

2001—2022年宁夏地区干旱与植被耦合关系的时空分析

吴宏玥^{1,2}, 潘海珠¹, 肖峰³, 张晓晶¹

(1. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044; 3. 广东工业大学计算机学院, 广州 510006)

摘要: [目的] 为明确宁夏地区干旱演变特征及生态响应关系。[方法] 采用标准化降水蒸散指数(SPEI)和核归一化植被指数(k NDVI)分别表征干旱状态及植被覆盖状况, 利用Sen趋势分析、Mann-Kendall检验及相关性分析法, 系统研究宁夏地区干旱与植被的时空变化特征及植被对干旱的响应规律。[结果] 2001—2022年, 宁夏SPEI呈微弱上升趋势, 但未达显著性水平; 空间上, 中北部干旱化最明显; 春、秋季干旱加剧(趋势斜率分别为 $-0.0134/a$ 、 $-0.0231/a$), 夏季干旱缓解($0.0334/a$), 但三者均未通过显著性检验。同期 k NDVI显著上升($0.0103/a$, $p < 0.01$), 植被覆盖状况明显改善, 空间上呈南北高、中部低、西部最低格局。短时间干旱指数(SPEI-1、SPEI-3)与 k NDVI相关性显著, 极显著正相关区主要分布在中部干旱带的低 k NDVI区域, 短期干旱事件对植被生长影响更突出。季节性分析表明春、秋季干旱对植被影响较弱(94.55%与97.87%区域不显著); 夏季干旱对植被生长具有显著抑制作用, 71.34%区域呈极显著正相关, 反映该区夏季植被生长高度依赖水分供给, 干旱胁迫抑制效应显著。土地利用变化影响干旱-植被耦合关系, 中部干旱带草地扩张加剧水热失衡, 导致植被对短期干旱更敏感。[结论] 宁夏地区2001—2022年植被覆盖状况显著改善, 但受短时间干旱事件影响明显, 中部干旱带生态脆弱性突出。未来应重点关注夏季干旱对植被的限制作用, 加强水资源管理与生态保护, 以缓解区域植被退化压力并实现生态系统的可持续发展。

关键词: 标准化降水蒸散指数; 核归一化植被指数; 宁夏地区; 干旱; 时空变化

中图分类号: X87; S167

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0466-11

Spatiotemporal Analysis of Coupling Relationship Between Drought and Vegetation in Ningxia from 2001 to 2022

WU Hongyue^{1,2}, PAN Haizhu¹, XIAO Feng³, ZHANG Xiaojing¹

(1. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 3. School of Computer Science and Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006)

Abstract: [Objective] To clarify the characteristics of drought evolution and ecological response relationships in the Ningxia region. [Methods] The standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and kernel normalized difference vegetation index (k NDVI) were employed to represent drought conditions and vegetation cover, respectively. Sen's slope estimation, Mann-Kendall trend test, and correlation analysis were used to systematically investigate the spatiotemporal dynamics of drought and vegetation in Ningxia and to reveal the response patterns of vegetation to drought. [Results] From 2001 to 2022, the SPEI in Ningxia showed a slight increasing trend, but it did not reach statistical significance, with the most pronounced aridification observed in the central and northern regions. Drought intensified in spring and autumn (with trend slopes of $-0.0134/\text{year}$ and $-0.0231/\text{year}$, respectively), while it alleviated in summer ($0.0334/\text{year}$), but none of these trends passed the

收稿日期: 2025-12-16

修回日期: 2026-01-19

录用日期: 2026-01-31

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-13

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900600); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2025BEG01008, 2025BEG01007)

第一作者: 吴宏玥(1998—), 女, 博士研究生, 主要从事陆面过程研究。E-mail: wuhongyuede@163.com

通信作者: 潘海珠(1988—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态环境遥感研究。E-mail: panhaizhu@nxu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

significance test. During the same period, k NDVI increased significantly ($0.010\ 3/\text{year}$, $p < 0.01$), indicating a clear improvement in vegetation cover. Spatially, vegetation coverage was higher in the north and south, lower in the central area, and lowest in the west. Short-term drought scales (SPEI-1, SPEI-3) showed significant correlations with k NDVI, with highly significant positive correlations mainly distributed in low- k NDVI areas within the central arid zone, indicating that short-term drought events had a more pronounced impact on vegetation growth. Seasonal analysis revealed that drought in spring and autumn had weaker effects on vegetation (with 94.55% and 97.87% of the areas showing no significant correlation, respectively), whereas summer drought significantly inhibited vegetation growth, with 71.34% of the areas showing a highly significant positive correlation, reflecting that summer vegetation growth in this region was highly dependent on water supply and was strongly suppressed by drought stress. Furthermore, land use changes influenced the drought-vegetation relationship. The expansion of grassland in the central arid zone exacerbated water-heat imbalance, making vegetation more sensitive to short-term drought. [Conclusion] Although vegetation cover in Ningxia improved significantly from 2001 to 2022, short-term drought events exerted substantial influence, especially in the ecologically fragile central drought belt. Future efforts should focus on mitigating the impacts of summer drought on vegetation by enhancing water resource management and ecological protection to alleviate vegetation degradation and promote sustainable ecosystem development.

Keywords: standardized precipitation evapotranspiration index; kernel normalized difference vegetation index; Ningxia region; drought; spatiotemporal changes

Received: 2025-12-16

Revised: 2026-01-19

Accepted: 2026-01-31

Online(www.cnki.net): 2026-03-13

全球气候变化带来一系列生态系统、农业生产及社会经济问题,据估计仅气象干旱造成的全球经济损失已高达每年68亿美元^[1]。干旱通常被分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱,气候异常造成的气象干旱是引发其他类型干旱的先决条件,是农业干旱的先兆^[2-3]。干旱程度对植被生长、土地退化和森林火灾都有显著影响,决定植被覆盖的类型和结构^[4]。植被作为连接土壤、大气和水资源的天然纽带,极易受到干旱事件的影响,如气温较高、降水不足、土壤含水量过低会导致植被生产力下降^[5]。快速的经济发展和高强度的人类活动导致下垫面发生显著改变,植被空间格局亦受明显影响。受暖干化气候的影响,干旱区已经覆盖中国陆地面积1/2以上,干旱半干旱区植被生长已受到严重影响,甚至发生植被退化^[6-7]。尤其是作为我国气候变化敏感区的宁夏地区,气候特征差异大,生态环境较为脆弱,研究该地区干旱对植被的影响有助于理解宁夏的干旱特征,对区域可持续发展具有重要意义。

干旱指数是衡量干旱事件严重程度的有效方法,能够简化复杂的干旱现象^[8]。国内外已提出许多种干旱指数,常用于干旱监测的指数有标准化降水指数(SPI)、帕默尔干旱指数(PDSI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)。其中,SPEI考虑降水、蒸发的影响,能够从多尺度、多空间进行比较^[9],在描述干旱特征

方面可以更好地反映干旱对植被生长的影响,成为最常用的干旱指数之一。近年来,遥感技术因其覆盖范围广、获取数据成本低及具有时空连续性等一系列优势,已成为监测各类地表动态变化的首选手段。遥感数据估算归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)能够表征区域植被生长状况,已被广泛应用在生态环境研究中^[10]。但NDVI本身的“非线性特征”及叶绿素a吸收使得红光通道很快饱和,导致NDVI在植被生长茂盛的地带出现饱和现象,最终导致植被生长的动态细节无法被精准捕捉^[11]。而使用核归一化植被指数(kernel normalized difference vegetation index, k NDVI)^[12]可以有效避免以上问题,该指数在干旱对植被影响的研究中使用还相对较少。许多学者都使用SPEI结合NDVI开展过干旱对植被生长的影响研究,有研究^[13]表明,中国大部分区域的SPEI与NDVI呈显著正相关,二者相关性在干旱半干旱区更明显;在华北地区SPEI与NDVI相关性较好,大部分地区SPEI呈极显著增长,NDVI呈极显著下降,NDVI与SPEI的相关性随植被覆盖度增加而增加;黄河流域内蒙古段气象干旱呈下降趋势,植被NDVI整体呈显著增长趋势,干旱对植被的影响具有滞后性且大部分地区的植被短期内受水文干旱的影响较大;内蒙古典型植被区NDVI和SPI的波动较小,但二者具有显著相关性,且

有早年份NDVI值减小区域主要集中在无旱时NDVI值较小区域附近^[14];从以上结果可以看出,干旱对植被生长的影响是存在区域性差异的。现有研究多使用NDVI而未考虑其在植被生长茂密地区的饱和现象,采用 k NDVI可有效修正该问题,揭示宁夏地区干旱影响下的植被动态变化特征,对于减少区域植被生长面临的干旱问题、保护生态安全有着非常重要的意义。为准确分析宁夏地区干旱时空变化及对植被的影响,本研究使用干旱指数SPEI作为干旱指数量化宁夏地区的干旱状态, k NDVI量化该地区的植被生长状况,通过时空分析探讨2001—2022年宁夏地区的干旱指数和植被的时空变化特征及植被对干旱的响应,对理解气候变化下植被脆弱性和预测植被转移精度方面具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区(35°14′~39°23′N,104°14′~107°40′E)位于我国生态环境脆弱的西北内陆区,属于干旱半干旱区,气候特点是干旱少雨、日照充足,但蒸散发量大^[15]。宁夏总面积66 400 km²,处于黄河上游地区,西部与北部与内蒙古自治区相连,南部与甘肃省接壤,东部与陕西省相邻,是西北干旱区、青藏高原区及东部季风区的过渡地带(图1)。宁夏地形呈北低南高,北部为引黄灌溉平原,中部为干旱带,南部为六盘山区,周围有乌兰布沙漠,是我国西部地区的重要生态屏障之一。宁夏自北向南包括北部的引黄灌溉区、中部干旱区、南部山区,环境差异明显、生态特征多样,但农业产业分区布局相对较为清晰。北部灌溉区内区县集中,是宁夏现代农业主产区和黄河生态经济带建设区;中南部非灌溉区内区县分散,是宁夏草畜和生态农业区^[16]。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 标准化降水蒸散指数 本研究使用的标准化降水蒸散指数(SPEI)数据来源于高分辨率SPEI数据集HSPEI:2001—2022年中国大陆1 km空间分辨率的数据集^[17],空间分辨率为1 km。SPEI综合考虑降水、温度和蒸散发等气象因素,是对降水量与潜在蒸发量的差值序列累计概率值进行正态分布后的指数,通过纳入蒸发量的影响,表征研究区内的干湿状态,能够从多时空尺度稳定地评价干旱时空特征。本研究分别使用SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12反映每月、每季度、每年的干旱情况,以上的时间尺度已经广泛应用在对干旱的研究中^[18],并且根据《GB/T 20481—2017 气象干旱等级》^[19],对SPEI等级划分为5级(表1)。

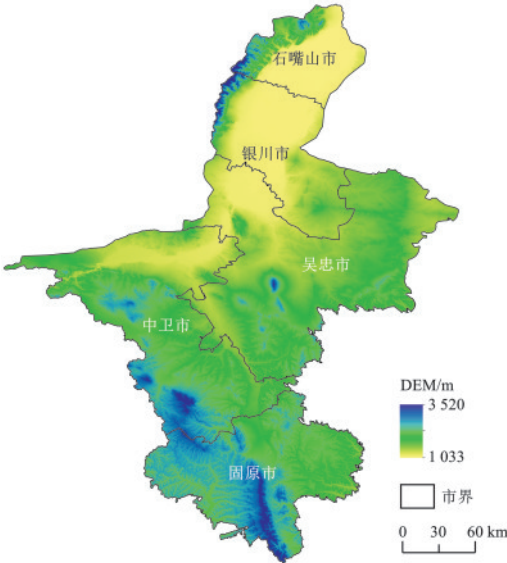


图1 研究区地理位置
Fig.1 Geographic location of study area

表1 干旱等级划分
Table 1 Classification of drought grades

等级	干旱类型	SPEI 值
1	无旱	$-0.5 < \text{SPEI}$
2	轻旱	$-1 < \text{SPEI} \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1$
4	重旱	$-2 < \text{SPEI} \leq -1.5$
5	特旱	$\text{SPEI} \leq -2$

1.2.2 核归一化植被指数及土地利用类型数据 核归一化植被指数(kernel normalized difference vegetation index, k NDVI)数据预处理操作基于Google Earth Engine(GEE)平台,使用MODIS MOD13Q1数据集,经过去云、合成、裁剪、最大值合成(maximum value composite, MVC)等处理后得到2001—2022年重采样至1 km空间分辨率的月尺度和年尺度 k NDVI数据。 k NDVI的具体计算方法见文献^[12]。

$$k\text{NDVI} = \tanh \left[\left(\frac{\text{NIR} - \text{Red}}{2\sigma} \right)^2 \right] \tag{1}$$

式中:NIR、Red分别为近红外波段与红光波段的地表反射率值;tanh为双曲线正切函数; σ 为尺度参数,表示指数对稀疏/茂密植被区域的敏感性,通常取值为0.5(NIR+Red)。公式简化为:

$$k\text{NDVI} = \tanh(\text{NDVI})^2 \tag{2}$$

本研究使用的土地利用类型数据为中国土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD),该数据基于Landsat系列卫星影像(1985—2024年),融合

夜间灯光、POI、道路网等多源辅助数据制作^[20]。CLCD为30 m空间分辨率,采用统一的10类分类体系(包括耕地、森林、草地、灌木等),本研究通过GEE调用该数据对宁夏地区土地利用类型变化进行研究。

1.3 研究方法

1.3.1 Sen斜率估计和Mann-Kendall检验 Sen趋势分析和Mann-Kendall(M-K)检验是广泛应用于气象和水文等领域的趋势分析与非参数检验方法。Sen趋势分析的主要优势在于其对测量误差和离群值的鲁棒性,特别适用于长时间序列数据的趋势分析。而M-K检验作为一种非参数检验方法,不依赖数据的分布特性,且对数据缺失的敏感性较低,因此能够有效提高分析结果的可靠性。本研究结合Sen趋势分析和M-K检验,判断时间序列趋势的显著性^[21]。

1.3.2 相关性分析 为探究干旱与植被动态的相关性,采用Spearman相关分析计算不同时间尺度SPEI(SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12)与 δ NDVI的相关关系,得到二者相关系数并验证其显著性。相关系数取值

为 $[-1, 1]$:当系数接近1时表示完全正相关,接近-1表示完全负相关,0值则表明无线性相关。

2 结果与分析

2.1 宁夏地区干旱时空分布

逐像元计算宁夏地区的多尺度SPEI的平均值,揭示不同时间尺度SPEI月值(SPEI-1、SPEI-3和SPEI-12)2001—2022年动态变化(图2)。结果表明,研究期间SPEI-1和SPEI-3的月值波动较大,正负交替频繁,无明显规律,短时间尺度的干旱事件频发,水分条件不稳定。宁夏地区短时间尺度SPEI(1月和3月)出现负值频率较高,分别为55.3%和52.3%,随着SPEI时间尺度增加,可以看出在年尺度上,负值月份明显减少,仅占15.53%,表明年际尺度上水分条件相对较为稳定。2001—2010年全年SPEI数据负值出现较为频繁,而2010—2020年整体偏向湿润,负值明显减少。2021—2022年出现负值的月份显著增多,尤其在2022年下半年多次出现连续负值,可以看出,宁夏地区在此期间经历更加频繁和持续的干旱。从整体变化来看,该地区经历一个湿润向干旱的转变。

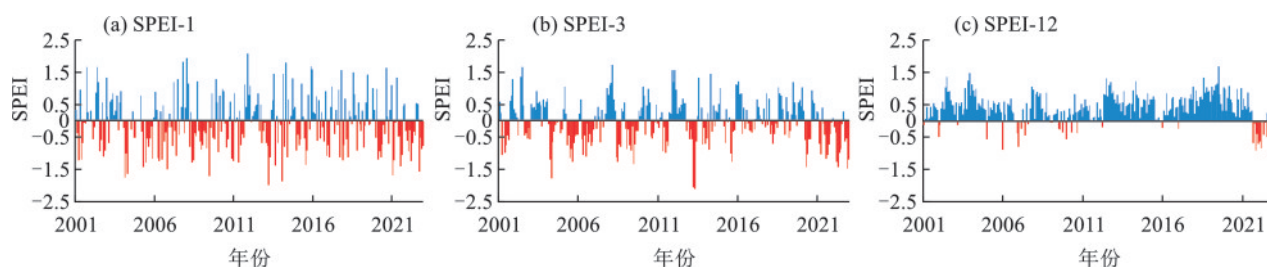


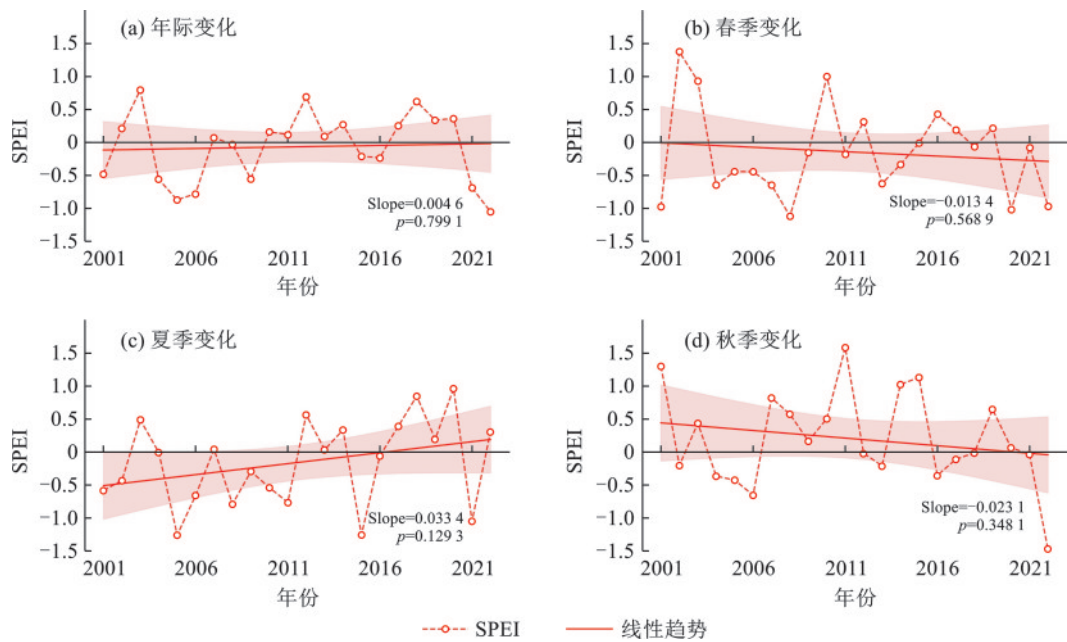
图2 2001—2022年宁夏SPEI月变化

Fig.2 Monthly variations of SPEI in Ningxia (2001–2022)

为进一步探究宁夏地区全年和季节性干旱特征,选取SPEI-12和SPEI-3的5月、8月和11月分别代表年、春季(3—5月)、夏季(6—8月)和秋季(9—11月)的干旱。在2001—2022年,尽管年度SPEI呈现微弱的正向趋势(斜率=0.004 6/a),但其 p 值为0.799 1,表明该趋势在统计上不显著,即2001—2022年宁夏地区年际干旱状况未表现出明显的湿润化趋势(图3a)。进一步分析研究期内的季节变化,春季和秋季均呈现微弱的下降趋势,变化幅度分别为-0.013 4/a和-0.023 1/a。夏季则呈现0.033 4/a的微弱上升趋势,但三者 p 值均 >0.05 ,表明这些变化在统计上不显著,可能反映区域季节性干旱波动而非长期趋势。宁夏地区的夏季干旱缓解对全年干旱状况有积极的作用,但春、秋季干旱加剧则可能对当地水资源管理和农业生产产生影响。

从年及春、夏、秋的季节SPEI趋势及显著性的空间

特征(图4)可以看出,宁夏地区存在较少的显著干旱或者显著湿润地区,大多数的干燥和湿润地区都未能通过显著性检验($p < 0.05$)。具体而言,在年度SPEI趋势中,干旱趋势地区占研究区的69.69%(显著干旱占0.1%),主要分布在宁夏的中、北部。从春季SPEI变化趋势来看,西部及中部偏北地区以干旱趋势为主,占据整个研究区的60.53%(显著干旱占0.19%),东部及南部部分地区则相对来说较为湿润。夏季SPEI整体呈湿润趋势,显著湿润地区主要集中在中北部,占研究区的13.36%,整个区域几乎没有显著干旱区域,只占0.39%。秋季时92.47%的区域呈现干旱状态,湿润地区则只占7.53%,且无显著湿润区域;秋季干旱特征更为显著。从全年SPEI干湿分布状况来看,春季和秋季干旱覆盖范围广,西部与北部干旱尤为突出;夏季则整体呈现湿润趋势,干旱程度有所缓解。



注:阴影部分表示通过 95% 的置信区间。

图3 2001—2022年宁夏SPEI不同时间尺度的年际变化

Fig.3 Interannual variations of SPEI at different time scales in Ningxia (2001–2022)

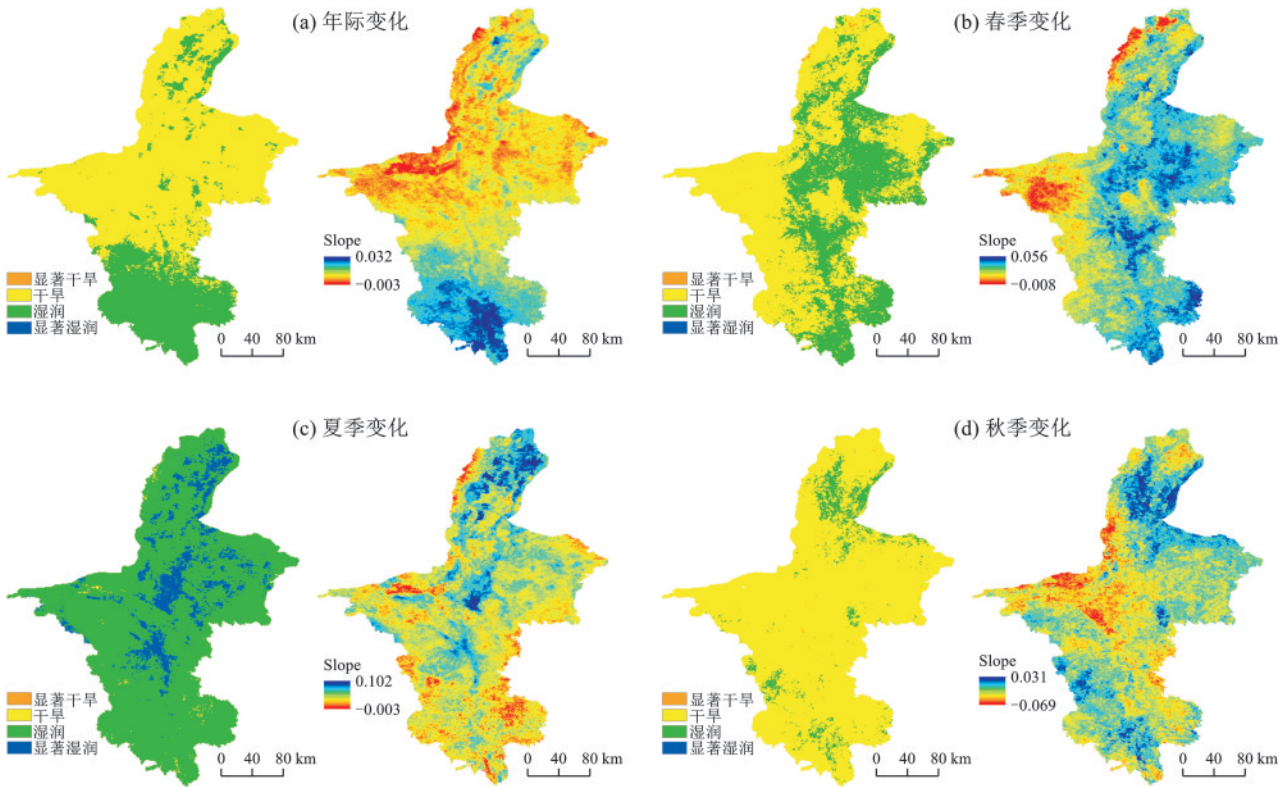


图4 2001—2022年宁夏SPEI的年、春、夏和秋的趋势性及趋势空间特征

Fig.4 Spatial patterns of trends and significance of annual, spring, summer, and autumn SPEI in Ningxia (2001–2022)

2.2 宁夏地区kNDVI时空变化

由图 5 可知,2001—2022 年,宁夏地区逐年 kNDVI 呈现显著上升趋势(斜率=0.010 3, $p<0.01$),表明该区域的植被覆盖状况不断改善。自 2014 年后,年平均 kNDVI 已稳定在 0.6 以上,反映出该地区植被生长状况进入相对稳定且较高的水平。结合图 6,从空间分布来看,宁夏地区的 kNDVI 呈“南北高、中

间低、西部值最低”的梯度分布特征。此分布格局与区域地形特征、气候条件及植被类型密切相关。南部地区地势较高,水系发育完善,气候属于温带半湿润区域,植被类型以森林和草地为主,得益于充足的水热条件和较高的生态系统稳定性,该区域的 kNDVI 显著较高(0.6~1.0)。相比之下,中部地区具有典型的温带半干旱气候特征,植被以农田和灌草为主,生态系统较为

脆弱, $kNDVI$ 较低(0.3~0.6)。北部沿河灌溉区域因水资源得到有效利用, 植被类型多样, 主要包括草地、农田和灌丛, $kNDVI$ 处于中等水平(0.4~0.7)。然而,

毗邻腾格里沙漠的西部地区受土地沙漠化加剧的显著影响, 生态系统退化显著, 植被覆盖率极低, $kNDVI$ 值也最低(0~0.3)。

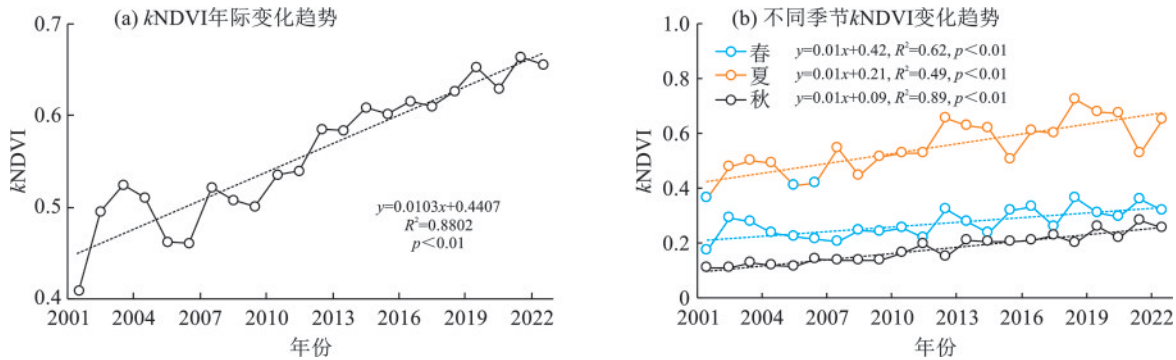


图 5 宁夏 $kNDVI$ 时间变化
Fig.5 Temporal variations of $kNDVI$ in Ningxia

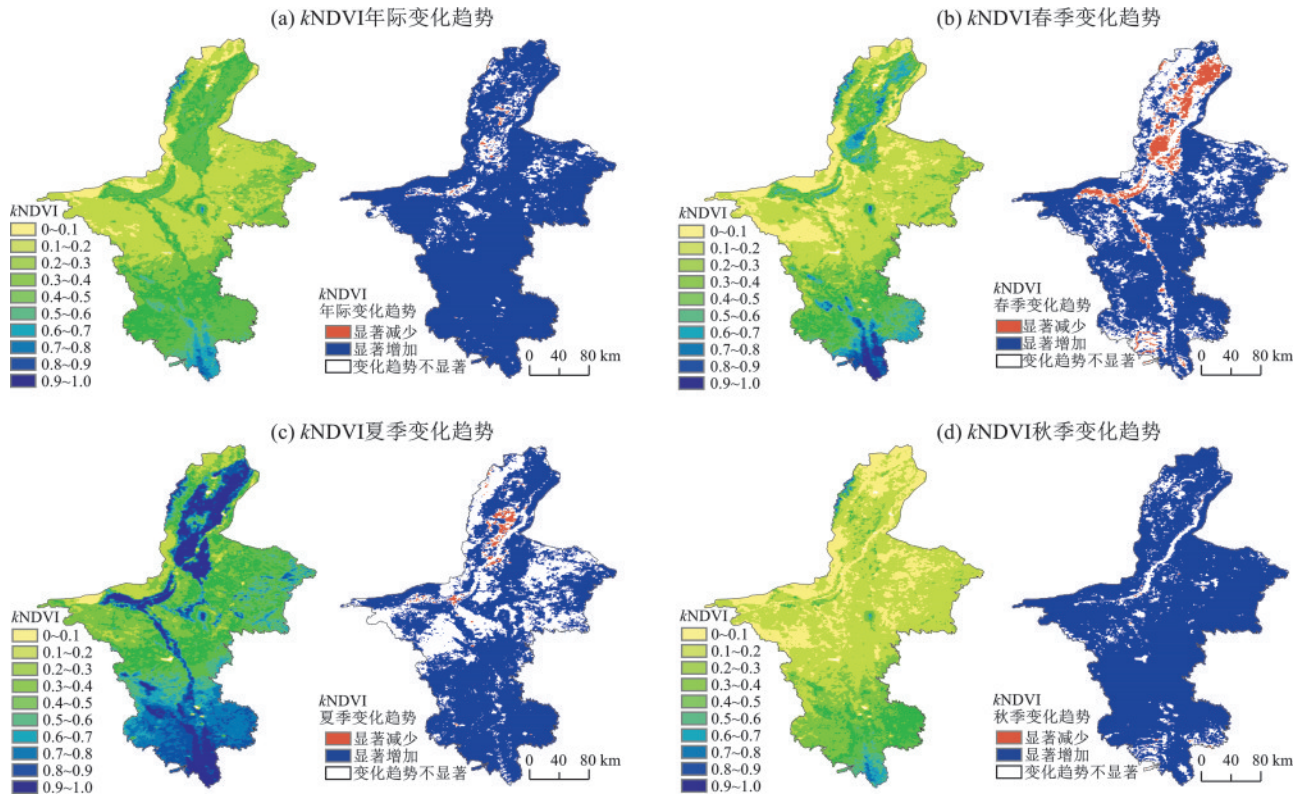


图 6 宁夏 $kNDVI$ 年际及季节空间变化
Fig.6 Spatial patterns of interannual and seasonal variations of $kNDVI$ in Ningxia

从年际空间变化来看, 大部分区域的 $kNDVI$ 均呈显著性增加, 仅北部沿黄灌区的变化不显著。进一步研究季节动态变化表明, 春季的北部沿黄灌区部分区域 $kNDVI$ 主要呈显著减少趋势, 中部大部分区域和南部山区缺乏显著的变化。夏季时, 全区植被覆盖显著增加的范围有所扩大, 尤其是南部山区, 说明夏季为植被生长的关键时期, 但北部部分灌区存在局部显著减少现象。秋季植被显著改善的区域分布较广, 仅西北部荒漠边缘及北部局部灌区存在少量不显著变化区域, 无显著减少区域, 整体变化趋势较为稳定。

季均表现出显著的线性增长趋势, 但季节间的增长速率与相关性存在一定差异。春季的 $kNDVI$ 增长速率最大(斜率=0.01), 且相关性较强($R^2=0.62$), 反映出植被覆盖在生长萌发期的显著改善。夏季 $kNDVI$ 的增长速率与春季相同(斜率=0.01), 但增长的相关性较弱($R^2=0.49$), 表明夏季植被覆盖改善易受区域气候年际变化和水资源分布不均等因素的限制。秋季 $kNDVI$ 的增长速率虽与前两季一致(斜率=0.01), 但其相关性最高($R^2=0.89$), 表明秋季植被覆盖的改善表现出较高的稳定性。

从季节尺度变化分析, $kNDVI$ 在春季、夏季和秋

综上所述, 2001—2022 年, 宁夏地区的植被覆盖

整体呈显著改善趋势,各季节增长速率一致,但稳定性以秋季最佳,春季次之,夏季受气候波动影响最大。空间上,南部山区改善最显著,北部引黄灌区局部区域 $kNDVI$ 呈显著下降趋势,存在植被退化风险,西部荒漠区仍为生态脆弱带。

2.3 SPEI和kNDVI相关性分析

2.3.1 不同时间尺度 SPEI 与 $kNDVI$ 相关性分析 为探究不同时间尺度的气象干旱指数(SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12)与植被指数($kNDVI$)之间的年际相关性,本研究采用相关性分析法在空间上逐像元计算相关系数,并通过显著性检验分析二者的空间关系(图7)。相关性分析结果表明,不同时间尺度的SPEI与 $kNDVI$ 之间存在一定的正相关,但相关程度和显著性在空间分布上表现出显著差异。短时间尺度的SPEI(即SPEI-1和SPEI-3)与 $kNDVI$ 的显著正相关区域占比较高,分别为6.73%和3.80%,而SPEI-12

的显著正相关区域仅占4.45%。极显著正相关区域($p<0.01$)的空间分布趋势与上述结果一致,分别为9.54%(SPEI-1)、4.94%(SPEI-3)和5.15%(SPEI-12)。从空间分布来看,这些显著及极显著正相关区域主要集中在宁夏中部及西部干旱带内的 $kNDVI$ 值普遍偏低的区域,表明植被覆盖度较低的地区对短期水分变化更为敏感。

随着时间尺度的增加(SPEI-1至SPEI-12),相关性呈降低趋势,说明宁夏地区的植被生长对短期干旱事件的响应较为显著,而长期干旱事件对植被的影响相对较弱。进一步分析空间显著性检验的结果可知,大部分研究区域内的相关性均表现为不显著($p>0.05$),表明干旱对植被指标的整体影响较为有限,多数区域植被生长未表现出对水分条件的强依赖。尤其是在北部灌区和南部山区,都有外源性的水分补充缓解干旱的胁迫。

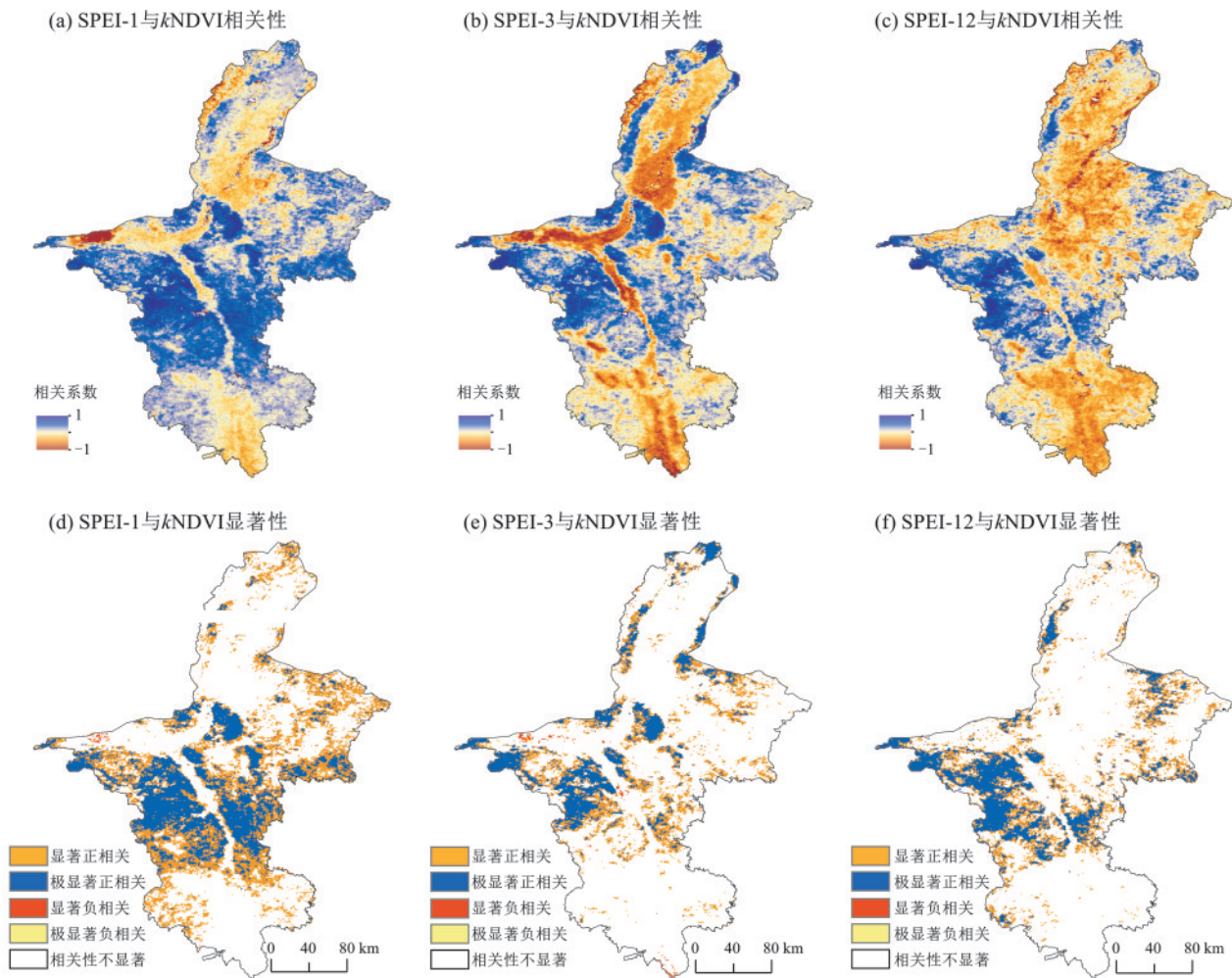


图7 不同时间尺度 SPEI 与 $kNDVI$ 相关性空间分布及显著性分析

Fig.7 Spatial distribution and significance of correlations between SPEI and $kNDVI$ at different time scales

2.3.2 不同季节 SPEI 与 $kNDVI$ 相关性分析 为进一步探究不同季节干旱事件对植被生长的影响,本研究选取春季(5月)、夏季(8月)和秋季(11月)的

SPEI-3 与 $kNDVI$ 进行相关性分析,并对相关性显著性进行检验(图8)。结果表明,不同季节的干旱事件对植被的影响存在显著差异。从季节变化来

看,春季和秋季的 SPEI-3 与 k NDVI 的相关性大部分区域均表现为不显著,分别占研究区的 94.55% 和 97.87%。表明春季和秋季的干旱对植被生长的影响较弱。春季植被处于萌发初期,生理活动强度弱,对水分需求相对较低;秋季植被生长逐渐进入衰退期,水分需求减少。因此,干旱对这 2 个季节植被生长的限制作用较弱。相比之下,夏季的 SPEI-3 与 k NDVI 的相关性显著增强,研究区内 71.34% 的区域表现为极显著正相关,7.87% 的区域表现为显著正相关。表明夏季水分条件越好,植被生长越旺盛;反之,干旱越严重,植被活动受到明显抑制。结

合空间分布来看,正相关区域主要分布在宁夏中部干旱半干旱区,该区域以农田和灌草为主,对水分供给高度敏感,夏季为植被生长的关键期,水分需求显著增加,因此干旱对植被生长的影响更为明显。相比之下,北部沿黄灌区和南部山区的相关性较弱甚至不显著,与植被类型耐旱性较强,干旱对植被的影响相对较小。综上所述,宁夏地区不同季节的干旱对植被的影响存在显著差异。春季和秋季的干旱对植被生长的限制作用较弱,而夏季干旱对植被的影响最为显著,尤其是在中部干旱半干旱区。

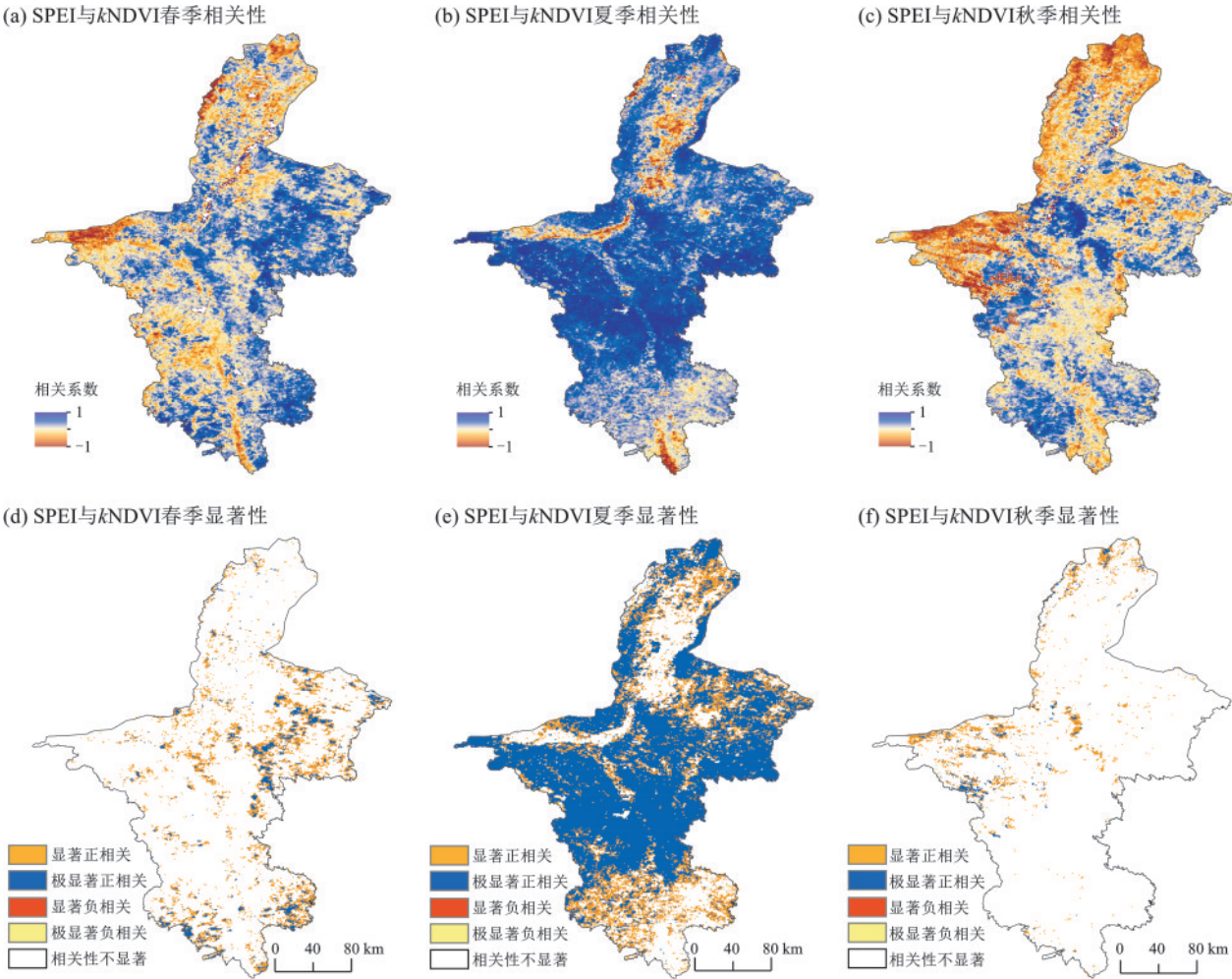


图 8 不同季节尺度 SPEI-3 与 k NDVI 相关性空间分布及显著性分析

Fig.8 Spatial distribution and significance of correlations between SPEI-3 and k NDVI in different seasons

3 讨论

宁夏地处中国西北内陆,属于典型的温带大陆性干旱、半干旱气候区。已有学者^[22]对宁夏的干旱发生进行相关研究,并指出干旱是宁夏地区的主要气象灾害。本研究发现,宁夏地区短时间尺度 SPEI(尤其是 SPEI-1 和 SPEI-3)与 k NDVI 的相关性较高,揭示植被生长对短期干旱的敏感性。这种敏感性与研究区的生态状况、植被因素等有极大的关系。研究表明,

宁夏中部干旱带是干旱影响最严重的区域。该区域分布着大量旱作农田,气候特点为高温少雨、风沙频繁,同时土壤类型偏沙性,保水保肥能力差。这些因素导致农业干旱频发,农作物单产受干旱影响极大^[23]。水热条件也是植被空间分布的重要驱动力之一,不同气候分区植被对气象干旱的抵抗力和恢复力具有差异性。因此,各植被类型对 SPEI 的响应强度和规律也随种类及生态环境而有所不同^[24-25]。

结合宁夏地区 2001—2022 年土地利用类型变化数据分析发现,中部干旱带以农田与草地为主导,其中草地是区域最大植被类型,2022 年较 2001 年净增 2 300 km²(图 9)。相比之下,灌木地面积积极小(< 2 km²),变化微弱,表明该区域生态恢复并非以灌木扩张为主,而是以草地自然恢复或人工草地建设为特征。转移矩阵显示,2001—2022 年,裸地净减少 1 030 km²,其中 1 642 km²转化为草地,93 km²转为不透水面;农田净减少 2 300 km²,其间共有 5 080 km²转为草地、336 km²转为不透水面,同时有部分其他地类转为农田,这种土地利用方式的调整未显著改变区域的主要的植被类型(农田与灌草占主导),但草地的扩张显然影响区域的水热平衡,具体表现为蒸散发增强、地表反照率及粗糙度变化,进而导致潜热输送增加,进一步加剧蒸散耗水^[26]。以农田及灌草为主要植被类型的中部干旱带植被由于根系分布较浅,难以吸收深层土壤水分维持蒸腾需求,因此对短时间尺度的干旱(如 SPEI-1 和 SPEI-3)表现出更高的敏感性^[27]。前人^[28]使用 SPEI 对宁夏中部干旱的定量研究结果表明,该区域是显著的旱灾高风险区,与本研究的结论一致。进一步分析表明,春季和秋季干旱状况呈微弱加剧趋势,而春季和秋季的干旱指数(SPEI)与植被指数(*k*NDVI)的相关性较低。可能与植被生长周期及水分需求较低有关,此阶段受干旱影响的植被生长相对有限。相比之下,夏季的干旱指数与植被指数的相关性显著增强,表明夏季是植被生长的关键时期,对水分需求达到峰值,干旱对植被的限制性影响更为显著。此结果提示未来需将夏季作为重点关注时间窗口,强化中部干旱带灌溉保障与生态用水分配,加强水资源精细化配置,统筹生态用水与农业灌溉,提升区域生态系统对干旱的适应性与恢复力,以缓解干旱对植被生态系统和农业生产的负面作用。

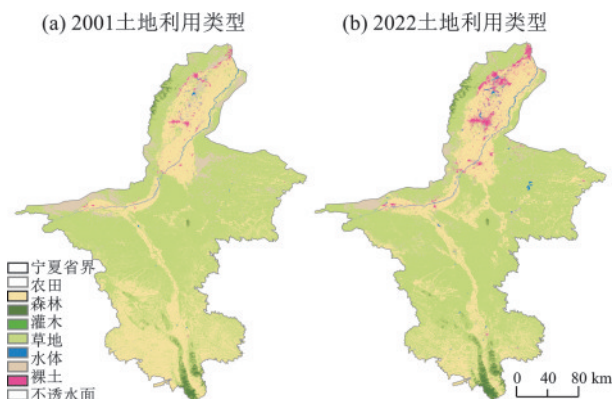


图 9 宁夏地区 2001—2022 年土地利用类型变化
Fig.9 Land use change in Ningxia region (2001—2022)

4 结 论

1)宁夏地区干旱状况呈现显著的季节与空间分异。尽管年度 SPEI 呈现微弱上升趋势(斜率=0.004 6/a),但其 *p* 值(0.799 1)表明该趋势在统计上不显著,即 2001—2022 年年际干旱状况未发生系统性湿润化转变。季节尺度上,春季与秋季 SPEI 呈微弱下降趋势(斜率分别为-0.013 4/a 和-0.023 1/a),夏季则呈微弱上升趋势(0.033 4/a),但三者均未通过显著性检验(*p*>0.05)。空间上,干旱事件主要集中于中部及北部地区,且季节性干旱热点区存在明显迁移,反映出区域水热条件的复杂时空格局。

2)宁夏地区的多年 *k*NDVI 在 2001—2022 年呈显著增长趋势(斜率=0.010 3/a, *p*<0.01),植被覆盖状况持续改善,尤其是 2014 年后年平均 *k*NDVI 已稳定在 0.6 以上。空间上,南部山区因水热条件良好,植被覆盖优越(*k*NDVI 值 0.6~1.0),中部干旱区植被覆盖次之(0.3~0.6),西部沙漠化地区植被覆盖最低(0~0.3)。季节变化分析表明,春季和秋季植被覆盖显著增加,同时表现为高度相关性(*R*²=0.62 与 *R*²=0.89),显示这些季节对植被覆盖改善的稳定作用;夏季是植被生长的关键期,但受气候波动和水资源分布的影响,相关性较弱(*R*²=0.49)。

3)SPEI 与 *k*NDVI 的相关性具有明显的时间尺度与季节依赖性。短时间尺度的 SPEI-1 和 SPEI-3 与 *k*NDVI 极显著正相关区域分别占研究区的 9.54% 和 4.94%,主要集中在中部干旱带的低 *k*NDVI 区域,表明短期水分波动对植被生长影响更为直接。随着时间尺度增加至 SPEI-12,干旱与植被的相关性下降,表明长期干旱影响较为缓慢且有限。季节分析显示,夏季干旱对植被的限制性影响更为强,其中极显著正相关区域集中分布在中部地区,反映该区域植被对夏季水分供给高度敏感,当水分充足时则植被生长旺盛,干旱则显著受抑制。

本研究揭示宁夏地区干旱事件与植被覆盖动态变化的复杂关系,提出干旱事件对植被的季节性响应显著,尤其是宁夏中部干旱带对短期干旱事件反应更为敏感。未来应加强对夏季干旱影响的重点监测,优化水资源使用策略,同时针对中部干旱带采取针对性生态环境保护措施以缓解植被退化压力。

参考文献:

- [1] 高宇,张丽媛,杨文通.华北地区干旱时空变化及其对植被 NDVI 的影响[J].中国农业气象,2024,45(4):374-389.
GAO Y, ZHANG L Y, YANG W T. Study on temporal and spatial variation of drought in north China and its influence on vegetation[J]. Chinese Journal of Agrome-

- teorology, 2024, 45(4):374-389.
- [2] 薛华柱,李阳阳,董国涛.基于SPEI指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J].中国农业气象,2022,43(11):923-934.
- XUE H Z, LI Y Y, DONG G T. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought in the Hexi corridor based on SPEI index[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(11):923-934.
- [3] DIKSHIT A, PRADHAN B, HUETE A. An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network[J].Journal of Environmental Management, 2021, 283:e111979.
- [4] WANG F, WANG Z M, YANG H B, et al. Copula-based drought analysis using standardized precipitation evapotranspiration index: A case study in the Yellow River basin, China[J].Water, 2019, 11(6):e1298.
- [5] 马梓策,孙鹏,姚蕊,等.内蒙古地区干旱时空变化特征及其对植被的影响[J].水土保持学报,2022,36(6):231-240.
- MA Z C, SUN P, YAO R, et al. Temporal and spatial variation of drought and its impact on vegetation in Inner Mongolia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6):231-240.
- [6] 吕振涛,李生字,彭中敏,等.蒙古国植被对于干旱响应的敏感性研究[J].地理研究,2021,40(11):3016-3028.
- LÜ 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.
- [7] GENG Q L, WU P T, ZHANG Q F, et al. Dry/wet climate zoning and delimitation of arid areas of northwest China based on a data-driven fashion[J].Journal of Arid Land, 2014, 6(3):287-299.
- [8] 游漫,贺中华,张浪,等.贵州省农业与气象干旱特征及其响应关系[J].水土保持学报,2022,36(5):255-264.
- YOU M, HE Z H, ZHANG L, et al. Characteristics of agricultural and meteorological drought in Guizhou Province and their response relationship[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):255-264.
- [9] 刘洋洋,任涵玉,呼天明,等.中国草地NDVI时空动态对多尺度干旱的响应[J].水土保持研究,2022,29(1):153-161.
- LIU Y Y, REN H Y, HU T M, et al. Spatiotemporal dynamics of NDVI of grassland and its response to multi-scale drought in China [J].Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1):153-161.
- [10] 易文莹,王海洋,董明明,等.山东省不同水土保持区划NDVI变化及影响因素[J].环境科学,2024,45(9):5329-5340.
- YI W Y, WANG H Y, DONG M M, et al. NDVI changes and influencing factors of different soil and water conservation zones in Shandong Province [J]. Environmental Science, 2024, 45(9):5329-5340.
- [11] 王正兴,刘闯, HUETE Alfredo. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI到MODIS-EVI[J].生态学报,2003,23(5):979-987.
- WANG Z X, LIU C, ALFREDO H. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research[J].Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5):979-987.
- [12] CAMPS-VALLS G, CAMPOS-TABERNER M, MORENO-MARTÍNEZ Á, et al. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere [J].Science Advances, 2021, 7(9):eabc7447.
- [13] 鲁佳琪,孟凡浩,罗敏,等.黄河流域内蒙古段气象干旱与水文干旱变化对植被NDVI的影响[J].人民珠江, 2024, 45(10):51-64.
- LU J Q, MENG F H, LUO M, et al. Effect of meteorological and hydrological drought changes on vegetation NDVI in Inner Mongolia section of Yellow River basin [J].Pearl River, 2024, 45(10):51-64.
- [14] 王雨晴,王荣林,布仁吉日嘎拉,等.内蒙古典型植被区NDVI演化对于干旱事件的响应研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(3):44-52.
- WANG Y Q, WANG C L, BURENJARGAL T, et al. Response of NDVI evolution to drought events in typical vegetation areas of Inner Mongolia [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2023, 44(3):44-52.
- [15] 罗霄,杜灵通,乔成龙,等.宁夏沿黄绿洲参考作物蒸散演变特征及其归因[J].生态学报,2024,44(11):4782-4794.
- LUO X, DU L T, QIAO C L, et al. Change characteristics of reference crop evapotranspiration of the Yellow River oasis in Ningxia autonomous region and its driving analysis [J].Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11):4782-4794.
- [16] 杜灵通,田庆久.宁夏植被覆盖动态变化及与气候因子的关系[J].中国沙漠,2012,32(5):1479-1485.
- DU L T, TIAN Q J. Vegetation coverage variations in Ningxia during 1999—2009 and its relationships with climatic factors [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5):1479-1485.
- [17] XIA H M, SHA Y T, ZHAO X Y, et al. HSPEI: A 1-km spatial resolution SPEI dataset across the Chinese mainland from 2001 to 2022[J].Geoscience Data Journal, 2024, 11:479-494.
- [18] 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:e108666.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会.气象干旱等级:GB/T 20481—2017 [S].北京:中国标准出版社,2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic

- of China. Standardization Administration of China. GB/T 20481—2017 Grades of meteorological drought [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [20] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [21] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global and Planetary Change, 2013, 100: 172-182.
- [22] 刘喆, 孙权, 鲁海涛, 等. 宁夏干旱的时空特征与大气环流响应关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 225-231.
- LIU Z, SUN Q, LU H T, et al. Temporal and spatial characteristics of droughts and their responses to atmospheric circulation in Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 225-231.
- [23] 郑方, 马力文. 宁夏农业干旱风险评估与区划[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(6): 152-155.
- ZHENG F, MA L W. Risk assessment and regionalization of agricultural drought in Ningxia[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, 11(6): 152-155.
- [24] ZHANG Q, KONG D D, SINGH V P, et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China spatiotemporal patterns, causes and implications [J]. Global and Planetary Change, 2017, 152: 1-11.
- [25] ENGELBRECHT B M J, COMITA L S, CONDIT R, et al. Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests[J]. Nature, 2007, 447(7140): 80-82.
- [26] 吴宏玥, 杜灵通, 乔成龙, 等. 基于蒸散演变驱动的宁夏绿洲平原生态系统耗水变化[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 172-180.
- WU H Y, DU L T, QIAO C L, et al. Water consumption of ecosystem driven by evapotranspiration evolution in Ningxia oasis plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 172-180.
- [27] 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.
- 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.
- [28] 王峰, 陈茜茜, 吕娟, 等. 宁夏回族自治区干旱灾害风险评估与区划研究[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(11): 38-45.
- WANG F, CHEN X X, LU J, et al. Drought disaster risk assessment and zoning in Ningxia Hui Autonomous Region[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(11): 38-45.
- 上接第401页
- [29] 刘志强, 张晓茹, 焦钊栩, 等. 连续性与间歇性降雨下土壤结皮与入渗的关系模拟[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 64-72.
- LIU Z Q, ZHANG X R, JIAO F X, et al. The relationship between soil crust and infiltration under simulation continuous and intermittent precipitation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 64-72.
- [30] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 等. 黑河下游怪柳根系水力提升对林分蒸散的贡献[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6029-6037.
- YU T F, FENG Q, SI J H, et al. The contribution of hydraulic lift to evapotranspiration by *Tamarix ramosissima* Ledeb. in the lower Heihe River, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6029-6037.
- [31] SCHYMANSKI S J, SIVAPALAN M, RODERICK M L, et al. An optimality-based model of the coupled soil moisture and root dynamics[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2008, 12(3): 913-932.
- [32] XUE L, ZHOU Y M, WANG H Y, et al. Impact of root diameter, length, and moisture content on the mechanical properties of root systems and the associated implications for ecological slope protection [J]. Catena, 2026, 262: e109634.
- [33] 顾中华, 倪钧钧. 基于CFD-DEM的不同根系形态加固边坡抗冲刷机理研究[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 2025, <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20250501001>
- GU Z H, NI J J. Study on anti-scour mechanism of slope strengthened with different root forms based on CFD-DEM [J/OL]. China Industrial Economics, 2025, <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20250501001>
- [34] 钟彩尹, 崔鹏, 朱帅润, 等. 植物根系吸水对非饱和土边坡稳定性影响的分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 99-105.
- ZHONG C Y, CUI P, ZHU S R, et al. Analysis of the influence of root water absorption on the stability of unsaturated soils slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 99-105.
- [35] MUNIRWAN R P, MILASAFARAH S, SUNGKAR M, et al. Effectiveness of elephant grass roots in improving soil shear strength for slope reinforcement[J]. Results in Engineering, 2025, 27: e106369.
- [36] ZHU Y N, LOU Y B, WANG W L, et al. Effects of three plant root systems on rill erosion characteristics on coal dump slopes under simulated experiments[J]. International Journal of Sediment Research, 2025, 40(5): 718-728.