



王世佳,田静. 黄河流域干旱传播特征及其驱动因子分析[J]. 中国农业大学学报,2025,30(07):24-35.

WANG Shijia, TIAN Jing. Drought propagation characteristics in the Yellow River Basin and its driving factor analyse [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(07): 24-35.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.03

黄河流域干旱传播特征及其驱动因子分析

王世佳^{1,2} 田静^{1*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;

2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要 为定量揭示黄河流域气象干旱向农业干旱的传播规律及其驱动因子的影响,本研究基于1982—2021年黄河流域的降水数据和自校准帕默尔干旱指数(self-calibrated Palmer Drought Severity Index, sc-PDSI)数据,采用标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)和sc-PDSI分别表征气象干旱和农业干旱,利用最大皮尔逊相关系数法计算并解析黄河流域各季节气象干旱向农业干旱的传播时间及其时空分布特征。此外,本研究还综合考虑了影响干旱传播的气象因子(降水、温度、潜在蒸散发)、下垫面因子(坡度、坡向、高程和地表切割深度)以及人类活动(土地利用类型),运用地理探测器方法探究这些驱动因子对黄河流域气象干旱向农业干旱传播时间的解释力。结果表明黄河流域气象干旱向农业干旱的传播时间具有明显的季节性和区域性特征。时间上,秋冬季传播时间明显高于春夏季;空间上,各季节的干旱传播时间呈现显著的空间异质性。此外,对驱动因子分析结果显示,不同季节干旱传播时间空间异质性的主导因子存在差异:春夏季主要是高程、气温和降水,秋冬季主要是降水。交互探测分析进一步表明,降水和气温以及降水和高程的交互作用影响最大。综上,本研究可为制定有效的干旱预警机制、优化水资源管理策略提供科学依据。

关键词 气象干旱; 农业干旱; 干旱传播时间; 地理探测器; 黄河流域

中图分类号 S423

文章编号 1007-4333(2025)07-0024-12

文献标志码 A

Drought propagation characteristics in the Yellow River Basin and its driving factor analyse

WANG Shijia^{1,2}, TIAN Jing^{1*}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research/Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To quantitatively reveal the propagation patterns of meteorological drought to agricultural drought and the influence of driving factors in the Yellow River Basin, this study utilized precipitation data and the self-calibrated Palmer Drought Severity Index (sc-PDSI) data from 1982 to 2021 in the Yellow River Basin. The Standardized Precipitation Index (SPI) and sc-PDSI were employed to characterize meteorological drought and agricultural drought, respectively. The maximum Pearson correlation coefficient method was used to calculate and analyze the propagation time and its spatiotemporal distribution characteristics of meteorological drought to agricultural drought across different seasons. Furthermore, this study comprehensively considered meteorological factors (precipitation, temperature, potential evapotranspiration), underlying surface factors

收稿日期: 2024-11-11

基金项目: 鄂尔多斯市科技重大专项(ZD20232303);国家自然科学基金项目(42071327)

第一作者: 王世佳(ORCID:0009-0005-7262-153X),硕士研究生,E-mail:wangshijia8025@igsrr.ac.cn

通讯作者: 田静(ORCID:0000-0002-7442-352X),副研究员,主要从事遥感水文专业研究,E-mail:tianj.04b@igsrr.ac.cn

(slope, aspect, elevation, and surface incision depth), and human activities (land use type) that influence drought propagation, using the GeoDetector method to explore their explanatory power on drought propagation time. Results reveal that the propagation time of meteorological to agricultural drought in the Yellow River Basin has pronounced seasonal and regional characteristics. Temporally, the propagation time in autumn and winter is noticeably longer than in spring and summer. Spatially, drought propagation time shows significant spatial heterogeneity across seasons. Factor detector indicates that the dominant factors influencing the spatiotemporal heterogeneity of drought propagation time vary across seasons: elevation, temperature, and precipitation are the primary factors in spring and summer, while precipitation is the main factor in autumn and winter. Interaction detection analysis further reveals that the interactions between precipitation and temperature, as well as precipitation and elevation, have the most significant impact. In conclusion, this study provides a scientific basis for formulating effective drought early warning mechanisms and optimizing water resource management strategies.

Keywords meteorological drought; agricultural drought; drought propagation time; GeoDetector; the Yellow River Basin

干旱灾害是最常见、影响最大的灾害之一^[1]。通常最早由降水亏缺(气象干旱)引发,当气象干旱持续,进一步造成土壤水分下降、径流量减少、地下水位下降和农业减产时,引发水文干旱和农业干旱,进而对水文系统、生态系统和农业系统产生广泛的影响^[2]。我国黄河流域降水量小,蒸发量大,是旱灾频发的地区之一。已有研究表明,20世纪中期以来,黄河流域农业干旱事件更加频繁,受灾面积逐年增加,连季干旱造成的重度干旱和特大干旱时常发生^[3-5]。1960年冬季干旱持续至次年3月,导致黄淮海地区近1 300万 hm^2 农田遭受严重旱灾^[6];1995、1997、1998和2000年,内蒙古、宁夏及甘肃遭受特大干旱,导致农作物大面积受灾,粮食减产约230万 t ^[4];2008年冬季至2009年春季甘肃、陕西、河南、山西和山东5省发生的干旱面积高达7.53万 km^2 ,造成9 000万人受灾,农作物受灾面积高达9万 km^2 ,直接经济损失多达60亿元^[7];2024年5月以来,由于降水偏少加上气温偏高导致干旱,黄河水利委员会对甘肃、山西、陕西、河南和山东省启动了干旱防御IV级应急响应^[8]。

黄河流域干旱的时空分布特征已取得不少研究成果,如:王飞等^[3]利用标准化降水蒸散指数解析黄河流域及其8个水资源分区的干旱时空格局,发现近55年来黄河流域的干旱趋势显著增强,其中兰州至河口镇地区的干旱化最为突出;牛亚婷等^[9]基于标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)研究了黄河流域干旱时空特征,结果表明黄土高原及黄河下游特大干旱事件的发生频率明显增加;刘晔等^[10]利用修正的帕默尔干旱指数

(self-calibrated Palmer Drought Severity Index, sc-PDSI)探究了流域不同气候区农业干旱的时空演变规律,发现黄河上游的农业干旱状况有所缓解,而下游地区的干旱程度进一步加剧;姜雨彤等^[11]则对复合高温干旱事件的时空演变特征进行了深入分析,发现近年来黄河流域大部分地区复合高温干旱事件的发生频率持续上升。在已有黄河流域干旱的时空分布特征研究的基础上,为精确掌握干旱的发生和发展过程,以实现有效的干旱应对和预警,还需要对干旱由气象干旱向农业干旱传递规律进行定量监测和分析。

气象干旱主要表现为降水量的减少,这一过程直接影响土壤水分的补充。随着气象干旱的持续,土壤水分逐步减少,导致土壤水分储备下降,最终形成土壤水分亏缺^[12]。同时,干旱通常伴随高温天气,使蒸发和作物蒸腾作用增强,加速土壤水分流失,进一步加剧干旱影响。土壤水分的不足限制了作物根系的水分吸收,进而引发作物水分胁迫^[13],作物的光合作用、养分吸收等生理过程都会受到严重影响,表现为生长减缓、叶片萎蔫、光合作用效率低,甚至枯死^[14],最终导致农业减产,形成农业干旱,详见图1。深入理解气象干旱向农业干旱的传递规律,对于更精准地监测农业干旱,进而采取有效的管理措施减轻干旱对农业生产的影响具有重要指导价值。黄河流域是中国重要的农业生产区,在全国粮食生产和水资源调配中扮演着关键角色,尤其是北方干旱地区,其灌溉农业严重依赖黄河的水源,因此研究气象干旱向农业干旱的传递规律,对于黄河流域的农业可

持续发展和水资源管理具有重要意义,但黄河流域在该领域的研究仍十分欠缺。

因此,本研究基于1982—2021年的SPI数据和sc-PDSI数据,采用最大皮尔逊相关系数法探究

黄河流域气象干旱向农业干旱的传递时间规律,并进一步利用地理探测器定量评估不同驱动因子及其交互作用对于干旱传递时间空间异质性的影响,以为黄河流域干旱管理提供参考支撑。

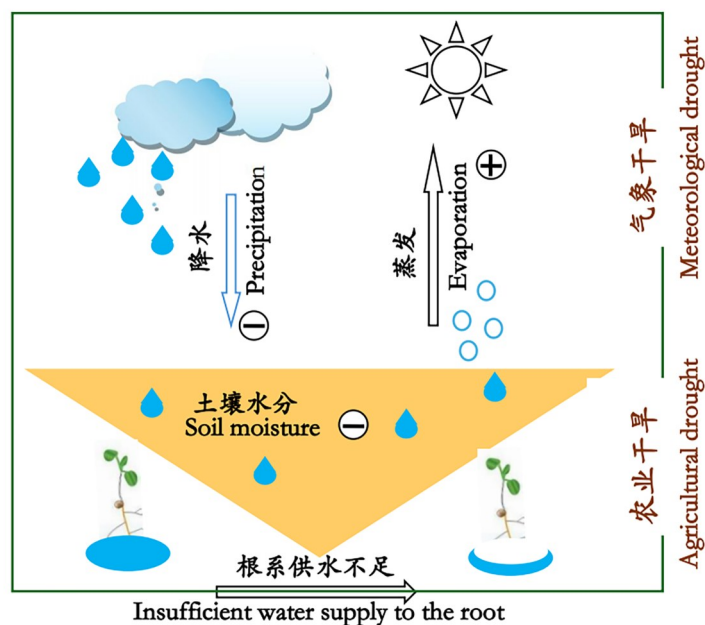


图1 气象干旱向农业干旱传播的机制示意图

Fig.1 Mechanism diagram for the propagation of meteorological drought to agricultural drought

1 研究区概况

黄河发源于青藏高原的巴颜喀拉山北麓,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、山东和河南等9个省(区),最终汇入渤海。黄河干流全长5 464 km,流域总面积约79.5万km²。该流域位于95°53′~119°05′ E,32°10′~41°50′ N,地势起伏较大,自西向东地势逐渐下降,平均海拔约为3 133 m。黄河流域属于典型的季风气候,受大气环流和季风的影响,不同区域的气候差异显著。气候因子与下垫面因子均呈现出明显的空间异质性。

作为我国重要的粮食生产基地^[15],黄河流域的粮食产量约占全国的三分之一,对于国家粮食安全与农业稳定发展具有重要意义。该流域的土地利用类型以草地为主,农田主要在黄河干流及其主要支流周围(图2),广泛的耕地为粮食和经济作物的种植提供了充足的空间。由于流域位于半干旱、半湿润地区,农业生产高度依赖灌溉,黄河水成为流域内重要的灌溉水源,其水资源的稳定供给直接关

系到农业的可持续发展。

2 研究数据及方法

2.1 研究数据

本研究的气象数据(降水、气温和潜在蒸散发)来自国家青藏高原科学数据中心提供的中国逐月气象数据集,该数据集的空间分辨率为0.008 333 3°(约1 km),时间覆盖1901年1月—2023年12月。数据集基于CRU发布的全球0.5°气候数据集和WorldClim发布的全球高分辨率气候数据集,通过Delta空间降尺度方案在中国地区进行了降尺度处理,并使用496个独立气象观测点数据进行了验证,验证结果可靠^[16]。自校准帕尔默干旱指数sc-PDSI来源于英国东英吉利大学气候研究中心(CRU)发布的高分辨率月尺度气象格点数据集CRU TS4.07 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>),该数据集提供全球范围的sc-PDSI数据,空间分辨率为0.5°×0.5°,为了与气象数据保持一致,本研究将sc-PDSI数据重采样到1 km分辨率。研究选取了

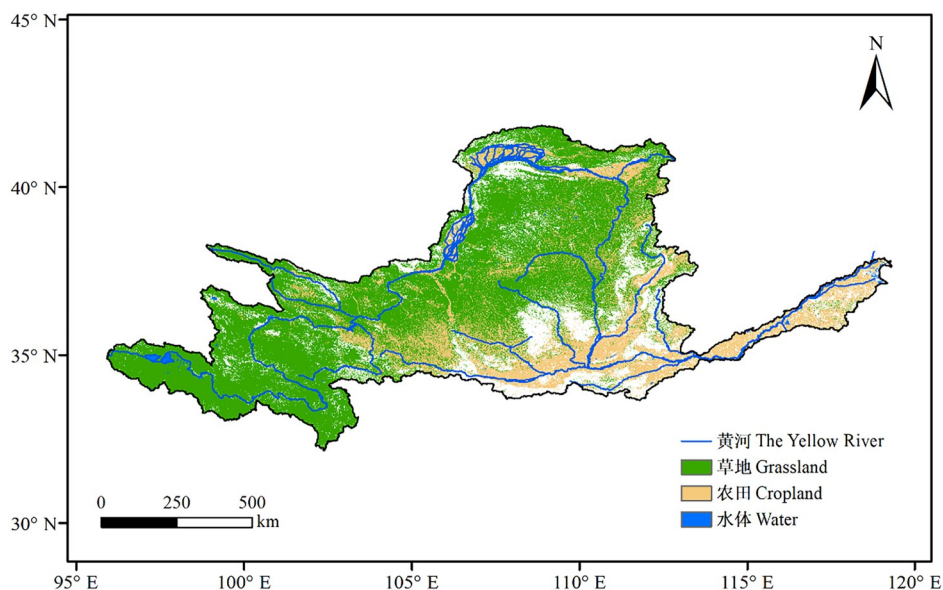


图2 黄河流域农田分布

Fig.2 Distribution of farmland in the Yellow River Basin

黄河流域1982—2021年共480个月的数据。

研究中使用的下垫面数据(高程、坡度、坡向、地表切割深度)来源于“国家冰川冻土沙漠科学数据中心/国家特殊环境、特殊功能观测研究台站共享服务平台”(http://www.ncdc.ac.cn)。其中高程DEM数据是以SRTM30 m分辨率DEM数据为数据源进行数据拼接生成的;坡度、坡向和地表切割深度数据利用Hydrology水文工具软件提取获得,并经过DEM改正,质量良好。所有下垫面数据均已重采样至1 km,以和气象数据集匹配。此外,1 km分辨率的土地利用类型数据来源于生态环境研究中心。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水指数的计算

Mc Kee等^[17]在描述科罗拉多州的干旱状况时首次提出标准化降水指数SPI。SPI以实测降水资料为基础,可以描述多时空尺度的气象干旱特征,被广泛应用于干旱分析的相关研究中^[18]。

降水的时间序列通常服从偏态分布,一般选用伽马(Gamma)分布拟合降水时间序列,在此基础上计算出相应的累积概率,最后将累积概率转换为标准正态分布,即可求得相应的SPI值。本研究基于逐月的降水数据实现了基于1月至12月累积降水的SPI计算,分别记为SPI-1, SPI-2, ..., SPI-12。

2.2.2 基于最大相关系数法的干旱传递时间量化

农业干旱的发生通常滞后于气象干旱,这种时

间延迟被称为气象干旱向农业干旱的传播时间。为了衡量这一传播时间,本研究采用了最大相关系数法,该方法常用于衡量不同干旱类型之间的传递时间,能够清晰有效地揭示滞后效应,并在干旱传播研究中得到了广泛应用^[19,20]。本研究基于皮尔逊相关系数(r)进行量化,其计算公式如下:

$$r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: X 和 Y 为2个变量; r 为皮尔逊相关系数; $\text{Cov}(X, Y)$ 为 X 和 Y 的协方差; $\sigma(X)$ 为 X 的标准差; $\sigma(Y)$ 为 Y 的标准差; $\bar{x}$ 为 x_i 的均值; $\bar{y}$ 为 y_i 的均值。

利用皮尔逊相关系数计算了不同时间尺度SPI(SPI-1, SPI-2, ..., SPI-12)和sc-PDSI之间的相关性,其中最大相关系数对应的SPI- n ($n=1, 2, \dots, 12$)的时间尺度 n 即为气象干旱至农业干旱的传递时间。

2.2.3 地理探测器方法

地理探测器是度量空间分异性并揭示空间分异驱动力的统计学方法^[21]。地理探测器不仅可以探测驱动因子对因变量的单独影响(因子探测器),还可以定量分析各驱动因子交互作用对因变量的

解释力(交互作用探测器)。

因子探测器方法用 q 值度量某驱动因子 X 对因变量 Y 的空间分异的解释力。 q 值的具体公式如下^[22]:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{2}$$

式中: L 为因变量 Y 或者自变量 X 的分层数; N_h 、 σ_h^2 为层 h 的样本单元数和方差; N 、 σ^2 为整个研究区的样本单元数和方差。 $q \in [0, 1]$, $q=0$ 说明自变量 X 对因变量 Y 没有任何解释力; $q=1$ 说明自变量 X 完全控制了因变量 Y 的空间分布^[18]。

交互作用探测器用于评估驱动因子 X_1 和 X_2 共同作用时对因变量 Y 的解释力,根据 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$ 之间的关系,判断驱动因子 X_1 和 X_2 之间是独立作用还是交互作用,以及其交互表现为协同作用还是抑制作用(表1)。

表1 自变量X1和X2对因变量Y交互作用的分类

Table 1 Classification of interactions between independent variables X1 and X2 on dependent variable Y

判断依据 Judgment criteria	交互作用 Interaction
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

智协飞等^[23]指出,干旱传播主要受气象因子、下垫面因子和人类活动3个方面的控制与影响。本研究选取降水、潜在蒸散发和气温作为气象因子,高程、坡度、坡向和地表切割深度作为下垫面因子,土地利用类型作为人类活动因子进行分析(图3)。气象因子直接影响干旱的发生和传播,降水决定水分的供给,而潜在蒸散发和气温则影响水分的蒸发速率,进而对干旱的形成和扩展起到关键作用。下垫面因子则通过影响水分的分布、渗透和积累能力,直接作用于干旱的传播过程。特别是地形特征(如高程、坡度、坡向等)对水分的存储和流动有重要影响,从而改变干旱的时空特征。而土地利用类型反映了人类活动对下垫面类型的改变,直接影响

土壤水分的分布与作物生长以及局地陆气作用,对干旱传播的加速或延缓具有重要作用。通过地理探测器分析,能够定量评估气象因子、下垫面因子与人类活动在黄河流域气象干旱向农业干旱传播中的具体影响,从而更准确地揭示干旱传播的特征与机制。这一分析有助于为干旱预警和农业管理提供科学依据。

本研究利用地理探测器探测每个季节影响黄河流域气象干旱向农业干旱传播时间空间分布格局与分异性特征的主要驱动因子^[24]。地理探测器适用于自变量为定性数据,因变量为定量数据的情况^[25],设传播时间为因变量,各驱动因子为自变量,其中降水、高程、温度、潜在蒸散发、坡向、地表切割

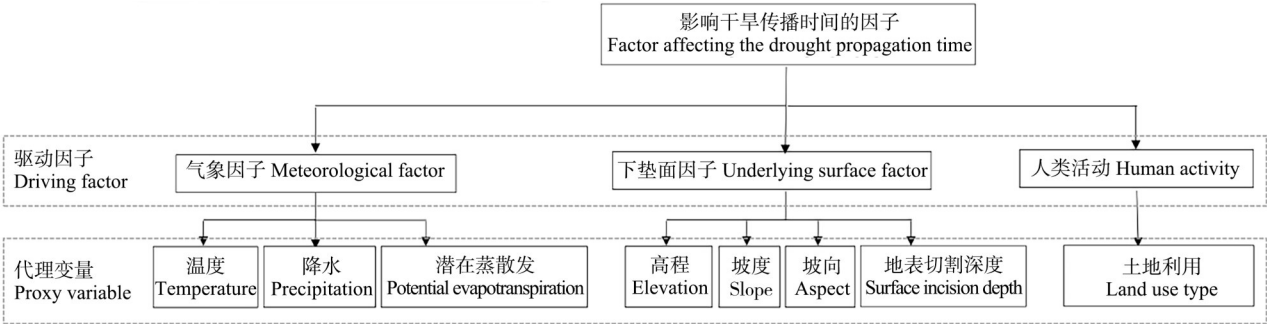


图3 本研究中不同驱动因子的参数选择

Fig. 3 The parameter selection for different driving factor in this study

深度和坡度为连续性定量数据,需要进行离散化处理。本研究采用自然断点法将自变量进行了适当的离散化。

3 结果与分析

3.1 气象干旱向农业干旱传递时间的特征

图4为黄河流域不同月份的SPI- n ($n=1,2,\dots,12$)与sc-PDSI之间的最大相关系数的空间分布情

况。可见黄河流域大多数区域的最大相关系数均 >0.65 。具体而言,相关系数 >0.65 的网格所占比例分别为:春季81.5%,夏季90.1%,秋季92.6%以及冬季84.7%。结果表明,SPI- n 与sc-PDSI之间存在显著的相关性,尤其在夏季和秋季,相关性表现尤为显著。在空间上,黄河流域中部和北部地区SPI- n 与sc-PDSI的最大相关系数整体低于西部和东部地区,呈现出明显的区域差异。

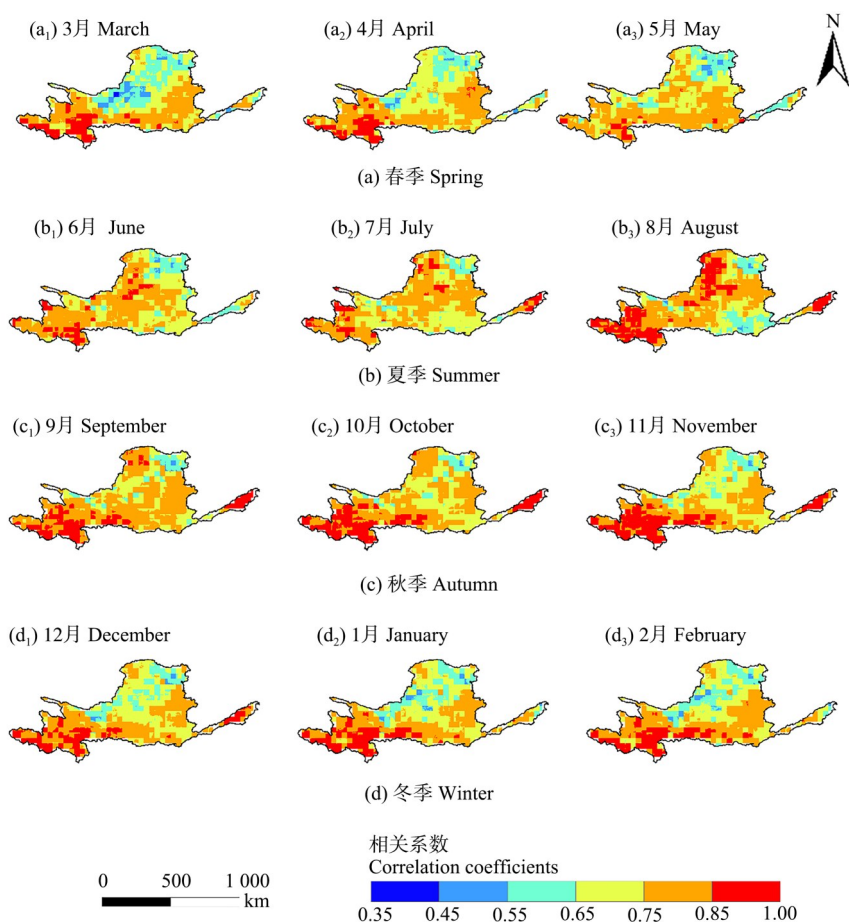


图4 黄河流域不同月份SPI- n 与sc-PDSI最大相关系数的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of maximum correlation coefficients between SPI- n and sc-PDSI in different months in the Yellow River Basin

黄河流域不同格点SPI- n ($n=1,2,\dots,12$)与sc-PDSI最大相关系数对应的时间尺度即为气象干旱向农业干旱的传播时间^[22],其空间分布图如图5所示。可见,黄河流域气象干旱向农业干旱的传播时间具有明显的季节性和区域性特征。从时间上看,秋冬季的气象干旱向农业干旱的传播时间明显高于春夏季的传播时间;在空间分布上,不同季节的干旱传播时间

也表现出显著差异。此外,春夏季,干旱传播时间较长的区域主要集中在黄河流域的西部地区。进入秋季后,中部地区的干旱传播时间明显变长,冬季则在整个流域范围内,传播时间普遍延长。

表2统计了整个流域不同季节的传播时间。可见黄河流域气象干旱向农业干旱的传播时间在不同季节之间有所不同。其中:春季和夏季时间较

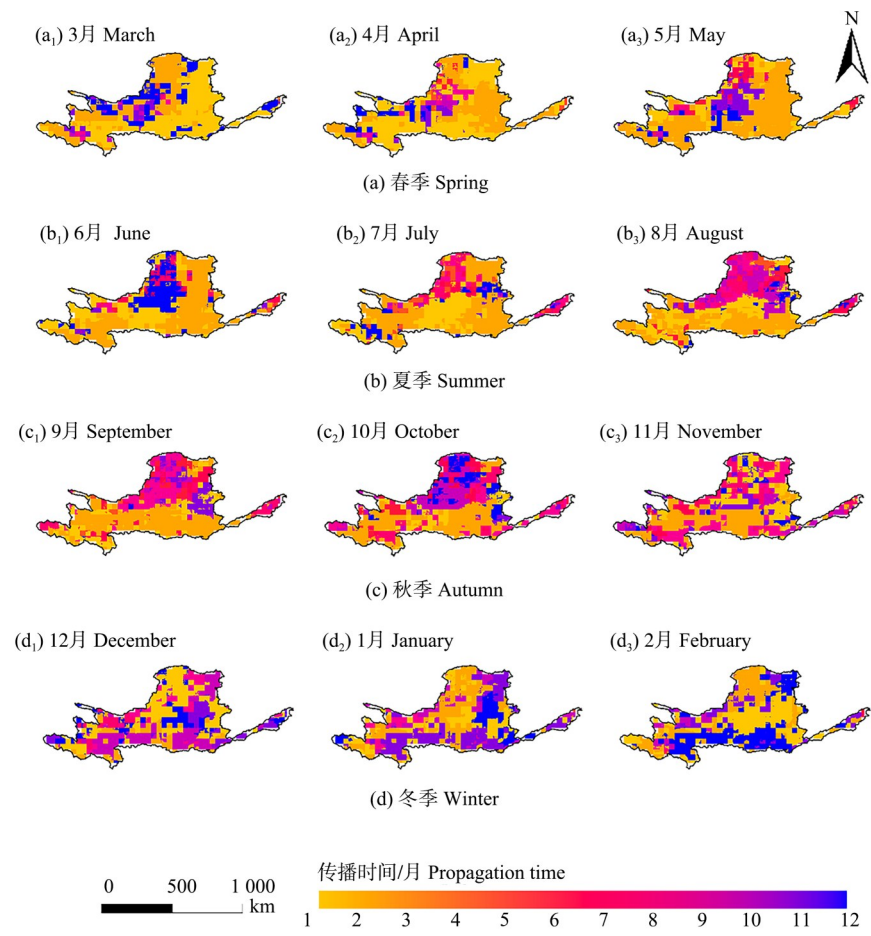


图5 黄河流域不同月份气象干旱向农业干旱传播时间的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of propagation time from meteorological drought to agricultural drought in different months in the Yellow River Basin

表2 黄河流域气象干旱到农业干旱的传播时间

Table 2 Propagation time from meteorological drought to agricultural drought in the Yellow River Basin 月

季节 Season	月份 Month	传播时间 Propagation time	均值 Mean
春季 Spring	3月 March	4.4	4.30
	4月 April	3.9	
	5月 May	4.6	
夏季 Summer	6月 June	4.8	4.77
	7月 July	4.3	
	8月 August	5.2	
秋季 Autumn	9月 September	5.4	5.90
	10月 October	6.5	
	11月 November	5.8	
冬季 Winter	12月 December	6.8	6.60
	1月 January	6.7	
	2月 February	6.3	

短,分别为 4.3 和 4.77 月;秋冬季较长,分别为 5.9 和 6.6 月。这与图 5 呈现的结果是一致的。

春夏季气象干旱向农业干旱的传播时间较短,主要由于气温较高,蒸散发作用强烈,使土壤水分流失加快,导致农业干旱迅速显现。而且,春夏季正值作物快速生长期,水分需求旺盛,当遇土壤水分亏缺时,作物生长受阻明显,进一步加快农业干旱的传播速度。

秋冬季传播时间较长,主要由于气温降低,蒸散发作用减弱,土壤水分消耗变慢,使农业干旱的响应滞后。此外,秋季作物逐渐成熟,水分需求减少,而冬季作物生长缓慢甚至进入越冬期,对干旱的敏感性较低。

3.2 气象干旱-农业干旱传播的驱动力分析

3.2.1 单因子驱动力解析

利用地理探测器模型量化不同因子对黄河流域干旱传播时间空间异质性的影响程度的单因子

驱动力分析,结果见图 6。可见气象干旱向农业干旱的传播受多种因素影响,不同季节的主要驱动因子存在差异:春夏季节,气温、高程和降水是主要驱动因素;而秋冬季节降水对干旱传播时间的影响最为显著。其中:春季温度回升,作物进入快速生长期,对水分的需求增加,因此气象干旱一旦发生,会迅速传导至农业干旱;同时,春夏季高温增强了蒸散发,使土壤水分流失加快,进一步加速了干旱传播的进程。此外,高程的影响在春夏季较为显著,也可能与高程对气温的影响有直接关系,并且可能与地形对降水的分布和土壤水分保持能力的影响有关。降水同样是主要驱动因素,因为降水直接影响土壤水分的补给、调节蒸散发过程和影响地下水位。秋冬季节的干旱传播机制则有所不同,降水成为最主要的驱动因素,其影响力远超其他因素。在

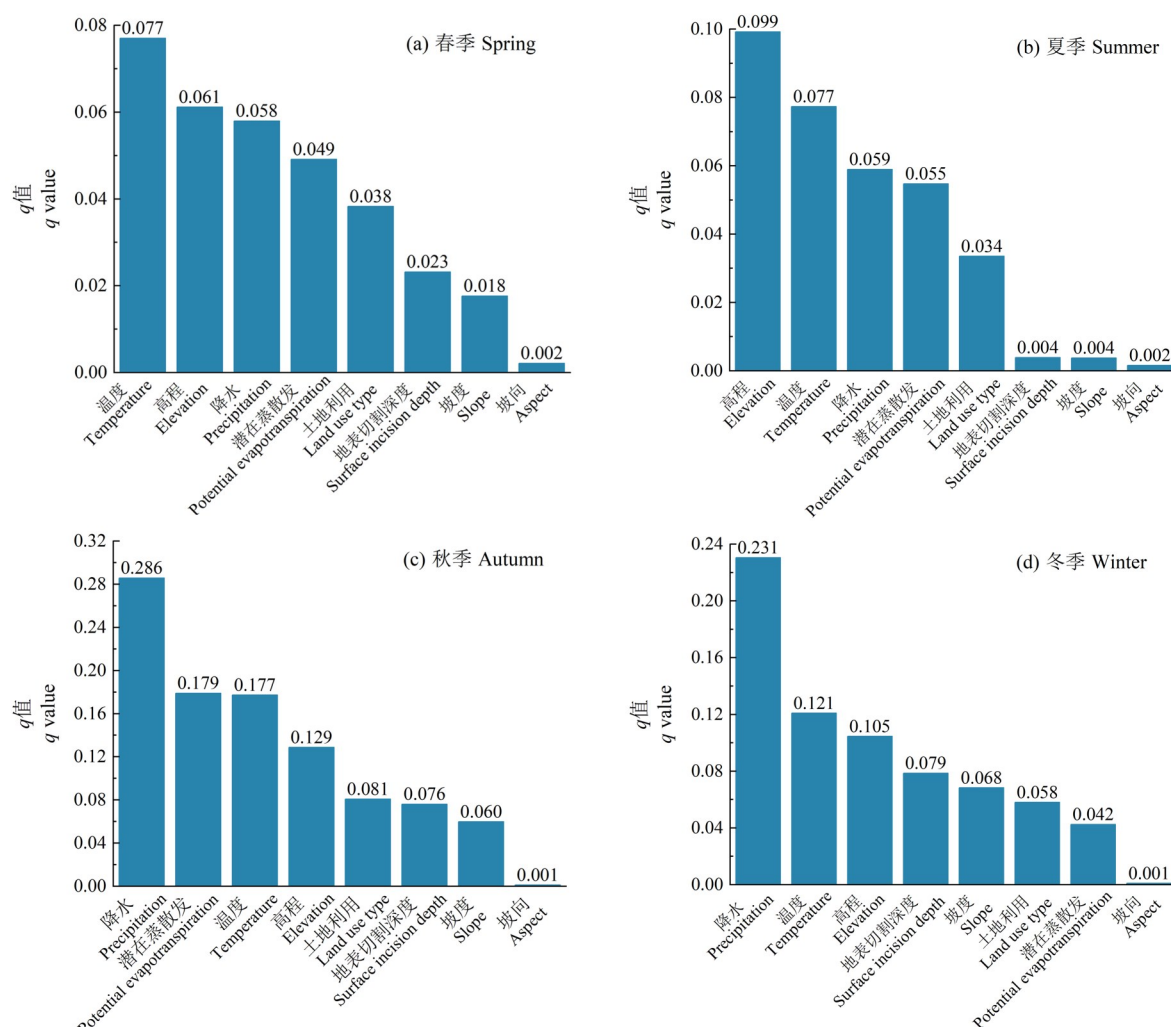


图 6 不同季节驱动因子对干旱传播时间的驱动力

Fig. 6 Driving force of driving factor on drought propagation time in different season

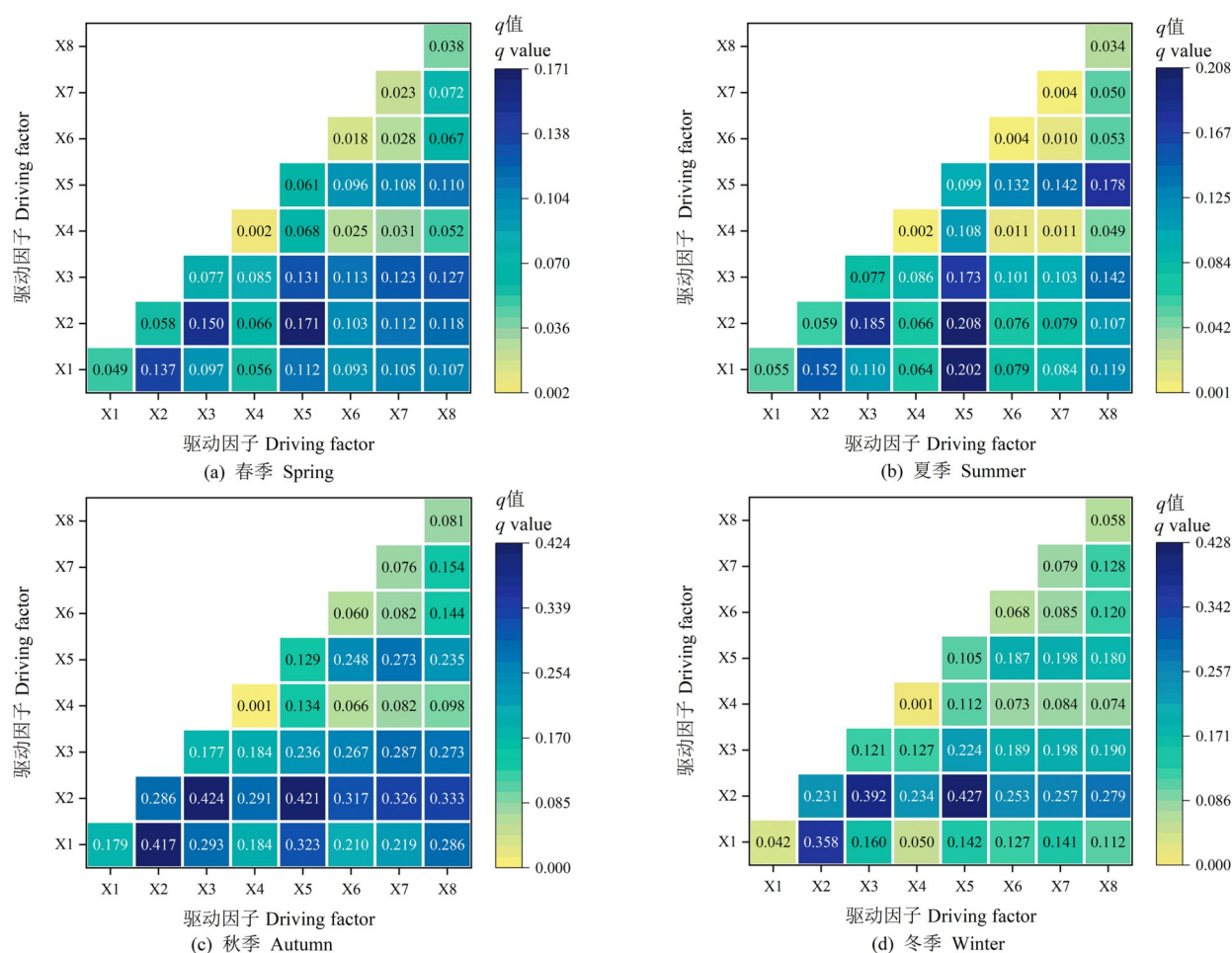
秋冬季,温度下降,蒸散发作用减弱,土壤水分保持能力增强,农业干旱的传播速度相对较慢。然而,若降水减少,土壤水分得不到补充,农业干旱仍会显现。此外,图6也显示出,在各个季节,除高程外,气象因素的影响力明显高于土地利用,而土地利用的作用又强于其他下垫面因素。

3.2.2 多因子交互作用解析

采用交互探测方法对气象干旱向农业干旱传播过程中,各驱动因子的交互作用对于干旱传播时间的驱动力进行分析,结果见图7。可见各因子的交互作用强度普遍高于单一因子作用,并具有双因子增强或非线性增强特征。这说明气象干旱向农业干旱的传播并非由单一因素决定,而是多种环境要素共同作用的结果。

在不同季节中,交互作用最强的因子组合均与降水有关,表明降水在整个干旱传播过程中起到了核心作用。总体而言,4个季节中,降水和高程、降水和气温都表现出最强的交互作用, q 值分别为0.171、0.208、0.424和0.427。这与单因子分析的结果具有较好的一致性,单因子结果也表明降水、气温和高程的主导作用。从下垫面因素来看,高程与地表切割深度的交互作用对于干旱传播时间的影响最强,这可能是由于地形起伏较大的地区,土壤水分储存能力不同,影响了农业干旱的传播速度。其 q 值在4个季节分别为0.108、0.142、0.273、0.198。

总体而言,多因子交互作用分析表明,降水是气象干旱向农业干旱传播的核心驱动因素,并且其与其他因子的交互作用在不同季节均表现出较强



X1~X8分别代表潜在蒸散发、降水、温度、坡向、高程、坡度、地表切割深度和土地利用类型。

The variables X1-X8 denote potential evapotranspiration, precipitation, temperature, aspect, elevation, slope, surface incision depth, and land use type, respectively.

图7 不同季节各因子交互作用对于干旱传播时间的驱动力

Fig.7 Driving force of interactions among multiple factors on drought lag time in different season

的影响力。秋冬季节,由于蒸散发作用减弱,降水对农业干旱的影响更加明显。而在春夏季节,温度和高程也在干旱传播过程中发挥重要作用。这些结果强调了干旱治理过程中需要综合考虑多种因素,并根据季节特征采取针对性的应对措施,如优化灌溉管理、调整作物种植结构,以及加强对地形因素的合理利用,以减缓气象干旱向农业干旱的传播速度和影响范围。

4 讨论

黄河流域是我国重要的粮食生产基地,主要包括宁蒙河套平原、汾渭盆地和引黄灌区等区域^[26]。研究该流域气象干旱向农业干旱的传播规律,对揭示干旱对农业生产的潜在威胁、优化农业水资源管理以及保障粮食安全具有重要意义。尽管已有研究探讨了黄河流域气象干旱向水文干旱的传播机制,但对农业干旱响应的系统性研究仍显不足。Dai等^[27]分析了渭河流域气象干旱传播向农业干旱的传播机制及水文气象因子的影响,毛文静等^[12]研究了土地利用类型对于旱传播的影响,但这些研究仅局限于渭河流域,缺乏对黄河流域整体性的研究。

本研究结果显示黄河流域气象干旱向农业干旱的传播时间具有显著的季节性特征,秋冬季传播时间较长,春夏季较短,这与黎云云^[7]的研究结论一致。影响干旱传播时间的因子主要包括气象因子、下垫面因子和人类活动。降水是气象干旱向农业干旱传播的主要驱动力,其减少直接导致土壤湿度下降,尤其是表层土壤水分迅速减少,影响作物根系吸水能力。气温升高则加剧蒸发,加速土壤水分流失,进一步恶化农业干旱。下垫面因子如高程、坡度和坡向通过调控土壤水分的存储与消耗,显著影响干旱传播时间。此外,土地利用类型通过改变地表水分储存和蒸散发特征,影响干旱传播速率,例如森林和草地能够缓解干旱传播,而耕地和城市化地区则加速传播。总体而言,气象因子的影响最大,土地利用次之,其他下垫面因子(除高程外)影响最小。

需要指出的是,本研究主要集中于气象因子和下垫面因子的分析,并通过土地利用类型初步探讨了人类活动对气象干旱向农业干旱传播时间的影响。灌溉作为缓解农业干旱的重要措施,由于数据缺失^[28]及研究区灌溉措施的复杂性^[29],本研究未考虑其对干旱

传播的影响,这可能带来一定的不确定性。然而,本研究涵盖了最重要的气象因子和下垫面因子,相关结果仍为理解干旱传播提供了重要的基础性见解。未来的研究可结合作物模型或水文模型的灌溉模块^[30,31],进一步探讨灌溉对干旱传播的影响机制。

5 结论

为解析黄河流域气象干旱向农业干旱的动态响应过程,并揭示气象因子(降水、温度、潜在蒸散发)、下垫面因子(高程、坡度、坡向、地表切割深度)和人类活动(土地利用类型)对传播时间的驱动机制,本研究基于黄河流域1982—2021年的降水数据和自校准帕默尔干旱指数数据,利用最大皮尔逊相关系数法和地理探测器方法,探讨了不同季节气象干旱向农业干旱传播时间的时空分布特征以及驱动因子对干旱传播时间的影响。主要结论如下:

1)黄河流域气象干旱向农业干旱的传播时间呈现显著的季节性和空间异质性。春夏季传播时间较短,且长传播时间主要集中于西部地区;秋冬季传播时间显著延长,其中秋季以中部地区为主,冬季则全流域普遍延长。

2)黄河流域干旱传播时间的驱动因子具有显著的季节性差异:春夏季以气温、高程和降水为主,秋冬季则以降水为主导。总体而言,气象因子的影响最大,土地利用次之,其他下垫面因子(除高程外)影响最小。

3)黄河流域干旱传播时间的空间异质性由多因子协同作用驱动,任意两因子间均表现为协同增强效应,其中冬季降水与高程的交互作用最为显著。

参考文献 References

- [1] 张翔,黄舒哲,管宇航. 干旱传播的研究进展、挑战与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(6): 563-579
Zhang X, Huang S Z, Guan Y H. Research progress, challenges, and prospects in drought propagation[J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(6): 563-579 (in Chinese)
- [2] Zhang X, Hao Z C, Singh V P, Zhang Y, Feng S F, Xu Y, Hao F H. Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 156021
- [3] 王飞,王宗敏,杨海波,赵勇. 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
Wang F, Wang Z M, Yang H B, Zhao Y. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River Basin based on SPEI[J].

- Scientia Sinica (Terrae)*, 2018, 48(9): 1169-1183 (in Chinese)
- [4] 黎云云, 畅建霞, 樊晶晶, 余波. 气候和土地利用变化下黄河流域农业干旱时空演变及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 84-93
Li Y Y, Chang J X, Fan J J, Yu B. Agricultural drought evolution characteristics and driving mechanisms in the Yellow River Basin under climate and land use changes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 84-93 (in Chinese)
- [5] 周帅, 王义民, 畅建霞, 郭爱军, 李紫妍. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1231-1241
Zhou S, Wang Y M, Chang J X, Guo A J, Li Z Y. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50 (10): 1231-1241 (in Chinese)
- [6] 谈英武, 张玫, 杨立彬. 从黄河流域2009年初的旱情看建设南水北调西线工程的必要性和紧迫性[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(4): 1-4
Tan Y W, Zhang M, Yang L B. Necessity and urgency of constructing the western route project of SNWDP by considering drought at the Yellow River Basin in the year of 2009 [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7 (4): 1-4 (in Chinese)
- [7] 黎云云. 气候和土地利用变化下流域干旱评估—传播—驱动—预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018
Li Y Y. Research on the drought assessment-propagation-driving-prediction under the climate and land use land cover change scenarios [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018 (in Chinese)
- [8] 水利部黄河水利委员会. 新华社: 黄委针对黄河流域五省启动干旱防御IV级应急响应[EB/OL]. [2024-11-11]. http://www.yrcc.gov.cn/xwdt/mtgz/202406/t20240613_432509.html
Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Xinhua News Agency: The Yellow River Conservancy Commission has activated a Level IV emergency response for drought prevention in five provinces within the Yellow River Basin [EB/OL]. [2024-11-11]. http://www.yrcc.gov.cn/xwdt/mtgz/202406/t20240613_432509.html (in Chinese)
- [9] 牛亚婷, 王素芬. 基于SPI的黄河流域干旱时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(4): 85-90
Niu Y T, Wang S F. Temporal and spatial characteristics of drought based on standardized precipitation index in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(4): 85-90 (in Chinese)
- [10] 刘晔, 薛万来. 黄河流域农业干旱时空演变规律及其自然恢复期特征[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 213-221
Liu Y, Xue W L. Temporal and spatial evolution of agricultural drought and its natural recovery period in the Yellow River Basin [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(2): 213-221 (in Chinese)
- [11] 姜雨彤, 郝增超, 冯思芳, 张宇, 张璇, 付永硕, 郝芳华. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 70-77
Jiang Y T, Hao Z C, Feng S F, Zhang Y, Zhang X, Fu Y S, Hao F H. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River Basins [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 70-77 (in Chinese)
- [12] 毛文静, 牛俊. 渭河流域气象干旱向农业干旱的传播研究[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(8): 233-244
Mao W J, Niu J. Study on the propagation of meteorological drought to agricultural drought in Weihe River Basin [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 233-244 (in Chinese)
- [13] 冯广龙, 刘昌明. 冬小麦根系生长与土壤水分利用方式相互关系分析[J]. 自然资源学报, 1998, (3): 42-49
Feng G L, Liu C M. Analysis of root system growth in relation to soil water extraction pattern by winter wheat under water-limiting conditions [J]. *Journal of Natural Resources*, 1998, (3): 42-49 (in Chinese)
- [14] 余俊瑞, 杨富成, 覃余方铨, 孟森, 陆俊银. 干旱胁迫影响下的植物个体响应与种间关系变化: 以寄生植物为例[J/OL]. [2024-11-11]. <https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2025.0016.y>
Yu J R, Yang F C, Qin F C, Meng S, Lu J K. Response of individual plants and changes in interspecific relationships under drought stress: exemplified by parasitic plants [J/OL]. [2024-11-11]. <https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2025.0016.y> (in Chinese)
- [15] 张志高, 张秀丽, 贾梦薇, 陈河阳, 孙梓欣, 郝海蛟, 李卓娅, 蔡茂堂. 1960—2020年黄河流域农业热量资源时空演变特征[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2024, 44(3): 119-130
Zhang Z G, Zhang X L, Jia M W, Chen H Y, Sun Z X, Hao H J, Li Z Y, Cai M T. Spatiotemporal evolution characteristics of agricultural thermal resources in the Yellow River Basin from 1960 to 2020 [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2024, 44(3): 119-130 (in Chinese)
- [16] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, Chen Y M, Cao Y, Ren J Y. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 183-194
- [17] Mckee T, Doesken N, Kleist J. Drought monitoring with multipletime scales [C] In: American Meteorological Society. Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology. Dallas: American Meteorological Society, 1995: 233-236
- [18] 张晨晨, 黄翀, 何云, 刘庆生, 李贺, 吴春生, 刘高焕. 黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 21-30
Zhang C C, Huang C, He Y, Liu Q S, Li H, Wu C S, Liu G H. An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 21-30 (in Chinese)
- [19] 谢灵枫, 杨肖丽, 吴凡, 叶周兵, 罗定. 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, 24
Xie L F, Yang X L, Wu F, Ye Z B, Luo D. 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, 24 (in Chinese)
- [20] Ding Y B, Xu J, Wang X W, Cai H J, Zhou Z Q, Sun Y N, Shi H Y. Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 283: 111980
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134
Wang J F, Xu C D. GeoDetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134 (in Chinese)
- [22] 李帅, 曾凌, 张存杰, 肖潺, 张强, 龚文婷. 长江上游近120年来气象干旱和水文干旱时空变化关系及其传递特征[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(3): 263-277
Li S, Zeng L, Zhang C J, Xiao C, Zhang Q, Gong W T. Spatio-temporal variations and propagation from meteorological to hydrological drought in the upper Yangtze River basin over last 120 years [J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(3): 263-277 (in Chinese)

- [23] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 张余庆. 干旱传播研究进展与展望II: 影响因素与干旱传播研究展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 654-668
- Zhi X F, Tian Y T, Chen C C, Zhang Y Q. Progress and prospects in drought propagation research part II: Influencing factors and research prospects [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 654-668 (in Chinese)
- [24] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors - based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127
- [25] 李海军, 高煜, 高鹏. 结合地理探测器的长沙市地表温度驱动力探究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(11): 78-81, 86
- Li H J, Gao Y, Gao P. Study on the driving force of land surface temperature in Changsha urban area in combination with the geographic detector [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2022, 45(11): 78-81, 86 (in Chinese)
- [26] 黄春艳. 黄河流域的干旱驱动及评估预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- Huang C Y. Drought driving and assessment prediction in the Yellow River Basin [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021 (in Chinese)
- [27] Dai M, Huang S Z, Huang Q, Zheng X D, Su X L, Leng G Y, Li Z Y, Guo Y, Fang W, Liu Y J. Propagation characteristics and mechanism from meteorological to agricultural drought in various seasons [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127897
- [28] Ketchum D, Hoylman Z H, Brinkerhoff D, Huntington J, Maneta M P, Kimball J, Jencso K. Irrigation response to drought in the western United States, 1987 - 2021 [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2024, 60(2): 603-619
- [29] 罗彪, 刘潇, 郭萍. 基于MODIS数据的河套灌区遥感干旱监测[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 44-54
- Luo B, Liu X, Guo P. Remote sensing drought monitoring of Hetao irrigation area based on MODIS data [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(10): 44-54 (in Chinese)
- [30] Xu Y Y, Lü H S, Yagci A L, Zhu Y H, Liu D, Wang Q M, Xu H T, Pan Y, Su J B. Influence of groundwater on the propagation of meteorological drought to agricultural drought during crop growth periods: A case study in Huaibei Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 305: 109122
- [31] Yang X L, Wu F, Yuan S S, Ren L L, Sheffield J, Fang X Q, Jiang S H, Liu Y. Quantifying the impact of human activities on hydrological drought and drought propagation in China using the PCR-GLOBWB V2.0 model [J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(1): e2023WR035443

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 王世佳, 硕士研究生, 现就读于中国科学院地理科学与资源研究所。本科毕业于河海大学。本科期间获得学业优秀奖学金、科技创新奖学金、第十一届全国大学生数学竞赛三等奖; 研究生期间获得一等所长奖学金。



通讯作者简介: 田静, 中国科学院地理科学与资源研究所副研究员, 硕士生导师。主要从事遥感水文领域的研究, 即围绕地表蒸散发和土壤水分的遥感估算及其在水循环与生态水文过程中的作用机理和农业干旱中的应用为核心开展系统研究。先后主持国家自然科学基金项目, 国家重点研发计划专题和中国科学院战略先导项目子课题等项目 10 余项。发表学术论文 80 余篇, 其中 SCI 论文 68 篇、参编专著 4 部及授权国家发明专利 8 项。