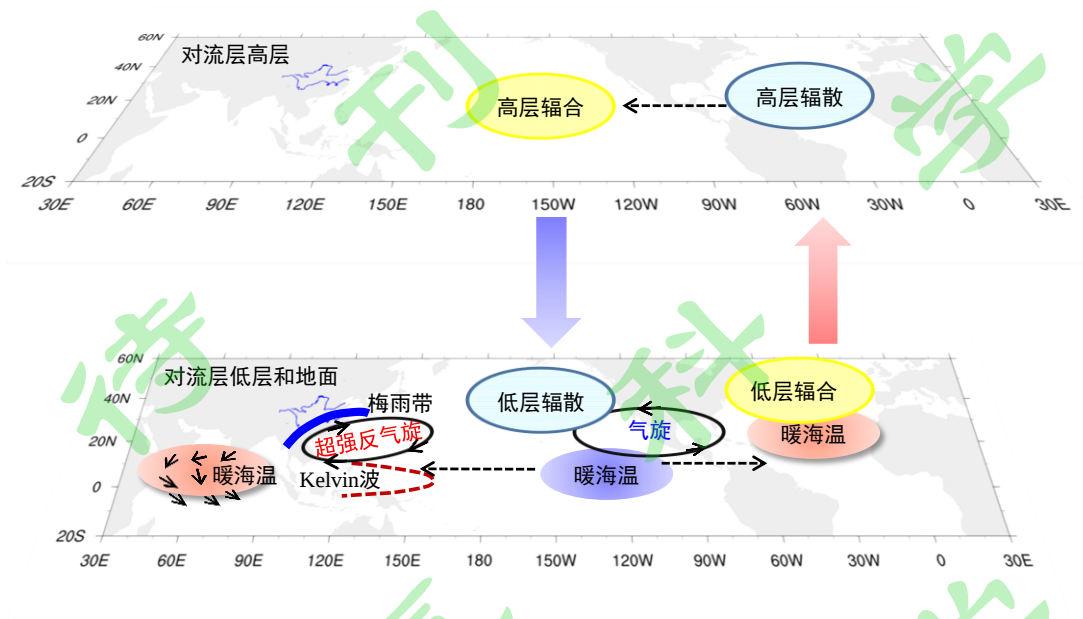


图 13 2020 年 6~7 月江淮流域超强梅雨形成的驱动因子及物理过程示意图

Fig.13 Schematic diagram describing what drives the super strong precipitation over the Yangtze-Huaihe Valley in Meiyu periods of 2020