

三维视角下基于 CMIP6 气候模式的黄河流域干旱 动态演变预测

王盈盈¹, 许桂平², 袁浩博¹, 冯 凯¹, 李彦彬¹, 黄生志¹, 栗晓玲³, 王 飞¹, 吴海江³

(1. 华北水利水电大学水利学院; 2. 黄河水文勘察测绘局; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院)

摘要:利用 SSP585 情景下的 CMIP6 气象数据驱动黄河流域 VIC 水文模型,基于模拟水文要素计算月尺度综合干旱指数,从三维视角分析了黄河流域未来干旱事件的演变规律。结果表明:SSP585 情景下黄河流域干旱事件的严重程度呈现逐渐增强的趋势,未来时期较严重的干旱事件多集中在甘肃东部、宁夏南部以及陕西西部地区;基于干旱事件三维识别,SSP585 情景下 2021—2070 年黄河流域共识别出 172 场时空连续的干旱事件,其中一场历时 16 月的典型复杂干旱事件(第 138 场)演变过程包括发生、强化、衰减、再强化、峰值、再衰减、消亡 7 个阶段,干旱中心迁移路径大致为东北方向;SSP585 情景下,黄河流域未来季节干旱整体上以向东(东南和东北)迁移为主,春季干旱事件平均迁移距离最短,夏季干旱事件平均迁移距离最长。

关键词:综合干旱; CMIP6; SSP585 情景; 三维视角; 黄河流域

Prediction of drought dynamic evolution in the Yellow River Basin based on CMIP6 climate model from a three-dimensional perspective//Wang Yingying¹, Xu Guiping², Yuan Haobo¹, Feng Kai¹, Li Yanbin¹, Huang Shengzhi¹, Su Xiaoling³, Wang Fei¹, Wu Haijiang³ (1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power; 2. Yellow River Hydrographic Bureau of Surveying and Mapping; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University)

Abstract: This study utilizes CMIP6 meteorological data under the SSP585 scenario to drive the VIC hydrological model in the Yellow River Basin. Based on simulated hydrological elements, the monthly comprehensive drought index is calculated, and the evolution law of future drought events in the Yellow River Basin is analyzed from a three-dimensional perspective. The results show that under the SSP585 scenario, the severity of drought events in the Yellow River Basin shows a progressively intensifying trend, with future severe droughts mostly concentrated in eastern Gansu, southern Ningxia, and western Shaanxi. Based on drought event three-dimensional identification, a total of 172 spatiotemporally continuous drought events were identified in the Yellow River Basin from 2021 to 2070. A detailed analysis of one of the typical complex drought events that lasted for 16 months (the 138th event) shows that its evolution process includes seven stages: occurrence, strengthening, attenuation, re strengthening, peak, re-attenuation, and extinction. The migration path of the drought center is roughly in the northeast direction. Under the SSP585 scenario, future seasonal droughts in the Yellow River Basin are projected to migrate predominantly eastward (southeastward and northeastward), with spring droughts having the shortest average migration distance and summer droughts the longest.

Key words: comprehensive drought; CMIP6; SSP585 scenario; three-dimensional perspective; the Yellow River Basin

据联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告(IPCC6)报道,1951—2012 年全球平均地表气温升高速率为每 10 a 0.12℃,相当于 1880 年以来升温速率的 2 倍^[1-2]。气候变暖加剧了水循环过程,导致干旱等极端气候事件频繁发生,引发作物减产、生态环境恶化等一系列连锁灾害,给水资源的可持

续利用带来了严峻挑战^[3-9]。在此背景下,深入理解干旱事件的时空动态演变规律,并科学预估其在未来气候情景下的可能变化,已成为水文学和气候变化研究领域的核心议题^[10]。干旱的演变本质上是一个时空连续的动态过程,其发生、发展、迁移和消亡都具有复杂的时空特征^[11]。因此,准确地刻画和

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006603, 2024YFC3212900);国家自然科学基金项目(42301024, 52179015);河南省高校科技创新人才计划项目(26HASTIT031);河南省科技攻关项目(242102321114);河南省高校青年骨干教师计划项目

作者简介:王盈盈(1989—),女,讲师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:763773449@qq.com

通信作者:冯凯(1991—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:fengk0121@163.com

预估这一完整的动态过程,不仅是提升干旱监测与预警能力的关键,更是制定前瞻性水资源适应性管理策略、保障区域社会经济可持续发展的科学基础。

干旱预报主要关注短期内的干旱发展趋势,通常基于历史观测资料,采用统计学或机器学习方法。这些方法包括回归分析、神经网络、时间序列分析、概率模型等^[8]。例如,Liu 等^[12]利用 BP 神经网络修正灰色模型以预报降水量;李明等^[13-14]则利用北极涛动(AO)、厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)等大尺度气候因子作为物理依据,为季节性干旱预报提供信息。此外,支持向量机、自回归滑动平均模型(ARIMA)、马尔科夫链等方法也被广泛应用于基于干旱指数序列的短期预报研究,旨在预测未来数月内干旱状态的演变概率^[15-18]。与短期预报不同,未来干旱情景预估旨在评估长期气候变化背景下的干旱风险,其主要工具是全球气候模式(GCMs)^[19-21],国际耦合模式比较计划(如CMIP5、CMIP6)为这类研究提供了关键的数据支持。已有大量学者基于CMIP 的模式输出,对未来气候情景下的干旱特征进行了评估。例如,杨肖丽等^[22]基于CMIP5 数据,利用标准降水指数(SPI)评估了黄河流域未来的气象干旱趋势;莫兴国等^[23]采用帕尔默干旱强度指数(PDSI)分析了21 世纪我国干旱事件的时空变化。近年来,通过耦合GCMs 和水文模型来分析气候变化对水文过程的影响已成为研究热点。例如,王天等^[24]利用CMIP6 分析了珠江流域未来的气象干旱时空特征;Gumus 等^[25]基于CMIP6 评估了摩洛哥的未来干旱风险。

目前,使用干旱指数对未来干旱情景预估的研究中,对潜在蒸散发(PET)的估算未能考虑大气CO₂ 浓度变化的动态影响^[26]。传统的PET 计算方法(如Penman-Monteith 模型)假设冠层阻力是恒定的,但这在高CO₂ 浓度的未来情景下是不成立的^[27]。已有研究证实,CO₂ 浓度升高将导致植物气孔部分关闭,从而显著改变冠层阻力,若忽略此效应会系统性地高估未来干旱的严重程度^[28]。回顾现有基于CMIP6 和水文模型的研究,其分析方法大多

仍侧重评估干旱的频率、强度等统计特征,本质上是从一维(时间序列)或二维(空间分布)的静态视角进行分析^[4,29-31]。干旱的演变是一个三维(经度-纬度-时间)时空连续体,难以通过传统方法进行有效刻画^[32-33]。因此,为了更准确地刻画黄河流域未来干旱,本文拟构建整合降水、径流和土壤水等多个变量的综合干旱指数,从三维(经度-纬度-时间)视角出发,揭示黄河流域未来干旱事件的整体动态演变规律,以期模拟干旱发生、发展、迁移和消亡的完整动态过程。

1 研究区概况与数据信息

1.1 研究区概况

黄河干流全长5 464 km,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9 个省区,于山东境内垦利县注入渤海。黄河流域地理范围为32°N~42°N、96°E~119°E,全程落差4 480 m,流域面积约为79.5 万km²(其中包含内流区约4.2 万km²),占全国国土总面积的8%,流域概况如图1 所示。黄河流域多年平均降水量为200~650 mm,降水量空间分布大致呈自东南向西北递减的趋势,多年平均气温为-4~14℃,总体趋势表现为南部高于北部、东部高于西部^[20,34-35]。

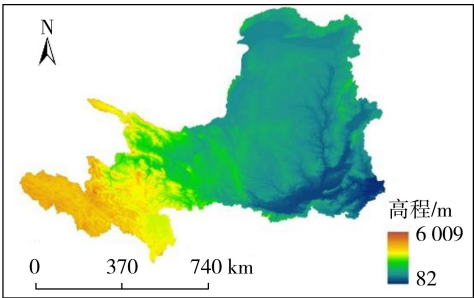


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据信息

本文使用的数据主要包括气象、地形、土壤、植被以及GCMs 数据,详细信息见表1、表2。

表1 数据集信息

Table 1 Dataset information

数据类型	来源	主要参数	空间分辨率	时间段
CN05.1 格点化数据集	国家气候信息中心	日最高/最低气温、日降水量、日平均风速	0.25°×0.25°	1961—2014 年
数字高程模型	地理空间数据云	高程	90 m	
MIROC6	寒区旱区科学数据中心	土壤质地、厚度等	1 km	
全球土地覆被数据	马里兰大学	土地覆盖类型	1 km	
CMIP6 全球气候模式	ESGF (Earth System Grid Federation)	降水量、最高气温、最低气温、风速、辐射、CO ₂ 浓度	因模式而异	2015—2070 年

表 2 GCMs 基本信息
Table 2 Basic information of GCMs

模式名称	所属国家、研究中心	分辨率(经向×纬向)
MRI-ESM2-0	德国普朗克气象研究所	1.125°×1.125°
MPI-ESMI-2LR	德国普朗克气象研究所	1.92°×0.96°
MIROC6	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所	1.4°×1.4°
Can ESM5	加拿大气候模拟与分析中心	2.8°×2.8°
BCC-CSM2-MR	中国气象局国家气候中心	3.2°×1.6°
ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	1.92°×1.45°

2 研究方法

2.1 综合干旱指数

利用月尺度气象、水文数据,考虑 CO₂ 的影响,基于 Copula 函数联合降水、径流、土壤水、蒸散发等要素构建月尺度综合干旱指数,具体步骤为:

步骤 1 确定要素边缘分布。获取降水量 P 、径流量 R 、土壤水 S_M 、考虑 CO₂ 的蒸散发 E_{pc} 4 个要素指标的数据序列。其中,径流量和土壤水数据通过构建的黄河流域 VIC 水文模型模拟得到, E_{pc} 的计算方法详见文献[36]。进而采用参数法确定各指标的最优边缘概率分布。

步骤 2 基于 Copula 函数构建联合分布函数计算联合累积概率。Copula 函数可以对任意类型的边缘分布进行联合,转换过程不会产生信息失真,可以解决多变量之间复杂的非线性关系^[37]。设 X 、 Y 、 Z 、 K 分别代表降水量、径流量、土壤水、蒸散发,对应的单变量累积概率分布函数分别为 $F(X)$ 、 $F(Y)$ 、 $F(Z)$ 、 $F(K)$,则其联合分布可表示为:

$$P(X \leq x, Y \leq y, Z \leq z, K \leq k) = C[F(X), F(Y), F(Z), F(K)] \quad (1)$$

式中: $P(\cdot)$ 为联合累积概率函数; x 、 y 、 z 、 k 为变量的阈值; $C(\cdot)$ 为优选出的 Copula 函数。

步骤 3 基于标准正态化转换计算综合干旱指数。按照标准化指数的等概率转换方法,将联合累积概率 P 转化为服从标准正态分布的综合干旱指数 I_{MSD} ,计算公式为:

$$I_{MSD} = \alpha^{-1}(P) \quad (2)$$

式中: $\alpha(\cdot)$ 为标准正态分布函数。参考 SPI 指数的等级划分标准^[38],根据 I_{MSD} 划分干旱等级:无旱、轻微干旱、中等干旱、严重干旱、极端干旱对应的 I_{MSD} 范围分别为 >-0.5 、 $>-1.0 \sim -0.5$ 、 $>-1.5 \sim -1.0$ 、 $>-2.0 \sim -1.5$ 、 ≤ -2.0 。

2.2 干旱事件三维识别方法

干旱演变是在时间和空间上的连续事件,本文基于综合干旱指数的经度-纬度-时间三维矩阵,对干旱事件进行识别提取,包括干旱斑块识别和干旱

斑块时程连接两个部分。

a. 干旱斑块空间识别。采用阈值法进行干旱斑块空间识别:①对于综合干旱指数二维矩阵中的栅格,给定一个阈值(本文取-1.0),对综合干旱指数小于阈值的栅格进行标记;②利用九宫格滤波对标记栅格空间上相邻的栅格进行搜寻,根据搜索结果进行栅格类别划分,即标记栅格周围识别出的干旱栅格属于同一场干旱事件,进行合并,构成一个干旱斑块;③如果标记栅格的周围搜索不到其他干旱栅格,则标记一个新的编号用于创建下一个干旱斑块,遍历所有栅格,直到识别不到新的干旱栅格为止;④按照上述方法逐月搜索,得到不同时间维度上多个面积不同的干旱斑块,分别对其进行编号。实际应用中,干旱面积大且持续时间长的干旱事件更受到关注,因此预先给定最小干旱斑块面积阈值 A ,若干旱斑块面积大于 A ,判定构成一次干旱事件(如图 2 中 A_1 和 A_2),若干旱斑块面积小于 A ,将该干旱斑块忽略(如图 2 中 A_3 和 A_8)。

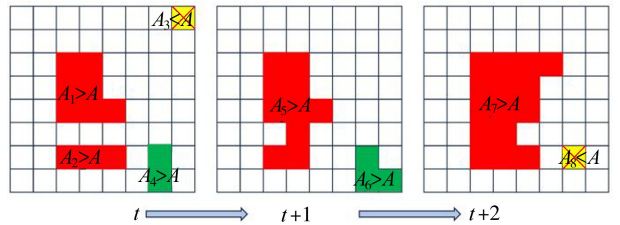


图 2 干旱斑块识别示意图

Fig. 2 Schematic diagram of drought patch identification

b. 干旱斑块时程连接。基于逐月的干旱斑块识别,判断干旱斑块之间的时间联系,是否构成一次连续的干旱事件:①若 t 时刻某一干旱斑块 A_t 与 $t+1$ 时刻任意干旱斑块 A_{t+1} 的重合面积 $A^* > A$,表明 A_t 和 A_{t+1} 在时间上是连续的,隶属于同一场干旱事件(如图 3 中 A_1 和 A_5);②若 $A^* < A$,表明 A_t 和 A_{t+1} 不属于同一场干旱事件(如图 3 中 A_6 和 A_8);③按照时间顺序遍历所有干旱斑块,依次判断相邻两时刻任何一对干旱斑块间的重合面积,直到 $A^* < A$,判定此次干旱事件结束,对属于同一场干旱事件的干旱斑块进行整合并重新编号;④重复上述步骤,将经纬

度层面的干旱斑块在时程上连接,形成干旱事件三维连续体,从而获取多场三维干旱事件。

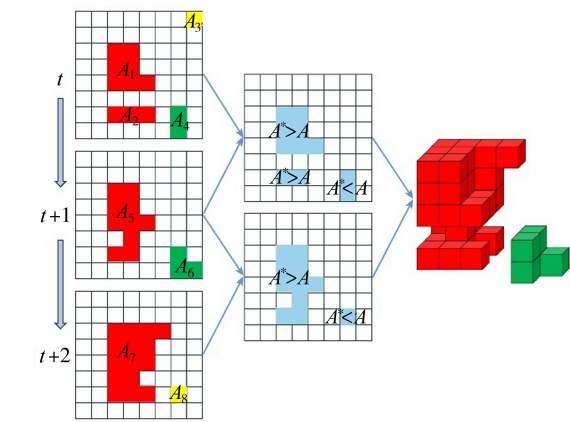


图 3 干旱斑块时程连接示意图

Fig. 3 Temporal connection diagram of drought patches

图 4 为干旱事件三维连续体及特征变量示意图。本文采用干旱历时 D 、干旱面积 A_D 、干旱烈度 S 、干旱中心 C 、干旱迁移距离 L_M 和干旱迁移方向 O_M 等特征变量反映干旱事件时空连续动态演变过程。干旱历时为干旱事件的持续时间,即三维连续体的高度。干旱面积为三维连续体在二维地理坐标平面上的垂直投影面积。干旱烈度表征干旱事件的缺水程度,即三维连续体所有栅格体积之和。干旱中心指干旱事件的核心位置,包括两个层面:时空中心为三维连续体的质心,用以宏观表征干旱事件的时空位置;地理中心为特定月份的二维干旱斑块质心,是一个动态变化的点,用以追踪事件的逐月演变。干旱迁移距离为相邻两月地理中心的迁移距离,可通过经纬度坐标换算得到,干旱事件的总迁移距离为逐月干旱迁移距离之和。利用第一个和最后一个干旱斑块的质心分别确定干旱事件的初始和结束位置,由开始和结束的相对位置来判断干旱事件的迁移方向,如图 5 所示(图中原点代表干旱事件

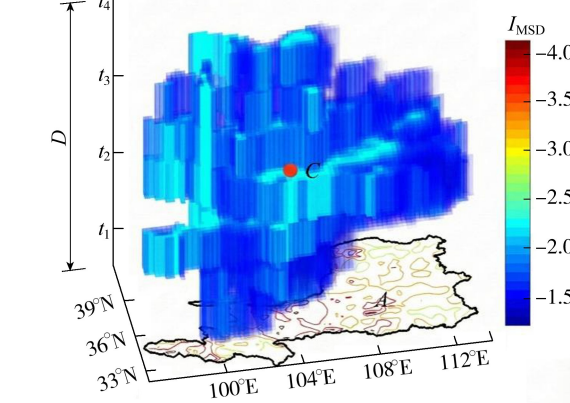


图 4 干旱事件三维连续体及特征变量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three-dimensional continuum and characteristic variables of drought events

开始位置, r 点代表干旱事件结束位置, θ 为干旱开始、结束位置连线与横轴正方向的夹角)。基于 θ 确定干旱迁移方向,分为 E、NE、N、NW、W、SW、S、SE 8 个方向,如图 5 所示。

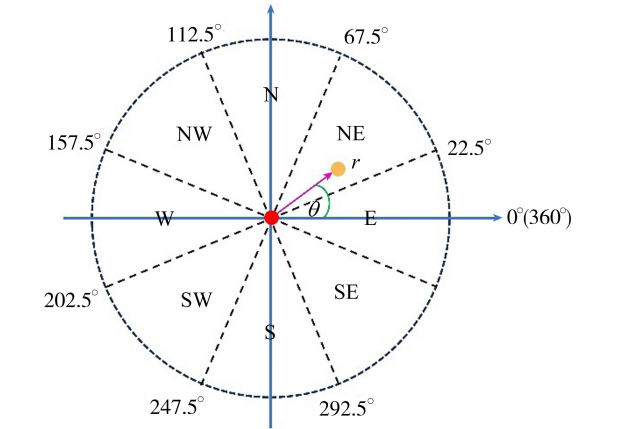


图 5 干旱迁移方向示意图

Fig. 5 Schematic diagram of drought migration orientation

3 结果与分析

3.1 黄河流域干旱事件识别结果

为确保干旱事件识别的可靠性,首先对 VIC 水文模型在黄河流域的模拟性能进行了评估。在 1991—2005 年(率定期)与 2006—2010 年(验证期),模型在唐乃亥等 6 个关键水文站均表现出色,所有站点的纳什效率系数(NSE)和决定系数(R^2)分别在 0.80 和 0.90 以上,相对误差(R_E)均在 $\pm 10\%$ 以内。结果表明本文构建的 VIC 水文模型能够高精度地模拟黄河流域的径流过程和水量平衡,为分析未来气候情景下的干旱动态演变提供了可靠的基础。

基于三维识别方法,计算 2021—2070 年黄河流域综合干旱指数,在 SSP585 情景下识别出了 172 场干旱事件,占研究时段总月数的 28.67%,其中干旱历时为 2 月及以上的干旱事件有 81 场。根据干旱烈度排序,表 3 为 2021—2070 年黄河流域严重程度前 10 场干旱事件及其特征变量,表中干旱事件编号按照识别的时间顺序确定。由表 3 可见,SSP585 情景下严重程度前 10 场干旱事件的历时均超过 10 月,干旱面积均超过流域面积的 87%。最严重的第 156 场干旱事件发生在 2060 年 10 月至 2062 年 4 月,干旱烈度为 1 855 月·万 km^2 ,干旱历时为 19 月,干旱面积为 75.5 万 km^2 ,约占黄河流域总面积的 94.8%,总的迁移距离为 1 394.3 km,平均迁移速度为 73.38 km/月,向东迁移。排在第 2 的第 119 场干旱事件的干旱烈度为 1 304 月·万 km^2 ,干旱历时长达 20 月,干旱面积为 75.2 万 km^2 ,约占黄

表 3 SSP585 情景下黄河流域识别出的严重程度前 10 场干旱事件

Table 3 Top 10 drought events of severity identified in the Yellow River Basin under SSP585 scenario

干旱事件编号	开始时间	结束时间	历时/月	干旱中心		干旱面积/ 万 km ²	干旱烈度/ (月·万 km ²)	迁移距离/km	迁移方向
				经度/(°)	纬度/(°)				
156	2060-10	2062-04	19	106.90	37.15	75.5	1855	1394.30	E
119	2045-11	2047-06	20	105.57	36.60	75.2	1304	2690.14	SE
142	2056-04	2057-09	18	106.19	35.97	74.5	1237	2080.81	E
151	2058-11	2060-05	19	106.96	36.62	75.0	1143	2566.20	NE
165	2066-01	2067-07	19	104.79	36.47	73.2	1126	2589.36	N
171	2069-06	2070-12	19	106.72	36.09	75.5	1114	1737.10	N
138	2054-07	2055-10	16	106.31	36.48	74.3	1105	2103.57	NE
168	2067-05	2068-08	16	107.23	37.09	74.8	1030	1804.66	SE
122	2047-08	2048-11	16	106.92	37.26	75.4	1009	1959.91	SE
19	2026-01	2026-11	11	106.84	36.85	75.5	864	1540.18	N

河流域总面积的 94.5%，总的迁移距离为 2690.14 km，以 134.51 km/月的平均速率向东迁移。其余场次的干旱事件历时也较长（平均大于 11 月），干旱的影响范围较大，严重程度较高，表明黄河流域未来时期将处于一种连旱的状态。

表 4 为 SSP585 情景下黄河流域不同年代干旱事件统计结果（表中 2020 s~2060 s 分别表示 20 世纪 20~60 年代）。由表 4 可见，SSP585 情景下，2060 s 干旱事件最少，但干旱事件特征变量的年代平均值均最大，干旱历时超过 2 月和干旱面积占比超过 50% 的干旱事件占比分别为 62.5% 和 37.5%，在各年代中分别排第一和第二，说明 2060 s 为黄河流域未来干旱最严重的年代。其余年代干旱严重程度依次为 2050 s、2040 s、2030 s、2020 s。结合表 3，未来黄河流域最严重的前 10 场干旱事件中，2020 s 有 1 场，2040 s 有 2 场，2050 s 有 3 场，2060 s 有 4 场，并且最严重的第 156 场干旱事件发生在 2060 s。整体来看，SSP585 情景下未来黄河流域干旱事件的严重程度呈现逐渐增强的趋势。

图 6 为 SSP585 情景下黄河流域干旱事件特征变量变化（图中柱子宽度表征干旱历时）。由图 6 可见，SSP585 情景下未来初期（2021—2040 年）和未来中期（2041—2070 年）发生干旱的频次分别为 4.7、2.63 次/a，平均烈度分别为 92、223 月·万 km²，干旱面积分别为 19.3 万、28.2 万 km²，发生长历时（>10 月）的干旱事件分别为 2、11 次。未来初期虽

然干旱事件影响面积较大，但干旱历时、烈度均较小，且干旱烈度和面积均呈减小的趋势，说明 SSP585 情景下未来初期黄河流域不会发生较为严重的干旱事件。而未来中期干旱历时、烈度和面积均呈增加的趋势，且严重干旱事件和轻微干旱事件呈现交替发生的状态。

3.2 黄河流域干旱事件时空动态演变

图 7 为 SSP585 情景下黄河流域不同年代干旱事件特征变量的空间分布（图中圆圈大小表征干旱面积）。由图 7 可见，干旱烈度范围为 3~1855 月·万 km²。2020 s 小规模干旱事件主要分布在青海和内蒙古地区，高烈度、大面积的干旱事件分布在甘肃与宁夏的交界处、甘肃和陕西西部地区；2030 s 干旱事件呈增加的趋势，高烈度、大面积的大规模干旱事件向东发生了转移，主要分布在陕西东部地区以及甘肃、宁夏与陕西三省交界处；2040 s 和 2050 s 干旱事件呈减少的趋势，高烈度、大面积的干旱事件均集中分布在宁夏南部和陕西西部地区；2060 s 干旱事件持续减少，尤其是低强度、小面积的小规模干旱事件，其中高烈度、大面积的干旱集群空间分布位置与 2050 s 类似。

图 8 为第 138 场干旱事件的动态演变过程（图中干旱强度为干旱烈度与干旱历时、干旱面积的比值）。由图 8 可见：①本场干旱事件于 2054 年 7 月起源于青海，干旱中心位于海西蒙古族藏族自治州北部，干旱面积约为 5.2 万 km²，仅占黄河流域总面

表 4 SSP585 情景下黄河流域不同年代干旱事件统计结果

Table 4 Statistics results of droughts for different decades in the Yellow River Basin under SSP585 scenario

年代	干旱事件数	干旱历时/月			干旱面积/万 km ²				干旱烈度/(月·万 km ²)				迁移距离/km		
		均值	最大值	标准差	均值	最大值	最小值	标准差	均值	最大值	最小值	标准差	均值	最大值	标准差
2020 s	42	2.57	11	2.75	18.3	75.5	2.4	23.3	102	864	3	209	202.02	1856.42	425.96
2030 s	51	2.71	12	2.55	20.1	72.0	2.5	21.7	84	438	4	124	216.88	1320.41	339.95
2040 s	35	4.34	20	4.83	25.1	75.54	2.6	24.1	171	1304	3	297	397.58	2690.14	637.78
2050 s	28	4.54	19	6.02	29.0	75.5	2.5	29.7	261	1855	4	478	451.03	2566.20	753.56
2060 s	16	5.31	19	6.63	33.4	75.5	2.9	31.1	299	1126	4	437	535.15	2589.36	832.69

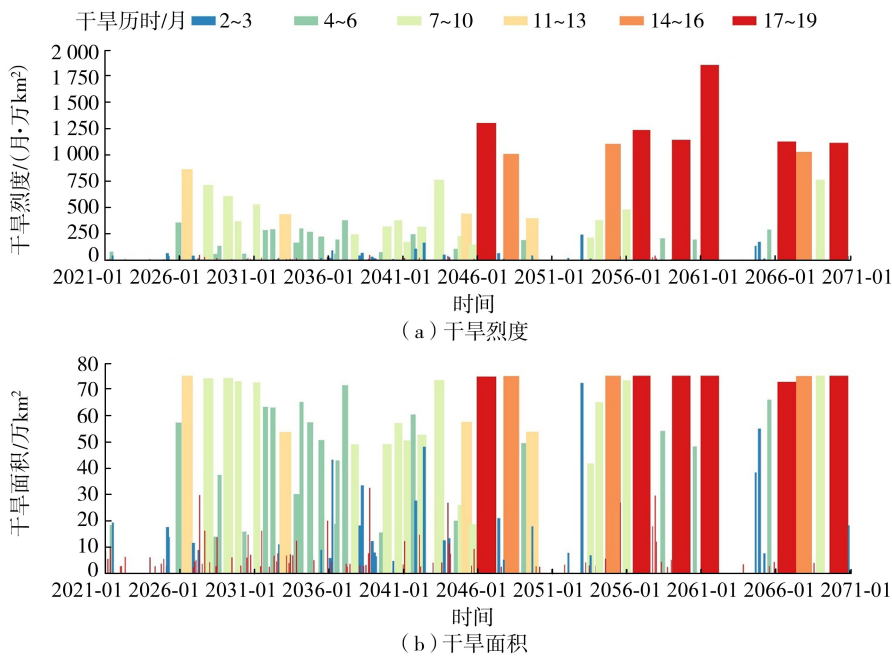


图 6 SSP585 情景下黄河流域干旱事件特征变量变化

Fig. 6 Changes in characteristic variables of drought events in the Yellow River Basin under SSP585 scenario

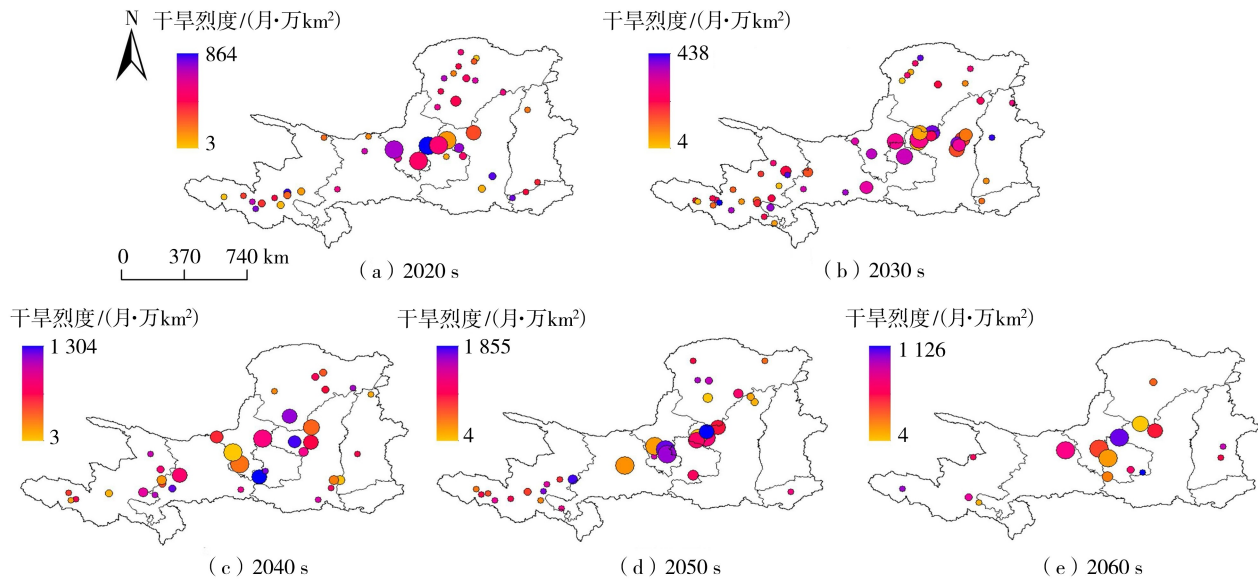


图 7 SSP585 情景下黄河流域干旱事件特征变量的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of characteristic variables of drought events in the Yellow River Basin under SSP585 scenario

积的 6.54%, 干旱烈度为 8 月 · 万 km²; ②8 月干旱面积和烈度处于上升阶段, 干旱中心向东南方向迁移 89.26 km 至玉树藏族自治州东北部; ③9 月干旱迅速向流域东部蔓延, 干旱面积为 32 万 km², 干旱烈度为 55 月 · 万 km², 干旱中心迁移至甘肃省天水市北部; ④10 月干旱继续向北发展, 干旱烈度为 87 月 · 万 km², 呈增加趋势, 干旱中心位于甘肃省平凉市西部; ⑤11 月干旱面积继续向东、向北扩大, 干旱面积为 53.5 万 km², 干旱烈度为 100 月 · 万 km², 持续增强, 干旱中心向东北方向迁移至甘肃省庆阳市西北部; ⑥12 月干旱面积为

60.9 万 km², 覆盖黄河流域 76% 以上区域, 干旱烈度为 110 月 · 万 km², 面积与烈度达到第一个峰值, 干旱中心位于庆阳市东北部; ⑦2055 年 1—2 月干旱出现衰减, 干旱面积占比为 45%~53%, 平均干旱烈度为 68 月 · 万 km², 干旱中心分布在内蒙古阿拉善盟南部; ⑧3 月干旱面积和烈度呈增加趋势, 干旱面积为 52 万 km², 干旱烈度为 102 月 · 万 km², 干旱中心以 185.72 km/月的速度向西南方向迁移至陕西省榆林市西部; ⑨4 月干旱面积继续向西扩大, 干旱烈度为 126 月 · 万 km², 持续增强, 干旱中心位于榆林市和庆阳市的交界处; ⑩5 月干旱面积为

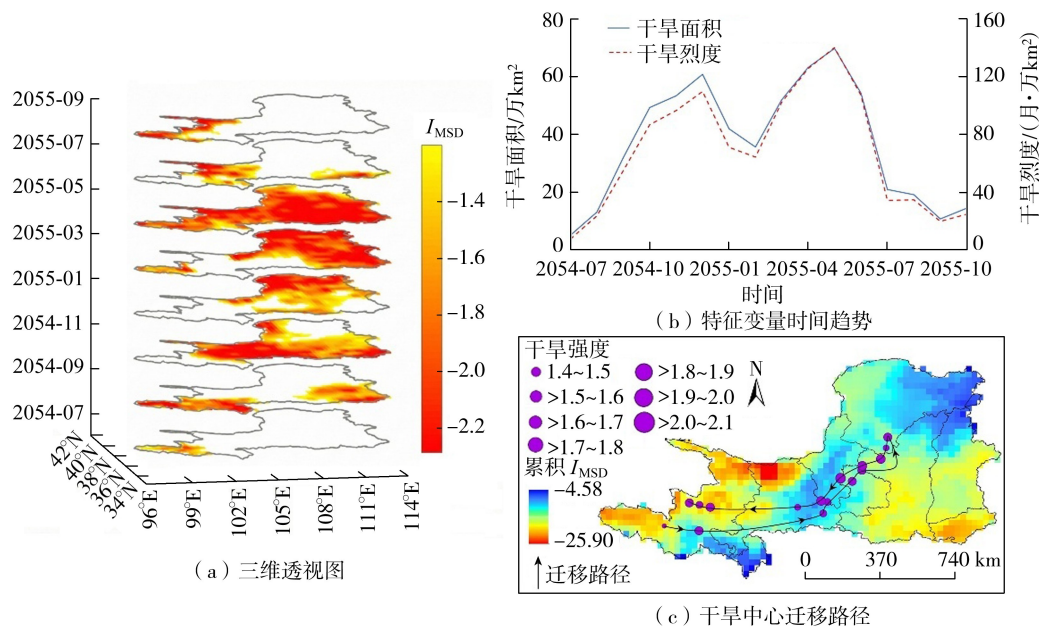


图 8 第 138 场干旱事件动态演变过程

Fig. 8 Dynamic evolution process of No. 138 drought event

69.9 万 km^2 , 覆盖研究区 87% 以上区域, 干旱烈度为 140 月 $\cdot$ 万 km^2 , 面积与烈度达到第二个峰值, 是本场干旱事件最严重的状态, 干旱中心向西迁移至宁夏吴忠市与甘肃省酒泉市交界处; ⑪6 月干旱事件呈现出衰减趋势, 干旱面积为 54.4 万 km^2 , 干旱烈度为 107 月 $\cdot$ 万 km^2 , 干旱中心以 175.86 $\text{km}/\text{月}$ 的速率向西南方向迁移至宁夏固原市与甘肃平凉市交界处; ⑫7 月干旱继续衰减, 干旱中心以 378.97 $\text{km}/\text{月}$ 的速率向西迁移至甘肃省定西市中部; ⑬8—10 月干旱事件呈现波动衰减趋势并逐渐消亡, 平均干旱面积为 14.8 万 km^2 , 平均干旱烈度为 26 月 $\cdot$ 万 km^2 , 干旱中心向流域西北方向迁移至青海省海西蒙古族藏族自治州北部。综上所述, SSP585 情景下第 138 场干旱事件从 2054 年 7 月至 2055 年 10 月, 干旱历时为 16 月, 其演变过程经历了发生、强化、衰减、再强化、峰值、再衰减、消亡 7 个过程, 整体上干旱中心迁移路径大致为青海西北部—甘肃东部—内蒙古西南部—陕西西部—宁夏南部—甘肃东部—青海西北部。

3.3 黄河流域干旱事件发展规律

为进一步探究不同季节始发的干旱事件的空间发展规律, 基于干旱烈度进行了季节性累加分析。具体而言, 首先, 基于干旱事件的三维识别结果, 将所有干旱事件按起始月份归入春、夏、秋、冬四季; 其次, 计算各季节内所有始发的干旱事件在其整个历时内的总烈度 (即每个栅格综合干旱指数的累积值); 最后, 将其在空间上进行叠加, 旨在揭示特定

季节始发的干旱事件影响的重灾区或活跃区。图 9 为 SSP585 情景下黄河流域各季节始发的干旱事件的发展特征, 图中黑色实线箭头表示迁移方向, 箭头长度表示平均迁移距离。由图 9 可见, 春、夏、秋、冬四季发生的干旱事件迁移方向和总烈度在空间格局上存在显著差异。春季始发的较严重的干旱事件主要在青海中南部、陕西南部以及河南地区, 青海中南部、陕西南部地区为春季始发干旱事件的活跃区, 向东迁移的干旱事件占比 93%, 其中位于青海中南部地区的干旱事件发展轨迹以向东迁移为主, 迁移距离较短, 甘肃东部和陕西地区的干旱事件均向东北迁移, 迁移距离较长。夏季始发的干旱事件有所减少, 干旱严重区域主要集中在青海西南部、宁夏北部、内蒙古、陕西北部 and 南部、山西北部以及河南地区, 由于干旱事件分布广泛且迁移方向复杂, 主导的发展路径较难跟踪。秋季始发的干旱事件呈增加的趋势, 严重干旱事件主要集中在青海中东部以及甘肃西南部地区, 这些地区同时也是干旱事件的活跃区, 向东南方向迁移的干旱事件占比高达 71%, 宁夏以东的区域干旱事件均向东北方向迁移。冬季始发的干旱事件呈减少趋势, 多发生在青海和内蒙古北部, 没有明显的迁移路径和方向。综上所述, SSP585 情景下, 黄河流域未来的季节干旱整体上以向东 (东南和东北) 迁移为主, 春季干旱事件平均迁移距离最短, 夏季干旱事件平均迁移距离最长, 这主要由气候条件的地域性差异造成, 黄河流域地势西高东低, 降水量总体分布趋势由西北向东南逐渐递增, 而平均气温总体表现出由西北向东南增加的趋势。

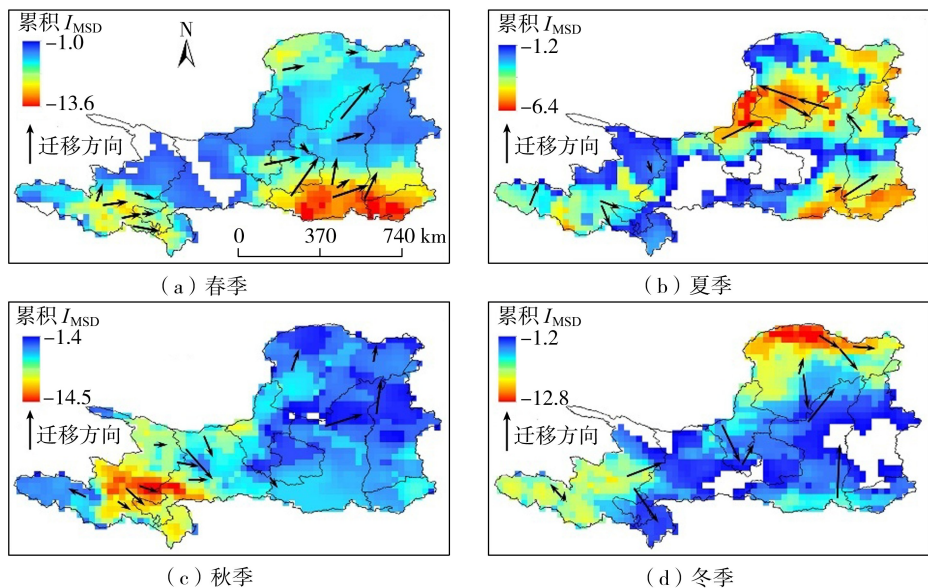


图9 SSP585 情景下黄河流域不同季节始发的干旱事件发展特征

Fig. 9 Development characteristics of drought events originating in different seasons in the Yellow River Basin under SSP585 scenario

4 结 论

a. 基于干旱三维识别方法, SSP585 情景下黄河流域 2021—2070 年共识别出 172 场时空连续的干旱事件。其中最典型的第 138 场干旱事件从 2054 年 7 月至 2055 年 10 月, 干旱历时 16 月, 其演变过程经历了发生、强化、衰减、再强化、峰值、再衰减、消亡 7 个阶段, 干旱中心的迁移路径为青海西北部—甘肃东部—内蒙古西南部—陕西西部—宁夏南部—甘肃东部—青海西北部。

b. SSP585 情景下黄河流域未来初期(2021—2040 年)干旱事件严重程度呈减弱的趋势, 未来中期(2041—2070 年)干旱事件严重程度呈增加的趋势, 整体上呈向干旱历时、面积和迁移距离逐渐增大、干旱烈度逐渐增强的趋势发展; 未来时期较严重的干旱事件大都集中在甘肃东部、宁夏南部以及陕西西部地区。

c. SSP585 情景下, 黄河流域未来季节性干旱的迁移方向表现出明显规律, 整体上以向东(包括东北和东南)移动为主。不同季节的干旱事件迁移距离存在差异, 其中春季干旱的平均迁移距离最短, 夏季干旱的平均迁移距离最长。

参考文献:

[1] 高启慧, 秦圆圆, 梁媚聪, 等. IPCC 第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议[J]. 环境保护, 2023, 51(增刊 2): 82-84. (Gao Qihui, Qin Yuanyuan, Liang Meicong, et al. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 synthesis report [J].

Environmental Protection, 2023, 51 (Sup2): 82-84. (in Chinese))

[2] 翟盘茂, 周佰铨, 陈阳, 等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 629-635. (Zhai Panmao, Zhou Baiquan, Chen Yang, et al. Several new understandings in the climate change science [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 629-635. (in Chinese))

[3] 董蓉蓉, 栗晓玲, 屈艳萍, 等. 2022 年长江流域不同类型干旱时空响应关系[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 61-70. (Dong Rongrong, Su Xiaoling, Qu Yanping, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 61-70. (in Chinese))

[4] 张丹, 梁瀚续, 何小聪, 等. 基于 CMIP6 的金沙江流域径流及水文干旱预估[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 53-62. (Zhang Dan, Liang Hanxu, He Xiacong, et al. Estimation of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 53-62. (in Chinese))

[5] 徐征光, 丁海伦, 吴志勇, 等. 不同气候区气象干旱向农业干旱动态传播规律及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 144-152. (Xu Zhengguang, Ding Hailun, Wu Zhiyong, et al. Analysis of dynamic propagation patterns and influencing factors from meteorological drought to agricultural drought in different climatic regions [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 144-152. (in Chinese))

[6] 孟长青, 董子娇, 刘柯莹, 等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4):

- 23-30. (Meng Changqing, Dong Zijiao, Liu Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 23-30. (in Chinese))
- [7] 瞿德业, 杨明月, 刘婷婷, 等. 基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(5): 32-40. (Qu Deyue, Yang Mingyue, Liu Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(5): 32-40. (in Chinese))
- [8] Sutanto S J, Vitolo C, Di Napoli C, et al. Heatwaves, droughts, and fires: exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale [J]. Environment International, 2020, 134: 105276.
- [9] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500-521. (Zhang Qiang, Yao Yubi, Li Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500-521. (in Chinese))
- [10] 张长征, 沈婷, 徐慎晖, 等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济, 2023, 41(1): 55-61. (Zhang Changzheng, Shen Ting, Xu Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))
- [11] Hao Zengchao, Hao Fanghua, Xia Youlong, et al. A statistical method for categorical drought prediction based on NLDAS-2 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2016, 55(4): 1049-1061.
- [12] Liu Xiaojing, Song Yongpeng, Ma Donglai, et al. The application of gray model and BP artificial neural network in predicting drought in the liaoning province [C]// Proceedings of the 7th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention. Dordrecht: Atlantis Press, 2016.
- [13] 李明, 邓宇莹, 葛晨昊, 等. 1961—2017 年黄土高原气象干旱特征及其与大尺度气候因子的联系[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2231-2239. (Li Ming, Deng Yuying, Ge Chenhao, et al. Characteristics of meteorological drought across the Loess Plateau and their linkages with large-scale climatic factors during 1961-2017 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(11): 2231-2239. (in Chinese))
- [14] 关不了, 姜珊, 赵勇, 等. 海河流域干旱时空演变及其与气候因子的关系[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 59-68. (Guan Buliao, Jiang Shan, Zhao Yong, et al. Spatial and temporal evolution of drought and its relationship with climate factors in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 59-68. (in Chinese))
- [15] 王雪梅, 杨雪峰, 赵枫, 等. 基于机器学习算法的干旱区绿洲地上生物量估算[J]. 生态环境学报, 2023, 32(6): 1007-1015. (Wang Xuemei, Yang Xuefeng, Zhao Feng, et al. Estimation of aboveground biomass in the arid oasis based on the machine learning algorithm [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(6): 1007-1015. (in Chinese))
- [16] 宋立辉, 张鑫, 杜传玉, 等. 基于随机森林的西北地区综合干旱监测模型研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(5): 62-72. (Song Lihui, Zhang Xin, Du Chuanyu, et al. Model for comprehensive drought monitoring in Northwest China based on random forest [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(5): 62-72. (in Chinese))
- [17] Han Ping, Wang Pengxin, Zhang Shuyu, et al. Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA models [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11/12): 1398-1403.
- [18] 杨洁, 王义民, 畅建霞, 等. PDSI 与马尔科夫耦合的干旱预测[J]. 人民珠江, 2016, 37(8): 1-5. (Yang Jie, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Drought prediction based on PDSI and Markov chain model [J]. Pearl River, 2016, 37(8): 1-5. (in Chinese))
- [19] 鞠琴, 马啸赞, 刘艳丽, 等. 基于秩评分方法的 CMIP6 全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 12-20. (Ju Qin, Ma Xiaozan, Liu Yanli, et al. Evaluation for CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on rank score method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 12-20. (in Chinese))
- [20] 谢灵枫, 杨肖丽, 吴凡, 等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 10-17. (Xie Lingfeng, Yang Xiaoli, Wu Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese))
- [21] 武传号, 逯家宝, 周君, 等. 基于 CMIP6 多模式集合的中国洪水-热浪复合极端事件特征预测[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 20-30. (Wu Chuanhao, LU Jiabao, Zhou Jun, et al. Characteristic projection of successive flood-heatwave extreme events in China based on CMIP6 multi-model ensembles [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 20-30. (in Chinese))
- [22] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (Yang Xiaoli, Zheng Weifei, Lin Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River

- based on statistical downscale study and SPI[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (5) : 377-383. (in Chinese))
- [23] 莫兴国,胡实,卢洪健,等. GCM 预测情景下中国 21 世纪干旱演变趋势分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33 (7) : 1244-1256. (Mo Xingguo, Hu Shi, Lu Hongjian, et al. Drought trends over the terrestrial China in the 21st century in climate change scenarios with ensemble GCM projections [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33 (7) : 1244-1256. (in Chinese))
- [24] 王天,涂新军,周宗林,等. 基于 CMIP6 的珠江流域未来干旱时空变化[J]. 农业工程学报, 2022, 38 (11) : 81-90. (Wang Tian, Tu Xinjun, Zhou Zonglin, et al. Spatiotemporal variation of future droughts in the Pearl River Basin using CMIP6 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (11) : 81-90. (in Chinese))
- [25] Gumus V, El Mocayd N, Seker M, et al. Future projection of droughts in Morocco and potential impact on agriculture [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 367 : 122019.
- [26] 张更喜,栗晓玲,刘文斐. 考虑 CO₂ 浓度影响的中国未来干旱趋势变化[J]. 农业工程学报, 2021, 37 (1) : 84-91. (Zhang Gengxi, Su Xiaoling, Liu Wenfei. Future drought trend in China considering CO₂ concentration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (1) : 84-91. (in Chinese))
- [27] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes [J]. Nature Climate Change, 2016, 6 (11) : 1023-1027.
- [28] Yang Yuting, Zhang Shulei, Roderick M L, et al. Comparing Palmer drought severity index drought assessments using the traditional offline approach with direct climate model outputs [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (6) : 2921-2930.
- [29] 王磊,曾思栋,阳林翰,等. 基于 CMIP6 的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5) : 39-45. (Wang Lei, Zeng Sidong, Yang Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5) : 39-45. (in Chinese))
- [30] 门宝辉,吕行,陈仕豪,等. 基于 CMIP6 耦合 WRF 的黄河上游复合干旱热浪事件演变规律[J]. 水利学报, 2024, 55 (8) : 908-919. (Men Baohui, Lyu Xing, Chen Shihao, et al. Evolution law of compound drought and heatwave events in the upper Yellow River Basin based on CMIP6 coupled WRF [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (8) : 908-919. (in Chinese))
- [31] 赖雨瞳,徐影. CMIP6 全球气候模式对中国地区干旱模拟能力评估与预估[J]. 大气科学, 2024, 48 (6) : 2157-2177. (Lai Yutong, Xu Ying. Assessment of simulation capability and projection of drought over China based on CMIP6 global climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48 (6) : 2157-2177. (in Chinese))
- [32] Feng Kai, Wang Yingying, Li Yanbin, et al. Three-dimensional perspective on the characterization of the spatiotemporal propagation from meteorological to agricultural drought [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 353 : 110048.
- [33] 冯凯,李彦彬,王飞,等. 基于改进三维识别方法的西北地区干旱事件分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (1) : 63-72. (Feng Kai, Li Yanbin, Wang Fei, et al. Analysis of drought events in Northwest China based on an improved three-dimensional identification method [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1) : 63-72. (in Chinese))
- [34] 薛联青,王文壮,刘远洪,等. 黄河流域植被总初级生产力对持续性干旱水分亏缺的响应[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3) : 44-51. (Xue Lianqing, Wang Wenzhuang, Liu Yuanhong, et al. Response of gross primary productivity of vegetation to persistent drought-induced water deficit in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3) : 44-51. (in Chinese))
- [35] 薛联青,肖颖,刘远洪,等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护, 2023, 39 (4) : 32-41. (Xue Lianqing, Xiao Ying, Liu Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4) : 32-41. (in Chinese))
- [36] Yang Yuting, Roderick M L, Zhang Shulei, et al. Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections [J]. Nature Climate Change, 2019, 9 (1) : 44-48.
- [37] 李琼芳,方凯悦,韩幸烨,等. 基于多维 Copula 函数的澜沧江-湄公河流域气象干旱特征分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1) : 52-59. (Li Qiongfang, Fang Kaiyue, Han Xingye, et al. Analysis of meteorological drought characteristics in the Lancang-Mekong River Basin based on multi-dimensional Copula function [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1) : 52-59. (in Chinese))
- [38] 王盈盈. 黄河流域综合干旱时空动态演变模拟与预测 [D]. 郑州:华北水利水电大学, 2022.

(收稿日期:2025 - 04 - 27 编辑:王芳)