



## 秋季黄河中下游降水主模态及2021年极端降水的气候背景

于群 孙越 李建平 王建波 张可 朱晓清

**The leading mode of autumn rainfall over the mid-lower reaches of the Yellow river and the climate background of extreme autumn rainfall in 2021**

YU Qun, SUN Yue, LI Jianping, WANG Jianbo, ZHANG Ke, ZHU Xiaoqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220216>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 1981–2015年中国95° E以东区域性暴雨过程时、空分布特征

Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to the east of 95° E in China during 1981–2015  
气象学报. 2018, 76(2): 182–195 doi: [10.11676/qxxb2017.092](https://doi.org/10.11676/qxxb2017.092)

#### 超强厄尔尼诺事件对中国东部春夏季极端降水频率的影响

Influence of super El Nio events on the frequency of spring and summer extreme precipitation over eastern China  
气象学报. 2018, 76(4): 539–553 doi: [10.11676/qxxb2018.021](https://doi.org/10.11676/qxxb2018.021)

#### 基于CloudSat、FY-2E资料的中国海域及周边地区深对流和穿透性对流特征

The sea-land characteristics of deep convections and convective overshootings over China sea and surrounding areas based on the CloudSat and FY-2E datasets  
气象学报. 2019, 77(2): 256–267 doi: [10.11676/qxxb2019.024](https://doi.org/10.11676/qxxb2019.024)

#### 厄尔尼诺年西北太平洋异常反气旋的年际变化特征及其影响

Inter-annual variation of the western North Pacific anomalous anticyclone during El Nio years and its impact  
气象学报. 2017, 75(4): 581–595 doi: [10.11676/qxxb2017.042](https://doi.org/10.11676/qxxb2017.042)

#### 厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水分布影响的新研究

A new study of El Nio impacts on summertime water vapor transport and rainfall in China  
气象学报. 2017, 75(3): 371–383 doi: [10.11676/qxxb2017.033](https://doi.org/10.11676/qxxb2017.033)

#### 夏季厄尔尼诺-Modoki和东部型ENSO海表温度异常分布型特征及其与海洋性大陆区域气候异常的联系

The SSTA patterns of El Nio-Modoki and eastern Pacific ENSO and their associations with regional climate variation in the Maritime Continent during boreal summer  
气象学报. 2018, 76(1): 1–14 doi: [10.11676/qxxb2017.081](https://doi.org/10.11676/qxxb2017.081)



扫码关注公众号，获取更多信息！

# 秋季黄河中下游降水主模态及 2021 年极端降水的气候背景<sup>\*</sup>

于 群<sup>1</sup> 孙 越<sup>2</sup> 李建平<sup>2</sup> 王建波<sup>1</sup> 张 可<sup>1</sup> 朱晓清<sup>1</sup>  
 YU Qun<sup>1</sup> SUN Yue<sup>2</sup> LI Jianping<sup>2</sup> WANG Jianbo<sup>1</sup> ZHANG Ke<sup>1</sup> ZHU Xiaoqing<sup>1</sup>

1. 山东省气象台, 济南, 250031

2. 中国海洋大学未来海洋学院, 青岛, 266100

1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China

2. Academy of the Future Ocean, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2023-01-04 收稿, 2023-03-31 改回.

于群, 孙越, 李建平, 王建波, 张可, 朱晓清. 2023. 秋季黄河中下游降水主模态及 2021 年极端降水的气候背景. 气象学报, 81(4): 547-558

Yu Qun, Sun Yue, Li Jianping, Wang Jianbo, Zhang Ke, Zhu Xiaoqing. 2023. The leading mode of autumn rainfall over the mid-lower reaches of the Yellow river and the climate background of extreme autumn rainfall in 2021. *Acta Meteorologica Sinica*, 81(4):547-558

**Abstract** To investigate the climate background for the extreme rainfall anomaly in 2021 over the mid-lower reaches of the Yellow river, this study analyzes the leading mode of autumn rainfall over the mid-lower reaches of the Yellow river during 1951–2021 and its relationship with the extreme rainfall anomaly in 2021. Rainfall data collected at 160 stations in China and NCEP/NCAR atmospheric circulation reanalysis as well as NOAA sea surface temperature (SST) reanalysis are used. The result of Empirical Orthogonal Function analysis reveals a consistent autumn rainfall pattern from the southeast of Gansu province to the west of Shandong province, which covers the mid-lower reaches of the Yellow river. This pattern is regarded as the leading mode of autumn rainfall over the mid-lower reaches of the Yellow river. The time coefficient in 2021 is the maximum since 1951, consistent with the extreme precipitation in 2021 in the region. The extreme event in 2021 is a typical example corresponding to the leading mode. This study uses the time series of Autumn Rainfall over the Yellow river (ARYR) to represent the variability of this leading mode. Analysis reveals that the interannual and interdecadal variations of this mode are affected by El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO) with more rainfall during La Niña phase and negative PDO phase. Further, the leading rainfall mode over the mid-lower reaches of the Yellow river is closely related to SST anomalies in the mid-latitude North Pacific with more rainfall under higher SST. The mid-latitude North Pacific SST (MNPSST) index is calculated over the key region in the North Pacific, where the correlation is the most significant. The MNPSST index is the highest in 2021 since 1951. When the MNPSST index is high, the regressed high-level (low-level) anticyclone (cyclonic) shear occurs over the mid-lower reaches of the Yellow river, and strong upward motions develop over the mid-lower reaches of the Yellow river and the Marine Continent (MC) region. In the autumn of 2021, there are strong upward motions in the northern South China Sea, and anomalous easterly winds over the northern Pacific are obviously stronger. As a result, water vapor flux anomalies could split to southern and eastern branches, reaching the mid-lower reaches of the Yellow river basin. The leading mode of autumn rainfall over the mid-lower reaches of the Yellow river is strongly related to the intensity of SST anomaly in the North Pacific. Positive SST anomalies in the mid-latitude North Pacific are one of the most important factors affecting extreme rainfall over the mid-lower reaches of the Yellow river in autumn 2021.

**Key words** The mid-lower reaches of the Yellow river, Leading mode of autumn rainfall, Extreme rainfall in 2021, Sea surface

\* 资助课题: 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD12)、山东省气象局气象科学技术研究项目(2019sdqxm01)。

作者简介: 于群, 主要从事极端天气气候研究与气象服务。E-mail: 517634061@qq.com

## temperature anomalies in the North Pacific

**摘要** 为探讨2021年秋季黄河中下游极端降水的气候背景,基于中国160站降水资料、NCEP/NCAR大气环流和NOAA海表温度(SST)再分析资料,分析了黄河中下游秋季降水主模态的时空特征及2021年极端降水的可能成因。经验正交函数分解表明,秋季黄河中下游降水主模态在空间分布上西至甘肃省东南部,东至山东省西部,主体位于黄河中下游地区,2021年是黄河中下游降水主模态的典型表现。采用黄河中下游秋季降水指数(ARYR)表征主模态时间变化,其年际、年代际变化分别与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和太平洋年代际振荡(PDO)存在相关,拉尼娜年和PDO负位相时降水偏多。秋季黄河中下游降水偏多主模态与北太平洋SST异常偏高的区域和强度相关密切,选取关键区定义中纬度北太平洋SST(MNPSST)指数,当MNPSST偏高时,海洋性大陆(MC)区域存在强的上升运动,黄河中下游地区出现显著的低(高)空辐合(散),指数偏低则降水偏少。其中2021年MNPSST指数为1951年以来最高,2021年MC对流区北侧的中国南海北部有较强上升运动,中纬度北太平洋偏东气流异常偏强,水汽通量异常分为偏南和偏东两支到达黄河流域中游和下游。中纬度北太平洋SST正异常是2021年秋季黄河中下游极端降水的重要影响因子之一。

**关键词** 黄河中下游地区, 秋季降水主模态, 2021年极端降水, 北太平洋海表温度异常

中图法分类号 P468.0<sup>+24</sup>

## 1 引言

黄河中下游秋季降水对中国农业生产和国民经济有重要影响,在全球变暖加剧、气候系统不稳定性增强的背景下,加强秋季降水特别是极端降水的研究,对预防气候极端事件带来的灾害有重要意义。2021年秋季华北和西北地区降水量分别偏多196%和102%,均为1961年以来历史同期最多(中国气象局国家气候中心,2022)。黄河中下游地区是中国东部旱涝变率最大的区域之一(Qian, et al., 2003; 鄢凤玉等, 2021)。由于黄河中下游地区人口密度大,且位于东部季风区,是南、北雨区过渡带,降水存在显著的季节、年际和年代际变化,因此该区域降水异常备受关注。然而,黄河中下游地区降水的预报、预测技巧水平较低(陈丽娟等,2017),其外强迫因子如厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、积雪厚度、土壤湿度等在该地区指示信号均偏弱。随着全球变暖,极端天气、气候事件增多,夏、秋季洪涝灾害频发(Rahmstorf, et al., 2011; Chen, et al., 2015; Du, et al., 2019)。黄河中下游地区秋季降水异常及影响因子,特别是2021年秋季该地区极端降水的气候背景有必要进一步探究。

叶笃正等(1958)和高由禧等(1958)指出,季节盛行的天气过程与大气环流的突变相联系,华西秋雨是中国秋季范围最大、现象最明显的降水过程,其起止时间与高空西风急流的位置密切相关。根据《中国雨季监测指标——华西秋雨》(QX/T 496—2019)(中国气象局,2019),将华西秋雨区以秦岭为

界划分为北区和南区,其中北区包括甘肃东南部、宁夏南部和陕西南部,山西、河北、河南和山东毗邻华西秋雨北区。华西秋雨南区和北区秋雨异常分布和成因不同(白虎志等,2004; 喻乙耽等,2018)。9—10月的降水异常对整个秋季降水的空间格局起决定作用(支蓉等,2018; 梁萍等,2019),这一阶段北方台风降雨较少,秋雨偏多往往是中高纬度大气环流和西北太平洋副热带高压(WNPSH)相互作用的结果。影响华西秋雨的主要大气环流系统包括巴尔喀什湖—贝加尔湖低压槽、印缅槽、西北太平洋副热带高压、东亚高空西风急流、季风环流等(柳艳菊等,2012; 鲍媛媛等,2020)。海表温度(SST)作为主要的外强迫信号,ENSO、太平洋年代际振荡(PDO)、北太平洋海表温度、印度洋偶极子等对中国秋季降水有重要影响(Li, et al., 2013; Wei, et al., 2021)。

ENSO是年际尺度上最强的气候异常信号,对中国气候有显著影响。厄尔尼诺年中国秋季降水以南多北少居多,拉尼娜年则相反(Li W, et al., 2011; Zhang, et al., 2013; Li J P, et al., 2019)。太平洋年代际振荡(Mantua, et al., 1997; Zhang, et al., 1997)不仅直接造成太平洋及其周边区域气候的年代际变化,也是年际变化的重要背景(Zhu, et al., 2007; Yang, et al., 2017; Qin, et al., 2018; Wei, et al., 2021),已有研究(Geng, et al., 2019)指出PDO在全球变暖背景下周期缩短,全球变暖可导致PDO的振幅增大,且与观测基本一致(陈广超等,2021)。PDO可能在黄河中下游降水年际、年代际变化中扮演着越

来越重要的角色, 孟祥新等(2017)、薛德强(2019)指出山东汛期降水量与汛期 PDO 指数存在负相关, 春、夏季 PDO 指数与汛期降水有稳定、显著的相关。最新的研究(Liu, et al, 2022; Sun, et al, 2023)从极端性上探讨了影响9月中国北方强降雨的多个海、气因子。

2021年秋季京津冀及陕西、山西、辽宁和山东的降水量均为1961年以来历史同期最多, 甘肃降水量为历史同期次多, 甘肃、陕西、山西、河北和山东等多个省份将秋季降水异常列为2021年十大天气、气候事件之一。上述省份的多雨区主要位于黄河中下游地区, 严重秋汛和阴雨寡照是2021年秋季该地区主要的天气、气候特征。北方秋汛严重时, 降水异常区域并不仅限于传统意义上的华西秋雨北区, 而是向东、向北延伸到更广大的区域, 对华西秋雨北区及以东地区秋季降水异常整体性的研究还不多见, 同一纬度上华西秋雨与东部黄河中下游地区降水异常有着怎样的联系还不清楚。文中将讨论秋季黄河中下游地区降水主模态及其年际变化, 分析降水偏多/少年和极端年的大气环流、动力和水汽条件异常, 探讨北太平洋海表温度对秋季黄河中下游降水的重要指示意义, 从大气环流和海表温度异常两方面进行成因分析, 阐述2021年的气候背景及导致其极端性的海、气因子的影响。

## 2 资料与方法

采用国家气候中心(NCC)的160站月降水资料、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 海表温度再分析格点资料和PDO指数; 位势高度、水平风场、垂直速度和比湿等 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的再分析格点资料取自美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)(Kalnay, et al, 1996)。上述资料使用时段均为1951年1月至2021年12月。

分析方法主要有经验正交函数分解(EOF)、小波分析、滑动平均以及合成、回归和相关分析, 显著水平t检验等。由于中国北方秋季的降水主要集中在9月和10月, 降水量占比超过秋季降水量的80%, 因此采用9—10月累计降水量代表秋季降水量, 文中定义的物理量同样采用9—10月的平均。观测降水量距平和再分析资料距平均为相对1951—2020年气候平均值。

## 3 秋季黄河中下游降水主模态及与2021年的比较

观测表明, 一些年份在黄河中下游地区存在秋季降水量一致型分布, 对1951—2020年全国160站标准化秋季降水量序列做经验正交函数分解(图略), 第一模态方差贡献11.5%, EOF1在黄河中下游地区呈现显著的一致性, 标准化变量EOF可以定性反映空间区域的相关分布结构(吴洪宝等, 2010), 超过0.01显著水平检验区西至青海中东部, 东至山东, 北至内蒙古南部, 南至长江以北。为更好地提取这一特征, 在秦岭以北( $32^{\circ}\text{--}40^{\circ}\text{N}, 104^{\circ}\text{--}122^{\circ}\text{E}$ )包括华北平原和黄土高原, 地理上被称为华北暖湿带湿润半湿润地区, 选取40个测站进行EOF分析(图1), 第一模态方差贡献32.6%, 通过0.05显著水平North检验(North, et al, 1982)。图1a不同等级系数0.23、0.30、0.38分别对应0.05、0.01、0.001显著相关水平(吴洪宝等, 2010), 图1a通过0.01显著水平检验的区域与全国160站EOF1结果基本相同, 最高相关区为陕西中东部、山西南部和河南北部, 相关系数超过0.7, 计算时间系数(简称PC1, 图1b)与各测站降水量的决定系数( $R^2$ ), 邢台、菏泽、西峰镇、延安、太原、西安、郑州、安阳、长治9站均超过0.5, 解释方差达到50%—66%。第一模态主体在黄河中下游地区降水异常分布一致, 称之为黄河中下游秋季降水主模态。徐桂玉等(1994)提出华西秋雨存在纬向型第一模态与文中提取的主模态有一致之处, 但其选取东、西向跨度小, 向东止于 $110^{\circ}\text{E}$ 。

20世纪80年代中期华西秋雨北区出现明显的偏多到偏少的年代际转折(薛春芳等, 2012; 徐曼琳等, 2020), 将1951—2020年分为两个时段各35 a分别做EOF分析(图略), 近35年范围有所缩小, 但依然包括华西秋雨北区和以东的山西中南部、河南北部和河北南部、山东西部, 进一步表明主体在黄河中下游地区存在降水异常主模态。

由EOF1空间系数超过0.001显著水平t检验, 确定18个代表测站(图1a), 做降水量区域平均并标准化, 定义为黄河中下游秋雨指数(Autumn Rainfall in the Yellow River, 简称ARYR), 该序列与1951—2020年PC1相关系数超过0.97。以ARYR序列 $\pm 1.5$ 倍标准差定义主模态降水偏多/少年, 可确定1961、1964、1975、1983、1985、2003、2005、

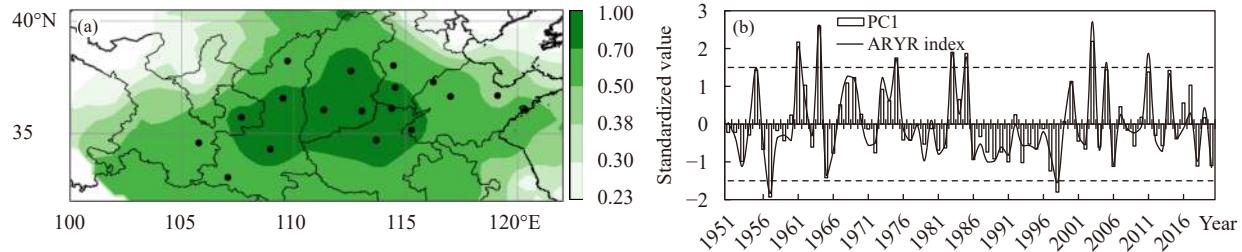


图 1 1951—2020 年 ( $32^{\circ}$ — $40^{\circ}$ N,  $104^{\circ}$ — $122^{\circ}$ E) 40 站 9—10 月降水量 EOF1 分布 (a) 及 PC1 (柱) 和 ARYR 指数 (实线) 年际变化 (b)(a 中色阶区相关通过 0.01 显著性水平检验, 黑色圆点为黄河中下游地区气象站; b 中虚线为 ARYR 序列的  $\pm 1.5$  倍标准差)

Fig. 1 (a) EOF1 of rainfall during September–October based on the rainfall data over ( $32^{\circ}$ — $40^{\circ}$ N,  $104^{\circ}$ — $122^{\circ}$ E) from 1951 to 2020 (color shaded; black dot: stations in the mid-lower reaches of the Yellow river), (b) principal component (bar) of the leading mode and ARYR index (black line) (dashed lines represent 1.5 standard deviations)

2011 年为偏多年, 偏多年与偏少年呈现不对称, 仅 1957、1998 年达到  $-1.5$  倍标准差。20 世纪 60 年代至 70 年代中期和进入 21 世纪以来降水相对偏多, 且降水量起伏频繁, 极端降水几率大, 偏多年除了 1983 和 1985 年外, 其他 6 a 都发生在偏多时段(图 1b)。

为比较降水偏多年与 2021 年, 图 2 给出了偏多年(不含 2021 年, 下同)和 2021 年的距平百分率, 偏多年距平百分率正值分布在黄淮流域, 偏多超过 70% 的高值区集中在黄河中下游地区, 2021 年偏多超过 200% 的区域主要位于黄河中下游, 偏多年的分析可以为 2021 年气候背景提供依据, 2021 年降水异常与黄河中下游主模态偏多分布一致, 是主模态的极端典型年份。2021 年中国北方出现强秋汛, 为 70 年来最异常的 1 a。1951—2020 年 ARYR 标准化序列(图 1b)分析表明, 最大和次大值为 2003 和 1964 年(分别为  $2.25$  和  $2.17$  倍标准差),

进而分析 1951—2021 年 ARYR 序列(参见图 8), 2021 年为  $4.5$  倍标准差, 除 2021、2003 和 1964 年外, 其他 6 个偏多年也均大于  $1.33$  倍标准差; 1951—2021 年的 PC1 序列分析(图略)表明, 2021 年 PC1 最高, 为  $4.05$ , 其次是 1964 和 2003 年(分别为  $2.28$  和  $1.88$ ), 其他 6 个偏多年, PC1 值均大于  $1.15$ , 即秋季降水主模态的时空分布很大程度上反映了黄河中下游降水的异常特征。

## 4 降水异常偏多年和 2021 年的大气环流特征

### 4.1 大气环流异常

季节降水异常决定于大气环流系统的异常变化。华西区(包括华西一般区和秋雨明显区)秋雨偏多/少的环流形势和黄淮区一般秋雨区十分相似(何敏, 1984)。降水偏多年位势高度和水平风场

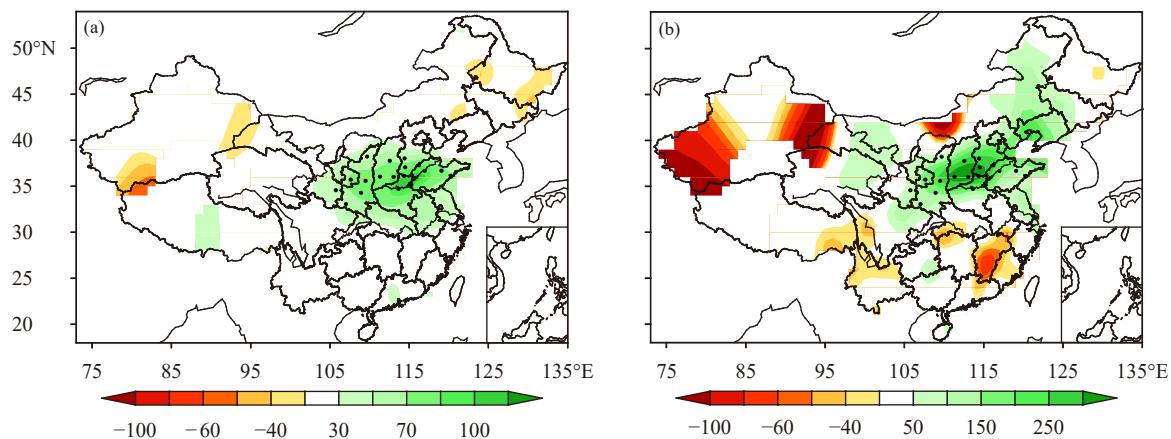


图 2 (a) 降水偏多年(不含 2021 年)和 (b) 2021 年秋季降水距平百分率(%) (黑色圆点同图 1)

Fig. 2 Percentage autumn rainfall anomalies (color shaded, unit: %) in (a) rainy years (excluding 2021) and (b) 2021 (black dots same as that in Fig. 1)

(图3a)欧亚上空中、高纬度西风气流较为平直,偏多年与2021年(图3c)位势高度异常在中纬度东亚沿岸至北太平洋分布一致,两个正距平中心都分别位于朝鲜半岛至日本岛和中纬度北太平洋,风场相应出现两个深厚的反气旋环流;东亚沿岸与巴尔喀什湖正、负距平区的配置提供了东高西低的大尺度环流背景,东亚高纬度阻塞高压和东亚大槽较浅或不明显;海洋性大陆(MC)对流区低层辐合都异常加强。2021年中纬度北太平洋的位势高度正距平区显著性更强。偏多年西北太平洋副热带高压较气候平均略偏西、偏北,而2021年显著偏强、偏西,Liu等(2022)研究指出,2021年极端降水与西北太平洋副热带高压西伸密切相关。降水偏少年位势高度、风的距平场基本相反(图3b)。

## 4.2 动力条件

降水偏多/少年份200 hPa纬向风速距平(图4)

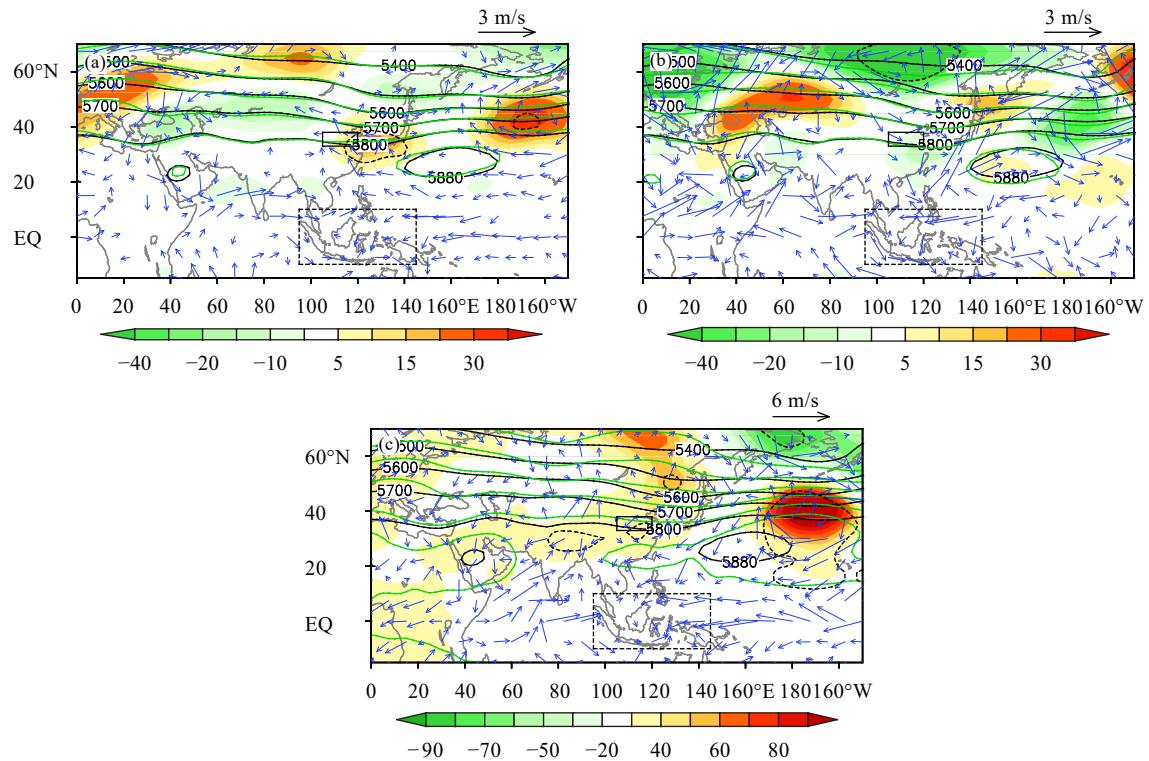


图3 500 hPa位势高度及距平场、925 hPa距平风场(黑实线为常年平均位势高度,绿实线为偏多年和2021年位势高度,色阶:位势高度距平,单位:gpm;矢量,风场,单位:m/s;实线框为黄河中下游地区,虚线框为海洋性大陆对流区)(a. 降水偏多年, b. 降水偏少年, c. 2021年;粗点线区为位势高度异常超过0.05显著水平t检验)

Fig. 3 Raw (green contour) and abnormal (color shaded, unit: gpm) geopotential height at 500 hPa and abnormal horizontal wind (vector, unit: m/s) at 925 hPa in (a) rainy years, (b) rainless years and (c) 2021 (black contours are climatological geopotential high at 500 hPa, the solid line box indicates the region of the mid-lower reaches of the Yellow river, the dotted line box indicates the MC region (the same hereafter); the black dotted contours in (a) and (b) indicate the 0.05 significance level of geopotential height at 500 hPa in rainy years and 2021 by student-*t* test)

基本相反,沿40°N正/负距平呈东西带状,南侧为负/正距平,即高空急流比气候平均偏北/南。偏多年(图4a)东亚沿岸40°N和30°N出现的正、负距平中心通过了0.01显著水平*t*检验,大于40 m/s高空急流范围扩大,向西扩展至黄河中下游北侧,黄河中下游地区位于急流轴右侧入口处。东亚高空急流轴入口区的极端气流加速决定了2021年秋季北方强降雨雨带的位置(Sun, et al, 2023)。2021年(图4c)急流轴明显偏北,北太平洋西风漂流区大范围正距平通过了0.01显著水平*t*检验,大于40 m/s高空急流较偏多年范围更大、位置更偏东,2021年秋季极端降水可能与高空急流轴偏北和异常向东延伸有密切联系。

## 4.3 水汽条件

降水偏多年和2021年在黄河中下游地区水汽通量散度(图略)及其距平场(图5a、c)都存在负值

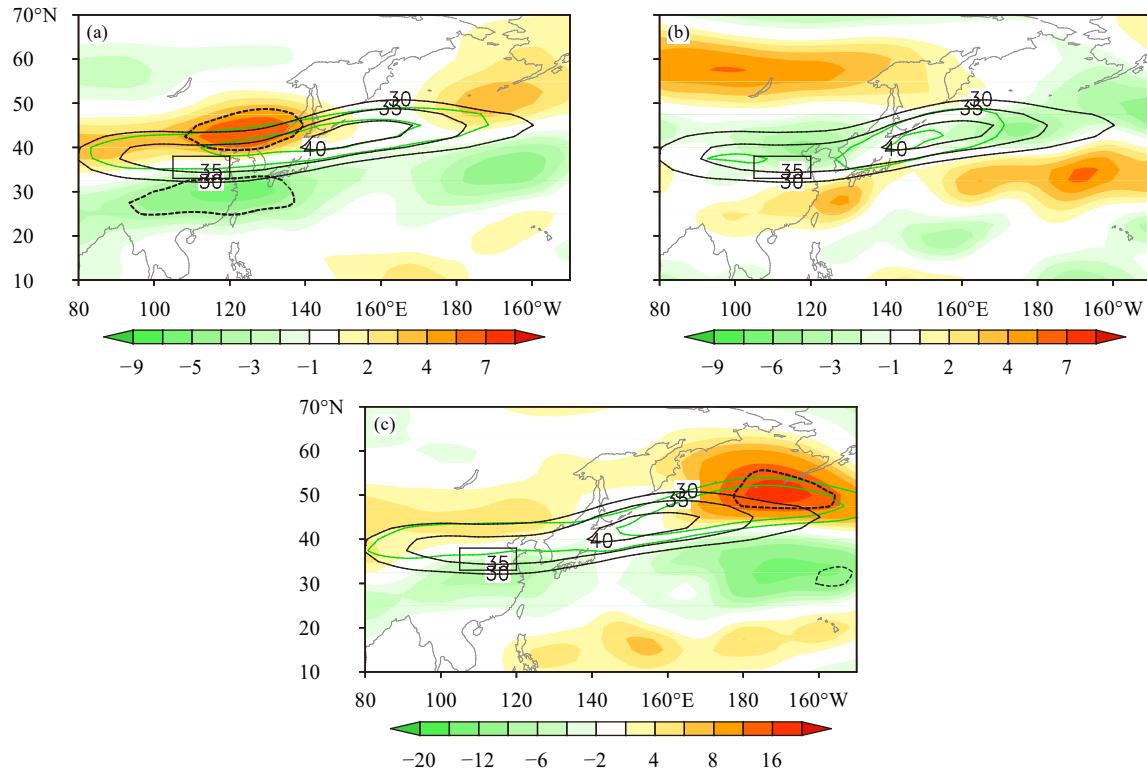


图 4 200 hPa 纬向风速及距平场 (黑实线, 常年平均纬向风; 绿实线, 偏多年和 2021 年大于 35 m/s 区域, 等值线间隔 5 m/s, 色阶: 风速距平, 单位: m/s; 粗点线为风速距平超过 0.01 显著水平  $t$  检验) (a. 降水偏多年, b. 降水偏少年, c. 2021 年; 实线方框同图 3)

Fig. 4 Raw (black contours) and anomalous (color shaded, unit: m/s) zonal wind speed at 200 hPa in (a) rainy years, (b) rainless years and (c) 2021 (the black dotted contours indicate the 0.01 significance level of zonal wind speed at 200 hPa by the student  $t$ -test, the green contours indicate areas with wind spee greater than 35 m/s and the contour interval is 5 m/s; the solid line box as in Fig.3

区。偏多年份整层水汽通量分布相似(图略),水汽通道一支来自西北太平洋副热带高压南侧的偏东气流,另一支来自印度季风的西南水汽源,经孟加拉湾折向北,至青藏高原东侧两支水汽汇合北上,到达黄河中下游地区。偏多年水汽通量距平场(图 5a)在青藏高原东侧有相似轨迹,但 2021 年(图 5c)西北太平洋副热带高压南侧的偏东气流异常较偏多年强。另外,来自北太平洋的水汽经日本群岛在中国东部沿海向西北折向黄河下游地区,与来自青藏高原东侧的偏南水汽汇合,两支水汽通量异常分别到达黄河流域中游和下游。偏少年水汽通量和水汽通量散度的距平场(图 5b)与偏多年呈几乎相反的分布。

## 5 海表温度异常对降水的指示意义

### 5.1 北太平洋海表温度异常信号的影响

依据国家气候中心的 ENSO 事件定义标准(李晓燕等, 2000), 黄河中下游地区降水偏多年中

1961、1964、1975、1983、1985 和 2011 年为拉尼娜年,其中 2011 年是双拉尼娜年,2003 和 2005 年则处于弱厄尔尼诺间的非 ENSO 年;降水偏少年中的 1957 年和较偏少的 1965 年是厄尔尼诺的发展年,1998 年例外。Nino3.4 指数与 ARYR 指数相关系数达 -0.35, 通过 0.05 显著水平  $t$  检验。黄河流域秋季降水与 ENSO 关系的年代际变化受到气候年代际变化的调制(Li, et al., 2013)。ARYR 指数年代际变化与 PDO 的冷、暖位相的转变有很好的对应关系(图略),马柱国等(2006)指出前期的 PDO 指数可作为华北年代际干、湿变化预测的一个重要指标。ARYR 指数和 PDO 指数的小波分析(图 6a)表明,秋季降水异常变化与 PDO 年代际周期有同步性,在 10 a 和 20 a 周期都存在峰值,9—10 a 周期在不同时段较为显著,从全局功率谱(图 6b)上同样可以看到这一信号。ARYR 指数的周期特征也表明秋季黄河中下游降水受 PDO 年代际特征的制约。

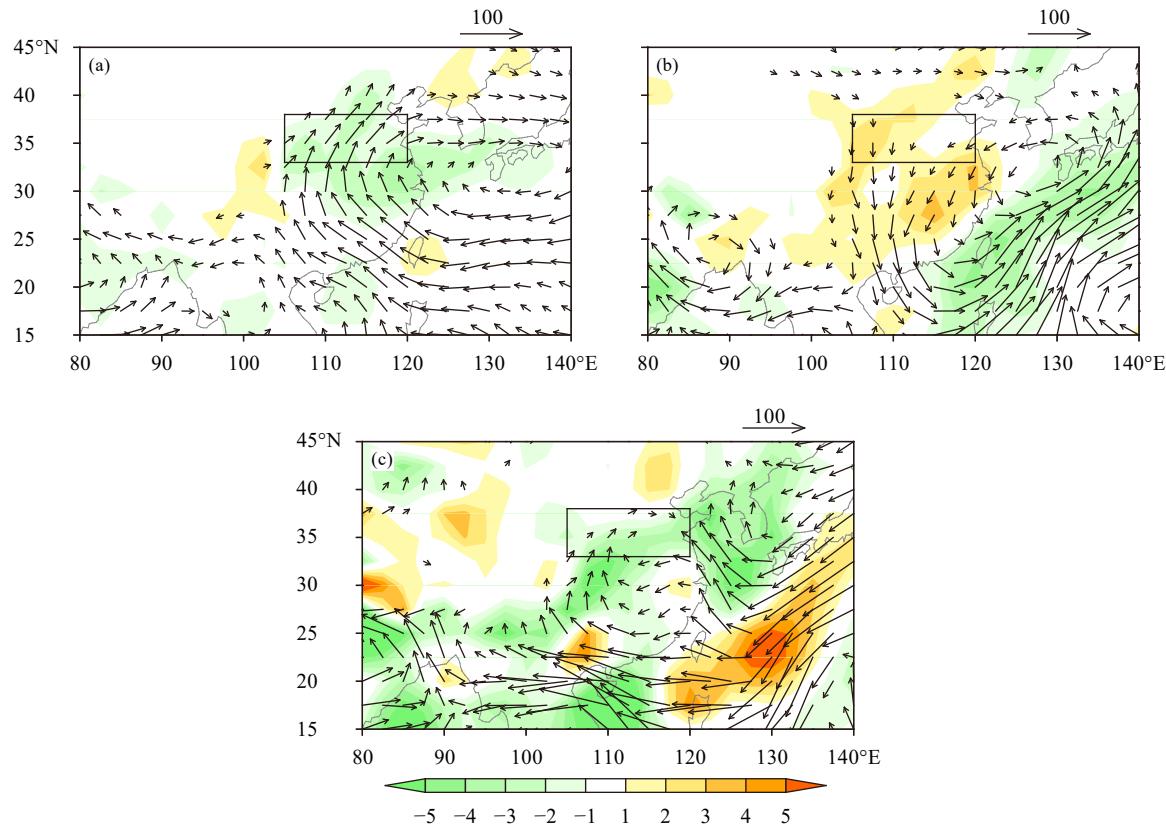


图 5 整层大气水汽通量距平场(箭矢, 单位:  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ,  $u$ 、 $v$ 方向分别大于 10)和水汽通量散度距平场(色阶, 单位:  $10^5 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )。a. 降水偏多年, b. 降水偏少年, c. 2021 年; 实线方框同图 3)

Fig. 5 Anomalies of vertically integrated moisture flux (vector, unit:  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ) and moisture convergence (color shaded, unit:  $10^5 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ) in (a) rainy years, (b) rainless years and (c) 2021 (vectors with zonal or meridional moisture flux less than  $10 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$  are not shown; the solid line box as in Fig. 3)

## 5.2 降水偏多年和 2021 年的海表温度异常分析

大尺度海-气相互作用对气候异常有重要影响, 1951—2020 年 ARYR 指数与海表温度异常的相关系数分布(图 7a)表明, 太平洋海域存在显著相关区, 分别是黑潮、亲潮及其延伸体区和中纬度北太平洋地区正相关、热带中东太平洋负相关以及中纬度南太平洋与北太平洋对应区域的正相关。当 ARYR 指数偏高时, 中纬度北太平洋海表温度异常偏高, 热带中东太平洋海表温度偏低, 降水偏少年则相反, 分布与 PDO 空间负/正结构类似。图 7b、c 显示偏多年与 2021 年海表温度异常在大西洋和印度洋明显不同。2021 年为双拉尼娜年, 但偏多年赤道中东太平洋海表温度的合成为负距平明显强于 2021 年。偏多年份中纬度北太平洋中部海表温度都出现了正距平, 2021 年正异常范围大、强度强, 最大超过  $2^\circ\text{C}$ , 1964 和 2003 年异常强度在  $1.0\text{--}1.5^\circ\text{C}$ (图略), 约是 2021 年的一半, 偏多年合成基本

在  $0.4\text{--}0.8^\circ\text{C}$ 。这一分析表明中纬度北太平洋中部海表温度的显著正异常是造成 2021 年极端降水的重要影响因子。

## 5.3 北太平洋秋季海表温度异常对降水的指示意义

秋季黄河中下游降水异常在年际和年代际尺度上都与太平洋海表温度有密切关系(图 8), 相比热带海洋, 中纬度北太平洋海表温度异常是更为显著的因子, 因此选取显著相关区( $28^\circ\text{--}40^\circ\text{N}$ ,  $166^\circ\text{E}\text{--}164^\circ\text{W}$ ), 对海表温度异常区域平均并做标准化处理, 得到中纬度北太平洋海表温度指数(简称 MNPSST), 与同期 ARYR 的相关系数为 0.43, 通过 0.001 显著水平  $t$  检验, 高于 PDO、Nino3.4 指数。两序列滤去年代际变化, 相关系数为 0.39, 仍通过 0.001 显著水平  $t$  检验, 虽受到年代际调制, 年际变化影响仍起主要作用。前期(5—8 月)MNPSST 与 ARYR 指数相关持续为正, 表明前期春、夏季关

键区海表温度异常对黄河中下游秋雨异常有一定的指示意义。当北太平洋海表温度偏高时,作为异

常热源加热其上空的大气,激发深厚的异常反气旋环流,北太平洋反气旋以罗斯贝波形式传播能量到

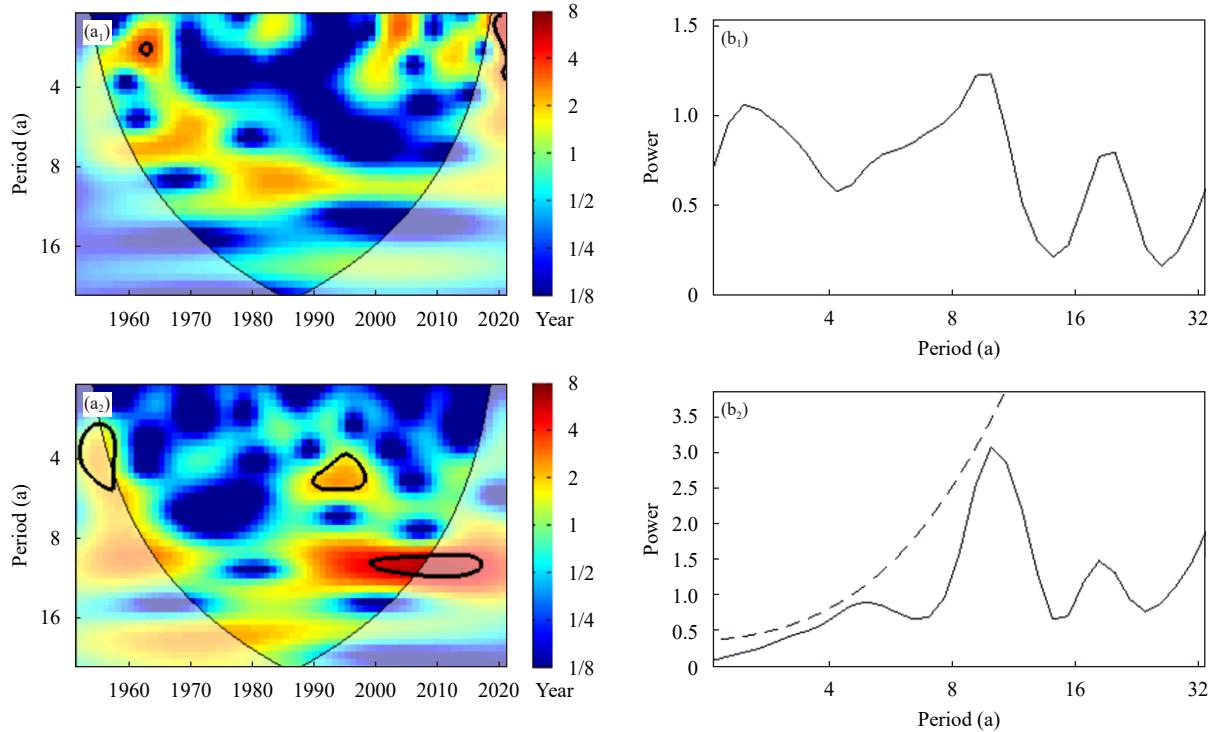


图 6 ARYR ( $a_1, b_1$ ) 与 PDO ( $a_2, b_2$ ) 指数序列 (a) 小波分析 (粗实线为红噪声超过 0.05 显著水平, 浅色区为边缘效应区) 和 (b) 全局功率谱分析 (虚线为红噪声超过 0.05 显著水平)

Fig. 6 (a) Wavelet analysis (bold solid lines indicate the red noise reaching 0.05 significance level and the light color represents the edge effect area) and (b) global power spectrum (dotted lines indicate red noise reaching 0.05 significance level) of ARYR ( $a_1, b_1$ ) and PDO ( $a_2, b_2$ ) indices

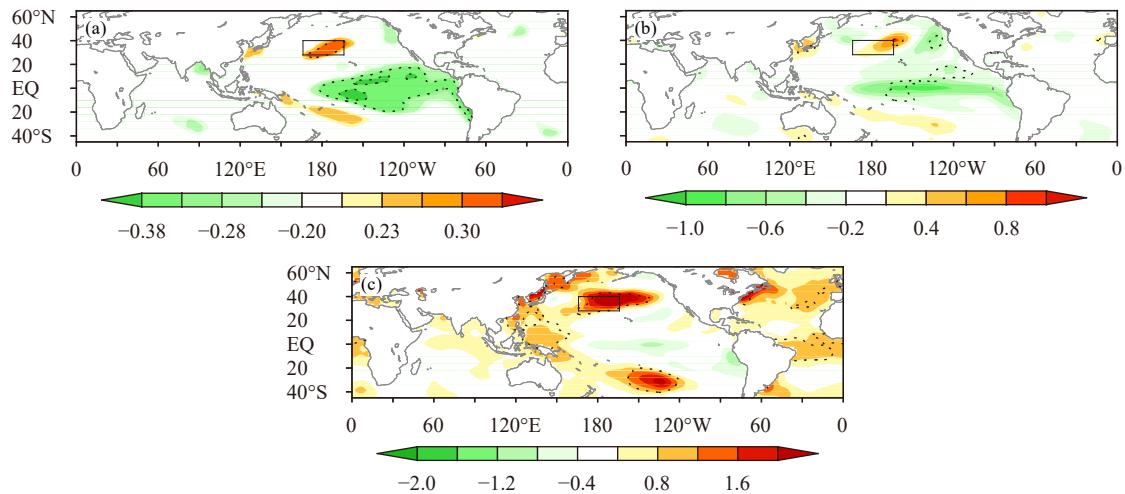


图 7 1951—2020 年 ARYR 指数与海表温度的相关系数分布 (a, 点线内区域为通过 0.01 显著水平  $t$  检验, 黑色框为中纬度北太平洋关键区), 偏多年 (b) 和 2021 年 (c) 海表温度距平 (点线区通过 0.05 显著水平  $t$  检验)

Fig. 7 Correlation coefficients between ARYR index and SST (a) in September-October, and SST in (b) rainy year and (c) 2021 (dotted contours in (a), (b) and (c) indicate the 0.01, 0.05 and 0.05 significance levels respectively by student  $t$ -test; the black box represents the key region in the mid-latitude North Pacific)

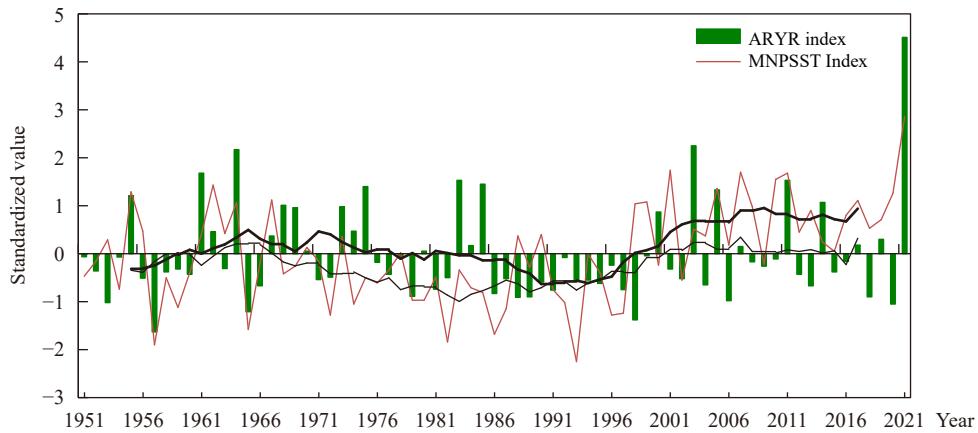


图 8 ARYR 指数(柱)与 MNPSST 指数(红线)的年际、年代际变化(黑细、粗实线分别为 ARYR 指数与 MNPSST 指数的 9 a 滑动平均)

Fig. 8 Interannual and interdecadal indices of ARYR (bar) and MNPSST (red line), and the thin and thick lines indicate the 9 a moving averages of ARYR and MNPSST indices

MC 区域(Sun, et al, 2023),使 MC 上空上升运动加强,通过哈得来环流使中国南方副热带高压加强,进而影响北方降水。

将 MNPSST 指数回归到同期 500 hPa 位势高度和 925 hPa 风场(图 9a),与偏多年合成的异常场(图 3)相似,当 MNPSST 指数偏高时,伴随位势高度正异常,925 hPa 中纬度北太平洋和日本海一带出现两个异常反气旋环流,都通过了 0.05 显著水平  $t$  检验,而黄河中下游地区位于反气旋式环流的东南气流下游,同时来自中低纬度洋面的暖湿水汽在黄河中下游地区有气旋式切变。MNPSST 指数对 200 hPa 纬向异常风场回归分析(图 9b)显示,高

空西风急流明显东伸北抬,与偏多年异常场(图 4a)一致,黄河中下游区位于急流右侧的强辐散区,底层为辐合区(图 9a),急流的东伸北抬区域也都通过 0.05 显著水平  $t$  检验。

MNPSST 指数对 105°—115°E 平均的垂直速度场的回归分析(图 10a)表明,30°—40°N 的垂直上升运动可达 200 hPa,35°N 附近上升速度最强,略偏北的黄河流域 900—700 hPa 高度达到 0.05 显著水平  $t$  检验;海洋性大陆区域存在较强上升运动,且 900—100 hPa 高度都通过 0.05 显著水平  $t$  检验。通过大气桥作用(Lau, et al, 1996; Li J P, et al, 2019),海洋性大陆对流加强通过影响西北太平洋副热带高

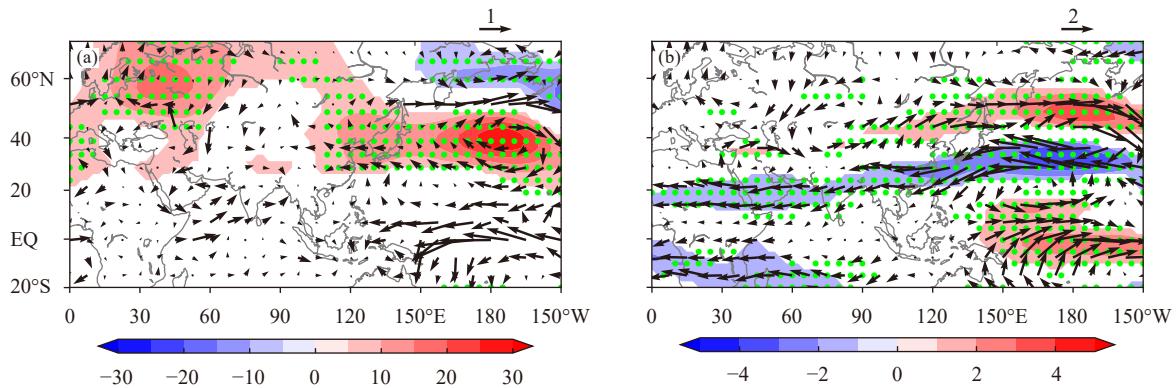


图 9 1951—2020 年 9—10 月 MNPSST 指数对(a)500 hPa 位势高度(色阶,单位:gpm)、925 hPa 风场和(b)200 hPa 风场(色阶:纬向风速,单位:m/s)的回归分析(水平风场矢量,单位:m/s;绿色点区域为通过 0.05 显著水平  $t$  检验)

Fig. 9 Regressions of (a) geopotential height at 500 hPa (color shaded, unit: gpm) and horizontal wind at 925 hPa, (b) horizontal wind and zonal wind speed (color shaded, unit: m/s) at 200 hPa onto NPSST index from 1951—2020 (vector, unit: m/s; green dots indicate the 0.05 significance level  $t$ -test)

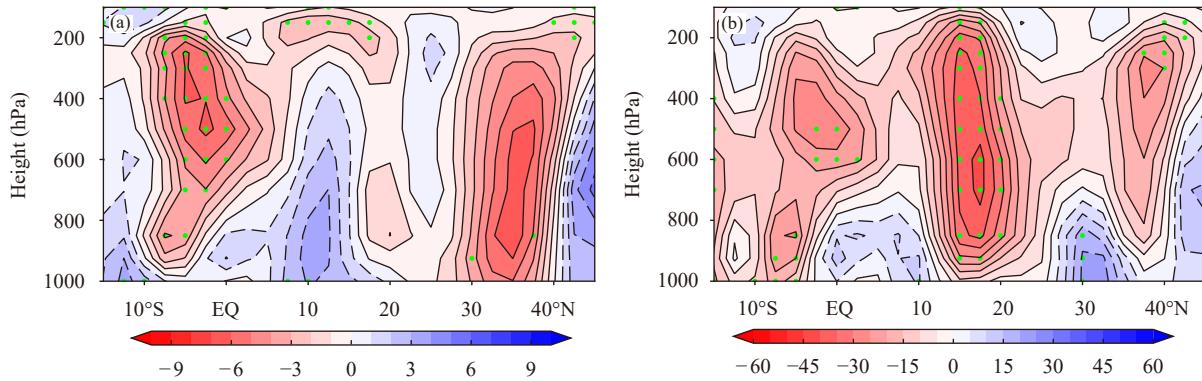


图 10 (a) 1951—2020 年 MNPSST 指数对 105°—115°E 平均垂直速度的回归分析, (b) 2021 年 105°—115°E 平均垂直速度距平 (色阶, 绿色点区域为通过 0.05 显著水平  $t$  检验, 单位:  $10^{-3}$  hPa/s)

Fig. 10 (a) Regression of zonally averaged vertical velocity between 105°E and 115°E onto MNPSST index from 1951 to 2020, (b) anomalous zonally averaged vertical velocity between 105°E and 115°E in 2021 (color shaded, green dots indicate the 0.05 significance level  $t$ -test, unit:  $10^{-3}$  hPa/s )

压进而影响黄河中下游流域的对流上升运动加强, 其北侧为较强下沉区。2021 年距平场(图 10b)的不同在于, 中国南海北部存在强的上升运动区域, 30°N 附近低层(700 hPa 以下)有强的下沉, 西北太平洋副热带高压西进偏强, 华南、江南降水偏少或接近常年, 黄河中下游地区降水异常偏多。

## 6 结论与讨论

以 2021 年秋季中国北方极端降水异常的气候背景为出发点, 探究发现主体在黄河中下游地区存在一致型秋季降水主模态, 西至甘肃省东南部, 东至山东省西部。该模态的时、空分布与降水偏多/少年的观测结果相匹配, 反映了降水偏多/少年的分布特征, 可解释该地区降水异常超过 50% 的局地方差, 特别表现了 2021 年秋季降水黄河中下游地区的极端性, 为此称之为秋季黄河中下游降水主模态。2021 年秋季降水异常偏多, 是黄河中下游降水一致型偏多主模态的典型表现。

降水主模态年际、年代际变化与中纬度北太平洋海表温度异常相关尤为密切。降水偏多年中纬度北太平洋中部海表温度为正距平, 强弱程度不同, 2021 年海表温度异常范围更广、强度更强, 达到降水次多年(1964、2003 年)的 2 倍, 偏少年该区域为负距平。中纬度北太平洋中部海表温度显著正异常与 2021 年极端降水密切相关, 该关键区海表温度的异常信号一般在春、夏季就有表现, 中纬度北太平洋海表温度异常信号是预测黄河中下游

秋季降水异常的一个重要因子。而观测表明 2022 年 8 月关键区海表温度正异常明显, 但 9 月前半月海表温度正异常区向西移动, 关键区海表温度正异常不再显著, 9 月黄河中下游降水亦不显著, 北太平洋关键区海表温度异常与黄河中下游降水秋季同期关联可能更加密切。中纬度北太平洋能量以罗斯贝波形式传播到海洋性大陆地区(Sun, et al., 2023), 通过大气桥作用, 海洋性大陆地区对流加强影响西北太平洋副热带高压进而影响黄河中下游流域降水。

主模态降水异常决定于大气环流的季节异常变化, 在 0°—180°—150°W 北半球中高纬度, 降水偏多年巴尔喀什湖低压槽加深, 东亚大槽变浅, 东亚高空急流偏北, 偏少年位势高度和风的距平场则相反; 2021 年西北太平洋副热带高压较偏多年显著偏强、偏西, 中纬度北太平洋的位势高度正距平更强, 海洋性大陆对流区低层辐合异常加强。偏多/少年高空急流相对常年明显偏北/南, 东亚高空急流轴入口区的极端气流加速决定了 2021 年秋季北方强降水带的位置, 2021 年大于 40 m/s 高空急流较偏多年范围更大、位置更偏东。偏多年水汽通量及距平场一支来自西北太平洋副热带高压南侧的偏东气流, 另一支来自印度季风的西南水汽源, 汇合北上到达黄河中下游地区; 2021 年西北太平洋副热带高压南侧的偏东气流异常较偏多年更强, 另外来自北太平洋的水汽经日本群岛在中国东部沿海折向黄河下游地区; 偏少年水汽通量及散度的距平场则

相反。

2021年秋季北方降水为有仪器观测以来的历史极值。Liu等(2022)将这一极端事件归因于西北太平洋副热带高压向西内陆入侵,印度洋—太平洋暖池海表温度正异常、赤道中东太平洋的海表温度负异常和热带大西洋的海表温度正异常对西北太平洋副热带高压和中国北方降雨具有单独和联合的影响;Sun等(2023)指出热带大西洋、热带太平洋的海表温度异常以及南半球环状模和北太平洋振荡共同加强了海洋性大陆地区的对流和印度季风(IM),增强的海洋性大陆对流激发了北太平洋副热带高压发展,并引起9月中国北方降水异常偏多。极端天气、气候事件有其发生的气候背景,又有多因子极端性的综合影响,影响异常降水的海、气因子的季节内振荡机制更需深入研究。

文中主要针对2021年秋季中国北方降水异常偏多的现象,从降水量入手,年际尺度分析指出秋季黄河中下游存在降水量一致型的主模态,对形成主模态的海表温度异常和大气环流形势及2021年极端降水的成因进行了初步诊断分析。2021年秋季降水异常的成因是复杂的,尤其是全球变暖、极端天气频发的背景下,其中更深层次的物理过程、机理成因与预测方法等,有待进一步分析和研究。

## 参考文献

- 白虎志,董文杰.2004.华西秋雨的气候特征及成因分析.高原气象,23(6):884-889. Bai H Z, Dong W J. 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over southwest China. Plateau Meteor, 23(6): 884-889 (in Chinese)
- 鲍媛媛,李勇,康志明.2020.2017年华西极端秋雨的季风环流异常特征及机理.高原气象,39(3): 560-569. Bao Y Y, Li Y, Kang Z M. 2020. Characteristics and mechanism of monsoon circulation anomalies in extreme autumn rain over West China in 2017. Plateau Meteor, 39(3): 560-569 (in Chinese)
- 陈广超,陈峰,黎鑫等.2021.全球变暖情景下太平洋年代际振荡(PDO)时空特征变化分析.气候与环境研究,26(5): 482-492. Chen G C, Chen Z, Li X, et al. 2021. Analysis of the temporal and spatial characteristics of the Pacific Decadal Oscillation in global warming scenarios. Climatic Environ Res, 26(5): 482-492 (in Chinese)
- 陈丽娟,顾伟宗,伯忠凯等.2017.黄淮地区夏季降水的统计降尺度预测.应用气象学报,28(2): 129-141. Chen L J, Gu W Z, Bo Z K, et al. 2017. The statistical downscaling method of summer rainfall prediction over the Huang-Huai valley. J Appl Meteor Sci, 28(2): 129-141 (in Chinese)
- 高由禧,郭其蕴.1958.我国的秋雨现象.气象学报,29(4): 264-273. Kao Y H, Kuo C Y. 1958. On the autumn raining area in China. Acta Meteor Sinica, 29(4): 264-273 (in Chinese)
- 何敏.1984.我国主要秋雨区的分布及长期预报.气象,10(9): 10-13. He M. 1984. Distribution and long-term forecast of the main autumn rain areas in China. Meteor Mon, 10(9): 10-13 (in Chinese)
- 李晓燕,翟盘茂.2000.ENSO事件指数与指标研究.气象学报,58(1): 102-109. Li X Y, Zhai P M. 2000. On indices and indicators of ENSO episodes. Acta Meteor Sinica, 58(1): 102-109 (in Chinese)
- 梁萍,周兵,马悦等.2019.2017年秋季华西秋雨的多时间尺度变化特征及成因分析.气象,45(8): 1104-1112. Liang P, Zhou B, Ma Y, et al. 2019. Characteristics of variability on multiple timescales and cause analysis of autumn rainfall in West China during 2017. Meteor Mon, 45(8): 1104-1112 (in Chinese)
- 柳艳菊,孙冷,孙丞虎等.2012.2011年秋季华西秋雨异常及成因分析.气象,38(4): 456-463. Liu Y J, Sun L, Sun C H, et al. 2012. Analysis of anomalies of autumn rain in West China in 2011 and its possible mechanism. Meteor Mon, 38(4): 456-463 (in Chinese)
- 马柱国,邵丽娟.2006.中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系.大气科学,30(3): 464-474. Ma Z G, Shao L J. 2006. Relationship between dry/wet variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years. Chinese J Atmos Sci, 30(3): 464-474 (in Chinese)
- 孟祥新,王娜,商林.2017.海温异常对山东夏季降水的影响分析.气象,43(10): 1259-1266. Meng X X, Wang N, Shang L. 2017. Influence of the early SST anomaly on the summer precipitation in Shandong province. Meteor Mon, 43(10): 1259-1266 (in Chinese)
- 吴洪宝,吴蕾.2010.气候变率诊断和预测方法.2版.北京:气象出版社,16-34. Wu H B, Wu L. 2010. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 16-34 (in Chinese)
- 徐桂玉,林春育.1994.华西秋雨特征及成因探讨.气象科学,12(4): 149-154. Xu G Y, Lin C Y. 1994. Survey on the causes and features of autumn rain in Western China. Scientia Meteor Sinica, 12(4): 149-154 (in Chinese)
- 徐曼琳,周波涛,程志刚.2020.2010年以来华西秋季降水年代际增多原因初探.大气科学学报,43(3): 568-576. Xu M L, Zhou B T, Cheng Z G. 2020. Preliminary analysis on the interdecadal increase of autumn rainfall in Western China since 2010. Trans Atmos Sci, 43(3): 568-576 (in Chinese)
- 薛春芳,董文杰,李青等.2012.近50年渭河流域秋雨的特征与成因分析.高原气象,31(2): 409-417. Xue C F, Dong W J, Li Q, et al. 2012. Climate characteristic and formative cause of autumn rain in Weihe River Basin in recent 50 years. Plateau Meteor, 31(2): 409-417 (in Chinese)
- 薛德强.2019.青岛汛期降水量与太平洋年代际振荡的关系.海洋气象学报,39(1): 46-54. Xue D Q. 2019. Study on the relationship between precipitation during flood season in Qingdao and Pacific Decadal Oscillation. J Mar Meteor, 39(1): 46-54 (in Chinese)
- 鄢凤玉,赵传湖,孙即霖.2021.1470—2019年中国东部旱涝年代际变化及

- 其与太平洋海表温度的关系. 气象学报, 79(2): 196-208. Yan F Y, Zhao C H, Sun J L. 2021. Interdecadal variation of dryness/wetness in eastern China and its relationship with the Pacific sea surface temperature during 1470—2019. *Acta Meteor Sinica*, 79(2): 196-208 (in Chinese)
- 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报, 29(4): 249-263. Ye D Z, Tao S Y, Li M C. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October. *Acta Meteor Sinica*, 29(4): 249-263 (in Chinese)
- 喻乙耽, 马振峰, 范广洲. 2018. 华西秋雨气候特征分析. 成都信息工程大学学报, 33(2): 164-176. Yu Y D, Ma Z F, Fan G Z. 2018. The analysis of climatic feature of autumn rainfall in West China. *J Chengdu Univ Inf Technol*, 33(2): 164-176 (in Chinese)
- 支蓉, 陈丽娟, 竺夏英. 2018. 2017年秋季我国北方地区降水异常偏多成因分析. 气象, 44(4): 572-581. Zhi R, Chen L J, Zhu X Y. 2018. Analysis of characteristics and causes of precipitation anomalies over northern China in autumn 2017. *Meteor Mon*, 44(4): 572-581 (in Chinese)
- 中国气象局. 2019. 中国雨季监测指标——华西秋雨: QX/T 496—2019. 北京: 气象出版社, 1-4.
- China Meteorological Administration. 2019. Monitoring indices of rainy season in China—Autumn rain of West China: QX/T 496—2019. Beijing: China Meteorological Press, 1-4 (in Chinese)
- 中国气象局国家气候中心. 2022. 中国气候公报(2021). 北京: 中国气象局, 12-20.
- National Climate Center of China Meteorological Administration. 2022. China Climate Bulletin (2021). Beijing: China Meteorological Administration, 12-20 (in Chinese)
- Chen H P, Sun J Q. 2015. Changes in climate extreme events in China associated with warming. *Int J Climatol*, 35(10): 2735-2751
- Du H B, Alexander L V, Donat M G, et al. 2019. Precipitation from persistent extremes is increasing in most regions and globally. *Geophys Res Lett*, 46(11): 6041-6049
- Geng T, Yang Y, Wu L X. 2019. On the mechanisms of Pacific Decadal Oscillation modulation in a warming climate. *J Climate*, 32(5): 1443-1459
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-472
- Lau N C, Nath M J. 1996. The role of the "atmospheric bridge" in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies. *J Climate*, 9(9): 2036-2057
- Li C, Zeng G. 2013. Impacts of ENSO on autumn rainfall over Yellow river loop valley in observation: Possible mechanism and stability. *J Geophys Res Atmos*, 118(8): 3110-3119
- 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. *Adv Atmos Sci*, 36(9): 902-921
- Li W, Zhai P M, Cai J H. 2011. Research on the relationship of ENSO and the frequency of extreme precipitation events in China. *Adv Climate Change Res*, 2(2): 101-107
- Liu B Q, Zhu C W, Ma S M, et al. 2022. Combined effects of tropical Indo-Pacific-Atlantic SST anomalies on record-breaking floods over Central-North China in September 2021. *J Climate*, 35(18): 6191-6205
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(6): 1069-1080
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon Wea Rev*, 110(7): 699-706
- Qian W H, Chen D, Zhu Y, et al. 2003. Temporal and spatial variability of dryness/wetness in China during the last 530 years. *Theor Appl Climatol*, 76(1-2): 13-29
- Qin M H, Li D L, Dai A G, et al. 2018. The influence of the Pacific Decadal Oscillation on North Central China precipitation during boreal autumn. *Int J Climatol*, 38(S1): e821-e831
- Rahmstorf S, Coumou D. 2011. Increase of extreme events in a warming world. *Proc Natl Acad Sci USA*, 108(44): 17905-17909
- Sun Y, Li J P, Wang H, et al. 2023. Extreme rainfall in Northern China in September 2021 tied to air-sea multi-factors. *Climate Dyn*, 60: 1987–2001, doi: 10.1007/s00382-022-06439-2
- Wei W G, Yan Z W, Li Z. 2021. Influence of Pacific Decadal Oscillation on global precipitation extremes. *Environ Res Lett*, 16(4): 044031
- Yang Q, Ma Z G, Xu B L. 2017. Modulation of monthly precipitation patterns over East China by the Pacific Decadal Oscillation. *Climatic Change*, 144(3): 405-417
- Zhang W J, Jin F F, Zhao J X, et al. 2013. The possible influence of a nonconventional El Niño on the severe autumn drought of 2009 in southwest China. *J Climate*, 26(21): 8392-8405
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J Climate*, 10(5): 1004-1020
- Zhu Y M, Yang X Q, Chen X Y, et al. 2007. Interdecadal variation of the relationship between ENSO and summer interannual climate variability in China. *J Trop Meteor*, 13(2): 132-136