

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.05

# 2021年黄河流域极端秋雨与大气环流和海温的关系

刘静, 靳莉君, 王鹏

(黄河水利委员会水文局, 河南郑州450004)

**摘要:** 为探究2021年黄河流域秋雨的异常特征及其成因,利用黄河流域232个测站逐日降水资料、NCEP/NCAR逐月再分析数据集和英国气象局Hadley中心月平均海温资料等,分析了2021年黄河流域秋雨的极端性,并进一步与秋雨异常偏多年的环流背景和海温异常特征进行了对比。结果表明:2021年黄河流域秋雨较常年异常偏多,偏离气候态近 $8\sigma$ ,全流域有62.5%的站点累积雨量大小位列历史同期前5,37.9%的站点位列第1,表现出显著的极端性。巴尔喀什湖低槽底部分裂短波槽东移南下,与西太平洋副热带高压西北侧的西南气流交汇于黄河流域南部,造成2021年秋雨异常偏多;与其余秋雨异常年相比,2021年副高面积偏大、强度偏强、西伸脊点偏西,印缅槽强度则偏弱。2021年秋季,北太平洋海温较气候态偏高 $3.6\sigma$ ,异常度位居秋雨异常年首位,其通过引起副高的异常响应造成极端秋雨的发生。本研究可为黄河流域秋雨预测提供参考。

**关键词:** 极端秋雨; 雨量; 雨日; 大气环流; 海温异常; 标准差; 黄河流域

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)05-0036-09

## Relationship between extreme autumn rainfall, atmospheric circulation and sea surface temperature in the Yellow River Basin in 2021

LIU Jing, JIN Lijun, WANG Peng

(Hydrology Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** In order to explore the characteristics and causes of the abnormal autumn rainfall in the Yellow River Basin in 2021, we analyzed the extreme autumn rainfall of 2021 and investigated the circulation background and sea surface temperature (SST) anomaly characteristics of the years with extreme autumn rainfalls using daily precipitation data of 232 stations in the Yellow River Basin, monthly reanalysis data of NCEP/NCAR and monthly SST of the Hadley Center, United Kingdom Meteorological Office. The results show that the autumn rainfall in the Yellow River Basin in 2021 was abnormally more abundant than usual, deviating from the climatic state by nearly 8 standard deviations. Accumulated rainfall of 62.5% of the stations ranked among the top five in the same period of history, and 37.9% ranked first, showing significant extremities. This is because the short wave troughs that split from the bottom of the low trough of Balkhash Lake moved eastward and southward, and converged with the southwest airflow of the north-west side of the West Pacific Subtropical High (WPSH) in the south of the Yellow River Basin, resulting in abnormally more abundant autumn rainfall in 2021. Compared with the other years with extreme autumn rainfalls, the area, intensity and west ridge point of WPSH in 2021 were especially larger, stronger and more to the west, while the intensity of Indian Burma trough was weaker. The SST in the North Pacific in autumn of 2021 was 3.6 standard deviations higher than the climatic state and the abnormal degree ranked first among years with extreme autumn rainfalls. The abnormal SST caused the extreme autumn rainfall through the abnormal response of WPSH. This study can provide a reference for autumn rainfall prediction in the Yellow River Basin.

**Key words:** extreme autumn rainfall; precipitation; rainy day; atmospheric circulation; sea surface tem-

收稿日期:2022-01-28; 修回日期:2022-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(42171024)

作者简介:刘静(1989-),女,河南濮阳人,硕士,工程师,研究方向为气象预报。

perature (SST) anomaly; standard deviation; the Yellow River Basin

## 1 研究背景

秋季降水多寡对农业生产活动、水库调度和社会经济等具有重要影响,华西地区是我国秋雨最典型的区域<sup>[1]</sup>,主要包含四川、重庆、云南、贵州、甘肃省东部和南部、陕西省中南部、湖北省中西部等地<sup>[2]</sup>,这些区域在秋季常出现影响范围大、持续时间长的连阴雨<sup>[3-4]</sup>,降水量一般多于春季,仅次于夏季<sup>[5]</sup>。秋季是农作物采收和冬小麦播种的季节,长时间的阴雨寡照会影响全年收成和秋播,而且同一地区的持续降水易引发江河洪水、滑坡、山洪、泥石流等灾害,给国民经济和人民生命财产带来重大损失<sup>[6]</sup>。因此,加强华西秋雨异常的诊断分析和机理研究,提高预测水平,可为农作物管理和水资源调度提供科学依据,对防灾减灾具有重要意义。

针对华西秋雨特征及其成因,不少学者开展了研究。蒋竹将等<sup>[7]</sup>认为华西秋雨出现时段以9-10月为主,最早开始时间为8月下旬,最晚结束时间为11月下旬。罗霄等<sup>[3]</sup>提出华西秋雨有南北两个极大值中心,北部中心位于甘肃省南部、陕西省中南部、四川省东北部,南部中心位于四川省南部至云南省中西部。陈凯等<sup>[8]</sup>研究指出华西秋雨存在明显的年代际变化,1964-1998年呈显著下降趋势,1998-2014年呈显著上升趋势。已有的研究对华西地区异常秋雨的环流特征进行了分析,一致认为西太平洋副热带高压、印缅槽、贝加尔湖低槽是影响华西秋雨多寡的主要大气环流因子,当贝加尔湖低槽、印缅槽偏深且副高偏强时,秋雨易偏多,反之秋雨不明显<sup>[9-11]</sup>。同时有研究指出,高空西风急流、西太平洋低值系统、热带大气季节内振荡等对华西秋雨也有重大影响<sup>[12-14]</sup>。针对外强迫因子的影响,许多学者的关注重点主要集中在海温场上,认为赤道中东太平洋、北太平洋和热带印度洋等海温异常对秋雨多寡有重要影响<sup>[15-17]</sup>。

黄河上中游南部地区位于华西秋雨发生区,防范秋汛是黄河流域水旱灾害防御工作的重点之一。2021年黄河流域秋雨较常年异常偏多,造成中下游发生历史罕见秋汛,9月底至10月初黄河干流接连出现3次编号洪水,其中潼关站2次,在3号洪水期间出现1979年以来最大流量 $8\,360\text{ m}^3/\text{s}$ 。下游河段出现长历时、高水位、大流量洪水过程,花园口站流量在 $4\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 左右历时近20 d,小浪底水库达

到投运以来最高水位 $273.5\text{ m}$ <sup>[18]</sup>。此次秋汛造成山西、陕西、河南、山东等4省32市232个县(市、区) $666.8\times 10^4$ 人受灾,因灾死亡失踪41人,农作物受灾面积 $49.86\times 10^4\text{ hm}^2$ ,直接经济损失 $153.4\times 10^8$ 元。2021年黄河流域秋雨为何如此极端?与历史典型秋雨年相比,其气象成因有何特殊性?为寻找答案,本文将在分析此次降水极端特征的基础上,进一步探讨大气环流因子和海温外强迫信号的影响,以为黄河流域秋雨预测提供参考依据。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓约古宗列盆地,干流全长 $5\,464\text{ km}$ ,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等9省(区)。流域总面积 $79.5\times 10^4\text{ km}^2$ ,横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原。各地气候差异明显,东南部基本属半湿润气候,中部属半干旱气候,西北部属干旱气候<sup>[19]</sup>。流域年平均降水量为 $476.1\text{ mm}$ <sup>[20]</sup>,在空间上表现为自东南向西北递减,在时间上表现为冬干春旱、夏秋降水集中。9-10月泾渭河中下游及上游低纬度带时有秋雨发生,降雨强度不大,但持续时间较长,可引发龙门以下特别是泾渭河和伊洛河等黄河中下游的南部出现秋汛洪水。

### 2.2 数据和他方法

本文使用的资料有:(1)NCEP/NCAR提供的逐月高度场再分析资料,分辨率为 $2.5^\circ\times 2.5^\circ$ ,时间为1961年1月-2021年10月;(2)国家气候中心提供的1961-2021年逐月大气环流指数和海温指数资料,包括西太副高指数(面积、强度、脊线位置、西伸脊点)、亚洲纬向环流、印缅槽强度和NINO3.4区海温指数等资料;(3)英国气象局Hadley中心提供的全球海表温度逐月再分析资料,分辨率为 $1.0^\circ\times 1.0^\circ$ ,时间为1960年1月-2021年10月;(4)中国气象局国家气象信息中心提供的1961-2021年黄河流域232个台站逐日降水资料,时段为08:00至08:00,日雨量在 $10.0\text{ mm}$ 以下为小雨, $10.0\sim 24.9\text{ mm}$ 为中雨, $25.0\sim 49.9\text{ mm}$ 为大雨, $50.0\text{ mm}$ 以上为暴雨。文中各要素的气候均值取1981-2010年平均值,秋季定义为9-10月。采用的分析方法包括历史排序法、EOF(empirical orthogonal function)分析、标准化、相关分析等。

### 3 2021年黄河流域秋雨异常特征

#### 3.1 雨量和雨日

2021年黄河流域平均秋雨雨量为253.2 mm,图1(a)和1(b)为2021年黄河流域秋雨雨量及其距平百分率的空间分布。由图1(a)可知,累积雨量高值区主要集中在山陕南部、汾河、“泾渭洛”河、龙三干流和三花区间,其中山陕南部、北洛河局部高达450 mm以上。雨量距平百分率(图1(b))与图1(a)具有相似的分布特征,除流域北部部分地区雨量较常年同期偏少以外,其余地区均偏多,其中山陕南部、三花区间部分地区及汾河、泾渭洛河中下游、龙三干流、黄河下游大部地区偏多2倍以上,山陕南部、汾河局部偏多3倍以上。图1(e)给出了2021年秋雨雨量历史排序的空间分布,全流域共有145个站点的雨量大小位列1961年以来同期前5,占总

站数的62.5%,其中88个站点位列历史同期最多,占总站数的37.9%,且站点的空间分布与累积雨量及其距平的大值区高度一致。由此可见,2021年黄河流域秋雨雨量呈现出显著的极端性。

图1(c)和图1(d)为2021年黄河流域秋雨雨日及其距平百分率的空间分布,图1(c)显示,雨日与雨量(图1(a))具有明显差别,雨日高值区集中于兰州上游南部地区,达32 d以上,而黄河中游大部仅为20~28 d。从雨日距平空间分布上看(图1(d)),兰州上游部分地区及黄河中下游大部地区雨日较常年同期偏多,其中汾河、沁河局部及金堤河大部偏多50%以上。雨日历史排序空间分布见图1(f),由图1(f)可知,全流域仅有11站秋雨雨日多少位列历史同期第4或第5位,且多分布于山陕南部及汾河。可见,2021年黄河流域秋雨雨日的极端性明显弱于秋雨雨量。

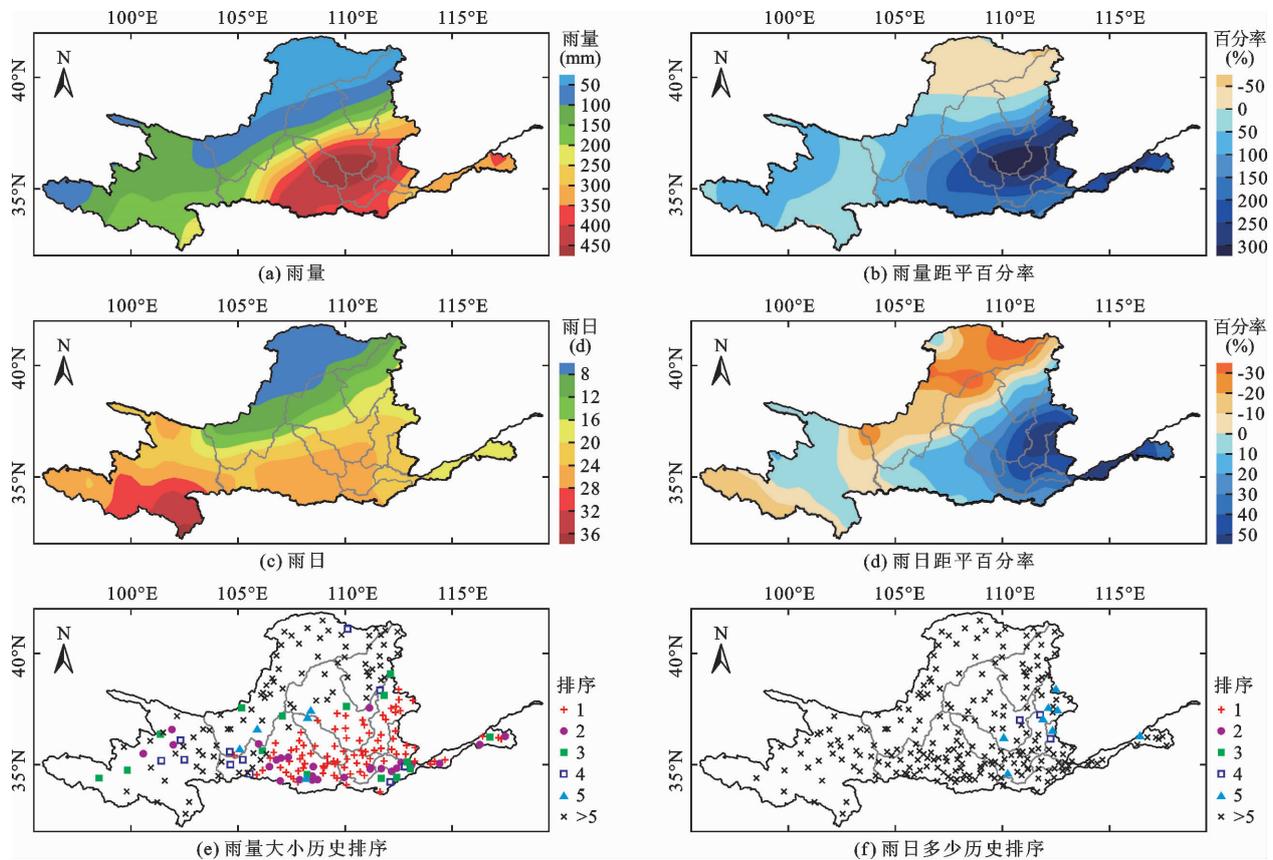


图1 2021年黄河流域秋雨特征值的空间分布

#### 3.2 不同量级降雨的雨量和雨日

2021年黄河流域秋季各量级降雨的雨量和雨日的距平分布图(图略)显示,黄河中下游大部地区各量级降雨的雨量均较常年偏多,中雨及以上量级雨日亦偏多,而小雨雨日除山陕区间、汾河、三花区

间及金堤河部分地区较常年偏多以外,其余地区均偏少;黄河上游仅小雨雨日偏少,而小雨雨量以及小雨和中雨雨日均偏多。

进一步统计2021年黄河流域秋季各站点不同量级降雨的雨量占秋雨总雨量的比例,并与气候均值进

行对比,结果见图 2。由图 2 可知,黄河中下游地区大雨和暴雨对秋雨的贡献较大,其中山陕南部、汾河局部及沁河、黄河下游大部的暴雨雨量占比为 40% ~ 50%,泾、渭河中下游大雨雨量占比为 40% ~ 60%,相比而言,小雨和中雨雨量贡献较小,中雨雨量占比大多在 30% 以下,小雨雨量则大多在 20% 以下。而对于黄河上游大部地区而言,小雨和中雨雨量对秋雨的贡献较大,其中小雨的占比大多在 50% 以上,局部达 70% 以上。与气候均值相比,2021 年大雨和暴雨雨量对黄河中下游秋雨的贡献异常偏大,且尤以暴雨更为突出,而小雨和中雨雨量的贡献异常偏小;黄河上游除兰托区间北部地区以外,中雨雨量贡献异常偏大,小雨雨量贡献异常偏小。

图 3 展示了 2021 年黄河流域秋季不同量级降

雨的雨日占秋雨总雨日的比例以及气候均值的空间分布,可以发现,与雨量不同的是,2021 年黄河中下游小雨雨日对总秋雨日数的贡献远大于中雨及其以上量级的降水雨日,占比大多在 50% ~ 70%,而中雨和暴雨雨日占比大多在 10% ~ 30%,暴雨雨日占比除山陕南部、汾河、沁河及黄河下游部分地区为 10% ~ 20% 以外,其余地区均在 10% 以下。对于黄河上游而言,小雨雨日占比大多在 70% 以上,局部达 90% 以上,中雨雨日占比大多在 10% ~ 30%,大部分站点未出现大雨和暴雨。与气候均值相比,黄河中下游大部分地区小雨雨日的贡献明显偏小,而中雨、大雨和暴雨雨日的贡献明显偏大。同样地,黄河上游大部分地区小雨雨日贡献偏小,而中雨雨日贡献偏大。

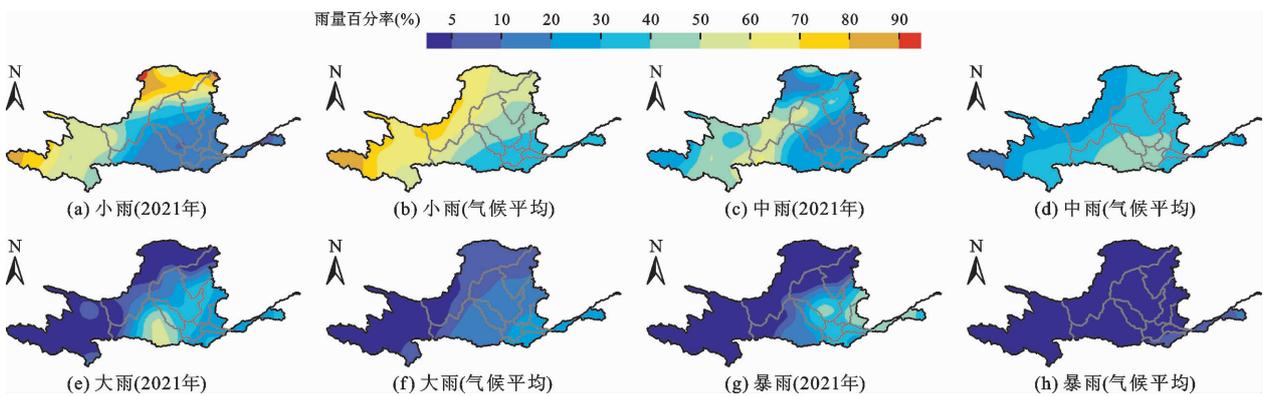


图 2 黄河流域秋季不同量级降雨的雨量占秋雨雨量比例的空间分布

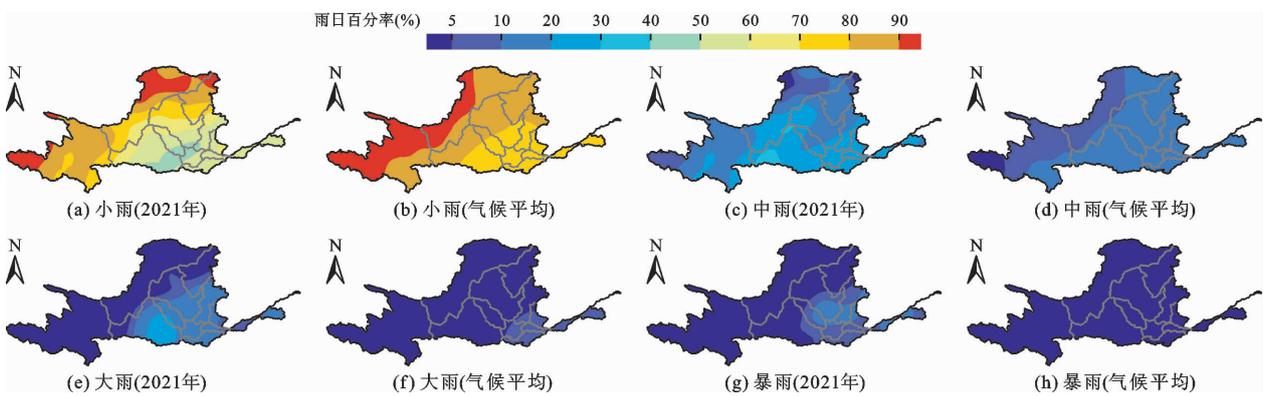


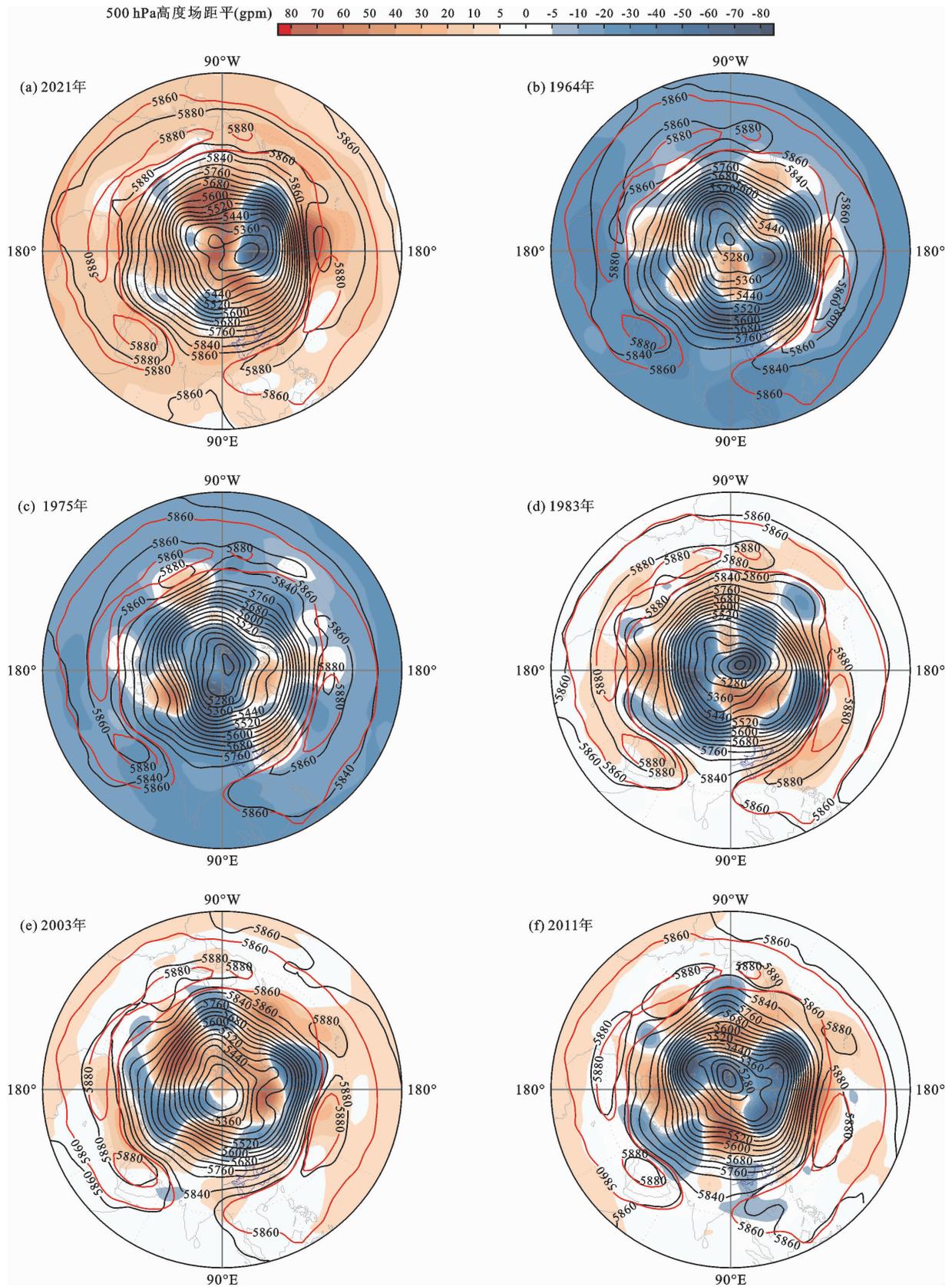
图 3 黄河流域秋季不同量级降雨的雨日占秋雨雨日比例的空间分布

## 4 大气环流异常特征

### 4.1 2021 年秋季环流异常特征

图 4(a) 给出了 2021 年秋季 500 hPa 高度场及其距平分布,由图 4(a) 可知,北极极涡出现偏心结构,中心位于 150°E 附近,略偏向东半球;亚洲中高纬高度距平场呈“东正西负”分布,巴尔喀什湖一带

为负距平区,其东部为正距平区;低纬度为弱的正距平区,西太副高较常年明显偏西,控制江南大部地区,西伸脊点位于 95°E 附近,中心脊线位于 25°N 附近,北界位于 28°N 附近,印缅槽则较常年偏弱。在这种环流形势下,巴尔喀什湖低槽多分裂短波槽东移南下,与副高西北侧西南气流持续交汇于黄河流域南部,易引起秋雨异常偏多。



注:黑色实线为500 hPa高度场,单位为gpm;红色实线代表气候平均的5860和5880 gpm线;阴影为距平分布。

图4 1961-2021年黄河流域秋雨异常偏多年份秋季500 hPa高度场及其距平分布

### 4.2 秋雨异常年大气环流的异同比较

进一步对比分析 2021 年秋季大气环流与其余秋雨异常年的异同,以揭示 2021 年环流异常的极端性。首先利用 EOF 方法挑选黄河流域异常秋雨年,而非采用面平均雨量法,这是因为面平均序列会掩盖区域特征<sup>[21]</sup>。1961–2021 年黄河流域秋雨雨量距平 EOF 分析第一模态的方差贡献高达 64.3%,且其空间分布显示出黄河流域降水一致偏多或偏少的特征,图 5 为第一模态时间系数的标准化序列。由图 5 可知,黄河流域秋雨具有明显的年代际变化特征,20 世纪 70 年代末期以前为多秋雨期,70 年代末期至 90 年代末期秋雨偏少,自 2001 年之后秋雨又进入相对偏多的阶段,且 2021 年异常程度近  $8\sigma$  ( $\sigma$  为标准偏差),呈现出显著的极端性。挑选标准化后的时间系数大于 3 的年份作为异常偏多年,即除 2021 年以外,还有 1964、1975、1983、2003 和 2011 年,并对比分析这 6 年秋季大气环流的异同。

图 4(b)~4(f) 给出了 1964、1975、1983、2003 和 2011 年秋季 500 hPa 高度场及其距平分布,将图 4(a)与图 4(b)~4(f) 进行对比可知,各秋雨异常年

500 hPa 环流场相同的特征是中高纬西风带均为经向型环流,但西风槽的位置具有差异,1964、1975、1983 和 2021 年位于巴尔喀什湖附近,2003 和 2011 年则位于贝加尔湖以东地区。除了西风带环流不同以外,副高和印缅槽也具有明显差别,1964、1975、2011 年副高西伸脊点较常年异常偏东,1983、2003、2021 年则异常偏西;1964、1975 年印缅槽偏强,1983、2003、2011、2021 年则接近或弱于常年。统计各年副高、西风带环流及印缅槽环流指数的标准化序列,结果见表 1。由表 1 可以看出,2021 年副高面积、强度和西伸脊点指数以及印缅槽强度指数均偏离气候态  $(1\sim 2)\sigma$ ,且均为 6 个年份中的最大值或最小值,而副高脊线位置及亚洲纬向环流指数的异常度较小,这表明与其余秋雨异常年相比,2021 年秋季副高面积偏大、强度偏强、西伸脊点偏西,印缅槽强度则偏弱。比较其余 5 个异常年份可知,黄河流域秋雨异常偏多一般发生在亚洲中高纬为经向型环流的背景下,但副高和印缅槽则表现出相反的特征,即当副高异常偏强(弱)偏西(东)时,印缅槽则异常偏弱(强)。

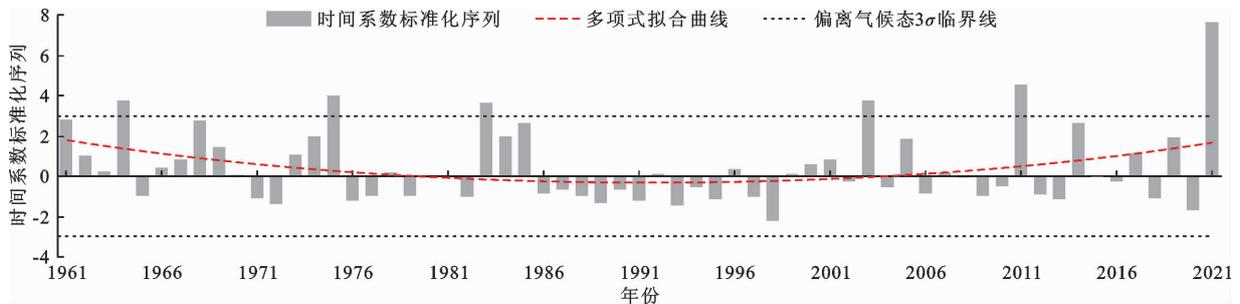


图 5 1961–2021 年黄河流域秋雨雨量距平 EOF 分析第一模态的标准化时间系数序列

表 1 1961–2021 年黄河流域秋雨异常偏多年份秋季标准化大气环流指数

年份	副高面积	副高强度	副高脊线位置	副高西伸脊点	亚洲纬向环流	印缅槽强度
1964	-0.9	-0.7	0.6	1.6	-1.1	-5.1
1975	-1.8	-1.8	0.5	2.6	0.2	-3.8
1983	1.3	1.3	-0.8	-0.4	-1.3	-0.1
2003	1.0	1.0	-0.2	-0.6	-0.8	0.7
2011	0.8	1.1	1.9	0.9	-0.2	-0.4
2021	2.3	2.5	-0.4	-1.2	-0.3	1.4

## 5 海温对 2021 年极端秋雨的影响

海洋热状况异常对我国降水多寡具有显著的影响<sup>[22]</sup>。图 6 为 2021 年秋季海温距平场分布,由图 6 可知,2021 年秋季,赤道中东太平洋海温较常年偏

低  $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ ,北太平洋海温较常年偏高,其中阿留申群岛以南海域偏高  $2^{\circ}\text{C}$  以上。图 7 给出了  $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $30^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$  平均海温距平的经度-时间剖面,图 7 表明,在拉尼娜事件于 2021 年 5 月结束之后,赤道中东太平洋海温维持偏低状态,9–10 月

偏低幅度加大;北太平洋海温前期持续偏高,正距平区于9-10月向西扩张,且偏高幅度明显加大。再分析黄河流域秋雨距平第一模态时间系数与同期海温场的相关性,结果见图8,从图8可以看出,赤道中东太平洋为负相关区,而北太平洋为正相关区,且高相关区与2021年海温距平中心区基本一致。进一步统计时间系数与前期冬季、春季、夏季海温场的相关系数(图略),可以发现,各季节的相关系数分布与秋季相似,但相关程度明显偏弱,因此,下面将

着重分析2021年秋季海温的异常特征及其对黄河流域极端秋雨的影响。

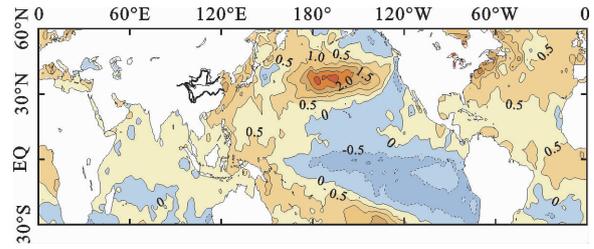


图6 2021年秋季海温距平场分布(单位:°C)

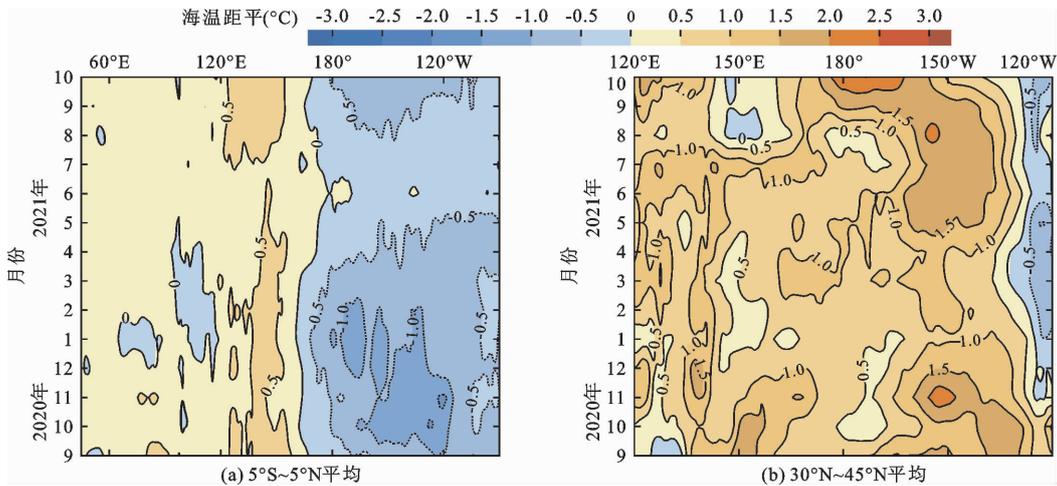
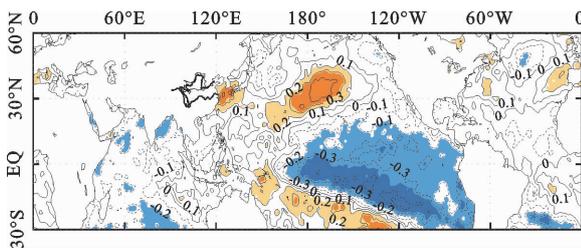


图7 5°S~5°N、30°N~45°N平均海温距平的经度-时间剖面



注:阴影表示通过了0.1、0.01显著性水平检验。

图8 1961-2021年黄河流域秋雨距平第一模态时间系数与同期海温场的相关系数分布

为便于对比分析,将30°N~45°N、170°E~140°W区域内海表温度距平的区域平均值定义为北太平洋海温距平指数( $SST_{NP}$ ),并统计2021年与其余5个秋雨异常年秋季标准化的NINO3.4区(5°S~5°N、150°W~90°W)海温距平指数和 $SST_{NP}$ 指数,结果见表2。由表2可知,除2003年以外,其余秋雨异常年的NINO3.4指数均低于气候态,其中1964和1975年异常度较高,分别偏离气候态 $1.0\sigma$ 和 $1.5\sigma$ ;  $SST_{NP}$ 指数则以2021年异常度最为突出,高于气候态 $3.6\sigma$ ,其次为2011和1964年,均高于气候态 $1\sigma$ 以上。由此可见,2021年北太平洋海温的异常特

征明显强于赤道中东太平洋海温。

表2 黄河流域秋雨异常年秋季标准化NINO3.4指数和 $SST_{NP}$ 指数

指数类型	1964年	1975年	1983年	2003年	2011年	2021年
NINO3.4	-1.0	-1.5	-0.8	0.4	-0.9	-0.7
$SST_{NP}$	1.0	0.0	-0.5	0.1	1.2	3.6

进一步分别统计秋季NINO3.4指数、 $SST_{NP}$ 指数与各环流指数的相关系数,结果见表3。由表3可知,NINO3.4指数与印缅槽强度指数的相关关系明显强于副高各指数,当赤道中东太平洋海温异常偏低(高)时,印缅槽异常偏强(弱),1964和1975年印缅槽均对赤道中东太平洋海温异常偏低作出响应(表1);  $SST_{NP}$ 指数与副高面积、强度、西伸脊点的相关关系明显强于印缅槽,当北太平洋海温异常偏高(低)时,副高面积偏大(小)、强度偏强(弱)、西伸脊点偏西(东),可见,2021年副高的异常特征是对北太平洋海温异常的响应。1964和2011年 $SST_{NP}$ 指数的异常度分别接近和略高于NINO3.4指数,但环流异常均表现为印缅槽对NINO3.4指数的响应,对比2021年可以认为,仅当 $SST_{NP}$ 指数异常

明显强于 NINO3.4 指数时,副高对北太平洋海温异常的响应才更明显。

表3 秋季 NINO3.4 指数、 $SST_{NP}$  指数与环流指数的相关系数

指数类型	副高面积	副高强度	副高脊线位置	副高西伸脊点	印缅槽强度
NINO3.4	-0.01	-0.06	0.02	-0.06	0.41
$SST_{NP}$	0.23	0.26	0.09	-0.16	-0.03

由上可知,2021年秋季北太平洋海温异常偏高,使得副高面积异常偏大、强度异常偏强、西伸脊点异常偏西,从而造成黄河流域极端秋雨的发生。

## 6 讨论

大气环流是影响秋季降水多寡最直接的因素,巴尔喀什湖低槽和西太副高是造成2021年黄河流域极端秋雨的主要影响系统,此结论与李多等<sup>[23]</sup>的研究成果一致。将2021年秋季环流背景同黄河流域其他秋雨异常偏多年进行对比发现,各异常年的环流形势不尽相同,西风槽、西太副高、印缅槽等天气系统呈现出不同的异常特征,这与前人研究结果相符<sup>[24-26]</sup>。本文在对黄河流域异常秋雨年秋季环流特征进行定性分析的基础上,又利用大气环流指数定量讨论环流异常度,经过对比发现,印缅槽和西太副高似有相斥性,即印缅槽异常偏弱有利于副高加强西伸,这一结论与韦晋等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。

海洋热状况的变化持续时间长、空间尺度大,海温可通过大气环流影响秋雨多寡。柳艳菊等<sup>[28]</sup>分析了华西秋雨与全球海温的相关性,结果表明,北半球显著的正、负相关区分别位于北太平洋中纬度地区和赤道东太平洋地区,与本文研究结果相似。本文重点讨论了同期海温场对2021年黄河流域异常秋雨的影响,但前期海温对华西秋雨亦有重要影响,蔡新玲等<sup>[29]</sup>研究指出前期春、夏季赤道中东太平洋冷(暖)海温发展时,有利于陕西秋淋偏强(弱);吴遥等<sup>[30]</sup>认为当夏季热带印度洋出现“西暖东冷”的偶极型模态时,华西南区秋季降水异常偏多。此外,除了海温以外,积雪、海冰、青藏高原冷源等外强迫因子也会影响华西秋雨多寡<sup>[31-33]</sup>,在后续工作中将针对前期海温异常以及其他外强迫因子的影响深入开展研究。

## 7 结论

本文分析了2021年黄河流域秋雨的异常特征,

并与秋雨异常偏多年的环流背景和太平洋海温进行了对比,结论如下:

(1)2021年黄河流域秋雨较常年异常偏多,偏离气候态近 $8\sigma$ ,全流域有62.5%的站点雨量位列1961年以来同期的前5,37.9%的站点位列历史首位,表现出显著的极端性,而雨日的极端性明显弱于雨量。

(2)在黄河中下游地区,2021年大雨和暴雨雨量对秋雨的贡献异常偏大,且以暴雨更为突出,而小雨和中雨雨量的贡献异常偏小;小雨雨日的贡献明显偏小,中雨及以上量级雨日的贡献则明显偏大。黄河上游中雨雨量(雨日)贡献异常偏大,小雨雨量(雨日)贡献异常偏小。

(3)2021年秋季,巴尔喀什湖一带为宽广的低压槽区,西太副高较常年明显偏强偏西,西伸脊点位于 $95^{\circ}E$ 附近;巴尔喀什湖低槽底部多分裂短波槽东移南下,与副高西北侧西南气流持续交汇于黄河流域南部,造成秋雨异常偏多。与其余秋雨异常年相比,2021年副高面积偏大、强度偏强、西伸脊点偏西,印缅槽强度则偏弱。

(4)2021年秋季,北太平洋海温较气候态偏高 $3.6\sigma$ ,异常度位居黄河流域秋雨异常年首位,其通过引起副高的异常响应造成极端秋雨的发生。赤道中东太平洋和北太平洋是影响秋雨多寡的海温关键区,但仅当后者异常程度明显强于前者时,副高的异常响应才更突出。

### 参考文献:

- [1] 李传浩,刘宣飞,李智,等. 华西秋雨区域性极端降水的环流特征[J]. 热带气象学报,2015,31(4):526-535.
- [2] 鲍媛媛,李勇,康志明. 2017年华西极端秋雨的季风环流异常特征及机理[J]. 高原气象,2020,39(3):560-569.
- [3] 罗霄,李栋梁,王慧. 华西秋雨演变的新特征及其对大气环流的响应[J]. 高原气象,2013,32(4):1019-1031.
- [4] 杨利霞,徐钰,彭菊蓉. 汉台区近40年秋雨特点及变化趋势分析[J]. 陕西气象,2020(5):27-30.
- [5] 王国安,李保国,李荣容,等. 从水文与气象相结合的视野新论华西秋雨[J]. 人民黄河,2015,37(8):1-6.
- [6] 杨明珠,陈丽娟. 2020年秋季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象,2021,47(4):499-509.
- [7] 蒋竹将,马振峰,刘佳,等. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J]. 大气科学,2014,38(1):32-44.
- [8] 陈凯,钟霖浩,华丽娟,等. 华西秋雨趋势变化的年代际转折及其成因分析[J]. 气候与环境研究,2020,25(1):90-102.

- [9] 范维,刘松,丁洪亮,等. 2017年汉江上游秋雨成因分析及与相似年比较[J]. 人民长江,2018,49(S2):86-89.
- [10] ZHOU Botao, WANG Zunya. Enlightenment from heavy autumn rain of West China in 2017: synergic role of atmospheric circulation at mid-high latitudes and oceanic background[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(6): 263-274.
- [11] 陈红梅,吕琳玉,李小芳,等. 安康市2017年华西秋雨天气特征及成因分析[J]. 陕西气象,2021(2):32-37.
- [12] 赵佳玉,马振峰,范广洲. 热带大气季节内振荡对华西秋雨的影响[J]. 高原气象,2016,35(6):1487-1497.
- [13] 徐金霞,郭海燕,王钦,等. 华西秋雨的空间分型及其特征分析[J]. 高原山地气象研究,2019,39(1):26-33.
- [14] 徐曼琳,周波涛,程志刚. 2010年以来华西秋季降水年代际增多原因初探[J]. 大气科学学报,2020,43(3):568-576.
- [15] 韩晋平. 北太平洋增暖对我国西北秋雨的影响[J]. 应用气象学报,2014,25(3):257-264.
- [16] 王春学,马振峰,邵鹏程,等. 我国华西秋雨的气候变化规律及其影响因子[J]. 干旱区研究,2015,32(6):1113-1121.
- [17] 刘佳,马振峰,杨淑群,等. 印度洋偶极子和华西秋雨的关系[J]. 高原气象,2015,34(4):950-962.
- [18] 魏向阳,赵龙. 2021年黄河流域水旱灾害防御工作回顾[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(12):16-18+56.
- [19] 胡一三,王春青,赵咸榕,等. 黄河防汛[M]. 郑州:黄河水利出版社,2021.
- [20] 靳莉君,王春青,王鹏,等. 黄河流域极端降水特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):44-48.
- [21] 房一禾,龚强,赵连伟,等. 辽宁省秋季降水对前期海洋和大气信号的遥响应[J]. 气象与环境学报,2016,32(2):37-43.
- [22] 符芳兵,薛联青,任磊. 淮河流域夏季旱涝前兆信号及预测[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):13-20.
- [23] 李多,顾薇. 2021年秋季我国北方地区降水异常偏多的特征及成因分析[J]. 气象,2022,48(4):494-503.
- [24] 王春青,彭梅香,张荣刚,等. 2003年黄河流域汛期天气成因分析[J]. 人民黄河,2004,26(1):17-19.
- [25] 蔡新玲,康岚,孙娴,等. 2011年渭河和汉江上游秋汛期环流特征及暴雨致洪成因[J]. 暴雨灾害,2013,32(2):120-125.
- [26] 惠英,刘晓东,余兴. 2011年秋季影响陕西关中地区强降水的天气系统及水汽收支分析[J]. 干旱气象,2015,33(4):607-615.
- [27] 韦晋,苏志重,蒋艳蓉,等. 夏季印缅槽年际变化及其影响机制探究[C]//中国气象学会. 第33届中国气象学会年会 S2 副热带气象与气象灾害风险. 西安:2016.
- [28] 柳艳菊,孙冷,孙丞虎,等. 2011年秋季华西秋雨异常及成因分析[J]. 气象,2012,38(4):456-463.
- [29] 蔡新玲,李瑜,李茜,等. 1961-2016年陕西秋淋气候变化特征及其与大气环流和海温的关系[J]. 干旱气象,2019,37(2):226-232.
- [30] 吴遥,唐红玉,刘颖,等. 统计降尺度方法在华西南区秋季降水预测中的应用[J]. 气象,2020,46(12):1555-1564.
- [31] 郑然,刘嘉慧敏,王春学,等. 华西南区秋雨异常及其对青藏高原冬季大气冷源的响应[J]. 干旱气象,2021,39(2):225-234.
- [32] 霍飞,江志红,刘征宇. 春夏季青藏高原积雪对中国夏末秋初降水的影响及其可能机制[J]. 大气科学,2014,38(2):352-362.
- [33] ZHOU Botao, XU Manlin, SUN Bo, et al. Possible role of Southern Hemispheric sea ice in the variability of West China autumn rain[J]. Atmospheric Research, 2021, 249: 105329.