

商林,孟祥新,汤子东.2021年山东夏季降水异常特征及成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):61-67.  
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 2021年山东夏季降水异常特征及成因分析

商林<sup>1,2</sup>,孟祥新<sup>1,2\*</sup>,汤子东<sup>1,2</sup>

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.山东省气候中心,山东 济南 250031)

**摘要:**基于 NCEP 再分析资料和山东省 122 个国家地面观测站数据,对 2021 年山东夏季降水异常特征及成因进行研究。2021 年夏季山东平均降水量较常年偏多 25.3%,降雨过程较多,其中,6 月降水偏多主要是由于西太平洋副热带高压(简称“副高”)北抬造成;7 月中旬降水偏多主要是由于副高强度偏强,副高边缘暖湿气流为山东降水提供了充足水汽,下旬降水偏多是由于台风“烟花”带来强降水;8 月降水偏多主要是下旬副高强度偏强,水汽输送充沛造成。此外,2021 年夏季山东降水空间分布不均匀,呈西多东少的空间分布。进一步分析近 3 次拉尼娜事件发现,夏季副高强度偏强是造成近 3 个拉尼娜衰减年夏季山东降水空间分布异常的主要原因。夏季副高强度是拉尼娜次年山东夏季降水的重要预测因子。

**关键词:**山东夏季降水;拉尼娜;西太平洋副热带高压;位势高度场;风场

**中图分类号:**P458.121 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-0799(2024)02-0061-07

山东全年降水量常年值为 665.9 mm,夏季降水量常年值为 418.5 mm,占全年降水量的 62.8%。夏季降水量年际变化大,标准差达到 94.1 mm,降水量最大为 663.3 mm(1964 年),最小为 206.2 mm(2002 年),严重的洪涝和干旱灾害给农业生产、基础设施建设、人民财产安全都带来巨大的损失<sup>[1-2]</sup>。因此准确预测山东夏季降水具有重要的意义。

关于山东夏季降水的影响因素已有众多研究<sup>[3-7]</sup>,建立的山东夏季降水与海温、大气环流等的模型,成为预测山东夏季降水的重要参考指标。尤其是海洋具有“长记忆”的特性,前期海温异常是气候预测的重要考虑因子<sup>[8-9]</sup>。需要指出的是,气候系统是不断变化的,在气候预测中,不能沿用全程相关的预测思

路,使用以往规律建立的预测模型在后续预测中,可能存在预测失误的现象<sup>[4]</sup>。研究表明,山东夏季降水发生了年代际变化<sup>[3,10-12]</sup>,黄淮地区夏季降水与前冬 Nino3 区海温关系也发生了年代际变化,以 1989 年为界,之前为负相关,之后为正相关<sup>[13]</sup>。ENSO 作为重要的海温信号,是气候预测业务中重点参考对象。以往关于 ENSO 影响山东夏季降水已有大量的研究<sup>[14-15]</sup>。拉尼娜在前冬达到峰值并在春季衰减的情况下,山东夏季降水呈现西少东多的分布型<sup>[16-17]</sup>。但是最近的 3 个拉尼娜衰减年山东夏季降水都没有呈现出西少东多的分布型,尤其是 2021 年山东夏季降水呈现出西多东少的空间分布,与以往研究中拉尼娜衰减年山东夏季降水异常分布相反。因此有必要对 2021 年山东夏季降水异常成因进行进一步的分析,并对近 3 个拉尼娜事件衰减年山东夏季降水异常进行总结。及时分析汛期气候异常的成因,逐步积累认知,有助于提高短期气候预测水平和服务能力。虽然赵俊虎等<sup>[18-19]</sup>对 2021 年全国夏季气候异常成因和先兆信号等进行了分析,并对预测效果做了检验,但是全国雨型不能反映山东的降水情况<sup>[20]</sup>,

收稿日期:2022-09-13;修回日期:2023-03-21

基金项目:国家自然科学基金(41705025);山东省气象局面上项目(2016sdqxm02);山东省气象局引导类项目(2021SDYD05)

作者简介:商林(1987—),女,高级工程师,主要从事气候监测与预测研究。E-mail:shangl2005@163.com

通信作者:孟祥新(1980—),男,正高级工程师,主要从事气候监测与预测研究。E-mail:mx8544@hotmail.com

因此有必要对山东夏季降水单独进行分析。

本文回顾 2021 年山东夏季降水异常特征,及影响降水的环流形势,分析近 3 个拉尼娜衰减年山东夏季降水对拉尼娜事件的响应情况,讨论在拉尼娜衰减年预测山东夏季降水需要着重考虑的预测因子,以期深入认识山东夏季降水异常机理,提高预测水平。

### 1 研究数据

降水资料为山东 122 个国家地面观测站数据,500 hPa 位势高度场数据和 850 hPa 风场数据为 NCEP 再分析数据,水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

西太平洋副热带高压(简称“副高”)强度指数来自国家气候中心。

冬季为前一年 12 月—当年 2 月,春季指 3—5 月,夏季指 6—8 月。

### 2 2021 年山东夏季降水异常特征

2021 年夏季山东全省平均降水量为 524.5 mm,较常年(418.5 mm)偏多 25.3%。其中,6 月全省平均降水量为 95.8 mm,较常年(79.5 mm)偏多 20.5%;7 月全省平均降水量为 242.7 mm,较常年(172.5 mm)偏多 40.7%;8 月全省平均降水量为 186.0 mm,较常年(166.6 mm)偏多 11.6%。

从空间分布来看,山东夏季降水整体呈现“西部多东部少”的分布特征,半岛西部、鲁中和鲁南的部

分地区偏少,其他地区偏多(图 1a)。从时间变化来看,山东夏季降水呈现准两旬的变化周期(图 1b)。

全省降水过程较多,过程降水量超过 20 mm 的有 9 次,超过 50 mm 的有 3 次。7 月 11—13 日,受副高边缘低涡切变线、低空急流和地面气旋影响,鲁西北、鲁中的西部和半岛的部分地区出现大到暴雨局部大暴雨,全省平均降水量为 51.5 mm;7 月 28—29 日,受第 6 号台风“烟花”影响,鲁南、鲁西北西部和鲁中部分地区出现暴雨到大暴雨局部特大暴雨,全省平均降水量达 93.4 mm;8 月 28—31 日,受副高边缘切变线和暖湿气流影响,全省普遍出现持续性降水,鲁南、鲁中、鲁西北和半岛地区先后出现大到暴雨局部大暴雨,全省平均降水量达 92.6 mm。

### 3 大气环流特征

2021 年夏季东亚地区 500 hPa 位势高度距平场(图 2a)显示,中高纬度呈现“+—+”的波列,贝加尔湖东南至山东一带是负距平场,副高面积偏大,西伸脊点偏西,脊线偏南,尤其是副高强度异常偏强,为 1961 年以来历史第三,仅次于 2010 和 2020 年,东亚夏季风整体偏强<sup>[18]</sup>。850 hPa 距平风场(图 2b)显示,贝加尔湖东南至山东一带为异常气旋式环流,其东部为异常反气旋式环流,中国东南沿海为异常气旋式环流,菲律宾以东洋面为异常反气旋式环流。虽然中国东南沿海异常气旋式环流北侧的偏西气流可以将东部洋面上的水汽输送到山东地区,但是这种

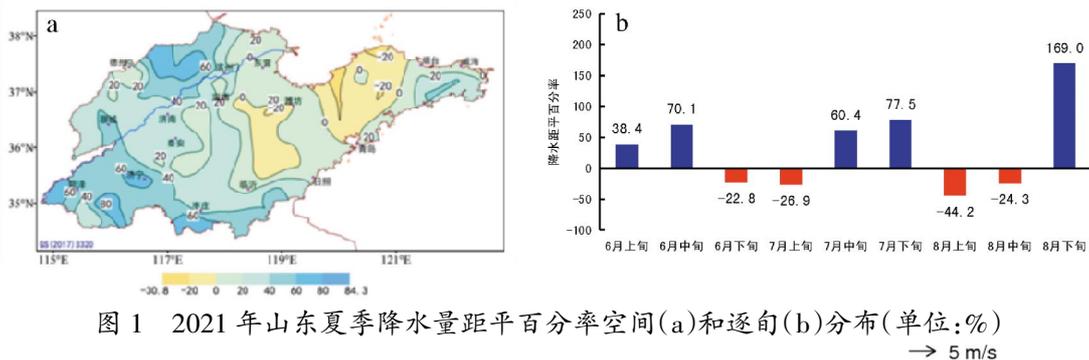


图 1 2021 年山东夏季降水量距平百分率空间(a)和逐旬(b)分布(单位:%)

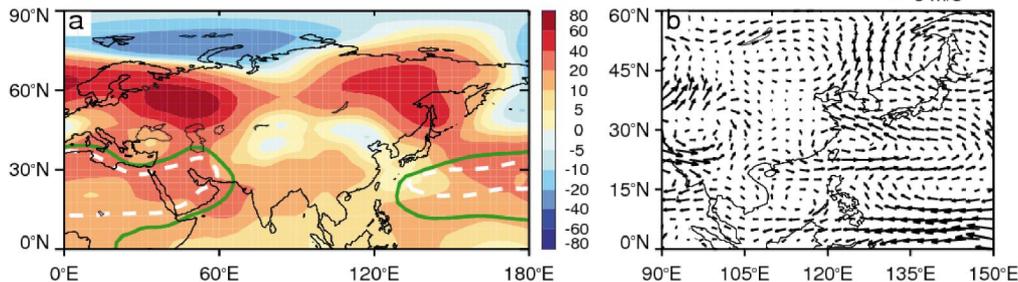


图 2 2021 年夏季 500 hPa 位势高度距平场(a,单位:gpm)和同期 850 hPa 距平风场(b,单位:m/s)

(a 中白色虚线为 1991—2020 年夏季平均气候态 5 880 等位势线,绿色实线为 2021 年夏季 5 880 等位势线)

环流形势并不是典型的多雨年环流形势<sup>[7]</sup>。

图3为2021年6月逐旬环流形势。850 hPa风场显示,6月上旬(图3d),中国大陆以东洋面为异常的反气旋式环流控制,反气旋西侧的偏南气流将充沛的水汽输送到山东地区,这是造成6月上旬山东降水偏多的主要原因。500 hPa位势高度距平场(图3a)显示,6月上旬副高面积偏大,西伸脊点偏西,脊线位置偏北。6月中旬(图3b、3e)环流发生了调整,中国大陆以东的异常反气旋式环流转为异常气旋式环流,山东以东、日本以北洋面位势高度场转为负距平,这种异常的环流形势持续到6月下旬(图3c、3f),导致山东6月下旬降水偏少。

6月下旬到7月上旬,环流再次发生调整。7月上旬,中国东部沿海异常的气旋式环流转为反气旋式环流(图4d),副高表现出明显的西伸(图4a),但此时异常反气旋西侧偏南气流北界到达的位置仍然偏南,山东水汽输送条件偏差。之后这个异常反气旋环流继续强盛发展,西侧偏南气流给山东带来充沛的水汽。副高继续西伸,并在7月12日发生北抬,标志着华北雨季开始。伴随着副高北抬,受副高边缘低涡切变线、低空急流和地面气旋(7月11—13日),以及高空槽和副高边缘低空急流共同影响(7月14—15日),导致7月11—15日山东出现大范围强降水过程,这两次过程降水量共计85.8 mm。7月中旬,500 hPa位势高度距平场(图4b)中国东部为异常负距平。850 hPa风场在中国以东洋面为异常的

气旋式环流(图4e),主要是由于台风“烟花”的影响。台风“烟花”的移动发展并加强,完全掩盖了7月中旬前5 d(7月11—15日)典型的降水偏多的环流形势。7月28—29日,台风“烟花”给山东带来93.4 mm的过程降水,7月下旬的环流场显示由于台风造成的中国以东洋面为异常气旋式环流(图4f)和位势高度距平场负异常,副高东退(图4c)。

8月上旬,受台风“烟花”影响,副高的脊线位置偏南(图5a),整个中国东南部受异常气旋式环流控制(图5d);8月中旬,副高重建(图5b),西伸明显,脊线位置较上月有所北抬。850 hPa风场,中国东南部转为异常反气旋式环流,但其西侧偏南气流北界仍然偏南,即8月中上旬水汽输送条件较差,是导致8月中上旬山东降水偏少的主要原因。8月下旬,异常反气旋环流继续强盛发展(图5f),西侧偏南气流给山东带来充沛的水汽。位势高度距平场上(图5c),副高西伸明显,其西侧边缘的切变线等低值系统在8月28—31日给山东带来92.6 mm的过程降水,造成8月下旬山东降水偏多。

在夏季各旬,阿拉伯海和孟加拉湾上空都有明显的位势高度正距平,两个地区高压对应的反气旋式环流北侧的异常偏西风有利于水汽东传,并与副高输送的来自南海的水汽汇合,使山东出现显著的水汽通量辐合<sup>[7]</sup>,有利于山东夏季降水偏多。对比图2a,虽然夏季平均的环流场并不是典型的山东夏季降水偏多的形势<sup>[7]</sup>,但是环流的季节内变化以及台风

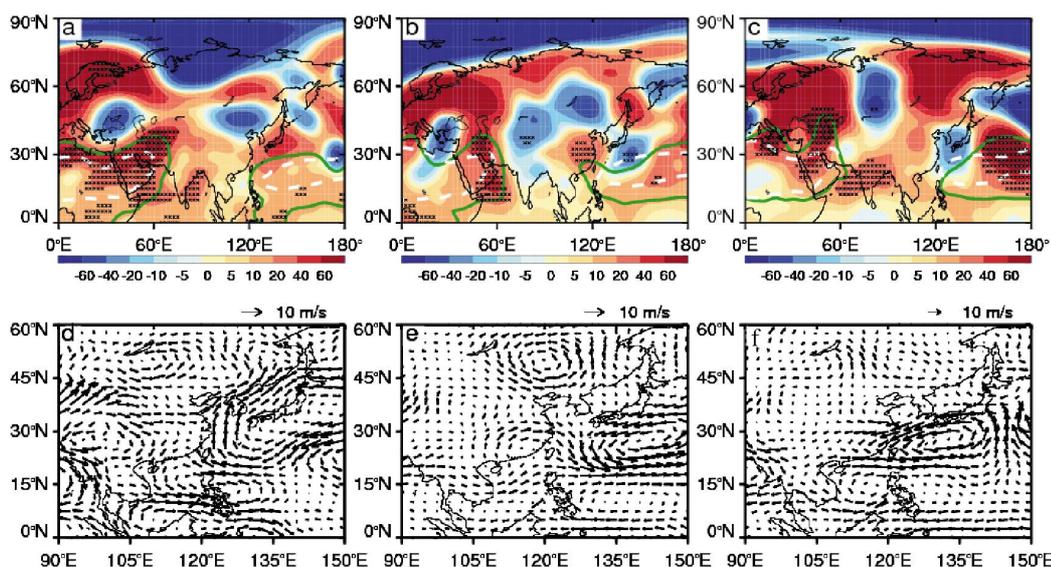


图3 2021年6月逐旬500 hPa位势高度距平场(a、b、c,单位:gpm)和

同期850 hPa距平风场(d、e、f;单位:m/s)

(a、d为上旬,b、e为中旬,c、f为下旬;a、b、c中白色虚线为1991—2020年平均气候态

5 880等位势线,绿色实线为2021年6月逐旬的5 880等位势线)

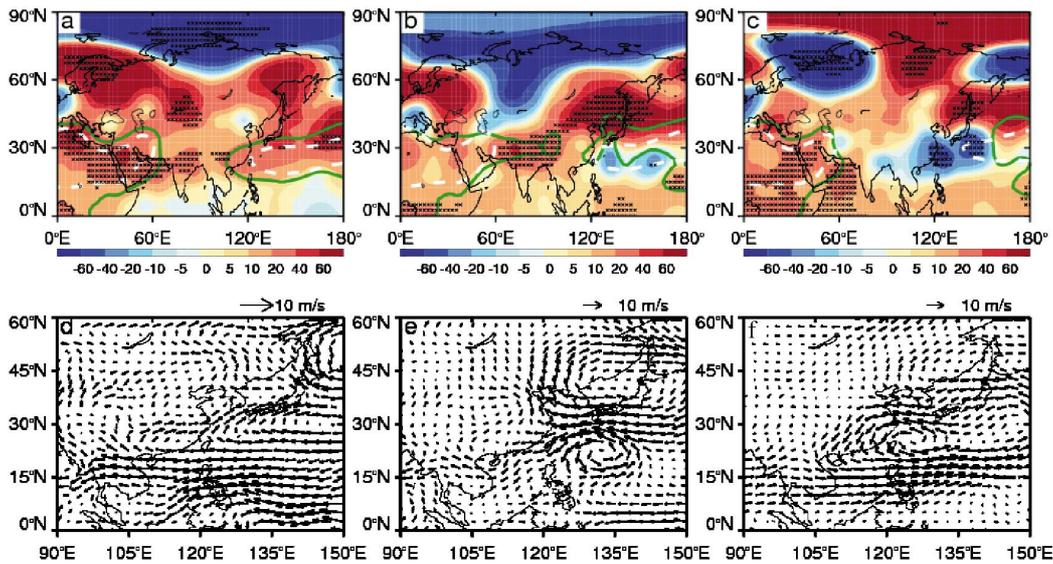


图 4 2021 年 7 月逐旬 500 hPa 位势高度距平场(a、b、c,单位:gpm)和同期 850 hPa 距平风场(d、e、f,单位:m/s)

(a、d 为上旬,b、e 为中旬,c、f 为下旬;a、b、c 中白色虚线为 1991—2020 年平均气候态 5 880 等位势线,绿色实线为 2021 年 7 月逐旬的 5 880 等位势线)

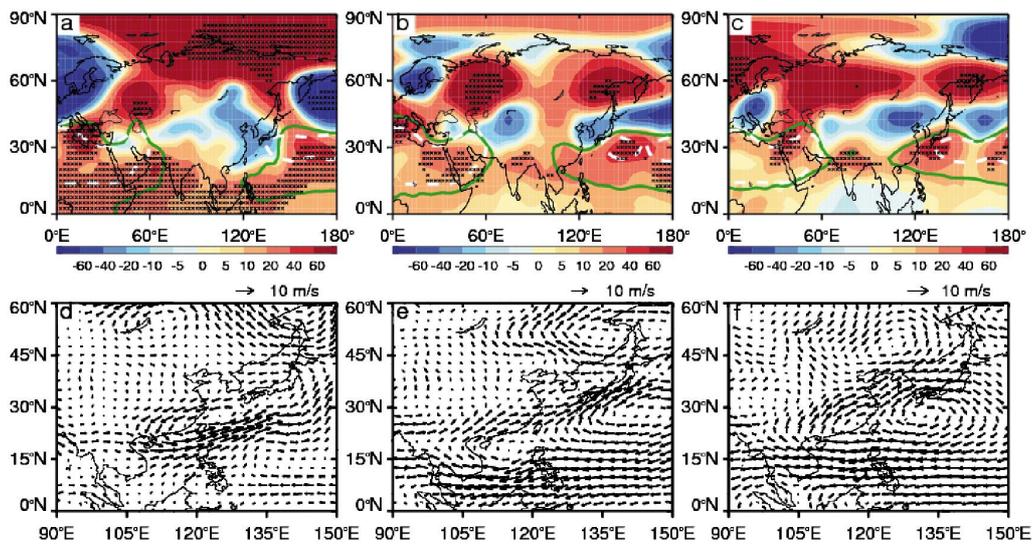


图 5 2021 年 8 月逐旬 500 hPa 位势高度距平场(a、b、c,单位:gpm)和同期 850 hPa 距平风场(d、e、f,单位:m/s)

(a、d 为上旬,b、e 为中旬,c、f 为下旬;a、b、c 中白色虚线为 1991—2020 年平均气候态 5 880 等位势线,绿色实线为 2021 年 8 月逐旬的 5 880 等位势线)

等,导致了山东夏季降水偏多。这种非典型环流场异常给汛期预测带来极大的难度。

#### 4 近 3 次拉尼娜事件对山东夏季降水的影响

根据美国国家海洋和大气管理局(NOAA)对拉尼娜事件的定义,最近的 3 次拉尼娜事件分别发生在 2016 年 7—12 月、2017 年 9 月—2018 年 5 月、2020 年 7 月—2021 年 6 月。虽然这 3 次拉尼娜事件持续的时间不同,拉尼娜事件结束以后的海温演变

趋势不同,但在春季,大气都表现出了对拉尼娜事件的响应<sup>[19,21-22]</sup>。

考虑到 20 世纪 70 年代末期气候发生了年代际变化<sup>[23]</sup>,本文进行合成分析时,均采用 20 世纪 80 年代以后的数据。根据 NOAA 对拉尼娜事件的定义,对 1980—2016 年拉尼娜衰减年山东夏季降水进行合成发现,山东降水偏多地区主要集中在鲁东南和半岛地区,鲁西北地区偏多概率较低,降水整体呈现西少东多的分布形式<sup>[16-17]</sup>。2017 年(图 6a),山东夏

季降水在鲁西北的局部地区、鲁中的部分地区偏少,其余地区以偏多为主;2018年(图6b),山东夏季降水在鲁西南地区和半岛北部地区偏少,其他地区偏多;2021年(图6c),山东夏季降水在鲁中和半岛部分地区偏少,其他地区偏多。这3a的降水空间分布形式,均不符合典型的拉尼娜衰减年夏季降水异常分布形式,尤其是2018和2021年,降水呈现西多东少的异常分布形势,这与典型拉尼娜衰减年降水空间分布异常形势完全相反。说明拉尼娜衰减年夏季,拉尼娜信号作为预测因子的指示性在减弱。山东夏季降水预测必须考虑其他预测因子。

山东夏季降水多少与副高关系密切。以往研究<sup>[16]</sup>指出,山东夏季降水西多东少的空间分布型主要是副高西伸北抬导致。使用1980年后副高强度偏强的10a和偏弱的10a进行合成分析,结果显示,副高偏强年山东西部夏季降水偏多概率更高(图7a),副

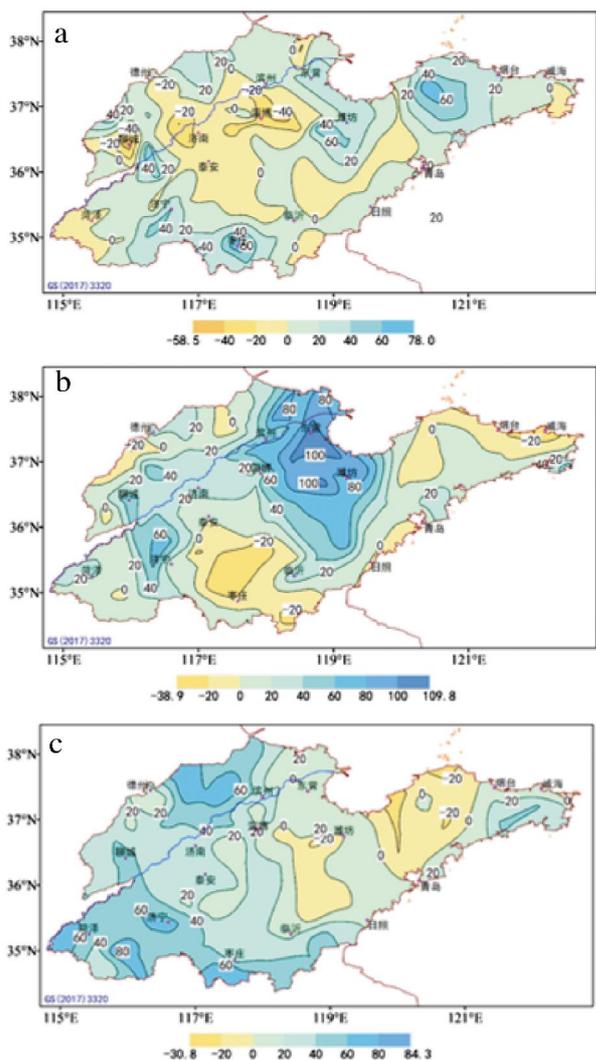


图6 2017年(a)、2018年(b)和2021年(c)山东夏季降水距平百分率分布

高偏弱年山东东部夏季降水偏多概率更高(图7b)。根据以往研究结果,前冬拉尼娜年,会导致菲律宾出现异常的气旋式环流<sup>[24]</sup>,气旋式环流持续到夏季,导致副高强度偏弱,西伸脊点偏东。但是2017、2018、2021年的副高强度指数逐月演变(图8)显示,在前冬至春季前期,副高强度都呈现出对拉尼娜事件的响应,副高强度偏弱。但在后期,副高强度都逐渐转为偏强,这种偏强的态势一直持续到夏季。

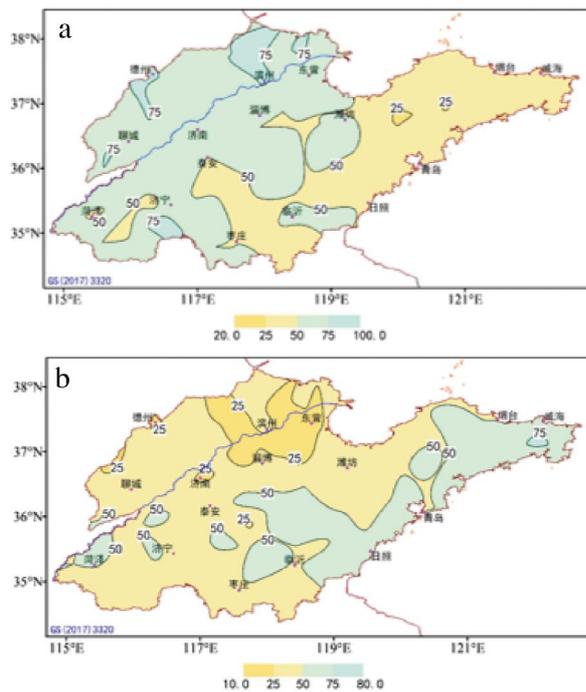


图7 副高偏强年(a)和偏弱年(b)山东夏季降水偏多概率分布

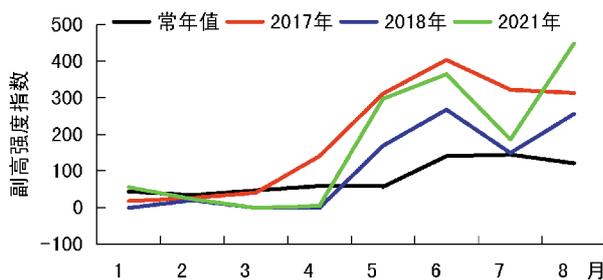


图8 2017、2018、2021年副高强度逐月演变

### 5 结论

基于NCEP再分析资料和山东省122个国家地面观测站数据,对2021年山东夏季降水异常特征及成因进行研究,主要结论如下:

(1)2021年夏季山东平均降水量为524.5 mm,较常年偏多25.3%。其中,6月降水偏多主要是由于副高北抬造成;7月中旬降水偏多主要是由于副高

强度偏强,副高边缘暖湿气流为山东降水提供了充足水汽,下旬降水偏多是由于台风“烟花”带来强降雨;8月降水偏多主要是下旬副高强度偏强,水汽输送充沛造成的。

(2)2021年夏季山东降水空间分布不均匀,呈西多东少的空间分布,这种分布并非典型的拉尼娜衰减年降水空间分布型。夏季副高强度偏强是造成近3次拉尼娜事件次年山东夏季降水空间分布异常的主要原因。

(3)副高发生年代际增强的背景下,虽然前冬至春季前期,副高都表现出对拉尼娜的响应,强度偏弱,但是在春季后期,副高强度均转为偏强并一直持续到夏季。在拉尼娜次年,拉尼娜作为山东夏季降水预测因子的指示意义在减弱,夏季副高强度是拉尼娜次年山东夏季降水的重要预测因子。

研究表明,副高强度发生了年代际的增强<sup>[25]</sup>,同时,随着气候变暖,赤道中东太平洋冬季海温异常与副高强的关系减弱,气候变暖期 Hadley 环流加强以及 Walker 环流上升支减弱辅助作用,使夏季副高强度加强,面积增大<sup>[26]</sup>,在统计意义上,副高和 ENSO 的关系在减弱。最近3次拉尼娜事件也显示,虽然前冬副高强度偏弱呈现出对拉尼娜的响应,但在夏季副高强度均偏强,2021年的副高强度异常偏强,为1961年以来历史第三。因此在拉尼娜衰减年,需要更多地考虑直接影响山东夏季降水的大气环流的异常,不能直接将拉尼娜衰减作为预测降水的最主要因子。贾蓓<sup>[27]</sup>指出20世纪70年代以来副高强度有年代际的增强,但是基于CMIP6模式结果显示,2015—2100年副高强度是减弱的。说明气候系统在不断变化,气候预测中不能沿用全程相关的预测思路,要时刻关注气候规律是否发生了变化,并及时将最新的结果应用在气候预测业务中。

本研究仅考虑在拉尼娜衰减年夏季副高强度对山东降水的影响,并没有对印度洋、大西洋、青藏高原积雪等信号的影响进行分析,在全球变暖背景下,气候异常和极端天气气候事件发生的可能性增加<sup>[28]</sup>,各因子协同作用影响山东夏季降水的机制和机理还需要进一步的分析,以更好地满足气候预测服务需求。

#### 参考文献:

- [1] 周宗先.大汶河1964年暴雨洪水简介[J].水文,1990(5):59-62.
- [2] 顾润源,汤子东.2002年夏季山东干旱成因分析[J].气象,2004(8):22-26.
- [3] 金大超,管兆勇,蔡佳熙,等.近50年华东地区夏季异常降水空间分型及与其相联系的遥相关[J].大气科学,2010,34(5):947-961.
- [4] 胡桂芳,孟祥新,汤子东.山东夏季降水量场预测模型的改进及预测效果检验[J].气象,2013,39(9):1210-1216.
- [5] 王庆,马倩倩,夏艳玲,等.最近50年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究[J].地理科学,2014,34(2):220-228.
- [6] 顾伟宗,陈丽娟.山东夏季降水异常的环流特征及降尺度解释应用预测方法研究[J].海洋气象学报,2019,39(4):83-89.
- [7] 王娜,顾伟宗,孟祥新.山东夏季降水年际优势模态及对应大气环流特征[J].气象,2019,45(1):99-112.
- [8] NAMIAS J. Interactions of circulation and weather between hemispheres[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(10): 482-486.
- [9] BJERKNES J A. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. Monthly Weather Review, 1969(3): 97, 163-172.
- [10] 姜德娟,李志,王昆.1961—2008年山东省极端降水事件的变化趋势分析[J].地理科学,2011,31(9):1118-1124.
- [11] 高理,胡桂芳,孙莎莎.山东夏季强降水的时空演变特征及成因[J].干旱气象,2013,31(4):690-694,731.
- [12] 高理,胡桂芳,邹瑾.近52年山东省夏季不同等级降水的变化特征分析[C]//创新驱动发展 提高气象灾害防御能力——S5应对气候变化、低碳发展与生态文明建设.南京:中国气象学会,2013:508-514.
- [13] 宗海锋,陈烈庭,张庆云. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征[J].大气科学,2010,34(1):184-192.
- [14] 李媛,李瑞芬,张熙.不同分布型 El Niño 事件对山东次年夏季降水的影响[J].干旱气象,2019,37(5):762-770.
- [15] 褚颖佳,郭飞燕,尹承美,等.东部型和中部型厄尔尼诺事件对山东夏季降水的不同影响[J].海洋气象学报,2020,40(4):97-104.
- [16] 孟祥新,王娜,商林.海温异常对山东夏季降水的影响分析[J].气象,2017,43(10):1259-1266.
- [17] 郭飞燕,毕玮,郭飞龙,等.山东气候年际变化特征及其与 ENSO 的关系[J].海洋与湖沼,2017,48(3):465-474.
- [18] 赵俊虎,陈丽娟,章大全.2021年夏季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,2022,48(1):107-121.
- [19] 赵俊虎,陈丽娟,章大全.2021年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J].气象,2022,48(4):479-493.
- [20] 胡桂芳.山东夏季降水分布型及与全国雨型的关系[J].山东气象,2011,31(1):1-4.
- [21] 龚志强,宋文玲,王东阡,等.2017年春季我国主要气候特征及其成因分析[J].气象,2017,43(10):1296-1301.
- [22] 陈丽娟,顾薇,龚振淞,等.影响2018年汛期气候的先兆

- 信号及预测效果评估[J].气象,2019,45(4):553-564.
- [23] 黄荣辉,蔡榕硕,陈际龙,等.我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J].大气科学,2006(5):730-743.
- [24] WANG B, Q ZHANG. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño Development[J]. Journal of Climate, 2002, 15(22): 3252-3265.
- [25] 钱代丽,管兆勇,王黎娟.近 57 a 夏季西太平洋副高面积的年代际振荡及其与中国降水的联系[J].大气科学学报,2009,32(5):9.
- [26] 孙圣杰,李栋梁.近 60 年气候冷暖波动背景下西太平洋副高特征的变异及其与海温关系的变化[J].热带气象学报,2016,32(5):11.
- [27] 贾蓓.基于全球大气环流三型分解的西太平洋副热带高压气候演变特征研究[D].兰州:兰州大学,2021.
- [28] IPCC. Summary for Policymakers[C]/MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

## Characteristics and Mechanism of Summer Rainfall in Shandong in 2021

SHANG Lin<sup>1,2</sup>, MENG Xiangxin<sup>1,2</sup>, TANG Zidong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Ji'nan 250031, China;  
2. Shandong Climate Center, Ji'nan 250031, China)

**Abstract** Based on the NCEP reanalysis data and precipitation data from 122 meteorological stations, this study examines the rainfall anomalies and mechanisms during the summer of 2021 in Shandong province. The average summer rainfall in Shandong province in 2021 exceeds the normal by 25.3%, accompanied by an increased frequency of rainfall events. Another notable characteristic of summer rainfall in Shandong province is its uniform spatial distribution, with greater rainfall in the west and less rainfall in the east. Further analysis of the three most recent La Niña events reveals that the spatial distribution anomalies of summer rainfall in Shandong province during the La Niña decay period are attributed to the intensified subtropical high. The intensity of the subtropical high serves as a significant predictor during the La Niña decay period in Shandong province.

**Key words** summer rainfall in Shandong; La Niña; western pacific subtropical high; potential height; wind field