

基于SPEI的多尺度法分析干旱气候对 黄河流域内蒙古段植被覆盖的影响*

宋静^{1,2}, 荀学义¹, 梅佳慧¹, 沈映月¹, 牛佳牧¹, 张敏¹

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要:黄河流域内蒙古段位于中纬度生态脆弱区, 植被覆盖对气候变化异常敏感。因此, 开展多尺度气候变化影响流域植被覆盖的研究对维护生态平衡、促进可持续发展具有重要意义。基于黄河流域内蒙古段气象观测站温度和降水量数据, 结合SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感资料, 计算标准化降水蒸散指数(SPEI)和归一化植被指数(NDVI), 采用线性回归分析和相关分析等方法, 多尺度分析流域干旱气候变化规律与植被覆盖演变趋势, 探讨子流域SPEI与NDVI的同期相关关系和滞后相关性。研究表明:流域SPEI总体呈微弱上升趋势, 干旱化趋势减弱, SPEI波动振幅和趋势线斜率均自东南向西北递减, 且时间尺度越大, 显著上升区范围越大; 冬季、夏季和秋季SPEI呈上升趋势, 干旱化趋势逐渐缓解, 春季SPEI呈下降趋势; 黄河流域内蒙古段年均NDVI呈微弱波动上升趋势, 子流域年均NDVI变化规律与之基本一致, 其中下游区上升趋势最快, 上游区最慢; 黄河流域内蒙古段SPEI与NDVI整体呈正相关, 且相关性滞后特征明显, 其中, 上游区滞后两年相关系数达到最大, 其他子流域则在次年达到极值。

关键词:黄河流域内蒙古段; 多时间尺度; 标准化降水蒸散指数(SPEI); 归一化植被指数(NDVI)

中图分类号: P467; X171 **文献标志码:** A

气候变化对区域植被覆盖的影响是全球变化研究的热点问题之一^[1]。气候变化会通过影响植被长势来改变生态系统的结构与功能^[2], 同时, 生态系统变化也会反馈给气候系统, 加剧区域气候变化^[3]。作为陆地生态系统的主体^[4], 植被不仅具有明显的年际变化和季节循环, 连接着大气圈、水圈和土壤圈的物质循环与能量流动^[5], 而且对环境变化极为敏感, 是响应气候变化的重要指示器^[3,6], 特别是在中纬度生态脆弱区, 伴随平均温度显著升高与干旱条件加剧, 植被覆盖更易受干旱气候的影响。归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)与植被生产力、冠层覆盖面积及生物量等具有良好的相关性, 能有效表征植被覆盖特征与生长状况^[7-8], 因此, NDVI被广泛应用于探究植被时空动态与气候因子的相互关系及其对气候变化的响应研究^[8-14]。

在自然生态系统中, 气候是决定植被覆盖类型及空间格局的最主要因素^[15-16], 因此, 在全球变化与流域自然生态系统关系研究中, 探讨气候与植被的关联性具有重要的现实意义^[17]。气温与降水是调控植物生长与发育的核心驱动因子^[16]。标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)综合考虑了降水和潜在蒸散发, 保留了对温度与降水的敏感性, 同时具备多

* 收稿日期:2024-03-10; 修回日期:2025-07-04

基金项目:创建鄂尔多斯国家可持续发展议程创新示范区项目(2022EEDSKJXM005);内蒙古自治区自然科学基金项目(2025MS04014);中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0168)

作者简介:宋静(2001—),女,内蒙古呼伦贝尔人,2024级硕士研究生。E-mail:songjing1128@163.com

通信作者:荀学义(1979—),男,内蒙古赤峰人,副教授,博士。主要从事气候变化与植被响应的研究。

E-mail:xunxy@imu.edu.cn

时间尺度和空间可比性的优势^[18-20],因此,SPEI能够较好反映区域干湿状况,适用于评估干旱气候对植被覆盖的影响。

黄河流域地理位置与气候条件独特,水土流失严重且范围广泛,区域生态环境脆弱^[21],易受降水波动影响^[22]。在全球气候变暖背景下,黄河流域内蒙古段增温显著,极端天气事件频发,叠加人类活动干扰,导致生态环境脆弱性进一步加剧^[23-25]。同时,该区域不仅是内蒙古重要的经济发展核心区,更是内蒙古高原生态屏障的关键组成部分^[26-28],其生态环境健康状况直接关系到内蒙古经济社会的可持续发展。因此,研究黄河流域内蒙古段植被覆盖的时空演变及其对气候变化的响应,对区域生态修复与经济建设具有双重意义。

近年来,在流域植被覆盖的时空变化^[29-30]及其气候变化的响应^[3,31-32]等方面已取得丰硕成果。然而,针对黄河流域内蒙古段的专门研究相对匮乏,特别是结合SPEI探究植被覆盖对区域气候变化响应的研究更为有限。鉴于此,本文通过计算表征区域干旱程度的SPEI和反映植被覆盖状况的NDVI,运用多尺度分析方法,系统揭示了流域气候变化趋势与干旱强度演变特征,深入探讨了干旱气候对植被动态的影响,剖析了区域NDVI与不同时间尺度SPEI的同期及滞后相关性。研究成果旨在为预测流域未来干旱情势提供科学依据,为深入理解植被响应气候变化过程提供重要参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

黄河流域内蒙古段位于内蒙古自治区中西部,地处黄河流域最北端(图1)。该段干流全长约843.5 km,约占黄河总长度的1/7,流域面积约15.19万km²,约占黄河流域面积的19%^[28]。该区域地处中纬度生态脆弱带,属干旱、半干旱气候带,流经区域多为荒漠和半荒漠区。在全球气候变暖背景下,流域增温趋势显著,灾害性天气愈加频繁^[33],叠加人类活动干扰,导致其生态环境的脆弱性进一步加剧^[23-25]。

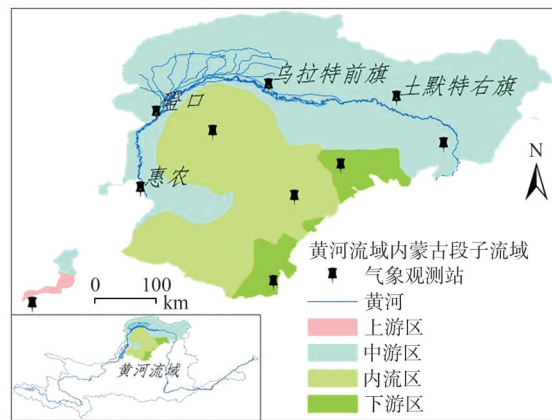


图1 黄河流域内蒙古段子流域和气象观测站分布情况

Fig. 1 Distribution of sub-basins and meteorological stations over the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin

1.2 数据处理

选用1998—2019年黄河流域内蒙古段10个地面气象观测站日降水量和平均温度观测资料。将黄河流域内蒙古段划分为上游区(兰州至青铜峡段在内蒙古自治区境内的区域)、中游区(青铜峡至府谷段在内蒙古自治区境内的区域)、内流区和下游区(府谷至龙门段在内蒙古自治区境内的区域)4个子流域,其中有1个台站位于上游区,5个台站位于中游区,2个台站位于内流区,2个台站位于下游区(图1),各台站均匀分布在黄河流域内蒙古段,具有较好的区域代表性。对个别台站的缺测数据采用均值替换法插补处理。NDVI数据源自中国植被指数空间分布数据集(<http://www.gisrs.cn/>),

数据时段为1998—2019年。该数据集是基于连续时间序列的SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感数据,采用最大值合成法^[14],在其旬植被指数数据产品基础上,通过拼接镶嵌、投影变换生成1998年以来年度归一化植被指数数据集。

利用地面气象观测站降水量和温度数据计算得到SPEI_n,其中,*n*表示时间尺度(月数),SPEI_n的数值表示过去连续*n*个月的累积干湿平衡状况^[34],本文主要分析3、6、12、24个月时间尺度的SPEI,标记为SPEI3,SPEI6,SPEI12和SPEI24。SPEI3表示3个月时间尺度累积的干湿平衡状态,对于季节性降水和温度变化都比较敏感,能够反映季节性干旱变化状况^[35];SPEI6通常与农作物生长季密切相关^[36];SPEI12代表年尺度的累积干湿平衡状态,变化相对稳定,能清楚地反映黄河流域内蒙古段的干旱年际变化特征;SPEI24则能更好地反映区域干湿状况的长期趋势变化。利用一元线性回归法分析流域干旱气候变化趋势和多尺度演变规律,以及流域干旱气候的季节分布特征。季节的定义为:当年的1、2月和上年的12月为冬季,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季^[37]。本文选取5月份的SPEI3作为春季SPEI、8月份的SPEI3作为夏季SPEI、11月份的SPEI3作为秋季SPEI、次年2月份的SPEI3作为冬季SPEI。

基于1998—2019年NDVI数据,利用趋势分析法揭示黄河流域内蒙古段植被覆盖的变化趋势,定量分析子流域植被覆盖年际变化和演变趋势,探索植被变化特征的可能原因。应用ArcGIS掩膜提取气象观测站周边10 km的逐月NDVI数据,取平均值后分别做3、6、12、24个月的滑动平均,以消除短期波动,突出长期趋势或周期,进而探讨黄河流域内蒙古段和子流域不同尺度SPEI与NDVI的同期相关关系和滞后相关性。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)计算

SPEI指数采用Thornthwaite方法计算得到潜在蒸散发,进一步通过Log-Logistic概率分布对数值序列(降水量与潜在蒸散发的差值)进行拟合^[38],而后标准化概率分布函数得到SPEI^[37]。

本文SPEI对应的干旱等级按照表1中的标准进行划分。

表1 SPEI对应的干旱等级划分

Table 1 Drought levels based on standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) values

干旱等级	SPEI数值
极端干旱	≤ -2
严重干旱	$(-2, -1.5]$
中等干旱	$(-1.5, -1]$
轻微干旱	$(-1, -0.5]$

1.3.2 线性回归分析

通过对SPEI、NDVI和年份进行线性回归计算,得到二者多年连续变化趋势,计算斜率*b*和相关系数*r*,公式如下:

$$b = \left(\sum_{i=1}^n x_i t_i - \sum_{i=1}^n x_i / n \sum_{i=1}^n t_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2 / n \right),$$

$$r = \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}.$$

式中: x_i 为第*i*年SPEI或NDVI; t_i 为第*i*年;*n*为研究时长。

当*b*>0时,表征SPEI、NDVI呈现上升趋势;当*b*<0时,表征SPEI、NDVI变化呈现下降趋势。

1.3.3 相关分析法

相关分析法常用于量化变量间的线性关联程度与方向,反映其相互关系的密切性,通常用相关

系数 r 来表示^[39]。相关系数 r 的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中: r 表示SPEI与NDVI的相关系数; x_i 和 y_i 分别表示第 i 年的SPEI和NDVI。

当 $r > 0$ 时,表明变量间存在正相关关系, r 值越趋近于1.0,正相关性越强;当 $r < 0$ 时,则表明存在负相关关系, r 值越趋近于-1.0,负相关性越强。

2 结果与分析

2.1 黄河流域内蒙古段SPEI变化趋势分析

本文选取1998—2019年黄河流域内蒙古段干流沿线均匀分布的4个代表性气象站(惠农、磴口、乌拉特前旗、土默特右旗),分析其年平均SPEI3变化趋势(图2)。从图2可以看出:各站SPEI3的波动特征与变化趋势基本一致,均呈波动下降趋势,表明区域具有干旱化态势;不同站SPEI3波动幅度及线性趋势斜率存在差异,其中磴口站线性趋势斜率的绝对值最大(0.011),干旱化趋势最为显著,其余3站斜率绝对值差异较小,记录的干旱强度整体较弱,惠农站斜率绝对值最小(接近0)。在研究期内,4个站中仅磴口站在2013年发生一次中等干旱事件,其余站发生的干旱事件均为轻微干旱。惠农、磴口、乌拉特前旗和土默特右旗4个代表站沿黄河干流自西向东排列,该区域西部属温带大陆性气候,向东逐渐过渡到温带季风气候。位于最东端的土默特右旗站受季风气候影响相对明显,干旱强度较小。总体而言,1998—2019年间黄河流域内蒙古段轻微干旱事件发生频繁,连年持续干旱事件较少,整体呈现轻微干旱化趋势,但不同站间存在显著差异,这种空间差异性可能与各站所处的地理位置及其局地气候条件密切相关。

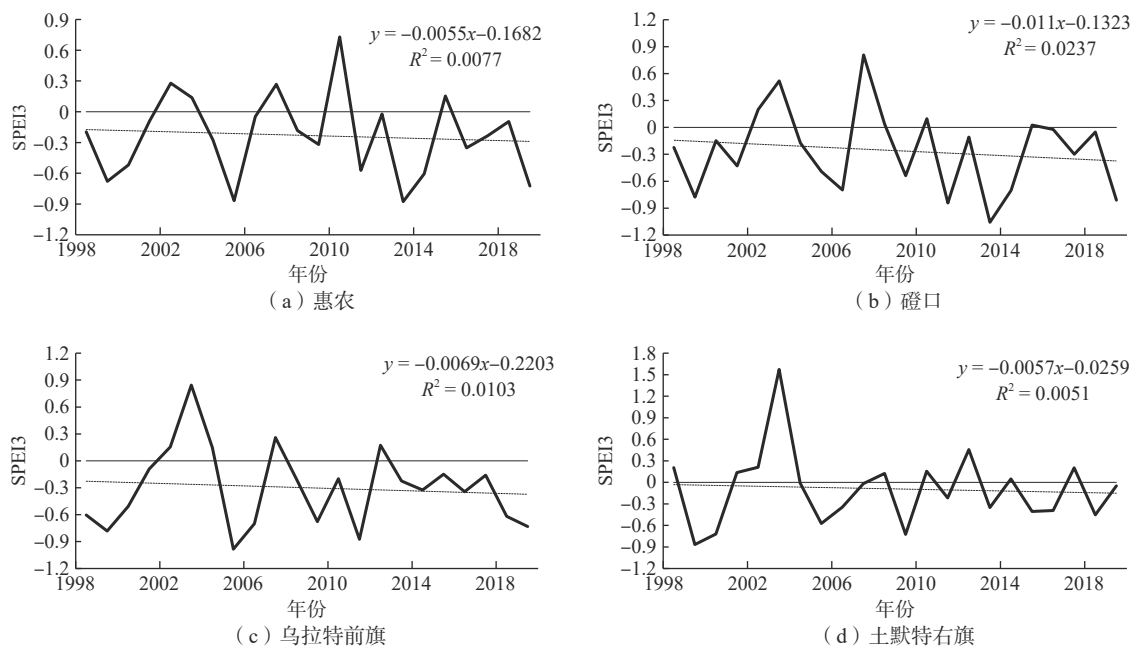


图2 1998—2019年黄河流域内蒙古段年平均SPEI3变化

Fig. 2 Changes in annual mean SPEI3 over the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1998 to 2019

2.2 基于SPEI的气候变化多尺度分析

为综合分析黄河流域内蒙古段气候变化特征,计算区域内10个气象站平均SPEI值,进行多时间尺度分析(图3)。从图3可以看出,不同时间尺度的SPEI均呈一致的线性上升趋势,表明区域干旱化趋势整体减弱。然而,不同时间尺度SPEI趋势线斜率存在差异,时间尺度越大,趋势线斜率的绝

对值越大。值得注意的是,尽管SPEI呈上升趋势,但其年际波动幅度较小,表明区域干湿状况的实际年际变化不显著。此外,在研究期内观测到个别年份仍发生了较严重的干旱事件。

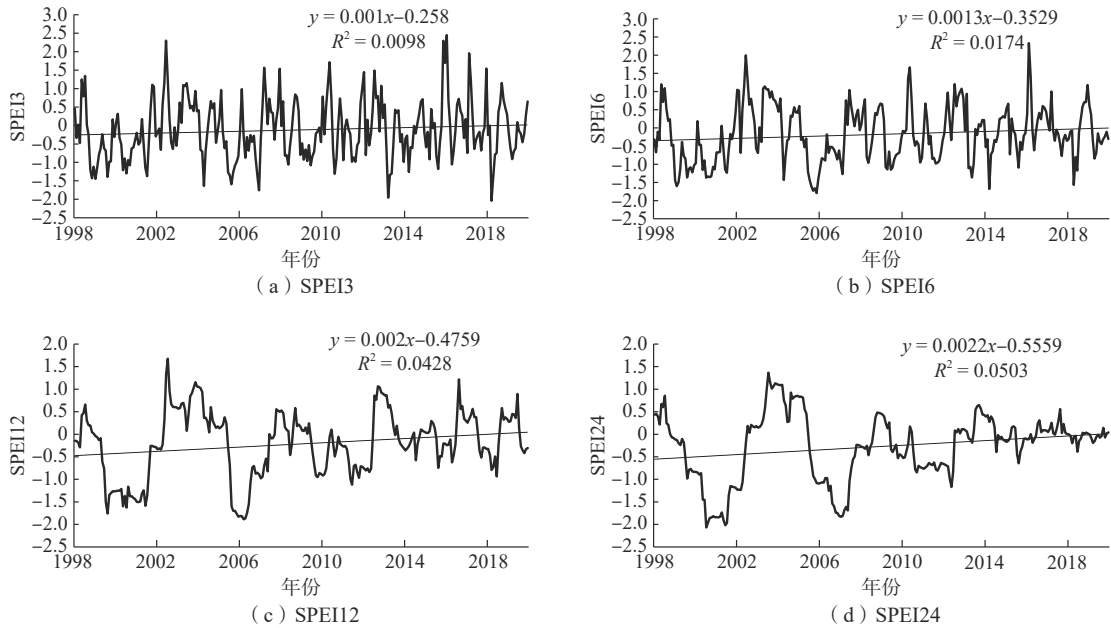


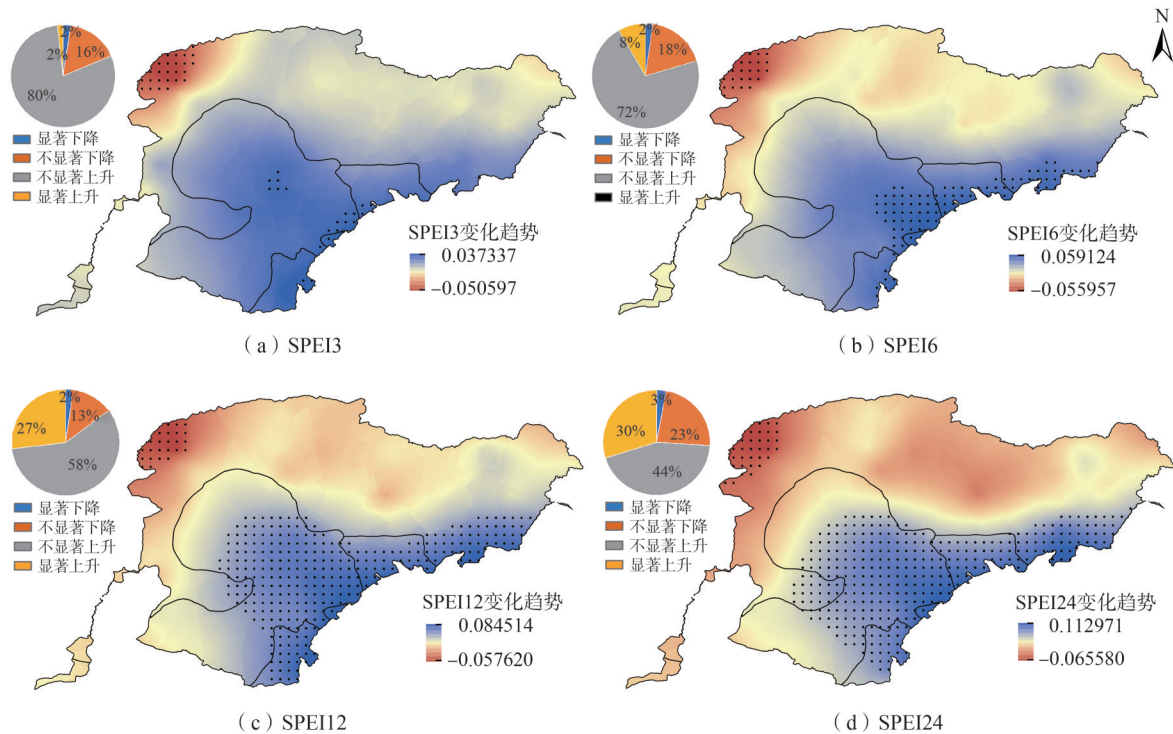
图3 黄河流域内蒙古段多时间尺度SPEI时间变化特征

Fig. 3 Characteristics of temporal changes of SPEI at multiple time scales over the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin

深入分析图3可以看到,SPEI3的趋势线斜率最小,但其年际波动幅度较大。SPEI6的波动周期相对延长,波动强度减弱,1998—2019年间,轻微、中度、严重和极端干旱的发生频率分别为21.22%、12.88%、3.41%和0%。其中,轻微干旱在秋季发生频率略高,中等干旱在夏季最为频繁,严重干旱则主要发生于秋季。SPEI12变化趋势表明,该区域在1999—2001年经历持续严重干旱,此后转为连年湿润,直至2006年再次出现严重干旱;2006年后,干湿状况主要在湿润与轻微干旱之间波动。SPEI24则呈旱期与湿润期交替的特征,且干旱强度呈减弱趋势。

为探究黄河流域内蒙古段干旱气候的空间变化特征,本文基于克里金插值的SPEI数据,系统分析了黄河流域内蒙古段多时间尺度SPEI的空间变化趋势及其显著性。从图4可以看出,SPEI整体大致由东南向西北递减。其中,SPEI3整体呈不显著上升趋势($P > 0.05$),仅2%的区域呈显著下降趋势,分布在研究区西北部,另有2%的区域呈显著上升趋势,零散分布于内流区和下游区。SPEI6的空间格局与SPEI3基本一致,但呈不显著下降趋势和显著上升趋势的面积有所增加,不显著下降趋势新增区域主要位于中游区西部和中部,显著上升趋势的新增区域则位于中游区东南部和内流区东南部。SPEI12的空间趋势与SPEI6相似,但不显著下降趋势区域的比例由18%降至13%,减少区域集中在中游区,而显著上升趋势区域的比例则从8%大幅增至27%,增加区域分布于下游区、内流区和中游区。SPEI24延续了SPEI12的基本格局,其显著下降趋势区域仍集中于研究区西北部,但面积比例略有增加,中游区中部不显著下降趋势区域集中增加,并由西北部向东南延伸至内流区。值得注意的是,SPEI24的不显著上升趋势区域比例在多时间尺度中最小(44%),而显著上升趋势区域比例则进一步增加至30%。

综上所述,黄河流域内蒙古段不同时间尺度的SPEI总体上均呈现微弱的波动上升趋势,即干旱化趋势减弱,但其变化速率随SPEI时间尺度的增加而增大。空间分布上,各时间尺度的SPEI均表现出自东南向西北递减的特征。同时,随着时间尺度的增加,呈显著上升趋势的区域面积比例明显增加,而显著下降趋势的区域面积比例变化较小,且持续集中分布在研究区西北部。



实心圆点表示通过0.05水平显著性检验。

图4 黄河流域内蒙古段多时间尺度SPEI空间变化特征

Fig. 4 Characteristics of spatial variation of SPEI at multiple time scales over the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin

2.3 基于SPEI的干旱气候季节分布特征分析

为分析干旱气候的季节分布特征,本文绘制了黄河流域内蒙古段季节尺度SPEI的年际变化曲线(图5)。从图5可以看出,不同程度干旱在四季均有发生,但季节特征差异显著。冬季绝大部分时间处于无旱状态,研究期内仅出现1次中等干旱和6次轻微干旱,见图5(a);春季以干旱为主导,以轻微干旱为主,中等干旱较少,基本未发生严重干旱,见图5(b);夏季在2005年发生了1次严重干旱,见图5(c);秋季整体呈湿润特征,仅发生1次中等干旱事件,见图5(d)。

如图5(a)、(c)和(d)显示,冬季、夏季和秋季SPEI均呈上升趋势,表明这三个季节的干旱程度随时间推移有所缓解。秋季SPEI趋势线斜率最大(0.0481),变湿速率最快;冬季SPEI趋势线斜率最小(0.017),变湿速率最慢;夏季SPEI趋势线斜率为0.0264,其变湿速率介于秋季和冬季之间。与之相反,如图5(b)所示,春季SPEI则呈下降趋势,干旱化趋势加剧。春季SPEI趋势线斜率为-0.0424,趋势线的 R^2 为0.1145,表明1998—2019年黄河流域内蒙古段春季干旱化趋势在加强,且变旱趋势相对明显。

2.4 NDVI变化趋势分析

为揭示黄河流域内蒙古段植被覆盖随时间演变特征,选取1998—2019年期间,各年的流域NDVI均值作为当年植被覆盖状态绘制NDVI年际变化曲线,见图6(a)。从图中可以看出,黄河流域内蒙古段植被覆盖尽管存在微弱的年际波动,但整体呈上升趋势,表明流域植被生长总体状况正逐渐得到改善。黄河流域内蒙古段子流域的年均NDVI的变化规律与流域的相似,均表现为波动上升趋势,见图6(b)。上游区、内流区、中游区和下游区4个子流域年均NDVI变化的趋势线斜率分别为0.0032、0.0038、0.0047和0.0075,各子流域植被变化趋势不尽相同。NDVI变化趋势依次为下游区>中游区>内流区>上游区。下游区的植被覆盖增幅最大,分别是内流区和上游区的1.97倍和2.34倍。

为进一步揭示植被覆盖空间变化特征,对1998—2019年黄河流域内蒙古段NDVI作回归分析和显著性检验,结果见图7。1998—2019年黄河流域内蒙古段植被覆盖整体较好,多年平均NDVI为

0.058~0.832,呈东北高、西南低的分布格局。1998—2019年间黄河流域内蒙古段植被覆盖总体呈上升趋势,NDVI空间变化趋势为 $-0.025/a \sim 0.033/a$,NDVI显著增加、不显著增加、不显著减少、显著减少趋势面积占比分别为57%、32%、9%、2%。NDVI显著增加的区域主要分布在中游区的河套平原以及下游区和内流区的毛乌素沙地,NDVI显著减少的区域主要分布在黄河沿岸地区。

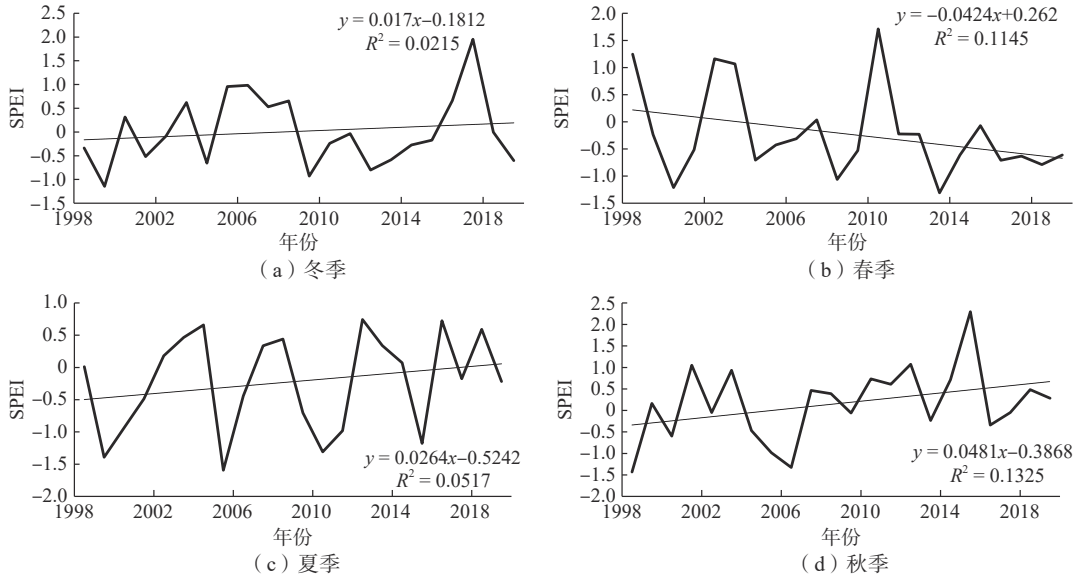


图5 黄河流域内蒙古段季节尺度SPEI变化特征

Fig. 5 Characteristics of seasonal-scale SPEI changes over the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin

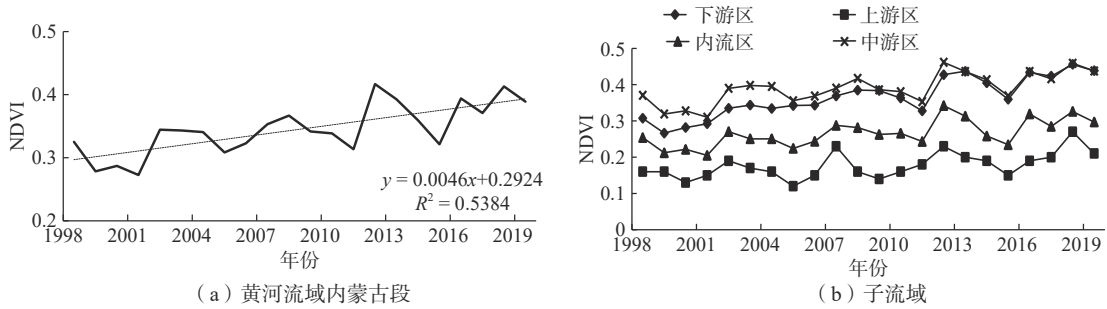
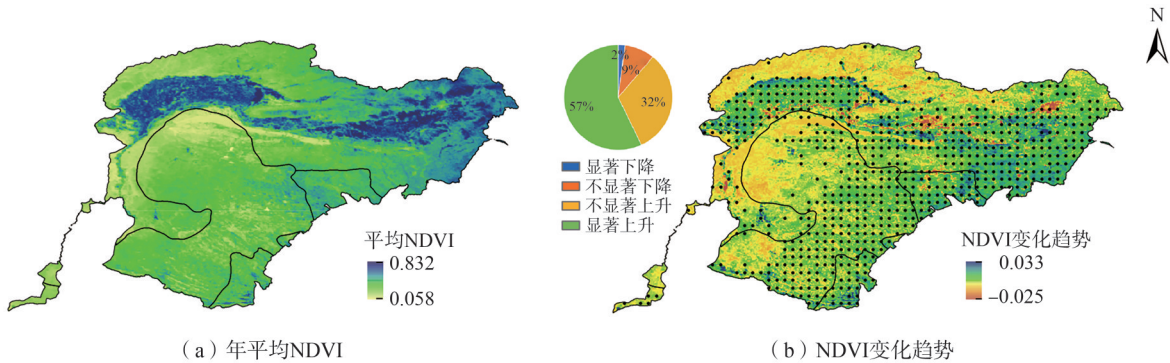


图6 1998—2019年黄河流域内蒙古段及其子流域NDVI年际变化

Fig. 6 Changes of NDVI over the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin and it's sub-basins from 1998 to 2019



实心圆点表示通过0.05水平显著性检验。

图7 黄河流域内蒙古段1998—2019年平均NDVI及NDVI空间变化特征

Fig. 7 Characteristics of average NDVI and spatial variation of NDVI over the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1998 to 2019

2.5 NDVI与SPEI的相关性分析

基于1998—2019年流域NDVI与SPEI12数据的统计分析及其变化趋势对比(图8),可以看到黄河流域内蒙古段各子流域NDVI均呈显著上升趋势,而SPEI12揭示的水分条件变化则具有明显的区域性差异——上游区持续干旱化,中游区略微湿润化,内流区与下游区则显著湿润化。总体而言,该区域呈现出“植被普遍绿化改善,但水分条件在上游区恶化、中下游区改善”的空间分布特征。

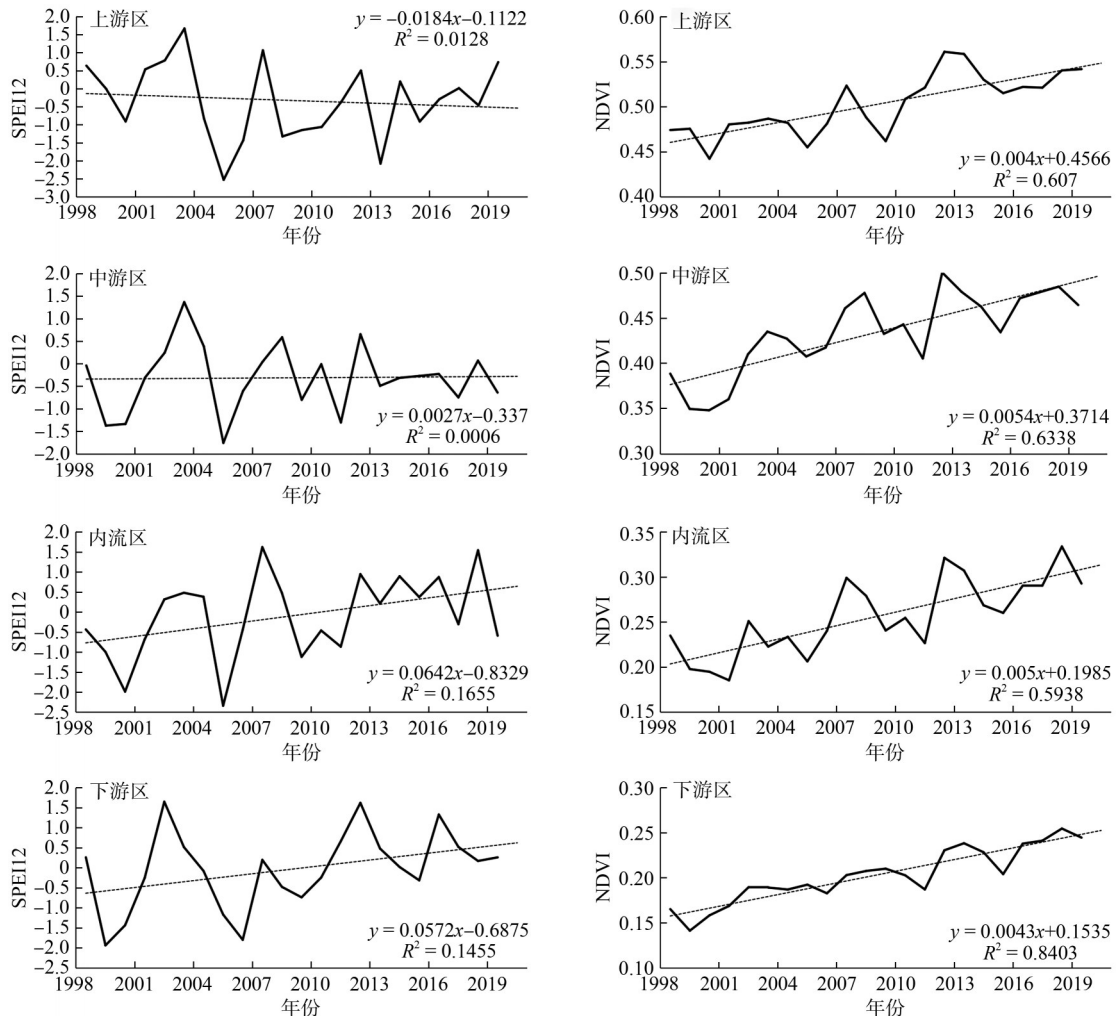


图8 1998—2019年黄河流域内蒙古段各子流域SPEI12与NDVI年际变化

Fig. 8 Variations of SPEI12 and NDVI in sub-basins of the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 1998 to 2019

基于SPEI和NDVI空间像元数据,本文深入分析了黄河流域内蒙古段不同时间尺度SPEI与NDVI的空间相关关系。从图9可以看出,不同时间尺度SPEI和NDVI正相关区域均明显大于负相关区域。黄河流域内蒙古段SPEI3与NDVI的相关系数分布范围为 $-0.6365 \sim 0.8228$,大部区域(94%)呈正相关关系,其中,57%的区域呈不显著正相关,呈显著正相关的区域仅占37%,显著正相关区域主要分布于中游区与内流区交界带、中游区东部及下游区。SPEI6、SPEI12与NDVI的相关格局及其显著性分布基本一致,主要差异体现在内流区的显著正相关区域位置。SPEI6的显著正相关区域主要位于内流区西部,而SPEI12的则集中分布在内流区东南部。值得注意的是,与其他时间尺度相比,SPEI24与NDVI呈负相关的区域比例显著增加,主要位于中游区和内流区。空间分析进一步揭示,不同时间尺度SPEI与NDVI的负相关区域主要集中分布于中游区的后套平原。该区域

土地利用以耕地为主,属典型的高度人为干预的农业生态系统。在干旱事件发生时,灌溉等人工补水措施保障了作物生长,这可能是导致 SPEI 与 NDVI 在此出现负相关关系的重要原因。总体而言,黄河流域内蒙古段不同时间尺度 SPEI 与 NDVI 在大部分区域呈正相关空间格局,显著正相关区域多分布于中游区东南部、下游区大部及内流区大部,而负相关区域则主要集中于中游区的平原农业区,该区域耕地广布,受人类活动影响显著。

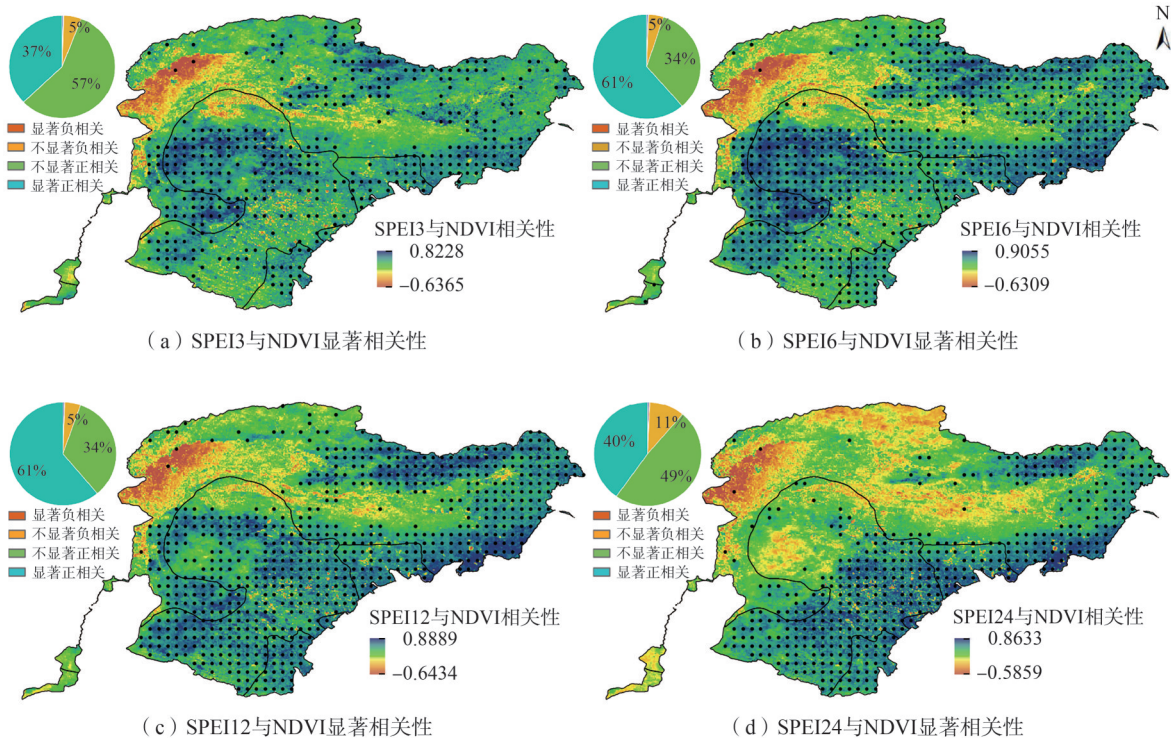


图 9 黄河流域内蒙古段多时间尺度 SPEI 与 NDVI 相关性及其显著性检验

Fig. 9 Correlation and significance test between SPEI and NDVI at multiple time scales over the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin

气候变化对植被的影响是长时间尺度的作用过程,NDVI 随温度和降水的变化也存在明显滞后现象。因此,本文基于 1998—2019 年流域 NDVI 与 SPEI3、SPEI6、SPEI12 及 SPEI24 数据,计算了两者在 NDVI 同年、滞后 1 年和滞后 2 年的相关系数。从图 10 可以看出,除上游区外,其他 3 个子流域的相关系数基本为正值,且在不同时间尺度上,SPEI 与 NDVI 的相关系数多在滞后一年达到最大,表明温度和降水量对次年的植被生长状态影响最大。在中游区 SPEI12、SPEI24 与 NDVI 同年的相关系数大于滞后一年的相关系数,SPEI3、SPEI6 与 NDVI 的相关系数均在滞后一年达到最大,但 SPEI 与 NDVI 的最大相关系数仅为 0.38,相关程度较弱。内流区 SPEI12、SPEI24 与 NDVI 同年的相关系数最大,SPEI3、SPEI6 与 NDVI 滞后一年的相关系数最大,相关系数最大值达到 0.74,相关程度较高。下游区不同尺度 SPEI 与 NDVI 的相关系数均在滞后一年达到最大,其中 SPEI12 与 NDVI 的相关性最强,存在明显的滞后性。上游区相关系数基本为负值,相关系数的绝对值在滞后两年达到最大,同期相关性极弱。

3 讨论

1998—2019 年黄河流域内蒙古段的干旱气候变化表明,区域干旱并未随全球升温而同步加剧。多尺度 SPEI 序列显示,除上游外,中下游及内流区干湿状况总体趋于改善,干旱强度、频率和持续时间均呈减弱态势,表明气候变暖背景下的干旱化趋势在该区域已得到一定程度的缓解。

1998—2019 年,黄河流域内蒙古段多尺度 SPEI 整体微弱上升,干旱化趋势明显缓解。与此同

时,区域NDVI持续增加,植被覆盖显著改善。本结论与付含培等^[40]和李晶等^[41]对黄河流域植被覆盖的研究结果一致,表明水分条件的好转为植被生长提供了直接支持。从空间上看,SPEI自东南向西北递减,水分梯度决定了植被绿度的宏观格局。中游、下游干旱减缓最为明显,NDVI增速也最大,进一步印证了气候驱动的主导作用。

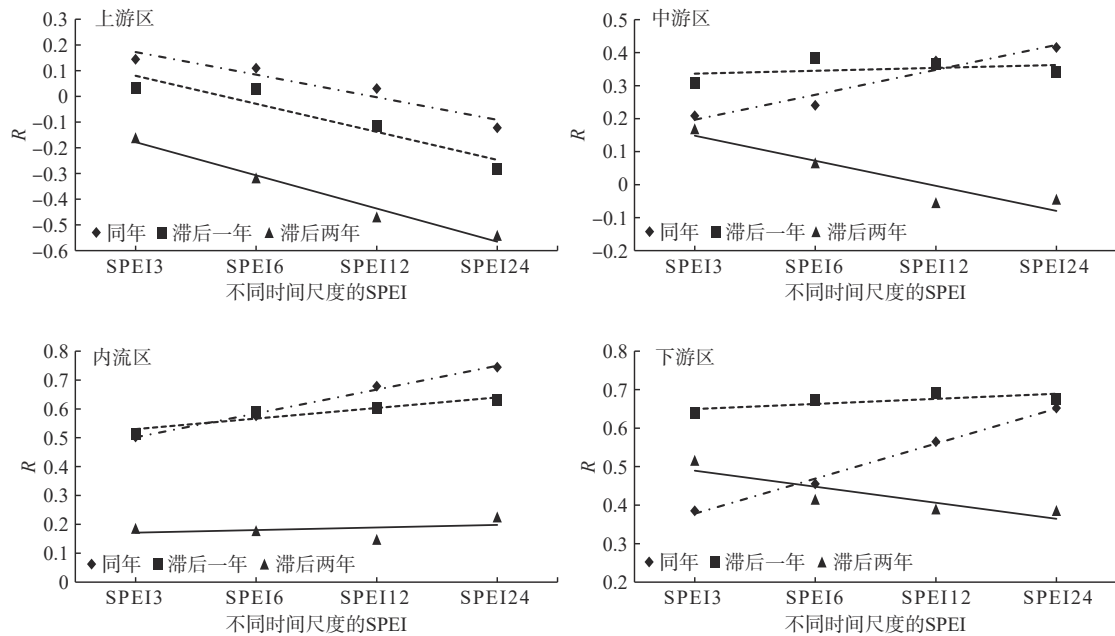


图10 黄河流域内蒙古段各子流域不同尺度SPEI与NDVI的相关系数

Fig. 10 Correlation coefficients between SPEI and NDVI at different scales in each sub-basin of the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin

尽管气候是植被变化的基础驱动因子,但人类活动的叠加效应不可忽视^[42]。农业生产、生态建设等人类活动是影响植被覆盖变化的重要因素,植树造林、退耕还林还草等生态工程的实施在一定程度上促进了植被覆盖的增加。在探讨SPEI与NDVI的关系时,本文发现二者在黄河流域内蒙古段大部分地区呈正相关关系,与Wang等^[43]得出的内蒙古地区植被对于旱的响应结果一致。基于NDVI时序分析表明,黄河流域内蒙古段的植被覆盖总体呈上升趋势,尤其是在中游区和下游区植被生长状况改善明显,与前述SPEI揭示的区域气候干旱化缓解趋势高度吻合,有力佐证了气候条件的改善对植被生长具有积极的促进作用。

然而,春季SPEI呈现下降趋势,表明春季干旱情况加剧。鉴于春季是植物生长的关键物候期,研究结论凸显了气候变暖在生态系统敏感阶段可能带来的显著负面影响。此外,SPEI和NDVI滞后效应在内流区表现尤为明显,说明气候条件的影响不仅是即时性的,还会对植物的长期生长产生深远的影响。本文识别出的SPEI与NDVI负相关区域主要集中在农耕区,这与人类活动密切相关。在农田灌溉和农业管理措施的影响下,植被生长与气候因子的关系呈现复杂化特征。这进一步表明,在制定未来生态恢复策略和区域可持续发展方案时,亟需综合考虑气候变化与人类活动的双重影响。

4 结论

本文多尺度分析了流域干旱气候的变化规律及植被覆盖年际变化和演变趋势,探讨了黄河流域内蒙古段4个子流域SPEI与NDVI在时间尺度上的同期和滞后的相关特征,研究结果表明:

(1) 黄河流域内蒙古段不同气象观测站的年平均SPEI3变化趋势基本一致,均呈微弱下降趋势,但数值波动幅度和斜率存在站点差异;若将时间尺度由3个月扩展至6个月及以上,区域平均SPEI

转为微弱上升,干旱化总体呈缓和态势;空间上自东南向西北递减,随时间尺度增加,显著上升的面积占比逐渐增加;秋季、夏季和冬季干旱程度略有缓解,春季干旱化趋势加剧。

(2)黄河流域内蒙古段年平均NDVI变化呈波动上升趋势,各子流域年均NDVI的变化规律基本相似。子流域植被覆盖增长趋势表现为:下游区>中游区>内流区>上游区。NDVI显著上升区大于显著降低区。

(3)黄河流域内蒙古段不同时间尺度SPEI与NDVI在空间上以正相关关系为主导。各子流域SPEI与NDVI的相关性均表现出明显的滞后效应。其中,上游区的相关系数基本均为负值,且其绝对值在滞后两年时达到最大;而中游区、内流区与下游区的相关系数则基本为正值,多于滞后一年时达到极值。

参考文献:

- [1] DING Y K, FENG Y Q, CHEN K, et al. Analysis of spatial and temporal changes in vegetation cover and its drivers in the Aksu River Basin, China[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1):10165.
- [2] 夏传福,李静,柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展[J]. *遥感学报*, 2013, 17(1):1-16.
- [3] 解晗,同小娟,李俊,等. 2000—2018年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(11):4536-4549.
- [4] LIU Y, LI Y, LI S C, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10):13233-13250.
- [5] 孙红雨,王长耀,牛铮,等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系:基于NOAA时间序列数据分析[J]. *遥感学报*, 1998, 2(3):204-210.
- [6] 马启民,贾晓鹏,王海兵,等. 气候和人为因素对植被变化影响的评价方法综述[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6):48-55.
- [7] 金凯,王飞,韩剑桥,等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5):961-974.
- [8] WU X T, WANG S, FU B J, et al. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after Grain to Green Program[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 678:565-573.
- [9] SUN W Y, SONG X Y, MU X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209-210:87-99.
- [10] 孙钦明,刘彤,韩志全,等. 遥感分析天山北部植被覆盖对气候变化的多时间尺度响应[J]. *农业工程学报*, 2014(15):248-255.
- [11] 王海军,靳晓华,李海龙,等. 基于GIS和RS的中国西北NDVI变化特征及其与气候变化的耦合性[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11):194-203.
- [12] 赵倩倩,张京朋,赵天保,等. 2000年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应[J]. *高原气象*, 2021, 40(2):292-301.
- [13] 张辰华,李书恒,白红英,等. 太白山地区7月NDVI多尺度周期变化及其对气候因子的响应[J]. *资源科学*, 2019, 41(11):2131-2143.
- [14] 王青霞,吕世华,鲍艳,等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(2):301-312.
- [15] 鲍艳,王玉琦,南素兰,等. 青藏高原植被对未来气候变暖的反馈[J]. *高原气象*, 2023, 42(3):553-563.
- [16] 郭敏杰,张亭亭,张建军,等. 1982—2006年黄土高原地区植被覆盖度对气候变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5):35-40, 48.
- [17] 刘世梁,田韞钰,尹艺洁,等. 云南省植被NDVI时间变化特征及其对干旱的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(15):4699-4707.
- [18] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to

- global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [19] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 423-431.
- [20] 陆静雯. 中国北方地区植被覆盖时空变化特征及对气候因子和干旱的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [21] 高云飞, 张栋, 赵帮元, 等. 1990—2019年黄河流域水土流失动态变化分析[J]. *中国水土保持*, 2020(10): 64-67.
- [22] 陈敏建. 水循环生态效应与区域生态需水类型[J]. *水利学报*, 2007, 38(3): 282-288.
- [23] BATMAN I J, HARWOOD A M, MACE G M, et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom[J]. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
- [24] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 等. 流域生态空间与生态保护红线规划方法: 以长江流域为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 835-843.
- [25] 张合兵, 于壮, 邵河顺. 基于多源数据的自然生态空间分类体系构建及其识别[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(12): 24-33.
- [26] 黄星, 马龙, 刘廷玺, 等. 黄河流域内蒙古段 1951—2012年气温、降水变化及其关系[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 1027-1040.
- [27] 冯琰玮, 甄江红. 黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(10): 129-138.
- [28] 王宇霞. 黄河内蒙古段高质量发展建议[J]. *内蒙古水利*, 2021(7): 76-77.
- [29] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 849-858.
- [30] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 等. 2001—2020年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 205-212.
- [31] 李晴晴, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域植被时空变化及其对气候要素的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4041-4054.
- [32] 郭帅, 裴艳茜, 胡胜, 等. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3): 1-7, 13.
- [33] 刘吉峰, 王金花, 焦敏辉, 等. 全球气候变化背景下中国黄河流域的响应[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(5): 860-865.
- [34] JIAO W Z, WANG L X, NOVICK K A, et al. A new station-enabled multi-sensor integrated index for drought monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 169-180.
- [35] 宋珂, 刘京会, 袁旭山. 基于SPEI指数的华北地区 1981—2020年干旱时空特征分析[J]. *防灾科技学院学报*, 2023, 25(1): 49-58.
- [36] 张棋, 许德合, 丁严. 基于SPEI和时空立体的中国近40年干旱时空模式挖掘[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(3): 194-201.
- [37] 刘世梁, 田韞钰, 安南南, 等. 基于逐月标准化降水蒸散指数的多尺度方法分析气候变化对澜沧江流域归一化植被指数的影响[J]. *气候与环境研究*, 2015(6): 705-714.
- [38] 宋进喜, 齐贵增, 余敦先, 等. 中国植被生产力对干湿变化的响应[J]. *地理学报*, 2023, 78(7): 1764-1778.
- [39] 姜晓勇. 黑河上游地区径流量的变化趋势及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2008.
- [40] 付含培, 王让虎, 王晓军. 1999—2018年黄河流域NDVI时空变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 145-153, 162.
- [41] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于GEE云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1439-1450.
- [42] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007(11): 1504-1514.
- [43] WANG S N, LI R P, WU Y J, et al. Effects of multi-temporal scale drought on vegetation dynamics in Inner Mongolia from 1982 to 2015, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108666.

(责任编辑 张 庆)

Impact of Arid Climate Change on the Vegetation Coverage Based on Multiple Analysis of SPEI over the Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin

SONG Jing^{1,2}, XUN Xueyi¹, MEI Jiahui¹, SHEN Yingyue¹, NIU Jiamu¹, ZHANG Min¹

(1. *College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;*

2. *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: The Inner Mongolia section of the Yellow River Basin lies in an ecologically fragile mid-latitude area, where vegetation cover is extremely sensitive to climate change. Therefore, it is crucial to investigate how climate change at multiple scales influences vegetation cover in the basin, so as to maintain ecological balance and promote sustainable development. Using temperature and precipitation data from meteorological observation stations in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin, together with SPOT/VEGETATION NDVI satellite remote sensing data, we calculated the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Linear regression and correlation analysis were then employed to examine the temporal dynamics of arid climate and the multi-scale evolutionary trends of vegetation cover, as well as to investigate the correlations and lag effects between SPEI and NDVI at the sub-basin scale. The results indicate that SPEI values in the basin exhibit a weak upward trend, suggesting that the aridification tendency is diminishing. Both the amplitude of SPEI fluctuations and the slope of the trend line decrease from the southeast to the northwest, and the larger the time scale, the wider the area showing a significant upward trend. Seasonal analyses reveal that SPEI values increase in winter, summer, and autumn—indicating a gradual alleviation of aridification—whereas spring values decrease, implying an intensification of aridification. The annual mean NDVI of the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin also shows a weak but fluctuating upward trend, consistent across sub-basins, with the most rapid increase in downstream areas, followed by midstream areas, and the slowest in upstream areas. Overall, the positive correlation between SPEI and NDVI in this region demonstrates a weak but fluctuating upward trend, with sub-basin NDVI dynamics largely consistent with the basin-wide pattern. There is a positive correlation between SPEI and NDVI, which exhibits pronounced lag characteristics. In the upstream region, the correlation coefficient reaches its maximum value after a two-year lag, whereas in other sub-basins, this occurs the following year.

Key words: Inner Mongolia section of the Yellow River Basin; multiple time scale; standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); normalized difference vegetation index (NDVI)