

蔺小虎,张鹏,罗凌燕,等. 干旱胁迫下鄂尔多斯矿区植被响应的遥感监测研究[J]. 西安科技大学学报, 2026, 46(2): 409-419.

LIN Xiaohu, ZHANG Peng, LUO Lingyan, et al. Remote sensing monitoring of vegetation response to drought stress in Ordos mining area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 409-419.

干旱胁迫下鄂尔多斯矿区植被响应的遥感监测研究

蔺小虎¹, 张鹏¹, 罗凌燕², 马雄伟¹, 徐梦雨¹, 郭继尧¹, 姜之跃¹

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054;

2. 深圳市勘察测绘院(集团)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:生态干旱对鄂尔多斯矿区可持续发展带来了严峻挑战。传统生态干旱监测指数在非线性和饱和效应处理方面存在一定局限性,难以准确反映矿区复杂生态条件下的生态干旱状况。为此,应用核归一化植被指数(kernel Normalized Difference Vegetation Index, kNDVI)构建了一种基于核温度植被干旱指数(kernel Temperature Vegetation Dryness Index, kTVDI)的鄂尔多斯矿区干旱监测模型;基于2001—2020年MODIS遥感数据,采用Pearson相关性分析、Theil-Sen-Median趋势分析、Mann-Kendall检验等方法,系统评估了鄂尔多斯矿区生态干旱的时空演变特征。结果表明:kTVDI相较于TVDI具有更强的降水量和土壤湿度相关性;时间上,kTVDI在2002年达到峰值后,干旱程度便开始逐渐缓解;而在月际变化方面,kTVDI在5月和10月会出现峰值,其中5月的kTVDI达到最大值,整体变化趋势为先下降后上升;空间上,矿区干旱呈现出整体偏旱、局部适宜的格局,干旱程度呈现出自北向南逐步加剧、由东向西持续加重的空间变化态势。相较于传统TVDI,kTVDI在抑制指数饱和效应和减小系统偏差方面具有明显优势,有助于提升鄂尔多斯矿区生态干旱监测的准确性与稳定性,为矿区生态环境管理与可持续发展提供科学支撑。

关键词:核温度植被干旱指数;生态干旱;鄂尔多斯矿区;时空演变;相关性分析;趋势分析

中图分类号:P 426.616

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0409-11

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdx.2026.0216

Remote sensing monitoring of vegetation response to drought stress in Ordos mining area

LIN Xiaohu¹, ZHANG Peng¹, LUO Lingyan², MA Xiongwei¹,
XU Mengyu¹, GUO Jiyao¹, JIANG Zhiyue¹

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shenzhen Survey and Mapping Institute (Group) Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Ecological drought poses a severe challenge to the sustainable development of the Ordos mining area. Traditional ecological drought monitoring indices have certain limitations in handling nonlinear

收稿日期:2025-10-25

基金项目:国家自然科学基金项目(42201484);陕西省重点研发计划项目(2024GX-YBXM-294);陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2025JC-QYXQ-014)

第一作者:蔺小虎,男,陕西延安人,博士,副教授,E-mail:xhlin214@xust.edu.cn

通信作者:罗凌燕,女,湖南衡阳人,高级工程师,E-mail:371870371@qq.com

responses and saturation effects, making it difficult to accurately reflect the state of ecological drought under the complex ecological conditions of the mining area. To address this, a drought monitoring model for the Ordos mining area was developed based on the kernel temperature vegetation dryness index (kTVDI) using the kernel normalized difference vegetation index (kNDVI). Based on MODIS remote sensing data from 2001 to 2020, methods such as Pearson correlation analysis, Theil-Sen median trend analysis, and the Mann-Kendall test were used to systematically assess the spatiotemporal evolution characteristics of ecological drought in the Ordos mining area. The results show that: kTVDI has a stronger correlation with precipitation and soil moisture compared with TVDI; temporally, after reaching the peak in 2002, the drought level began to alleviate gradually; in terms of monthly variation, kTVDI peaked in May and October, with the maximum occurring in May, showing an overall trend of decreasing first and then increasing. Spatially, the mining area shows an overall pattern of aridity with localized suitability, with drought severity gradually increasing from north to south and continuously intensifying from east to west. Compared with traditional TVDI, kTVDI has clear advantages in suppressing index saturation effects and reducing system bias, which helps improve the accuracy and stability of ecological drought monitoring in the Ordos mining area, providing scientific support for ecological environment management and sustainable development of the mining area.

Key words: kernel temperature vegetation drought index; ecological drought; Ordos mining area; spatio-temporal evolution; correlation analysis; trend analysis

0 引言

干旱灾害以其高发性、持续性和广域性,成为全球影响最为深远的自然灾害^[1]。随着全球气候不断变暖,干旱事件的发生频率愈发增高^[2],强度持续加大,影响范围也在不断扩展^[3],对生态脆弱的干旱半干旱地区构成严峻挑战^[4],导致水资源短缺、生物多样性下降等生态问题^[5]。而矿区长期不间断的煤炭开采作业,如同对区域生态系统的“深度重塑”,其带来的地表结构系统性破坏,直接触发了土壤水分的持续性流失,最终形成“开采扰动-结构破坏-水分耗散-生态干旱”的连锁反应。生态干旱是指因水资源供给出现间歇性短缺,致使生态系统损害其服务功能,并在自然生态与人类社会系统中产生连锁反馈效应的生态水文现象。因此,聚焦矿区生态干旱研究,对揭示自然、人为双重胁迫下的生态干旱传播机制、防范矿业灾害风险及修复受损生态系统具有特殊意义。

在生态干旱监测领域,植被指数作为生态干旱响应的重要指标,广泛用于生态干旱的评估^[5]。基于归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[6]与地表温度(Land Surface Temperature, LST)构建的温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)^[7-9],能够

有效表征土壤表层水分状况,在干旱监测中具有良好的应用潜力^[10]。例如,李晓鹏等利用 TVDI 定量分析了新疆地区的生态干旱特征^[11];王嘉杰等利用多种植被指数构建的 TVDI 分析了京津冀地区的生态干旱特征^[12]。然而,TVDI 在实际应用中存在一些局限性,如 LST 缺乏高程校正;NDVI 抗饱和性和抗偏差性能力较弱^[13]。针对这些问题,学者们尝试通过优化植被指数的方法对 TVDI 模型进行改进。CAMPS-VALLS 等基于机器学习与核方法理论提出的 kNDVI^[14],在多场景、生物群落及气候带中表现优于 NDVI 和植被近红外反射率(The Near-infrared Reflectance of Vegetation, NIRv),具备更强的抗饱和性、抗偏差性,且计算简便、理论基础扎实,在自然与农业系统研究中极具价值。但在当前相关研究中,利用该指数对矿区 TVDI 进行优化的探索较为匮乏,且传统生态干旱监测指数在抗偏差性及缓解饱和效应方面存在一定局限。例如,邵天意等利用传统 TVDI 对神东矿区进行旱情时空动态变化监测^[15];徐霞等基于 TVDI 对布尔台矿区的土壤湿度进行研究^[16]。但是他们都没有解决矿区 TVDI 抗饱和性、抗偏差性能力弱的问题。鉴于此,以鄂尔多斯矿区为研究对象,引入 kNDVI 对 TVDI 进行改进,构建 kTVDI^[17],系统评估其应用于矿区的抗饱和性和抗偏

差性的效能,旨在为矿区生态干旱遥感监测提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯矿区,矿区地理坐标为北纬 $38^{\circ}56'$ 至 $39^{\circ}49'$ 、东经 $108^{\circ}58'$ 至 $110^{\circ}25'$ ^[18]。研究区属于温带大陆性气候,降水空间分异明显,年降水量介于 $340 \sim 420 \text{ mm}$,自东南向西北递减,年蒸发量高达 $2\ 163 \text{ mm}$,约为降水量的 5 倍,干旱态势显著。在生态干旱的持续影响下,矿区面临一系列严峻的生态环境问题。土壤

水分严重匮乏,导致土壤结构稳定性下降、风沙活动加剧,沙化面积增大。干旱还抑制了土壤微生物活性,加速有机质分解,造成土壤有机碳含量降低。水文过程也受到严重干扰,地表径流减少,部分季节性河流断流频发,地下水位持续下降,生态用水与生产生活用水矛盾突出。此外,该区域不仅是国家重要的能源保障基地,也位于黄河流域生态保护关键带,其生态系统兼具高度脆弱性与重大功能价值^[19]。研究成果不仅可为矿区生态恢复与水资源管理提供科学依据,也对黄河流域生态安全与能源基地可持续发展具有重要实践意义。研究区地理位置如图 1 所示。

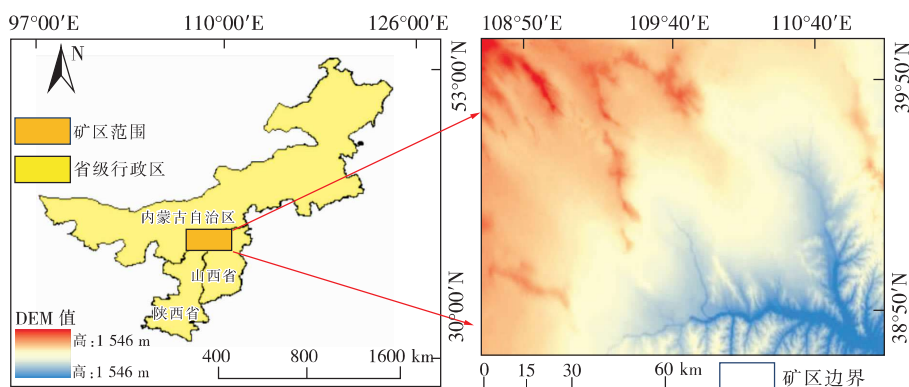


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview map of the research area

1.2 数据来源及预处理

采用中分辨率成像光谱仪数据 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS), 具体包括每天的地表反射率数据 (MODIS Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m, MOD09GA), 8 天的地表温度数据 (MODIS Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day L3 Global 1 km, MOD11A2) 和月合成的植被指数数据 (MODIS Vegetation Indices Monthly L3 Global 1 km, MOD13A3)。其中, MOD09GA 数据通过谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 平台进行获取并处理生成 kNDVI 数据; MOD11A2 和 MOD13A3 数据来源于美国国家航空航天局的陆地过程分布式主动存档中心 (Land Processes Distributed Active Archive Center, LAADS DAAC)。此外, 逐月降水量数据来源于欧洲中期天气预报中心哥白尼气候数据存储库发布的第 5 代欧洲中期天气预报中心大气再分析单层月平均再分析数据集。土壤湿度数据来源于美国国家海洋和大气管理局。观测时间跨度为

2001—2020 年每年的 5~10 月。

选取 2001—2020 年 5~10 月 NDVI 和 LST 数据作为数据源, 5~10 月是北半球大多数地区的植被活跃生长期, 此时植被光合作用强, NDVI 值显著高于其他月份, 能更准确反映植被的覆盖度和健康状况^[20]。利用 MODIS 数据重投影工具 (MODIS Reprojection Tool, MRT), 对 MODIS 产品数据开展批量提取、重投影、格式转换及掩膜裁剪等预处理操作。针对裁剪后的 NDVI 数据, 通过去除异常值, 将其值域校正至 $-1 \sim 1$ 的标准范围; kNDVI 数据则是通过波段运算方法将 NDVI 数据代入核函数公式, 利用 GEE 的指数函数实现指数运算, 生成 kNDVI 数据; 对 LST 数据进行温度单位转换, 将其从原始单位转换为摄氏温度。运用最大值合成法, 将 8 天合成 LST 数据进一步处理, 生成月尺度的 LST 数据, 为后续分析提供基础数据支撑。

1.3 研究方法

1.3.1 kTVDI 原理与实现

NDVI 计算公式为

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中 NIR 为近红外波段的反射值;R 为红光波段的反射值。

kNDVI 计算公式为

$$kNDVI = \tanh\left[\left(\frac{NIR - R}{2\sigma}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中 tanh 为双曲正切函数; σ 为特定区域的长度尺度参数^[21],取值 $0.5(NIR + R)$ 。

$$kNDVI = \tanh(NDVI^2) \quad (3)$$

TVDI 计算公式为

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s\min}}{T_{s\max} - T_{s\min}} \quad (4)$$

$$T_{s\max} = a_1 + b_1NDVI \quad (5)$$

$$T_{s\min} = a_2 + b_2NDVI \quad (6)$$

kTVDI 的计算公式为

$$kTVDI = \frac{T_s - T_{s\min}}{T_{s\max} - T_{s\min}} \quad (7)$$

$$T_{s\max} = a_1 + b_1kNDVI \quad (8)$$

$$T_{s\min} = a_2 + b_2kNDVI \quad (9)$$

式中 T_s 为地表温度,℃; $T_{s\min}$ 为地表温度最小值,℃; $T_{s\max}$ 是地表温度最大值,℃; a_1, a_2, b_1, b_2 为拟合方程系数^[22]。

依据相关研究^[15-16],将基于 kTVDI 的生态干

旱程度划分为 5 个等级(表 1)。

1.3.2 皮尔逊相关性分析

为揭示 TVDI 与 kTVDI 对降水量和土壤湿度响应的差异性,采用空间随机采样方法获取 2 种干旱指数的像元值,并基于皮尔逊相关分析法探究其与同期降水量和土壤湿度的关系。如图 2 和图 3 所示,2 种干旱指数均表现出与降水量和土壤湿度显著负相关关系。以 2020 年为例,5 月 kTVDI、TVDI 与降水量的相关系数 r 为 -0.75 、 -0.71 ,与土壤湿度的相关系数 r 为 -0.71 、 -0.67 ;至 8 月,与降水量的相关系数 r 提升至 -0.78 、 -0.73 ,与土壤湿度的相关系数 r 提升至 -0.84 、 -0.79 。结果表明,kTVDI 与降水量和土壤湿度的相关性显著高于传统 TVDI。这一发现验证了基于 kNDVI 优化的 kTVDI 在干湿边建模方面具有更高的精度。

表 1 生态干旱等级

Table 1 Ecological drought level

干旱等级	kTVDI
湿润	$0.0 < kTVDI \leq 0.2$
适宜	$0.2 < kTVDI \leq 0.4$
轻旱	$0.4 < kTVDI \leq 0.6$
中旱	$0.6 < kTVDI \leq 0.8$
重旱	$0.8 < kTVDI \leq 1.0$

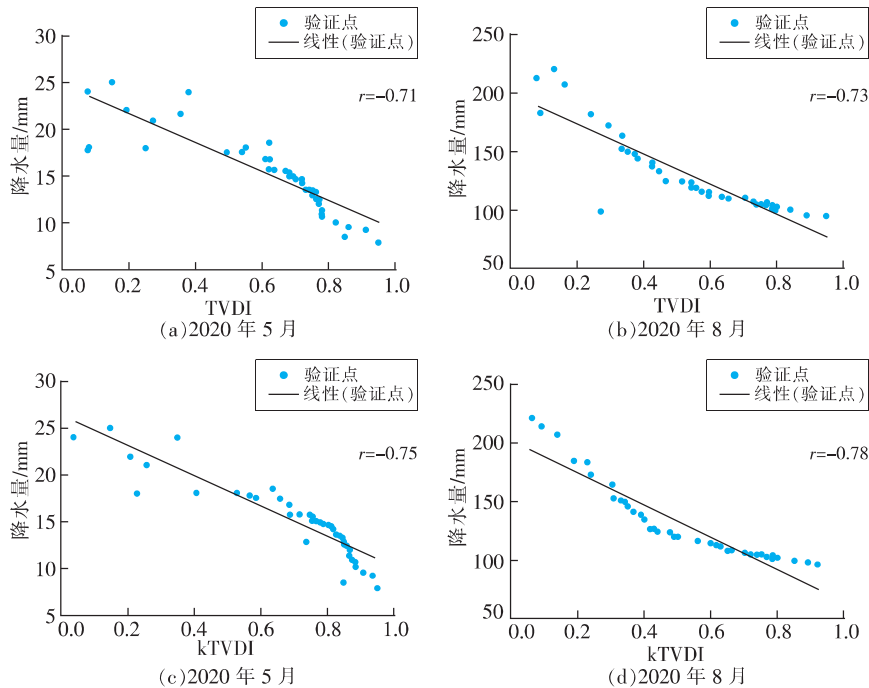


图 2 植被指数与降水量的相关性

Fig. 2 Correlation between vegetation index and precipitation

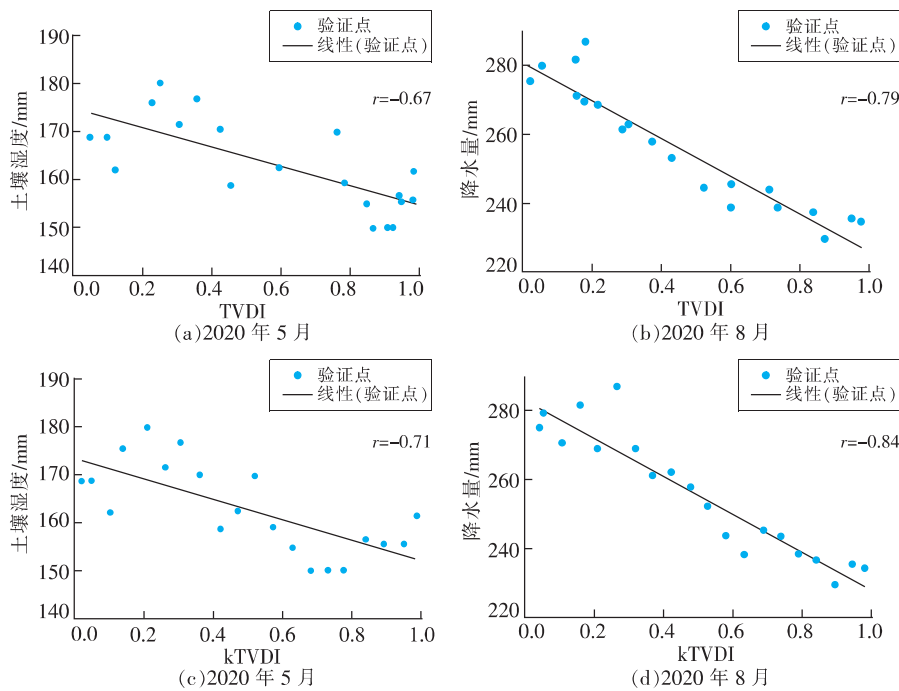


图 3 植被指数与土壤湿度的相关性

Fig. 3 Correlation between vegetation index and soil moisture

1.3.3 kNDVI-Ts 与 NDVI-Ts 特征空间对比

为探究 kNDVI 与 NDVI 在鄂尔多斯矿区干湿边拟合中的应用效能差异,表 2 展示了 2 种植被指数在植被生长季的拟合干湿边方程及其相关系数。图 4 绘制了 2 种植被指数特征空间拟合关系。研究数据显示,2020 年 7~9 月期间,基于 kNDVI 的干边拟合决定系数 R^2 分别为 0.85、0.89 和 0.89,湿边拟合系数 R^2 分别为 0.19、0.34 和 0.42。TVDI 干湿边拟合结果相比,kTVDI 在各月的拟合 R^2 值均大于 TVDI 的拟合 R^2 值。此外,kNDVI 干边拟合的相关系数始终保持在 0.85 以上,表明其具有较高的线性相关性。这一结果表明,基于 kNDVI 的 kTVDI 模型在干湿边方程拟合

方面具有更好的适用性,较基于 NDVI 的 TVDI 模型表现更优。

1.3.4 Theil-SenMedian + Mann-Kendall 检验

Theil-SenMedian 方法属于非参数统计趋势计算方法,常被应用于长时间序列数据的趋势分析^[23]。其计算公式如下

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (10)$$

式中 Median 为中值; x_j 和 x_i 为时间序列数据; β 为趋势值, $\beta > 0$,表示时间序列呈上升趋势,反之表示时间序列呈下降趋势^[24]。根据 β 值将研究区分为 3 个区域: $\beta < 0$ 表示变湿润区域; $\beta = 0$ 表示保持稳定区域; $\beta > 0$ 表示变干旱区域^[25]。

表 2 植被指数拟合方程

Table 2 Fitting equation of vegetation index

月份/月	特征空间	拟合干边方程	R^2	拟合湿边方程	R^2
7	NDVI-Ts	$y = -25.46x + 57.15$	0.84	$y = 0.72x + 32.32$	0.13
	kNDVI-Ts	$y = -33.20x + 56.48$	0.85	$y = 5.49x + 30.29$	0.19
8	NDVI-Ts	$y = -31.67x + 55.04$	0.84	$y = 7.41x + 28.71$	0.32
	kNDVI-Ts	$y = -26.84x + 57.44$	0.89	$y = 5.57x + 34.83$	0.34
9	NDVI-Ts	$y = -19.03x + 39.72$	0.83	$y = 4.26x + 26.09$	0.09
	kNDVI-Ts	$y = -15.13x + 41.07$	0.89	$y = 6.61x + 23.59$	0.42

Mann-Kendall 检验不要求数据遵从正态分布或其他理论分布模型,对数据中的异常值具有

较强的稳健性,受极端值的干扰程度较小,有效保障了分析结论的可靠性^[26]。文中将干旱趋势分为

显著变化 ($|Z| \geq 1.96$) 和非显著变化 ($|Z| \leq 1.96$), 将 Z 与 β 结合, 对干旱变化趋势分为 5 个

等级^[27]: 显著上升、轻微上升、稳定不变、轻微下降、显著下降, 见表 3。

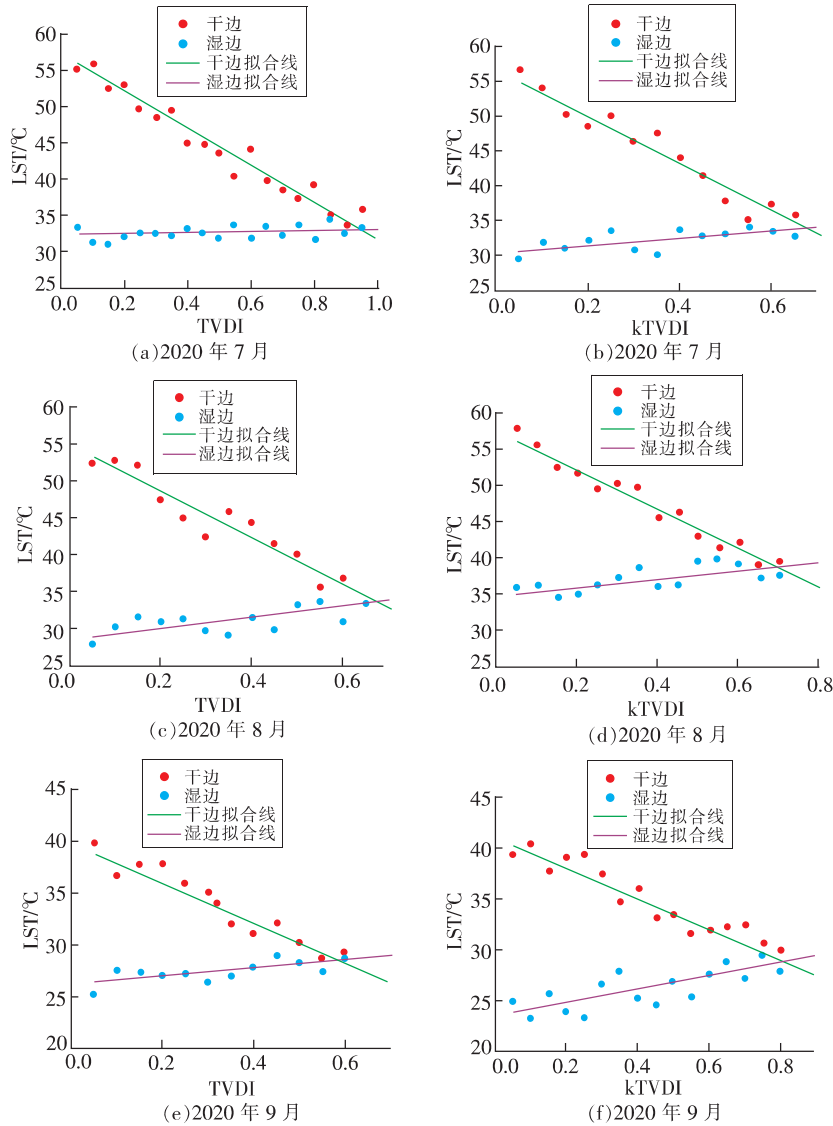


图4 植被指数特征空间拟合关系

Fig. 4 Vegetation index feature space fitting relationship

表3 Theil-SenMedian + Mann-Kendall 趋势变化等级
Table 3 Theil-SenMedian + Mann-Kendall trend variation grade

β	Z	趋势特征
$\beta > 0$	$Z \geq 1.96$	显著上升
	$Z < 1.96$	轻微上升
$\beta = 0$	$Z = 0.00$	稳定不变
$\beta < 0$	$Z > -1.96$	轻微下降
	$Z \leq -1.96$	显著下降

2 结果与分析

2.1 鄂尔多斯矿区生态干旱空间分布特征

依据 kTVDI 的干旱等级划分标准, 图 5 通过

计算 2001—2020 年间 kTVDI 的均值, 对不同等级 kTVDI 的统计分析显示, 矿区的干旱分布具有显著特征, 呈现出整体干旱、局部适宜的空间格局, 南部与西部地区的干旱程度尤为突出, 而矿区内的其他区域干旱状况则相对缓和。具体而言, 轻旱区域占比 51.8%, 主要分布在矿区东部、中北部及中西部; 中旱区域占比 38.7%, 集中分布于南部、东北部和西北部; 重旱等级区域占比为 3.3%, 主要聚集在矿区西南部; 而适宜区与湿润区的占比极小, 分别仅为 4.1% 和 2.1%。从空间分布规律来看, 鄂尔多斯矿区的生态干旱等级呈现出与植被覆盖度密切相关的变化特征: 随着植被覆盖度

自北向南逐步降低,生态干旱等级相应升高;与此同时,生态系统的供水能力也随之减弱。这种植被覆盖度与供水能力的南北向变化,直接导致矿

区干旱程度从北至南逐渐加剧,最终形成了明显的空间梯度变化格局。

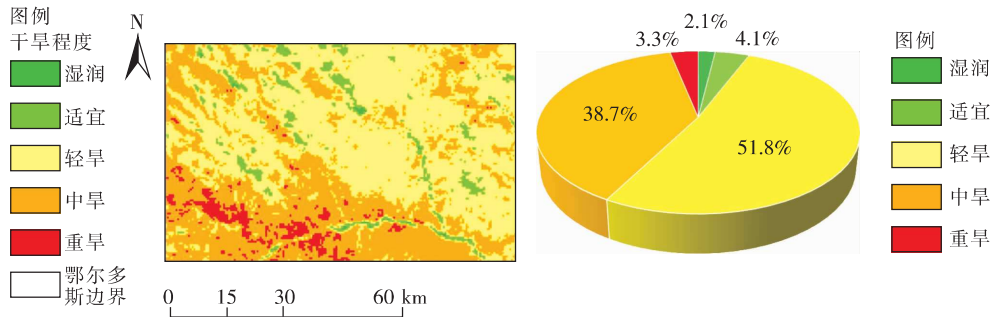


图 5 2001—2020 年鄂尔多斯矿区生态干旱程度空间分布及面积占比

Fig.5 Spatial distribution and proportion of ecological drought degree in Ordos mining area from 2001 to 2020

2.2 2001—2020 年 kTVDI 时间变化分析

基于 kTVDI 划分标准,对 2001—2020 年鄂尔多斯矿区的 TVDI 值进行等级划分。图 6 为近 20 年来矿区干旱的年际变化规律:鄂尔多斯矿区干旱空间分布差异显著,整体以轻旱为主,局部存在中旱和重旱现象,其中南部与西部地区干旱程度较高、覆盖面积较大。值得注意的是,研究期内矿区干旱程度呈整体减缓趋势,空间上表现为自北向南、自西向东的梯度缓解特征。为更直观揭示矿区干旱演变趋势,图 7 统计分析了 2001—2020 年间 kTVDI 均值及各干旱等级面积占比。数据显示,kTVDI 值总体呈现出波动中逐步下降的趋势,下降速率达 $-2.5 \times 10^{-3}/\text{年}$,研究区多年均值为 0.58,其中 2014 年出现最低值为 0.48,2002 年达

到峰值 0.65。干旱等级构成方面,轻旱和中旱为矿区主要干旱类型,多年平均面积占比分别为 41.8% 和 36.3%,且所占比例在 20 年间持续下降;而湿润、适宜、重旱等级面积占比相对稳定,多年均值分别为 1.5%、10.7% 和 9.7%。从年际变化来看,2002 年矿区中旱与重旱区域面积占比达历史最高,干旱形势最为严峻;2003—2005 年及 2015 年亦为干旱高发年份,中旱和重旱区域面积合计超过矿区总面积的 50%。进一步分析长时间序列变化发现,年均 kTVDI 值与中旱、轻旱区域面积占比呈显著正相关,即 kTVDI 值下降过程往往伴随中旱和轻旱面积占比的同步缩减,表明这 2 个干旱等级的动态变化是驱动矿区干旱程度演变的关键因素。

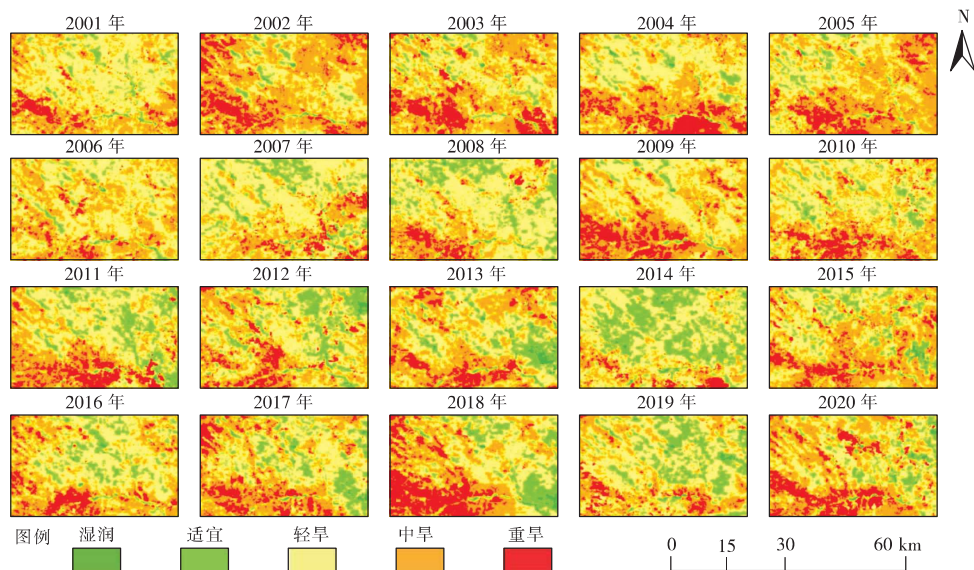


图 6 鄂尔多斯矿区年际 kTVDI 空间分布

Fig.6 Interannual spatial distribution of kTVDI in Ordos mining area

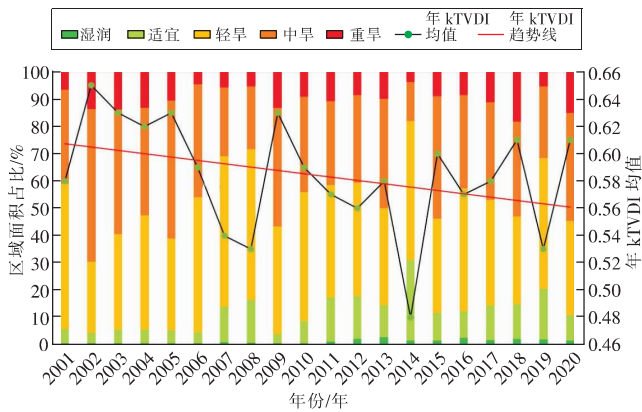


图7 kTVDI 年际变化及各干旱等级的面积占比
Fig. 7 Interannual variation of kTVDI and area proportion of each drought grade

对鄂尔多斯矿区 2001—2020 年 5 ~ 10 月 kTVDI 均值进行重分类后,图 8 和图 9 为各月份的干旱等级分布情况。经分析可见,kTVDI 值在不同月份之间的波动并无固定规律:5 月矿区干旱程度最为严重,随着进入夏季,气温回暖,植被进入快速生长期,5 ~ 7 月 kTVDI 值显著下降,这与同期中旱、重旱区域面积占比的减少趋势高度吻合。然而,7 ~ 10 月 kTVDI 值出现小幅回升,该现象与矿区内气温变化密切相关。夏季高温期,鄂尔多斯矿区地表温度持续攀升,加剧了水分蒸发;同时,植被生长旺盛导致需水量激增。尽管该时段降水可能有所增加,但高温胁迫与水分供需失衡仍对植被生长形成一定制约,促使 kTVDI 值回升,反映出高温环境下矿区干旱压力的阶段性反弹。

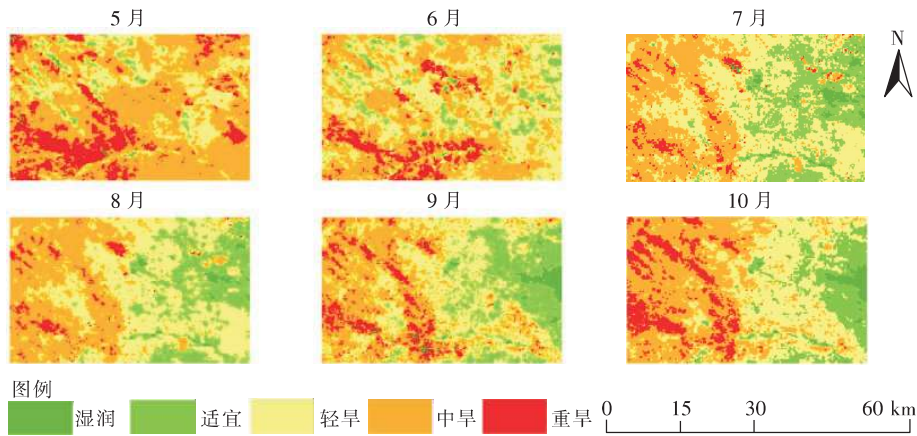


图8 鄂尔多斯矿区月际 kTVDI 空间分布

Fig. 8 Monthly spatial distribution of kTVDI in Ordos mining area

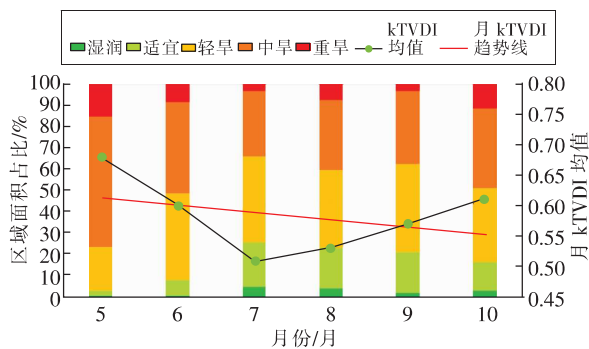


图9 kTVDI 月际变化及各干旱等级的面积占比
Fig. 9 Monthly variation of kTVDI and area proportion of each drought grade

斯矿区干旱变化趋势及面积占比。从全域尺度来看,2001—2020 年间鄂尔多斯矿区 kTVDI 总体呈下降趋势,但南部与西部地区却呈现相反特征,以轻微上升为主,部分区域干旱化趋势显著。具体数据表明,39.6% 区域 kTVDI 上升,其中约 3.1% 的区域 kTVDI 呈现显著上升趋势,36.5% 的区域表现为轻微上升;58.3% 的区域 kTVDI 下降,其中约 14.6% 的区域 kTVDI 呈现显著下降趋势,43.7% 的区域表现为轻微下降,仅有 2.1% 的区域未出现干旱程度加剧现象,凸显出矿区内部干旱演变的复杂性与不均衡性。

3 讨论

通过计算 kNDVI,对传统 TVDI 中的 NDVI 进行优化,进而构建核温度生态干旱指数 kTVDI。并基于该指数开展 2001—2020 年鄂尔多斯矿区生态

2.3 鄂尔多斯矿区生态干旱变化趋势

采用 Theil-SenMedian 分析与 Mann-Kendall 检验方法对鄂尔多斯矿区 2001—2020 年 kTVDI 的年际变化趋势展开系统分析。图 10 绘制了鄂尔多

干旱时空演变特征分析。结果表明,kTVDI显著提升了干旱半干旱区植被覆盖差异显著区域的干旱监测效果,这一结论通过双重验证得到充分支撑:其一,对比kNDVI-Ts与NDVI-Ts特征空间的干湿边拟合效果,发现kNDVI对植被覆盖信息的表征

更具敏感性与稳定性,尤其在中高植被覆盖过渡区,干湿边拟合精度提升显著;其二,相关性检验显示,kTVDI与降水量、土壤湿度的相关系数分别较传统TVDI有所提升,证实其对干旱胁迫的响应更贴合实际生态水文过程。

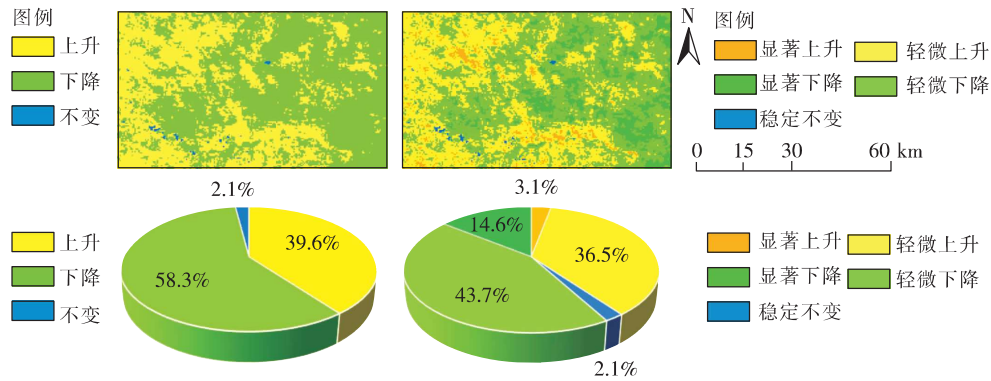


图10 鄂尔多斯矿区干旱变化趋势及面积占比

Fig. 10 Trend and proportion of drought changes in the Ordos mining area

从监测方法的优势来看,传统TVDI采用的NDVI在干旱半干旱区易受植被覆盖稀疏、土壤背景裸露的干扰,导致低植被覆盖区干旱等级误判率较高,且在植被覆盖梯度变化显著区域的区分能力不足。而kTVDI引入的kNDVI通过核函数优化,增强了对植被绿色生物量的捕捉能力,有效削弱了土壤背景噪声的影响:一方面,在低植被覆盖的矿区中西部,kTVDI可区分轻度干旱与中度干旱的边界,避免传统TVDI将“植被稀疏导致的低NDVI”误判为“重度干旱”;另一方面,在矿区东部植被覆盖相对较好的区域,kTVDI能够精准响应植被生长状态的细微变化,及时捕捉因水分条件改善引发的干旱缓解信号,提升了干旱动态监测的时效性与准确性。这种优势使得kTVDI更适配干旱半干旱矿区的下垫面特征,为同类区域的干旱监测提供了更可靠的技术方法。

从植被指数优化的生态意义来看,通过kNDVI替代NDVI构建干旱指数,本质上是强化了干旱监测与植被生态过程的耦合关联,其成果具有明确的生态实践价值。干旱半干旱区植被是生态系统稳定性的核心载体,且植被生长与水分条件呈强耦合关系。kNDVI对植被冠层结构和绿色度的表征更精准,使得kTVDI不仅能反映“土壤干旱”状态,更能间接表征“植被水分胁迫”程度,这意味着该指数可同时服务于土壤干旱监测与植被生态健康评估。具体而言,研究揭示的鄂尔多斯

矿区“东部缓解、中西部加剧”的干旱格局,与区域植被覆盖时空演变特征高度契合:中西部高强度采矿活动破坏植被根系与地表结皮,导致植被保水能力下降,干旱加剧;东部生态修复工程提升植被覆盖度,增强了生态系统水分涵养能力,干旱缓解。这一关联为矿区生态治理提供了关键依据:可基于kTVDI监测结果,精准识别植被水分胁迫严重的核心区域,针对性制定植被恢复与水资源调控方案;同时,kTVDI对植被、水分关系的敏感响应,可作为矿区生态修复成效的量化评估指标,为治理措施的优化调整提供科学支撑。

4 结论

1)采用kNDVI替代NDVI构建kTVDI指数,实现了干旱监测精度的提升。该指数通过核函数优化增强了植被绿色生物量捕捉能力,有效削弱土壤背景干扰,在低植被覆盖区可精准区分干旱等级边界、在中高植被覆盖区能及时响应水分条件引发的干旱动态变化,为同类矿区复杂下垫面的干旱监测提供了更可靠的技术方法。

2)2001—2020年鄂尔多斯矿区生态干旱呈轻微缓解的整体趋势,但空间分异显著,表现为东部缓解、中西部加剧,这一格局与区域植被覆盖演变及人为活动强度高度耦合,揭示了干旱半干旱气候本底与矿产开发双重胁迫下矿区干旱的驱动机制,深化了对矿区生态系统演变规律的认识。

参考文献(References):

- [1] 史晓亮,尚雨,陈冲,等. 淮河流域植被 NDVI 与干旱条件的相关性[J]. 西安科技大学学报,2019,39(6):1033-1040.
SHI Xiaoliang, SHANG Yu, CHEN Chong, et al. Correlation of vegetation NDVI and drought conditions in Huaihe River Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(6):1033-1040.
- [2] 杜臻,张茂省,员少奇,等. 半干旱区煤炭采动下植被生态与土地利用变化响应特征[J]. 煤田地质与勘探,2025,53(10):68-81.
DU Zhen, ZHANG Maosheng, YUAN Shaoqi, et al. Response characteristics of vegetation ecology and land use changes under coal mining activities in semi-arid regions[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(10):68-81.
- [3] BAI H, ZHONG Y, ZHONG M, et al. A GRACE-based framework for tracking flash drought hotspots and spatio-temporal evolution[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 328:114893.
- [4] 范萌萌,卜军,袁珍,等. 鄂尔多斯盆地中东部延安组古环境恢复[J]. 西安科技大学学报,2023,43(5):912-922.
FAN Mengmeng, BU Jun, YUAN Zhen, et al. Paleoenvironmental reconstruction of the Yan' an Formation in the Central-Eastern Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(5):912-922.
- [5] 栗晓玲,姜田亮,牛纪莘. 生态干旱的概念及研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(4):15-21.
SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4):15-21.
- [6] JIANG T, SU X, SINGH V P, et al. A novel index for ecological drought monitoring based on ecological water deficit[J]. Ecological Indicators, 2021, 129:107804.
- [7] 杨强,王婷婷,陈昊,等. 基于 MODIS EVI 数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22):191-198.
YANG Qiang, WANG Tingting, CHEN Hao, et al. Characteristics of vegetation cover change in Xilin Gol League based on MODIS EVI data[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(22):191-198.
- [8] PAYEN S, FSLCONER S, LDDGARGD S F. Water scarcity footprint of dairy milk production in New Zealand - A comparison of methods and spatio-temporal resolution[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639:504-515.
- [9] 王兆礼,黄泽勤,李军,等. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变[J]. 农业工程学报,2016,32(14):177-186.
WANG Zhaoli, HUANG Zeqin, LI Jun, et al. Assessing impacts of meteorological drought on vegetation at catchment scale in China based on SPEI and NDVI[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(14):177-186.
- [10] 刘馨,宋小宁,冷佩,等. 基于 MODIS 数据的黄河源区土壤干湿状况时空格局变化[J]. 中国科学院大学学报,2019,36(2):178-187.
LIU Xin, SONG Xiaoning, LENG Pei, et al. Spatiotemporal variation of drought conditions based on MODIS data over the source area of Yellow River[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(2):178-187.
- [11] 李晓鹏,李康,雷双,等. 基于 TVDI 的新疆地区干旱时空变化特征[J]. 干旱区研究,2025,42(4):589-599.
LI Xiaopeng, LI Kang, LEI Shuang, et al. Spatiotemporal variations in drought conditions in Xinjiang based on TVDI[J]. Research on Arid Areas, 2025, 42(4):589-599.
- [12] 王嘉杰,王贺封,张安兵,等. 基于多种植被指数 TVDI 京津冀地区干旱监测[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(4):21-25.
WANG Jiajie, WANG Hefeng, ZHANG Anbing, et al. Drought monitoring in Beijing-Tianjin-Hebei region based on TVDI of multiple vegetation indexes[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(4):21-25.
- [13] ALENCAR A, Z. SHIMBO J, LENTI F, et al. Mapping three decades of changes in the brazilian savanna native vegetation using landsat data processed in the google earth engine platform[J]. Remote Sensing, 2020, 12(6):924.
- [14] CAMPS-VALLS G, CAMPOS-TABERNER M, MORENO-MARTI NEZ A, et al. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere[J]. Science Advances, 2021, 7(9):eabc7447.
- [15] 邵天意,包斯琴,王楠,等. 基于 TVDI 的旱情时空动态变化监测——以神东矿区为例[J]. 灌溉排水学报,2023,42(6):59-66.
SHAO Tianyi, BAO Siqin, WANG Nan, et al. Monitoring the temporal and spatial dynamic changes of drought based on TVDI: A case study of the Shendong mining ar-

- ea[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*,2023,42(6):59-66.
- [16] 徐霞,孙文彬,王振.基于TVDI的布尔台矿区土壤湿度变化分析[J].*矿业科学学报*,2019,4(4):285-291.
XU Xia, SUN Wenbin, WANG Zhen. Analysis of soil moisture variation in the Buertai mining area based on TVDI[J]. *Journal of Mining Science*,2019,4(4):285-291.
- [17] 赵家培,郭恩亮,王永芳,等.基于核温度植被干旱指数的内蒙古植被生长季生态干旱监测[J].*应用生态学报*,2023,34(11):2929-2937.
ZHAO Jiawei, GUO Enliang, WANG Yongfang, et al. Monitoring ecological drought during the vegetation growing season in Inner Mongolia based on the kernel temperature vegetation drought index[J]. *Journal of Applied Ecology*,2023,34(11):2929-2937.
- [18] 邱晓,肖焱,石磊,等.基于生态资产的内蒙古生态保护效益评估[J].*生态学报*,2022,42(13):5255-5263.
QIU Xiao, XIAO Yi, SHI Lei, et al. Assessment of ecological conservation benefit in the Inner Mongolia based on ecological assets[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2022,42(13):5255-5263.
- [19] 曲学斌,杨钦宇,王慧清,等.基于MCI的内蒙古气象干旱强度特征分析[J].*气象与环境科学*,2019,42(4):47-54.
QU Xuebin, YANG Qinyu, WANG Huiqing, et al. Characteristics of meteorological drought intensity in Inner Mongolia based on MCI[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*,2019,42(4):47-54.
- [20] HOBART MARIUS, SCHIRRMANN MICHAEL, ABUBAKARI ABDUL-HALIM, et al. Drought monitoring and prediction in agriculture: Employing earth observation data, climate scenarios and data driven methods; a case study: Mango orchard in tamale, Ghana [J]. *Remote Sensing*,2024,16(11):1942.
- [21] 李云鹏,司瑶冰,刘朋涛,等.基于空间信息的内蒙古农业干旱监测研究[J].*干旱区资源与环境*,2011,25(11):125-131.
LI Yunpeng, SI Yaobing, LIU Pengtao, et al. Research on agricultural drought monitoring in Inner Mongolia based on spatial information[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,2011,25(11):125-131.
- [22] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*,2002,79(2-3):213-224.
- [23] LIU Z, WANG H, LI N, et al. Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe River Basin from 2003 to 2018[J]. *Sustainability*,2020,12(6):2198.
- [24] 赵莉弘,李捷,崔耀月.基于MK突变检验和稳健回归的桥梁监测数据基线校正[J].*建筑技术开发*,2025,52(6):102-104.
ZHAO Lihong, LI Jie, CUI Yaoyue. Baseline correction of bridge monitoring data based on MK mutation test and robust regression [J]. *Building Technology Development*,2025,52(6):102-104.
- [25] 唐秀楠,周全保,王旭东,等.岚河流域径流洪水变化规律和时间分布特征[J].*山西水利*,2024,11:24-26.
TANG Xiunan, ZHOU Quanbao, WANG Xudong, et al. The variation law and temporal distribution characteristics of runoff and flood in the Lanhe River Basin [J]. *Shanxi Water Resources*,2024,11:24-26.
- [26] 盛菲,刘士余,时建国,等.彭冲涧小流域蒸发散变化及其影响因素分析[J].*江西农业大学学报*,2021,43(1):223-234.
SHENG Fei, LIU Shiyu, SHI Jianguo, et al. Analysis of evapotranspiration changes and their influencing factors in the Pengchong Stream Catchment [J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*,2021,43(1):223-234.
- [27] 李景刚,陈晓楠,乔雨,等.近41年南水北调中线工程安阳河以北段冬季气温变化特征[J].*长江科学院院报*,2024,41(10):165-174.
LI Jinggang, CHEN Xiaonan, QIAO Yu, et al. Characteristics of winter temperature changes in the North section of Anyang River in the South to North water diversion project over the past 41 years [J]. *Journal of the Yangtze River Sciences Research Institute*,2024,41(10):165-174.

(责任编辑:高佳)