

王驰,张正偲,韩兰英,等.基于CMIP6和遥感反演的黄河流域未来干旱预估[J].中国沙漠,2026,46(3):66-74.

# 基于CMIP6和遥感反演的黄河流域 未来干旱预估

王驰<sup>1</sup>,张正偲<sup>1</sup>,韩兰英<sup>1,2</sup>,张令光<sup>1</sup>,张振煜<sup>1</sup>,王思琦<sup>1</sup>,  
雷云竹<sup>1</sup>,张文慧<sup>1</sup>,方盼<sup>1</sup>,陈宇峰<sup>1</sup>

(1.陕西师范大学地理科学与旅游学院,陕西西安710119;2.中国气象局兰州干旱气象研究所甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,甘肃兰州730020)

**摘要:** 气候变暖背景下,全球的干旱不断加剧。黄河流域为中国气候变化敏感区和极端气候事件高发频发地区,明确其干旱时空演变特征对于改善区域环境等具有重要的理论和现实意义。本文基于CMIP6模式和遥感反演数据,利用标准化降水蒸散指数(SPEI)、遥感反演的温度植被干旱指数(TVDI),采用Hurst指数、Theil-Sen Median趋势分析法和Mann-Kendall检验,研究黄河流域干旱发生的时空演变特征,并探讨未来气候变化下的干旱面积及趋势。结果表明:2024—2100年黄河流域气温累计升高 $1.97\pm 0.58$  °C,降水量增加 $138.99\pm 60.52$  mm;黄河流域干旱频率减少,呈暖湿化演变趋势;Hurst指数预测进一步表明,干旱演变具有同向持续性;黄河流域干旱面积占比呈下降趋势,中游地区35.46%的面积呈湿润化趋势,而上游西北部和下游局部地区21.91%的面积呈干旱化趋势。研究成果可为黄河流域气候变化应对和干旱风险管理提供科学支撑。

**关键词:** CMIP6; 标准化降水蒸散指数(SPEI); 温度植被干旱指数(TVDI); 干旱; 黄河流域

文章编号: 1000-694X(2026)03-066-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00162

中图分类号: P429

文献标志码: A

## 0 引言

全球变暖加速了水循环,导致全球不同尺度的水资源重新分配,加剧了极端天气气候事件发生。地球近47%的面积受到干旱事件的威胁<sup>[1-2]</sup>,干旱事件已成为影响人类社会可持续发展最严重的气象灾害,也是气候学、水文学和生态学等领域的研究热点<sup>[3]</sup>。世界粮农组织和国家重大科技计划一直将干旱预测和预警列为重大科技攻关领域的课题<sup>[4]</sup>。

全球气候模式(GCM)是模拟和预估气候变化的核心工具<sup>[5-6]</sup>。基于GCM的模拟数据,科学界得以评估未来干旱等极端气候事件的风险。IPCC第六次评估报告指出,未来气候持续增暖,对人类生存环境造成严峻而广泛的影响<sup>[7]</sup>。在这一背景下,利用GCM数据监测和评估未来气候变化情境下的

干旱发生发展状况变得尤为重要。目前,多利用历史气象数据建立干旱指数科学和定量评估干旱,常用气象干旱指标包括标准化降水指数(SPI)<sup>[8]</sup>、帕默尔干旱指数(PDSI)<sup>[9]</sup>和标准化降水蒸散指数(SPEI)<sup>[10]</sup>。其中,SPI仅考虑降水一个变量,无法反映升温对干旱的加剧作用;PDSI虽为著名的综合干旱指标,但其计算复杂且对数据要求高,在不同区域和时段的应用存在一定局限性。SPEI通过站点观测的降水和潜在蒸散发,综合考虑了降水量不足和温度升高引发的蒸散发增加的因素,可有效反映不同时间尺度的干湿变化特征<sup>[11]</sup>。通过遥感数据反演温度植被干旱指数(TVDI),能在栅格单元实时观测要素,从而实现对大范围的长期干旱监测,有效克服了站点数据在空间覆盖和时效性方面的局

收稿日期:2025-07-10; 改回日期:2025-11-03

资助项目:国家自然科学基金项目(42575204);内蒙古自治区林业科学研究院开放课题(KF2025ZD07);内蒙古自治区科技重大专项(2024JBGS0003-1-1);高校项目(GK202502004);干旱气象科学研究基金项目(IAM202306);中央高校基本科研业务费项目(1301032624)

作者简介:王驰(2002—),男,陕西周至人,硕士研究生,研究方向为气候变化。E-mail: 20242436@snnu.edu.cn

通信作者:韩兰英(E-mail: hanly@snnu.edu.cn)

限性<sup>[12]</sup>,有效反映地表土壤水分和植被水分胁迫状况,弥补了气象干旱指数的不足<sup>[13]</sup>。

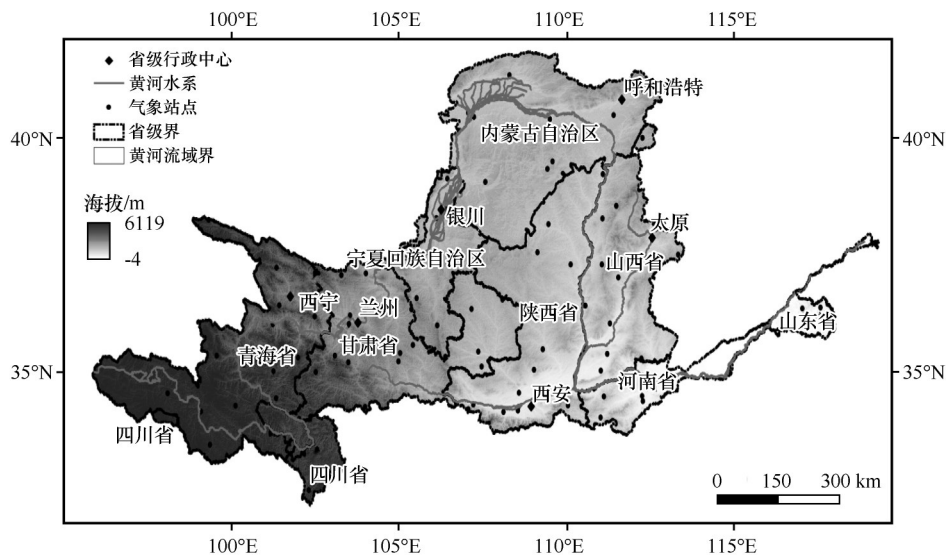
东亚旱区(Drylands in East Asia, DEA)为人口最密集的干旱区。Ren等<sup>[14]</sup>研究表明,未来温室气体排放增加将导致DEA地区水循环显著增强,冬季降水、蒸散发、径流和土壤湿度均呈一致增加趋势,而夏季则呈现西北部减弱、东南部增强的空间分异特征。黄河流域作为DEA的重要组成部分,对中国北方社会经济的可持续发展有重大影响<sup>[15-16]</sup>。受气候持续增暖影响,黄河流域的干旱等复合型灾害事件频发,水循环过程加速演变,深刻影响区域水资源可利用性与干旱风险格局,对生态环境、农业生产和社会经济造成了严重威胁<sup>[17-18]</sup>。目前基于第六次耦合模式比较计划(CMIP6)最新的模式预估数据的干旱发生发展预估研究相对较少。本研究通过SPEI和TVDI指数系统评估流域

干旱演变规律,为区域防灾减灾和水资源管理提供科学依据。

## 1 研究资料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河流域位于31°10′—41°50′N、95°53′—119°05′E,总面积79.5万km<sup>2</sup>,黄河全长5464 km、自西向东流经青海、四川、甘肃等9个省区<sup>[19]</sup>(图1)。按地形和水文特征分为三段,上、中游分界在内蒙古自治区托克托县河口镇,中、下游分界在河南郑州桃花峪,在山东省东营市垦利区注入渤海<sup>[20-21]</sup>。黄河流域气候类型复杂多样,横跨干旱区、半干旱区、半湿润区,流域属于中国夏季风过渡区影响最大的区域,降水空间分布存在显著差异,总降水量从南部650 mm向北部200 mm逐渐减少,年际变化较大<sup>[22]</sup>。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2019)4345号标准地图制作,底图无修改

图1 研究区及气象站点分布

Fig.1 Distribution of study area and meteorological stations

### 1.2 数据来源

研究数据选取自黄河流域全域内的90个气象站点1960—2023年的气温、降水量等逐月气象资料,数据来源于国家气象信息中心(<https://data.cma.cn/>)。2015—2100年的CMIP6未来气候数据来源于世界气候研究计划(WCRP,<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>)。本研究选取SSP2-4.5情景下的CMIP6数据,该预估结果介于依赖强力减排的SSP1-2.6与高碳排放的SSP5-8.5之间,被视为一条

更为现实与稳健的中间路径。为克服单一气候模式数据不确定性大等问题,本文选用了全球26个比较成熟的气候模式,采用多模式集合(Multi-Model Ensemble, MME)平均法,对CMIP6的26个全球气候模式数据进行集合平均<sup>[23]</sup>。

遥感数据选用2003—2022年MODIS数据,来源于美国USGS数据中心(<https://lpdaac.usgs.gov/>)平台的归一化植被指数产品(MOD13A2),空间分辨率为1 km。通过MRT工具进行投影转换(WGS84)

和最大值合成,生成黄河流域2003—2022年尺度NDVI数据集。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)、干旱频率

标准化降水蒸散指数(SPEI)通过降水量和潜在蒸散发差值偏离平均状态的程度来表征某区域干湿状态<sup>[24]</sup>。利用概率分布标准化为SPEI值。SPEI引入了温度对干旱的影响,更适用于气候变暖背景下的干旱监测评估。计算遵循中华人民共和国国家标准《气象干旱等级》(GB/T 20481—2017),其中潜在蒸散发应用Thornthwaite方法进行计算。SPEI干旱等级划分为:SPEI>-0.5为无旱,-1.0<SPEI≤-0.5为轻旱,-1.5<SPEI≤-1.0为中旱,-2.0<SPEI≤-1.5为重旱,SPEI≤-2.0为特旱。

干旱频率通过统计各等级干旱发生年数占研究时段总年数的比例进行计算,用于反映干旱发生的频次特征。

#### 1.3.2 温度植被干旱指数(TVDI)

TVDI考虑表征植被生长状态的NDVI和LST两个因素。通过构建NDVI-LST特征空间,反演评估土壤湿度,从而在多变的气候和复杂的地形条件下进行干旱监测<sup>[25]</sup>:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (1)$$

$$LST_{\min} = a_1 + b_1 NDVI \quad (2)$$

$$LST_{\max} = a_2 + b_2 NDVI \quad (3)$$

式中:LST表示任意像元的地表温度(°C); $LST_{\max}$ 和 $LST_{\min}$ 分别为最高和最低地表温度(°C),分别对应NDVI-LST特征空间的干边和湿边; $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 和 $b_2$ 为相关系数。根据TVDI将干旱划分为5个等级<sup>[25]</sup>:TVDI值在0~0.2为湿润,0.2~0.4为正常,0.4~0.6为轻旱,0.6~0.8为中旱,0.8~1.0则为重旱。

#### 1.3.3 Hurst指数与Theil-Sen Median趋势分析法

Hurst指数( $H$ )定量描述时间序列自相似性和长期趋势,可反映时间序列的特性,Hurst指数可以分为4类:强同向持续性( $0.65 < H < 1$ )、弱同向持续性( $0.50 < H < 0.65$ )、弱反向持续性( $0.35 < H < 0.50$ )、强反向持续性( $0 < H < 0.35$ )<sup>[26]</sup>。

Theil-Sen Median趋势分析法是一种用于趋势计算的稳健非参数统计方法。该方法具有计算效率高、对测量误差不敏感、数据聚类性强等优点<sup>[27]</sup>。

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (4)$$

式中: $\beta$ 为变化趋势的斜率;Median为取中值函数; $i$ 和 $j$ 为时间序数, $j > i$ 。 $\beta > 0.001$ 表示干旱加剧; $-0.001 < \beta < 0.001$ 表示干旱稳定; $\beta < -0.001$ 表示干旱缓解。研究采用Theil-Sen Median趋势估计法量化干旱时空变化的趋势幅度,并结合Mann-Kendall检验法判断其统计显著性<sup>[28]</sup>,综合分析干旱的时空演变规律。

#### 1.3.4 偏差校正

CMIP6模式数据的偏差校正对于增强未来气候变化的可预测性的置信度至关重要<sup>[29]</sup>。等距累积分布函数(EDCDFm)通过调整未来预测数据的累积分布函数(CDF),使其与历史观测数据的CDF在统计特性上更加一致<sup>[30]</sup>。

$$X_{m_p/adj} = x_{m-p} + F_{o-c}^{-1} \left( F_{m-p}(x_{m-p}) - F_{m-c}^{-1}(F_{m-p}(x_{m-p})) \right) \quad (5)$$

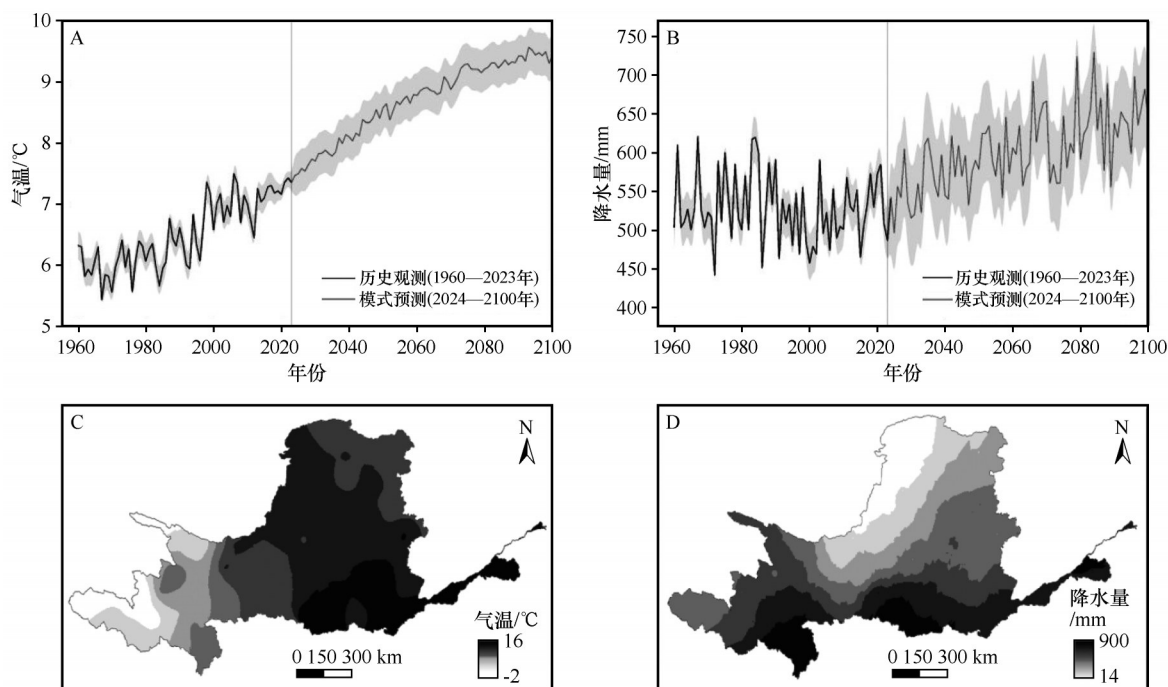
式中: $X_{m_p/adj}$ 为修正后的未来预测值; $x_{m-p}$ 为原始的未来预测值; $F_{o-c}$ 为历史观测数据(累积分布函数CDF); $F_{m-c}$ 为气候模式对历史时期模拟数据的CDF; $F_{m-p}$ 为气候模式对未来时期预测数据的CDF; $F^{-1}$ 为分位数函数。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河流域历史观测与未来预估气候变化特征

在全球变暖的背景下,黄河流域气温呈上升趋势(图2A)。1960—2023年,气温随着年际变化而呈波动上升趋势,升温速率达 $0.16 \pm 0.27$  °C/10a,累计升温 $1.03 \pm 0.55$  °C。2024—2100年,升温速率达 $0.26 \pm 0.14$  °C/10a,累计升温 $1.97 \pm 0.58$  °C。将2024—2100年分为中短期、中期和长期3个阶段来看,2024—2050年中短期升温最快,为 $0.42 \pm 0.09$  °C/10a;2051—2075年中期升温速率放缓至 $0.26 \pm 0.08$  °C/10a;2076—2100年长期进一步降低为 $0.09 \pm 0.07$  °C/10a。

黄河流域降水受夏季风影响显著<sup>[16]</sup>,整体呈增加趋势但阶段性特征明显(图2B)。1960—2000年,年降水量呈下降趋势,21世纪后逐渐增加,年降水量为 $533.64 \pm 49.35$  mm。2024—2100年,年降水量呈显著增加趋势,增加速率为 $8.71 \pm 1.23$  mm/10a。2024—2050年,年降水量增加速率为 $6.54 \pm 2.16$  mm/10a,2051—



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2019)4345号标准地图制作，底图无修改

图2 黄河流域1960—2100年平均气温(A)、年降水量(B)变化(阴影部分为标准差),2024—2100年气温(C)、降水量空间分布(D)

Fig.2 Changes of mean temperature (A) and annual precipitation (B) in the Yellow River Basin from 1960 to 2100 (Shadow part is the standard deviation), and spatial distribution of temperature (C) and precipitation (D) in the Yellow River Basin from 2024 to 2100

—2075年,年降水量增加速率为 $18.4 \pm 3.89$  mm/10a, 2076—2100年,增加速率为 $9.21 \pm 4.57$  mm/10a。

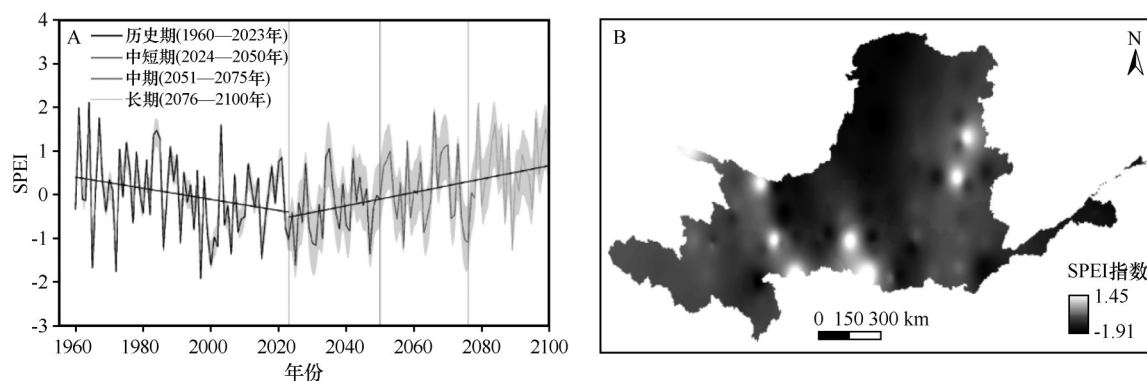
黄河流域气候空间分布差异显著。气温呈西低东高的分布格局(图2C),上游北部、中下游气温较高,而上游高海拔地区受地形影响气温相对较低,全流域气温普遍上升 $1.2 \sim 2.3$  °C。降水则呈北少南多的分布格局(图2D),上游北部降水量不足,而下游南部地区降水较为丰沛。由于上游北部地区

高温且降水量较低,结合Ji等<sup>[29]</sup>的研究,我们认为上游北部地区仍然是干旱风险最高的区域。

## 2.2 黄河流域干旱特征变化

### 2.2.1 干旱程度时空演变

黄河流域干旱演变呈明显的阶段性特征(图3A)。1960—2023年SPEI值呈先降后升趋势( $P < 0.05$ ):1960—2000年SPEI值降低,表明干旱加剧;



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2019)4345号标准地图制作，底图无修改

图3 1960—2100年尺度SPEI值(A)和2024—2100年平均SPEI空间分布(B)

Fig.3 SPEI value from 1960 to 2100 (A) and Spatial distribution of SPEI in 2024-2100 (B)

2001—2023年SPEI值上升,表明干旱缓解。其中发生极端干旱年份分别为1965、1972、1997、2000年,最严重的年份为1997年,与王飞等<sup>[31]</sup>研究结果一致。2024—2100年黄河流域SPEI值总体呈显著上升趋势( $P<0.05$ ),Theil-Sen斜率为+0.09/10a,表明干旱缓解,但在时间序列上存在阶段性波动。分阶段来看,中短期SPEI呈上升趋势,表明干旱得到缓解,SPEI均值为-0.34;中期SPEI呈下降趋势,均值接近-0.04;长期SPEI值呈上升趋势,SPEI均值升至0.42,表明黄河流域向湿润化状态发展,但如2075、2076、2089年等仍会发生干旱事件<sup>[32]</sup>。

未来时期(2024—2100年)黄河流域干旱呈西低东高的分布特点(图3B),空间分布差异显著,在上游西北部的内蒙古、宁夏和甘肃北部等地区的SPEI值集中在-1.9~-1,即发生干旱以重旱和中旱为主;在青海、四川和甘肃南部,SPEI值为-1~1.3,即发生干旱以轻旱为主;在中游的甘肃东部、陕西北部 and 山西南部,SPEI值在-1.5~-0.5,即发生干旱以中旱和轻旱为主;在下游的河南和山东,SPEI值位于-1.5~-1,即发生干旱以中旱为主。而湿润区域主要位于青海东部、甘肃南部、陕西西南部和山西东部,SPEI值为-0.5~1.3。

### 2.2.2 干旱频率

黄河流域内干旱事件以中旱和轻旱为主,两者占比达85%以上,历史时期(1960—2023年)至未来时期(2024—2100年),干旱频率呈下降趋势(表1)。干旱总频率从0.31降至0.27,其中特旱频率从0.02降至0、重旱从0.05降至0.03、中旱从0.09降至0.08,

表1 不同时间段黄河流域干旱频率

Table 1 Drought frequency in the Yellow River Basin at different time periods

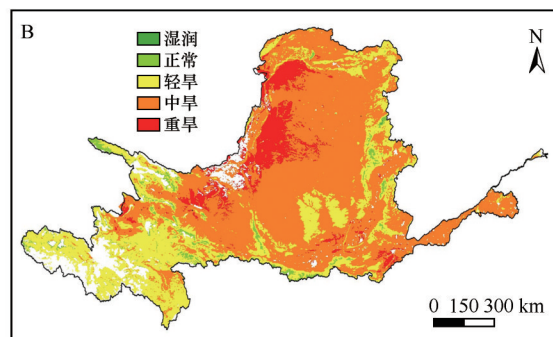
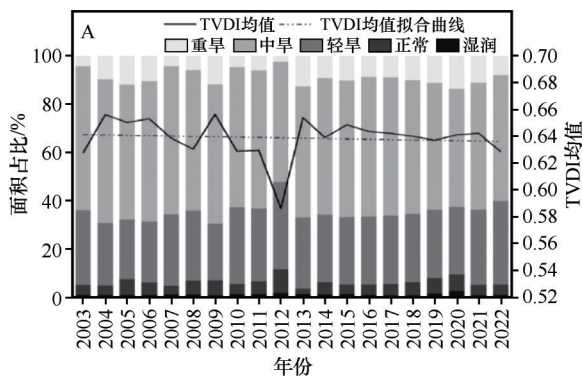
年份	特旱频率	重旱频率	中旱频率	轻旱频率	干旱总频率
1960—2023	0.02	0.05	0.09	0.16	0.31
2024—2050	0.00	0.04	0.15	0.19	0.37
2051—2075	0.00	0.04	0.08	0.24	0.28
2076—2100	0.00	0.00	0.08	0.04	0.12
2024—2100	0.00	0.03	0.08	0.16	0.27

同时轻旱基本保持稳定;分阶段来看,中短期(2024—2050年)至长期(2076—2100年)干旱总频率呈递减趋势,从0.37降至0.12。其中,重旱频率从0.04下降到0,中旱从0.15大幅下降至0.08,轻旱也从0.19显著降低至0.04。结果表明,黄河流域的干旱情况整体呈现缓解趋势,中旱和轻旱的改善效果尤为显著。

## 2.3 温度植被干旱指数(TVDI)

### 2.3.1 TVDI时空格局

2003—2022年,黄河流域TVDI多年平均值为0.64,呈中旱水平(图4A)。整体来说,湿润区面积占比普遍较低;正常区的面积占比波动较大,2012年达到最高值9.91%;轻旱区面积占比相对稳定,为25%~35%;中旱区的面积占比最高,大多为50%~60%,但呈现逐年下降趋势;重旱区的面积占比波动较大,2005年和2013年达到较高值12.85%,而2012年占比最低,为2.43%。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2019)4345号标准地图制作,底图无修改

图4 2003—2022年干旱面积占比、年均值变化(A)和年均TVDI空间分布(B)

Fig.4 The proportion of drought area, annual mean change (A) and Average annual spatial distribution of TVDI (B) from 2003 to 2022

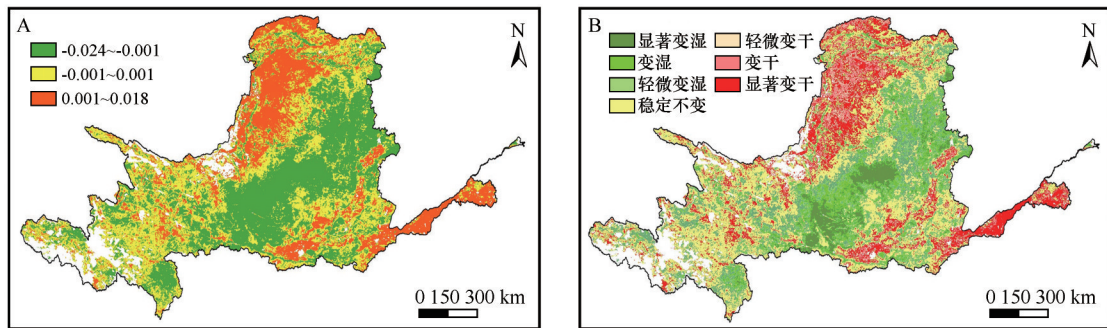
黄河流域地区干旱分布呈现明显的空间差异(图4B),呈西低东高的分布格局。流域干旱面积以轻旱和中旱为主,轻旱面积占比28.1%,中旱面积占比为61.8%,重旱主要发生在内蒙古自治区鄂尔多斯市西部、宁夏回族自治区银川市南部、吴忠市北部和甘肃省兰州市、白银市中部。

### 2.3.2 干旱演变趋势的空间分异与显著性检验

将Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验在ArcGIS软件上进行叠加,将干旱变化分

为7类<sup>[33]</sup>。

基于Theil-Sen Median趋势,得到了黄河流域的TVDI变化率( $\beta$ )的空间分布图, $\beta$ 值 $-0.024\sim 0.018$ ,均值为 $-0.004$ ,呈下降趋势(图5A)。黄河流域TVDI年际变化降低的面积占38.91%,基本不变的面积占36.72%,上升面积占24.32%。通过对 $\beta$ 值的Mann-Kendall检验,得到了黄河流域更为详细的干旱变化,显著变湿的地区主要集中在陕西省中部、宁夏回族自治区南部和甘肃省东部(图5B)。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2019)4345号标准地图制作,底图无修改

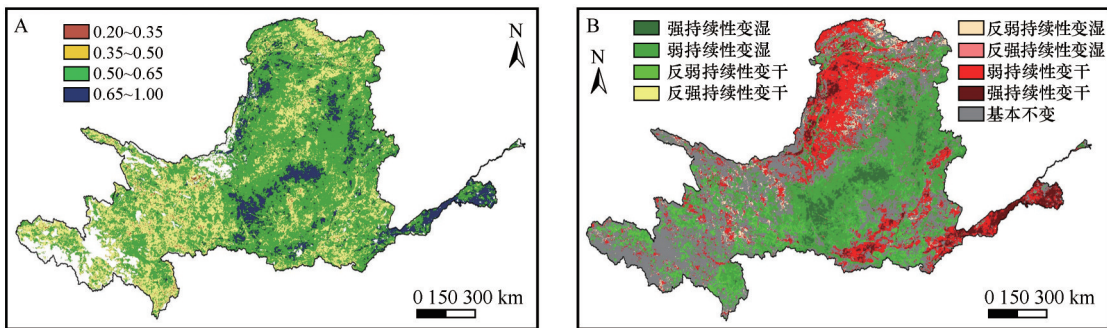
图5 Theil-Sen Median变化趋势分布(A)和Theil-Sen Median+Mann-Kendall检验干旱变化分布(B)

Fig.5 Theil-Sen Median change trend distribution (A) and Theil-Sen Median + Mann-Kendall test drought change distribution (B)

### 2.3.3 未来时期TVDI变化趋势

2003—2022年黄河流域的Hurst值为0.22~0.76,平均为0.54,Hurst值大于0.5的黄河流域面积

占69.29%,其中大于0.65的占60.61%,Hurst值小于0.5的黄河流域面积占30.71%(图6A)。流域干旱情况具有同向持续发展的特征。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2019)4345号标准地图制作,底图无修改

图6 黄河流域Hurst指数分布(A)和未来时期TVDI变化趋势(B)

Fig.6 The Hurst index distribution (A) of the Yellow River Basin and the trend of TVDI in the future (B)

基于Hurst指数与Theil-Sen Median变化趋势叠加分析<sup>[34]</sup>,得到黄河流域未来时期干旱的变化趋势(图6B)。持续变湿润的区域面积占比28.12%,过去变干未来缓解的区域面积占比7.34%,过去变湿未来变干的区域面积占比3.22%,干旱加剧区域面积占比为18.69%,基本不变的区域面积占比为

42.63%(表2)。黄河流域持续性变湿润的区域主要位于黄河流域中游,而未来持续性变干的区域主要位于黄河流域上游西北部地区和下游。

### 2.4 SPEI指数与TVDI指数的相关性

在相同时间段2003—2022年,黄河流域SPEI

表2 黄河流域地区未来时期 TVDI 变化趋势

Table 2 The variation trend of TVDI in the Yellow River Basin in the future

编号	发展变化	未来变化趋势	面积占比/%
1	持续变湿	强持续性变湿	4.11
2		弱持续性变湿	24.01
3	过去变干未来缓解	反弱持续性变干	7.27
4		反强持续性变干	0.07
5	过去变湿未来变干	反弱持续性变湿	3.18
6		反强持续性变湿	0.04
7	干旱加剧	弱持续性变干	14.87
8		强持续性变干	3.82
9	基本不变	基本不变	42.63

指数呈上升趋势, TVDI 指数呈下降趋势, 两者关系呈明显反向变化特征。为验证这一关系的可靠性, 计算 SPEI 指数和 TVDI 指数的皮尔逊相关系数, 相关系数为  $-0.61$  (图 7), 即当 SPEI 指数升高时, 土壤水分增加, 导致植被水分胁迫增加, TVDI 指数降低, 干旱程度减轻伴随植被干旱状况缓解。

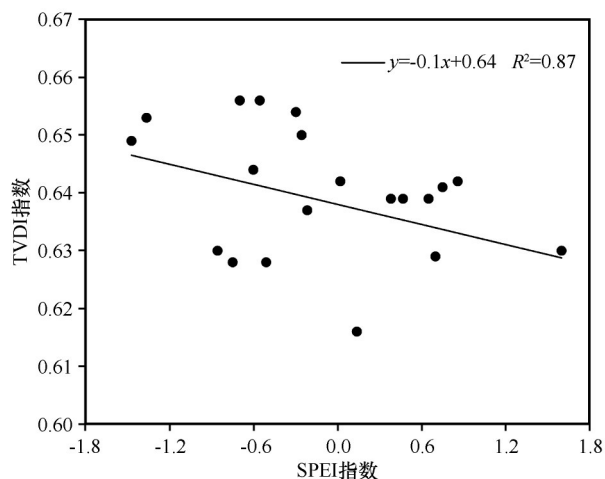


图7 2003—2022年 SPEI 指数、TVDI 指数相关性

Fig.7 Correlation analysis of SPEI index and TVDI index from 2003 to 2022

基于 CMIP6 多模式集合预测结果表明, 黄河流域干旱状况将持续改善, 干旱主要位于上游西北部和下游区域, 而中游和上游西部大部分区域干旱得到改善 (图 3B) 与未来时期 TVDI 变化趋势一致 (图 6B), 结合 Hurst 指数的空间分布特征表明, 黄河流域湿润范围将显著扩大。这一变化趋势表明 TVDI 指数将进一步降低, 即 SPEI 指数与 TVDI 指数在未来负相关关系保持稳定。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

黄河流域气温和降水量呈明显的阶段性变化, 气温呈阶段性上升且增速趋缓, 这与中国“双碳”政策密切相关。降水量呈增加趋势, 但年际波动变化显著, 与王有恒等<sup>[16]</sup>、韩兰英等<sup>[19]</sup>研究结论一致, 均指出了区域暖湿化的趋势。这一趋势是全球变暖背景下水循环过程与大气环流动力热力机制共同作用的结果<sup>[16]</sup>, 流域的降水变化深受东亚季风系统演变控制。未来东亚夏季风环流的增强与西扩趋势<sup>[35]</sup>, 将导致黄河流域降水增加。从干旱演变来看, 干旱面积明显缩小、干旱频率逐渐降低。谢京凯<sup>[36]</sup>研究发现较大规模的基础建设活动会改变植被覆盖率影响水文循环。这表明干旱演变是气候变化与人类活动共同作用的结果。

研究采用 Thornthwaite 方法计算潜在蒸散发并构建 SPEI 指数, 未能充分考虑上游高寒地区太阳辐射强等关键驱动因子, 可能导致对潜在蒸散发的低估。为此在后续研究中引入 TVDI 进行协同分析, 有效弥补单纯气象数据推算干旱的不足, 提高干旱预估精度。结果表明, 黄河流域干旱分布呈现明显的空间差异, 呈西低东高的特征。上游北部为干旱高风险区, 这与张镭等<sup>[15]</sup>指出的气候变化加剧上游水资源不确定性的论断相符。据 Hurst 指数可知, 持续变湿润的区域面积占比 35.46%; 干旱加剧区域面积占比为 21.91%。研究同时发现 SPEI 与 TVDI 指数呈显著负相关, SPEI 指数升高时, 土壤水分增加, 导致植被水分胁迫增加, TVDI 指数降低, 验证了气象干旱与植被干旱的协同演变机制。研究成果为应对气候变化下的水资源管理提供了科学依据, 如在流域上游大力发展节水灌溉农业, 推广抗旱作物品种, 向低耗水、高附加值的生态产业转型; 在全流域, 打造流域水资源统筹协调开发区, 缓解水资源压力。未来还需要持续关注气候变化与人类活动的交互作用, 以保障流域生态安全和社会经济可持续发展。

#### 3.2 结论

未来黄河流域呈暖湿化趋势, 黄河流域近地面温度持续上升, 1960—2023 年升温速率为  $0.16 \pm 0.27$  °C/10a, 2024—2100 年升温速率增至  $0.26 \pm$

0.14 °C/10a, 累计升温  $1.97 \pm 0.58$  °C; 降水量呈阶段性变化, 1960—2000年下降, 2000年后显著增加, 未来2024—2100年增幅达  $8.71 \pm 1.23$  mm/10a。

1960—2023年黄河流域干旱状况具有阶段性特征, 总体在21世纪前, 干旱程度和频次偏重偏多, 之后逐渐呈改善趋势, 其中中度干旱区域面积逐年减少, 重旱区域波动较大; 空间分布上, 干旱呈西低东高特征, 上游西北部为干旱高风险区。

2024—2100年黄河流域干旱情况显著改善, Theil-Sen斜率达  $+0.09/10a$ ; 干旱主要分布在上游西北部和下游; 干旱频率整体呈下降趋势, 特旱、重旱和中旱频率显著减少, 轻旱频率保持稳定。Hurst指数显示, 未来黄河流域变湿区域占比35.46%, 主要分布在中游; 变干区域占比21.91%, 主要分布在上游西北部及下游局部。

#### 参考文献:

- [1] Chiang F, Mazdiyasi O, AghaKouchak A. Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2754.
- [2] Franke J. Changing drought risks[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 118.
- [3] Koutroulis A G. Dryland changes under different levels of global warming[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 482–511.
- [4] 韩兰英, 张强, 马鹏里, 等. 中国西南地区农业干旱灾害风险空间特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 1015–1023.
- [5] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 445–456.
- [6] Wu T, Lu Y, Fang Y, et al. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4): 1573–1600.
- [7] 匡舒雅, 周泽宇, 梁媚聪, 等. IPCC第六次评估报告第二工作组报告解读[J]. *环境保护*, 2022, 50(9): 71–75.
- [8] Livada I, Assimakopoulos V. Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI) [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2007, 89: 143–153.
- [9] Heddinghaus T R, Sabol P. A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here[C]//Proceedings of the 7th Conference on Applied Climatology. Boston, USA: American Meteorological Society, 1991: 242–246.
- [10] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 1696–1718.
- [11] 郭旭宁, 李云玲, 闫佳铭, 等. “双碳”战略下水循环响应与需水情势变化[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 22–28.
- [12] 李晓鹏, 李康, 雷双, 等. 基于TVDI的新疆地区干旱时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2025, 42(4): 589–599.
- [13] 陈少丹, 张利平, 汤柔馨, 等. 基于SPEI和TVDI的河南省干旱时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 126–132.
- [14] Ren Y, Yu H, Huang J, et al. The projected response of the water cycle to global warming over drylands in East Asia [J]. *Earth's Future*, 2024, 12(4): EF004008.
- [15] 张镭, 黄建平, 梁捷宁, 等. 气候变化对黄河流域的影响及应对措施[J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 42–51.
- [16] 王有恒, 谭丹, 韩兰英, 等. 黄河流域气候变化研究综述[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 235–246.
- [17] 王飞. 多干旱类型视角下的黄河流域干旱时空演变特征研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [18] 闫昕昀. 泛中亚干旱区气候变化特征及其与全球典型干旱区的对比[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [19] 韩兰英, 张强, 马鹏里, 等. 气候变暖背景下黄河流域干旱灾害风险空间特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 225–234.
- [20] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000–2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 849–858.
- [21] 何福力, 胡彩虹, 王纪军, 等. 基于标准化降水、径流指数的黄河流域近50年气象水文干旱演变分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(3): 69–75.
- [22] Zhang K, Wang Y M, Chang J X, et al. Spatial and temporal evolution of drought characteristics across the Yellow River basin [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108207.
- [23] 山建安, 朱睿, 尹振良, 等. 基于CMIP6模式的中国西北地区干旱时空变化[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(5): 717–729.
- [24] 周丹, 张勃, 罗静, 等. 基于SPEI的华北地区近50年干旱发生强度的特征及成因分析[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(4): 192–202.
- [25] Liu Y, Wu L, Yue H. Biparabolic NDVI-Ts space and soil moisture remote sensing in an arid and semi-arid area [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2015, 41(3): 159–169.
- [26] 冯新灵, 冯自立, 罗隆诚, 等. 青藏高原冷暖气候气候变化趋势的R/S分析及Hurst指数试验研究[J]. *干旱区地理*, 2008(2): 175–181.
- [27] Wang M, Chen Y, Li J, et al. Spatiotemporal evolution and driving force analysis of drought characteristics in the Yellow River Basin [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 113007.
- [28] 刘涛, 司振江, 刘岩. 基于CMIP6模式下黑龙江省的未来气象干旱演变预估[J]. *人民珠江*, 2025, 46(2): 21–28.
- [29] Ji G, Lai Z, Yan D, et al. Spatiotemporal patterns of future meteorological drought in the Yellow River Basin based on SPEI under RCP scenarios [J]. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2022, 14(1): 39–53.
- [30] Zhou J, Lu H, Yang K, et al. Projection of China's future runoff based on the CMIP6 mid-high warming scenarios [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(3): 528–546.
- [31] 王飞, 王宗敏, 杨海波, 等. 基于SPEI的黄河流域干旱时空格

- 局研究[J].中国科学:地球科学,2018,48(9):1169-1183.
- [32] 韩兰英,张强,贾建英,等.气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性[J].中国沙漠,2019,39(5):1-10.
- [33] 王欣毅,杨洁,林良国,等.基于Sen+Mann-Kendall陕西省植被覆盖度时空变化规律研究[J].农业与技术,2023,43(7):62-66.
- [34] 刘智源,李继红.2000-2020年黑龙江省植被时空变化对气候因子响应[J].森林工程,2024,40(1):85-97.
- [35] Guan X, Zhu K, Huang X, et al. Precipitation changes in semi-arid regions in east Asia under global warming[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 762348.
- [36] 谢京凯.气候变异和人类活动对黄河流域水储量变化的影响[D].杭州:浙江大学,2020.

## Prediction of future drought in the Yellow River Basin based on CMIP6 and remote sensing inversion

Wang Chi<sup>1</sup>, Zhang Zhengcai<sup>1</sup>, Han Lanying<sup>1,2</sup>, Zhang Lingguang<sup>1</sup>, Zhang Zhenyu<sup>1</sup>,  
Wang Siqi<sup>1</sup>, Lei Yunzhu<sup>1</sup>, Zhang Wenhui<sup>1</sup>, Fang Pan<sup>1</sup>, Chen Yufeng<sup>1</sup>

(1. School of Geography Science and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Key laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Provin / Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** Under the background of climate warming, droughts are intensifying globally. The Yellow River Basin is a climate-sensitive region in China and one of the areas frequently affected by extreme climate events, and clarifying the spatiotemporal evolution characteristics of drought in the Yellow River Basin is of significant theoretical and practical importance for regional environmental improvement. Based on CMIP6 model data and remote sensing inversion data, this study employs the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), the remotely sensed Temperature Vegetation Drought Index (TVDI), the Hurst index, the Theil-Sen Median trend analysis, and the Mann-Kendall test to investigate the spatiotemporal evolution characteristics of drought occurrence in the Yellow River Basin and to discuss the future drought extent and trends under climate change. The results indicate that from 2024 to 2100, the Yellow River Basin will experience a cumulative temperature increase of  $1.97 \pm 0.58$  °C and a precipitation increase of  $138.99 \pm 60.52$  mm; drought frequency in the basin shows a decreasing trend, indicating a warm-wet transition; predictions from the Hurst index further suggest that drought evolution exhibits positive persistence; the proportion of drought-affected area in the Yellow River Basin shows a declining trend, with 35.46% of the middle reaches exhibiting a wetting trend, while 21.91% of the northwestern upper reaches and parts of the lower reaches show a drying trend. The research findings can provide scientific support for climate change response and drought risk management in the Yellow River Basin.

**Key words:** CMIP6; SPEI; TVDI; drought; Yellow River Basin