

doi: 10.6046/zrzyyg.2023226

引用格式: 赵富,王莉,马禹昂,等.2000—2020年山西省植被生长状态对气象干旱的响应[J].自然资源遥感,2025,37(1): 221–231.(Zhao F, Wang L, Ma Y A, et al.Responses of vegetation growth conditions to meteorological drought in Shanxi Province from 2000 to 2020[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2025,37(1): 221–231.)

2000—2020年山西省植被生长状态对气象干旱的响应

赵富,王莉,马禹昂,蒋瑞霞

(河南理工大学测绘与国土信息工程学院,焦作 454003)

摘要: 基于2000—2020年标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)与植被状态指数(vegetation condition index, VCI),采用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)、Mann-Kendall趋势分析、Pearson相关系数等方法,分析了山西省不同植被类型下气象干旱变化趋势,量化了植被生长状态对气象干旱的响应时间。结果表明:①20世纪以来,山西省整体气象干旱逐步缓解,但季尺度上呈现由春至冬旱情加重区不断扩大的态势;②不同植被类型下气象干旱均得到缓解,且随着时间尺度增长,态势越发显著,而季尺度上由春至冬缓解态势渐弱,加重态势渐强;③植被生长状态受气象干旱影响显著,年尺度上主要以正相关为主,季尺度上高相关性区域由春至冬逐渐收缩至西北部 and 东北部,而响应时间呈现出春冬长于秋夏的特征;④不同植被类型下植被生长状态对气象干旱的响应均在夏季最为迅速,且耕地是对气象干旱最敏感的地类。

关键词: SPI; VCI; 气象干旱; 响应关系; 山西省

中图分类号: TP 79; P 461 **文献标志码:** A

文章编号: 2097-034X(2025)01-0221-11

0 引言

伴随着全球变暖和气候异常,世界上越来越多的地区长期降水匮乏,促使干旱成为频发性自然灾害,虽然其演变过程缓慢,但影响范围广、危害程度深,对生态环境、农业生产及社会经济都造成了严重威胁^[1-2]。根据现有研究,干旱常分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[3],其中气象干旱常发生在缺乏降水或降水量长期显著低于平均水平的地区,通常是其他类型干旱发生的主要驱动力^[4],也是造成植被生长状态恶化的主要原因。

气象干旱常用基于气象站点的干旱监测指数表征,如标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)、帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)、标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)、综合气象干旱指数(composite index of meteorological drought, CI)^[5]等,其中SPI理论完善、易于计算且特征明显,已被广泛应用于评估不同时间尺度的气象干旱^[4, 6]。而植被生长状态常采用基于遥感的干

旱监测指数表征,如归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、植被状态指数(vegetation condition index, VCI)、温度状况指数(temperature condition index, TCI)等,其中NDVI是衡量植被覆盖率、反映植被长势的重要指标,但对于不同植被类型的解释能力有限,易受云、阴影和大气干扰^[7-8],故在此基础上提出VCI用于植被健康状况评估和水分监测,目前已有诸多学者研究证明了VCI在黄土高原及西北地区存在良好的适用性。李家誉等^[9]以VCI作为植被状况指标,得到了黄土高原植被状况时空变化特征并分析了其与气象干旱的相关性;李明等^[10]采用SPI和VCI分别表征气象干旱和农业干旱,进而探究二者的时滞关系,证明了VCI能较好反映黄土高原地区的干旱情况;张华等^[11]通过对NDVI和VCI所表征的植被生长状况与SPEI的相关性进行对比分析,证明了VCI相较于NDVI适用性更好。

对不同指数之间的响应关系的研究常以2种思路展开。其一,以统计面雨量的方式,按以点代面的形式,分析2个指数时间序列的相关性,进而量化响应时间、拟合响应关系。刘永佳等^[6]以时序SPI和

收稿日期: 2023-07-24; 修订日期: 2023-10-10

基金项目: 河南省科技攻关项目“基于GIS的大学生体质健康评价与预警技术研究”(编号: 192102310025)和河南理工大学国家社科基金预研项目“我国城乡青少年体质健康时空差异及体制提升研究”(编号: CSKY2023-04)共同资助。

第一作者: 赵富(2000-),男,硕士研究生,主要从事气象学与地理信息技术及应用研究。Email: zhaofu_2000@163.com。

通信作者: 王莉(1981-),女,博士,副教授,主要从事地理信息系统研究。Email: wangli29@hpu.edu.cn。

标准化径流指数 (standardized runoff index, SRI) 为基础,研究无定河、窟野河和沁河流域水文干旱对气象干旱的响应时间,得到无定河、窟野河和沁河流域气象干旱向水文干旱的年传播时间为 5~7 个月; Dai 等^[12]以 SPI 和标准化土壤水分指数 (standardized soil moisture index, SSMI) 表征气象干旱和农业干旱,通过选择不同时间尺度的 SPI 和 1 个月时间尺度的 SSMI 之间的最大条件概率值,确定从气象干旱到农业干旱的传播时间,结果表明夏季和秋季干旱传播时间短于春季和冬季,说明夏季和秋季干旱传播速度快于春季和冬季。其二,通过逐项元计算 2 个指数影像集的相关性,直观分析响应时间在空间上存在的差异。靖娟利等^[7]采用趋势分析和相关性分析,以 SPEI 和 NDVI 影像集为基础,研究植被变化及其对气象干旱的响应特征,结果表明滇黔桂地区 NDVI 对短时间尺度 SPEI 响应比较敏感;吕振涛等^[13]借助 NDVI 和 SPEI,研究蒙古国植被对气象干旱的敏感性,结果表明大部分区域植被生长受干旱影响较强,且相关性显著区域主要在中部地区,各植被指数与干旱指数呈较明显的正相关关系,且草地是最敏感的地类。本研究将 2 者融合,在完成空间相关性分析的基础上,得到可用来量化响应关系的平均响应时间,同时完成不同植被类型下植被生长状态对气象干旱响应时间的比较。

山西省位于黄土高原东翼,远离海洋,再加上东西有太行、吕梁两山耸立,阻隔水汽,故降水稀少,干旱频发。全省林草丰富,且以夏、秋为主要粮食产季,产量易受干旱影响。多数学者以黄土高原为研

究区,聚焦于整体的干旱时空特征分析或干旱响应关系研究^[9-10,14-15],本研究选取黄土高原中属典型半干旱半湿润区的山西省为研究区,借助 Google Earth Engine(GEE)平台,基于气象站点数据和遥感监测数据,将变分模态分解 (variational model decomposition, VMD) 与 Mann-Kendall 相结合,分析山西省 2000—2020 年不同植被类型下气象干旱变化趋势,同时采用点、面结合的思路,研究其植被生长状态对气象干旱的响应机制,量化响应时间,为山西省应对气象变化、实现生态建设提供理论支撑。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

山西省地形错综复杂、河谷纵横,西部是以吕梁山为主干的黄土高原,东部是以太行山为主脉形成的块状山地,汾河、桑干河贯穿山谷之中,盆地、平原沿河由东北至西南分散,形成“两山夹一川”的地形格局,属我国生态环境脆弱地带。全省的植被类型多样,除主要城市建设区以外,大部分区域被林地、草地和耕地所覆盖,其中草地主要分布在地形起伏较小的丘陵和山地,占总面积的 61.32% (图 1)。同时,受温带大陆性季风气候和地理因素影响,山西省冬夏气温悬殊,省内降水分布不均,降水季节性显著。全省各地年降水量介于 358~621 mm 之间,且主要集中在夏季 6—8 月,约占全年降水量的 70%,其余季节降雨稀少,总体水资源贫乏,旱情严重^[16-17]。

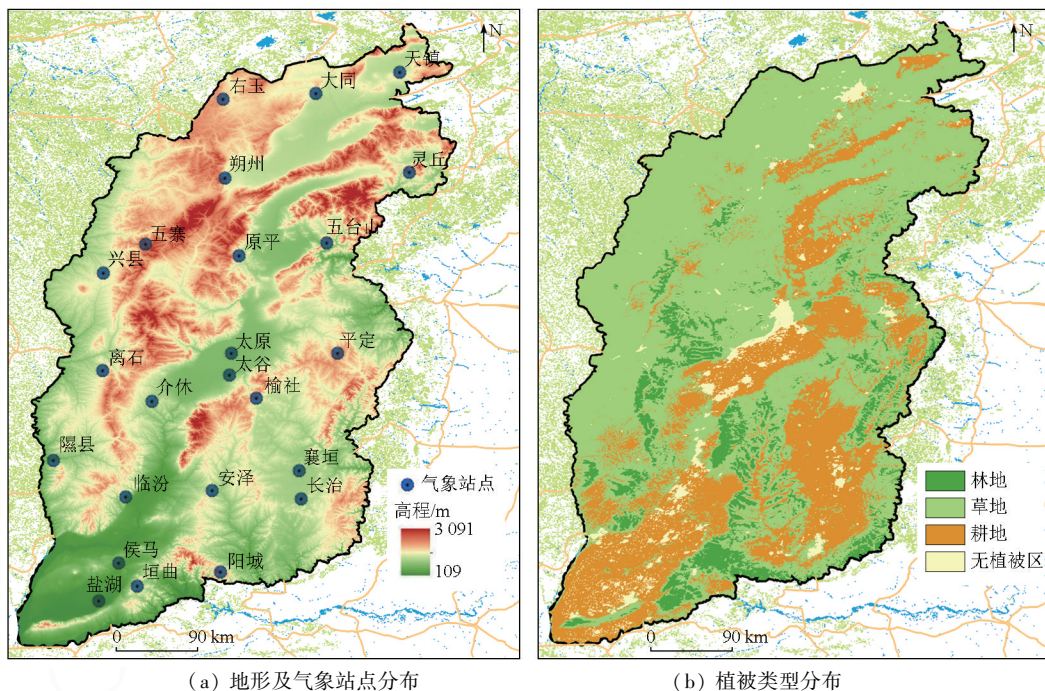


图 1 山西省地形、植被类型及气象站点分布

Fig.1 Distribution of terrain, vegetation types and meteorological stations in Shanxi Province

1.2 数据源及其预处理

1.2.1 气象数据

本研究所采用的山西省 2000—2020 年逐日降水数据来自国家气象信息中心整理的国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0) (<http://data.cma.cn/>), 将监测时序不完整的气象站点剔除, 选取 24 个气象站点反映山西省降水情况(图 1(a))。

1.2.2 MODIS 数据

本研究所采用的 MODIS 数据来自 GEE 平台 (<https://code.earthengine.google.com/>), 分别获取了植被指数产品 MOD13A1 (空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 16 d) 和土地覆盖类型产品 MCD12Q1 (空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 1 a)。对于 MOD13A1 产品, 为减少云雾和霾的影响, 采用最大值合成法(maximum value composite, MVC)将 NDVI 原始序列合成为月尺度序列^[18]。对于 MCD12Q1 产品, 为了避免地类变化造成的影响, 采用众数合成法进行多年合成, 再将得到的土地覆盖类型数据基于国际地圈生物圈计划(International Geosphere Biosphere Programme, IGBP)中全球植被分类方案重新划分为 4 类: 耕地(包括天然植被的作物和镶嵌农田)、草地(包括乔木草原、稀疏草原和草原)、林地(包括树栖针叶林、树栖阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、封闭灌木林和稀疏灌木林)、无植被区(包括城市和建筑区、冰、雪、裸露土地或稀疏植被覆盖、湿地和水域)^[19-20]。

1.2.3 其他数据

本研究所采用的全国行政区划数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 山西省 30 m 分辨率 DEM 数据来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。

2 研究方法

2.1 SPI 指数

SPI 是由 McKee 等^[21]于 1993 年提出的气象干旱指数, 其计算所需参数少且易于获取, 2009 年被世界气象组织推荐为主要的干旱指数, 用于旱情监测与跟踪^[22]。一般而言, SPI 计算步骤大致为: 首先, 计算某一时期的累积降水量, 构建时间序列; 其次, 使用概率分布估计时间序列的累积概率; 最后, 将累积概率转换为标准正态分布^[23-24]。具体的计算公式如下^[25-26]:

$$SPI = G \frac{t - (u_3 t + u_2)t + u_1}{[(l_3 t + l_2)t + l_1]t + 1}, \quad (1)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{Y(x)^2}}, \quad (2)$$

式中: x 为降水量; G 为正负系数, 当 $Y(x) > 0.5$ 时, $G = 1$, 当 $Y(x) \leq 0.5$ 时, $G = -1$; $u_1, u_2, u_3, l_1, l_2, l_3$ 为常数, 分别为: $u_1 = 2.515\ 517, u_2 = 0.802\ 853, u_3 = 0.010\ 328, l_1 = 1.432\ 788, l_2 = 0.189\ 269, l_3 = 0.001\ 308$; $Y(x)^2$ 为与 Γ 函数相关的降水量分布概率, 由 Γ 函数概率密度积分公式求得, 即

$$Y(x) = \frac{2}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx, \quad (3)$$

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty x^{\gamma-1} e^{-x} dx, \quad (4)$$

式中 γ 和 β 分别为 Γ 分布函数的形状和尺度参数。

基于气象站点降水数据计算得到的 SPI 具有多时间尺度特性, 记为 SPI1, SPI2, ..., SPI24。其中 SPI3 可用来分析气象干旱的季节特性^[27], SPI12 则可表征气象干旱的年际变化^[9], 适用于本研究中植被生长状态对气象干旱的响应与时滞关系探究。

2.2 VCI 指数

VCI 是通过某年某月的 NDVI 与研究时段内所有年份同月的 NDVI 最大和最小值归一化得到的植被指数, 单幅影像可分析地区内不同植被的相对生长状况, 多幅影像则可分析植被的生长变化趋势。具体的计算公式如下^[11, 28-29]:

$$VCI_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 100, \quad (5)$$

式中: VCI_i 为某年第 i 月 VCI; $NDVI_i$ 为某年第 i 月 NDVI; $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别为研究序列中第 i 月的 NDVI 最大值和最小值。

2.3 趋势分析

Mann-Kendall 趋势分析是一种非参数检验方法, 具有不受数据概率分布形式影响, 且不被异常值干扰的优点, 常用于气象和水文时间序列的趋势检验^[4, 24, 26]。本研究取 $|z| > 1.64, 1.96$ 和 2.58 分别代表原假设通过 90%, 95% 和 99% 的显著性检验。同时, 基于最小二乘法的线性拟合, 建立线性回归模型, 计算斜率, 表征时间序列趋势。

2.4 VMD 分解

VMD 分解是一种自适应、完全非递归的模式变分和信号处理方法^[30]。其可根据实际情况灵活确定分解模态数, 随后匹配每种模态的最佳中心频率和有限带宽, 得到原始信号的最佳分解方式, 具有更坚实的数学基础^[31]。VMD 对于构建和求解变分问题, 具体过程为: 首先构造带约束条件的变分问题,

约束条件为分解后的分量和与原信号相等,表达式为^[30-32]:

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\}, \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^K u_k = f(t), \quad (7)$$

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda(t)) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \|f(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle, \quad (8)$$

式中: α 为二次惩罚因子,在高斯噪声存在的情况下保证信号重构精度; $\lambda(t)$ 为拉格朗日乘法算子,使约束条件保持严格性。

在实现 VMD 分解时,需提前设置惩罚因子、噪声容限、收敛容错和分解模态数,进行信号初始化和常量判断。其中,惩罚因子 α 影响分解的精度,太小导致分解模态精度不高,但太大又面临着分解时间增多,甚至可能造成死循环。对于带有明显频率成分的信号,选用较小的惩罚因子能更好地捕捉信号的频率特征,而对于嘈杂或频率特征不明显的信号,可用较大的惩罚因子来限制模态的带宽,以提高噪声抑制能力;噪声容限 τ 主要控制对噪声的容忍度,过大的噪声容限可能会导致信号损失,对于高噪声信号,可以选用较大的噪声容限以容忍噪声成分,对于低噪声信号,可以选用较小的噪声容限以更严格地限制噪声;收敛容错 tol 控制误差大小,较小的收敛容错会提高分解精度,但也会导致耗费更长的计算时间。此三者会对分解结果的好坏产生间接影响。此外,信号初始化 init 设置为 1 进行均匀初始化;常量判断 DC 根据是否需要考虑直流成分而定,如需分析信号的直流成分,将其设置为 1,否则为 0。根据先验知识并结合多次实验结果,本研究取 $\alpha=2\ 000$, $\tau=0.024\ 4$, $\text{tol}=1\text{E}-6$, $\text{init}=1$, $\text{DC}=0$ 。

除以上参数外,由于分解模态数 K 直接决定分解结果是否正确,故研究确定合适的分解模态数常作为相关研究的重点^[32]。而本研究采用中心频率法确定分解模态数,大致过程为:

1) 将 $K=2, 3, \dots, n$ 依次代入 VMD, 计算各分解结果的高频模态的中心频率,记为 $\omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ 。

2) 若其中 $|\omega_t - \omega_{t+1}| \leq 0.001 \cap |\omega_{t+1} - \omega_{t+2}| \leq 0.001$, 表示中心频率出现平缓趋势, $K=t$ 即为最优解。

2.5 相关性分析

Pearson 相关系数常用于研究不同干旱指数间

式中的: K 为分解模态数; $\{u_k\}$ 和 $\{\omega_k\}$ 分别为 k 个模态分量和中心频率; $e^{-j\omega_k t}$ 为混合算子; $\|\cdot\|_2^2$ 为频率梯度 2 范数的平方; $\delta(t)$ 为狄拉克分布; $f(t)$ 为输入信号。

接着引入拉格朗日乘法算子与二次惩罚因子将约束变分问题转换为非约束变分问题,最后采用交替方向乘子法即可解决上述问题。表达式为:

的相关性和一致性。其计算公式为^[33]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{12} [(x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{12} (y_{ij} - \bar{y})^2}}, \quad (9)$$

式中: R 为相关系数; x_{ij}, y_{ij} 分别为第 i 年第 j 月的 VCI 值和 SPI 值。本研究基于 GEE 平台,利用最大值合成的月 NDVI 求得 VCI ,再采用均值法合成年尺度 VCI ,同时选取插值而来的 SPI_{12} ,逐像元分析年尺度的相关性。对于月和季尺度的相关性分析,逐像元计算各月多年 VCI 和相应的 1~24 个月时间尺度 SPI 之间的相关系数,得到 288 幅相关系数图,通过最大值合成各月、季(春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12—次年 2 月)最大相关系数图,其对应的 SPI 时间尺度即为滞后时间^[6,7,13]。

3 结果与分析

3.1 气象干旱变化趋势

3.1.1 年与月尺度气象干旱变化趋势

通过经验贝叶斯克里金法对各站点 SPI 的 Mann-Kendall 趋势检验结果和线性拟合斜率进行插值,分析山西省年、月尺度 SPI 空间变化趋势(图 2)。其中,年 SPI 以临汾、榆社和平定为界,呈现出北升南降的总趋势,东北部太行山、五台山附近以 $8\%/a$ 的速率上升,东南部安泽、长治等地以 $-0.98\%/a$ 的速率下降; SPI_{12} 全省总体呈上升趋势,以五台山为中心上升最为明显,速率为 $0.1\%/a$,南部以隰县、介休和榆社为界,南部上升趋势不明显,速率趋近于 $0.01\%/a$; SPI_3 趋势变化特征与 SPI_{12} 类似,区别在于五台山附近上升速率为 $0.3\%/a$; SPI_{12} 大部分地区呈上升趋势,五台山附近以 $0.8\%/a$ 的速率上升,东南部以安泽、襄垣两地为中

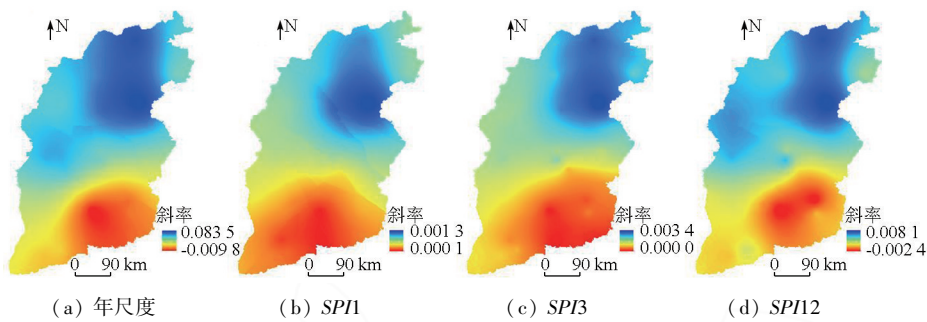


图 2 年与月尺度 SPI 变化趋势

Fig.2 Variation trend of SPI at the interannual and monthly scales

3.1.2 季尺度气象干旱变化趋势

分析山西省季尺度 SPI 变化趋势可知(图 3),春季 SPI 全省 98% 的地区呈上升趋势,除朔州、大同交界处和朔州西北部外,其余地区旱情均得到缓解;夏季 SPI 全省北部呈上升趋势,南部以安泽、襄垣、阳城和长治为中心形成闭环,夏旱呈现加重趋势;

秋季 SPI 以兴县、平定为界,以北呈上升趋势,以南呈下降趋势;冬季全省 97% 的地区旱情加重,只有灵丘和朔州 2 地 SPI 呈上升趋势。综合分析,山西省季尺度 SPI 呈上升趋势的区域,随着季节更替,一直处于由南至北方向上的动态移动,同时该区域的面积也在不断减小。

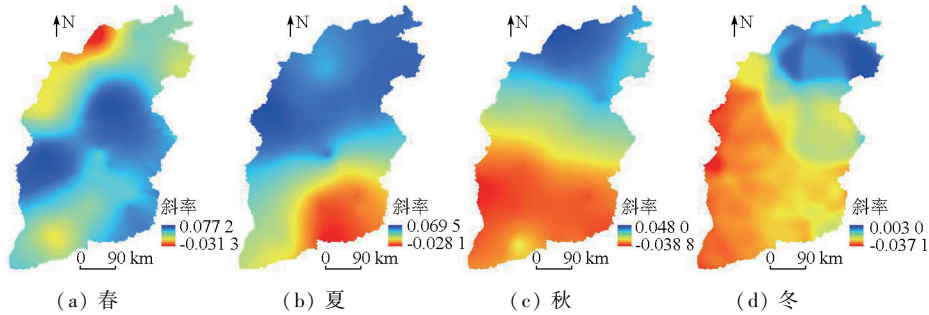


图 3 季尺度 SPI 变化趋势

Fig.3 Variation trend of SPI at the seasonal scale

3.1.3 不同植被类型下气象干旱变化趋势

为了探究不同植被类型下 SPI 的变化趋势,采用均值法合成面雨量,计算出不同植被类型下多时

间尺度 SPI,再分析趋势(表 1)。以草地春季 SPI 序列为例,采用 VMD 分解为 9 个模态分量(图 4),记为 IMF1, ..., IMF9,其中 IMF1 为趋势分量,反映了

表 1 不同植被类型下年、月与季尺度 SPI 变化趋势

Tab.1 Variation trend of SPI at different scales under different vegetation types

土地类型	类别	年	SPI1	SPI3	SPI12	春季	夏季	秋季	冬季
耕地	z ①	0.604	0.609	1.693 *	2.420 **	1.419	0.635	-0.544	-0.974
	s	0.044	0.001	0.002	0.003	0.046	0.033	-0.025	-0.031
草地	z	2.477 **	1.075	2.818 ***	6.555 ***	1.359	1.178	0.030	0.616
	s	0.082	0.001	0.003	0.006	0.049	0.048	0.002	-0.021
林地	z	0.967	0.407	1.439	2.461 **	1.571	0.574	-0.574	-0.974
	s	0.034	0.000	0.001	0.002	0.050	0.033	-0.025	-0.033
无植被区	z	1.298	0.753	2.141 **	3.661 ***	1.480	1.238	-0.513	-0.876
	s	0.051	0.001	0.002	0.003	0.040	0.050	-0.027	-0.035

① z 表示显著性检验结果, s 表示线性拟合斜率, * 表示通过 90% 显著性检验, ** 表示通过 95% 显著性检验, *** 表示通过 99% 显著性检验。

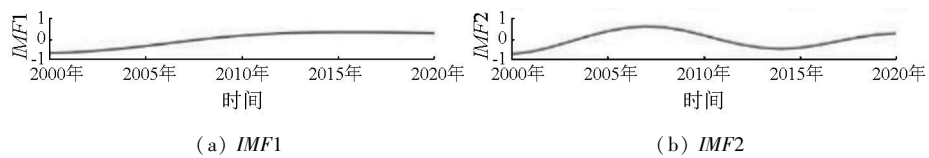


图 4-1 草地春季 SPI 的 VMD 分解

Fig.4-1 VMD decomposition of grassland SPI in spring

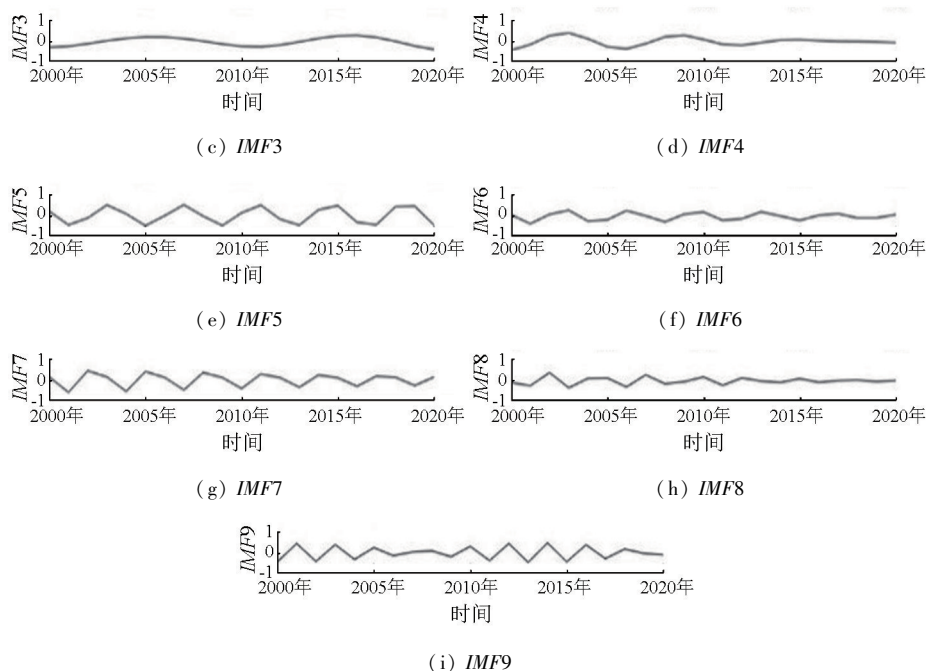


图 4-2 草地春季 SPI 的 VMD 分解

Fig.4-2 VMD decomposition of grassland SPI in spring

原始序列的总体趋势,同时结合趋势检验结果中草地春季 SPI 斜率为 0.049,呈上升趋势,与 IMF1 一致。

3.2 植被生长状态对气象干旱的响应

3.2.1 年尺度植被生长状态与气象干旱的相关性

分析年尺度 VCI 与 SPI12 的相关系数及显著性检验结果可看出(图 5),二者主要以正相关为主,占

全省面积的 94%,负相关区域主要集中在安泽和阳城附近,极显著正相关和显著正相关主要分布在以隰县、介休、太谷和平定为界的山西北部,占正相关区域面积的 25%,以南主要为不显著正相关和不显著负相关。

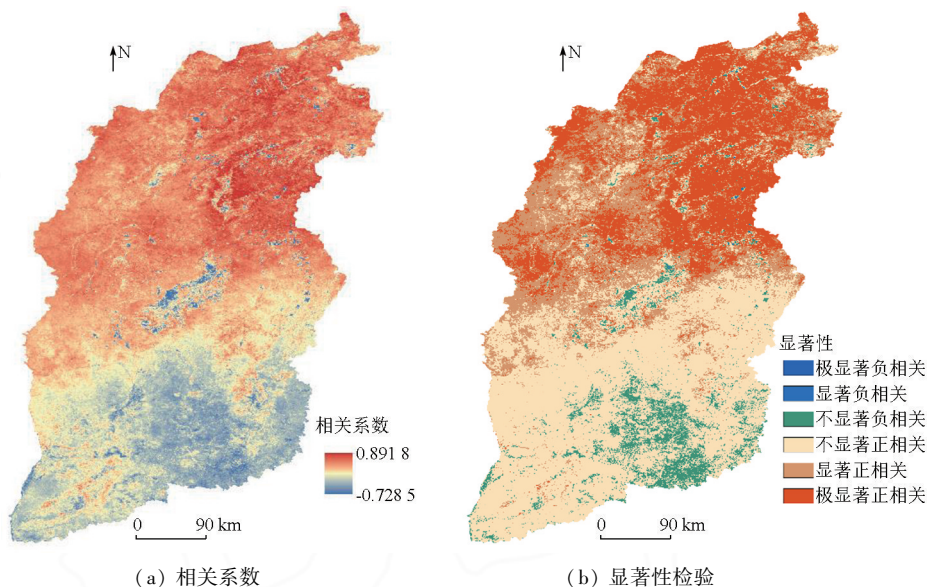


图 5 年尺度 VCI 与 SPI12 的相关系数及显著性检验空间分布

Fig.5 Spatial distribution of correlation coefficient and significance test between interannual VCI and SPI12

3.2.2 季尺度植被生长状态对气象干旱的响应

通过对每月 VCI 和对应月份多时间尺度 SPI 求解相关系数,反映植被状态对不同降水累积时间下

的气象干旱响应过程。将每月的相关系数图按季节划分合成最大相关系数图(图 6),并得到相应的响应时间(图 7)。

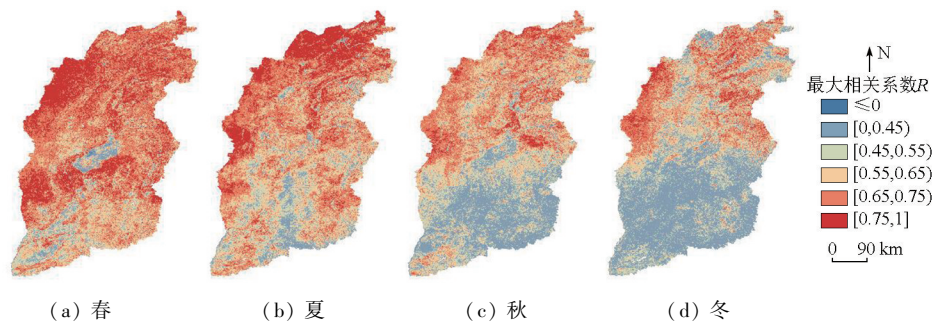


图6 季尺度 VCI 与不同时间尺度 SPI 的最大相关系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of maximum correlation coefficient between seasonal VCI and SPI at different time scales

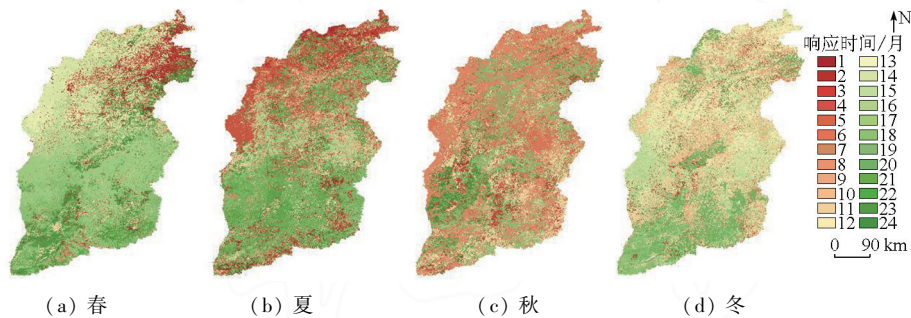


图7 季尺度 VCI 对 SPI 的响应时间

Fig.7 Response time of seasonal VCI to SPI

总体而言,各季 VCI 与 SPI 均以正相关为主,并且 $R>0.55$ 的区域,随着季节更替,由春至冬收缩至西北和东北部。其中,春季低相关性区域($R<0.45$)主要集中在太原及山西中南部的无植被区,占全省总面积的 4%,高相关性区域($R>0.75$)占全省总面积的 26%,在西北部兴县、五寨,及中部隰县、介休、榆社集中分布;夏季低相关性区域范围扩大至安泽、阳城,高相关性区域由西北部转移至东北部的右玉、大同,由中部向北转移至离石;秋季以隰县、榆社和平定为界,北部主要为 $R>0.55$ 的区域,其中高相关性区域占 11%,低相关性区域占 $R<0.45$ 区域的 56%;冬季 $R>0.55$ 的区域收缩至山西西北吕梁山和东北太行山地区,低相关性区域占全省面积的 40%。

VCI 对 SPI 的响应时间存在空间差异,且随季节变化明显。春季响应时间以长期为主,响应时间小于 12 个月的区域主要集中在东北部的天镇、灵丘和五台山地区,仅占全省面积的 18%,其余地区由北至南响应时间从 13~24 个月逐渐延长;夏季响应时间仍以长期为主,响应时间大于 12 个月的区域占 61%,响应时间小于 12 个月的区域主要沿兴县、五寨、朔州、右玉、大同和天镇一线分布,南部盐湖、垣曲、阳城和长治一线响应时间相较春季也明显缩短;秋季响应时间呈长短期离散分布,其中响应时间为 7 个月、18 个月和 11 个月的区域分别占 32%,11% 和 9%;冬季响应时间主要为 9~18 个月,响应时间

超 18 个月的区域主要分布在太原及南部平原等地,占全省面积的 17%。

3.2.3 月尺度植被生长状态对气象干旱的响应

分析全省各月 VCI 与 1~24 个月时间尺度 SPI 的相关系数均值(图 8),可以看出整个山西省 VCI 对 SPI 的响应时间随季节变化明显, $R>0.4$ 主要出现在 4—8 月,其余各月相关系数随着 SPI 时间尺度增加也不断增大。从中选取各月响应时间均值作为对应季节的响应时间(如春季响应时间,计算 3,4,5 月最大相关系数对应的 SPI 时间尺度的均值),春季为 13.7 个月,夏季为 10 个月,秋季为 14.7 个月,冬季为 22.7 个月,说明夏季气象干旱对植被生长状态的影响反应最快。

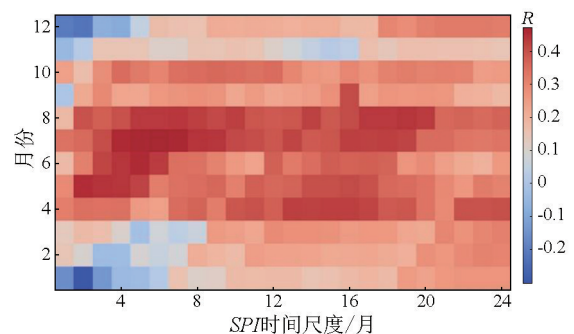


图8 各月 VCI 与 1~24 个月时间尺度 SPI 的相关系数均值

Fig.8 The average value of the correlation coefficient between VCI and SPI with a time scale of 1 to 24 months

3.2.4 不同植被类型下植被生长状态对气象干旱的响应

为进一步细化 VCI 对 SPI 响应的空间差异,统

计分析了不同植被类型下生长季 *VCI* 与 *SPI* 的最大相关系数及对应时间尺度(表 2)。结果表明,耕地、草地、林地和无植被区的最大相关系数分别出现在 7 月、7 月、5 月和 6 月,其对应的响应时间分别为 6 个月、6 个月、3 个月和 5 个月。而耕地、草地、林地

和无植被区最短响应时间分别出现在 5 月、6 月、5 月和 6 月。4 种地类在春夏两季的响应时间相较秋冬要短,且在冬季响应时间都最长。同时,耕地在各月的响应时间都要短于草地和林地,说明耕地对气象干旱更敏感。

表 2 不同植被类型下生长季最大相关系数及对应时间尺度

Tab.2 Maximum correlation coefficients and corresponding time scales of growing seasons under different vegetation types

土地 类型	4 月		5 月		6 月		7 月		8 月		9 月		10 月	
	<i>R</i>	响应时 间/月	<i>R</i>	响应时 间/月	<i>R</i>	响应时 间/月	<i>R</i>	响应时 间/月	<i>R</i>	响应时 间/月	<i>R</i>	响应时 间/月	<i>R</i>	响应时 间/月
耕地	0.38	8	0.41	2	0.47	5	0.49	6	0.44	7	0.37	16	0.24	9
草地	0.49	15	0.47	16	0.46	5	0.50	6	0.49	19	0.46	16	0.43	9
林地	0.33	24	0.49	3	0.37	5	0.25	18	0.28	7	0.24	16	0.37	12
无植被区	0.32	7	0.29	8	0.41	5	0.38	6	0.27	10	0.21	16	0.16	10

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 气象干旱变化特征

山西省“两山夹一川”的地理格局,直接造成山区多雨、平原少雨的降雨分布,再加之受东亚季风减弱影响^[34],省内东南部降水异常减少,北部无明显变化,气象干旱年际变化也呈现出南重北轻的趋势。这与李明等^[10]的研究结果一致,一致性也体现在春、夏和秋 3 季,但在冬季存在差异,可能是由于研究时间跨度不同造成的。此外,本研究用于表征气象干旱的 *SPI* 主要受降水影响,在晏利斌^[35]、侯青青等^[36]和安彬等^[37]的研究中山西省降水变化趋势与本研究的结论具有空间一致性也可得出这一结论。

同时,土壤含水量也能有效地反映旱情,根据薛少博等^[38]研究,山西省在 2002—2020 年间水储量明显减少,且由西北至东南减少趋势更为明显,同时,在东南部 0~200 cm 土层土壤水分均流失严重,这与气象干旱年际变化相吻合。

4.1.2 植被生长状态对气象干旱的响应

基于 *VCI* 与 *SPI* 探究植被生长状态对气象干旱的响应,各月相关系数空间分布以正相关为主,这与李明等^[10]的研究结果相似,但相关程度不同,可能是由于研究区域大小不同,气候变化存在空间差异性。同时,考虑到 *SPEI* 相较于 *SPI* 将蒸散发纳入对干旱的响应,*VCI* 则是在 *NDVI* 基础上求得的植被指数,故二者相关性与 *SPI-VCI* 存在相似性,这在史尚渝等^[39]的研究中得到验证。

此外,探究植被生长状态对气象干旱的响应,应综合考虑多种因素影响。其一,相关指数选取。*SPI* 作为仅依靠降水数据得到的干旱指数,在气象干旱

表征中存在一定局限性,同时在探究响应机制时也会存在不足,所以对于气象干旱指数应选取综合了气温、地形、海拔、降水和蒸散发等因子的干旱指数来表征。*VCI* 主要通过植被覆盖度和植被水分来量化植被生长状态,而山西省以夏、秋为主要粮食产季,冬季农作物种植较少且常有积雪覆盖,春季农作物长势不明显,故农作物面积与实际耕地面积常常不符,在借助 *VCI* 反映农作物收割前后的耕地旱情时存在偏差,可能出现 *VCI* 值比实际偏小的情况。其二,影响因素的考量。植被生长状态不仅受气象因素影响,同时还与土壤状况、土地类型、人类活动有密切关联。自 1999 年以来,山西省积极响应国家退耕还林还草政策,植被覆盖率大幅增长^[40],大面积区域植被得到改善。但政策施行初期伴随着植被蒸腾作用增强和气候异常,植被返青所需的土壤水含量不足,植被生长受限^[41]。植被的生长发育是受到多种因素共同作用的结果。综上所述,选取更合理的评价指数,综合考虑各种影响因子,将是未来气象干旱评估重要的发展方向。

4.1.3 对于不同植被类型的考虑

针对不同植被类型研究气象干旱变化趋势,分析植被生长状态与气象干旱的响应关系,为了避免长时间跨度地类变化造成的影响,本研究采用众数合成法对土地覆盖类型进行多年合成,对于此问题其他学者也有不同的解决办法,如尉毓姣等^[42]将研究时段划分为 4 期土地覆盖数据,分时段提取不同类型植被的 *NDVI* 和 *SPEI*;吴林霖等^[43]使用 2005 年和 2010 年数据分别提取 2000—2008 年、2009—2013 年间的典型植被类型;李家誉等^[9]统计了黄土高原地区 1990 年和 2015 年耕地、林地和草地 3 种土地利用类型未发生改变的格点。不同的方法有不同的可行性,但如何更合理地将随时间变化的各种因素纳入对气象干旱研究的考虑范围,得出更科

学的结论是目前亟待解决的问题。

4.2 结论

研究气象干旱的变化趋势,分析气象干旱与植被生长状态的关系,有利于更好地了解干旱的演变规律及其对社会经济造成的影响。本研究的主要结论如下:

1) 2000—2020 年山西省年与 12 个月尺度气象干旱均呈现北部缓解、东南部加重的态势,而在 1 个月和 3 个月尺度则整体缓解,不同尺度下的相同之处在于缓解态势最明显的区域均在五台山附近;山西省气象干旱存在明显的季节性差异,呈现由春至冬旱情加重区不断扩大的态势。不同植被类型(耕地、草地、林地和无植被区)下气象干旱均得到缓解,且随着时间尺度增长,态势越发显著,而季尺度上由春至冬缓解态势渐弱,加重态势渐强。

2) 山西省年尺度植被生长状态与气象干旱主要以正相关为主,且极显著与显著正相关区域向五台山附近集中,表明植被受气象干旱影响显著,且阻隔季风与湿气的山地植被对降水更为敏感;季尺度上高相关性区域由春至冬逐渐收缩至西北部 and 东北部,表明春季植被生长状态受降水限制最强,但在季节更替中,该限制逐渐减弱。而植被生长状态对气象干旱的响应时间存在空间差异,且随季节变化,以长期响应为主的区域不断缩减,短期响应的区域逐步从东北部向西北部再向全省蔓延。同时经过量化分析各月 VCI 与 1—24 个月时间尺度 SPI 的相关系数均值,发现各月响应时间存在明显季节性差异,其中夏季气象干旱对植被生长状态的影响反应最快。对于不同植被类型,最大相关系数集中出现在 5—7 月,也说明夏季植被生长状态对气象干旱响应更快,同时耕地在各月的响应时间都要短于草地和林地,说明耕地对气象干旱更敏感。

参考文献 (References):

- [1] Varela V, Vlachogiannis D, Sfetsos A, et al. Projection of forest fire danger due to climate change in the French Mediterranean region [J]. Sustainability, 2019, 11(16): 4284.
- [2] Zhou Z Q, Shi H Y, Fu Q, et al. Assessing spatiotemporal characteristics of drought and its effects on climate-induced yield of maize in Northeast China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125097.
- [3] Heim R R Jr. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149–1166.
- [4] Li J, Wu C, Xia C A, et al. Assessing the responses of hydrological drought to meteorological drought in the Huai River basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 144(3): 1043–1057.
- [5] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 李 维, 等. 基于综合气象干旱指数的 1961—2012 年阿勒泰地区干旱时空演变特征 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 512–520.
- [6] Wu Y F, Bake B, Li W, et al. Spatio-temporal variation of drought condition during 1961 to 2012 based on composite index of meteorological drought in Altay region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 512–520.
- [7] 刘永佳, 黄生志, 方 伟, 等. 不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化 [J]. 水利学报, 2021, 52(1): 93–102.
- [8] Liu Y J, Huang S Z, Fang W, et al. Propagation and dynamic change of meteorological drought to hydrological drought in different seasons [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 93–102.
- [9] 靖娟利, 王永锋, 和彩霞. 滇黔桂地区 NDVI 变化及其对 SPEI 的响应特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(8): 1763–1775.
- [10] Jing J L, Wang Y F, He C X. Spatial and temporal variations of NDVI and its response to SPEI in Yunnan-Guizhou-Guangxi region [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(8): 1763–1775.
- [11] 张更喜, 粟晓玲, 郝丽娜, 等. 基于 NDVI 和 scPDSI 研究 1982—2015 年中国植被对干旱的响应 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 145–151.
- [12] Zhang G X, Su X L, Hao L N, et al. Response of vegetation to drought based on NDVI and scPDSI data sets from 1982 to 2015 across China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 145–151.
- [13] 李家誉, 余敦先, 张利平, 等. 黄土高原植被变化对气象干旱多尺度响应特征与机制 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 280–289.
- [14] Li J Y, She D X, Zhang L P, et al. Multi-scale response characteristics and mechanism of vegetation to meteorological drought on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 280–289.
- [15] 李 明, 葛晨昊, 邓宇莹, 等. 黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究 [J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2105–2114.
- [16] Li M, Ge C H, Deng Y Y, et al. Meteorological and agricultural drought characteristics and their relationship across the Loess Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2105–2114.
- [17] 张 华, 徐存刚, 王 浩. 2001—2018 年西北地区植被变化对气象干旱的响应 [J]. 地理科学, 2020, 40(6): 1029–1038.
- [18] Zhang H, Xu C G, Wang H. Response of vegetation change to meteorological drought in Northwest China from 2001 to 2018 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(6): 1029–1038.
- [19] Dai M, Huang S, Huang Q, et al. Propagation characteristics and mechanism from meteorological to agricultural drought in various seasons [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127897.
- [20] 吕振涛, 李生宇, 彭中敏, 等. 蒙古国植被对干旱响应的敏感性研究 [J]. 地理研究, 2021, 40(11): 3016–3028.
- [21] Lyu Z T, Li S Y, Peng Z M, et al. Sensitivity of vegetation responses to drought in Mongolia [J]. Geographical Research, 2021, 40(11): 3016–3028.
- [22] Zhao A, Yu Q, Feng L, et al. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: A case study in the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 110214.

- [15] Han Z, Huang Q, Huang S, et al. Spatial-temporal dynamics of agricultural drought in the Loess Plateau under a changing environment: Characteristics and potential influencing factors[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: 106540.
- [16] 刘立文, 段永红, 徐立帅, 等. 山西省农业干旱时空变化特征[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(2): 114-121.
Liu L W, Duan Y H, Xu L S, et al. Characteristics of drought spatio-temporal transformation in Shanxi Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(2): 114-121.
- [17] 袁瑞强, 龙西亭, 王鹏, 等. 山西省降水量时空变化及预测[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 651-663.
Yuan R Q, Long X T, Wang P, et al. Temporal-spatial variation and forecast of precipitation in Shanxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 651-663.
- [18] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [19] Cao S, Zhang L, He Y, et al. Effects and contributions of meteorological drought on agricultural drought under different climatic zones and vegetation types in Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153270.
- [20] 刘远, 周买春. 3 种 IGBP 分类系统的土地覆盖数据在韩江流域的对比分析[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(3): 575-584.
Liu Y, Zhou M C. Comparative analysis on three land cover datasets based on IGBP classification system over Hanjiang River basin[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(3): 575-584.
- [21] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, 1993: 179-183.
- [22] Svoboda M, Fuchs B A. Handbook of drought indicators and indices[M]. Switzerland: World Meteorological Organization Geneva, 2016: 13-14.
- [23] Ma L, Huang Q, Huang S, et al. Propagation dynamics and causes of hydrological drought in response to meteorological drought at seasonal timescales[J]. *Hydrology Research*, 2022, 53(1): 193-205.
- [24] Zhou Z, Liu S, Ding Y, et al. Assessing the responses of vegetation to meteorological drought and its influencing factors with partial wavelet coherence analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 311: 114879.
- [25] Han Z, Huang S, Huang Q, et al. Propagation dynamics from meteorological to groundwater drought and their possible influence factors[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124102.
- [26] 吕纯月. 基于 SPI 指数的中国夏季干旱区域性特征及环流异常研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
Lyu C Y. Study on regional characteristics and circulation anomalies of summer drought in China based on SPI index[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.
- [27] 马景钊, 郝璐. 基于 SPI 和 SPEI 指数的锡林郭勒草原干旱时空变化特征[J]. *草业科学*, 2021, 38(12): 2327-2339.
Ma J Z, Hao L. Temporal and spatial variation of drought in the Xilingol grassland based on the standardized precipitation index and standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(12): 2327-2339.
- [28] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91-100.
- [29] Li W, Wang Y, Yang J. Cloudy region drought index (CRDI) based on long-time-series cloud optical thickness (COT) and vegetation conditions index (VCI): A case study in Guangdong, south eastern China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3641.
- [30] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531-544.
- [31] 李文武, 石强, 王凯, 等. 基于变分模态分解和深度门控网络的径流预测[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(3): 34-44.
Li W W, Shi Q, Wang K, et al. Runoff prediction based on variational mode decomposition and deep gated network[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(3): 34-44.
- [32] 吴文轩, 王志坚, 张纪平, 等. 基于峭度的 VMD 分解中 k 值的确定方法研究[J]. *机械传动*, 2018, 42(8): 153-157.
Wu W X, Wang Z J, Zhang J P, et al. Research of the method of determining k value in VMD based on kurtosis[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2018, 42(8): 153-157.
- [33] 邢愿. 基于不同时间尺度的贵州省农业干旱对气象干旱的响应机制[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
Xing Y. Response mechanism of agricultural drought to meteorological drought based on different time scales in Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [34] 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. *大气科学*, 2018, 42(3): 533-558.
Ding Y H, Si D, Liu Y J, et al. On the characteristics, driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(3): 533-558.
- [35] 晏利斌. 1961—2014 年黄土高原气温和降水变化趋势[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(5): 276-282.
Yan L B. Characteristics of temperature and precipitation on the Loess Plateau from 1961 to 2014[J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(5): 276-282.
- [36] 侯青青, 裴婷婷, 陈英, 等. 1986—2019 年黄土高原干旱变化特征及趋势[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 649-660.
Hou Q Q, Pei T T, Chen Y, et al. Variations of drought and its trend in the Loess Plateau from 1986 to 2019[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 649-660.
- [37] 安彬, 肖薇薇, 朱妮, 等. 近 60 a 黄土高原地区降水集中度与集中期时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1333-1344.
An B, Xiao W W, Zhu N, et al. Temporal and spatial variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period on the Loess Plateau from 1960 to 2019[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(5): 1333-1344.
- [38] 薛少博, 李鹏, 于坤霞, 等. 2002—2020 年黄土高原土壤水变化及其相关性分析[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 221-226.
Xue S B, Li P, Yu K X, et al. Soil water change and its correlation analysis in the Loess Plateau from 2002 to 2020[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 221-226.
- [39] 史尚渝, 王飞, 金凯, 等. 黄土高原地区植被指数对干旱变化的响应[J]. *干旱气象*, 2020, 38(1): 1-13.
Shi S Y, Wang F, Jin K, et al. Response of vegetation index to mete-

- orological drought over loess plateau[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 38(1): 1–13.
- [40] 王 一, 郝利娜, 许 强, 等. 2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J]. *生态学报*, 2023, 43(6): 2397–2407.
- Wang Y, Hao L N, Xu Q, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2397–2407.
- [41] 付建新. 山西黄河流域不同土地利用类型 NDVI 时空变化及其对气温、降水的响应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 364–372.
- Fu J X. Temporal and spatial changes of NDVI of different land covers and their responses to temperature and precipitation in the Yellow River basin of Shanxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 364–372.
- [42] 尉毓姣, 朱 琳, 曹鑫宇, 等. 基于转移函数分析的蒙东地区不同类型植被变化对干旱的响应[J]. *地球科学*, 2023, 48(9): 3539–3551.
- Wei Y J, Zhu L, Cao X Y, et al. Response of different types of vegetation changes to drought in eastern inner Mongolia based on transfer function analysis[J]. *Earth Science*, 2023, 48(9): 3539–3551.
- [43] 吴林霖, 王思远, 马元旭, 等. 中亚地区植被对气候变化的响应机制初探[J]. *遥感学报*, 2022, 26(11): 2248–2267.
- Wu L L, Wang S Y, Ma Y X, et al. Response of vegetation to climate change in Central Asia with remote sensing and meteorological data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(11): 2248–2267.

Responses of vegetation growth conditions to meteorological drought in Shanxi Province from 2000 to 2020

ZHAO Fu, WANG Li, MA Yuang, JIANG Ruixia

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Based on the standardized precipitation index (SPI) and vegetation condition index (VCI) from 2000 to 2020, this study analyzed the trends in meteorological drought across different vegetation types in Shanxi Province using methods such as variational mode decomposition (VMD), Mann–Kendall trend analysis, and Pearson correlation coefficient. Accordingly, this study quantified the response time of vegetation growth conditions to meteorological drought. The results indicate that from the beginning of the 2000s, the overall meteorological drought in Shanxi Province has gradually eased. However, on a seasonal scale, areas with increasingly aggravated drought continuously expand from spring to winter. Meteorological drought has alleviated across various vegetation types, with the alleviation becoming increasingly significant with an increase in the time scale. In contrast, on a seasonal scale, the drought relief gradually weakens from spring to winter, during which drought aggravation progressively strengthens. Vegetation growth conditions are significantly influenced by meteorological drought. On the annual scale, there is a predominantly positive correlation between both. On the seasonal scale, areas with a strong correlation between both gradually contract from spring to winter, when such areas are dominated by the northwestern and northeastern areas of the province. Additionally, the response time of vegetation to drought is longer in spring and winter compared to autumn and summer. Across different vegetation types, the responses of vegetation growth conditions to meteorological drought prove the most rapid during the summer, and cultivated lands are identified as the most sensitive land type to meteorological drought.

Keywords: SPI; VCI; meteorological drought; response relationship; Shanxi Province

(责任编辑: 李 瑜)