



资源型城市生态修复需求空间异质性分析

陈媚楠 丁忠义 侯湖平 倪庆琳 王雪晴

引用本文:

陈媚楠, 丁忠义, 侯湖平, 等. 资源型城市生态修复需求空间异质性分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 278–286.

CHEN Meinan, DING Zhongyi, HOU Huping. Analysis on spatial heterogeneity of ecological restoration demand in resource-based cities: taking Jiawang District of Xuzhou city as an example[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 278–286.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.ST21-001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1995—2021年榆神府矿区景观生态风险时空异质性研究

Spatial-temporal heterogeneity of landscape ecological risk in Yushenfu Mining Area from 1995 to 2021

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 270–279 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0762>

生态保护型煤炭开采技术与实践

Ecological protection coal mining technology system and engineering practice

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 28–37 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1962>

北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术

Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 323–333 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1902>

矿区复垦林地生态修复无人机监测研究

Study on ecological restoration of reclaimed forest land in mining area based on UAV monitoring

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dfe04126-d687-4e56-a570-0a0a6e1b79fe>

关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考——基于生态修复视角

Some thoughts on green development strategy of coal industry: from aspects of ecological restoration

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/daa798c3-3985-410d-8610-a2cc03b92fd2>

煤矸石对草原煤矿区生态风险影响研究

Research on influence of coal gangue on ecological risk in grassland coal mining area

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 226–234 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e388297a-600c-4eee-9745-a0cc0b7d2213>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

陈媚楠, 丁忠义, 侯湖平, 等. 资源型城市生态修复需求空间异质性分析——以徐州市贾汪区为例[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 278–286.

CHEN Meinan, DING Zhongyi, HOU Huping, *et al.* Analysis on spatial heterogeneity of ecological restoration demand in resource-based cities: taking Jiawang District of Xuzhou city as an example[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 278–286.

资源型城市生态修复需求空间异质性分析

——以徐州市贾汪区为例

陈媚楠¹, 丁忠义^{1,2}, 侯湖平^{1,2}, 倪庆琳¹, 王雪晴¹

(1. 中国矿业大学 公共管理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 资源型城市经过长期的煤炭资源开采, 导致煤矿区资源开发与生态保护之间不平衡、不协调的矛盾突出; 在生态文明建设背景下, 厘清生态修复需求空间异质性、合理安排生态修复工作优先次序, 成为开展高效协调的生态保护与修复的基础性工作。从生态系统和人类福祉协同发展的综合视角切入, 选取徐州市贾汪区为研究对象, 以 2000、2010、2019 年 3 期历史遥感影像以及历史矿井信息和社会经济统计数据为数据源, 采用当量赋值法核算区域生态系统服务价值并作系数修正, 综合地形位指数、矿区扰动指数和景观脆弱度指数构建景观生态风险评价体系, 分析研究区生态系统服务价值和生态风险指数的时空格局, 并引入夏普比率进一步探讨生态修复需求空间异质性。结果表明: ① 2000—2019 年贾汪区生态系统服务价值总量先增加后减少, 生态风险指数值先下降后上升, 增长速率较为平缓, 均表现为小幅度; 生态服务价值和生态风险等级的空间分布均呈现出总体连片, 局部圈层向外推移的态势, 城镇化与采煤塌陷地治理是空间格局差异化的主要影响因素。② 在数量层面, 单位面积生态系统服务价值和生态风险指数具有较强的负向等级相关性, 但没有明显的函数关系; 在空间层面, 2000—2019 年贾汪区单位生态系统服务价值与生态风险指数的全局 Moran's I 指数均为负值, 存在负向空间关联性。生态风险与生态系统服务具有明显的错位特征。③ 贾汪区生态修复需求异质性指数 R 值呈现一定程度上的梯度空间变化趋势, 整体生态修复需求降低趋向, 但局部区域仍存在 R 指标过高或过低的现象; 随着偏离度等级增加, 生态修复需求高值区范围逐渐缩小并向低值区转化, 需要进行重点生态建设的区域更加趋向集中化。研究结论能够为资源枯竭型城市的系统性、整体性生态修复决策安排提供参考。

关键词: 生态修复; 生态服务价值; 生态风险; 资源型城市; 异质性

中图分类号: TD88

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2022)12-0278-09

Analysis on spatial heterogeneity of ecological restoration demand in resource-based cities: taking Jiawang District of Xuzhou city as an example

CHEN Meinan¹, DING Zhongyi^{1,2}, HOU Huping^{1,2}, NI Qinglin¹, WANG Xueqing¹

(1. School of Public Policy & Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Resource and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: After a long period of coal resource exploitation in resource-based cities, the imbalance and disharmony between resource development and ecological protection in coal mining areas are prominent. In the context of ecological civilization construction, clarifying the spatial heterogeneity of ecological restoration needs and reasonably arranging the priority of ecological restoration work will become

收稿日期: 2022-05-20

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-001

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074154); 江苏省资源环境信息工程重点实验室开放基金资助项目(JS201901); 中央高校基本科研业务费专项资助资金(2017XKQY071)

作者简介: 陈媚楠(1997—), 女, 广西玉林人, 硕士研究生。E-mail: chenmeinan@cumt.edu.cn

通讯作者: 丁忠义(1975—), 男, 山西宁武人, 副教授。E-mail: dingzhongyi@cumt.edu.cn

the basic work for efficient and coordinated ecological protection and restoration, which will help to plan as a whole, coordinate and orderly promote the high-quality sustainable development of resource-based cities. From the comprehensive perspective of the coordinated development of ecosystem and human well-being, Jiawang District, Xuzhou City, was selected as an example, and the historical remote sensing images, historical mine information and social and economic statistics in 2000, 2010 and 2019 were taken as the data sources. The equivalent assignment method was used to calculate the regional ecosystem service value and make coefficient correction. The landscape ecological risk assessment system was constructed by integrating the topographic location index, mining area disturbance index and landscape vulnerability index. The spatial and temporal patterns of ecosystem service value and ecological risk index in the study area were analyzed, and the sharpe ratio was introduced to further explore the spatial heterogeneity of ecological restoration needs. The results showed that: ① From 2000 to 2019, the total value of ecosystem services in Jiawang district increased first and then decreased, and the value of ecological risk index decreased first and then increased. The growth rate was relatively flat, showing a small range; the spatial distribution of ecological service value and ecological risk level shows a trend of overall connectivity, with local circles moving outward. Urbanization and coal mining subsidence land management are the main factors influencing the spatial pattern differentiation. ② At the quantitative level, the ecosystem service value per unit area and the ecological risk index have strong negative grade correlations, but there is no obvious functional relationship; At the spatial level, the overall Moran's I index of unit ecosystem service value and ecological risk index in Jiawang District from 2000 to 2019 were negative, showing negative spatial correlation. Ecological risks and ecosystem services have obvious dislocation characteristics. ③ The heterogeneity index R of ecological restoration demand in Jiawang district presents a gradient spatial change trend to a certain extent, and the overall ecological restoration demand tends to decrease, but the R index is still too high or too low in some regions; with the increase of degree of deviation, the range of high value areas for ecological restoration needs gradually narrowed and transformed to low value areas, and the areas requiring key ecological construction tend to be more centralized. The research conclusion can provide reference for the decision-making arrangement of systematic and integrated ecological restoration of resource exhausted cities.

Key words: ecological restoration; ecosystem service value; ecological risk; resource-based city; spatial heterogeneity

0 引 言

随着资源型城市生态化转型以及人类活动日趋频繁,煤炭资源枯竭和生境破碎化等问题导致土地利用结构剧烈变化^[1],引发生态系统服务和生态风险不断变化进而影响人类福祉^[2],因煤炭资源开采引致的生态风险使得煤矿区生态修复与保护已经成为应对生态保护不均衡、不平等发展的热点问题^[3],能否科学确定生态修复空间辨识的限制性因素及其阈值,将影响生态修复范围以及应达到的合理程度^[4]。

现阶段生态保护和修复目标从生态系统结构与功能优化转向人类生态福祉提升等、从过去单一要素保护转变为多要素构成的生态系统服务功能提升^[5];生态修复需要权衡自然资源本底约束和社会经济需求,对已退化、损害或彻底破坏的生态系统结构和功能进行恢复^[6];现有研究多聚焦于对水体^[7]、土壤^[8]和植被^[9]等单一生态要素的监测以及生态系统结构和功能服务的改善。生态系统服务是由生态系统服务功能产生的,可从正向改变生态系统恢复方向,从而改善区域生态安全状况^[10]。如王军等^[11]探讨了生态系统服务理论在山水林田湖草系统生态保护修复中的应用,白中科等^[12]提出人工支持引导生态系统自然修复的路径和关键方法,为生态系统服务理论应用于生态修复提供了认知视角和决策途径^[13-14]。

由于资源环境约束、国土空间冲突等困境交织导致生态修复需求在空间上呈现的差异化,要求开展生态修复选择的优先度研究^[15];不同目标需求下生态修复内容顺序及策略选择优先度差异显著,应实施分区管控、分级修复、分步推进^[16]。资源型城市与非资源型城市发展路径不同,容易出现生态风险问题,在空间尺度上定量研究统筹解决受损的点、线影响势在必行^[17]。立足人类福祉并结合生态系统过程进行风险表征^[18],李俊翰等^[19]探讨生态服务价值和生态风险的关联性、王慧芳等^[20]从人类福祉的角度结合生态系统过程进行风险评价,刘世梁等^[21]将生态系统服务功能的提升应用到土地整治全过程的生态风险评价,蒋蕾等^[22]提出了生态风险分区管控对策,陈峰等^[23]采用生态风险分析模型划定了不同置信水平下的生态风险管控优先区。由于自然本底、社会经济发展、典型生态问题的空间非均衡性,生态修复需求在空间分布上的不均匀性及其复杂性客观存在^[24];从人类福祉的角度^[25],综合考量生态系统服务并定量评价区域生态风险进行生态修复修复需求异质性研究和分区管控,是推动我国煤矿区生态问题的有效措施和生态修复差别化建设的前提^[26]。现有生态修复需求异质性研究区域大多集中在长三角、长株潭、京津冀和西南地区^[27],而对资源型城市转型期间的生态修复需求时空异质性相关的实证案例分

析较为薄弱。

贾汪区是我国第3批资源枯竭城市;曾经的煤炭资源开采给经济建设提供支持同时也带来生态破坏^[28],此类地区亟待结合国家转型发展政策对其实施系统性生态修复,构建资源枯竭型城市生态化转型内在发展的基础和动力^[17]。基于此,以徐州市贾汪区为例,将生态服务价值和生态风险指数作为衡量手段,针对不同偏离度等级下的生态修复需求进行空间异质性分析,以期作为资源型城市政府决策、生态修复规划和生态保护控制的科学依据。

1 研究区概况

贾汪区地处苏鲁交界,属湿润至半湿润季风气候区,地理坐标为北纬 $34^{\circ}17' \sim 34^{\circ}32'$,东经 $117^{\circ}17' \sim 117^{\circ}42'$,位于徐州市主城区东北部35 km,全区总面积 620.29 km^2 ,以丘陵与黄淮冲积平原为主。贾汪区拥有全国综合实力“千强镇”2个,是全国绿色发展百强区之一,也徐州特大城市的核心区之一。贾汪区拥有具有水源涵养、调节小气候、调蓄洪水等重要生态功能的水系、山体、湿地等,如作为主城区重要

生态屏障的商湖、潘安湖、南湖,全国南水北调东路通道的京杭大运河、不老河,以及国道206东西两侧分布4个山系等,如图1所示。历史上,煤矿分布主要涉及到贾汪镇、青山泉镇、紫庄镇和大吴镇等4个乡镇,涵盖村庄50多个;至2016年11月贾汪区的所有煤矿已经全部关闭^[29]。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

将2000、2010和2019年Landsat遥感影像数据处理后,得到所使用的土地利用数据,Landsat影像来源于地理空间数据云,数据空间分辨率为30 m,辅以矿区地籍调查数据。根据遥感图像地物显示特征和研究区情况将其划分为耕地、林地、建设用地、水域和未利用5种。相关基础资料来自历年中国统计年鉴、中国粮食年鉴、中国农业年鉴、中国农村统计年鉴、徐州市统计年鉴、贾汪统计年鉴和全国农产品成本收益资料汇编,部分数据来源于国民经济与社会发展统计公报以及相关的统计信息网站。

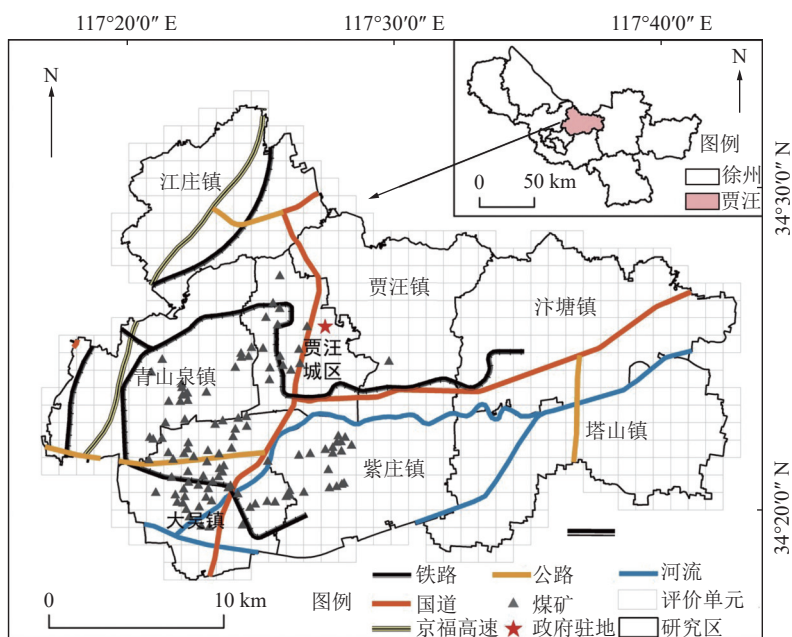


图1 研究区概况

Fig.1 Location and situation of the research area

2.2 研究方法

根据关于国土空间生态修复演进阶段划分:区域生态风险管控是生态修复的基础,关注高强度人类活动的影响,是生态修复第1阶段;生态系统服务提升是生态修复的目标,关注综合国土空间系统认知,是生态修复的第2个阶段^[5]。研究尝试将生

态修复需求视作为人们对已退化、损害或彻底破坏的生态系统结构和功能进行恢复的需要,以及人类社会消耗的或渴望得到的生态系统服务的数量和质量。引入夏普比率和“ 3σ ”法则,将生态服务价值与生态风险分别视为“预期报酬”上限与“波动风险”阈值,在空间上将生态系统服务与生态风

险组合分析,强调空间要素来表征多种风险源和受体(异质性景观)以及与人类福祉这一评估终点相关联,在阐释提升生态系统服务(隐性生态修复需

求)和降低人类扰动风险(显性生态修复需求)2者空间演变的基础上进行生态修复需求空间异质性衡量,总体研究思路与框架如图2所示。

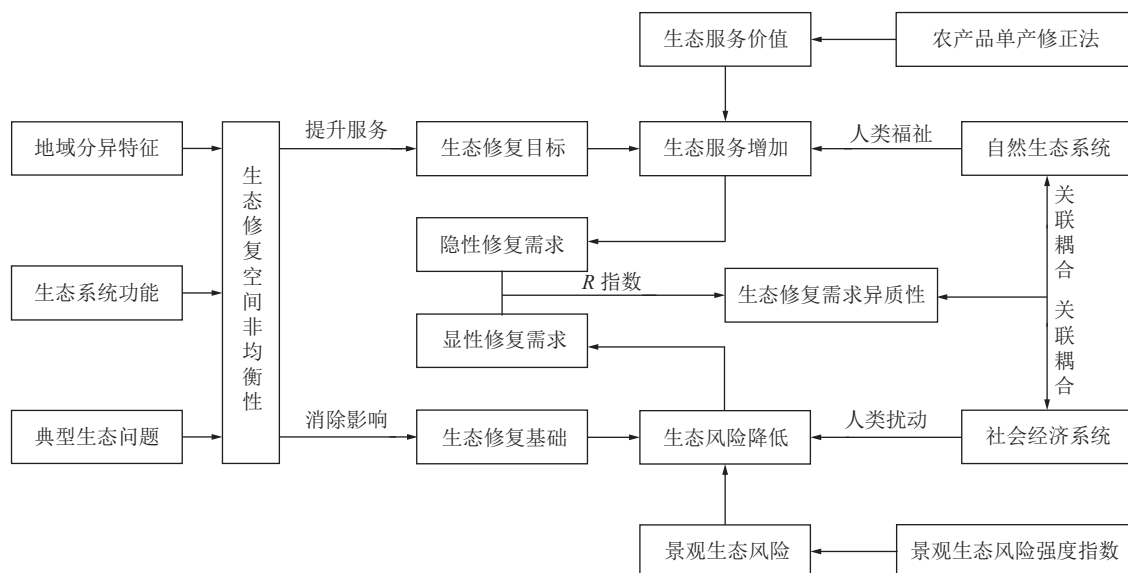


图2 总体研究思路与框架

Fig.2 Overall research ideas and framework

2.2.1 生态服务价值核算修正

煤矿区因煤炭开采活动、非农建设等人类活动改变了生态系统结构和功能,影响着区域生态系统服务价值,有必要对单位面积生态服务价值当量因子进行修正。在 COSTANZA 等^[30]文献研究成果的基础上,采用以农田为基准的地区修正法进行标准当量的系数修订^[31],修正公式如下:

$$V_i = e_i f_i \sum_{j=w,c,r} S_{ji} P_{ji} y_{ji} \quad (1)$$

式中: V_i 为研究区生态服务价值标准当量(元/hm²); S_{ji} 为某作物播种面积占总播种面积比重; P_{ji} 为某作物的全国平均净利润; y_{ji} 为单产修正系数(研究区单产与全国平均单产之比); e_i 和 f_i 为经济修正和肥力修正系数^[19], i 为年份, j 为作物类型。

通过划分格网单元(1 km×1 km)分别核算 3 期每个格网单元的生态系统服务价值系数/指数(即单位面积内的生态服务价值 ESVI), 计算公式^[19] 如下:

$$ESV_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} E_i \quad (2)$$

式中: ESV_k 为第 k 个格网生态服务价值指数(元); A_k 为格网单元总面积 hm²; A_{ki} 为第 k 个格网中第 i 类土地类型总面积 hm²; E_i 为第 i 类土地类型生态服务价值系数元/hm²。

2.2.2 景观生态风险指数计算

经过综合考虑研究区自然本底、煤炭开采、人类活动影响,选取地形位指数、矿区扰动指数和景观脆弱度指数 3 个指标来衡量生态风险强度;其中,地形位指数综合坡度和高程反映了区域地形的复杂状况^[32],矿区扰动指数衡量矿山开采对不同自然生态系统的复合影响^[33],景观脆弱度代表生态系统内部结构的易损性和不同景观类型的抗干扰能力^[34]。等权叠加获得格网内各土地利用类型生态风险值;为保证生态风险具有可比性,利用研究区内各土地利用类型的面积占比构建生态风险指数,用于描述格网内综合生态损失即生态风险的大小。生态风险强度指数 ERI 的计算公式^[35] 如下:

$$ERI = \sum_{i=1}^m \frac{A_i W_i}{A} \quad (3)$$

式中: m 为土地景观类型数量; A_i 为样地内第 i 种景观类型的总面积; A 为样地总面积; W_i 为第 i 种景观类型所反映的生态风险强度值。

2.2.3 生态修复需求程度 R 指数

煤矿区生态修复在于构建自维持、具有恢复力的生态系统;当生态系统服务供应不能满足于人们需求时,即人们生产、生活所消耗的生态产品和服务超过了自然生态系统的供应阈值,此时生态系统暴

露于风险之中^[23],与金融系统风险分析的夏普比率(Sharpe Ratio)^[36-37]十分类似,即投资的预期报酬与承受的波动风险存在相关性。为此,将生态服务价值与生态风险分别视为“预期报酬”上限与“波动风险”阈值,引入“夏普比率”作为判定生态修复需求程度的指标,将某个空间单元的生态损伤视为未来的生态修复目标,揭示不同区域的生态修复需求程度。基于统计误差理论“ 3σ ”法则划定生态保护允许偏离度,依据 ESV-ERI 的均衡程度,对不同需求情景分别赋值:①高偏离度,即生态压力较小,此时 $R_t=3\sigma(P<0.01)$;②中偏离度,即生态压力适中,此时 $R_t=2\sigma(P<0.05)$;③低偏离度,即生态压力较大,此时 $R_t=\sigma(P<0.1)$ 。则利用生态系统服务价值变化构建生态风险分析 R 指数可见式(4):

$$R = \frac{|ESV - ERI| - R_t}{\sigma^2} \quad (4)$$

式中,ESV 为生态服务价值;ERI 为生态风险强度指

数,可以看作是在一定时间水平和置信区间范围的预期可能损失值;2 者均进行归一化处理。 R_t 为最小二乘法计算的残差平方和,即给定的阈值。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值特征分析

结合标准当量系数修正方法,将 2000、2010 和 2019 年的标准当量值取均值,计算得出 2000—2019 年贾汪区的标准价值当量因子基准值为 638.24 元/hm²。将 3 期经过分类和精度验证的底图与格网单元进行叠加分析,利用各土地类型生态服务价值系数。为较好地研究区生态系统服务价值的空间异质性和空间集聚性特征进行可视化呈现,在变异函数拟合满意的前提下,采用克里金插值法空间插值各格网单元的单位面积生态服务价值(元/m²),结果按照自然断点法分成低、较低、中、较高、高 5 个等级(图 3)。

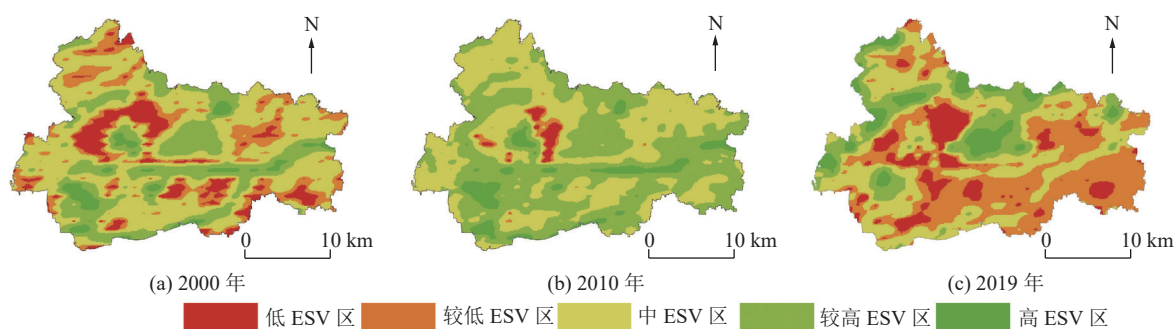


图 3 2000—2019 年贾汪区单位面积生态系统服务价值空间格局

Fig.3 Spatial distribution of ESV per unit area in Jiawang district

单位面积生态系统服务价值主要以中、较低两个等级为主;ESV 低等级区分布于贾汪区主城区周边,主要受建设用地比例及人为因素干扰;较低等级区域逐渐向研究区东部及南部平原地区扩展,村镇人口迁出造成部分耕地产出所致;较高等级区域于期初主要分布在研究区北部、主城区外围的林地,受到国道 310、206 等交通设施影响,较高等级 ESV 逐渐向较低等级转变。3 期 ESV 空间分布总体较为相似,随着城镇化进程和矿井逐步关闭,高值区呈条状分布在北部低山丘陵、不老河和大运河处,3 期 ESV 大同小异。人类活动为主导的景观变化是影响生态系统结构和功能的主要原因,并逐步实现生态系统保护控制。

从时序角度来看,研究区西南部矿区和骨干水系在研究期初 ESV 处于较低等级,得益于采煤塌陷地综合治理或矿区土地复垦项目以及锦凤溪、玉龙

湾等水系贯通工程和生态修复与环境再造取得成效,一定程度上促进了向高 ESV 区的转化。作为贾汪区重要的生态屏障,研究区北部大洞山生态片区 ESV 等级逐年提高,与近年来政府严格控制片区内建设用地规模,实施生态保育措施,维护了生态功能发挥有关。

3.2 生态风险特征分析

运用熵权法计算各指标的权重(表 1);归一化处理得到 5 种地类的生态风险强度参数分别为 0.274、0.150、0.108、0.275、0.193。分别计算不同时期格网单元内的生态风险指数,以此代表该评价小区的生态风险水平。对 3 期数据进行克里金空间插值,结果如图 4。按照自然断点法分成低、较低、中、较高、高 5 个风险等级。

2000 年、2010 年和 2019 年的生态风险指数值分别为 0.249、0.241 和 0.251。研究期间贾汪区生态

表 1 贾汪区生态风险强度评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of ecological risk intensity in jiawang district

类别	地类				
	耕地	林地	水域	建设用地	未利用地
矿区扰动指数	0.401	0.210	0.276	0.704	0.282
地形位指数	0.284	0.008	0.007	0.053	0.008
景观脆弱度指数	0.200	0.267	0.067	0.133	0.333

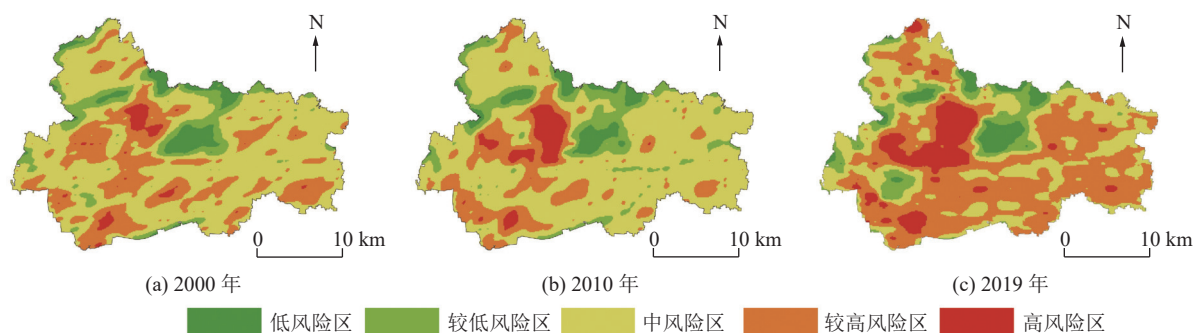


图 4 2000—2019 年贾汪区生态风险空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution pattern of ecological risk in Jiawang district from 2000 to 2019

风险指数呈现先降后升的趋势,浮动变化速率平缓。研究期初,随着采矿扰动及后期矿区复垦工作的进行,生态修复对改善环境有一定成效,但改善程度仍有待提高。从面积占比来看,2000—2019 年内的主要生态风险等级为中级,呈逐年缓慢降低的趋势,到期末达到 31.22%,主要地类为形状规则、破碎度较低的耕地;高生态风险和低生态风险面积占比较低,至研究期末分别仅为 10.07% 和 4.96%。

从分布形态来看,贾汪区生态风险等级呈现出总体连片、局部集聚的空间分布特征。高生态风险区主要分布在贾汪主城区,少量分布于西南部大吴镇内,随着近年来工业发展,高风险区的范围逐渐从主城区向东北角经济开发区辐射,并于 2019 年呈点状分布在大吴镇、紫庄镇和青山泉镇中心区;低生态风险区主要分布在贾汪区北部林地和大洞山生态片区,研究期内总体变化不显著。总体来看,贾汪区在城镇化发展过程中存在资源主导性、高速低质性、发展脆弱性和生态风险性的特征,建设用地景观结构随着城镇建设、人口压力、交通基础设施新建等方面的加大而发生变化,表现在较高风险等级区域面积显著增加;原西南部矿区情况得到改善,较低生态风险区呈环状分布在低生态风险区外围,有相互转移的趋势。

3.3 生态修复需求空间异质性分析

利用 SPSS 软件对 3 期数据 714 个格网的单位面积生态系统服务价值和生态风险值进行数量关联

性研究,3 个时期的肯德尔系数分别为 -0.625 、 -0.458 和 -0.639 ,可得单位面积生态系统服务价值与生态风险指数呈现一定的负向相关性。该结果与李俊翰等^[19]研究结论不一致,原因可能在于研究区选取与景观分析指标的差异性。采用 GeoDa 软件计算出全局自相关 Moran's I 指数分别为 -0.1937 、 -0.1104 、 -0.2956 ,表现出空间分布的负相关性,并通过一定显著性水平下检验,相似空间单元趋于空间集聚分布。

为了探讨贾汪区不同时段生态修复需求空间分异情况,将各评价单元 R 值进行插值得到图 5。整体来看, R 值呈现一定程度上的梯度空间变化趋势,局部区域仍有 R 指标过高/过低的现象,需要进行重点生态修复的区域趋向集聚化;贾汪区 R 值先减少后增加,环境得到改善但仍未恢复到采矿前的自然条件和生态本底,总体修复需求降低。中部的贾汪镇、贾汪城区和西南部的大吴镇生态修复需求程度较大,最高平均 R 值达到 1.36,西部青山泉和南部紫庄、塔山 3 镇的生态修复需求程度一般,北部江庄和汴塘两镇的生态修复需求程度较低, R 值范围在 $-1.96 \sim 0.2$ 之间。

从时序角度来看,低偏离度情形下 3 年的高值区范围最大,大面积分布在西南部大吴镇以及中部的贾汪城区,占区域总面积的 13.25%~14.85%。主城区西南部为产业发展区扩展方向,易受城市辐射带动影响,京福高速、京沪高铁等交通干线的建设一

一定程度上破坏了原有的生态格局。中偏离度情形下3期的高值区面积先减小后增大,平均占比为5.15%。于西南矿区、不老河水系东部和京杭大运河沿线与未利用地的交接处均有分布,从2000年的条带形态

逐渐转向点状式分布,这可能与水环境建设项目和“向荒山进军”绿化系列工作的进行有关。高偏离度情形下的高值区域所占比重最低,占研究区总面积2.64%左右。

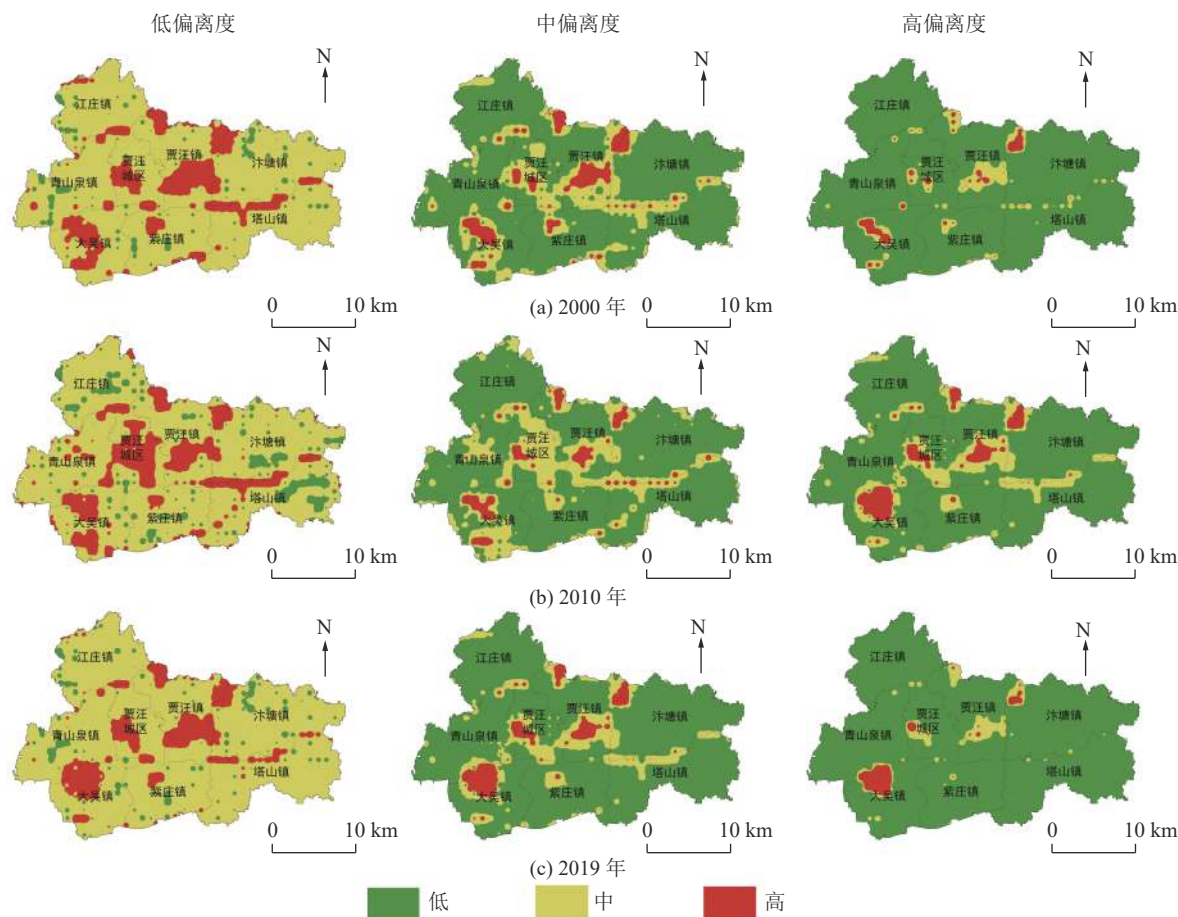


图5 2000—2019年贾汪区不同偏离度 R 值空间分布

Fig.5 Spatial distribution of R -value with diverse deviations in Jiawang District

不同偏离度等级的 R 分布表现出一定的规律性:①高值区于西南部大吴镇以及北部采石场均有覆盖;煤炭资源的开采导致景观破碎化、区域生态承载力较低,坑塘河流水系多样化的利用方式带来水源涵养等生态功能易遭破坏的风险;②低值区主要集中在贾汪区西北部江庄镇与东北部督公湖附近;北部区域多为丘陵和山前平原,丘陵区督公湖全面整治,水域库容面积的增加使该区域生态服务价值增大;唐庄、马庄、权台等西南部煤矿基地高低值相间分布,景观斑块较为破碎且有潜在地质灾害风险。可见,贾汪区煤炭资源开发导致的历史遗留问题和潜在生态风险并存,生态修复需求呈“点、线、面”的异质性格局。基于生态偏离筛选生态修复重点区域为:点——北部采石场与窝山、九山、二郎山等山体;线——塔山镇北部不老河流域;面——潘安湖生态

片区、贾汪主城区。基于生态修复需求异质性分析结果,综合贾汪区山、水、林、田、矿五大类生态系统,划分重点区域优先安排生态修复项目。

4 结 论

1)ESV和ERI的空间分布变化明显,高生态服务价值-低生态风险区域主要集中在中部山体和潘安湖生态片区;煤炭资源的开采和复垦工程等人为因素是ESV和ERI空间差异化的主要推动力。

2)单位面积生态系统服务价值和生态风险指数具有较强的负向等级相关性,但没有明显的函数关系;随着偏离度等级增加,高值区范围逐渐缩小并向低值区转化,重点生态修复建设的区域趋向集中。

3)生态修复需求空间分异变化幅度与所处自然生态系统和社会经济系统背景有关,本文未能针对

性分析生态修复需求空间分异的主导因素/驱动因素, 未来将针对区域生态本底、社会需求、修复成本等约束条件, 综合研判资源型城市生态修复需求差异化特征, 以便为区域生态修复决策提供更为详尽的借鉴。

参考文献(References):

- [1] 卢 硕, 张文忠, 余建辉, 等. 资源型城市演化阶段识别及其发展特征[J]. *地理学报*, 2020, 75(10): 2180–2191.
LU Shuo, ZHANG Wenzhong, YU Jianhui, *et al.* The identification of spatial evolution stage of resource-based cities and its development characteristics[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2180–2191.
- [2] 谢丽霞, 白永平, 车 磊, 等. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 196–207.
XIE Lixia, BAI Yongping, CHE Lei, *et al.* Construction of ecological zone based on value-risk ecological function area in the Upper Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 196–207.
- [3] 胡振琪, 肖 武. 关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考: 基于生态修复视角[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(4): 35–42.
HU Zhenqi, XIAO Wu. Some thoughts on green development strategy of coal industry: from aspects of ecological restoration[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 35–42.
- [4] 卞正富, 雷少刚, 金 丹, 等. 矿区土地修复的几个基本问题[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 190–197.
BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, *et al.* Several basic scientific issues related to mined land remediation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 190–197.
- [5] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64–69.
FU Bojie. Several key points in territorial ecological restoration[J]. *Strategy & Policy Decision Research*, 2021, 36(1): 64–69.
- [6] 曹 宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知[J]. *中国土地科学*, 2019, 33(7): 1–10.
CAO Yu, WANG Jiayi, LI Guoyu. Ecological restoration for territorial space: basic concepts and foundations[J]. *China Land Science*, 2019, 33(7): 1–10.
- [7] 熊 文, 孙晓玉, 黄 羽. 城市静态小水体生态修复措施与生态服务价值评估研究[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(2): 29–35.
XIONG Wen, SUN Xiaoyu, HUANG Yu. Assessment of an ecosystem restoration project and evaluation of ecosystem services for a small urban lake in Wuhan, China[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(2): 29–35.
- [8] XUE Zhijing, CHENG Man, AN Shaoshan. Soil nitrogen distributions for different land uses and landscape positions in a small watershed on Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60(5): 204–213.
- [9] ZHOU Yuanyuan, FU Dongjie, LU Chunxia, *et al.* Positive effects of ecological restoration policies on the vegetation dynamics in a typical ecologically vulnerable area of China[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 159(5): 106087.
- [10] TAN Puay Yok, ZHANG Jingyuan, MASOUDI Mahyar, *et al.* A conceptual framework to untangle the concept of urban ecosystem services[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 200(5): 103837.
- [11] 王 军, 钟莉娜. 生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8702–8708.
WANG Jun, ZHONG Lina. Application of ecosystem service theory for ecological protection and restoration of mountain-river-forest-field-lake-grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8702–8708.
- [12] 白中科, 师学义, 周 伟, 等. 人工如何支持引导生态系统自然修复[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(9): 1–9.
BAI Zhongke, SHI Xueyi, ZHOU Wei, *et al.* How does artificiality support and guide the natural restoration of ecosystems[J]. *China Land Science*, 2020, 34(9): 1–9.
- [13] 彭 建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 3–13.
PENG Jian, LYU Danna, DONG Jianquan, *et al.* Processes coupling and spatial integration: characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 3–13.
- [14] 陈新闻, 李小倩, 吕一河, 等. 区域尺度生态修复空间辨识研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8717–8724.
CHEN Xinchuan, LI Xiaoqian, LV Yihe, *et al.* Review of spatial identification of ecological restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8717–8724.
- [15] 宫清华, 叶玉瑶, 王 钧, 等. 粤港澳大湾区防灾韧性空间规划策略研究[J]. *规划师*, 2021, 37(3): 22–27.
GONG Qinghua, YE Yuyao, WANG Jun, *et al.* Resilient disaster prevention space planning of Guangdong-Hong Kong-Macao Great Bay Area[J]. *Planners*, 2021, 37(3): 22–27.
- [16] 卞正富, 于昊辰, 雷少刚, 等. 黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1378–1391.
BIAN Zhengfu, YU Haochen, LEI Shaogang, *et al.* Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River Basin, China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1378–1391.
- [17] 白中科. 资源型城市城镇化进程及生态整治路径研究[J]. *中国土地*, 2017(7): 17–19.
BAI Zhongke. Research on the urbanization process and ecological improvement path of resource-based cities[J]. *China Land*, 2017(7): 17–19.
- [18] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 843–855.
CAO Qiwen, ZHANG Xiwen, MA Hongkun, *et al.* Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services: ESRISK[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 843–855.
- [19] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 7815–7828.
LI Junhan, GAO Mingxiu. Spatiotemporal evolution and correla-

- tion analysis of ecosystem service values and ecological risk in Binzhou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21): 7815–7828.
- [20] 王慧芳, 林子雁, 肖 斌, 等. 基于生态系统服务潜在损失的滑坡灾害生态风险评价[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3553–3562.
- WANG Huifang, LIN Ziyang, XIAO Yi, *et al.* Ecological risk assessment of landslide disasters based on potential loss of ecosystem services[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3553–3562.
- [21] 刘世梁, 侯笑云, 张月秋, 等. 基于生态系统服务的土地整治生态风险评价与管控建议[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(3): 193–200.
- LIU Shiliang, HOU Xiaoyun, ZHANG Yueqiu, *et al.* Assessment of and controlling strategies for ecological risks of land consolidation based on ecosystem services[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(3): 193–200.
- [22] 蒋 蕾, 杜明月. 基于生态系统服务的农安县景观生态风险评价[J]. *环境生态学*, 2019, 1(3): 39–45.
- JIANG Lei, DU Mingyue. Landscape ecological risk assessment based on ecosystem services of Nong'an County[J]. *Environmental Ecology*, 2019, 1(3): 39–45.
- [23] 陈 峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 432–445.
- CHEN Feng, LI Hongbo, ZHANG Anlu. Ecological risk assessment based on terrestrial ecosystem services in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 432–445.
- [24] 蔡海生, 陈 艺, 查东平, 等. 基于主导功能的国土空间生态修复分区的原理与方法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 261–270.
- CAI Haisheng, CHEN Yi, ZHA Dongping, *et al.* Principle and method for ecological restoration zoning of territorial space based on the dominant function[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 261–270.
- [25] KHOSHKAR Sara, HAMMER Monica, BORGSTRÖM Sara, *et al.* Moving from vision to action-integrating ecosystem services in the Swedish local planning context[J]. *Land Use Policy*, 2020, 97(5): 104791.
- [26] 陈春丽, 吕永龙, 王铁宇, 等. 区域生态风险评价的关键问题与展望[J]. *生态学报*, 2010, 30(3): 808–816.
- CHEN Chunli, LYU Yonglong, WANG Tieyu, *et al.* Emerging issues and prospects for regional ecological risk assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 808–816.
- [27] 谢余初, 张素欣, 林 冰, 等. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 217–229.
- XIE Yuchu, ZHANG Suxin, LIN Bing, *et al.* Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 217–229.
- [28] 胡振琪. 我国土地复垦与生态修复30年: 回顾、反思与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 25–35.
- HU Zhenqi. The 30 years'land reclamation and ecological restoration in China: review, rethinking and prospect[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 25–35.
- [29] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区: 以徐州市贾汪区为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 204–216.
- NI Qinglin, HOU Huping, DING Zhongyi, *et al.* Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: taking Jiawang District of Xuzhou City as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 204–216.
- [30] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253–260.
- [31] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740–1746.
- XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Changshun, *et al.* The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740–1746.
- [32] 杜腾飞, 齐 伟, 朱西存, 等. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1190–1200.
- DU Tengfei, QI Wei, ZHU Xicun, *et al.* Precise identification and control method of natural resources space based on ecological security pattern in mountainous hilly area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1190–1200.
- [33] LI Sucui, XIAO Wu, ZHAO Yanling, *et al.* Incorporating ecological risk index in the multi-process MCRE model to optimize the ecological security pattern in a semi-arid area with intensive coal mining: A case study in northern China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119143.
- [34] 吴健生, 宗敏丽, 彭 建. 基于景观格局的矿区生态脆弱性评价: 以吉林省辽源市为例[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(12): 3213–3220.
- WU Jiansheng, ZONG Minli, PENG Jian. Assessment of mining area's ecological vulnerability based on landscape pattern: a case study of Liaoyuan, Jilin Province of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(12): 3213–3220.
- [35] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 复垦矿区生态系统服务价值空间分异研究: 以徐州市贾汪矿区为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(4): 749–756.
- LI Baojie, GU Hehe, JI Yazhou. Spatial heterogeneity of ecosystem service value of reclaimed land in mining area: A case study of Jiawang Mining Area in Xuzhou City[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(4): 749–756.
- [36] XING Lu, HU Mingsheng, WANG Yi. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment: a case study of Hubei Province, central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740(5): 140126.
- [37] HANSEN Bruce E. Sample splitting and threshold estimation[J]. *Econometrica*, 2000, 68(3): 575–603.