

荒漠草原金属矿区 NDVI 时空动态变化与生态质量评价

珊丹^{1,2}, 郭建英^{1,2}, 阿比亚斯², 杨晓杰³, 张铁钢^{1,2}, 徐凯然²

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038;
2.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古, 呼和浩特 010020; 3.内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 采用遥感技术明确草原金属矿山开采的影响范围, 综合评价矿区及影响区生态质量, 为草原矿山及周边区域的生态修复与环境保护提供科学依据。[方法] 以地处生态脆弱区荒漠草原的金矿区为研究对象, 基于长时间序列遥感数据分析研究区植被指数动态变化特征, 采用遥感生态指数(RSEI)对研究区生态质量进行综合评价。[结果] 研究确定荒漠草原金矿开采影响区为矿区边界向外半径 5 km 范围内; 矿山开采期间(2009—2021 年)研究区 NDVI 值呈波动性增加, 井工开采运行期矿区内 NDVI 年平均值比露天开采运行期提高了 51.9%, 露天开采对研究区植被影响更大; 矿区及影响区遥感生态指数表现出先增加后减小随后趋于稳定的变化规律, 整体以不显著增加为主; 根据遥感生态指数的空间分布, 矿区及影响区生态环境质量较差的区域主要为排土场及周边区域。[结论] 荒漠草原金矿开采对周边植被的影响主要集中在 5 km 范围内。采取边开采边治理的生态修复方式能使矿区及影响区的生态环境逐步得到改善。荒漠草原金矿生态建设过程中, 应重点加强排土场及周边区域的生态修复与环境治理。

关键词: 采矿活动; NDVI; 时空动态; 遥感生态指数; 荒漠草原; 金属矿区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0230-09

中图分类号: X835, P237

文献参数: 珊丹, 郭建英, 阿比亚斯, 等. 荒漠草原金属矿区 NDVI 时空动态变化与生态质量评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 230-238. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.027; Shan Dan, Guo Jianying, Abi Yasi, et al. Vegetation spatial and temporal dynamic characteristics and ecological quality assessment in metal mine areas of desert-steppe [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 230-238.

Vegetation Spatial and Temporal Dynamic Characteristics and Ecological Quality Assessment in Metal Mine Areas of Desert-Steppe

Shan Dan^{1,2}, Guo Jianying^{1,2}, Abi Yasi², Yang Xiaojie³, Zhang Tiegang^{1,2}, Xu Kairan²

(1.Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2.Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 3.Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The impacts of a metal mine on the surrounding grassland were studied, and the ecological environment was evaluated using remote sensing technology as a significant aid to ecological restoration and environmental protection of mining areas. [Methods] The study was conducted at a desert-steppe gold mine located in an ecologically fragile area. Spatial and temporal dynamics of normalized difference vegetation index (NDVI) in the mine area were analyzed based on long time series remote sensing data to conduct a comprehensive evaluation of the ecological quality of the study area using the remote sensing ecological index (RSEI). [Results] The impacted area of desert-steppe gold mining was determined as the area with a radius of 5 km outward from the mine boundary. There was a fluctuating increase in NDVI values in the mine and impact areas that varied with the duration of mining in the steppe from 2009 to 2021.

收稿日期: 2022-06-23

修回日期: 2022-08-10

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“草原绿色矿山建设与生态用水关键技术研究及示范”(2019GG023); 鄂尔多斯市科技合作重大专项“黄河流域绿色矿山建设生态修复关键技术研究及示范”(2021EEDSCXQDFZ2016)

第一作者: 珊丹(1978—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持与生态修复方面研究。Email: mksshhd@126.com。

通讯作者: 郭建英(1979—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土流失与植物生态方面研究。Email: guojianying1980@163.com。

The annual average value of NVDI within the mine area during the underground mining operation period was 51.9% higher than during the open pit mining operation period. In addition, the impact of open pit mining on vegetation in the study area was higher compared with underground mining. The RSEI values in the mining area and the impacted area initially increased, then decreased, and then stabilized, resulting in an overall non-significant increase. The spatial distribution of RSEI indicated that the areas with poor ecological environmental quality in the mine and impact areas were mainly the waste dump and surrounding area. [Conclusion] Gold mining influenced the surrounding desert grassland within a radius of 5 km from the mine. The ecological environment of the mine and the impacted area gradually improved through management efforts during mining. Ecological restoration and environmental management of the waste dump and the surrounding area should be strengthened during the process of mine ecological construction.

Keywords: mining activities; NVDI; spatial and temporal dynamics; remote sensing ecological index; desert-steppe; metal mine areas

矿产资源开发利用推动了区域经济的迅速发展,同时也不可避免地造成资源损毁、环境污染等一系列问题。受自然气候条件、资源开发规模及强度等因素的影响,不同地区矿产资源开发对生态环境的破坏程度及范围存在较大差异^[1-3]。康萨如拉等^[4]研究表明,地处内蒙古草原区的黑岱沟露天煤矿对周边生态系统的影 响呈逐渐降低的趋势,确定矿区边界向外 10 km 范围为采矿影响区。袁涛等^[5]通过主成分分析确定位于干旱荒漠草原的宁东矿区生态影响范围边界在 7 km 左右,随着开采过程的持续,影响区植被生长受到明显影响。梅昭容等^[6]利用遥感影像数据结合移动窗口分析法,研究采矿活动下的区域景观格局时空演变模式,结果显示矿区内部与周边 1~2 km 处的景观异质性程度逐年升高,而距离矿区中心 2.5 km 以外的区域基本不受采矿活动影响。孟峰等^[7]研究了宝日希勒露天煤矿资源开发对生态环境影响,结果表明煤炭开发对地植被指数、植物优势物种等指示生态因子的最大影响范围为 2 km。毕银丽等^[8]定量比较了胜利矿区不同距离的植物与土壤变化,发现距离矿区 1 900 m 处的植物群落组成、土壤主要养分比较接近围封多年的典型草原。以上研究结果说明,矿产资源开发对生态环境的影响在一定的范围之内,由于自然气候条件、土壤植被特征、开发规模及强度等因素的差异,采矿活动的影响程度、范围、表现形式及其生态恢复方式都有所不同。

矿产资源开发利用使区域生态环境发生巨大变化,监测与评价矿区及周边区域的生态环境变化,对于平衡环境保护和经济发展之间的关系具有重要作用。近几年,诸多学者利用遥感生态指数法(remote sensing ecological index, RSEI)对我国北方的神东矿区、神府矿区、东北矿区、松宜煤矿、宝日希勒露天矿等多个矿区的生态环境进行了监测与评价^[9-14],探讨区域生态环境质量变化与矿业开发活动之间的相

互关系。基于遥感信息数据并综合多种生态因子的遥感生态指数法(RSEI),主要是利用主成分分析确定湿度指标(WET)、干度指标(NDSI)、绿度指标(NDVI)、热度指标(LST)对各主分量的贡献来综合评价研究区生态环境状况^[15-16],计算结果具有较强的客观性和稳定性。本文以地处内蒙古锡林郭勒荒漠草原的毕力赫金矿为研究对象,利用长时间序列遥感数据,在明确草原金属矿山开采的影响范围的基础上,分析草原矿山生产建设不同阶段矿区及周边影响区植被覆盖动态变化特征及生态质量变化,评估已实施的生态建设工程恢复成效,为后续草原矿山及周边区域的生态修复与环境保护精准实施提供科学依据,助力绿色矿山建设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毕力赫金矿位于内蒙古自治区锡林郭勒盟苏尼特右旗境内,地理坐标:东经 113°31′30″—113°34′30″,北纬 42°22′45″—42°25′00″,研究区北西距苏尼特右旗所在地赛汉塔拉镇 90 km,南距镶黄旗政府所在地新宝力格镇 35 km。金矿于 2009 年 3 月开工建设,2011 年 6 月建成投产,2012—2016 年为露天开采阶段,产能 3 000 t/d;2016 年 11 月,露天开采全部完成,继而转向井工建设,2019 年 2 月开始进行井工开采。金矿生产建设过程中,在工业广场、道路两侧、排土场、尾矿库等区域实施了植被建设工程,主要采取表土覆盖、机械平整、土壤改良、植被建植等治理措施。金矿未开采前研究区及周边均为天然放牧场,地广人稀,以自然放牧为主,开采后研究区周边 10 km 范围内无其他生产建设项目。

研究区处于内蒙古高原中部,属中温带干旱半干旱气候,多年平均降水量 209 mm,年平均蒸发量 2 384 mm,年均风速 4.6 m/s,年均气温 4.3 ℃,无霜

期 135 d; 地带性土壤以栗钙土为主, 研究区周边为低山丘陵干草原, 以小针茅(*Stipa klemenzi*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)为主要建群种, 植被盖度约 35%。

1.2 数据来源与处理

根据草原金矿生产建设实际情况, 利用地理空间数据云平台, 以 2008、2009 和 2011 年 Landsat 5TM 和 2013—2021 年每隔 1 a 选取 1 期 Landsat 8OLI 作为遥感数据源, 数据采集时间集中在植被地上生物量高峰期, 即 7—9 月, 空间分辨率为 30 m, 云量低于 10% 的影像。气象数据来源于国家气象信息网 (<http://data.cma.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 归一化植被指数(NDVI) 基于归一化植被指数(NDVI)进行像元二分模型近似估算植被覆盖度是一种简单成熟的方法^[17-18]。采用 ENVI 5.3 对 Landsat 影像进行预处理, 包括辐射定标、大气校正和正射校正, 计算 NDVI 值以及像元统计^[19], 计算公式为:

$$NDVI = (R_I - R) / (R_I + R) \quad (1)$$

式中: R_I 为红外波段的像素值; R 为红光波段的像素值。将 NDVI 处于 $[-1, -0.1]$ 的值赋值为 -0.1 , 通过公式 $DN = (NDVI + 0.1) / 0.004$ 转换到 $0 \sim 255$ 用较大的值表示 DN。

1.3.2 矿区影响范围确定 草原区矿产资源开采等建设活动产生的影响范围不仅是在矿区内部, 矿区周边也会不同程度地受到影响。利用无人机获取矿区正摄影像及 DEM 图, 分辨率 0.1 m, 将矿区正摄影像拼接完成, 进行矢量化以及图斑精细化勾绘及建立解译标志确定矿区边界, 矿区平面布置图如图 1 所示。根据康萨如拉等^[4]在内蒙古草原区黑岱沟露天煤矿的研究成果, 沿矿区边界分别以半径为 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 和 10 km 向四周扩展, 形成环形且不同面积的影响

区; 依据 2009—2021 年 NDVI 图像, 计算矿区与影响区 NDVI 逐像元的加和比值的百分数, 并定义为指标 k 值, k 值越高表示矿产资源开发对周边生态系统初级生产力的影响越大^[4]。通过对矿区 and 不同影响范围内 NDVI 逐像元的加和之间进行 Pearson 相关性分析, 进而确定受采矿周边影响区域的范围。 k 值计算公式为:

$$k = \frac{\sum_{i=0}^n DN}{\sum_{j=0}^m DN} \times 100\% \quad (2)$$

式中: i 为矿区内 NDVI 的第 i 个像元 ($i=0, 1, 2, \dots, n$); j 为研究区内 NDVI 的第 j 个像元 ($j=0, 1, 2, \dots, m$)。

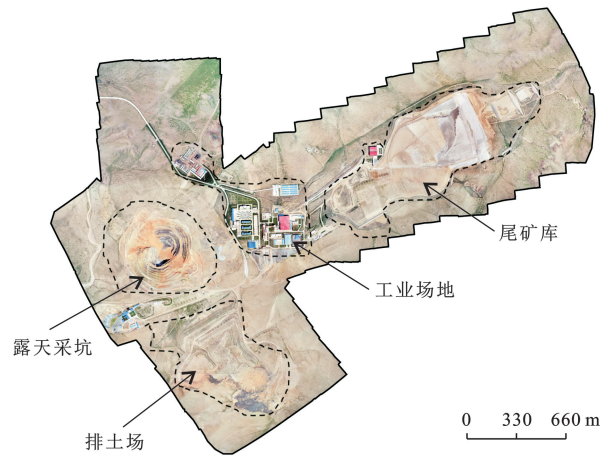


图 1 研究金矿区正摄影像图(2021 年)

Fig.1 The ortho-photo map of the studied gold mine areas(2021)

1.3.3 遥感生态指数(RSEI) 遥感生态指数(RSEI)采用主成分分析耦合湿度、绿度、干度、热度 4 个指标, 定量描述区域生态水平, 同时对生态环境分级^[15-16], RSEI 值越接近于 1, 代表生态质量越优。

(1) 湿度指标(WET)。湿度指标高低可以直接影响植被生长状况, 基于 Landsat TM/OLI 传感器数据的湿度分量计算公式为:

$$\begin{aligned} WET_{TM} &= \rho_B \times 0.031\ 5 + \rho_G \times 0.202\ 1 + \rho_R \times 0.310\ 2 + \rho_{NIR} \times 0.159\ 4 + \\ &\quad \rho_{SWIR1} \times (-0.680\ 6) + \rho_{SWIR2} \times (-0.610\ 9) \\ WET_{OLI} &= \rho_B \times 0.151\ 1 + \rho_G \times 0.197\ 3 + \rho_R \times 0.328\ 3 + \rho_{NIR} \times 0.340\ 7 + \\ &\quad \rho_{SWIR1} \times (-0.711\ 7) + \rho_{SWIR2} \times (-0.455\ 9) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ_B 为蓝波段; ρ_G 为绿波段; ρ_R 为红波段; ρ_{NIR} 为近红外波段; ρ_{SWIR1} 为中红外波段 1; ρ_{SWIR2} 为中红外波段 2 的反射数据。

(2) 绿度指数(NDVI)。地表植被覆盖度可以用绿度指数表示, 归一化植被指数(NDVI)用于表示绿度, NDVI 能综合反映植物生物量、叶面积指数、植被覆盖度信息。

(3) 干度指数(NDSI)。干度指数是由建筑用地

指数(ABI)和裸土指数(SI)合成表示地表干化程度, 其值越大, 表示越干燥, 地表干化程度会直接影响生态环境。计算公式为:

$$ABI = \frac{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} + \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{SWIR1}} \right]}{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} + \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{SWIR1}} \right]} \quad (4)$$

$$SI=\frac{[(\rho_{SWIR}+\rho_R)-(\rho_{NIR}+\rho_B)]}{[(\rho_{SWIR}+\rho_R)+(\rho_{NIR}+\rho_B)]}$$
$$NDSI=(IBI+SI)/2$$

(4) 热度指数(LST)。利用遥感影像的热红外来表示地表温度,通过 Landsat 用户手册的模型和最新修订的参数来计算。计算公式为:

$$L_6= gain\times DN+ bias$$
$$T_b=K_2/(K_1/L_6+1)$$
$$LST=T_b/\{1+[(\lambda T_b)/\rho]\epsilon\}-273.15$$

式中: L_6 代表 Landsat 热红外波段的像元在传感器处的辐射值; DN 为像元的灰度值; $gain, bias$ 分别为波段增益值和偏置值; T_b 为传感器处温度值; K_1, K_2 分别为定标参数; λ 表示 Landsat 热红外波段波长; $\rho=1.438\times10^{-2}$ mK; ϵ 为地表比辐射率,将遥感影像分为水体、自然表面和工矿区 3 个部分,根据影像的 NDTV 值和植被覆盖度计算得出。

由于遥感生态指数的 4 个组成指标物理意义不同。量纲不统一,需对 4 个指标进行归一化处理,计算公式为:

$$NI_i=(I_i-I_{min})/(I_{max}-I_{min})$$

式中: NI_i 为归一化值; I_i 为第 i 个指标像元值; I_{max} 为最大值; I_{min} 为最小值。

归一化处理后进行主成分分析,消除各指标间的相关性。将包含信息量最大的第一主成分作为遥感生态指数以定量揭示研究区的生态质量差异与空间分布特征,计算公式为:

$$RSEI_0=1-PCA$$
$$RSEI=(RSEI_0-RSEI_{min})/(RSEI_{max}-RSEI_{min})$$

式中: PCA 为主成分分析; $RSEI$ 代表遥感生态指数,其值介于 0~1 之间; $RSEI_{max}, RSEI_{min}$ 分别代表 $RSEI_0$ 的最大值、最小值。

2 结果与分析

2.1 矿产资源开发影响区的确定

根据 2009—2021 年 NDTV 图像,计算得到指标

k 值的变化范围在 0.3%~30% 之间(图 2),从空间变化上来看,矿产资源开发利用过程中,周边区域与矿区距离越近, k 值越大,反之与矿区距离越远, k 值越小,当影响区与矿区的距离达到一定程度时,如图 2 距离矿区边界 5 km 以外, k 值年际间变化表现极其微弱,说明草原矿产资源开发建设对其周边草原植被的影响表现出随距离增加而逐渐降低趋势。时间变化上来看,2009—2021 年 k 值呈现先增加后降低随后轻度波动趋于平稳的变化规律,说明矿区建设期地表大面积扰动,工程施工等干扰活动对周边的植被影响较明显,投产运行期间由于产生的废弃物逐渐减少,加之生态建设工程逐步实施,采矿活动对周边植被产生的影响也随之减少。

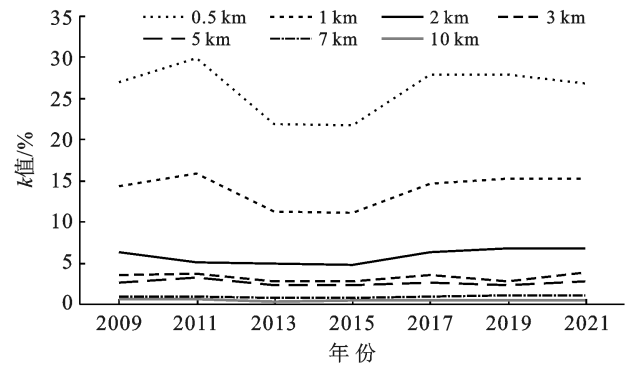


图 2 研究区年际间不同范围 k 值动态变化
Fig.2 Dynamics of k value on different range of study area

Pearson 相关性分析结果表明(表 1),距离矿区边界 0.5 km 范围内,矿区内部和影响区逐个像元 NDTV 值总和呈现出极显著相关性($p<0.01$),1~5 km 范围内表现出显著相关($p<0.05$),与矿区边界距离超过 5 km,二者之间无明显相关关系。研究区位于内蒙古锡林郭勒盟苏尼特右旗西南端,属于中温带干旱半干旱气候,海拔处于 1 100~1 300 m 之间,矿区与周边区域处于相同气候单元,最高海拔无明显差异,因此,确定以矿区边界向外半径为 5 km 范围内为该矿产资源开发的影响区,矿区及影响区总面积为 122.362 km²。

表 1 研究矿区与影响区 NDTV 值的相关关系
Table 1 Correlation between NDTV of the studied mineral area and its impacting area

项 目	影响区					
	0.5 km	1 km	2 km	3 km	5 km	10 km
矿区	0.990**	0.905*	0.81*	0.714*	0.714*	0.619

注: ** 为 $p=0.01$ 显著水平; * 为 $p=0.05$ 显著水平。

2.2 植被指数动态变化特征

对矿区及影响区植被覆盖时空分布数据进行像

元统计(图 3),金矿未开采前矿区及影响区为天然放牧场,NDVI 均值 0.314,矿区与周边植被没有明显差

异,随着矿产资源生产建设活动的进行,矿区及影响区 NDVI 值出现波动性增加的变化特征。2009—2011 年是露天开采建设期,各种施工活动改变了建设区地形地貌,同时对周边天然草原也产生明显影响,2011 年矿区内 NDVI 值为 0.006,影响区 NDVI 值为 0.112,露天矿生产初期(2013 年)研究区 NDVI 值也处于较低的水平,随着矿区工业场地人工绿化、排土场、尾矿库土地复垦等生态建设工程的相继实施,矿区及影响区植被得以修复与重建,2015 年矿区内 NDVI 值增加到 0.053,影响区 NDVI 值为 0.165,

2017 年金矿由露天开采转为井工式开采,井工矿建设期间受夏季降水偏少等因素影响,矿区及影响区 NDVI 值均降低,井工矿开采后,研究区 NDVI 值逐步升高,2021 年矿区内 NDVI 值为 0.082,影响区 NDVI 值为 0.152。井工开采运行期间矿区内的 NVDI 年平均值比露天开采运行期提高了 51.9%,一方面是与露天开采相比,井工式开采对地表的扰动较少,对研究区植被的影响相对较弱;另一方面是排土场、尾矿库等废弃地实施的生态建设工程的治理成效逐步显现,矿区内生态环境明显改善。

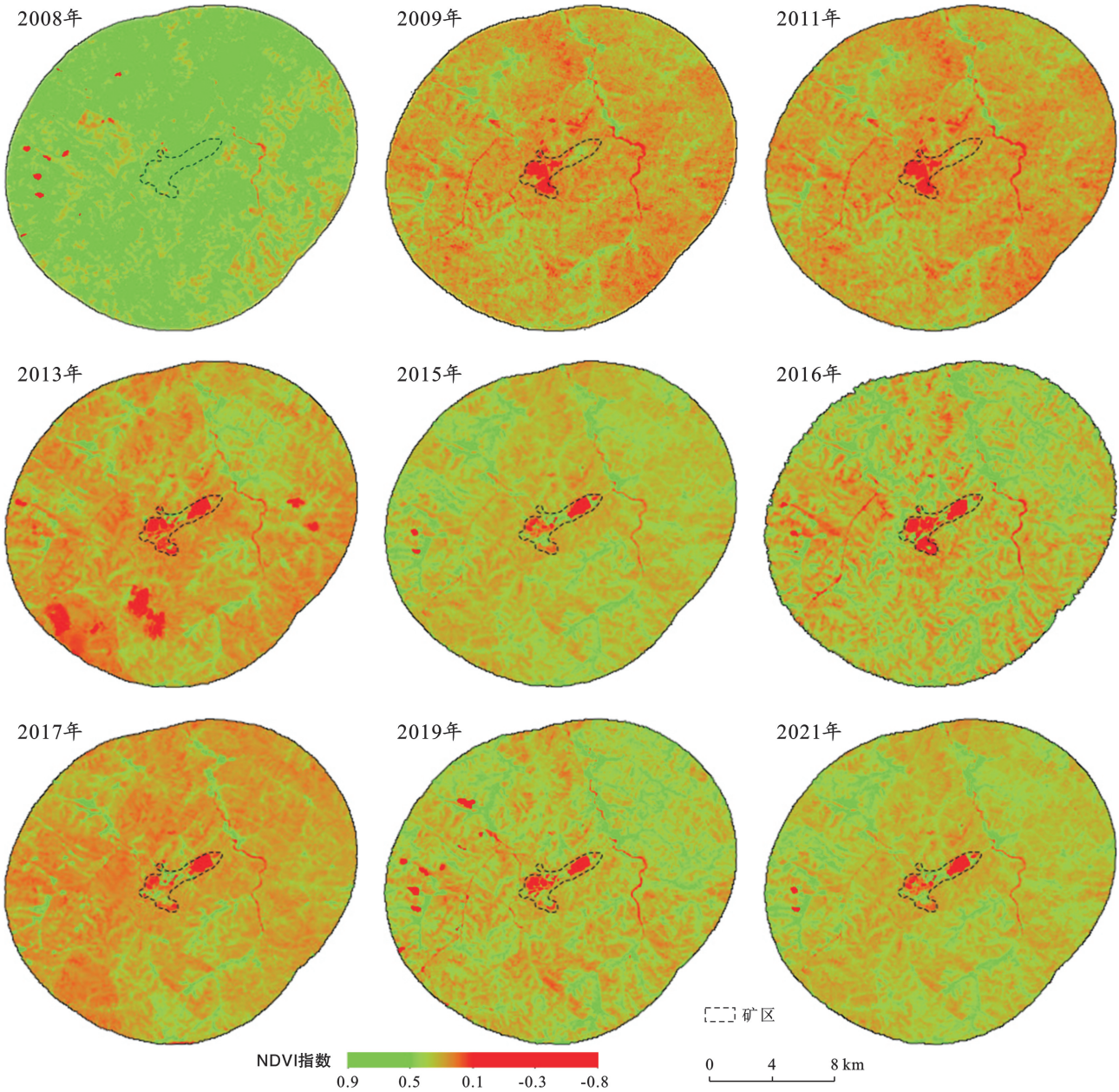


图 3 研究矿区及影响区 NDVI 指数变化(2008—2021 年)

Fig.3 Dynamics of NDVI value in the studied mineral area and its impacted area(2008—2021)

2.3 基于遥感生态指数的生态质量评价

选取矿区生产建设 4 个不同时期即,2009 年(露天开采建设期)、2011 年(露天开采运行期)、2016 年(井工开采建设期)和 2021 年(井工开采运行期),对不同时期的 4 个遥感指数指标(湿度、绿度、干度、热度指标)标准化处理后进行主成分分析(表 2),根据主成分分析结果,第一主成分(PC₁)的贡献率在 85% 以上,说明第一主成分可以代表 4 个指标的大部分特征。在第一主成分中,湿度和绿度指标为正值,说明这两个指标对矿区及周边的环境变化起到了积极作用,热度和干度指标为负值。将处于 0~1 之间的 RSEI 指数以 0.2 为节点分为 5 个等级^[20],统计矿区及影响区 4 个时期的生态质量等级,随着生产建设时

间的延长,RSEI 指数均值呈现先增加后减小最后趋于稳定的变化规律,2009 年的 RSEI 指数均值为 0.271,2011 年增加到 0.334,2016 年达到最大(0.669),2021 年 RSEI 指数均值维持在 0.594。露天开采建设期(2009 年)处于差、较差生态质量等级的矿区及敏感区面积占总面积的 91.50%,进入运行期后(2011 年),差、较差生态质量等级的矿区及影响区面积所占比例下降到 67.46%,2016 年露天开采已基本完成,开始转向井工式开采,随着矿区生态修复工程的实施,生态质量等级处于良好以上的矿区及影响区面积增加到 70.40%,2021 年良好以上生态质量等级面积占总面积的 45.31%,差、较差生态质量等级仅占 11.49%(表 3)。

表 2 不同时期研究矿区 4 个遥感指数指标主成分贡献率

Table 2 Principal component contribution rate of 4 remote sensing indices at different stages of the studied mine area								
指 标	2009 年				2011 年			
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
WET	0.251 5	0.292 6	0.843 1	0.374 5	0.275 8	0.460 4	0.833 5	-0.131 3
NDVI	0.521 3	-0.269 1	0.523 4	-0.617 9	0.598 2	-0.403 1	0.324 2	-0.612 0
NDSI	-0.645 9	-0.329 0	0.000 9	0.688 9	-0.467 2	0.790 9	-0.319 0	-0.233 3
LST	-0.497 8	0.856 6	-0.123 3	-0.057 5	-0.589 7	-0.002 3	0.313 7	0.744 2
特征值	0.351 8	0.031 2	0.016 7	0.005 5	0.325 5	0.030 9	0.007 6	0.007 3
累计贡献率/%	86.81%	94.52%	98.63%	100%	87.66%	95.98%	98.02%	100%

指 标	2016 年				2021 年			
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
WET	0.540 7	-0.202 9	-0.442 3	-0.686 1	0.560 4	0.062 7	0.586 0	-0.582 0
NDVI	0.378 4	0.903 4	0.182 0	-0.086 3	0.477 6	0.680 4	-0.555 2	-0.025 8
NDSI	-0.529 0	-0.371 7	0.762 1	0.035 5	-0.601 6	-0.244 3	0.183 8	0.738 0
LST	-0.533 5	-0.066 6	-0.436 4	0.721 5	-0.309 8	0.688 1	0.560 9	0.340 6
特征值	0.477 6	0.024 0	0.003 3	0.000 4	0.379 9	0.025 0	0.008 0	0.003 7
累计贡献率/%	94.53%	99.27%	99.92%	100%	91.18%	97.17%	99.10%	100%

表 3 研究矿区生态质量不同等级面积变化

Table 3 Area changes of different classes of ecological quality at the studied mine area								
等 级	2009 年		2011 年		2016 年		2021 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
差(0~0.2)	26.924	22.00	20.685	16.91	0.111	0.09	0.372	0.30
较差(0.2~0.4)	85.044	69.50	61.856	50.55	1.330	1.09	14.058	11.49
一般(0.4~0.6)	9.347	7.64	35.910	29.35	34.780	28.42	52.496	42.90
良好(0.6~0.8)	0.818	0.67	3.666	3.00	70.582	57.68	41.554	33.96
优(0.8~1)	0.229	0.19	0.245	0.20	15.559	12.72	13.882	11.35

不同时期 RSEI 指数分布可以看出(图 4),矿山生产建设过程中,矿区北侧及北侧影响区的生态质量总体上要优于南侧,而东、西两侧的生态质量变化差异不明显。时间维度上来看,露天开采建设至运行初期(2009—2011 年)矿区及影响区的生态质量较差,在此之后,随着植被建设等生态修复工程的实施,矿

区及影响区生态质量不断向变好的趋势发展,说明矿产资源的开发建设过程对周边的生态质量造成了一定影响,经过人工植被建植、土地复垦等措施的逐步实施,矿区及周边的生态质量会得到改善,到 2021 年矿区及影响区大部分区域处于优或良的生态质量等级中。

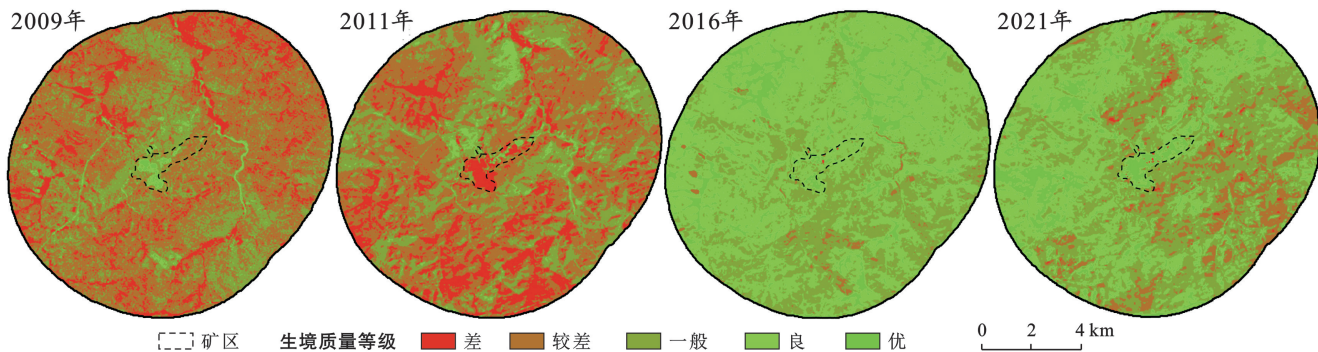


图 4 研究矿区及影响区生态质量等级分布

Fig.4 Rank distribution of ecological quality in the studied miner area and impact area

利用 ENVI 软件对矿区及影响区生态质量进行趋势分析,结果如图 5 所示(在 0.05 显著性水平下),矿区及影响区的生态质量总体以未显著性增加为主,未显著性增加的面积为 111.59 km^2 ,占矿区及影响区总面积的 91.2%,显著性增加的面积占 1.7%;矿区及影响区生态质量的减少区域呈小部分零星分布,并且减少区域主要分布在矿区南侧周边区域,处于未显著性减少的面积占总面积的 3.5%,显著性减少的面积占 1.8%,基本未发生变化的面积占总面积 1.8%。

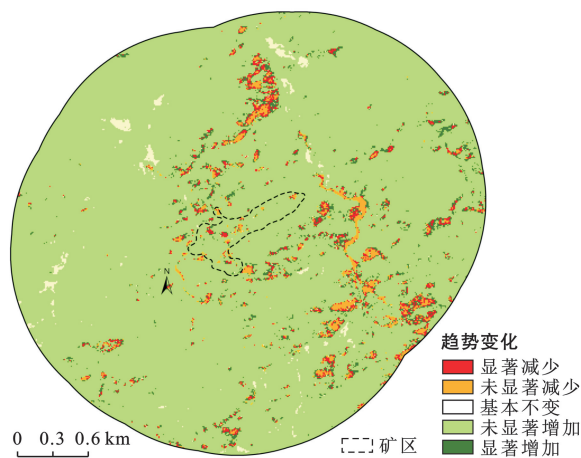


图 5 2009—2021 年研究矿区生态质量变化情况

Fig.5 Change of ecological quality at the studied mine area from 2009 to 2021

3 讨论

草原矿产资源开发改变了原始地貌形态、土体结构,生物种群遭到严重破坏,矿区周边草原也出现不同程度的退化^[21-23],矿产资源开采对周边生态系统的影响范围因自然气候条件、植被类型、土壤特征等自然因素以及矿产资源开发利用形式、强度等人为因素的差异而不同^[4-8]。本研究基于长时间序列遥感数据,确定了处于内蒙古高原中部的荒漠草原矿区边界

向外半径为 5 km 范围内为采矿影响区,明确了矿山开采生态影响区对科学制定矿业发展策略与生态环境保护措施具有重要的作用。

通过分析矿区及影响区 2008—2021 年 NDVI 指数变化特征表明,10 a 间毕力赫金矿区内及影响区 NDVI 值出现明显的波动变化,露天开采生产建设期矿区大部分区域土壤和植被被破坏,形成人工再塑地貌,矿区周边 5 km 范围内植被也受到不同程度的影响,随着矿区生态建设工程的逐步实施,矿区及影响区 NDVI 值增加,而在井工开采施工期,受施工活动的干扰,矿区及影响区 NDVI 值又出现降低,井工矿建成投产后,矿区及影响区 NDVI 值又逐步回升并趋于稳定。对比分析发现,井工式开采对草原生态系统的影响相对小于露天开采,主要原因是露天开采形成大面积的采坑使周边土壤水分向矿坑中心流失,降低表层土壤持水性能^[24],采坑、排土场导致区域地形地貌与水文条件发生明显改变,引起矿区及周边区域土壤水分和植被的分布格局变化^[25],而井工矿生产建设过程中形成的以地面变形、地裂缝为特征的地面沉降对地表植被的影响相对不明显^[26]。矿山开采过程中,企业实施的生态恢复措施对改善矿区及影响区环境有一定的促进作用。田定慧等^[27]对近 31 a 澳大利亚恰那铁矿生态环境遥感监测数据分析结果显示,矿区建设对周边植被的影响主要集中在 2 km 范围内,出现严重退化的区域占研究区总面积的 1.49%,坚持边开采边治理,绿色施工方式是恰那铁矿取得较好经济效益和生态环境整体保持相对稳定的主要原因。刘超^[28]研究结果表明,加拿大 Alberta 省北部油砂矿区开采前期(1995—2010 年)植被覆盖度、植被含水量迅速下降;2010 年以后随着矿区开发建设政策和手段的逐步完善,植被覆盖度下降速度减缓。毕银丽等^[29]分析了准格尔矿区 1988—2020 年的 NDVI 指数与植被覆盖度的时序变化结果显示,矿区人工植被

恢复及生态治理使矿区外 5 km 范围内 74.74% 区域内植被得到中度改善,矿区人工修复可促使区域整体生态环境的协同改善。

遥感技术以其数据可靠、覆盖面广、及时、快速等优势得到广泛应用,基于遥感信息集成多种生态因子的遥感生态指数(RSEI)主要应用于生态质量监测、生态质量评价、生态修复效果评估等方面,遥感生态指数(RSEI)其指标体系中考虑了植被绿度参数和气候因素对生态环境的影响,对于自然环境较多和人居较少的研究区,遥感生态指数更为适用^[30-32]。李蕊等^[32]利用遥感生态指数(RSEI)对神东矿区生态环境质量进行监测与评价的结果表明,1995—2020 年神东矿区生态环境状况明显提升,绿度、干度指数对矿区生态质量影响较大。韩琳等^[15]通过对比宝日希勒矿区开采前、开采中和开采后不同阶段的遥感生态指数,发现矿区绿度、干度、湿度、热度各分量指标随着矿区的开发进程呈现先降后升的趋势,尤其是已经进行生态修复的内排土场,其分量指标和遥感生态指数已恢复到矿区平均水平,生态修复效果良好。毕力赫金矿从建设到生产期间(2009—2021 年),遥感生态指数(RSEI)总体变化趋势与以上研究结果类似,但由于毕力赫金矿先后采取了两种开采方式(前期露天开采、后期井工开采),在时间尺度上,矿区及影响区遥感生态指数表现出总体上升的波动性变化,露天矿建设阶段生态状况最差,投产以后生态质量趋于良好,转向井工式开采后生态状况虽有波动但基本维持稳定。从空间上来看,矿区北侧及北侧影响区的生态质量总体上要优于南侧,主要原因是排土场位于矿区南侧,矿产资源开采过程中弃土弃渣堆放形成大面积的排土场造成草原景观格局破碎,排土场尚未实施土地复垦或者治理后植被覆盖度仍然较低的情况下,当地常年盛行的西北风加速影响了排土场南侧草原生态系统稳定性。

4 结论

(1) 基于长时间序列遥感数据,确定荒漠草原金矿开采影响范围为矿区边界向外半径 5 km 区域;矿区及影响区 NDVI 值表现出波动性增加的变化特征,井工开采运行期间矿区内的 NDVI 年平均值比露天开采运行期提高了 51.9%,相比于井工式开采,露天开采对研究区植被影响更大。

(2) 利用遥感生态指数对研究矿区及影响区不同时期生态质量进行评价,结果表明草原矿山建设生产期间(2009—2021 年),遥感生态指数呈现先增加后减小随后趋于稳定的变化规律,整体以不显著增加

趋势为主,未显著性增加的面积占矿区及影响区总面积的 91.2%。

(3) 根据遥感生态指数的空间分布,研究矿区及影响区生态环境质量较差的区域主要为排土场及排土场周边草原,后续的矿山生态建设过程中,应加强对排土场及周边区域的生态恢复与环境治理。

[参 考 文 献]

- [1] 陈军,成金华.中国矿产资源开发利用的环境影响[J].中国人口·资源与环境,2015,25(3):111-119.
- [2] 马丽,田华征,康蕾.黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J].资源科学,2020,42(1):137-149.
- [3] 严丹霖,孟楠,杨树旺.矿产资源开发对生态环境影响的多维分析[J].中国国土资源经济,2015,28(5):39-42.
- [4] 康萨如拉,牛建明,张庆,等.草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响:以黑岱沟露天煤矿为例[J].生态学报,2014,34(11):2855-2867.
- [5] 袁涛,倪璇,周伟.煤炭开发区植被扰动时空效应及影响范围界定:以宁东矿区为例[J].地学前缘,2021,28(4):110-117.
- [6] 梅昭容,李云驹,康翔,等.基于移动窗口分析法的矿区景观格局时空演变研究[J].国土资源遥感,2019,31(4):12-17.
- [7] 孟峰,张周爱,陈树召.宝日希勒矿区煤炭资源开发的生态环境影响评价[J].中国煤炭,2021,47(9):16-25.
- [8] 毕银丽,李向磊,彭苏萍,等.露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征[J].煤炭科学技术,2020,48(12):205-213.
- [9] 岳辉,刘英,朱蓉.基于遥感生态指数的神东矿区生态环境变化监测[J].水土保持通报,2019,39(2):101-107,114.
- [10] 范德芹,邱玥,孙文彬,等.基于遥感生态指数的神府矿区生态环境评价[J].测绘通报,2021(7):23-28.
- [11] Xu Jiaxing, Zhao Hua, Yin Pengcheng, et al. Landscape ecological quality assessment and its dynamic change in coal mining area: A case study of Peixian [J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78(24):708-715.
- [12] 吕宝奇,牛瑞卿,张培佩,等.松宜煤矿区生态环境质量变化监测与评价[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(4):15-24.
- [13] 韩琳,李永峰,巫长悦,等.基于遥感生态指数的宝日希勒露天矿区生态修复效果评估[J].中国矿业,2022,31(4):55-61.
- [14] 胡思汉,姚玉增,付建飞,等.基于 RSEI 指数的东北矿区生态质量变化评价:以辽宁弓长岭区为例[J].生态学杂志,2021,40(12):4053-4060.
- [15] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指标[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.
- [16] 徐涵秋.水土流失区生态变化的遥感评估[J].农业工程

- 学报, 2013, 29(7): 91-97.
- [17] 张学珍, 朱金峰. 1982—2006 年中国东部植被覆盖度的变化[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3): 365-374.
- [18] 宋怡, 马明国. 基于 GIMMS AVHRR/NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 499-505.
- [19] Lunetta R S, Knight J F, Ediriwickrema J, et al. Land-cover characterization and change detection using multitemporal MODIS NDVI data [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 105(2): 142-154.
- [20] 环境保护部. HJ192-2015 生态环境状况评价技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [21] Malaviva S, Munsu M, Oinam G, et al. Landscape approach for quantifying land use land cover change (1972—2006) and habitat diversity in a mining area in Central India(Bokaro, Jharkhand) [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2010, 170(1/4): 215-229.
- [22] 吉莉, 董霁红, 房阿曼, 等. 宝日希勒大型露天矿敏感区划定及重金属累积效应[J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3325-3338.
- [23] 于昊辰, 牟守国, 卞正富, 等. 北方草原露天煤矿区植被退化因素分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1): 1-8.
- [24] Ahirwal, Jitendra, Maiti, et al. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India [J]. Catena: An Interdisciplinary Journal of Soil Science Hydrology-Geomorphology Focusing on Geoecology and Landscape Evolution, 2016, 140: 155-163.
- [25] Ross M, Mcglyn B, Bernhardt E. Deep impact: Effects of mountaintop mining on surface topography, bedrock structure, and downstream waters [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(4): 2064-2071.
- [26] 雷少刚, 张周爱, 陈航, 等. 草原煤电基地景观生态恢复技术策略[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3662-3669.
- [27] 田定慧, 邬明权, 牛铮, 等. 近 31 年澳大利亚恰那铁矿生态环境和社会经济影响长时间序列遥感监测[J]. 江西科学, 2021, 39(2): 281-291.
- [28] 刘超. 基于遥感数据的 1995—2020 年加拿大 Alberta 油砂矿区周边植被变化研究[D]. 吉林 长春: 吉林大学, 2021.
- [29] 毕银丽, 刘涛. 露天矿区植被协同演变多源数据时序分析: 以准格尔矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 293-302.
- [30] 范德芹, 邱玥, 孙文彬, 等. 基于遥感生态指数的神府矿区生态环境评价[J]. 测绘通报, 2021(7): 23-28.
- [31] 李蕊, 陈国清, 李玮贤, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区 1995—2020 年生态环境质量的时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 143-151.

(上接第 229 页)

- [9] Zhang Yan, Chao Yang, Fan Ruirui, et al. Spatial-temporal trends of rainfall erosivity and its implication for sustainable agriculture in the Wei River basin of China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106557.
- [10] 陈剑南, 刘益麟, 李朋飞, 等. 1901—2016 年黄土高原降雨侵蚀力时空变化[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 39-46.
- [11] Yu B, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales [J]. Soil Research, 1996, 34(1): 139-152.
- [12] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002(06): 705-711.
- [13] Xie Yun, Yin Shuiqing, Liu Baoyuan, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 547-558.
- [14] 祝艳波, 兰恒星, 彭建兵, 等. 黄河中游地区水土灾害机理与灾害链效应研究进展[J]. 人民黄河, 2021, 43(8): 108-116, 147.
- [15] 杨义, 舒和平, 马金珠, 等. 基于 Mann-Kendall 法和小波分析中小尺度多年气候变化特征研究: 以甘肃省白银市近 50 年气候变化为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 126-131.
- [16] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 503-509.
- [17] 钟科元, 郑粉莉. 1960—2014 年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 278-291.
- [18] Chen Yuhong, Xu Menghua, Wang Zhaoli, et al. Re-examination of the Xie model and spatiotemporal variability in rainfall erosivity in Mainland China from 1960 to 2018 [J]. Catena, 2020, 195(1): 104-837.
- [19] 陈剑南, 刘益麟, 李朋飞, 等. 1901—2016 年黄土高原降雨侵蚀力时空变化[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 39-46.
- [20] 李大伟, 段克勤, 石培宏, 等. 秦岭中部山地降水的垂直变化研究[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1762-1774.
- [21] 高歌, 韩振宇, 殷水清, 等. 黄河流域 1961—2017 年降雨侵蚀力特征与未来变化预估[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 575-590.