

俱永升,魏勇,胡安龙,等. 黄河流域农业干旱时空演变特征及其驱动机理研究[J]. 人民珠江,2026,47(1):104-111.

黄河流域农业干旱时空演变特征及其驱动机理研究

俱永升¹,魏勇¹,胡安龙¹,李惠庸¹,郭爱军^{2*}

(1. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院,甘肃 兰州 730050;2. 西安理工大学,旱区水工程生态环境全国重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要:干旱在干旱、半干旱区频发且破坏性强,其时空演变规律在气候变暖与高强度人类活动的驱动下日趋复杂。探究粮食主产区农业干旱的时空演变特征及其影响因素,对应对粮食危机、支撑中国北方旱区特色农业发展至关重要。因此,以黄河流域为例,采用趋势检验、游程理论和标准化土壤湿度指数(Standard Soil Index, SSI)等方法,揭示了多尺度农业干旱的时空演变特征,采用 17 种极端气候指数和方差分析(Analysis Variance, ANOVA)方法,定量揭示了极端气候因子对干旱的影响。结果表明:1990 年附近多尺度农业干旱化程度发生了显著改变,1990 年之前不同气候区整体呈暖湿化趋势变化特征,而之后其变化规律相反;同时,随着时间尺度增大(由 SSI-1 至 SSI-12),极端重旱或特旱发生的可能性增大;不同时间尺度下,极端降水和温度指标对各气候区农业干旱的贡献存在显著差异,其中 Rx1day 和 Rx5day 为核心驱动因子,在部分地区对多尺度农业干旱的解释力高达 90% 以上。研究结果对于指导中国黄河流域农业生产布局、保障粮食安全、防灾减灾等具有重要现实意义。

关键词:农业干旱;时空演变规律;驱动机理;极端气候指数;多因素方差分析;黄河流域

中图分类号:TV219 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)01-0104-08

1 研究背景与意义

在全球气候持续变暖的影响下,未来流域或区域遭遇极端干旱事件的可能性大增,其严重威胁了社会发展和生态系统的良性可持续性发展^[1-3]。干旱的发生可能会对粮食生产构成严重威胁,在黄河流域等地区尤为突出^[4]。每年因农业干旱造成的粮食减产或失收非常严重,且随着气候变化和强人类活动影响,农业干旱频发、广发^[5-6]。黄河是中国人民的“母亲河”,是中国粮食主产区,且承担着近 50 座大中型城市的供水任务,自 20 世纪中叶以来,因农业干旱已累计造成近 10 万 km² 的农作物受灾,导致的直接经济损失总额逾 60 亿元人民币^[7]。因此,以黄河流域为研究对象,开展气候变暖背景下流域

农业干旱时空变化识别及其潜在影响因素研究,其对于流域防旱预警和应对措施制定具有实际价值,推动流域实现可持续协调发展。

目前,许多专家学者在农业干旱及其驱动力方面进行了深入研究。例如,黎云云等^[5]选取黄河流域为研究区,采用 SSI(Standardized Soil Index)指数揭示了不同等级下农业干旱特征变量,并采用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型模拟,开展了气候变化与人类活动对农业干旱影响的归因分析,并量化了其各自的贡献,结果表明:流域 1990 年附近是农业干旱最为严峻的时期,气候变化是该区域农业干旱的主导驱动因子,其贡献率高达 50%~90%。徐慧等^[8]以赣江流域为例,基于 1961—

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52379024)

收稿日期:2025-05-28 修回日期:2025-07-11 网络首发日期:2025-07-29

作者简介:俱永升(1981—),男,高级工程师,主要从事极端水文过程、水库水电站调整等研究。E-mail:6340034972@qq.com

通信作者:郭爱军(1990—),博士,副教授,主要从事极端水文过程、水库水电站调度等研究。E-mail:aijunguo619@gmail.com

2021年逐日最高气温和土壤含水量长时间序列数据,研究了流域热浪、农业干旱以及复合高温干旱事件的时空演变规律,并指出较1961—2000年,流域北部发生农业干旱的频次减少,而南部区域增大,其干旱历时和干旱烈度分别增加10.65%和26.86%。闫瀚文等^[9]以陕西省为例,采用标准化土壤湿度指数和基于Meta-Gaussian模型的多变量条件概率方法揭示了夏季农业干旱发生的风险,并指出组合因子越多,农业干旱风险越大。纵观农业干旱相关研究发现,在气候变暖和强人类活动的双重作用下,极端气候变化显著,具体表现为热浪持续时间延长、高温日阈值上升和强降雨天数逐渐减少^[2],而针对极端气候因素对农业干旱影响的定量研究却相对匮乏。

因此,本文以黄河的不同气候区域为研究对象,基于收集的1970—2017年逐日气象站和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 土壤含水量资料,采用M-K趋势检验、游程理论和SSI等方法,揭示了多尺度农业干旱的时空演变规律;其次,应用17种极端气候指数和方差分析(Analysis Variance, ANOVA)方法,定量揭示了极端气候因子对多尺度农业干旱的影响,阐明了极端气候因子在黄河流域不同气候区农业干旱的多尺度驱动机制。

2 区域概况及数据来源

黄河作为中国第二大江河,其地处干旱、半干旱、半湿润气候区,造成气象和下垫面条件差异明显,流域集水面积约为79.50万 km^2 ^[10],降雨具有显著的季节性特征,且空间分布不均,导致水资源匮乏,成为干旱的易发区域^[11]。为揭示黄河流域上中下游流域(不同气候带)农业干旱的时空变化及其潜在影响因素,本文将黄河流域划分为8个气候分区,分别为:高寒带半干旱半湿润区(A区)、寒温过渡带半干旱半湿润区(B区)、中温带干旱与半干旱区(C区)、中温带半干旱区(D区)、暖温过渡带半干旱区(E区)、暖温带半干旱区(F区)、暖温带半干旱半湿润过渡区(G区)和暖温带半湿润区(H区)^[2]。各气候区地理位置及气象、土壤含水量格网空间位

置见图1。

本文采用数据主要包括气象数据和土壤含水量数据,时间范围为1970—2017年,其中前者为96个气象站点的日降水量、相对湿度、平均风速、平均气温等实测数据,其均来源于国家资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>);后者来源于NOAA开发的高分辨率全球陆面数据集GLDAS(<https://disc.gsfc.nasa.gov/>),其空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

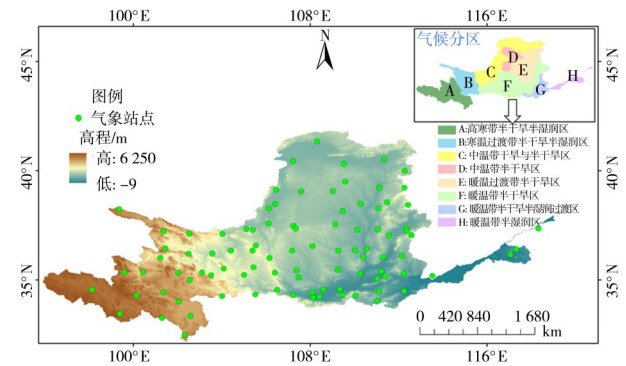


图1 黄河流域不同气候分区及气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of different climate zones and meteorological stations in the Yellow River Basin

3 研究方法

3.1 标准化土壤湿度指数

SSI参照SPI概念构建,其利用土壤水分的盈亏状态客观评估黄河流域不同气候区的农业干旱,该指数计算过程如下。

土壤水分序列的累积分布函数 $F(x)$ 为:

$$F(x) = \int_y^x f(x) dx \quad (1)$$

以黄河流域各气候区为响应单元,对1970—2017年每月土壤水的累积分布函数 $F(x)$ 进行标准化处理:令 $P=1-F(x)$,当 $P \leq 0.5$ 时, $W = \sqrt{-2 \ln P}$

$$SSI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^2} \quad (2)$$

若 $P > 0.50$,则 $W = \sqrt{-2 \ln(1 - P)}$

$$SSI = -W + \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^2} \quad (3)$$

式中: W 为土壤含水量的累计亏缺值; P 为累积概

率;无量纲参数 $c_0=2.516$ 、 $c_1=0.803$ 、 $c_2=0.010$ 、 $d_1=1.433$ 、 $d_2=0.189$ 、 $d_3=0.001$ 。

3.2 游程理论

其计算方式与SPI指数、气象干旱计算方式相似,其在干旱监测与评估领域具有广泛的应用价值^[12-13]。截至目前,众多学者使用该方法从气象干旱、农业干旱等干旱事件序列中提取干旱频率、干旱持续时间和干旱强度^[14-15]。本研究采用三级干旱阈值($R=0$, $R_1=-0.5$, $R_2=-1$)进行干旱事件识别,具体流程如下:①当SSI指数首次低于 R_1 阈值时,标记该月为潜在干旱月份;②若后续出现SSI指数大于 R_2 阈值,则确认干旱过程成立;若SSI处于 R_1-R_2 区间且持续时间不足1个月,则取消该月干旱标记;③对于间隔小于等于1个月的相邻干旱事件,且此月 $R_1<SSI<R$,则合并为单一干旱过程;干旱历时为基于负游程起止时间计算干旱持续时间;干旱烈度通过累积干旱指标与 R_1 阈值的负偏差进行表征^[13-16]。

3.3 极端气候指数

旱涝事件等极端气候现象通过引发区域性水资源时空失衡,进而威胁粮食安全,阻碍区域稳定和可持续发展^[17]。因此,本文采用ETCCDI^[18]提出的17个极端气候指数(表1)对各气候区极端气候现象进行监测,其详细定义参考文献^[19]。

3.4 多因素方差分析方法(ANOVA)

ANOVA(Analysis of Variance)用于揭示系统中因变量与自变量之间的动态响应关系^[20]。假定因变量序列为 y ,其自变量为 x_i , $i=1,2,\dots,n$,系统总方差见式(4):

$$\text{Var}(\text{total}) = \text{Var}(y) = \text{Var}\left[\left(y - \sum_{i=1}^n x_i\right) + \sum_{i=1}^n x_i\right] \quad (4)$$

其具体分解为:

$$\text{Var}(\text{total}) = \text{Var}\left(t + \sum_{i=1}^n x_i\right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\text{Var} = \text{Var}(x_i) + \text{cov}(t, x_i) + \text{cov}(x_i, x_j) \quad (6)$$

($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$; and $i \neq j$)

因此,各影响因素 x_i 对因变量 y 的贡献为:

$$\text{Contribution}_{x_i} = \frac{\text{Var}(x_i^{\text{total}})}{\text{Var}(\text{total})} \quad (7)$$

表1 极端气候指数

Tab. 1 Extreme climate indexes

简称	名称	单位
Rx1day	最大一日降水量	mm
Rx5day	最大五日降水量	mm
SDII	弱降水日强度	mm
R10	强降水日	d
R20	特大降水日	d
R95p	非常潮湿日	d
R99p	极端潮湿日	d
R95pTOT	湿润日降水比例	%
R99pTOT	极端湿润日降水比例	%
CDD	干旱持续天数	d
CWD	发生降水持续天数	d
SU	高温持续天数	d
TR	炎热夜晚天数	d
TXx	极端高温最大值	°C
TNX	极端低温最大值	°C
TN90p	暖夜	d
TX90p	暖日	d

4 结果与讨论

4.1 不同气候分区农业干旱的时空演变规律分析

4.1.1 不同气候区农业干旱的时程变化特征

基于黄河流域划分的8个气候区和长序列1970—2017年逐月格网土壤含水量资料,分别计算了多时间尺度农业干旱指数,结果见图2。由图2可以看出:黄河流域不同气候区多时间尺度农业干旱在时程上的演变规律具有一定相似性(即旱涝交替变化),整体表现为1995年之前,各时间尺度下农业干旱较轻(黄色带较浅),而1995年之后流域农业干旱、湿润程度明显增强,其SSI极值更大/更小,这与代萌^[21]研究发现的规律一致,即由于不断变化的环境和区域农业活动加剧了农业干旱化程度。

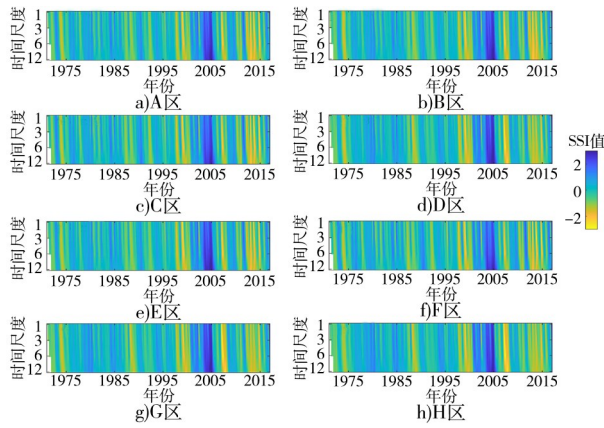


图2 不同气候分区多时间尺度(1、3、6和12个月)农业干旱在时间尺度的变化规律

Fig. 2 Temporal variation patterns of agricultural droughts in different climate zones at multiple time scales (1, 3, 6, and 12 months)

同时,同一气候区下,随着时间尺度的增大(由 SSI-1 至 SSI-12)农业干旱的干湿变化更加明显,即干旱历时更长;不同气候区下湿润化程度较高主要集中在 1995 年附近,干旱化程度较高主要集中在 1990—1995 年和 2010—2015 年,尤其是后者干旱化程度更大,这可能归因于近年来城镇化建设加快、全球气候变暖加剧,土地利用类型发生改变,扰动了土壤水分的动态平衡机制,进而增加农业干旱发生的风险。此外,自上游至下游,流域干旱化程度整体呈“先增后减”的趋势变化,即 C 区干旱化程度更强,这可能归因于该区域地处宁蒙灌区,其作物种植结构或耕作面积会促使土地利用形态发生转变,从而引发植被蒸散量或土壤持水性能变化,该结论与黎云云等^[5]研究发现该区域更容易发生重旱和特旱事件,其农业干旱发生频率高达 70%~90% 的研究结果基本一致。

4.1.2 不同气候区农业干旱的空间趋势变化特征

基于前一小节计算结果,本小节采用 M-K 趋势检验方法^[23]进一步揭示各气候区多尺度农业干旱的空间趋势变化规律,结果见图 3。

a)流域不同分区下多时间尺度农业干旱的趋势变化规律不同,但整体呈现出:短时间尺度(SSI-1 和 SSI-3)下,不同气候区(B 和 C 区除外)M-K 检验

得到的统计量 Z 值均大于 0,意味着土壤水分状况向更湿润的方向发展,结合区域增暖背景,即轻度农业干旱呈暖湿化的变化特征,但未达到 95% 置信水平的显著性要求。

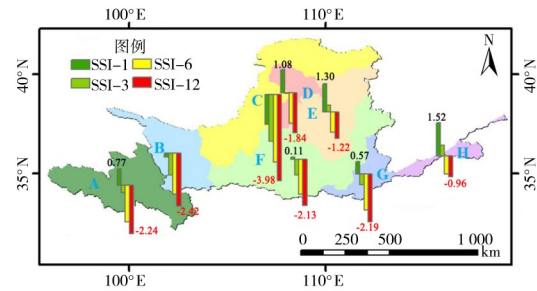


图3 不同气候分区下多时间尺度(1、3、6和12个月)农业干旱 M-K 检验空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of M-K test for agricultural droughts in different climate zones at multiple time scales (1, 3, 6, and 12 months)

b)随着时间尺度增大,不同气候区农业干旱检测得到的统计量 Z 值逐渐变小,尤其是 B、C、F 和 G 区 SSI-12 尺度下,其值小于 -1.96,意味着该区域年尺度农业干旱(重旱或特旱)干旱化趋势更加严重,且通过 95% 置信水平的显著性要求。

c)以 SSI-12 为例,A、B、C、D、E、F、G 和 H 区下,M-K 检验得到的统计量 Z 值分别为 -2.24、-2.42、-3.98、-1.84、-1.22、-2.19 和 -0.96,这表明自上游至下游,极端干旱程度整体呈“先增后减”的空间分布。

4.1.3 不同时间尺度下农业干旱特征变量的空间分布规律

本小节以不同气候区为响应单元,分别采用程理论从多时间尺度(1、3、6 和 12 个月)农业干旱序列中分离出干旱发生次数、持续时间和干旱烈度 3 个指标,结果见图 4。分析图 4 发现,随着时间尺度增大,且从上游到下游,农业干旱频次降低、但干旱历时和烈度却显著增强;同时,A、C、E 和 F 区发生农业干旱的次数较多,而其他气候区较少;D、G 和 H 区干旱历时较长,而 A 区的干旱历时最短;同理,不同气候区干旱烈度的演变规律与干旱历时相似。

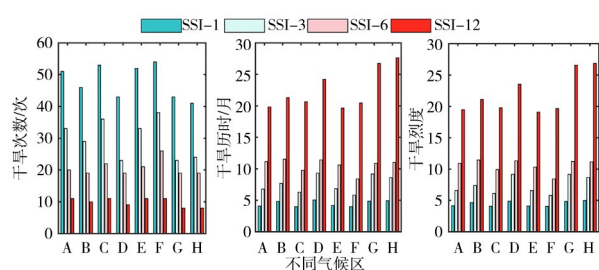


图4 不同时间尺度(1、3、6和12个月)下农业干旱特征变量空间变化规律

Fig. 4 Spatial variation patterns of agricultural drought characteristic variables at different time scales (1, 3, 6, and 12 months)

4.2 不同气候区极端气候指数计算结果

极端气候事件的发生可能会打破区域水分平衡,导致土壤储水急剧下降,进而诱发农业干旱^[22]。本小节采用表1中17种极端气候指数揭示极端气候因子对多尺度农业干旱的影响,限于篇幅,仅展示部分指标结果,见图5。由图5可以看出:自上游至下游,检测得到的6种极端气候指数均呈增加趋势,且其概率分布规律存在一定差异性,对于Rx1day来说,上游气候区其值多集中分布在3.50左右,且其范围介于0~30 mm,而下游区其范围介于0~100 mm。

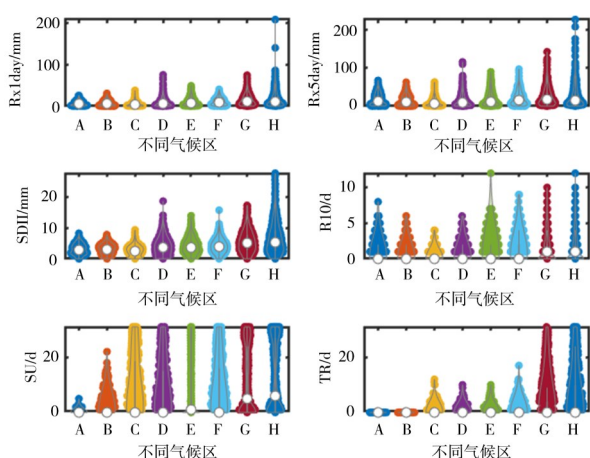


图5 不同气候区极端气候指数(降水和气温)计算结果
Fig. 5 Calculation results of extreme climate indexes (precipitation and temperature) in different climate zones

同时,以降水指标为例,Rx1day、Rx5day和SDII的空间变化趋势基本一致,即自上游至下游,甚至均呈增大的趋势变化特征;然而,在极端气温指标

下,高温持续天数(Summer Days, SU)和炎热夜晚天数(Tropical Nights, TR)在空间上的变化相反,前者仅上游A区SU值较小,而其他气候区其值较大,这主要归因于该区域地处高寒气候区,且流域农业干旱呈现出暖湿化的特征。总的来说,极端气候指数的空间差异性将会加剧多时间尺度农业干旱的空间异质性,亦可能导致潜在极端气候指数对不同气候分区农业干旱的影响不同。

4.3 黄河流域多尺度农业干旱的驱动力分析

由降水、气温等因素异常导致的气候变化,其直接或间接改变土壤水的下渗规律,从而形成农业干旱^[5]。为定量评估极端降水和温度指标在驱动多尺度农业干旱中的作用,图6为通过ANOVA量化的极端气候指数对各气候区不同时间尺度农业干旱影响的贡献率分布情况。

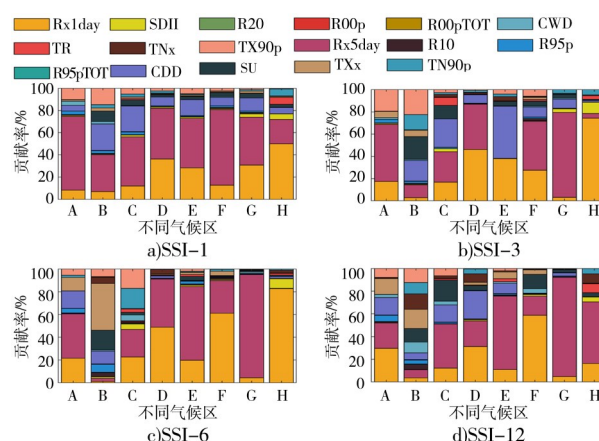


图6 极端气候指数对多尺度农业干旱的相对贡献大小
Fig. 6 Relative contribution of extreme climate indexes to multi-scale agricultural droughts

a)不同时间尺度下,极端降水和温度指标对不同气候区农业干旱的贡献程度不同,其中Rx5day指数对各种时间尺度农业干旱的贡献均较大,贡献高达30%~60%,这归因于该指数反映的是5 d滑动窗口内的最大降雨量,若其数值下降意味着强降水事件可能被弱降水或无降水情况取代,从而提高了干旱发生的潜在风险。

b)不同气候区下,17种极端气候指数对同一种时间尺度农业干旱的影响存在显著差异,以SSI-1

为例,A、B、C、D、E、F、G和H区下Rx5day指数对农业干旱的贡献最大,分别为66.23%、33.31%、44.36%、45.67%、44.26%、67.96%、43.05%和22%;其次为Rx1day指数,其对各气候区的贡献较大;对比不同时间尺度的分析结果可知,Rx1day与Rx5day是驱动农业干旱最为突出的2个指标,其贡献率高达60%左右。

c)自上游至下游,极端降水指数对多尺度农业干旱的解释力逐渐增大,而极端温度指数对其的解释力相反;同时,D、E、F和G区下,极端降水指数对多尺度农业干旱的解释力高达90%以上,这意味着黄河中游农业干旱的发生受极端降水的影响最大。

d)随着时间尺度增大,极端降水的解释力逐渐降低,而极端温度指数的解释力增大。

5 结论

本文以干旱区、半干旱区、湿润和半湿润过渡区的黄河流域为研究对象,基于不同的气候分区,采用M-K趋势检验、游程识别技术等方法,揭示了多尺度农业干旱的时空分布特征与演变趋势,并采用ANOVA方法定量分离了极端气候因素对多尺度农业干旱的相对贡献,得到的主要结论如下。

a)黄河流域不同气候区多尺度农业干旱在1995年之前呈暖湿化趋势,而1995年之后,其呈暖干趋势,且重度农业干旱集中分布于1990年左右;同时,短时间尺度(SS1-1和SS1-3)下,不同气候区(B和C区除外)发生轻度农业干旱的可能性较大,但未达到95%置信水平的显著性要求。

b)自上游至下游,6种极端气候指数检测值均呈增加趋势,且极端气候指数的空间差异性将会加剧多时间尺度农业干旱的空间异质性。

c)随着研究时段的延长,极端降水要素对多尺度农业干旱的贡献呈递减趋势,但极端温度指数对其的贡献逐渐增大;Rx1day和Rx5day指标对不同时间尺度农业干旱的贡献高达60%以上,尤其是D、E、F和G区下,其贡献高达90%左右。

6 不足与展望

本研究系统性地解析了黄河流域多尺度农业

干旱的时空演变规律和气候因子驱动力,但仍存在以下局限,可进一步深入研究。

a)本研究尽管考虑高强度人类活动的影响,但未耦合灌溉、土地利用、水库调度等具体活动数据,对人类活动的量化不足,可能低估其对干旱演变的贡献,后续可整合构建“气候-人类”双驱动的干旱归因模型进行深入研究^[24]。

b)本研究中极端气候指数与干旱的关联主要基于独立贡献率(ANOVA),可进行复合极端事件对干旱放大机制的研究,深化驱动因子协同效应。

c)可构建土壤-植被-大气连续体水分传输的跨尺度耦合模型,模拟不同类型干旱的级联效应,揭示多类型干旱的互馈和传播机制,深化干旱评估研究。

参考文献:

- [1] ZHANG Q, YU X, QIU R J, et al. Evolution, severity, and spatial extent of compound drought and heat events in north China based on copula model [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 273. DOI:10.1016/j.agwat.2022.107918.
- [2] 殷晖,白福青.考虑空间异质性的黄河流域气象干旱时空演变及其驱动力研究[J].*中国农村水利水电*,2025(2):74-80.
YIN H, BAI F Q. Study on the spatiotemporal evolution and driving forces of meteorological drought in the Yellow River Basin considering spatial heterogeneity [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2025(2): 74-80. (in Chinese)
- [3] WU J W, MIAO C Y, ZHENG H Y, et al. Meteorological and hydrological drought on the loess plateau, China: evolutionary characteristics, impact, and propagation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(20): 11569-11584.
- [4] 卢荡,魏伟,王继平,等.重要生态功能区干旱时空演变特征及对关键资源的影响:以黄河流域为例[J].*环境科学*,2024,45(6):3352-3362.
LU D, WEI W, WANG J P, et al. Spatio-temporal evolution of drought and its impact on key resources in the important ecological functional area: a case study in the Yellow River Basin [J]. *Environmental Sciences*, 2024, 45(6): 3352-3362. (in Chinese)
- [5] 黎云云,畅建霞,樊晶晶,等.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, et al. 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)
- [6] 杨辉辉,冯德程,彭莹,等. 近60年雷州半岛气象干旱变化特征及驱动因素分析[J]. 人民珠江,2024,45(11):108-114.
YANG H H, FENG D C, PENG Y, et al. Analysis of variation characteristics and driving factors of meteorological drought in Leizhou Peninsula in recent 60 years [J]. Pearl River, 2024, 45(11): 108-114. (in Chinese)
- [7] 周帅,王义民,畅建霞,等. 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, et al. 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)
- [8] 徐慧,江善虎,任立良,等. 气候变化背景下赣江流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(4):1-11.
XU H, JIANG S H, REN L L, et al. Spatial-temporal variation characteristics of compound hot-dry events in Ganjiang River Basin under climate change [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(4): 1-11. (in Chinese)
- [9] 闫瀚文,栗晓玲,吴海江. 基于Meta-Gaussian模型的陕西省农业干旱风险评估[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025,46(1):41-52.
YAN H W, SU X L, WU H J. Agricultural drought risk assessment in Shaanxi Province based on meta-Gaussian model [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(1): 41-52. (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] 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 L Q, WANG W Z, LIU Y H, 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)
- [12] 陈仕豪,门宝辉,庞金凤,等. 基于集成方法重构黄河流域非平稳气象干旱时空特征[J/OL]. 水力发电学报,2024:1-12.
CHEN S H, MEN B H, PANG J F, et al. Reconstructing the non-stationary spatiotemporal characteristics of meteorological drought in the Yellow River Basin based on the integration method [J/OL]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024: 1-12. (in Chinese)
- [13] REN X F, LI P Y, WANG D, et al. Drivers and characteristics of groundwater drought under human interventions in arid and semiarid areas of China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130839.
- [14] YEVEJEVICH V. An objective approach to definitions and investigation of continental hydrologic droughts [M]. Fort Collins: Colorado State University, 1967.
- [15] WU J F, CHEN X H, YU Z X, et al. Assessing the impact of human regulations on hydrological drought development and recovery based on a 'simulated-observed' comparison of the SWAT model [J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 1-13.
- [16] 鲁佳琪,孟凡浩,罗敏,等. 黄河流域内蒙古段气象干旱与水文干旱变化对植被NDVI的影响[J]. 人民珠江,2024,45(10):51-64.
LU J Q, MENG F H, LUO M, et al. Effect of meteorological and hydrological drought changes on vegetation NDVI in Inner Mongolia section of Yellow River Basin [J]. Pearl River, 2024, 45(10): 51-64. (in Chinese)
- [17] 智协飞,田云涛,陈昌春,等. 干旱传播研究进展与展望I—干旱传播含义、特征、类型与研究方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4):625-653.
ZHI X F, TIAN Y T, CHEN C C, et al. Progress and prospects in drought propagation research part I: meaning, characteristics, types, and research methods [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 625-653. (in Chinese)
- [18] SILLMANN J, KHARIN V V, ZHANG X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(4): 1716-1733.
- [19] 中国气象局兰州干旱气象研究所. 一种利用微波遥感数据监测农业干旱的监测与预警方法:202411059885. 2[P]. 2024-12-03. Lanzhou Arid Meteorological Research Institute of the China Meteorological Administration. A monitoring and early warning method for agricultural drought using microwave remote sensing data: 202411059885. 2 [P]. 2024-12-03. (in Chinese)
- [20] WU J W, MIAO C Y, ZHENG H Y, et al. Meteorological and hydrological drought on the loess plateau, China: evolutionary characteristics, impact, and propagation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(20): 11569-

- 11584.
- [21] 代萌. 干旱在气象—农业—灾损的传播特征与规律研究[D]. 西安:西安理工大学, 2022.
- DAI M. Study on the propagation characteristics and laws of drought in meteorology-agriculture-disaster loss [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [22] 郭世兴,刘斌,王光社,等. 基于 Mann-Kendall 法的汉江上游水沙趋势分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(11):140-142.
- GUO S X, LIU B, WANG G S, et al. Trend analysis of flow and sediment in upstream of Hanjiang Basin based on Mann-Kendall test method [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11): 140-142. (in Chinese)
- [23] 张更喜,王慧敏,栗晓玲,等. 复合干热胁迫下黄土高原夏季植被脆弱性评估[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6):339-346.
- ZHANG G X, WANG H M, SU X L, et al. Assessing the vegetation vulnerability of Loess Plateau under compound dry and hot climates [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 339-346. (in Chinese)
- [24] 朱芳,王海煜,杨少康,等. 汉江上游干旱恢复期间气象—水文干旱特征响应概率研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(4):55-64.
- ZHU F, WANG H Y, YANG S K, et al. Study on response probability of meteorological and hydrological drought characteristics during drought recovery period in upper Hanjiang River [J]. Pearl River, 2025, 46(4): 55-64. (in Chinese)

Research on Spatiotemporal Evolution Characteristics and Driving Mechanisms of Agricultural Drought in the Yellow River Basin

JU Yongsheng¹, WEI Yong¹, HU Anlong¹, LI Huiyong¹, GUO Aijun^{2*}

(1. Economic and Technological Research Institute of Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Droughts occur frequently and are highly destructive in arid and semi-arid regions, and their spatiotemporal evolution becomes increasingly complex with climate warming and intensified human activities. Conducting research on the spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of agricultural drought in major grain-producing areas is of vital importance for responding to food crises and supporting the development of characteristic agriculture in the arid regions of northern China. Therefore, this paper took the Yellow River Basin in arid regions, semi-arid regions, and the transitional zone between humid and semi-humid regions as an example and used trend test, run length theory, and standard soil index (SSI) methods to reveal the spatiotemporal distribution characteristics and evolution laws of multi-scale agricultural drought. 17 extreme climate indexes and analysis of variance (ANOVA) methods were used to quantitatively reveal the impact of droughts. The results show that as the time scale increases, the frequency of agricultural droughts decreases, but the duration and intensity of the droughts significantly increase; The degree of multi-scale agricultural aridification has undergone a significant change around the 90a. Before 90a, different climate zones show an overall trend of warming and humidification, while the trend has been opposite since then, and severe agricultural droughts are concentrated in this period. Meanwhile, from the upper reaches to the lower reaches of the Yellow River, some extreme precipitation index detection values show an increasing trend, but the extreme temperature index has the opposite explanatory power. The spatial differences of extreme climate indexes will exacerbate the spatial heterogeneity of agricultural droughts over multiple time scales. As the time scale increases (from SSI-1 to SSI-12), the likelihood of extremely severe or extreme droughts increases significantly at the 95% confidence level. At different time scales, the contributions of extreme precipitation and temperature indexes to agricultural droughts in various climate zones vary significantly. Among them, Rx1day and Rx5day are the core driving factors, and in some regions, their explanatory power for multi-scale agricultural droughts is as high as over 90%. These research results provide important practical guidance for optimizing agricultural production distribution, safeguarding food security, and developing drought early warning systems and countermeasures in China's Yellow River Basin.

Keywords: agricultural drought; spatiotemporal evolution; driving mechanism; extreme climate index; multi-factor analysis of variance; the Yellow River Basin