Vol.40 No.2

Mar. 2022

黄河流域农业干旱时空演变规律 及其自然恢复期特征

刘 晔^{1,2},薛万来²

(1. 河北工程大学水利水电学院,河北 邯郸 056000; 2.北京市水科学技术研究院,北京 100084)

摘 要:以黄河流域为例,基于1970—2014年气候数据,构建了修正的帕默尔干旱指数(sc_PDSI),探究了不同 气候区农业干旱的时空演变规律;其次,以 0.25°×0.25°栅格为响应单元,耦合农业干旱诊断和陆地水储量数据精准 识别了农业干旱自然恢复期,并利用全局和局部 Moran's I 指数,探明了农业干旱自然恢复期的空间分布格局。结 果表明:(1)黄河上游农业干旱化程度得以缓解,而下游干旱化程度加剧,且 21 世纪初期尤为凸显;(2)黄河流域农 业干旱恢复时间介于1~36个月,干旱恢复时间小于4个月对应的栅格数占整个黄河流域的42.68%,反之,大于4个 月的响应单元面积比重为57.32%;(3)农业干旱恢复时间在空间上存在显著的空间自相关性,且在99%置信水平下 显著。研究结果可为流域水管理机构旱涝保收工作的顺利开展提供理论依据。

关键字:农业干旱;干旱恢复时间;空间异质性;黄河流域

中图分类号:S166 文献标志码:A

Temporal and spatial evolution of agricultural drought and its natural recovery period in the Yellow River Basin

LIU Ye^{1,2}, XUE Wanlai²

School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Handan, Hebei 056000, China;
 Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100084, China)

Abstract: Frequent and widespread agricultural drought events seriously restrict the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin, and threaten the safety of food production. This study took the Yellow River Basin as an example, and constructed a modified Palmer Drought Index (sc_PDSI) to clarify the spatial and temporal evolution characteristics of agricultural drought events in different climatic regions based on the CRU climate data from 1970 to 2014. In addition, taking 0.25°×0.25° grid as response unit, the natural recovery period of agricultural drought accurately identified by coupling agricultural drought diagnosis and the land water storage data and spatial distribution pattern of natural recovery period of agricultural drought was explored by using global and local Moran's I index. The results showed that the degree of agricultural aridity in the upper reaches of the Yellow River had been alleviated, while that in the lower reaches had been intensified, especially in the early 21st century. Meanwhile, the recovery time of agricultural drought in the Yellow River Basin was between 1 month and 36 months. The number of grids corresponding to drought recovery time less than 4 months accounted for 42.68% of the whole Yellow River Basin. On the contrary, the proportion of response unit area greater than 4 months was 57.32%. There was significant spatial autocorrelation in the recovery time of agricultural drought, and it passed the significance test of 99% confidence level. The findings from the study provide some reference for water management institutions in flood control and drought relief to ensure proper development of crops in the Yellow River Basin.

Keywords: agricultural drought; drought recovery time; spatial heterogeneity; Yellow River Basin

214

黄河流域水资源量仅占全国的 2%,却承担着 全国 15%耕地面积和 12%人口的供水任务,人均水 资源量约为 408 m³,仅为全国水资源平均水平的 20%左右^[1]。同时,灌溉农业是黄河水资源高消耗 用户,2018 年黄河总取水量为 516.22×10⁸ m³,其中 农田灌溉取水量为 327.7×10⁸ m³,占总取水量的 63.48%^[2]。此外,受全球变暖和高强度下垫面变化 的影响,地处气候湿润-干旱过渡带的黄河流域河 川径流量逐年减少,农业干旱呈频发和广发的态 势,导致流域粮食生产安全面临着严峻挑战^[3-4]。 因此,精准评估黄河流域不同气候区农业干旱发 生、发展的时空演变格局及其自然恢复期,对农业 抗旱、防汛工作的顺利开展以及旱涝保收水平的提 高具有实际意义。

近年来,国内外学者针对黄河流域干旱的时空 演变规律开展了大量研究,并取得了较好的评估结 果[5-7]。在气象干旱评估方面,王璐等[8]采用 Copula 函数和综合干旱指数(MSDI)分析了干旱多 属性概率特征及其动态变化,并运用交叉小波变换 方法探究了太阳黑子、大气环流异常因子和植被覆 盖对黄河干旱的影响。王飞等[9]以标准化降水蒸 散指数 SPEI 作为干旱指标,应用极点对称模态分解 方法对 SPEI 序列进行时频分解,并从干旱年际变 化、季节变化、干旱频率和干旱强度等方面揭示了 黄河流域8个水资源分区干旱的时空分布格局。在 农业干旱评估方面,钱云平等[10]以土壤含水率为基 础建立了作物干旱评估指标,研究了黄河流域农业 干旱的地域性、季节性、持续性等特征。王飞以黄 河流域为研究对象,基于 MODIS 遥感卫星数据的归 一化植被指数 NDVI 与地表温度 LST 数据,采用 S-G 滤波方法重构 NDVI 和 LST 时间序列,构建了 5 种不同的农业干旱评估指标(VCI、TCI、VHI、MTVDI、 NVSWI),揭示了 2000—2015 年黄河流域农业干旱 的时间演变、空间分布特征^[5]。梳理过去的研究发 现,多数研究侧重于气象干旱评估,对农业干旱的 研究较少,且对其自然恢复期方面的研究存在明显 不足,这将使得流域粮食生产安全面临着严峻挑战。

因此,本文以典型气候过渡区黄河流域为例, 考虑到气象、下垫面要素的空间异质性,以水资源 分区为标准将黄河流域划分为8个子区域,并利用 1970—2014年气象数据集,构建了修正的帕默尔干 旱指数(sc_PDSI),揭示了不同气候区农业干旱事 件的时空演变特征;其次,采用游程理论方法探究 了干旱特征变量空间分布格局,并以分辨率 0.25°× 0.25°栅格为响应单元,耦合农业干旱检验结果,利 用陆地水储量数据(TWS)计算了农业干旱的恢复 期;最后,采用地理统计方法(全局和局部 Moran's I 指数)揭示了不同子区域农业干旱恢复期的空间异 质性分布特征。

1 研究区概况及数据来源

黄河是我国第二大河,从源头至入海途经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山 东共9个省份,干流长度为5464 km,流域面积约为 79.5万 km²,属于典型的复杂气候过渡带(半湿润、 干旱、半干旱)。降水量年内分配不均,主要集中于 6—10月份,占1970—2014年多年平均降水量的 69.50%左右,降水量自东南至西北逐渐递减且多年 平均气温介于-4℃~14℃之间,气温西北低、东南 高^[11-12]。考虑到气候要素和下垫面因子的空间异 质性影响,本文以二级水资源分区为例,分别为龙 羊峡以上、龙羊峡至兰州、兰州至河口镇、内流区、 河口镇至龙门、龙门至三门峡、三门峡至花园口以 及花园口以下(分别简称为区域 I、II、III、IV、V、VI、 VII和VIII)。流域地理位置及陆地水储量站点空 间分布如图1所示(见页)。

研究数据包括:1970—2014年月尺度降水量、 平均气温、潜在蒸发量、土壤体积含水量以及陆地 水储量等数据,其中潜在蒸发量采用彭曼公式计算 得到。气象数据集来源于英国东英吉利大学的气 候研究中心(Climate Research Unit,CRU),版本选用 CRU TS 4.03,数据由气象站实测数据空间插值获 得,空间分辨率为 0.5°×0.5°。土壤体积含水量和陆 地水储量数据来源于 GLDAS(https://disc.gsfc. nasa.gov/)数据集中的 CLSM 模式,其为由美国航空 航天局(NASA)、戈达德太空飞行中心(GSFC)和美 国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家环境预报中 心(NCEP)联合开发的全球高分辨率的陆面数据, 空间分辨率为 0.25°×0.25°。为保证空间分辨率一 致,将所有数据通过反距离权重方法(IDW)重采样 为 0.25°×0.25°的空间分辨率。

土壤湿度单位(kg・m⁻²)转化为国际单位制的体积含水量(m³・m⁻³)的计算公式为^[13]:

$$\theta = \frac{kg}{m^2} \frac{m^3}{1\ 000\ kg} \frac{1\ 000\ mm}{1\ m} \frac{1}{D(mm)} \tag{1}$$

式中,θ为土壤体积含水量,m³·m⁻³;D为土壤层厚度,mm;kg为重量单位;mm为厘米单位。值得指出的是,由于 GLDAS 土壤湿度产品的单位为 kg·m⁻²,通过公式(1)将其转化为单位体积含水量。

2 研究方法

2.1 修正的帕默尔干旱指数(sc_PDSI)

(1) 计算农业干旱水分异常指数 Z

水分距平d为实测降水量(P)与气候适宜条件 下降水量(\hat{p})差值:

$$d = p - \hat{p} \tag{2}$$

将水分距平d与相应月份的气候权重系数K相乘,获得 Palmer Z 指数^[14]:

$$Z = dK \tag{3}$$

(2) 气候权重系数 K 的计算公式为:

$$K_i = \left(\frac{17.67}{\sum_{i=1}^{12} \overline{D}_i K'_i}\right) K'_i \tag{4}$$

$$K'_{i} = 1.5 \cdot \log_{10} \left[\frac{\overline{PE_{i}} + \overline{R_{i}} + \overline{RO_{i}}}{(\overline{P_{i}} + \overline{L_{i}}) \overline{D_{i}}} + \frac{2.8}{\overline{D_{i}}} \right] + 0.5$$
(5)

式中,*i*表示第*i*个月;*D*是水分距平*d*绝对值的多年 平均值; \overline{PE} 、 \overline{P} 、 \overline{R} 、 \overline{RO} 分别代表平均潜在蒸散发、降 水量、补水量、土壤水量; \overline{L}_i 为第*i*个月对应的实际 平均土壤水分损失量。

(3) PDSI 指数的计算公式为:

$$PDSI_i = 0.897 \cdot PDSI_i + \frac{1}{3}Z_i \tag{6}$$

2004 年 WELLS 等^[15] 提出了修正的 PDSI 指数, 计算出每个区域所对应的权重系数和持续因子,具有 较好的空间可比性,sc_PDSI 干旱等级标准见表 1。

sc_PDSI	干旱程度 Degree of drought
>-1.0	无旱 Normal
-2.0~-1.0	轻旱 Light drought
-3.0~-2.0	中旱 Moderate drought
-4.0~-3.0	重旱 Severe drought
≤ -4.0	极旱 Extreme drought

2.2 游程理论

游程理论方法是 YEVJEVICH 于 1967 年提出 的广泛用于识别干旱事件的重要手段^[16]。为了揭 示农业干旱事件的多变量属性特征,本文利用游程 理论各个响应单元的干旱特征量,其详细计算过程 为:当 *sc_PDSI* < -1 时,记作一次干旱事件,该次干 旱事件从发生至结束记为干旱历时(月),该次干旱 历时相应的 *sc_PDSI* 绝对值的累加之和记为干旱烈 度,其与干旱历时的比值记为干旱强度;所有干旱 事件烈度的最大值记为干旱峰值,即特定干旱事件 中最严重月份的干旱程度。

2.3 干旱恢复时间

基于游程理论农业干旱的识别过程和陆地水储量数据,农业干旱的自然恢复时间计算过程为:

(1)当*sc_PDSI*≤-1时,记作一次干旱事件,并 识别出该次干旱事件的起始和终止时间;

(2)利用陆地水储量时间序列,识别出每次干 旱事件对应的平均土壤含水量赤字水量,识别出农 业干旱起始时刻对应的土壤含水量,并计算其差 值,即农业干旱恢复其初始状态所缺的水量;

(3)以一次农业干旱终止时刻为干旱自然恢复 期的起始时间,当(2)中所缺水量大于零时,相应的 恢复历时记为农业干旱自然恢复期;

(4)将所有干旱事件干旱恢复时间进行平均, 即为该响应单元对应的干旱恢复期。

2.4 地理统计方法(全局和局部 Moran's I 指数)

Moran's I 指数是广泛用于度量空间相关性的 一个重要指标,其包含全局 *Moran's I* (Global Moran's index, *GMI*)和局部 *Moran's I* (Local Moran's index,*LMI*)。前者是由澳大利亚统计学家 PATRICK^[17]于 1950年开发的空间自相关性度量指 标,后者则由美国 ANSELIN 教授^[18]于 1995年提 出。其计算公式分别为:

$$I_{\text{GMI}}(\boldsymbol{h}) = \frac{n \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} \omega_{ij}(z(\boldsymbol{u}_i) - m) (z(\boldsymbol{u}_j) - m)}{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} \omega_{ij} \sum_{i=1}^{i=n} (z(\boldsymbol{u}_i) - m)^2},$$

$$z(\boldsymbol{u}_i), z(\boldsymbol{u}_j) \in \delta(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{h})$$
(7)

$$I_{\text{LMI}}(\boldsymbol{h}) = \frac{z(\boldsymbol{u}_{i}) - m}{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{j=n} [z(\boldsymbol{u}_{j}) - m]^{2}} \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \omega_{i,j} [z(\boldsymbol{u}_{j}) - m]$$
(8)

式中,n 为样本个数;z 为空间变量的属性值,即本文 的农业干旱恢复时间;h 为相邻栅格之间的距离;u为空间位置; $\delta(u,h)$ 表示满足 $||u_i - u_j|| \approx h$ 的点对 集合; ω_i 为空间权重矩阵;m 为样本均值。

全局 Moran's I 可以分析整个不同子区域的干 旱恢复时间在空间上的潜在依赖性,用单一的值来 反映其空间自相关程度;GMI>0(<0)代表干旱恢复 时间在空间上呈正相关(负相关),其值越大(小)空 间相关性越强(弱),GMI ∈ [-1,1];局部 Moran's I 指数揭示了栅格响应单元与相邻单元在干旱恢复 时间的相关性,即揭示空间聚集或离散状态。

局域性关联性确定空间权重的计算公式为:



3 结果与分析

3.1 不同子区域农业干旱事件的时空演变特征

基于 8 个子区域 1970—2014 年面平均气象和 土壤水数据,采用修正的帕默尔干旱指数计算了月 尺度农业干旱事件的时程变化特征。分析图 2 发现:



图 1 陆地水储量站点空间分布及流域地理位置图(I、II、III、IV、V、VI、VII 和 VIII 分别为龙羊峡以上、龙羊峡至兰州、 兰州至河口镇、内流区、河口镇至龙门、龙门至三门峡、三门峡至花园口以及花园口以下区间边界;TWS 代表陆地水储量) Fig.1 Spatial distribution of land water storage stations and geographic location map of River Basin (I、II、III、IV、V、VI、VII and VIII are the boundaries above Longyangxia, Longyangxia to Lanzhou, Lanzhou to Hekouzhen, inner flow area, Hekouzhen to Longmen, Longmen to Sanmenxia, Sanmenxia to Huayuankou, and below Huayuankou, respectively; TWS represents land water reserves.)



图 2 黄河流域 8 个子区域农业干旱事件的时程变化特征

F gi.2 Temporal variation characteristics of agricultural drought events in eight sub regions of the Yellow River Basin

黄河流域不同子区域农业干旱的时程演变特征大 致分为两个阶段:1970-1990 年和 1990-2014 年, 其中,1990年以前,不同子区域对应的农业干旱时 程变化规律交替变化,即蓝色和红色渲染相当,而 1990年以后,不同子区域间农业干旱程度差异显 著,如子区域Ⅰ多以蓝色渲染为主,而子区域Ⅲ~ VII 多以红色渲染为主,即黄河源区农业干旱呈暖 湿化的趋势,而其他区域呈暖干化的趋势;从 sc_ PDSI 值角度出发,由黄河上游至黄河下游,农业干 旱程度逐渐加剧(红色渲染对应的干旱面积较大), 尤其是1990年以后,这可能归因于该时期人类活动 影响加剧,如黄河中下游存在四大农业灌区(宁蒙 灌区、河套灌区、汾河灌区和关中灌区),农业粮食 生产大量取水导致河川径流量显著减少[19];由此看 来,黄河流域农业干旱在空间上具有异质性,且随 着气候变化,这一差距愈加突显。

为进一步揭示黄河流域 8 个子区域农业干旱的 空间变化规律,本文采用 Mann-Kendall 趋势检验方 法对不同响应单元下的 sc_PDSI 序列进行趋势性检 验,并采用反距离权重方法(IDW)对趋势变化检验 统计量 Z 值进行空间插值,结果如图 3 所示(见 218 页)。分析图 3 发现,龙羊峡以上(I)、龙羊峡至兰 州(II)西北部区域统计量 Z 值均大于 0,即该区域 农业干旱整体呈湿润化特征,且区域 I 大部分区域 在 99%置信水平下是显著的(统计量 Z>2.57),这一 结果侧面印证了黄河上游农业干旱时间尺度农业 干旱化程度降低的科学性和合理性;内流域(IV)农 业干旱趋势检验的统计量 Z 值均小于-2.57(99%置 信水平),即未来内流区农业干旱化程度加剧;通过 分析不同子区域统计量 Z 值可知,黄河流域中下游 区域农业干旱愈加严重,而黄河上游未来农业干旱 程度将得以缓解,该研究结果与叶培龙等^[20]得到的 近 40 a 来黄河上游全区域暖湿化趋势的气候特征 基本一致。

整体而言,黄河流域农业干旱化演变趋势在空间上干湿分明,黄河上游地处高海拔寒区,气候变暖导致冰川融水,局地降水增加,农业干旱程度减弱,而中下游存在大型农业灌区、高密集人类活动区,天然河道取用水增大,导致农业干旱程度加剧。

3.2 基于游程理论的干旱特征变量识别结果

由于农业干旱具有多变量属性(干旱次数、干 旱历时、干旱强度和干旱峰值),采用游程理论方法 从各响应单元 sc_PDIS 序列中分离出农业干旱的多 变量属性,统计结果如图 4 所示。

分析图 4 发现:由历史时间序列(1970—2014 年)干旱特征统计结果箱型图中值可知,干旱特征 变量属性在不同子区域之间差异明显,且干旱历时 和干旱强度具有很好的长程相依性,即干旱历时 长,干旱强度大;子区域 I、II、III、IV、V、VI、VII 和 VIII 对应的干旱次数分别为 18、16、23、24、25、17、 27、35 次,相应的干旱历时分别为 13、16、10、14、15、 17、10、9 个月(箱体中位数可知),需要指出的是子 区域 VI 的干旱强度和干旱峰值最大,子区域 VIII 最 小,即前者发生极端干旱的风险较大;由干旱峰值箱



Fig.4 Statistical results of agricultural drought characteristic variables in 8 subregions of the Yellow River Basin from 1970 to 2014

体宽度可知,子区域 I、子区域 VII 和子区域 VIII 的 箱体宽度较小,而子区域 II ~IV 的箱体宽度较大,这 归因于前者多属于半湿润气候区,而后者属于干 旱、半干旱过渡带,导致计算的农业干旱特征变量 值在年际直接差异程度较大。

通过深入分析发现,黄河流域农业干旱化程度与 地理位置息息相关,流域中游区域干旱化程度最高, 而下游次之,上游最小,这可能归因于上游和下游均 属于半湿润气候区,而中游地处干旱、半干旱过渡区。

通过上述分析发现,受气候、下垫面类型的空间异质性影响,干旱特征变量属性值在区域之间具 有显著的差异性。为了更好地展示其空间差异性, 基于各响应单元对应的干旱特征值,采用 IDW 方法 进行空间插值,结果如图5所示。

分析图 5 发现:(1)由西至东,黄河流域农业干 旱次数整体呈逐渐增加的变化趋势,最大值出现在 子区域 VIII;(2)通过对比干旱历时、干旱强度和干 旱峰值的空间变化趋势可以发现,三者的空间分布 规律基本相同,但局部区域略有差异;(3)子区域 II (龙羊峡至兰州)南部和子区域 VI(龙门至三门峡) 农业干旱历时长、强度和峰值均较大,这可能归因 于该区域为农业高耗水区(汾河灌区和关中灌区), 导致农业干旱化程度较高;(4)纵观上述研究发现, 各子区域之间,农业干旱既有差异性、又有相似性, 有必要深入厘清农业干旱属性值在空间上的空间 异质性特征,重点布控干旱高发区。





Fig.3 Spatial variation trend of agricultural drought events in eight subregions of the Yellow River Basin



Fig.5 Spatial distribution of agricultural drought characteristic variables in the Yellow River Basin

3.3 不同子区域农业干旱自然恢复时间的空间分 布规律

由前文分析可知,不同子区域间农业干旱时空 变化特征具有显著的差异性,本节通过耦合游程理 论检验和陆地水储量变化过程,计算了不同子区域 的农业干旱恢复时间,结果如图 6 和图 7 所示。

分析图 6 发现:黄河流域农业干旱恢复时间介 于 4~8个月之间(箱型图中位数),各区域之间存在 差异性,整体呈现为:子区域 IV 的干旱恢复时间 长,其中位数高达 8 个月左右;子区域 III 次之,约为 6 个月;子区域 II 和 VII 的干旱恢复时间最小,约为 4 个月。值得注意的是子区域 IV 的干旱修复时间 最长,这主要归因于该区域属于典型的内流域,与 外界不存在水资源之间的交换,仅为降水补给,从 而导致其农业恢复时间较长。

图 7 为不同子区域各响应单元下农业干旱恢复 时间的空间分布规律。由图可知,黄河流域北部和 南部区域干旱恢复时间较短,而流域中部区域干旱 恢复时间较长,局部区域干旱恢复时间高达 36 个 月;不同子区域,农业干旱恢复时间存在明显的聚 集性空间分布特征,如子区域 I 的中部、子区域 II 的南部等;黄河流域农业干旱恢复时间介于 1~36 个月,4 个月以内所占的响应单元面积比重为 42.68%,相应的大于 4 个月的响应单元面积比重为 57.32%。

总的来说,我们发现干旱地区(北部)的生态系统从干旱中迅速恢复,这归因于该生态系统中的植物通过不同的生理、解剖和功能机制来适应长期缺水,帮助它们减少水分损失、呼吸成本、光合活性和最大限度地吸收水分。





Fig.6 Difference characteristics of natural recovery period of agricultural drought in different sub-regions

3.4 农业干旱恢复时间的全局和局部空间自相 关性

受气候、下垫面要素等影响,干旱因子特征变 量属性值存在一定的空间相关性,即农业干旱恢复 时间亦具有"相近相似"的空间分布格局^[21]。因此,本文以不同子区域为例,采用地理统计分析方法(全局和局部 Moran's I 指数)揭示农业干旱恢复时间的空间自相关性。

图 8 为不同子区域农业干旱自然恢复时间的全局空间自相关性检验结果。分析图 8 可知:除子区域 II,其他子区域的全局空间自相关性统计量 *Moran's I* 值均大于 0.20,且在 99%置信水平下是显著的(*T*-检验);子区域 I、II、III、IV、V、VI、VII 和 VIII 对应的 *Moran's I* 值分别为 0.44、0.02、0.35、0.41、0.26、0.26、0.66 和 0.26;在 99%置信水平下,统计量 *T* 值分别为 12.45、0.60、11.43、6.95、7.10、9.14、11.19 和 4.50,这意味着除了子区域 II,其他区域农业干旱恢复时间在空间上均存在显著的空间自相关性。

图 9 为不同子区域农业干旱自然恢复时间的局 部空间自相关性检验结果。由图可知:黄河流域大 部分区域局部空间自相关性检验结果为非显著性, 即相邻区域之间农业干旱恢复时间的差异性较小. 而流域中部区域存在显著的高高聚集现象:以子区 域为研究对象,子区域Ⅰ中部、子区域Ⅱ北部、子区 域 Ⅲ 西南部、子区域 Ⅳ 南部、子区域 Ⅴ 西南部和 子区域 VI 的北部均存在显著性的"高高聚集"现 象,即该区域的农业干旱修复时间明显高于相邻区 域,且在 99%置信水平下是显著的;流域中部的子 区域高高聚集位置周边存在"低高异常"现象,这意 味着随着农业干旱程度的加剧,其干旱恢复时间将 增加(被同化):通过本文的研究可以精准识别出农 业干旱发生时其所需要的自然干旱恢复时间,并检 验出其区域性空间集聚特征,可为抗旱减灾提供依 据,能够适时提高农业粮食安全生产的保障水平。

4 讨 论

随着气候变化的加剧,农业干旱已成为农业生产和粮食安全的重要影响因素^[22]。本文以黄河流域为例,通过构建修正的帕默尔干旱指数(sc_PDSI),探究了不同气候区农业干旱的时空演变规律,结果表明:流域上游农业干旱程度最小,中游和下游农业干旱化程度加剧,这一结论与王飞采用VCI、TCI等农业干旱指标得到的干旱趋势检验结果一致^[5]。同时,庞爱萍等^[23]研究发现黄河上游降水量呈增加趋势,而其他区域显著减少,该结论侧面证实了本研究结论。

本研究发现,干旱区生态系统发生农业干旱可 以迅速恢复,而干旱、半干旱过渡带的农业干旱时间





的全局空间自相关性







Fig.9 Local spatial autocorrelation of natural recovery time of agricultural drought in different sub-regions

较长,同时半湿润区(黄河源区)的干旱恢复时间也 较长。该结论与 ZHANG 等^[24]得到的不同气候区 干旱恢复时间不同、且干旱气候区对干旱恢复时间 较短的结论相一致。本研究对于水资源短缺的黄 河流域抗旱减灾工作的顺利开展可提供一定的理 论支撑。 在本研究基础上,尚需开展以下研究,如土壤 需水量数据源的选择仍具有不确定性,未来将增加 集合土壤水预报数据,并利用 GPP 或 NPP 等植被 生态系统要素,深入探究农业干旱发生后生态系统 对干旱的响应机理。此外,本研究以相邻区域进行 全局和局部空间自相关性检验,为了增加检验结果 的鲁棒性,未来将以 0.25°×0.25°为响应单元,按照 距离的方式计算农业干旱恢复时间空间自相关性。

5 结 论

本文研究旨在分析黄河流域农业干旱发生、发展的空间演变特征,并采用科学合理的指标揭示在 气候、下垫面空间异质性影响下农业干旱的自然恢 复时间,同时精准量化评估干旱恢复时间的空间分 布格局。主要结论为:

(1)时间上,1990年以前,农业干旱化程度较低,但随着气候变化,流域干旱化程度加剧;空间上,上游大部分区域农业干旱化程度有所减缓,而中游和下游区域干旱化程度加剧,且在95%置信水平下是显著的;

(2)自上游至下游,干旱发生频次逐渐增加,但 干旱历时、干旱烈度和干旱峰度均呈"先增加后减 小"的变化趋势,农业干旱化程度与地理位置、降水 要素息息相关,受农业取用水、人类活动影响较大;

(3)干旱区农业干旱恢复时间较短,干旱、半干 旱过渡区以及湿润区农业干旱恢复时间较长。同 时,黄河流域农业干旱恢复时间介于4~8个月之 间,干旱恢复时间小于4个月所占的响应单元面积 比重为42.68%,然而大于4个月的响应单元面积比 重高达57.32%。

参考文献:

[1] 张金良.黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J].人民黄 河,2020,42(4):1-6.

ZHANG J L. Water strategy for ecological protection and high quality development in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2020, 42 (4): 1-6.

[2] 张金萍,肖宏林.黄河流域灌区农业用水研究发展历程与展望[J].
 灌溉排水学报,2020,39(10):9-17.

ZHANG J P, XIAO H L. Past, current and future prospect for research on agricultural water use in irrigation districts in the Yellow River basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 9-17.

[3] 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-pre-

Li 1 1. 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.

[4] 王国庆,管晓祥,王乐扬,等.气候变化和人类活动对黄河重点区间

径流的影响[J].人民黄河,2019,41(10):26-30,39.

刘

WANG G Q, GUAN X X, WANG YY, et al. Impacts of climate change and human activities on stream flow of the key runoff generation areas of the Yellow River basin[J]. Yellow River, 2019, 41(10); 26-30, 39.

[5] 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.

WANG F. Study on the temporal and spatial evolution characteristics of drought from a multiple drought types perspective in the Yellow River basin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.

- [6] 曹闯,任立良,刘懿,等.基于联合干旱指数的黄河流域干旱时空特征[J].人民黄河,2019,41(5):51-56.
 CAO C, REN L L, LIU Y, et al. Spatial-temporal characteristics of drought of the Yellow River Basin based on joint drought index[J]. Yellow River, 2019, 41(5): 51-56.
- [7] HUANG S Z, CHANG J X, LENG G Y, et al. Integrated index for drought assessment based on variable fuzzy set theory: a case study in the Yellow River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 608-618.
- [8] 王璐,黄生志,黄强,等.基于综合干旱指数的黄河流域干旱多变量 概率特征研究[J].自然灾害学报,2019,28(6):70-80.
 WANG L, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Drought multivariable probability characteristics based on a multivariate standardized drought index in the Yellow River basin [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(6): 70-80.
- [9] 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.
 WANG F, WANG Z M, YANG H B, et al. 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.

- [10] 钱云平,林银平,张美丽.黄河流域农业干旱特征研究[J].人民黄河,1996(6):7-12, 61.
 QIAN Y P, LIN Y P, ZHANG M L. Study of drought characters of agriculture in Yellow River basin [J]. Yellow River, 1996(6): 7-12, 61.
- [11] TANG K L, ZHANG K L, LEI A L. Critical slope gradient for compulsory abandonment of farmland on the hilly Loess Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(5): 409-412.
- [12] 周帅,王义民,郭爱军,等黄河流域未来水资源时空变化[J].水力 发电学报,2018,37(3):28-39.
 ZHOU S, WANG Y M, GUO A J, et al. Spatial and temporal features of future changes in water resources in Yellow River basin [J].
 Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 28-39.
- [13] 朱智,师春香.中国气象局陆面同化系统和全球陆面同化系统对中 国区域土壤湿度的模拟与评估[J].科学技术与工程,2014,14 (32):138-144.

ZHU Z, SHI C X. Simulation and evaluation of CLDAS and GLDAS soil moisture data in China[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(32): 138-144.

- [14] 杨扬,安顺清,刘巍巍,等.帕尔默旱度指数方法在全国实时旱情监视中的应用[J].水科学进展,2007,18(1):52-57.
 YANG Y, AN S Q, LIU W W, et al. Application of palmer drought severity index method to real time drought survey in China[J]. Advances in Water Science, 2007,18(1): 52-57.
- [15] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating palmer drought severity index [J]. Journal of Climate, 2004, 17 (12): 2335-2351.
- [16] YEVJEVICH V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Fort Collins, Colorado State University, 1967, 19 p. (Hydrology paper no. 23) [J]. Journal of Hydrology, 1951, 7(3):491-494.
- [17] PATRICK H T. Financial development and economic growth in developing countries[J]. Economic and Cultural Change, 1966, 14(2): 174--189.
- [18] ANSELIN L. Local indicators of spatial association [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(3):93-115.
- [19] 王光辉.近60年黄河干流径流泥沙变异性分析[D].北京:清华大学,2019.
 WANG G H. The flow regime variation of the mainstream of the Yellow River in recent 60 years[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [20] 叶培龙,张强,王莺,等.1980-2018 年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J].大气科学学报,2020,43(6):967-979.
 YE P L, ZHANG Q, WANG Y, et al. Climate change in the upper Yellow River Basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 967-979.
- [21] 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.
- [22] 夏传花,贺中华,梁虹,等.贵州省 2006-2015 年粮食生长季农业干 旱时空变化研究[J].中国农村水利水电,2021(5):25-30.
 XIA C H, HE Z H, LIANG H, et al. Spatial and temporal changes of agricultural drought in grain growing season of Guizhou Province from 2006 to 2015[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(5): 25-30.
- [23] 庞爱萍,李春晖,杨志峰,等.近 50 年黄河流域降水变化的时空特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2008(4):420-423,336. PANG A P, LI C H, YANG Z F, et al. Spatial and temporal changes in precipitation in the yellow river basin in the last 50 years[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2008(4): 420-423, 336.
- [24] ZHANG S L, YANG Y T, WU X C, et al. Postdrought recovery time across global terrestrial ecosystems [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(6): e2020JG005699.