DOI：10.19789/j.1004-9398.2024.05.003
文献引用：谷月程，孟丹，赵月，等.基于遥感的废弃矿区生态环境质量变化研究：以茂名油页岩矿区为例[J].首都师范大学学报（自然科学版），2024，45（5）：19-29. GU Y C，MENG D，ZHAO Y，et al. Ecological environment quality changes of abandoned mining area based on remote sensing：a case study of Maoming oil shale mining area[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2024，45（5）：19-29.

基于遥感的废弃矿区生态环境质量变化研究：以茂名油页岩矿区为例*

谷月程，孟　丹**，赵　月，花艺玮

（首都师范大学资源环境与旅游学院，北京　100048；水资源安全北京实验室，北京　100048；北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地，北京　100048；资源环境与地理信息系统北京市重点实验室，北京 100048）

摘要：茂名油页岩的开采为经济发展做出了重要贡献，然而采矿造成了植被破坏、土地损害等生态环境问题。2013年，茂名露天矿系统性生态修复工程正式启动，为实现对废弃露天矿区生态修复情况的监测，本文以茂名油页岩矿区为研究区，选取1993—2021年的Landsat系列遥感影像，从矿坑水体面积、植被覆盖度（FVC）、遥感生态指数（RSEI）3个方面对研究区生态环境时空演化规律进行分析，并通过地理探测器对研究区生态环境质量空间分布的驱动因子进行探究。研究结果表明：（1）矿坑废弃后，矿坑内的水体面积逐渐增长，在2017年之后稳定在4.6 km^2。（2）1993—2013年矿坑1 km缓冲区内FVC在较低的范围内波动，2014—2017年呈现明显增加的趋势，2017年以后增速有所减缓；北排土场FVC均值在2008年达到0.809，之后处于较为稳定的状态。（3）矿坑1 km缓冲区内，矿区修复期间RSEI均值增长的趋势最为明显，但部分区域仍出现了RSEI小幅度下降的趋势，说明在矿坑修复期间，工程的实施可能对生态环境造成一定影响；北排土场内RSEI均值呈现增长趋势，2007年以后趋于稳定。（4）研究区内土地利用和夜间灯光对生态环境质量空间分布有重要影响。本研究可为矿山管理部门及矿权企业提供决策辅助，为生态修复的长效监管机制提供技术保障。

关键词：矿区；生态修复；植被覆盖度；遥感生态指数；地理探测器
中图分类号：X16　　**文献标志码**：A

Ecological environment quality changes of abandoned mining area based on remote sensing：a case study of Maoming oil shale mining area*

GU Yuecheng，MENG Dan**，ZHAO Yue，HUA Yiwei

（College of Resource Environment and Tourism，Capital Normal University，Beijing　100048；Beijing Laboratory of Water Resource Security，Beijing　100048；State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation，Beijing　100048；Beijing Municipal Key Laboratory of Resource Environment and Geographic Information System，Beijing　100048）

Abstract：The exploitation of Maoming oil shale has significantly contributed to the local economic

收稿日期：2023-12-29
* 中国电力工程顾问集团有限公司重大科技专项项目（DG3-P01-2022）
** 通信作者：mengdan@cnu.edu.cn

development. However, the mining activities have resulted in a series of ecological and environmental issues. In 2013, the comprehensive ecological restoration project for the Maoming open-pit mine was officially initiated. To monitor the ecological rehabilitation process of abandoned open pit mines, this study focuses on the Maoming oil shale mining area. The temporal and spatial evolution characteristics of the ecological environment in the Maoming oil shale mining area after closure were analyzed using Landsat remote sensing images from 1993 to 2021, taking into consideration factors such as the water area of the pit, fractional vegetation cover (FVC), and remote sensing ecological index (RSEI). Geographical detector analysis was employed to investigate the influencing factors of ecological environment quality in the study area. The results revealed that: (1) after the mine was abandoned, the water area within the mine gradually expanded and stabilizing at 4.6 km^2 after 2017. (2) Within the 1 km buffer zone of the mine, the value of FVC exhibited minor fluctuations from 1993 to 2013, and showed a significant increase trend from 2014 to 2017, then the growth rate slowed down after 2017. The average of FVC of the north dump reached a value of 0.809 in 2008, and subsequently remained relatively stable. (3) Within the 1 km buffer zone of the mine, there was a noticeable increase in RSEI average values during the mine restoration period, although some areas still experienced slight declines, indicating that implementation of the project may have had certain impacts on the ecological environment during this phase. The average of RSEI of the north dump demonstrated an increasing trend and tended towards stability after 2007. (4) Land use and night light significantly influence spatial distribution patterns of ecological environment quality in this region. This study serves as a valuable reference for evaluating ecological environment quality in mining areas.

Keywords: mining area; ecological restoration; fractional vegetation cover (FVC); remote sensing ecology index(RSEI); geographic detector

CLC: X16 **DC**: A

0 引 言

矿产资源是我国经济发展的重要物质基础,然而长期以来大规模、高强度的矿产资源开发造成一系列生态环境问题[1],如土地挖损、压占、地表沉降、植被破坏及区域生态退化等。随着国家对生态文明建设的重视程度不断提高[2],自然资源部等相关部门都在加强对矿山环境的监督管理及矿山生态修复,达到经济跟环境和谐发展。矿山生态修复治理工作点多、面积广、持续时间长,传统的监测理念与技术已无法快速做出有效全面的监测。近年来,遥感凭借其大范围、长时序以及多尺度的优势,在矿区生态环境监测中广泛应用[3]。2022年自然资源部发布《矿山环境遥感监测技术规范:DZ/T0392—2022》,该文件规定了采矿损毁土地、矿山生态修复土地遥感监测的工作内容、程序、方法及要求等。

矿区生态环境监测主要包括:矿区地表要素的遥感提取和分类;矿区植被、水体、土壤和生物量等要素的定量遥感监测;矿区总体生态系统参数的遥感监测[4]。研究者采用单一的指标进行矿区生态环境监测研究方面取得了丰硕的成果[5-9],但难以解释矿区整体生态环境质量状况。由于生态系统的复杂性,且受多重因素综合影响,仅靠单一生态指标难以较全面地对生态环境的系统性变化进行分析[10]。2006年,《生态环境状况评价技术规范(试行):HJ/T 192—2006》中首次提出了生态环境状况指数(ecological index, EI),是一种集生物多样性、植被覆盖度、水系密度及生态质量于一体的综合指标[11]。但是,基于统计分析的生态环境质量评价方法很难应用于复杂地形区域的生态环境评价。针对EI存在的问题,徐涵秋[12]提出了完全基于遥感信息的遥感生态指数(remote sensing ecology index, RSEI)。RSEI由4个子指标(绿度、湿度、干度和热度)通过主成分分析(principal component analysis, PCA)方法对研究区各个生态因子的贡献度进行评价,进而综合分析研究区的生态环境状况[13]。RSEI能有效地解决由于个体因素而造成的各指标权重确定上的误差[14],已广泛用于城市[15]、盆地[16]、岛

屿[17]、湿地[18]等区域的生态环境质量监测评估。并且RSEI在神东矿区[13]、永定矿区[19]、紫金山矿区[20]和抚顺西露天矿[21]等很多主要矿区生态环境时空动态变化特征分析中进行了应用,表明RSEI可较客观地对矿区生态环境质量进行评价。

随着能源日趋短缺,作为石油和天然气的替代品,油页岩受到了广泛关注。我国的油页岩蕴藏量十分丰富,却几乎未被很好地利用。近年来,我国油页岩产量有580多万t,主要产区为辽宁抚顺、吉林桦甸和广东茂名,茂名可开采油页岩贮量位在全国排名第二,素有"油城"之称[22]。茂名油页岩的开发对茂名市的经济发展起到了很大的推动作用。但是,长期的大型露天采矿活动,给矿山带来了严峻的生态环境问题。现有研究多关注于生态质量在矿区开采过程中的变化规律,针对矿区关闭后生态质量变化的研究较少[10]。因此研究茂名市油页岩露天矿区废弃后生态质量变化情况,可为露天矿区的生态治理提供相应的参考依据。

本文选取广东省茂名市油页岩矿区为研究区,利用1993—2021年的Landsat系列遥感影像,从矿坑水体面积、植被覆盖度(fractional of vegetation coverage,FVC)和RSEI 3个方面对茂名油页岩矿区关闭后自然恢复期(1993—2013年)、生态治理期(2014—2017年)、治理后(2018—2021年)长时序生态环境时空演化规律进行分析,并对研究区生态环境质量空间分布的驱动因子进行探究。本研究可为矿山管理部门及矿权企业提供决策辅助,为生态修复的长效监管机制提供技术保障。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

茂名油页岩露天矿位于茂名市南部(图1,行政区域界线参考中国标准地图,审图号为GS(2020)4619),该矿区被列为国家第一个五年计划的重点建设项目之一,1956年3月16日该矿区被批准开采,1962年1月正式投产[20],1992年矿区停止采矿活动。由于多年的大规模露天开采,矿区出现了严重的生态和环境问题。油页岩开采的原地会形成巨大矿坑;页岩开采和冶炼过程中产生的表层土和废渣堆积在一起,又形成了巨大的南北排土场。1995年后,茂名石化公司对产业结构进行了调整,停止了油页岩的开采以及"人造油"的生产,转而进行高岭土的综合开发,同时,北排土场的排土任务也随之终止[23]。2013年12月31日,茂名露天矿被正式移交茂名市政府,随后茂名市政府开启了"引水、种树、建馆、修路"系统性生态修复工程[24]。2014年,茂名市政府投入约5 000万元为该矿坑建设引水工程,旨在将高州水库、鉴江、矿湖和小东江水系连接起来[25-26]。包括开挖950 m引水渠和1 130 m泄洪渠、扩建800 m公馆支渠、筑填920 m大坝、堆砌4万m^2人工沙滩浴场5部分内容,该工程于2014年10月开始动工。2016年3月31日凌晨,引水工程正式通水,形成了一个容量为1.6亿m^3,集生态、蓄水、灌溉和调洪等于一体的多功能水库;2017年8月13日,生态修复工程完工,茂名市露天生态公园的矿坑湖被命名为"好心湖";2017年12月27日,茂名露天矿生态公园获批成为第四批国家矿山公园[25-26]。由于露天生态公园绝大部分在矿坑1 km缓冲区内,而南排土场在该矿区废弃前便开始了生态修复,与本研究的研究时间段不符,因此本文着重分析1993—2021年茂名油页岩露天矿坑1 km缓冲区及北排土场生态环境变化。

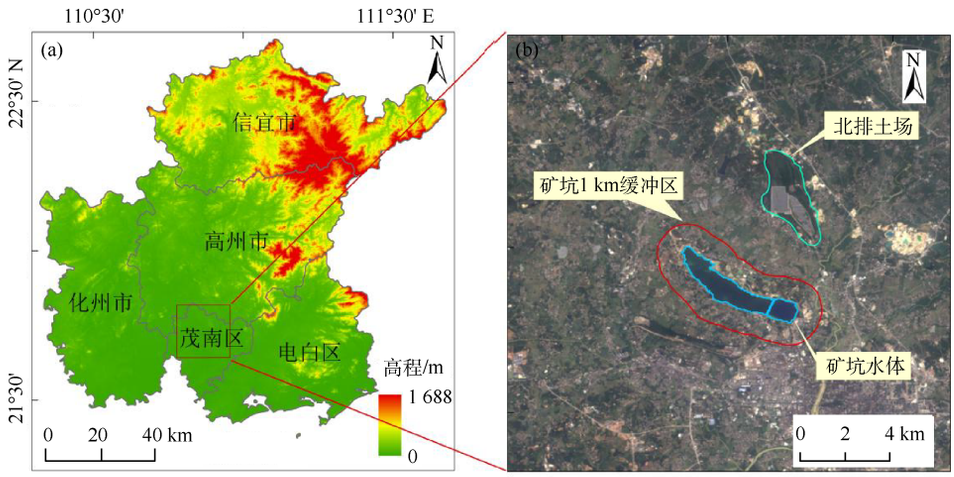
1.2 数据源

本研究选取的遥感影像数据来源于Google Earth Engine(GEE)平台提供的Landsat系列遥感影像的Tier1(T1)级别地表反射率(surface reflectance,SR)数据集。1993—2011年选用Landsat5数据,2012年选用Landsat7数据,2013—2021年选用Landsat8数据,每个年份选取5—10月数据,筛选云量低于40%的影像,经过去云合成处理。该数据产品空间分辨率30 m,时间分辨率16 d,且已经过几何校正、辐射定标等预处理,符合几何和辐射的品质要求。选取2020年数据,构建RSEI影响因子指标体系,人为因素包括土地利用类型(land-use and land-cover change,LUCC)、人口密度(population density,POP)、夜间灯光(night time light,NL),自然因素包括数字高程模型(digital elevation model,DEM)、坡度、坡向、改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index,MNDWI)。数据来源见表1。

2 研究方法

2.1 水体指数与FVC计算

(1)MNDWI。该模型在水体提取方面具有明显的优势,避免了在水体提取中阴影造成的影响。因此本研究利用MNDWI模型提取水体,该模型利用绿波段和中红外波段计算MNDWI,再选取适当



注:在图遥感影像为2017年12月8日Landsat8真彩色影像数据。

图1 研究区位置

(a)广州省茂名市高程图;(b)茂名矿区遥感图

表1 数据详细说明

数据产品	数据来源	年份	空间分辨率/m	数据用途
Landsat	Google Earth Engine(GEE)数据库	1993—2021	30	用于MNDWI、FVC、RSEI指数计算
LUCC	地球大数据科学工程数据共享服务系统(https://data.casearth.cn/)	2020	30	进行RSEI驱动因子分析
NL	美国国家海洋和大气管理局NPP-VIIRS数据集(https://www.noaa.gov/)	2020	750	进行RSEI驱动因子分析
POP	航天宏图PIE云平台WorldPop人口数据集(https://engine.piesat.cn/)	2020	100	进行RSEI驱动因子分析
DEM	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)		30	提取坡度、坡向,进行RSEI驱动因子分析

注:MNDWI为改进的归一化差异水体指数;FVC为植被覆盖度;RSEI为遥感生态指数;LUCC为土地利用类型;NL为夜间灯光;POP为人口密度;DEM为数字高程模型。

的阈值对结果进行分割,即可将水体与其他地物类型进行分离。MNDWI的计算方法为

$$I_{\mathrm{MNDW}}=\frac{\rho_{\mathrm{green}}-\rho_{\mathrm{mir}}}{\rho_{\mathrm{green}}+\rho_{\mathrm{mir}}},\tag{1}$$

式中:ρ_{green}和ρ_{mir}分别为绿波段反射率和中红外波段反射率。

(2)FVC。本研究利用FVC分析矿区及周边植被修复情况。基于GEE云平台对Landsat数据进行去云处理,并计算研究区内的NDVI值,利用最大值合成算法获取NDVI最大值空间分布结果,NDVI表达式为

$$I_{\mathrm{NDV}}=\frac{\rho_{\mathrm{nir}}-\rho_{\mathrm{red}}}{\rho_{\mathrm{nir}}+\rho_{\mathrm{red}}},\tag{2}$$

式中:ρ_{nir}和ρ_{red}分别代表近红外波段和红波段的反射率。在此基础之上,利用像元二分模型将每个像元的NDVI值计算FVC[27],即

$$C_{\mathrm{FV}}=\frac{I_{\mathrm{NDV}}-I_{\mathrm{NDV}}^{\mathrm{soil}}}{I_{\mathrm{NDV}}^{\mathrm{veg}}-I_{\mathrm{NDV}}^{\mathrm{soil}}},\tag{3}$$

式中:$I_{\mathrm{NDV}}^{\mathrm{veg}}$、$I_{\mathrm{NDV}}^{\mathrm{soil}}$分别代表纯植被像元和纯裸地像元的NDVI值。参考文献[27],分别在累积概率95%和5%处取得N_{veg}和N_{soil}。

2.2 RSEI指标计算

(1)绿度指标。本文选取NDVI作为评价研究区生态状况的绿度指标,计算公式同公式(2)。

(2)湿度指标。湿度指标由缨帽变换获得,与植被和土壤湿度密切相关,公式为:

$$W_{\mathrm{TM}}=0.031\,5\rho_{\mathrm{blue}}+0.202\,1\rho_{\mathrm{green}}+0.310\,2\rho_{\mathrm{red}}+0.159\,4\rho_{\mathrm{nir}}-0.680\,6\rho_{\mathrm{swir1}}-0.610\,9\rho_{\mathrm{swir2}},\tag{4}$$

$$W_{\mathrm{OLI}}=0.151\,1\rho_{\mathrm{blue}}+0.197\,3\rho_{\mathrm{green}}+0.328\,3\rho_{\mathrm{red}}+0.340\,7\rho_{\mathrm{nir}}-0.711\,7\rho_{\mathrm{swir1}}-0.455\,9\rho_{\mathrm{swir2}},\tag{5}$$

式中:W_{TM}和W_{OLI}分别为TM和OLI传感器计算的湿度指标;ρ_{blue}、ρ_{swir1}、ρ_{swir2}分别为蓝、短波红外1、短波红外2波段的反射率。

(3)干度指标(normalized difference build and soil index,NDBSI)。由建筑指数(index-based built-

up index,IBI)和裸土指数(bare soil index,SI)构成,公式为:

$$I_{\mathrm{NDBS}} = (I_{\mathrm{IB}} + I_{\mathrm{S}})/2, \tag{6}$$

$$I_{\mathrm{IB}} = [2\rho_{\mathrm{swir1}}/(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{nir}}) - \rho_{\mathrm{nir}}/(\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{red}}) - \rho_{\mathrm{green}}/(\rho_{\mathrm{green}} + \rho_{\mathrm{swir1}})]/[2\rho_{\mathrm{swir1}}/(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{nir}}) + \rho_{\mathrm{nir}}/(\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{red}}) + \rho_{\mathrm{green}}/(\rho_{\mathrm{green}} + \rho_{\mathrm{swir1}})], \tag{7}$$

$$I_{\mathrm{S}} = [(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{red}}) - (\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{blue}})]/[(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{red}}) + (\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{blue}})]。 \tag{8}$$

(4)热度指标。用地表温度代替,计算公式为:

$$L_i = g_{\mathrm{ain}} \times D_{\mathrm{N}} + b_{\mathrm{ias}}, \tag{9}$$

$$T_{\mathrm{b}} = K_2/\ln(K_1/L_i + 1), \tag{10}$$

$$T_{\mathrm{LS}} = T_{\mathrm{b}}/[1 + (\lambda T_{\mathrm{b}}/\alpha)\ln\varepsilon_i], \tag{11}$$

式中:L_i为TM、ETM+和OLI传感器像元(i)热红外波段的辐射值;g_{ain}和b_{ias}分别为热红外波段的增益和偏置值,单位分别为W/(m²·sr·μm)和W/(m²·sr·μm),可从影像的头文件读取;D_{N}为像元的灰度值;T_{b}为传感器的亮度温度;K_1和K_2为定标参数;λ为TM和OLI热红外波段的中心波长;α为常数;ε_i为地表辐射率[10]。

2.3　RSEI模型构建

本文选取绿度、湿度、干度和热度4个指标,利用主成分变换来构建RSEI。各指标的计算方法如表1所示,由于进行计算的指标具有各自不同的单位及量纲,因此,在进行PCA之前,必须对各个指数进行归一化处理,使其量纲统一到[0,1][28]。归一化公式为

$$I_{\mathrm{nor}} = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \tag{12}$$

式中:I_{nor}为某一指标的归一化结果;I_i为该指标在像元i中的值;$I_{\max}$和$I_{\min}$分别为该指标的最大值和最小值[10]。

经过归一化后的各指标可用于进行PCA,将各指标中主要的信息集中到第一主成分上(P_{C1})。该方法通过各指标自身对主成分的贡献度来确定各个指标对RSEI的影响,而不是通过人为确定各指标权重,从而避免了权重设定而导致的结果偏差,对PCA后的P_{C1}进行归一化处理,得到RSEI计算式为

$$I_{\mathrm{RSE}} = \frac{P_{\mathrm{C1}} - P_{\mathrm{C1}_{\min}}}{P_{\mathrm{C1}_{\max}} - P_{\mathrm{C1}_{\min}}}, \tag{13}$$

式中:$P_{\mathrm{C1}_{\min}}$和$P_{\mathrm{C1}_{\max}}$分别为第一主成分上最小值和最大值;RSEI值域为[0,1],其值越大,生态质量越好,反之,生态质量越差[12]。

2.4　地理探测器

地理探测器是一种探测空间分异性及其背后驱动因子的统计学方法,分为因子探测器、交互探测器、生态探测器和风险探测器4种。本文选择因子探测器和交互探测器2种方法,以探究各因子对生态质量的影响程度,用q值衡量,公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2}, \tag{14}$$

式中:$h = 1, 2, \cdots, L$为因变量(Y)或自变量(X)的分类;N_h和N分别为层h和全区的单元数;σ_h^2和σ^2分别是层h和Y值的方差。q值为[0,1],q值越接近1,X对Y的解释程度越高,反之则越低。

3　结果与分析

3.1　水体面积变化分析

本文将水体面积的时间序列变化进行监测分析。为了避免单景影像提取水体造成误差,对每年5—10月的Landsat数据进行去云处理,29 a共160景数据,以无云像元平均值合成获取每年的影像。利用MNDWI对研究区内的水体进行提取,研究区不同年份的MNDWI,如图2所示。

为更精细分析矿坑水体的面积,基于MNDWI数据,利用阈值法(MNDWI≥0.25)提取矿坑的水体面积,水体面积的变化趋势如图3所示。1992年矿坑废弃后,由于矿坑的排水系统失修,1993年矿坑内开始出现积水,至2003年矿坑内的水体面积呈现逐渐增加的趋势;至2012年,矿坑内的水体面积呈现缓慢下降的趋势;2012年以后,矿坑水体面积上升速度较快,2016年引水工程正式通水,到2017年,矿坑水体面积趋于稳定。

3.2　FVC变化分析

矿山覆绿是矿山修复工程的重要组成部分。本文利用长时序的Landsat遥感数据提取研究区1993—2021年的FVC,结果见图4。本矿区对土地破坏及土地压占主要位于矿坑及南北2个排土场。由于南排土场从1985年开始造林恢复,1994年已得到改善。北排土场范围内FVC从1997年之后开始出现改善的趋势,2009年该区域植被覆盖情况得到有效改善,但在2017年出现了较大面积的FVC较低的区域。在矿坑1 km缓冲区范围内,1993—2013年间FVC逐渐改善,但其改善的速率较慢;在2014—2017年该矿区实施生态修复工程期间,该区域内的FVC出现明

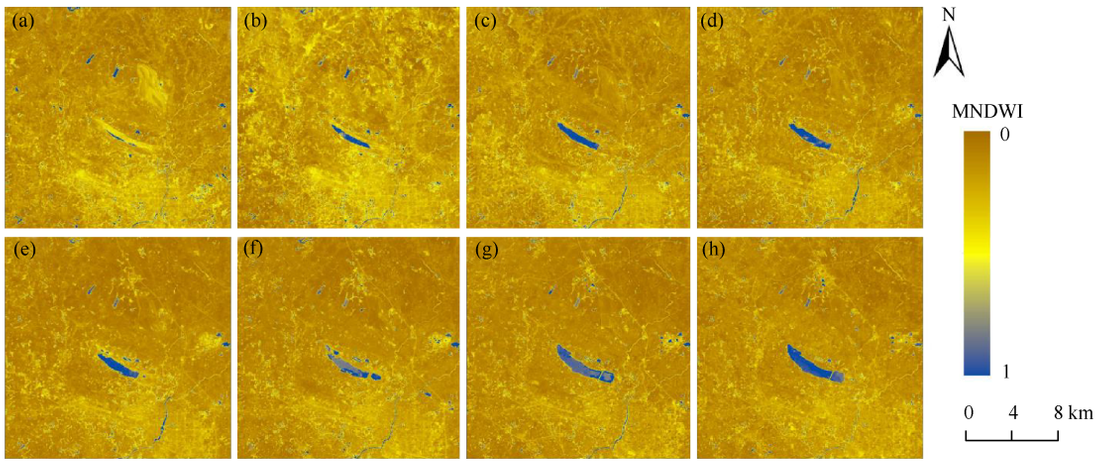


图2　不同年份研究区MNDWI变化

(a)1993年;(b)1997年;(c)2001年;(d)2005年;(e)2009年;(f)2013年;(g)2017年;(h)2021年

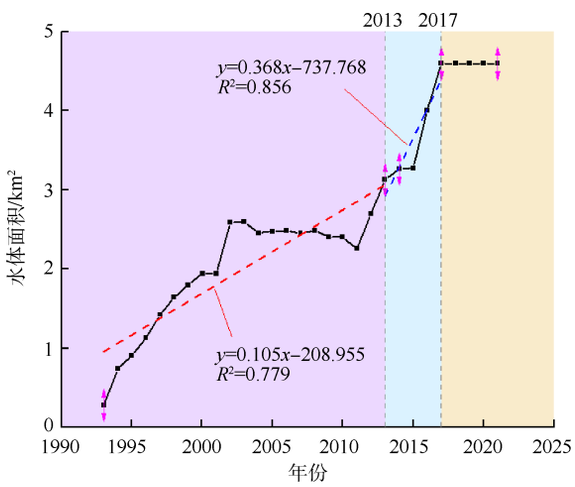


图3　矿坑水体面积

显改善的趋势;2018—2021年间FVC依旧处于改善的趋势,但该变化趋于平缓。由于研究区东南部为城市建设用地,FVC较低。经对比,矿区采矿场及现矿区公园均在目前的“好心湖”1 km范围内。为更详细分析研究区内矿区废弃后FVC的变化趋势,选取矿坑1 km缓冲区范围内及北排土场2个区域,分析2个区域每年FVC的变化情况,构建2个区域近29 a的植被覆盖度均值年际变化(图5)。

由图5(a)可知,在矿坑1 km缓冲区范围内,1993—2013年间FVC逐渐改善,但其改善的速率较慢,表明自1993—2013年矿区修复工程之前,矿坑1 km缓冲区范围内的植被覆盖度情况易受其他因素干扰,处于一种波动变化的状态。自2013年矿区移交茂名市政府并随之开启了“引水、种树、建馆、修路”系统性生态修复工程,至2017年,FVC均值呈现上升的趋势,表明在2013—2017年该矿区实施生态修复工程期间,该区域内的FVC出现明显改善的趋势。2017—2021年,FVC均值依旧呈现上升的趋势,但相比于修复工程期间,该趋势有所减缓。

由图5(b)可知,自该矿区废弃以来,北排土场的FVC均值呈现逐渐上升的趋势。从具体变化情

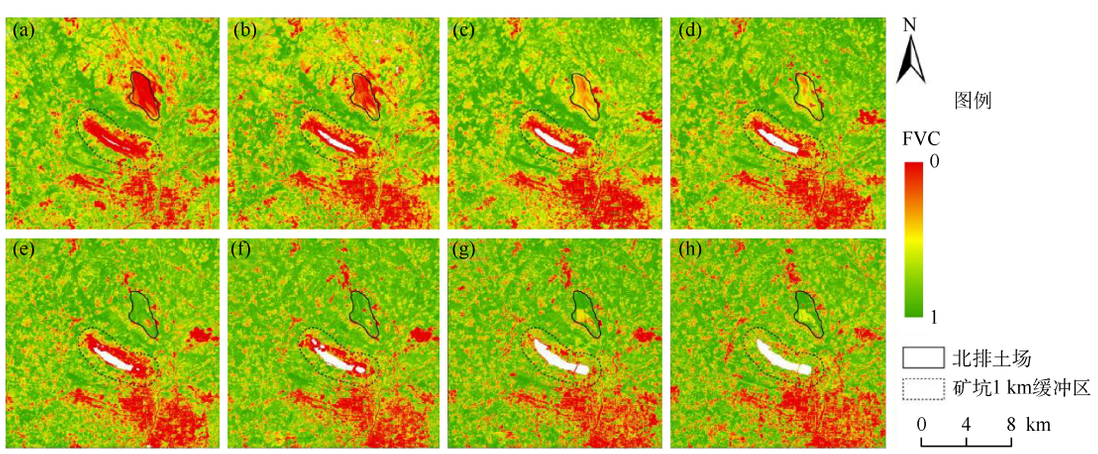


图4　研究区FVC

(a)1993年;(b)1997年;(c)2001年;(d)2005年;(e)2009年;(f)2013年;(g)2017年;(h)2021年

况分析来看,北排土场FVC均值在1993—2006年呈现较为稳定的升高趋势,2006—2007年出现了急剧增长的情况;在2008—2016年,北排土场FVC均值稳定在0.80左右,但在2017年出现了较为明显的下降趋势,经对比遥感影像,2017年北排土场内增加了较大面积的不透水面,致使北排土场整体FVC均值下降,2018—2021年FVC稳定在0.78左右。

3.3　RSEI变化分析

基于GEE中Mask算法对每年5—10月的Landsat数据进行去云处理,以无云像元平均值合成获取每年的影像,利用每年的合成结果影像计算研究区1993—2021年的RSEI。研究表明RSEI对水体区域并不适用,需要将水体区域进行掩膜,而该区域水体范围变化较大,若对不同年份数据做水体掩膜,导致研究区面积有所变化,通常情况认为水体的生态环境质量最优,所以本研究将矿坑水体的RSEI值赋值为1,部分年份RSEI值的空间分布如图6所示。为更有针对性地分析研究区内废弃矿区的生态环境质量,重点选取矿坑1 km缓冲区范围内及北排土场2个区域进行分析。由RSEI时间序列空间分布图可知:该矿自1992年关闭以来北排土场附近的生态质量有变好的趋势;在2013年之前矿坑及其附近的生态环境质量都比较差。自2013年该矿区开始治理以来,矿坑周围的生态环境得到明显改善,但由于距离城区较近,该矿区周围环境质量在一定程度上受到城市扩展的影响。

为进一步展示茂名油页岩矿区修复期间生态环境变化状态,选取矿坑1 km缓冲区内生态质量明显改善的3个样点区(A、B、C)与明显变差的3个样点区(D、E、F),并利用2013和2017年Landsat8影像和2013—2017年的RSEI差值图进行验证,并从差值图中选取变化明显的区域进行对比分析,如图7

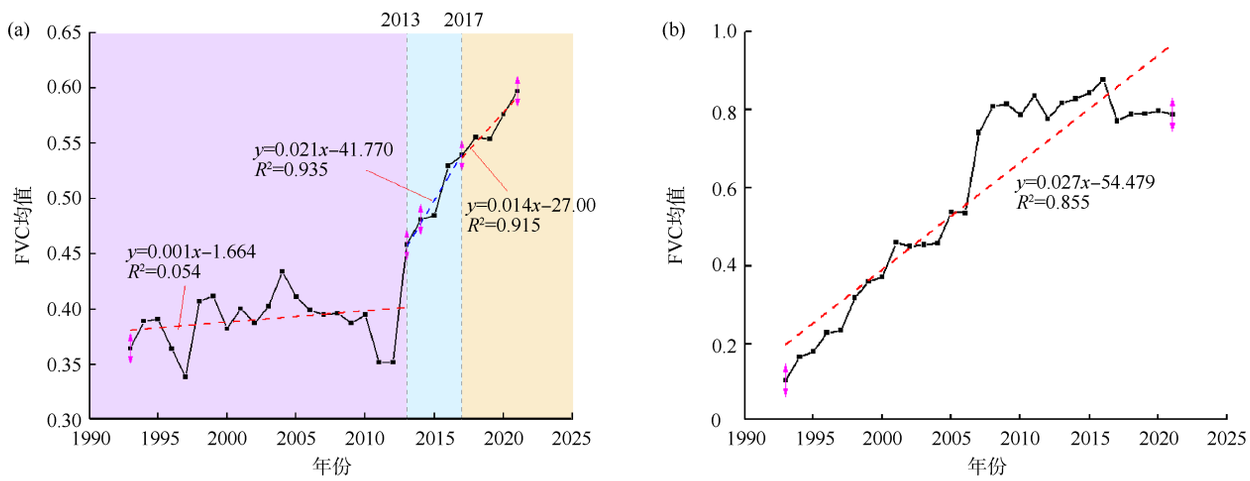


图5　1993—2021年矿区FVC均值

(a)矿坑1 km缓冲区;(b)北排土场

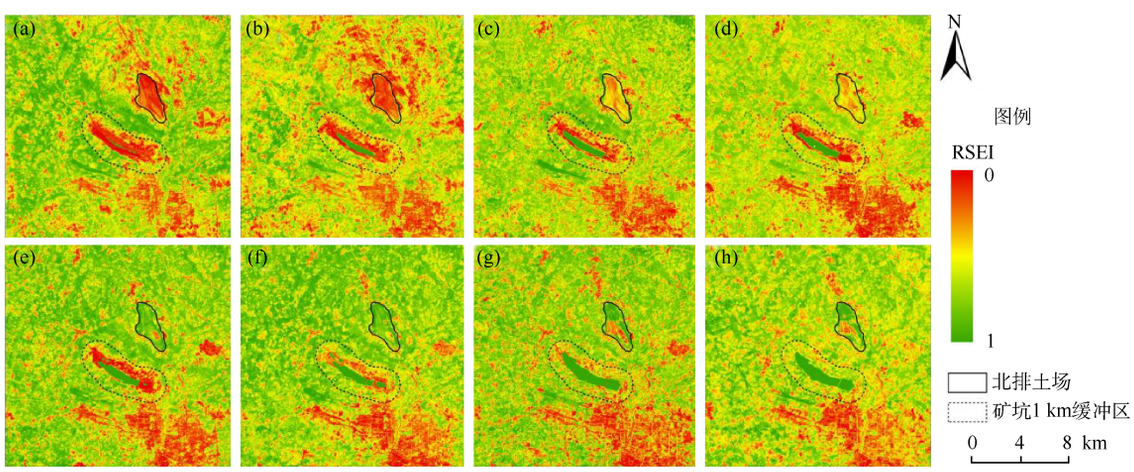


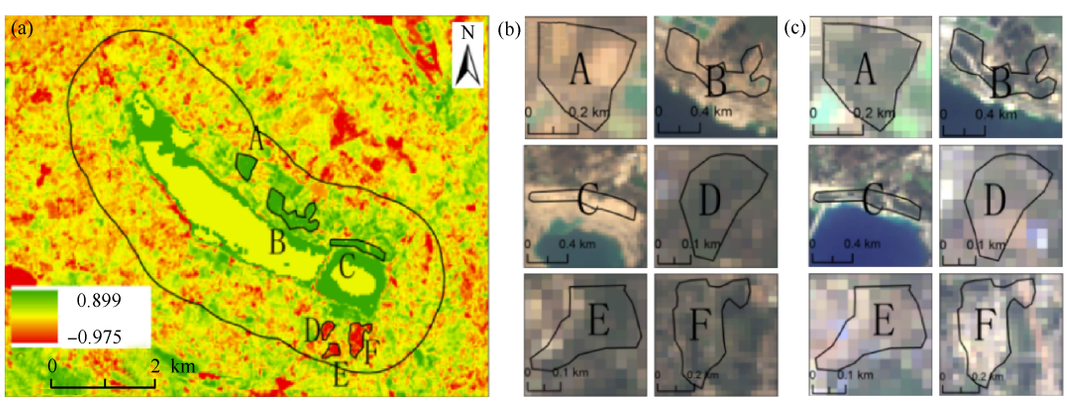
图6　不同年份研究区RSEI

(a)1993年;(b)1997年;(c)2001年;(d)2005年;(e)2009年;(f)2013年;(g)2017年;(h)2021年

所示。2013—2017年,样点区A、B、C的3个样点区的生态质量得到改善,结合2013和2017年遥感影像,这3个样点区的地表覆盖类型发生了改变,均由非植被覆盖变为植被;而D、E、F的3个样点区由植被转为裸土或不透水面,导致生态质量变差。经对比,A、B、C的3个样点区均在茂名露天矿生态公园范围内。

为更详细分析矿坑附近及北排土场的生态质量变化趋势,分析2个区域每年RSEI的变化情况,构建2个区域29 a的RSEI年际变化图,如图8所示。1993—2013年矿坑1 km范围内RSEI均值呈现波动上升的趋势,表明自该矿区废弃以来,矿坑附近生态质量呈现一种波动的状态;2013—2017年矿坑修复工程期间,2014年该矿区生态质量出现了短暂的下降,总体来看RSEI均值增长较快;2017—2021年,RSEI均值增速有所放缓,但是仍高于生态修复工程实施前的增速,且在矿区修复前、修复工程中和修复后3个不同阶段,矿区修复工程期间RSEI变化拟合曲线斜率最大,表明在该矿区修复期间,矿坑附近的生态环境改善的速度更快。北排土场RSEI均值在1993—2006年呈现一种波动上升的趋势,在2007年出现了急剧升高的趋势,2007年以后RSEI均值在0.7左右波动变化,2017年出现了比较明显的下降的趋势。

为了对研究区内的生态环境进行定量化分析,参考文献[29]方法,选取1993、2013、2017和2021年的RSEI值绘制成像元概率分布图(图9)。与1993年相比,2013年RSEI在较差一级的像元数明显减少,生态质量值为1,即水体的像元数明显增加;相较于2013年,2017年的生态质量值为1的像元数明显增加,表明该矿区在治理期间,引水工程取得成效,综合图7中的内容,在矿坑1 km缓冲区范围内,矿区生态公园范围内的生态治理效果明显,而矿区生态公园之外的区域仍易受到其他因素干扰而遭到破



注:A~F为样点区。

图7　生态质量明显变化区域遥感影像对比

(a)2013—2017年矿坑附近RSEI变化;(b)2013年Landsat8影像;(c)2017年Landsat8影像

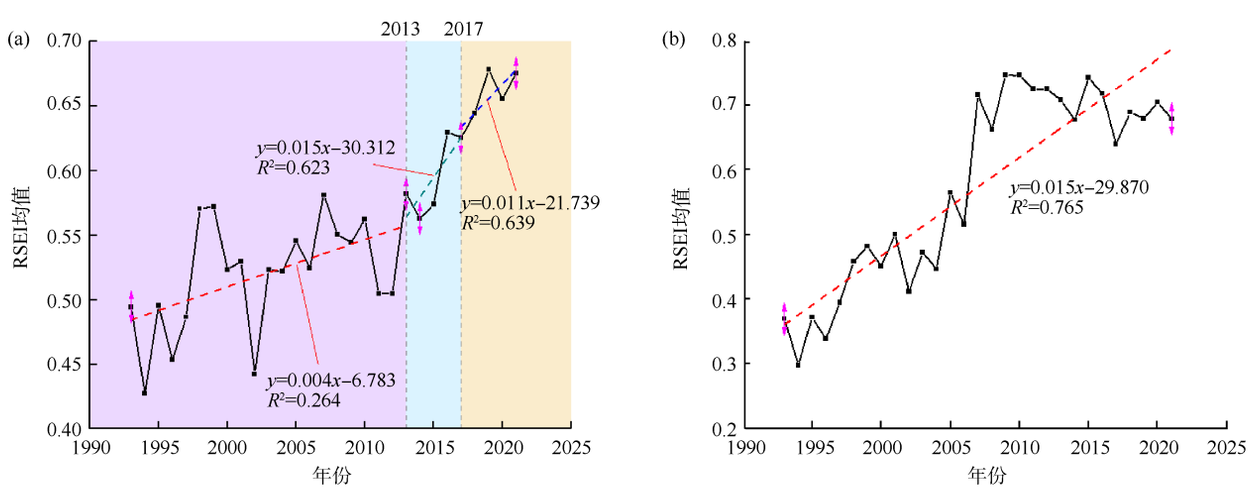


图8　1993—2021年矿区RSEI均值变化

(a)矿坑1 km缓冲区;(b)北排土场

坏;相较于2017年,2021年矿坑的水体面积没有变化,生态质量在较差一级中的像元数明显减少,良一级范围内的像元数明显增加,说明在2017年生态修复工程结束之后,该矿区的生态环境仍有所提升。

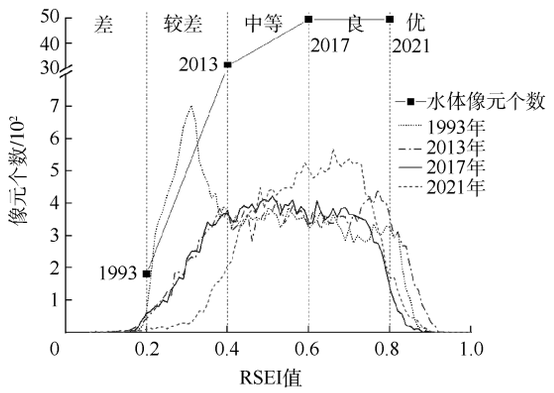


图9　矿坑1 km缓冲区内RSEI变化特征及水体像元变化

3.4　生态环境质量影响因子探测分析

引入地理探测器揭示影响生态环境质量的因子,选取2020年数据,以RSEI为因变量,自变量包括人为因素(LUCC、POP、NL)和自然因素(DEM、坡度、坡向、MNDWI),其中POP、NL、DEM、坡度、坡向和MNDWI以自然间断点方法分为5个等级。在计算RSEI时,将水体的RSEI值赋值为1,因此利用地理探测器进行分析时排除水体部分,土地利用类型如图10所示。土地利用类型数据通过借鉴相关研究[30],将各类别进行定量化处理,林地、草地、耕地、建设用地及其他用地分别赋值1、2、3、4和5。

单因子探测结果中,LUCC、NL、POP、DEM、坡度、坡向和MNDWI的q值(各驱动因子对变量的解释程度)分别为0.466、0.232、0.112、0.009、0.003、0.001和0.228,其中LUCC的q值最高(0.466),NL次之(0.232),说明研究区内生态环境质量受人为因素的影响较大。

交互探测结果(表2)表明,各因子均有较为显

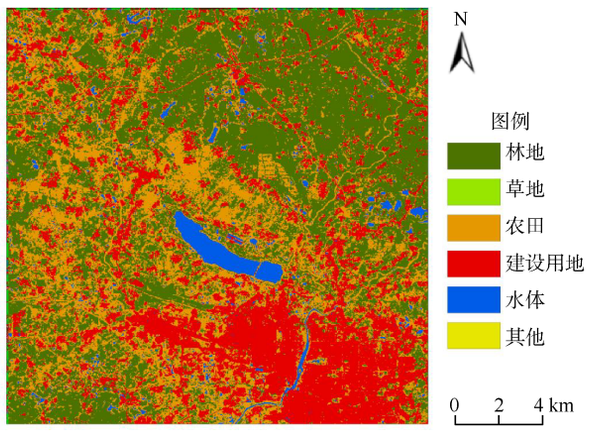


图10　研究区土地利用数据

著的交互作用,任意2个因子的交互作用均大于单因子对RSEI的影响,说明茂名油页岩矿区及周边地区遥感生态指数的空间分布差异是多个因子共同作用的结果。其中LUCC与MNDWI交互作用的驱动力最强(0.506),LUCC与NL交互作用的驱动力次之(0.492),结合前文中单因子探测结果可以看出,研究区RSEI空间分布与人类活动有着密切关系。

4　讨　论

针对茂名油页岩废弃矿区的研究多关注单因素的变化及影响,如有学者从矿区土壤[31]、微生物[32]、重金属[33]和矿坑积水[20]等方面对茂名油页岩矿区进行了研究,利用遥感对该矿区整体生态环境进行分析的研究较少。矿山生态修复治理的成效可通过遥感监测进行评估,如邹兰兰[34]对灵泉露天矿生态环境及修复效果进行了分析,结果表明植被覆盖度大幅度增长的主要原因是持续的生态修复工程治理。本文基于GEE平台对茂名油页岩矿区废弃后的生态质量进行了分析,结果表明在矿区自然恢复期间(1993—2013年)及治理后(2018—2021年)矿坑周边生态质量呈现缓慢改善的趋势,2014—2017年主要针对矿坑周边区域进行生态修复,矿坑周边生态质量得到大幅度提升。基于遥感数据看

表2　交互探测结果

因子	LUCC	NL	POP	DEM	坡度	坡向	MNDWI
LUCC	0.466	0.492	0.476	0.474	0.468	0.467	0.506
NL	0.492	0.232	0.239	0.235	0.235	0.234	0.339
POP	0.476	0.239	0.112	0.124	0.120	0.113	0.277
DEM	0.474	0.235	0.124	0.009	0.020	0.011	0.236
坡度	0.468	0.235	0.120	0.020	0.003	0.005	0.236
坡向	0.467	0.234	0.113	0.011	0.005	0.001	0.230
MNDWI	0.506	0.339	0.277	0.236	0.236	0.230	0.228

出北排土场则在2007年出现了RSEI和FVC大幅度升高的情况,通过查阅相关资料,茂名市于“十一五”期间实施了生态治理相关措施,可能是使得北排土场区域生态质量得到改善的原因。基于遥感数据可以监测矿区生态环境质量的变化,但是生态环境质量为何变化还需要结合当地具体自然-人为影响条件进行分析,鉴于本文研究重点是矿区生态环境的遥感监测,后续研究将对具体的生态环境变化的原因展开分析研究。

本文在对矿区生态质量进行分析的基础上,运用地理探测器分析了影响该矿区及其周边生态环境质量的因素,得出LUCC、NL等人为因素对该区域生态质量的影响较大。与前人研究得出结论类似,如杜华栋等[35]利用地理探测器对榆神府矿区景观生态风险进行了分析,得出对榆神府矿区景观生态风险影响程度最大的因子是人为干扰度;黄锦等[36]利用地理探测器对大冶市典型矿区生态质量变化的驱动因素进行了分析,得出LUCC是对研究区生态质量解释力最大的因子。因此可知人为活动是影响矿区生态环境的重要影响因素。

5 结 论

本文以茂名油页岩矿区为研究区,选取GEE平台1993—2021年的Landsat系列遥感影像,对茂名油页岩矿区关闭后生态环境时空演化规律进行分析,并通过地理探测器对研究区生态环境质量空间分布的驱动因子进行探究。主要结论如下:

(1)从矿坑水体面积的变化来看,茂名油页岩矿区废弃后,由于矿坑的排水系统失修,周边裸露地带无法蓄积地表雨水,降水得不到有效疏导汇入露天矿坑,积蓄成湖。矿坑内水体面积1993—2003年呈现增加趋势;2003—2012年出现了下降的趋势;2012年以后逐渐增长;2016年矿坑引水工程,矿坑内水体面积快速增长;2017年以后趋于稳定。

(2)从植被覆盖度的变化趋势来看,在矿区生态修复工程开始之前,矿坑1 km缓冲区内的植被主要以自然恢复为主,FVC均值在较低的范围内波动;矿区生态修复工程期间,FVC均值呈现上升的趋势;2017年修复工程结束后该趋势有所减缓,但植被覆盖情况依旧呈现改善的趋势,表明在该矿区修复期间,矿坑1 km缓冲区内的FVC得到有效改善。1993—2006年北排土场范围内的FVC均值呈现上升趋势;2007年明显提高,之后FVC均值在0.80左右波动变化;2017年由于北排土场范围内出现了较大面积的不透水面,导致北排土场内的FVC均值出现了明显的下降趋势,但2017年及以后依旧保持在0.78左右。

(3)从RSEI的变化趋势来看,在矿坑1 km缓冲区范围内,矿区修复前、修复工程中和修复后3个阶段,虽然RSEI均值均呈现上升的趋势,但在修复工程中趋势拟合线斜率最大,表明修复期间生态质量恢复的速度最快,该趋势与FVC变化趋势较为一致,但在修复工程初期仍出现了生态质量下降的趋势,表明在修复工程中施工过程仍不可避免会对生态质量造成影响。而北排土场RSEI均值变化整体趋势与FVC均值变化趋势基本一致,只是在少数年份有所不同。

(4)经地理探测器分析,各因子影响力从大到小依次为LUCC、NL、MNDWI、POP、DEM、坡度和坡向。交互因子的解释力最大的是LUCC与MNDWI,其次是LUCC与NL,说明人为因素对研究区的生态环境质量有着重要影响。

本研究利用长时序遥感影像获取生态指标,分析矿区废弃后不同修复阶段的生态环境质量,但RSEI模型未考虑土地覆盖类型、土壤质量、空气质量、水体质量、景观结构等因素对矿区生态质量的影响,后续将加强这些方面的研究。

参 考 文 献

[1] 张进德,郗富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J].生态学报,2020,40(21):7921-7930.

[2] 新华社.中国共产党第十八次全国代表大会关于《中国共产党章程(修正案)》的决议[EB/OL].(2012-11-14)[2023-06-01].https://www.xinhuanet.com/18cpcnc/2012-11/14/c_113690949.htm.

[3] 殷亚秋,蒋存浩,鞠星,等.海南岛2018年矿山地质环境遥感评价和生态修复对策[J].自然资源遥感,2022,34(2):194-202.

[4] 张成业,李军,雷少刚,等.矿区生态环境定量遥感监测研究进展与展望[J].金属矿山,2022(3):1-27.

[5] 王国芳,毕如田,张吴平,等.典型矿区植被覆盖度时空分布特征及影响因素[J].生态学报,2020,40(17):6046-6056.

[6] 刘英,雷少刚,陈孝杨,等.神东矿区植被覆盖度时序变化与驱动因素分析及引导恢复策略[J].煤炭学报,2021,46(10):3319-3331.

[7] 张苗琳.基于时空融合数据的矿区植被覆盖变化检测[D].北京:中国地质大学(北京),2019.

[8] 马威.主动微波遥感矿区地表土壤水分反演实验研究

[D].焦作：河南理工大学，2018.
[9] 王喆，余江宽，路云阁.西部典型煤矿区水体污染遥感监测应用[J].生态与农村环境学报，2019，35(4)：538-544.
[10] 秦璐，陈炳乾，于洋，等.基于遥感生态指数的矿井关闭前后生态环境时空变化规律研究[J].金属矿山，2023(3)：242-249.
[11] 杜高奇，李自强，赵勇，等.基于RSEI的黄河流域生态环境质量监测与驱动因素分析[J].水利水电技术(中英文)，2022，53(12)：81-93.
[12] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报，2013，33(24)：7853-7862.
[13] 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.
[14] YUAN B D，FU L N，ZOU Y A，et al. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin，based on RSEI[J]. Journal of Cleaner Production，2021，302：126995.
[15] HUANG H P，CHEN W，ZHANG Y，et al. Analysis of ecological quality in Lhasa Metropolitan Area during 1990—2017 based on remote sensing and Google Earth Engine platform[J]. Journal of Geographical Sciences，2021，31(2)：265-280.
[16] ARIKEN M，ZHANG F，LIU K，et al. Coupling coordination analysis of urbanization and eco-environment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data[J]. Ecological Indicators，2020，114：106331.
[17] LIU C，YANG M H，HOU Y T，et al. Spatiotemporal evolution of island ecological quality under different urban densities：a comparative analysis of Xiamen and Kinmen Islands，southeast China[J]. Ecological Indicators，2021，124：107438.
[18] QURESHI S，ALAVIPANAH S K，KONYUSHKOVA M，et al. A remotely sensed assessment of surface ecological change over the Gomishan Wetland，Iran[J]. Remote Sensing，2020，12(18)：2989.
[19] 吴志杰，王猛猛，陈绍杰，等.基于遥感生态指数的永定矿区生态变化监测与评价[J].生态科学，2016，35(5)：200-207.
[20] 周俊光.茂名市油页岩露天矿酸性积水成因分析及治理措施[D].衡阳：南华大学，2019.
[21] 孙灏，胡佳琪，蒋金豹，等.顾及“岩土差异”和植物多样性的矿区生态环境遥感监测模型[J].煤炭学报，2023，48(增刊1)：219-232.
[22] 梁增英，陈文仲，王春华，等.油页岩开发与利用的可行性研究[J].工业炉，2008(2)：10-13.
[23] 朱国武，戴林，伍思伟.运用循环经济理论研究矿山环境整治[J].南方论刊，2011(3)：14-17.
[24] 周 颖，田建川.“城市伤疤”变身生态公园[N].中国环境报，2017-09-20(004).
[25] 郑秀亮.昔日“城市伤疤”，今日“矿山公园”：茂名市油页岩露天矿废弃矿山生态修复之路[J].环境，2022(8)：35-37.
[26] 吴家龙，苏少青，冯妙玲，等.茂名油页岩露天矿生态修复的实践探索[J].国土资源，2019(11)：56-58.
[27] 李茂林，闫庆武，仲晓雅，等.干旱半干旱地区植被覆盖度变化及主导因素分析：以锡林郭勒为例[J].生态与农村环境学报，2021，37(12)：1548-1558.
[28] 朱翔，王晖，吴宜进，等.基于Google Earth Engine的长江中游城市群城镇化与生态环境耦合协调研究[J].长江流域资源与环境，2022，31(12)：2706-2717.
[29] 刘虎，姜岳，夏明宇，等.基于30年遥感监测的矿区生态环境变化：以南四湖周边矿区为例[J].金属矿山，2021(4)：197-206.
[30] 王志杰，苏嫄.南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J].生态学报，2018，38(2)：432-442.
[31] 刘华，郭先霞，李璐.茂名南、北排土场生物修复中土壤性状变化的研究[J].安徽农业科学，2012，40(12)：7112-7114+7129.
[32] 蒋绍妍，王文星，薛向欣，等.利用PCR-DGGE分析茂名油页岩矿区土壤细菌群落组成[J].中南大学学报(自然科学版)，2015，46(12)：4719-4724.
[33] MA T F，LUO H J，HUANG K B，et al. Hierarchical health risk assessment and influence factors of an ecological post-restoration oil shale mining area based on metal bioavailability[J]. Science of the Total Environment，2022，821：153480.
[34] 邹兰兰.灵泉露天煤矿生态环境遥感监测与修复效果评价[D].北京：中国矿业大学，2023.
[35] 杜华栋，刘云龙，毕银丽，等.1995—2021年榆神府矿区景观生态风险时空异质性研究[J].煤炭科学技术，2024，52(6)：270-279.
[36] 黄锦，陈勇，梁雅琪，等.大冶市典型矿区生态质量时空变化及驱动因子分析[J].化工矿物与加工，2022(9)：1-11.

(责任编辑：李拓宇)