

宁夏中部干旱带植被净初级生产力对 干旱变化的响应

丛士翔¹, 丁旭东², 常文静², 王盈盈², 余海龙², 黄菊莹³

(1. 宁夏大学 林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 地理科学与
规划学院, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏大学 生态环境学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: [目的] 评估不同植被类型因干旱造成的植被净初级生产力损失量(Δ NPP)对各降水年型的响应关系, 以期深入了解植被对气候极端事件的响应, 并为区域旱灾预防提供理论依据。[方法] 以宁夏回族自治区中部干旱带 2001—2021 年标准化降水蒸散指数(SPEI)度量气象干旱, 基于 MODIS 遥感数据, 采用 CASA 模型估算研究区 NPP, 采用趋势分析、Mann-Kendall 检验和 Pearson 相关性分析等方法分析不同植被类型 NPP 因干旱导致的损失量(Δ NPP)时空分异及其与 SPEI 指数的相关性。[结果] ① 2001—2021 年, SPEI 指数显示, 研究区干旱趋势整体趋缓; 在空间维度上总体仍以干旱占主导, 但局地有湿润化趋势。② 研究区植被 Δ NPP 整体上呈出波动减少趋势; 在空间上研究区东部植被 Δ NPP 呈减小趋势。③ SPEI 指数与 Δ NPP 的相关性分析显示, 呈负相关占主导, 但因干旱等级不同而呈现明显的时空差异。④ 不同植被类型 Δ NPP 对年尺度 SPEI 的响应具有一定差异, 具体表现为: 在严重和极端干旱胁迫下, 林地的 Δ NPP 最大, 农作物次之, 灌木最小。[结论] 目前宁夏中部干旱带出现湿润化趋势, 为提高研究区植被对干旱的抵抗力, 需提高植被结构与组成的复杂性和多样性。

关键词: 气象干旱; NPP; SPEI 指数; 宁夏中部

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0402-11

中图分类号: Q948.1

文献参数: 丛士翔, 丁旭东, 常文静, 等. 宁夏中部干旱带植被净初级生产力对干旱变化的响应[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 402-412. Cong Shixiang, Ding Xudong, Chang Wenjing, et al. Response of net primary productivity to drought change in middle arid zone of Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 402-412. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.005; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.005.

Response of net primary productivity to drought change in middle arid zone of Ningxia Hui Autonomous Region

Cong Shixiang¹, Ding Xudong², Chang Wenjing², Wang Yingying², Yu Hailong², Huang Juying³

(1. School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: [Objective] The response relationships of the net primary productivity loss (Δ NPP) of different vegetation types caused by drought of different vegetation types to various precipitation annual patterns were evaluated, in order to gain an in-depth understanding about the responses of vegetation to climate extreme events and provide a theoretical basis for regional drought prevention. [Methods] Drought characteristics was quantified by standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), and NPP was estimated based on MODIS remote sensing data by Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model and annual SPEI during 2001 to 2020 in the middle arid zone of Ningxia Hui Autonomous Region was calculated to explore the differences of net primary productivity (NPP) of different vegetation types to SPEI, and the correlation between NPP loss (Δ NPP) due to drought and SPEI index by using the methods of trend analysis, Mann-Kendall test and correlation analysis.

收稿日期: 2025-01-16

修回日期: 2025-03-15

采用日期: 2025-03-17

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目“宁夏中部干旱带典型固沙植物高效抚育利用的水力调控机理”(U23A20223); 宁夏回族自治区重点研发项目“宁夏中部干旱带多尺度旱灾遥感检测与应用”(2019BEG03029)

第一作者: 丛士翔(1997—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士研究生, 研究方向为草学。Email: CongShixiang1997@163.com。

通信作者: 余海龙(1979—), 男(汉族), 甘肃省酒泉人, 博士, 教授, 主要从事土地地理及节水灌溉等方面的研究。Email: yhl@nxu.edu.cn。

[Results] ① From 2001 to 2020, the SPEI index indicated that the drought trend in the study area was generally slowing down, and drought was still dominant in spatial dimension, but there was a trend of humidification. ② Δ NPP in the study area showed a totally decreasing trend of fluctuation; spatially, the Δ NPP in the eastern part of the study area decreased significantly. ③ The correlation analysis between SPEI index and Δ NPP showed that the negative correlation was dominant, but there were obvious spatial-temporal differences due to different drought grades. ④ The response of Δ NPP of different vegetation types to annual SPEI was different, under severe and extreme drought stresses, the NPP loss of forest was the largest, followed by crop, and shrubs was the least. [Conclusion] At present, the middle arid zone of Ningxia shows a trend of humidification. In order to improve the resistance of vegetation to drought in the study area, the complexity and diversity of vegetation structure and composition should be improved.

Keywords: meteorological drought; net primary productivity (NPP); standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); middle zone of Ningxi Hui Autonomous Region

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是衡量一个区域是碳源/碳汇的基本标准^[1],反映了植物对环境因子的利用能力,其动态变化代表了生态系统对气候变化的响应。干旱频发是21世纪气候变化的一个显著特征,厘清植被生长如何响应干旱,对理解和预测生态系统碳汇功能演变至关重要^[2]。

干旱是分布最广泛、持续时间最长的自然灾害,也是影响陆地NPP最普遍的因素之一^[3]。干旱可直接或间接地影响NPP,干旱频率和持续时间的增加会导致全球干旱半干旱地区NPP有所下降^[4],但干旱胁迫引发植被生长强烈响应的阈值可能存在种间差异和空间分异^[5]。干旱等级的升高会显著降低草地NPP^[6],而干旱频率的增加则会导致全球陆地生态系统NPP下降更为明显^[7]。近年来,已有学者针对局地乃至全球NPP变化对干旱的响应及其量化开展了较多研究,如Wang等^[8]量化了降水对黄土高原NPP变化的贡献率(86.31%),且认为年最小降水量与NPP年际变化具有协同关系;Zhao等^[6]基于多源遥感数据,发现由全球变暖引起的干旱已明显阻碍了全球NPP的增长。

了解植被NPP对干旱的响应机理,对评估区域干旱时空演变对植被动态变化的影响,从而进行防灾减灾,维持区域生态安全等具有重要意义。干旱指数是评价干旱最直观且最简单的度量指标,它通过将一或几个变量(如温度、降水和潜在蒸散发)的数据转化为单一数值来描述干旱严重程度及其开始和持续的时间。据世界气象组织统计,常用的气象干旱指数达55种之多^[9]。其中,标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)不仅能衡量温度变化对干旱的影响,而且可以从多个时间尺度监测干旱的发生、发展、等级、范围及起止时间,应用范围广泛。植被与干旱指数之间的相关性是研究植被对干旱响应关系的常用

方法^[10],如王东^[11]通过SPEI与NPP的相关性分析了黄土高原植被对干旱的响应,结果表明干旱发生越强,NPP降幅越大。Yu等^[12]分析了内蒙古NPP动态变化与干旱指数SPEI的相关性,结果表明干旱对植被NPP有明显的负面影响。SPEI具有表征区域旱灾风险时空变化的能力,可为干旱监测与防灾减灾提供具体指导。但目前在中部干旱带不同功能区和植被类型下,植被NPP因干旱造成的损失量(Δ NPP)对SPEI的响应关系是否存在线性特征,以及在不同干旱等级下其响应机制和强度是否存在显著差异等问题尚不明晰。

宁夏中部干旱带地处中国西北内陆,降水稀少且时空分布不均。干旱是当地主要的自然灾害,素有“十年九旱”之说^[13]。在气候变暖背景下,该区域旱灾频发,不仅严重影响农作物生长,还会限制当地退耕还林(草)工程的成效^[14]。因此,本文基于地面气象站点逐日数据,计算2001—2021年宁夏中部干旱带SPEI指数并分析该区域干旱等级、干旱范围、干旱频率的时空变化。在分析研究期内区域NPP时空变化的基础上,以研究期平水年为基准,结合相关性分析,定量计算干旱影响下不同植被类型 Δ NPP,评估各植被类型 Δ NPP对各降水年型的响应关系,以期深入了解植被对气候极端事件的响应,并为区域旱灾预防提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

根据生态功能类型,宁夏中部干旱带可划分为西部腾格里沙漠边缘防风固沙区、南部水源涵养区、中部水土流失保护区、东部毛乌素沙地防风固沙区。宁夏中部干旱带地处黄土高原和鄂尔多斯台地东部,地势南高北低,东高西低,地貌类型南部以黄土丘陵沟壑区为主,北部为丘陵台地,海拔高

程在 1 300~2 400 m, 区域沟壑纵横、梁峁起伏、地形支离破碎, 植被覆盖率不足 20%。自南向北由中温带半干旱区向干旱区过渡, 有明显的大陆性气候特征: 冬寒长, 春暖迟, 夏热短, 秋凉早, 干旱少雨, 降雨集中, 蒸发强烈, 风大沙多, 日照充足。多年平均降水量自南向北由 400 mm 递减到不足 200 mm, 且时空分布不均, 降水主要集中在 7—9 月, 约占全年总降水量的 60%~70%, 并多以暴雨、冰雹等灾害形式出现。年平均水面蒸发量在 1 210~1 600 mm 之间。大风天气(风速 ≥ 17 m/s)年平均 8~46 d, 大多出现在

冬春季节, 大风出现时往往伴有沙暴, 以盐池、同心两县居多, 每年达 20 d 左右。该地区种植业和畜牧业并存, 是具有生态脆弱特征的特殊生态经济复合系统, 也是中国水土流失、草地退化、沙漠化等生态问题最为突出的地区之一^[15]。土壤类型以灰钙土、黄绵土和风沙土为主。植被以地带性草原植被为主, 天然植被有干草原、荒漠草原、沙生草场、盐生草场等多种植被类型。由于近年来引黄灌区范围扩展和退耕还林(草)工程的实施, 研究区内人工植被面积大幅增加, 集中分布于盐池、同心的荒漠草原区(图 1)。

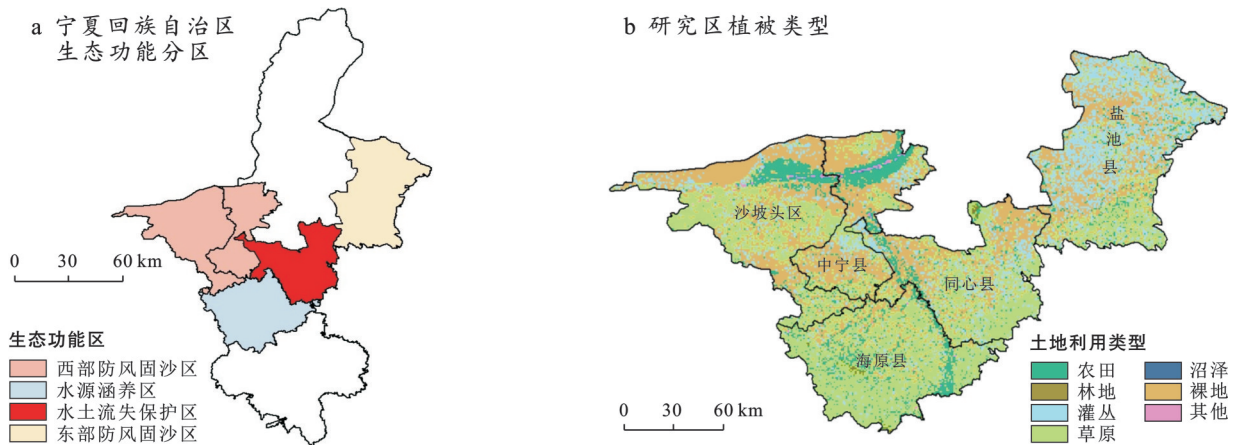


图 1 宁夏中部生态功能分区和干旱带土地利用类型分布

Fig.1 Ecological function zoning of Ningxia and land use type distribution in central arid region

1.2 计算方法及数据来源

1.2.1 SPEI 计算方法及数据来源

本研究选用 SPEI 指数作为干旱监测指标, 它是在标准化降水指数的基础上, 考虑水分亏缺和累积效应两个因素, 用降水量和潜在蒸散量差值偏离平均状态的程度来表征干旱。所需气象资料源自中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>), 包括气温、降水量、日照时间、相对湿度等指标。其中, 缺测的数据采用多年平均值进行线性插补处理。SPEI 指数所表征的干旱等级分类标准如表 1 所示, 具体计算公式参见《气象干旱等级: GB/T 20481—2017》。本研究以 12 个月为时间尺度计算 SPEI 值, 用以分析年尺度旱灾演变特征。

表 1 SPEI 指数干旱等级分类标准

Table 1 Classification criteria for drought grades by standardized precipitation evapotranspiration index (SPI)

SPEI	等级
$-0.5 < \text{SPEI} \leq 0.5$	无旱
$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$	轻旱
$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$	中旱
$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$	重旱
$\text{SPEI} \leq -2.0$	特旱

1.2.2 NPP 计算方法及数据来源

本研究使用 CASA 模型计算 2001—2021 年宁夏中部干旱带逐月 NPP。CASA 模型的估算原理是将植被吸收的光合有效辐射 (APAR) 观测值与植被实际光合利用率的乘积视作 NPP 的估算值。该模型具有所需参数少、遥感数据覆盖范围广, 时间分辨率高的特点, 能够实现对区域和全球 NPP 的动态监测, 是目前国际上最通用的 NPP 计算模型之一^[16]。计算公式为

$$\text{NPP}_{(x,t)} = \text{APAR}_{(x,t)} \times \epsilon_{(x,t)} \quad (1)$$

$$\text{APAR}_{(x,t)} = 0.5 \text{SOL}_{(x,t)} \times \text{FPAR}_{(x,t)} \quad (2)$$

$$\epsilon_{(x,t)} = T_{el(x,t)} \times T_{eh(x,t)} \times W_{\epsilon(x,t)} \times \epsilon_{\max} \quad (3)$$

式中: $\text{NPP}_{(x,t)}$ 为植被在像元 x 处 t 月的净初级生产力 (g/m^2) (以 C 计); $\text{APAR}_{(x,t)}$ 为植被在像元 x 处 t 月吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2); $\epsilon_{(x,t)}$ 为植被在像元 x 处 t 月的实际光能利用率 (g/MJ) (以 C 计); $\text{SOL}_{(x,t)}$ 为像元 x 在 t 月的太阳总辐射 (MJ/m^2); $\text{FPAR}_{(x,t)}$ 为入射光被植被层吸收的有效辐射比例; 0.5 为光合有效辐射与太阳总辐射之比; $T_{el(x,t)}$ 和 $T_{eh(x,t)}$ 分别为低温和高温对光能利用率的胁迫作用; $W_{\epsilon(x,t)}$ 为水分胁迫作用; ϵ_{\max} 为最大光能利用率, 本研究沿用朱文泉

等^[17]对中国陆地生态系统植被NPP估算时率定的各主要植被类型的 ϵ_{\max} 。

植被对太阳有效辐射的吸收比例取决于植被的类型和覆盖状况。NDVI可以很好地反映植被覆盖状况,FPAR_(x,t)由NDVI和植被类型两个因子表示。其中,NDVI数据集选用时间序列为2001—2021年的MODIS陆地标准产品MOD13Q1数据集(空间分辨率为250 m;时间分辨率为16 d),使用最大值合成法(maximum value composition, MVC)生成逐月最大NDVI数据。植被类型CLCD数据源自国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>),包含1985—2022年逐年土地覆盖信息,空间分辨率30 m,该数据时序较长,可用以确定不同植被类型的分布。这些数据均基于GEE(Google Earth Engine)遥感云平台进行处理和下载,按照数据的质量波段进行质量控制,然后重投影为WGS 84(EPSSG:4 326),进行镶嵌、掩膜和重采样,使其与NDVI数据具有相同的空间分辨率,且裁剪至像元行列数相同。

1.2.3 NPP因干旱导致的损失量(Δ NPP)

为定量分析干旱对宁夏中部干旱带NPP的影响,根据SPEI干旱等级划分标准(表1),将SPEI值处于(0.5, 0.5]之间(等级为无旱)的年份作为基准年^[18],获得宁夏中部干旱带NPP的基准值。本研究通过空间分析方法,在ArcGIS 10.6环境下,使用基准年NPP值逐像元减去不同等级干旱影响下的宁夏中部干旱带NPP值,即可得到3个等级干旱的 Δ NPP值及其空间分布。

Δ NPP计算方法如公式(4)所示。

$$\Delta\text{NPP} = \text{NPP}_{\text{atru}} - \text{NPP}_{\text{dtru}} \quad (4)$$

式中: Δ NPP为NPP因干旱产生的损失量[$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$](以C计); NPP_{atru} 为基准年NPP的平均值[$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$](以C计); NPP_{dtru} 为干旱年份NPP的真实值[$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$](以C计)。

1.2.4 变化趋势分析

采用一元线性回归方程分析SPEI和 Δ NPP的长期变化,并采用方程斜率来描述要素的变化趋势及幅度。并基于像元的匹配方法统计年尺度 Δ NPP与同时段SPEI的相关系数,通过ArcGIS进行空间分析。

1.2.5 数据分析与显著性检验

利用Origin 2021处理数据并制作图表,利用Matlab 2018软件对数据进行单因素方差分析、双因素方差分析和相关性分析,空间分析则采用ArcGIS 10.6完成。本研究采用Mann-Kendall检验法(简称M-K检验)对变化趋势进行显著性分析,在Matlab 2018环境下实现,显著水平 $\alpha = 0.05$ 。M-K检验不

受缺失值或异常值的影响,是常用的检验方法。

1.2.6 相关性分析

以年尺度 Δ NPP表征年度植被变化状况,并与其对应像元的年尺度SPEI指数进行基于空间像元的相关分析。相关性分析方法如下^[19]:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: R_{xy} 表示SPEI和NPP的相关系数; x_i 和 y_i 分别表示第*i*年的SPEI和NPP值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示SPEI和NPP的平均值。此外,采用*t*检验确定相关性的显著性,结果分为极显著($P \leq 0.01$)、显著($0.01 < P \leq 0.05$)、不显著($P > 0.05$)3个等级。

2 结果与分析

2.1 宁夏中部干旱带SPEI和 Δ NPP的时空演变特征

2.1.1 基于SPEI的干旱时空演变特征

SPEI指数不仅能直观地反映区域因降水-干旱而产生的干湿交替,也能反映较长时段内降水量的变化格局^[12]。参照SPEI干旱等级分类标准,研究区2001—2021年SPEI年际变化特征如图2所示,此期间SPEI的变幅为-1.81~0.26,呈现上升趋势,增速为0.03/a。在研究期内,72.73%的年份表现为干旱,其中,达到重旱级别($-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$)的年份为2005,2009,2015年;达到中旱级别($-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$)的年份为2004,2006,2011年;此外,达到轻旱级别($-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$)的年份有8个,为2001,2007,2008,2010,2012,2013,2016,2021年。

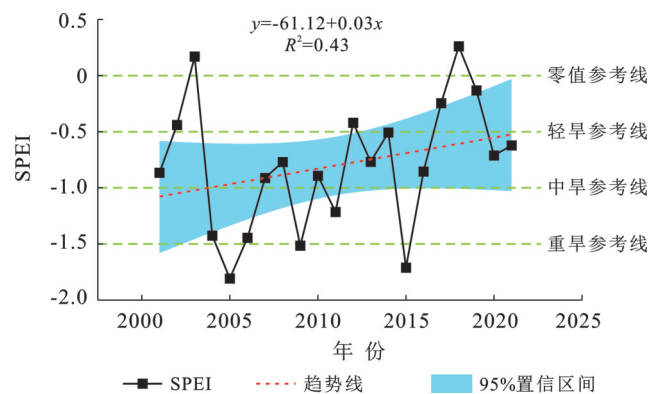


图2 2001—2021年宁夏中部干旱带SPEI年际变化
Fig.2 Interannual variation of SPEI in middle arid zone of Ningxia during 2001 to 2021

由图3可知,宁夏中部干旱带年际干旱等级的时空差异明显。2001—2005年,出现干旱现象的面积

占比为 78.56%。其中,研究区东部防风固沙区干旱等级较高,达重旱级别,而南部水源涵养区则相对湿润,干旱等级为无旱。2006—2010年,出现干旱现象的面积占比为 73.21%,相较于 2001—2005年,2006—2010年干旱重心向西部防风固沙区转移,且干旱影响范围呈缩小趋势。其中,研究区东部防风固沙区 SPEI 值上升明显,干旱等级从中旱向轻旱转变。

2011—2015年,出现干旱现象的面积占比为 84.88%,干旱范围呈增大趋势,干旱格局分异更加明显,具体表现为东部防风固沙区的干旱等级逐步降低,湿润化进一步加强;而干旱重心则自北向南发生转移,从西部防风固沙区向南部转移,旱灾影响范围扩大。2016—2021年,出现干旱现象的面积占比为 45.17%,干旱范围显著缩小,研究区东部整体呈湿润化状态。

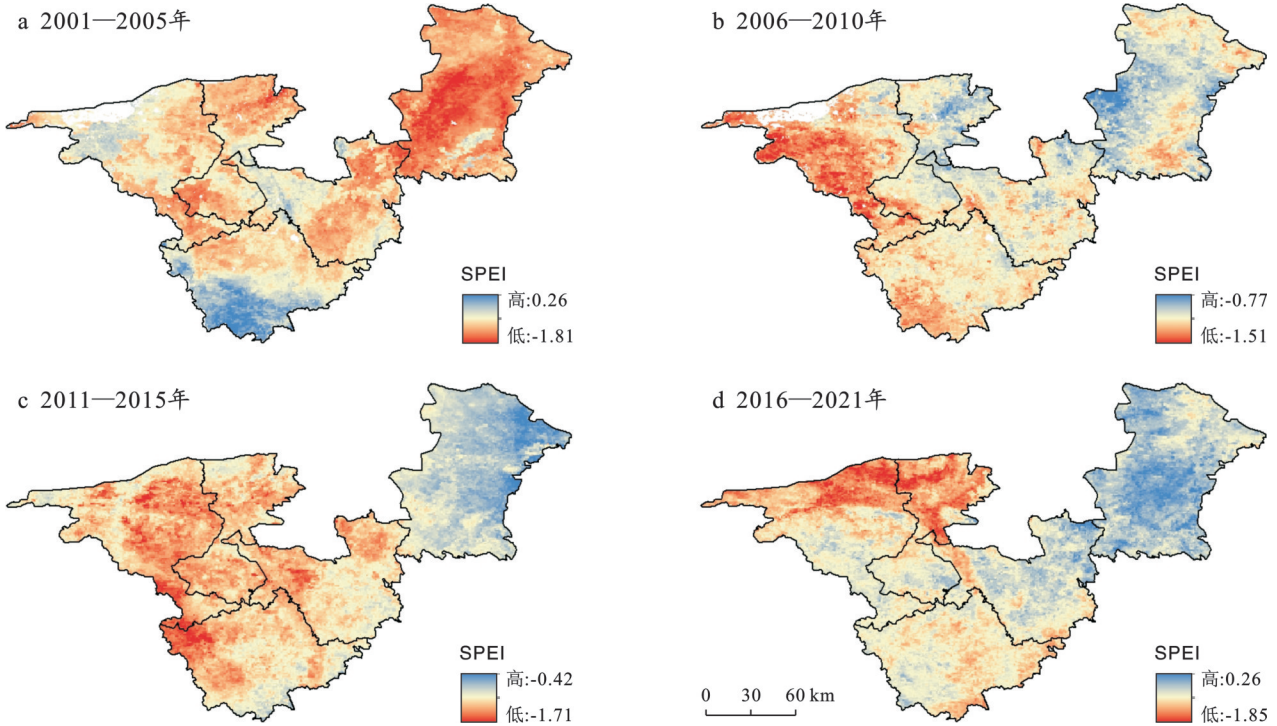


图 3 2001—2021年宁夏中部干旱带 SPEI 空间变化特征

Fig.3 Spatial variation of SPEI in middle arid zone of Ningxia during 2001 to 2021

由图 4a 可知,2001—2021年,研究区 92.34% 的区域其 SPEI 值呈上升趋势,变化幅度处于 $-0.02 \sim 0.07/10 a$ 之间。7.66% 的区域其 SPEI 值呈下降趋势,零星分布于西部防风固沙区。由图 4b 可知,2001—2021年,研究区干旱变化趋势存在显著的空间分异,具体表现为:22.62% 的区域呈现显著干旱化趋势,分布较为分散;25.16% 的区域呈不显著干旱化趋势,集中分布于研究区西南部;33.06% 的区域呈不显著湿润化趋势,主要分布在东部防风固沙区;19.14% 的区域呈显著湿润化趋势,主要分布在南部水源涵养区。

总体看来,研究区干旱现象具有发生频率高,旱灾范围广的特点,但整体呈波动中缓慢减缓趋势,且局地有显著湿润化趋势。

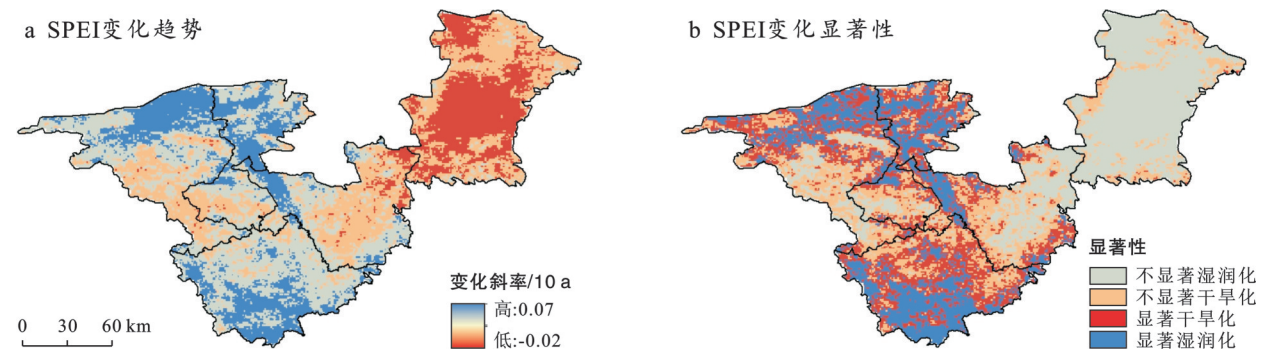


图 4 2001—2021年宁夏中部干旱带 SPEI 变化趋势和显著性分析

Fig.4 Change trend and significance analysis of SPEI in middle arid zone of Ningxia during 2001 to 2021

2.1.2 Δ NPP的时空演变特征 研究区2001—2021年 Δ NPP年际变化特征如图5所示。2001—2021年, Δ NPP总体呈波动下降趋势,下降速率为 $-9.39/a$,变幅为 $-80.70\sim 142.20 [g/(m^3 \cdot a)]$ (以C计),均值为 $19.89 [g/(m^3 \cdot a)]$ (以C计)。其中,2001年 Δ NPP最大,远高于多年均值,是研究区植被状况最差的一年;2013年是研究区 Δ NPP由正转负的转折点,此后研究区尽管仍有不同等级干旱发生,但 Δ NPP总体呈下降趋势。

由图6可知,研究区 Δ NPP具有明显的时空分异性。2001—2005年,研究区内植被NPP因干旱而呈减小趋势的面积占60.03%;其中,高值区位于西部防风固沙区,低值区则位于南部水源涵养区。2006—2010年, Δ NPP的重心向东部转移,且南北分布差异更加显著,66.53%的范围内NPP出现损失,且集中分布于西部和东部防风固沙区。相较于2001—2005年,2006—2010年研究区受旱范围呈扩大趋势。

2011—2015年,研究区 Δ NPP的空间分布范围与损失量显著减小,30.27%的范围内NPP出现因干旱而损失的现象,集中分布于西部和东部防风固沙区。2016—2021年,研究区 Δ NPP的空间分布范围与损失量持续减小, Δ NPP因干旱损失面积占比仅为25.04%,且较2011—2015年有所减小。

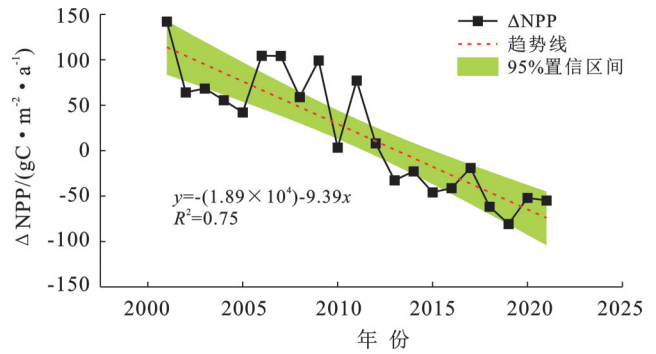


图5 2001—2021年宁夏中部干旱带 Δ NPP年际变化
Fig.5 Interannual variation of Δ NPP in middle arid zone of Ningxia during 2001 to 2021

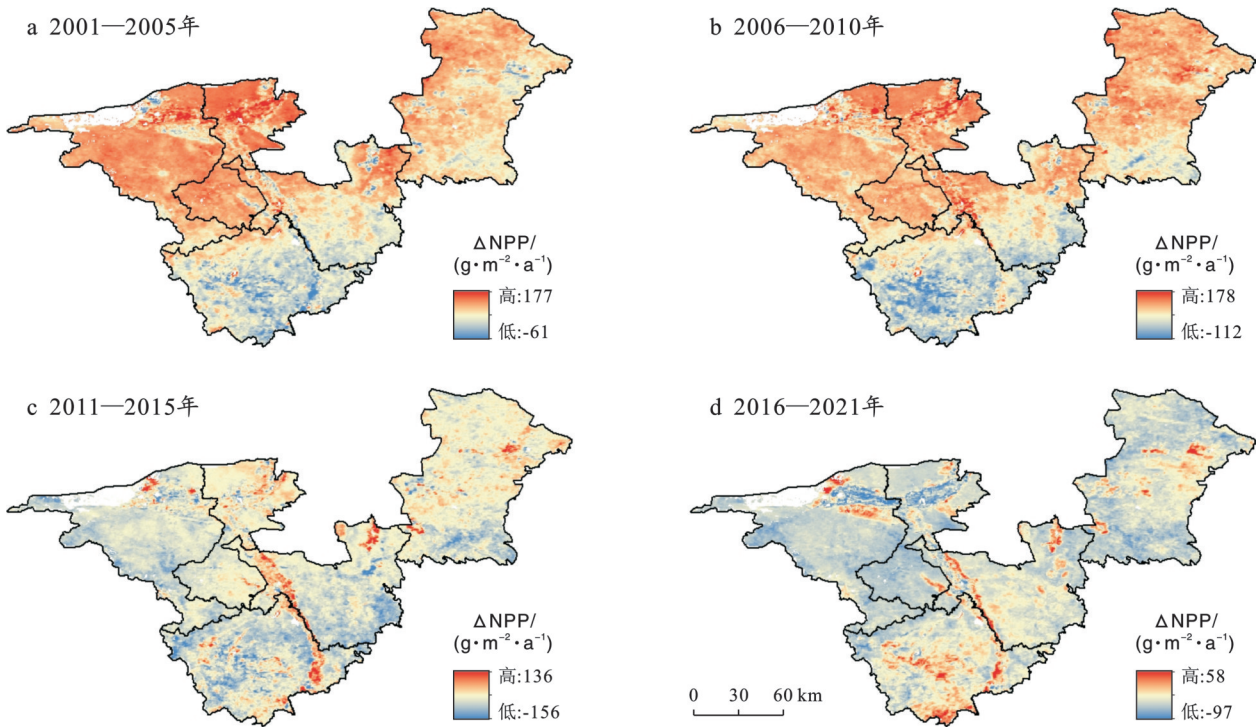


图6 2001—2021年宁夏中部干旱带 Δ NPP空间变化(以C计)
Fig.6 Spatial variation of Δ NPP in middle arid zone of Ningxia during 2001 to 2021 (calculated by C)

由图7a可知,研究区 Δ NPP变化趋势存在显著的空间异质性,变化趋势系数处于 $-8.00\sim 4.40$ 之间。其中,84.28%的区域其变化趋势系数为负,集中分布于研究区西北部,15.72%的区域变化趋势系数为正,零散分布于研究区东南部。6.19%的区域其 Δ NPP呈不显著退化趋势,15.84%的区域呈不显著改善趋势,20.64%的区域呈显著改善趋势,41.14%

的区域呈极显著改善趋势(见图7b)。总体看来,研究区 Δ NPP具有逐渐减小的趋势,植被状况持续改善。

2.2 Δ NPP与SPEI的响应关系

2.2.1 SPEI和 Δ NPP相关性分析

为探究干旱与植被变化的相关性,将研究区年尺度SPEI和 Δ NPP进行相关性分析。结果表明,二者的相关性呈现明显的空间异质性(图8)。SPEI和

Δ NPP表现出较高的负相关性。这说明在研究区内, SPEI指数下降,干旱等级上升,导致 Δ NPP上升。由此可见,干旱对 Δ NPP具有深刻影响,SPEI和 Δ NPP结合能够较好刻画研究区气候波动与植被状况的变化特征。此外,呈负相关的区域主要位于东部防风固沙区、中部水土流失保护区、西部防风固沙区,这

些区域的植被易受干旱影响。南部水源涵养区SPEI和 Δ NPP的相关性由北向南逐渐上升,说明南部水源涵养区的植被对于气象干旱具有一定的缓冲能力。西部防风固沙区二者的相关性最高,尤其是清水河流域内,说明气象干旱并非中宁县植被状况变化的主要因素。

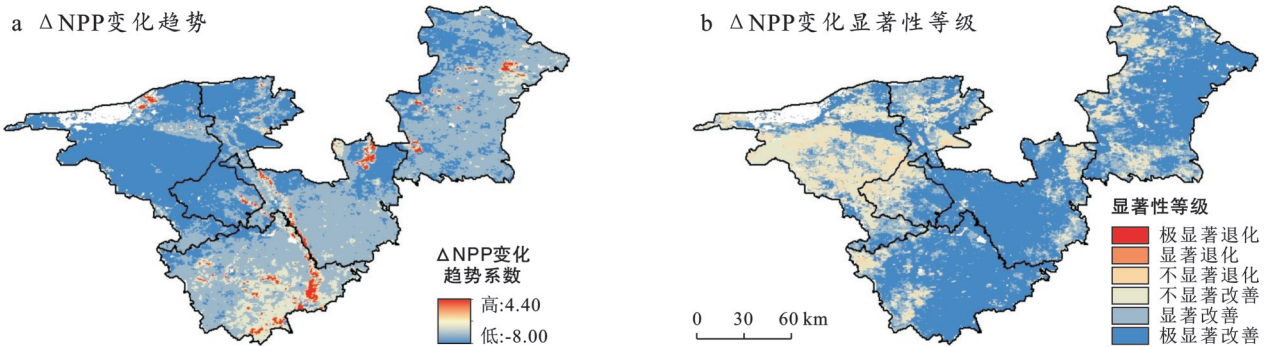


图7 2001—2021年宁夏中部干旱带 Δ NPP变化趋势空间分析

Fig.7 Change trend and spatial distribution of Δ NPP in middle arid zone of Ningxia during 2001 to 2021

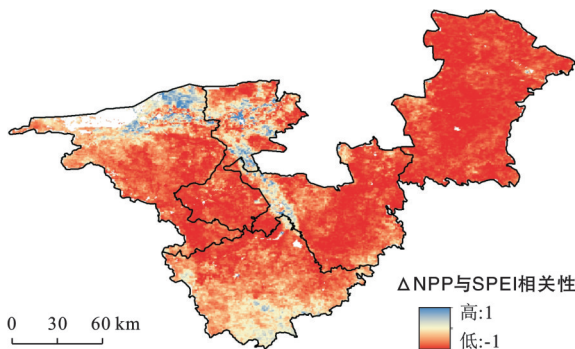


图8 2001—2021年宁夏中部干旱带SPEI和 Δ NPP的相关性
Fig.8 Correlation between SPEI and Δ NPP in middle arid zone of Ningxia during 2001 to 2021

2.2.2 不同干旱等级下 Δ NPP的空间分布特征

不同干旱等级造成 Δ NPP存在显著的空间分异。在无旱年,研究区NPP处于 $64\sim 553$ [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$](以C计)之间,低值区位于西部防风固沙区,高值区则位于南部水源涵养区(图9)。轻旱造成研究区49.83%的面积表现为 Δ NPP上升,主要分布在西部防风固沙区, Δ NPP最大值为 92 [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$](以C计);中旱造成74.82%的区域出现 Δ NPP上升,主要分布在西部和东部防风固沙区, Δ NPP最大值为 164 [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$](以C计);重旱造成80.23%的面积出现 Δ NPP上升,主要分布在西部和东部防风固沙区, Δ NPP最大值为 180 [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$](以C计)。不同等级干旱造成的 Δ NPP高值区分布具有空间异质性,重心均位于西部防风固沙区,随着干旱等级的上升,重心表现出向南转移的趋势。

2.2.3 不同干旱等级下植被 Δ NPP变化显著性

本研究基于像元尺度分析不同干旱等级下植被

Δ NPP变化显著性的空间差异,结果如图10所示。在无旱年(图10a),研究区内52.70%的区域 Δ NPP呈现显著减小趋势,其中东部防风固沙区改善最明显,其次为中部水土流失保护区。在轻旱年(图10b),研究区内植被 Δ NPP呈现不显著增加特征,面积占比达63.80%,主要集中在中部水土流失保护区及西部防风固沙区。中旱年(图10c),研究区内植被 Δ NPP以显著增加为主,面积占比为38.52%,主要集中在西部防风固沙区及中部水土流失保护区。重旱年(图10d),植被 Δ NPP进一步增加,面积占比为56.87%,西部和东部防风固沙区 Δ NPP明显上升。由此可见,研究区北部植被脆弱, Δ NPP水平受干旱灾害影响时易出现较大波动。

2.2.4 不同类型植被 Δ NPP对干旱等级的响应

不同植被类型对干旱响应存在差异(图11)。结果表明,对于中等干旱,林地、灌木、草地和农作物的 Δ NPP分别为23.15, 18.26, 41.26和21.63 [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$](以C计)。对于严重干旱,林地、灌木、草地和农作物的 Δ NPP分别为64.32, 26.35, 42.35, 48.62 [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$](以C计)。对于极端干旱,林地、草地和农作物的 Δ NPP分别为94.38, 37.85, 46.53, 66.51 [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$](以C计)。

总体来看,不同植被类型的 Δ NPP对不同干旱等级的响应不同,干旱等级越高,植被 Δ NPP越大;在相同干旱等级下,不同类型植被的 Δ NPP也存在显著差异。在干旱等级上升的条件下,林地 Δ NPP具有明显的变化梯度,且波动幅度最大,说明在4种植被类型中,林地对于气象干旱的响应程度最高,对于干旱环

境具有一定的耐受性。农作物 ΔNPP 波动幅度仅次于林地,在干旱环境下对 ΔNPP 的升高具有较大贡献。灌木 ΔNPP 的变化梯度也较明显,其 ΔNPP 在 4 种植被类型中最小,说明灌木在长期演变过程中对干旱胁迫的适应性更高,调整生长策略的能力最强。

草地 ΔNPP 波动幅度最小,这可能是由于草地对于干旱胁迫反应敏感,在中等干旱条件下,其 ΔNPP 已升至较高水平。

相较而言,在严重和极端干旱条件下,林地的 ΔNPP 最大,农作物次之,灌丛最小。

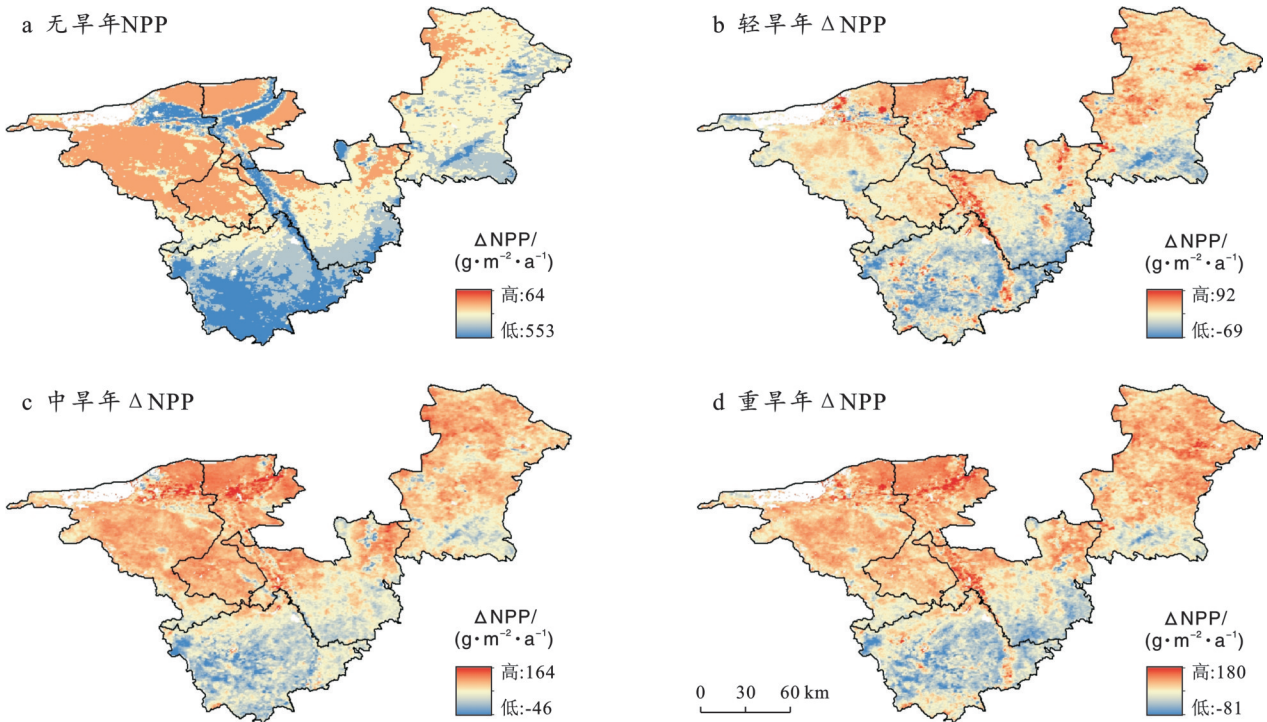


图 9 不同干旱等级宁夏中部干旱带 ΔNPP 空间分布(以 C 计)

Fig.9 Spatial distribution of ΔNPP under different drought grades in middle arid zone of Ningxia (calculated by C)

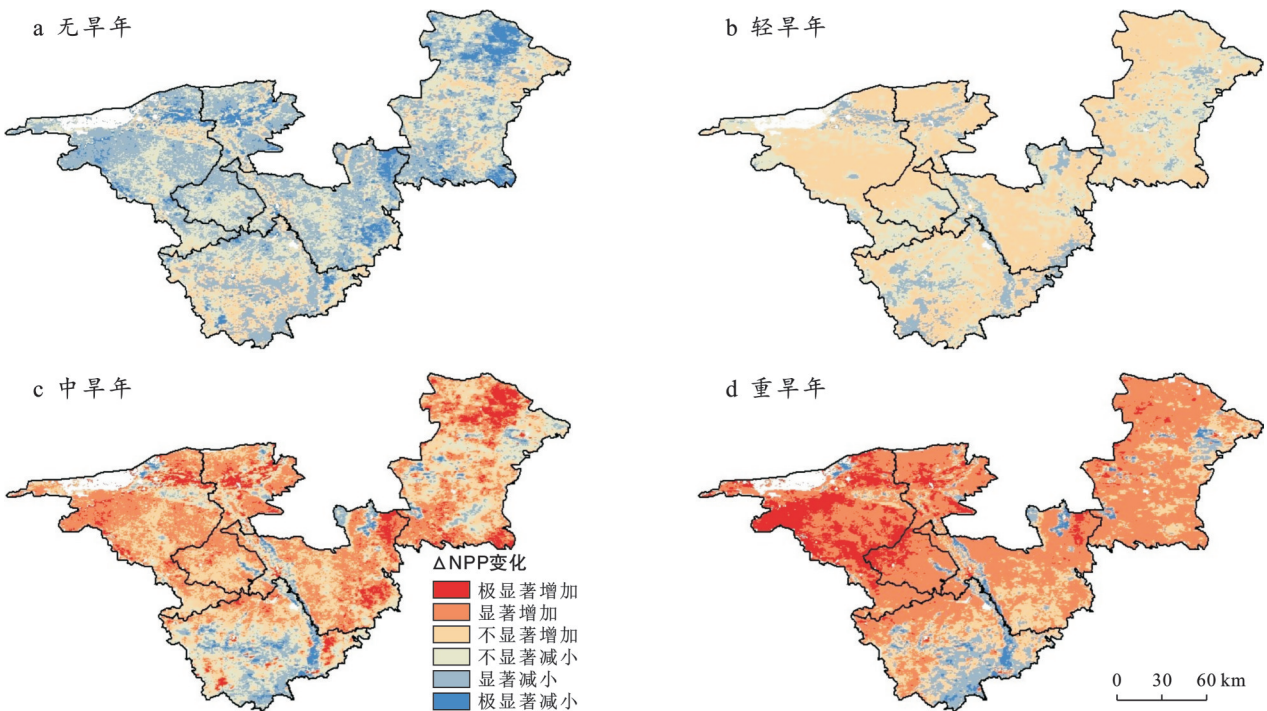


图 10 不同干旱等级宁夏中部干旱带植被 ΔNPP 变化显著性

Fig.10 Significance analysis for change of ΔNPP under different drought grades in middle arid zone of Ningxia

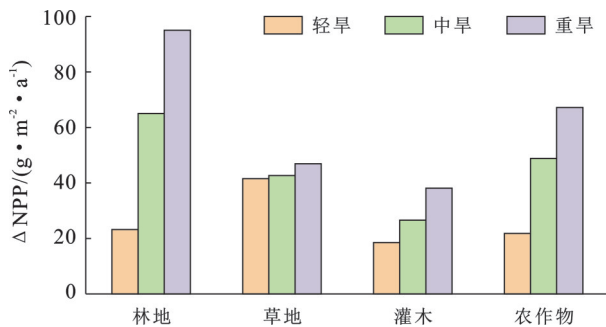


图 11 不同干旱等级主要植被类型的 ΔNPP (以 C 计)

Fig.11 ΔNPP of main vegetation types under different drought grades (calculated by C)

3 讨论

气象干旱是其他类型干旱研究及干旱风险评估的基础。在干旱半干旱地区,降水和温度是决定植被生长状况的主导要素。NPP是衡量植被生长发育能力的重要指标,植被 ΔNPP 的年际变化也常常与降水的年际变异性相关^[20]。因此,本研究以基于气温和降水的 SPEI 指数为干旱监测指标,进行干旱特征的时空演变分析。结果表明,在空间尺度上干旱等级自西北向东南逐渐减弱,具体表现为:干旱等级最严重的区域位于研究区西北部,且存在持续性;最轻的区域则位于研究区南部,局地甚至出现湿润化现象(图 4)。这与马小燕等^[21]总结的宁夏沿黄城市带干旱特征空间分异规律基本一致。在时间尺度上,分析总结了干旱等级和频次的发生规律,表现为中等干旱现象发生频繁,全域性干旱较多。从年际、年代际时间尺度来看,2010年后干旱范围缩小、干旱等级降低,这与姚旭阳等^[22]对西北地区气候转型的研究中关于宁夏部分的观点一致,而干旱等级降低的态势可能与我国西北地区气候“暖湿化”趋势有关^[23]。同时,也印证了 SPEI 指数在宁夏干旱状况评估中具有较好的适用性。

气象干旱被认为是造成 NPP 损失的潜在气候驱动因素^[24],尤其是温带地区。本研究以 ΔNPP 为评价指标,评估宁夏中部干旱带植被变化对气候变化的响应。已有研究表明,发现由全球变暖引起的干旱已明显阻碍了全球 ΔNPP 的增长^[6]。本研究中,从空间尺度来看,研究区植被 ΔNPP 空间分布呈现北高、南低的明显分布格局(图 8);从时间尺度上来看,随着近年来西北地区的“暖湿化”东扩趋势愈发显著,研究区整体的 SPEI 指数呈波动中缓慢加剧趋势,但局地也出现了干旱等级降低乃至湿润化趋势(图 4)。这与目前关于西北地区东部降水格局演变的趋势判断基本一致^[25]。

干旱是造成植被 ΔNPP 年际波动的主要胁迫因子之一,不同干旱等级对 ΔNPP 的影响不同^[26]。本研究中,不同等级的干旱均会导致植被 ΔNPP 上升。研究区植被 ΔNPP 与年尺度 SPEI 相关性分析结果表明,二者整体上以负相关占主导,且表现为干旱指数越小,负相关性越显著,且范围越广(图 8)。空间分析结果表明,研究区植被 ΔNPP 对旱灾的响应存在南北差异,研究区北部干旱等级相对更高(图 4),且该区域除西部防风固沙区外,其他植被均以浅层地表水为主要水分来源,随着干旱等级增加,由地表水亏缺造成的干旱胁迫加剧,植被以关闭气孔、降低光合色素的激发能力等方式作出响应^[27],最终表现为 ΔNPP 增加。研究区南部植被以林地为主,根系较深,对干旱灾害具有一定的缓冲能力^[28]。

植被类型差异是干旱响应空间异质性的重要因素之一^[29]。已有研究表明,植被 ΔNPP 与 SPEI 的相关性差异与植被分布及构成有关^[30]。西部防风固沙区属引黄灌区,植被以草地、农作物为主,东部防风固沙区植被以灌木及人工林地为主,中部水土流失保护区以草地为主,南部水源涵养区以草地、林地为主。本研究发现,在不同干旱等级下,灌木的 ΔNPP 最低,呈现出了较强的抗旱性,因此,东部防风固沙区在缺乏降水的条件下 ΔNPP 较低,且灌木和人工林地的组合方式能够在防风固沙的同时维持生态稳定。本研究发现,中部水土流失保护区 ΔNPP 易受干旱影响。草地 ΔNPP 变化幅度最小,但草地根系较浅,以浅层地表水为主要水分来源^[31],在轻旱影响下 ΔNPP 已达到较高水平,说明草地对于干旱更敏感,对于干旱适应性低于其他植被。南部水源涵养区在轻旱环境下 ΔNPP 较低,但在中旱、重旱时 ΔNPP 急剧升高,这可能是由于人工林地对地下水的获取能力强,对轻旱胁迫具有一定的缓冲、抵御作用^[28],但随着干旱等级升高,突破了缓冲作用的阈值,林地 ΔNPP 大幅上升^[32]。在不同干旱等级下,农作物 ΔNPP 的变化特征与林地相似,这可能是由于农作物分布区受人为灌溉等管理措施的调控,缓解了干旱的不利影响,故清水河流域内植被对干旱的响应较为迟缓。由于人工林和农作物具有更高的水分获取能力,对于干旱具有一定抵抗能力,随着干旱程度的加剧,当干旱超过生态系统的阈值^[28]时,其 ΔNPP 则急剧增加。因此,应通过增加植被丰富度同时选择最佳物种组合来优化植被生态系统的稳定性。

4 结论

(1) 2001—2021年宁夏中部干旱带 SPEI 指数呈

波动增大趋势,年均增长率为0.03/a,空间分布上表现为由北向南逐渐递增趋势。

(2) Δ NPP 总体呈波动减少趋势, Δ NPP 与 SPEI 指数的空间变化特征存在南北分异,总体以负相关占主导。

(3) Δ NPP 与 SPEI 指数的响应因植被类型不同表现出分异特征。总体来说旱灾对 Δ NPP 的上升具有驱动作用,通过提升植被多样性,选择合适的物种组合,能够在满足区域生态功能的同时增强生态系统的稳定性。高等级干旱导致林地 Δ NPP 最高,其次为农作物,草地对于干旱胁迫的反应最敏感,灌木对于干旱的耐受能力最强。

参考文献 (References)

- [1] Bouillon S, Borges A V, Castañeda-Moya E, et al. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(2):1-12.
- [2] Li Yue, Piao Shilong, Chen Anping, et al. Local and teleconnected temperature effects of afforestation and vegetation greening in China [J]. *National Science Review*, 2020, 7(5):897-912.
- [3] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle [J]. *Nature*, 2013, 500 (7462): 287-295.
- [4] Xu Haojie, Wang Xinping, Zhao Chuanyan, et al. Assessing the response of vegetation photosynthesis to meteorological drought across northern China [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(1):20-34.
- [5] Li Xiangyi, Piao Shilong, Wang Kai, et al. Temporal trade-off between gymnosperm resistance and resilience increases forest sensitivity to extreme drought [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(8):1075-1083.
- [6] Zhao Maosheng, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010, 329(5994):940-943.
- [7] He Wei, Ju Weimin, Jiang Fei, et al. Peak growing season patterns and climate extremes-driven responses of gross primary production estimated by satellite and process based models over North America [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 298:108292.
- [8] Wang Weixuan, Cui Chenfeng, Yu Weihua, et al. Response of drought index to land use types in the Loess Plateau of Shaanxi, China [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12:8668.
- [9] 李忆平,李耀辉.气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J].*干旱气象*,2017,35(5):709-723.
- Li Yiping, Li Yaohui. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, 35(5):709-723.
- [10] Wu Xiuchen, Liu Hongyan, Li Xiaoyan, et al. Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate northern hemisphere [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(1):504-516.
- [11] 王东.黄土高原干旱时空特征及对植被生长潜在风险评估[D].甘肃兰州:兰州大学,2023.
- Wang Dong. Spatial and temporal characteristics of the Loess Plateau drought and its potential risk to vegetation growth [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2023.
- [12] Yu Dongsheng, Li Yonghong, Yin Binglu, et al. Spatiotemporal variation of net primary productivity and its response to drought in Inner Mongolian desert steppe [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 33: e01991.
- [13] 赵雪雁,马平易,李文青,等.黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J].*地理学报*,2021,76(11):2780-2796.
- Zhao Xueyan, Ma Pingyi, Li Wenqing, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11):2780-2796.
- [14] Ni Xiangnan, Guo Wei, Li Xiaoting, et al. Heterogeneity of increases in net primary production under intensified human activity and climate variability on the Loess Plateau of China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4706.
- [15] 高阳,高甲荣,温存,等.宁夏盐池沙地土壤水分条件与植被分布格局[J].*西北林学院学报*,2006,21(6):1-4.
- Gao Yang, Gao Jiarong, Wen Cun, et al. The relationship between the soil water condition and vegetation distribution pattern in Yanchi [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(6):1-4.
- [16] 毕凡,潘竞虎.2000年以来中国潜在植被净初级生产力的时空分布模拟[J].*生态学报*,2022,42(24):10288-10296.
- Bi Fan, Pan Jinghu. Estimation of temporal and spatial distribution of potential vegetation net primary productivity in China since 2000 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(24):10288-10296.
- [17] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].*植物生态学报*,2007,31(3):413-424.
- Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3):413-424.
- [18] Lei Tianjie, Feng Jie, Lv Juan, et al. Net primary pro-

- ductivity loss under different drought levels in different grassland ecosystems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 274: 1111-1144.
- [19] 李焱, 巩杰, 戴睿, 等. 藏西南高原植被覆盖时空变化及其与气候因素和人类活动的关系[J]. *地理科学*, 2022, 42(5): 761-771.
Li Yan, Gong Jie, Dai Rui, et al. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its relationship with climatic factors and human activities in the southwest Tibetan Plateau [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(5): 761-771.
- [20] Biederman J A, Scott R L, Goulden M L, et al. Terrestrial carbon balance in a drier world: The effects of water availability in southwestern north America [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(5): 1867-1879.
- [21] 马小燕, 朱晓雯, 赵金涛, 等. 基于 SPEI 的宁夏沿黄城市带干旱特征及驱动性分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 364-373.
Ma Xiaoyan, Zhu Xiaowen, Zhao Jintao, et al. Analysis of drought characteristics and driving forces in the urban belt along the Yellow River in Ningxia based on SPEI [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 364-373.
- [22] 姚旭阳, 张明军, 张宇, 等. 中国西北地区气候转型的新认识[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(3): 671-683.
Yao Xuyang, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. New insights into climate transition in northwest China [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(3): 671-683.
- [23] 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(6): 551-562.
Ding Yihui, Liu Yanju, Xu Ying, et al. Regional responses to global climate change: Progress and prospects for trend, causes, and projection of climatic warming-wetting in northwest China [J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(6): 551-562.
- [24] Gampe D, Zscheischler J, Reichstein M, et al. Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades [J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(9): 772-779.
- [25] Shang Shasha, Zhu Gaofeng, Li Ruolin, et al. Decadal change in summer precipitation over the east of northwest China and its associations with atmospheric circulations and sea surface temperatures [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(8): 3731-3747.
- [26] Zeng Zhaoqi, Wu Wenxiang, Li Yamei, et al. Increasing meteorological drought under climate change reduces terrestrial ecosystem productivity and carbon storage [J]. *One Earth*, 2023, 6(10): 1326-1339.
- [27] 张斌, 李从娟, 易光平, 等. 梭梭和头状沙拐枣形态及生理生化特性对干旱胁迫的响应[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(7): 1177-1184.
Zhang Bin, Li Congjuan, Yi Guangping, et al. Physiological, biochemical and morphological responses of *Haloxyylon ammodendron* and *Calligonum caputmedusae* to drought stress [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(7): 1177-1184.
- [28] Hacke U G, Sperry J S. Functional and ecological xylem anatomy [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2001, 4(2): 97-115.
- [29] 陈燕丽, 唐梅蓉, 张会, 等. 广西喀斯特地区植被覆盖度和净初级生产力对 SPEI 干旱指数的响应差异[J]. *干旱气象*, 2022, 40(6): 1042-1050.
Chen Yanli, Tang Meirong, Zhang Hui, et al. Response difference of fractional vegetation cover and net primary productivity to SPEI drought index in karst areas of Guangxi [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, 40(6): 1042-1050.
- [30] 靖娟利, 孙佳荟, 赵婷, 等. 西南地区植被 NPP 对多尺度气象干旱的响应[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 335-344.
Jing Juanli, Sun Jiahui, Zhao Ting, et al. Response of vegetation NPP to multiscale meteorological drought in southwest China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 335-344.
- [31] Craine J M, Ocheltree T W, Nippert J B, et al. Global diversity of drought tolerance and grassland climate-change resilience [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3(1): 63-67.
- [32] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, et al. Global ecosystem thresholds driven by aridity [J]. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.