

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.04.001

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:黄兰,陈秋计,冯建中,刘瑞祥.基于地理探测器的神府矿区生境质量时空特征及驱动机制分析[J].西安理工大学学报,2023,39(4):451-463.

HUANG Lan, CHEN Qiuji, FENG Jianzhong, LIU Ruixiang. Spatial-temporal characteristics and driving mechanisms analysis of habitat quality in Shenfu mining area based on Geodetector[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023,39(4):451-463.

# 基于地理探测器的神府矿区生境质量 时空特征及驱动机制分析

黄 兰<sup>1</sup>, 陈秋计<sup>1</sup>, 冯建中<sup>2</sup>, 刘瑞祥<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国农业科学院 农业信息研究所, 北京 100081)

**摘要:**我国西部矿区生态环境脆弱,煤炭资源丰富,大规模的开发活动引起一系列的生态环境问题,定量评估其生境质量时空演变,将对我国矿区生态环境保护和健康可持续发展具有重要的现实意义。本文以西部典型矿区神府矿区为例,利用 InVEST 模型,耦合地理探测器,从矿区整体和不同开采强度两个方面分析矿区生境质量的变化,并探究生境质量空间异质的原因。研究结果表明:①神府矿区整体生境质量良好,等级为良好的生境质量类型占全区面积约为 50%;②2005—2018 年以来,研究区的平均生境质量由 0.496 8 上升至 0.510 6,之后又下降至 0.470 7,整体呈现为先升后降的趋势;③矿区不同开采强度对生境质量的影响不同,低、中强度开采区生境质量变化速率分别高达 265.12%,173.21%,远高于极高、高强度开采区和未采区的变化速率;④研究区生境质量变化的主要原因是自然因素和人文因素的协同作用,其中解释力最大的是人口和 NDVI 的协同,其解释力为 0.163 7。

**关键词:**神府矿区;生境质量;InVEST 模型;驱动力;开采强度

中图分类号: X821

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)04-0451-13

## Spatial-temporal characteristics and driving mechanisms analysis of habitat quality in Shenfu mining area based on geodetector

HUANG Lan<sup>1</sup>, CHEN Qiuji<sup>1</sup>, FENG Jianzhong<sup>2</sup>, LIU Ruixiang<sup>2</sup>

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

2. Agriculture Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The ecological environment in the western mining areas of China is fragile, with coal resources being abundant. Large-scale development activities have caused a series of ecological and environmental problems. Quantitatively evaluating the spatiotemporal evolution of the habitat quality will be of practical significance for the protection of ecological environment and healthy sustainable development in our country's mining areas. Taking the typical mining area of Shenfu in the western region as an example, this article uses the InVEST model and couples it with the geographic detector to analyze the changes in habitat quality in the mining area from both the overall perspective and different mining intensities, with the reasons for the spatial heterogeneity of habitat quality explored. The results show that: ① The overall habitat quality in the Shenfu

收稿日期: 2022-11-26; 网络首发日期: 2023-4-24

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1294.N.20230424.1350.002.html>

基金项目: 陕西省软科学研究计划资助项目(2022KRM034)

第一作者: 黄兰,女,硕士生,研究方向为生态环境监测与评估。E-mail: huanglan1216@163.com

通信作者: 陈秋计,男,博士,教授,研究方向为矿区土地复垦与生态恢复。E-mail: qiujichen@163.com

mining area is good, with the habitat quality type of good accounting for about 50% of the total area. ②From 2005—2018, the average habitat quality of the study area has increased from 0.496 8 to 0.510 6 and then decreases to 0.470 7, showing a trend of initial increase and subsequent decrease. ③Different levels of mining intensity have different effects on habitat quality. The rate of change in habitat quality in low and medium mining intensity areas are as high as 265.12% and 173.21%, respectively, far higher than that in high and extremely high mining intensity areas and non-mining areas. ④The main reason for the change of habitat quality in the study area is the synergy of natural factors and human factors, among which the greatest determining force is the synergy of population and NDVI, which is 0.163 7.

**Key words:** Shenfu mining area; habitat quality; InVEST model; driving factor; mining intensity

随着社会科技进步和整个国民经济建设的持续高速健康发展,中国正步入更高质量的发展新阶段<sup>[1]</sup>。然而,我国西部矿区生态环境脆弱,人类活动干扰强烈,使得其土地利用变化复杂,矿区煤炭的开采造成水土流失、土地塌陷,进而使得其生境变得更加脆弱,同时也造成了对生物多样性的破坏<sup>[2]</sup>。当前,虽然生态环境的恢复措施和土地复垦缓解了矿山开采带来的环境问题,但在评估采矿活动对生物多样性、生态安全等的影响方面仍然存在诸多问题<sup>[3-5]</sup>。生境质量是指生态系统为生物的生存与发展提供适宜条件的能力<sup>[6-7]</sup>,因此,研究矿区生境质量时空变化可以为生物多样性的保护提供依据和建议,对区域生态安全的维持和可持续健康发展具有重要意义<sup>[8]</sup>。

目前,对生境质量的评估主要包括两方面,第一是通过实地调查问卷,统计分析研究区物种数量种类的分布,分析研究区生境质量演变;第二是通过建立生态评估模型,进行研究区生境质量评估,如 MaxEnt 模型、HIS 模型、SolVES 模型以及 InVEST 模型等<sup>[9]</sup>。而 InVEST 模型因其操作简单,所需数据较易获取,输出结果空间表达能力较强等优点而被广泛应用。其中,赵博轩等<sup>[10]</sup>利用土地利用数据分析吉林省 2000—2020 年近 20 年的生境质量时空变化;冀泳帆等<sup>[11]</sup>利用 InVEST 模型分析榆林市生境质量变化,并和 PLUS 模型耦合,结合地理信息图谱法预测榆林市土地利用变化以及多情景分析评估研究区生境质量时空变化规律;Ding 等<sup>[12]</sup>将 InVEST 模型和 FLUS 模型耦合,预测分析未来多种土地利用情景下黄河三角洲生境质量时空变化。另外也有学者们将各种空间分析方法用于生境质量时空变化分析,如地理加权回归<sup>[13]</sup>,空间自相关指数<sup>[14]</sup>等,并对研究区生境质量时空变化的原因进行定量评估。但相较于这些空间分析方法,地理探测器不仅能够更好地探测驱动因素与地理空间对象、现象或过程等要素参量之间的关系,还可以克服一般统计方法处理变量的局限性,交互探测影响

因子对因变量的共同作用<sup>[15]</sup>,因此被广泛地应用在空间异质分析中。比如程静等<sup>[16]</sup>利用地理探测器和地形梯度分析法,分析渭河流域生境质量时空分异的影响因素,Wei 等<sup>[17]</sup>利用地理探测器分析土地利用变化对乌苏地区生境质量的响应,为乌苏地区土地利用管理和生态保护提供科学依据。

通过以上的研究发现,目前对于生境质量的研究主要集中在对省、市、自然保护区等大尺度方面的研究,而对于矿区小尺度的研究相对较少,同时缺少在矿区不同开采强度下生境质量的评估。另外,当前地理探测器的研究主要在典型流域、生态保护区等,很少有人将其应用到矿区生态的研究中,而矿区具有高度特异性和复杂性,其中包括开采过程中的环境破坏和后续的土地复垦和环境修复工作等。这些特点使得矿区研究具有更大的挑战和复杂性,使用地理探测器探测矿区生态环境变化的影响因素,能够为矿区的生态环境修复和土地复垦等工作提出更加有效的建议,以实现矿区的可持续发展和环境保护。

鉴于此,本文基于 GIS、RS 技术和 InVEST 模型,以 2005、2010、2015 和 2018 年 4 期空间分辨率 30 m 的土地利用栅格数据为基础,从生境质量的时空分布、时空变化以及不同采矿强度等多个角度全面的分析了矿区生境质量的变化,并耦合地理探测器,选取自然和人文因子,分析了影响其变化的因素,为矿区及关联区域绿色、可持续发展规划和生态环境保护与治理提供理论依据。

## 1 研究区概况

神府矿区(38°32'N ~ 39°28'N, 109°37'30"E ~ 110°49'30"E)位于陕西省北部,包括神木县西北部和府谷县西南部,总面积为 6 228.02 km<sup>2</sup>(见图 1)。地势东北高、西南低,海拔在 810 ~ 1 425 m 之间,拥有毛乌素沙地和黄土丘陵沟壑两大地貌类型单元<sup>[18]</sup>。该区属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温为 9℃,年降水量约

450 mm<sup>[19]</sup>。神府矿区是陕西省重要的煤炭开采区,煤炭开采占全省的 11.15%<sup>[20]</sup>,该区生态敏感,抗干扰能力弱,是典型的生态脆弱区,因此,对该地区开展生境质量评价,分析生境质量演变特征与规

律,以及其驱动因子影响力的研究,为矿区及广大的毗连区生态安全与环境保护以及生态规划重建、促进重点关注地区健康、绿色、可持续发展等提供理论方法和决策依据。

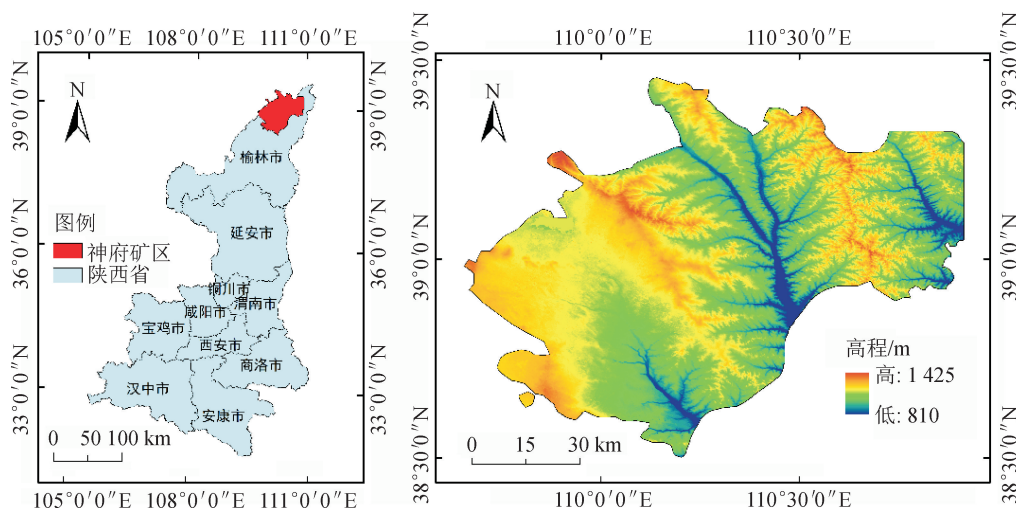


图1 神府矿区位置及范围

Fig. 1 Location and scope of Shenfu mining area

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本研究选用的数据主要包括土地利用数据、自然环境数据和社会经济数据等。2005—2018年(2005、2010、2015和2018)4期30 m空间分辨率的土地利用栅格数据集来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)。自然环境数据,数字地面模型DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),从中提取了坡度和坡向数据;逐月的nc格式气温和降雨数据(来源于国家地球系统科学数据共享服务平台,网址(<http://www.geodata.cn/>)),通过ArcGIS软件转换,合成年数据;植被归一化指数NDVI数据来源于美国国家航天航空局提供的全球植被指数数据集(<https://www.nasa.gov/nex>),通过MATLAB软件处理而得到时间分辨率为15 d的数据,利用最大值合成法生成成年数据。社会经济数据,人口密度空间格网数据和国内生产总值GDP空间分布公里格网数据亦来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>);路网数据来源于1:100万全国基础地理数据库(<http://www.webmap.cn>)。

### 2.2 研究方法

#### 1) 土地利用变化

土地利用(覆盖)变化是土地利用研究的重要内

容,也是生境质量研究的基础。土地利用转移矩阵能够准确表达出某一特定地区某一时段的初期阶段与末期阶段的各种特定土地利用的种类变化与土地面积的变动情况<sup>[21]</sup>,其表示为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $S_{ij}$ 表示转移前的第*i*类地转换成转移后的第*j*类地的面积;*n*为土地利用类型总数;*i*,*j*(*i*,*j*=1,2,⋯,*n*)分别代表转移前与转移后的土地利用类型。

#### 2) InVEST生境质量评价

生境质量是指生态系统为生物的生存和繁殖提供适宜条件的能力和潜力<sup>[22]</sup>,其数值为0~1,数值越大,生境质量越高。在InVEST模型中,生境质量用生境适宜度和生境退化度表示<sup>[10,22]</sup>,其计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left( 1 - \frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z + K^Z} \right) \quad (2)$$

式中: $Q_{xj}$ 是生境质量; $H_j$ 为生境适宜度; $Z$ 为归一化常量(一般取值2.5); $K$ 为半饱和常数,是最大退化度数值的一半,在此设为0.08; $D_{xj}$ 为土地利用类型*j*中栅格*x*的生境退化度指数。

生境退化度表示土地利用类型受威胁因子胁迫的程度<sup>[22-23]</sup>,土地利用类型受威胁的程度越高,生境越容易发生退化<sup>[24]</sup>,其计算公式为:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (\omega_r / \sum_{r=1}^R \omega_r) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (3)$$

式中： $D_{xj}$ 是生境退化度； $R$ 是威胁因子总数； $r$ 为威胁因子； $y$ 为威胁因子所在的栅格； $Y_r$ 为为威胁因子的栅格总数； $\omega_r$ 为各个威胁因子权重； $r_y$ 为栅格  $y$  上的威胁因子的值； $\beta_x$ 为栅格  $x$  的可达性水平； $S_{jr}$ 为不同生境类型  $j$  对不同威胁因子  $r$  的相对敏感程度； $i_{rxy}$ 为栅格  $y$  中威胁因子  $r$  对栅格  $x$  的影响。其中， $i_{rxy}$ 有两种表达式，即线性衰退(4)和指数衰退(5)：

$$i_{rxy} = 1 - \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \quad (4)$$

$$i_{rxy} = \exp\left(-\frac{2.99}{d_{rmax}} \times d_{xy}\right) \quad (5)$$

式中： $d_{xy}$ 为栅格  $x$  与栅格  $y$  之间的线性距离； $d_{rmax}$ 为威胁因子  $r$  的最大影响距离。

根据研究区的实际情况，本文选取旱地、农村居民点、工矿用地和沙地作为研究区的威胁因子，根据相关文献<sup>[11,14,24]</sup>，InVEST 指导手册<sup>[23]</sup>确定威胁因子所占权重、衰减类型及最大影响距离和不同土地利用类型生境适宜度及威胁因子的敏感性。具体内容见表 1 和表 2。

表 1 土地利用类型对威胁因子的敏感性

Tab.1 Sensitivity of land use type to threat factors

土地利用类型	生境适宜度	威胁因子敏感程度			
		旱地	农村居民点	工矿用地	沙地
旱地	0.4	0	0.35	0.2	0.2
有林地	1	0.8	0.8	0.6	0.2
灌木林地	1	0.4	0.45	0.3	0.1
疏林地	1	0.85	0.9	0.6	0.3
其他林地	1	0.9	0.95	0.65	0.3
高覆盖度草地	0.8	0.4	0.4	0.3	0.2
中覆盖度草地	0.75	0.5	0.5	0.35	0.3
低覆盖度草地	0.7	0.5	0.55	0.4	0.3
河渠	1	0.5	0.7	0.8	0.15
湖泊	1	0.65	0.75	0.8	0.15
水库、坑塘	1	0.7	0.75	0.8	0.15
滩地	0.6	0.75	0.8	0.7	0.3
城镇	0	0	0	0	0
农村居民点	0	0	0	0	0
工矿用地	0	0	0	0	0
沙地	0	0	0	0	0
盐碱地	0.5	0.2	0.15	0.15	0.1
沼泽地	0.9	0.3	0.7	0.7	0
裸土地	0.05	0	0	0	0

表 2 威胁因子参数

Tab.2 Threat factor parameter

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减类型
旱地	3	0.6	线性
农村居民点	5	0.6	指数
工矿用地	10	0.8	指数
沙地	8	0.5	线性

### 3) 地理探测器

地理探测器是探测空间要素的分异性，揭示其背后驱动力的一组统计学方法。它包括 4 个探测

器：因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测<sup>[15]</sup>。本文将重点研究利用因子探测和交互作用探测的方法来说明这些影响因子及其对研究区生境质量变化的潜在影响程度。因子探测计算公式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中： $q$ 为因子探测度量，表示某影响因子对生境质量时空分布的影响程度大小； $L$ 为影响因子的样本数； $N_h$ 是层  $h$  区的生境质量； $N$ 是整个研究区的生境质量； $\sigma_h^2$ 是层  $h$  区生境质量的离散方差； $\sigma^2$ 是整个研究区生境质量的离散方差。 $q$ 的取值区间为 $[0, 1]$ ，值越大，

表明影响因素对生境质量的影响越大,反之则越小。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化分析

本文将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水体、建设用地、其他用地六类。由图 2 可知,总体而言,神府矿区的土地利用类型以耕地、草地为主,面积占总面积的 80%左右(见表 3),各类用地呈交错分布状态,林地

和水体所占面积较少,建设用地呈零星集中分布,其他用地(主要为未利用地)较为集中分布在研究区的西南部。2005—2018 年,研究区建设用地面积增长最快,耕地面积持续减少,其主要原因是由于矿区以资源产业经济发展为主,煤炭产业的发展导致该地区经济的跃升,引起采矿用地大规模扩张,占用了大量的耕地和草地<sup>[19]</sup>;林地和水体面积变化不大,其他用地面积表现出一定的波动状态,整体呈下降的趋势。

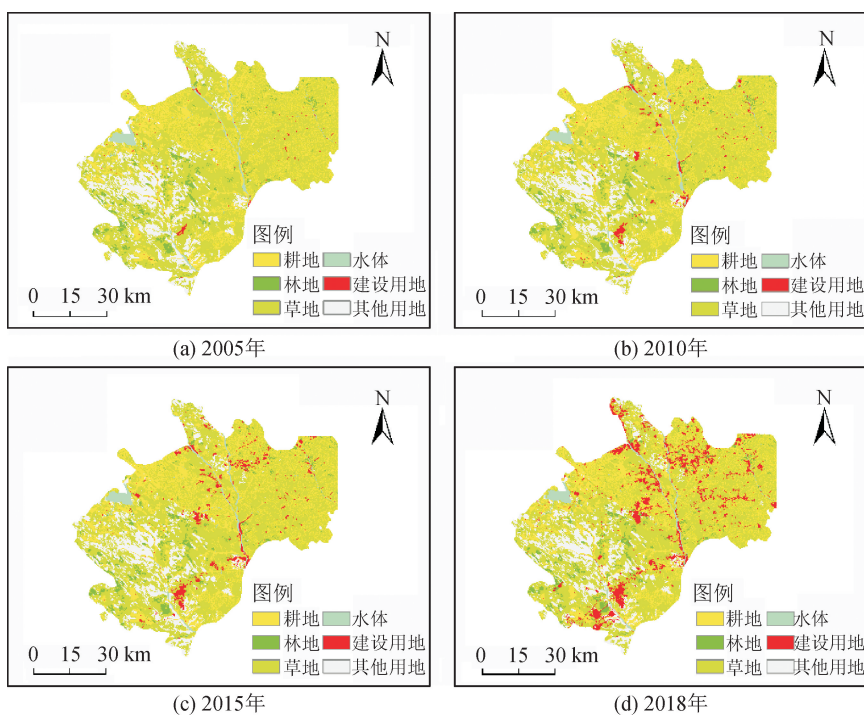


图 2 2005—2018 年神府矿区土地利用类型

Fig. 2 Land use types in Shenfu mining area from 2005 to 2018

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

表 3 2005—2018 年神府矿区土地利用面积和占比

Tab. 3 Land use area and proportion of Shenfu mining area from 2005 to 2018

土地利用类型	2005 年		2010 年		2015 年		2018 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
耕地	1 473.62	23.85	1 432.00	23.18	1 417.56	22.95	1 353.79	21.92
林地	220.50	3.57	226.50	3.67	222.35	3.60	218.82	3.54
草地	3 521.71	57.01	3 534.38	57.21	3 467.47	56.13	3 303.23	53.48
水体	125.78	2.04	120.66	1.95	117.64	1.90	112.36	1.82
建设用地	25.53	0.41	93.65	1.52	178.57	2.89	452.76	7.33
其他用地	810.50	13.12	770.44	12.47	774.02	12.53	735.35	11.91
合计	6 177.63	100.00	6 177.63	100.00	6 177.61	100.00	6 176.32	100.00

2005—2018 年神府矿区的土地利用转移情况见表 4,土地利用转出主要集中在耕地和草地土地利用,土地利用转入集中在建设用地。在 14 年间,草地转出面积为 422.51 km<sup>2</sup>,主要转为耕地和建设

用地,转出的面积分别为 108.86 km<sup>2</sup>和 260.48 km<sup>2</sup>,各占草地转出面积的 25.77%和 61.65%。耕地转出面积 249.94 km<sup>2</sup>,其中转成草地的面积有 127.04 km<sup>2</sup>,占耕地转出面积的 50.83%;耕地转为建设用

地的面积有 103.85 km<sup>2</sup>, 占耕地转出面积的 41.55%。建设用地转入面积增加了 430.12 km<sup>2</sup>,

这也充分地反映了矿区土地利用变化与该区经济发展、采矿活动密切相关。

表 4 2005—2018 年神府矿区土地利用转移矩阵

Tab. 4 Land use transfer matrix of Shenfu mining area from 2005 to 2018

单位: km<sup>2</sup>

土地利用类型	2005—2018 转移矩阵					
	草地	耕地	建设用地	林地	其他用地	水体
草地	3 098.43	108.86	260.48	14.54	36.01	2.62
耕地	127.04	1 223.43	103.85	9.06	4.82	5.17
建设用地	1.27	1.46	22.65	0.06	0.01	0.07
林地	9.79	2.60	12.12	193.65	2.18	0.11
其他用地	63.79	11.70	41.04	1.23	691.33	1.21
水体	2.89	5.72	12.63	0.28	1.00	103.17

### 3.2 生境质量时空变化特征

#### 3.2.1 生境质量分布分析

生境质量指数为 0~1, 值越接近 1, 表明生境质量越好, 越有利于生物生存和繁殖。本文将生境质量指数划分为 (0, 0.25]、(0.25, 0.5]、(0.5, 0.75]、(0.75, 1] 4 个区间, 分别对应差 (I)、一般 (II)、良好 (III)、优 (IV) 4 个等级<sup>[12]</sup>。

由图 3 和表 5 可知, 2005—2018 年期间, 生境质量为良好等级 (III) 的地区占神府矿区总面积的

50%左右, 主要分布在矿区东北部的草地覆盖区域。一般等级 (II) 的地区面积占矿区总面积的 30%左右, 主要分布在研究区北部的未开采区域。等级差 (I) 的生境质量面积占矿区总面积的 15%, 其大部分分布在其他 (未利用地) 区域。而等级为优 (IV) 的地区所占面积较少, 只有矿区总面积的 5%, 主要分布在研究区的河流、林地等区域。这也表明研究区土地利用类型的分布状况很大程度上决定着生境质量等级的区域分布。

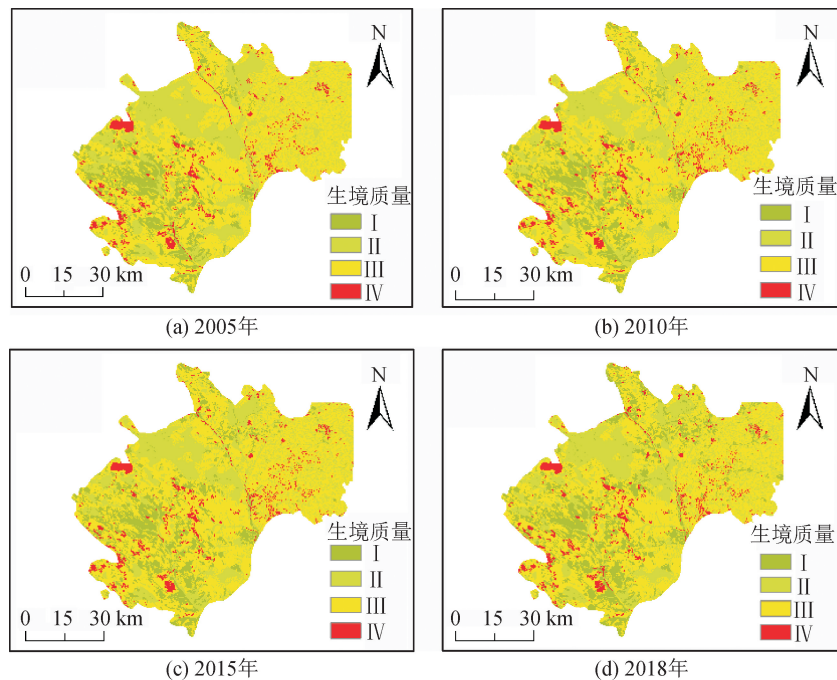


图 3 2005—2018 年神府矿区生境质量等级图

Fig. 3 Habitat quality grade of Shenfu mining area from 2005 to 2018

注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作, 底图无修改。

2005—2018 年 14 年间研究区平均生境质量指数分别为 0.496 8, 0.510 6, 0.499 1, 0.470 7, 呈现

先增后减的趋势, 整体减少量为 0.026 1, 表明矿区的整体生境质量呈下降趋势 (见表 5)。2005—2010

年期间,研究区生境质量指数有所增加,主要是由于生境质量良好(III)的地区面积占比从 50.63%增加到 53.51%,尽管生境质量一般(II)的地区面积占比有所减少(从 30.96%减少到 27.38%),但其余生境质量等级(I和IV)的地区面积都有所增加。因此,整体来看,矿区生境质量向良好方向发展,生境条件不断改善,这主要归因于 2006 年国家出台的七部委文件(关于加强生产建设项目土地复垦管理工作)和加快开展采煤沉陷区治理等相关政策的发布,榆林市加强了土地的治理与植被的修复。2010—2018 年,研究区生境质量指数呈降低趋势,生境质量为优、良好、一般等级(IV、III、II)的地区面积持续减

少,减少最多是生境质量良好(III)的地区,其面积占比从 53.51%减少到 49.09%,而生境质量差(I)的地区面积占比则从 14.09%增加到 19.35%,这进一步导致矿区的生境质量下降。究其原因,这期间研究区神府新民矿区以及榆神矿区二期等开始建设,煤炭产量提升,采矿用地快速扩张。从总体来看,2005—2018 年神府矿区生境质量呈下降趋势,主要由于生境质量良好(III)和一般(II)的地区面积减少,其占比分别减少 1.54%和 4.03%,而等级差(I)的地区面积增加,面积占比增加了 5.65%,此进一步表明促进神府矿区生态恢复,推进区域绿色、持续发展十分迫切。

表 5 2005—2018 年神府矿区各等级生境质量占比变化

Tab. 5 The proportion changes of habitat quality at all the levels in Shenfu mining area from 2005 to 2018

时期	属性	生境质量等级			
		I (0,0.25]	II (0.25,0.5]	III (0.5,0.75]	IV (0.75,1]
2005 年	A	13.70	30.96	50.63	4.71
	B		0.496 8		
2010 年	A	14.09	27.38	53.51	5.01
	B		0.510 6		
2015 年	A	15.53	27.44	52.23	4.80
	B		0.499 1		
2018 年	A	19.35	26.94	49.09	4.63
	B		0.470 7		
2005— 2018 年	A 变化量	5.65	-4.03	-1.54	-0.08
	B 变化量		-0.026 1		

注:A-生境质量等级区面积占比(%),B-全区生境质量指数均值。

### 3.2.2 生境质量时空变化分析

#### 1) 生境质量时空变化

由图 4 和图 5 可以看出,神府矿区生境质量变化情况在各个时期有所不同。2005—2010 年间,矿区生境质量提高的地区面积为 317.18 km<sup>2</sup>,降低的地区面积为 119.95 km<sup>2</sup>,矿区整体区域生境质量呈升高趋势,提高的地区总面积增加了 197.22 km<sup>2</sup>。在此期间,榆林市发布了土地利用总体规划政策,加强了矿区土地合理利用程度,林地、草地面积有所增加,其他用地(如未利用地)面积减少,而导致矿区整体生境质量有所提高。2010—2015 年间,矿区生境质量变化不大,生境质量降低的面积有 165.49 km<sup>2</sup>,而生境质量提高的面积仅只有 43.45 km<sup>2</sup>,主要是该期

间工矿用地的快速扩张,占用了较多耕地和草地,致使全区生境质量总体呈下降状态<sup>[19,25]</sup>。神府矿区中部集中了大量的煤矿开采地,2015—2018 年间,由于煤矿的进一步开采,导致该地区土地塌陷、水土流失等<sup>[18,26]</sup>,使得矿区全境生境质量进一步呈降低状态,降低面积达到 510.32 km<sup>2</sup>;但在建设用地扩张的同时,矿区部分地区亦实施了生态环境保护(如退耕还林)等措施,从而提高了部分地区的生境质量。总体来看,2005—2018 年期间,退耕还林、还草的地区生境质量虽有所提高,但工矿用地等人类活动强烈的地区生境质量仍在不断下降,因此加强神府矿区采矿区土地复垦、环境保护、生态恢复是未来生态环境保护工作的重要任务。

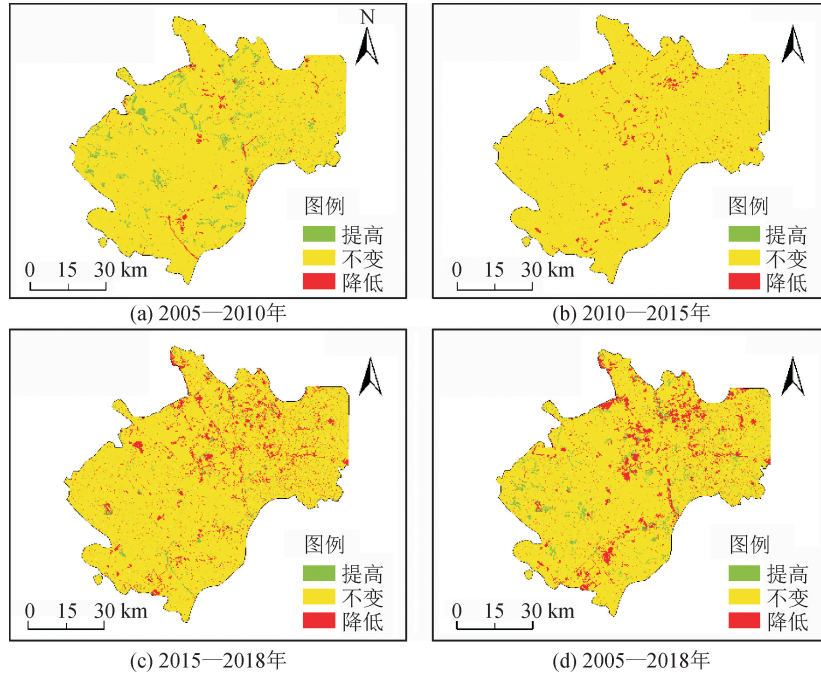


图 4 2005—2018 年神府矿区生境质量变化空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of habitat quality changes in Shenfu mining area from 2005 to 2018  
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

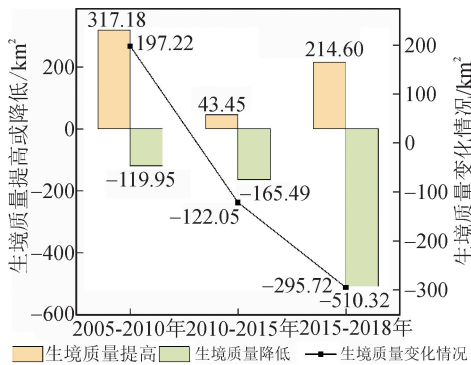


图 5 神府矿区生境质量变化情况

Fig. 5 Habitat quality change in Shenfu mining area

### 2) 生境质量等级转移

2005—2018 年间神府矿区生境质量整体保持稳定状态(见图 6),所占面积有 5 280. 42 km<sup>2</sup>,占矿区总面积的 85%,表明神府矿区的煤炭开采虽在很多地区对生境质量造成一定的影响,但占整个矿区的面积仍有限,同时随着采矿活动的日趋合理化以及对生态环境保护措施(如土地复垦、生态修复)等的日益重视,能够一定程度降低或缓解煤炭开采以及其他人类影响活动等对矿区生境质量造成的影响。神府矿区发生转移的面积有 896. 67 km<sup>2</sup>,占矿区总面积的 15%,主要以等级为良好(III)的地区生境质量向等级一般(II)、差(I)的生境质量转移,转移面积分别为 95. 93 km<sup>2</sup>和 272. 05 km<sup>2</sup>;其次是等

级一般(II)的地区生境质量向等级良好(III)、差(I)的生境质量转移,转移面积分别为 211. 28 km<sup>2</sup>和 145. 90 km<sup>2</sup>。此表明矿区生境质量变化的部分主要由其他等级转变为差等级,尽管生态环境保护诸多措施能够产生一定的成效,但随着矿区建设用地的快速扩建、采矿活动范围的扩大等,导致人类活动对矿区生态环境的破坏影响加剧,尤其使得原来生境质量良好的地区向着生境质量差的方向演变。另外,对于等级优(IV)的地区生境质量,因为其所占面积很小(为最少),所以发生转移的面积也较少,且面积基本保持稳定状态。

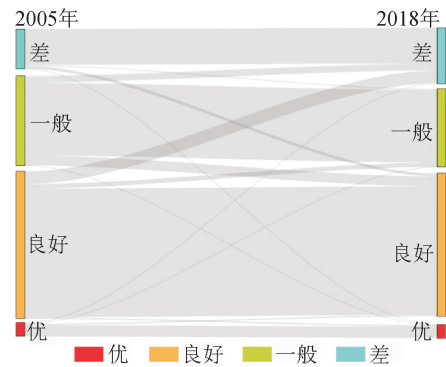


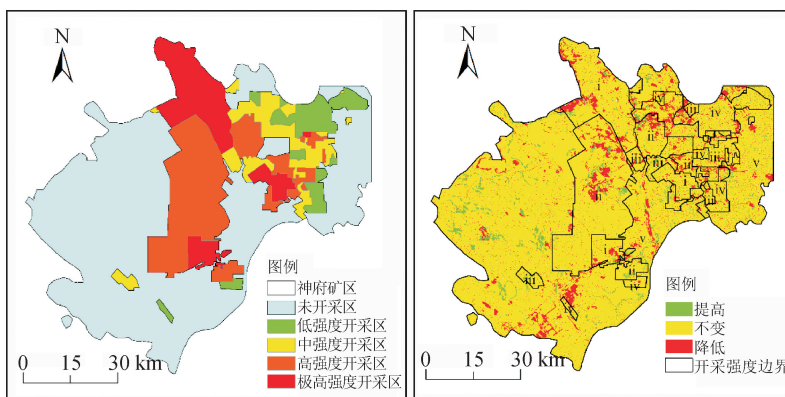
图 6 2005—2018 年生境质量等级转移 Sankey 图  
Fig. 6 Sankey transfer map of habitat quality grades from 2005 to 2018



### 3.2.3 不同开采强度下生境质量时空分布特征

为了深入分析神府矿区的不同开采强度对生境质量的影响,根据范立民等的研究成果<sup>[26]</sup>,本文将开采区按采高和平面开采比划分为极高强度开采(i)、高强度开采(ii)、中强度开采(iii)、低强度开采(iv)和未开采(v)五个级别(见图7)。其中,开采区

面积有 2 384.80 km<sup>2</sup>,未开采区面积有 3 792.48 km<sup>2</sup>,开采区生境质量发生改变的面积占开采区面积的 7.81%,未开采区生境质量发生改变的面积占未开采区面积的 5.60%,相较于未开采区而言,开采区生境质量改变的面积更大,可见采矿活动会影响矿区生境质量的改变。



i 为极高强度度开采区、ii 为高强度开采区、iii 为中强度开采区、iv 为低强度开采区、v 为未开采区。

图7 不同开采强度生境质量变化

Fig. 7 Changes of habitat quality in different mining intensity areas

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

2005—2018 年间,神府矿区不同开采强度下的地区生境质量有不同程度的变化(见表6)。变化速率最大的是低强度开采区(iv)和中强度开采区(iii),变化速率分别为 265.12% 和 173.21%;而极高强度开采区(i)和高强度开采区(ii),生境质量变化速率相对较小,分别为 64.51% 和 89.84%;变化速率最小的是未开采区(v),为 5.19%。这表明低强度开采和中强度开采对生境质量的影响比高强度开采和极高强度开采的影响大。

从生境质量等级来看,对于生境质量等级差(I)的地区面积呈增加趋势,其生境质量呈降低的态势,表明该地区生态环境恶化,低强度开采区(iv)生境质量变化速率为 284.67%,中强度开采区(iii)变化速率为 204.62%,高强度开采区(ii)变化速率为 113.32%。而对于等级优(IV)的地区生境质量而言,低强度开采区(iv)、中强度开采区(iii)和未开采区(v)生境质量变化亦呈下降趋势,下降速率分别为 1.22%、7.82% 和 3.20%,极高强度开采区(i)和高强度开采区(ii)生境质量变化呈增加的趋势,表明

该地区生态环境状况趋向好的态势,生境质量提高的上升速率分别为 7.53% 和 2.95%。这也进一步表明相较于低、中强度开采区(iv、iii),极高、高强度开采区(i、ii)生境质量变化速率较小。其主要原因有三点:

第一,极高、高强度开采区,治理理念更加环保,注重环境保护,而低、中强度开采区是小规模矿区,煤层浅,地下开采相对细碎,对地表的破坏严重<sup>[18]</sup>;

第二,极高、高强度采矿区,主要土地类型为沙地,对环境适应性强,有较强的自我修复能力,而低中强度开采区,耕地、草地分布较多,这些土地利用类型敏感,采矿将对其破坏更为严重;

第三,对于低、中强度采矿区,煤炭开采后土地复垦不及时,也是造成其生境质量降低的原因之一。

对于未开采区,由于其位于西部毛乌素沙地,人类活动较少,因此对生境的影响也相对较小。

此研究结果与肖武等<sup>[18]</sup>对神府矿区不同开采强度条件下的生态系统服务价值变化研究结果基本一致。

表 6 不同开采强度的生境质量面积变化  
Tab.6 Variation of habitat quality area with different mining intensities

开采程度	等级	2005 年	2018 年	2005—2018 年 总计	
		生境质量面积/km <sup>2</sup>	生境质量面积/km <sup>2</sup>	变化速率/%	变化速率/%
未开采区	差	651.22	767.99	17.93	5.19
	一般	1 182.61	1 065.05	-9.94	
	良好	1 759.75	1 766.91	0.41	
	优	199.03	192.65	-3.20	
低强度开采区	差	9.51	36.56	284.67	265.12
	一般	113.36	99.91	-11.87	
	良好	209.17	195.68	-6.45	
	优	8.62	8.52	-1.22	
中强度开采区	差	18.75	57.12	204.62	173.21
	一般	138.11	112.54	-18.52	
	良好	227.44	215.93	-5.06	
	优	16.37	15.09	-7.82	
高强度开采区	差	88.46	188.70	113.32	89.84
	一般	326.34	261.58	-19.84	
	良好	561.47	524.50	-6.58	
	优	50.38	51.87	2.95	
极高强度开采	差	77.64	144.28	85.82	64.51
	一般	151.27	124.27	-17.85	
	良好	371.60	330.76	-10.99	
	优	16.35	17.58	7.53%	

### 3.3 地理探测器驱动机制分析

利用地理探测器进行的影响因子的探测研究可以用来评估各种环境影响因子对生境质量变化的潜在影响强度<sup>[24]</sup>。本文选取了自然因素中的高程、坡度、距河流距离和 NDVI,以及人文因素中的人口、GDP 和距道路距离等因素,考察它们对神府矿区生态环境的影响。其中,高程和坡度影响植被的类型和生长状况,NDVI 反映植被的覆盖度,气温和降水影响物种栖息地适宜性,距河流距离影响生物的多样性,他们之间有一定的相关性,对生境的影响相对较大<sup>[27]</sup>。而人口和 GDP 在一定程度上反映城市扩张水平和经济发展状况,映射人类活动对区域生境质量的影响,距离道路距离反映人类活动对土地利用以及生物多样性的影响,据此以这 11 个驱动因子来解释矿区生境质量的变化。通过地理探测器对驱动因子进行因子探测和交互探测,最终得到以下结论。

从表 7 中可知,研究区整体驱动因子解释力不高,其主要原因是区域生境质量的变化是复杂的,受多方面因素联合的影响,不同的因子之间存在相互作用,对于单一因子的影响也会被其他因子所覆盖。从因子探测的结果来看,研究期内不同影响因子的解释力大小排序为 X7>X8>X5>X9>X10>X2>X1>X11>X6>X4>X3,表明人口、GDP、NDVI、距城镇距离是影响生境质量变化的重要因子。其中,人文因素中的人口解释力为 0.112 3,对生境质量的解释力最大;自然因素的归一化植被指数(NDVI)的解释力 *q* 值为 0.057 3,对生境质量的解释为最大。总体而言,人文因素对生境质量空间分异性的影响程度大于自然因素的作用。

表 7 神府矿区生境质量影响因子探测结果

Tab.7 Detection results for impact factors of habitat quality in Shenfu mining area

影响因子	自然因素					人文因素					
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
因子解释	高程	坡度	降水	气温	NDVI	距河流距离	人口	GDP	距城镇距离	距公路距离	距铁路距离
解释力 <i>q</i>	0.019 5	0.024 3	0.005 4	0.012 9	0.057 3	0.015 8	0.112 3	0.072 2	0.056 3	0.025 5	0.017 6

注:\* 各影响因子均通过了  $P < 0.05$  的显著性检验。

从交互作用探测来看(见图 8),研究期内驱动因子间交互探测结果均表现出非线性增强和双因子增强。其中对生境质量影响较大的交互因子是 X7∩X5(0.163 7)和 X7∩X6(0.156 7),说明人口与 NDVI以及人口与距河流距离的交互作用会导致对

生境质量影响的增强,这也反映了自然因素和人文因素的共同作用会增强对生境质量的影响。另外,NDVI 与高程、坡度、降水、气温的交互作用(解释程度)在 0.080~0.096 之间,说明气温、降水和坡度这些自然因素在一定程度上影响土地利用/覆盖状况

的变化,从而导致研究区生境质量的变化。对于GDP与其他因子的交互作用、距城镇距离因子与其他因子交互作用(除其与坡度和距铁路距离因子的交互影响外)均大于0.08,亦说明经济发展GDP增加和城镇化的推进,一般必然会导致加快研究区建设用地的扩张,加大矿区(煤炭)资源的开发,改变矿区的土地利用结构,而使得研究区生境质量发生改变。显然,降水是对生境质量影响较小的单因子,但降水与其他因子的交互作用远远大于单因子的影响,不可忽视。因此,在加大矿区生态环境保护工程(如生态修复、防止水土流失)实施的同时,优化矿产开采布局、改进优化开采工艺,合理推进城镇化,因地制宜等,对保护土地资源、维护提高研究区生境质量具有重要的意义。

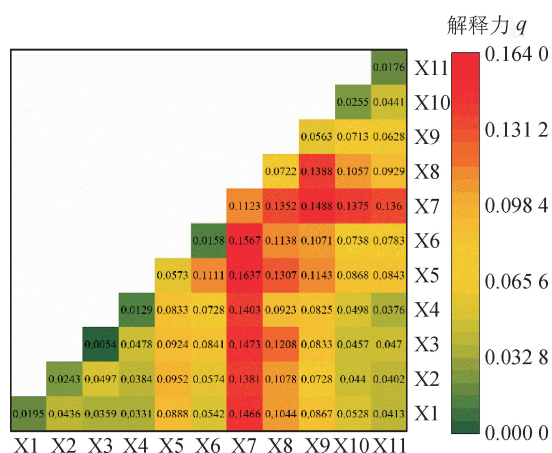


图8 神府矿区影响因子交互探测结果

Fig. 8 Detection results of interaction between impact factors of habitat quality in Shenfu mining area

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

1) 矿区生境质量分布主要以良好(III)等级为主,占研究区面积的50%左右,主要分布在矿区东北部的草地覆盖区域。2005—2018年研究区整体的生境质量呈下降趋势。

2) 2005—2010年由于矿区土地利用程度的提高,从而提高了研究区的生境质量。2010—2015年,工矿用地的扩张,生境质量降低。2015—2018年,矿区煤炭的进一步开采,生态环境的破坏导致生境质量持续下降。2005—2018年,研究区整体生境质量变化不大,发生变化的面积占研究区总面积的15%,主要以等级为良好(III)和一般(II)的生境质量向差(I)的生境质量转移,而等级为优的生境质量所占面积较少,基本保持稳定状态。

3) 2005—2018年研究区不同开采程度导致生

境质量变化有所差别,相比较于极高强度、高强度开采区,低、中强度的采矿区域生境质量变化速率更快,而未开采区因其主要位于西部毛乌素沙地,人类活动较少,因此其生境质量变化速率也较小。

4) 研究区生境质量时空分异特征受自然和人文因素共同作用。从单因子探测结果来看,神府矿区生境质量空间分异主要影响因素是人口、GDP、NDVI、距城镇距离。从双因子交互探测结果来看,自然和人文因素交互作用的影响都大于单因子的影响。随着城镇化的快速发展,人口大量的涌入,GDP持续的增长,区域植被状况发生改变使得研究区生境质量发生明显变化。因此,研究区生境质量的改变是自然和人文因素协同作用的结果。

### 4.2 讨论

本文基于InVEST模型,耦合地理探测器,分析神府矿区生境质量的时空变化及其驱动因素与机制。从空间上看,神府矿区的生境质量基本保持在一个稳定的状态,这与大部分学者的研究一致。从时间上看,2005—2018年间,神府矿区生境质量呈现先增后减的趋势,整体略有下降,而一些学者<sup>[28]</sup>的研究却表明是呈一个上升的趋势,该趋势略有差异,主要原因有两点。第一,研究区范围的不一致,相较于前人的研究,本文研究范围较小,而根据前人的研究,缺少的那部分生态质量处于优和良好等级,这正好说明了本文下降的趋势是合理的,并且生境质量整体下降0.0261,降低值较低,是在一个合适的范围内。第二,研究方法的不同,前人研究是利用遥感生态指数(RSEI)分析神府矿区生态质量的变化,而本文是以土地利用数据为基础,选择合适的胁迫因子,来计算神府矿区生境质量,方法的不同导致结果存在部分差异。另外,在研究的过程中,也存在一些不足,由于数据的可获取性,本文选取了自然和人文因素,缺少一些政策数据以及煤炭相关数据的支撑,在后续的研究中,可以更全面地考虑驱动因子的选取,使得探测的结果更加准确,能够更好地佐证矿区生境质量空间分异的原因,为矿区生态环境保护提供理论支撑。

从本文研究结果可知,人类活动是导致西部矿区生态环境主要受损的因素。随着经济和人口数量的增长以及对矿产资源需求的增加,工矿用地不断扩张,在未来的发展中,要适度地控制工矿用地的扩张规模。另外,采矿方式的不同、土地复垦不及时以及生态治理理念不同等因素都会对矿区生态环境产生负面影响。因此,在未来采矿中,应该制定科学合理的开采计划,优先考虑开采技术先进、资源利用率

高、环保性好的采矿方式,在采矿结束后应尽早实施复垦,修复受损地带,包括重建植被、恢复原有河流、水源和水质等生态环境,保障野生动植物能够恢复和繁衍。此外,在采矿过程中还应积极开展绿色矿山建设,以提高绿色采矿的标准、标识、监督等方面,进一步促进环境的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[R/OL]. 新华社. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [2] MURGUÍA D I, BRINGEZU S, SCHALDACH R. Global direct pressures on biodiversity by large-scale metal mining: spatial distribution and implications for conservation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 180: 409-420.
- [3] WANG-HE Kunyuan, GUO Xinle, HU Faxiang, et al. Spatial coincidence between mining activities and protected areas of giant panda habitat: the geographic overlaps and implications for conservation[J]. *Biological Conservation*, 2020, 247: 108600.
- [4] 卞正富,许家林,雷少刚. [J]. *煤炭学报*, 2007, 32(1): 13-19.  
BIAN Zhengfu, XU Jialin, LEI Shaogang. Discussion on mine ecological construction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(1): 13-19.
- [5] 杨辉,李春阳,杨德亮. 浅析矿山土地复垦及生态重建的涵义及技术措施[J]. *农业与技术*, 2020, 40(18): 136-137.
- [6] 李胜鹏,柳建玲,林津,等. 基于1980—2018年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4080-4090.  
LI Shengpeng, LIU Jianlin, LIN Jin, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [7] HILLARD E M, NIELSEN C K, GRONINGER J W. Swamp rabbits as indicators of wildlife habitat quality in bottomland hardwood forest ecosystems[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 79: 47-53.
- [8] WU Linlin, SUN Caige, FAN Fenglei. Estimating the characteristic spatiotemporal variation in habitat quality using the InVEST model—a case study from Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 1008.
- [9] 孙汇颖,宫巧巧,刘庆果,等. 基于土地利用变化的山东省生境质量时空演变特征[J]. *土壤通报*, 2022, 53(5): 1019-1028.
- SUN Huiying, GONG Qiaoqiao, LIU Qingguo, et al. Spatio-temporal evolution of habitat quality based on the land-use changes in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(5): 1019-1028.
- [10] 赵博轩,李淑杰,马剑,等. 基于InVEST模型的吉林省生境质量评价[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2022, 54(2): 132-141.  
ZHAO Boxuan, LI Shujie, MA Jian, et al. Evaluation of habitat quality in Jilin Province based on InVEST model [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 54(2): 132-141.
- [11] 冀帆帆,贾鲁净,杨联安,等. 耦合InVEST-PLUS模型的榆林市生境质量时空演变及预测分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 1-10.  
JI Yongfan, JIA Lujing, YANG Lian'an, et al. Spatio-temporal evolution and prediction analysis of habitat quality in Yulin City coupled with InVEST-PLUS model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 1-10.
- [12] DING Qinglong, CHEN Yang, BU Lingtong, et al. Multi-scenario analysis of habitat quality in the Yellow River Delta by coupling FLUS with InVEST model [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(5): 2389.
- [13] 梁晓瑶,袁丽华,宁立新,等. 基于InVEST模型的黑龙江省生境质量空间格局及其影响因素[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6): 864-872.  
LIANG Xiaoyao, YUAN Lihua, NING Lixin, et al. Spatial pattern of habitat quality and driving factors in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(6): 864-872.
- [14] 许宝荣,刘一川,董莹等. 基于InVEST模型的兰州地区生境质量评价[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(5): 120-129.  
XU Baorong, LIU Yichuan, DONG Ying, et al. Evaluation of habitat quality in Lanzhou Region based on InVEST model [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(5): 120-129.
- [15] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.  
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [16] 程静,王鹏,陈红翔,等. 渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(3): 481-491.  
CHENG Jing, WANG Peng, CHEN Hongxiang, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in the Weihe River Basin and its topographic gradient effects

- and influencing factors[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(3): 481-491.
- [17] WEI Yiming, WANG Hongwei, XUE Mengqi, et al. Spatial and temporal evolution of land use and the response of habitat quality in Wusu, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(1): 361.
- [18] 肖武, 张文凯, 吕雪娇, 等. 西部生态脆弱区矿山不同开采强度下生态系统服务时空变化——以神府矿区为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 68-81.
- XIAO Wu, ZHANG Wenkai, LÜ Xuejiao, et al. Spatio-temporal patterns of ecological capital under different mining intensities in an ecologically fragile mining area in Western China; a case study of Shenfu mining area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 68-81.
- [19] 夏正清, 谢艳玲, 王涛. 神府矿区土地利用与 NDVI 时空变化及其驱动因素分析[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(14): 97-105.
- XIA Zhengqing, XIE Yanling, WANG Tao. Land use and spatial and temporal change of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Shenfu mining area and their driving factors analysis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(14): 97-105.
- [20] 范立民, 王英, 夏玉成, 等. 陕西省煤矿瓦斯地质规律研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2012.
- [21] 冯然, 徐丽丽, 张力仁, 等. 基于地理国情监测的牡丹江市土地利用变化时空分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, 45(增刊 1): 150-154.
- FENG Ran, XU Lili, ZHANG Liren, et al. Spatio-temporal analysis of land use change in Mudanjiang City based on geographical national conditions monitoring[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2022, 45(S1): 150-154.
- [22] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 2895-2906.
- HUANG Muyi, YUE Wenzhi, FENG Shaoru, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain area of west Anhui Province based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 2895-2906.
- [23] SHARP R, CHAPLIN-KRAMER R, WOOD S, et al. InVEST User Guide[EB/OL]. [2020-08-10]. [http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/release\\_default/release\\_default/documentation/](http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/release_default/release_default/documentation/).
- [24] 郑可君, 李琛, 吴映梅, 等. 基于价值评估的川滇生态屏障区生境质量时空演变及其影响因素[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(11): 1377-1387.
- ZHENG Kejun, LI Chen, WU Yingmei, et al. Spatio-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in ecological conservation area in Sichuan-Yunnan Provinces based on value assessment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(11): 1377-1387.
- [25] 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.
- FAN Deqin, QIU Yue, SUN Wenbin, et al. Evaluating ecological environment based on remote sensing ecological index in Shenfu mining area[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(7): 23-28.
- [26] 范立民, 马雄德, 李永红, 等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 276-285.
- FAN Limin, MA Xiongde, LI Yonghong, et al. Geological disasters and control technology in high intensity mining area of western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 276-285.
- [27] 王江涛, 杨永崇, 杨梅焕. 基于地理探测器的黄土高原 NPP 时空变化及驱动力研究[J]. *西安理工大学学报*, 2003, 39(1): 12-20.
- WANG Jiangtao, YANG Yongchong, YANG Meihuan. Spatial and temporal variation and driving forces of NPP on the Loess Plateau based on Geodetector[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2003, 39(1): 12-20.
- [28] 康帅直, 穆琪, 赵永华, 等. 黄土高原神府资源开采区生态环境质量时空格局特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2781-2792.
- KANG Shuai zhi, MU Qi, ZHAO Yonghua, et al. Temporal and spatial pattern characteristics of ecological environmental quality in Shenfu mining area of Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2781-2792.

(责任编辑 王绪迪)