

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0100

李航鹤, 马腾辉, 王坤, 等. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1036-1045.

LI Hang-he, MA Teng-hui, WANG Kun, et al. Construction of Ecological Security Pattern in Northern Peixian Based on MCR and SPCA[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 1036-1045.

基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究

李航鹤¹, 马腾辉¹, 王坤², 谭敏^{1,2}, 渠俊峰^{1,2,3}① (1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116; 2. 徐州市生态文明建设研究院, 江苏徐州 221008; 3. 中国矿业大学低碳能源研究院, 江苏徐州 221008)

摘要: 沛县北部因采煤导致地形、地貌和地类变化, 直接影响了整个区域的生态安全, 因此需要在区域生态安全状况评价的基础上构建生态安全格局。该研究以沛县北部地区为研究对象, 选取高程、坡度、土地覆盖类型、植被覆盖、距水体的距离、距道路的距离、距矿点的距离、距居民点的距离 8 个指标, 采用空间主成分分析法(SPCA)评价研究区生态安全状况, 并利用最小累积阻力模型(MCR)建立生态阻力面, 借助 GIS 空间分析技术提取生态廊道和生态节点, 从而构建研究区的生态安全格局。结果表明研究区生态安全水平不高, 中度安全水平的面积为 447.53 km², 占研究区总面积的 44.53%; 较低安全水平的面积为 344.58 km², 占研究区总面积的 34.28%; 识别的 31 条潜在生态廊道、31 个一类生态节点和 20 个二类生态节点与生态源地一起构成了研究区的生态安全格局, 为沛县北部的生态规划和生态可持续发展提供了有效参考。

关键词: 生态安全格局; 最小累积阻力模型; 空间主成分分析; 沛县

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2020)08-1036-10

Construction of Ecological Security Pattern in Northern Peixian Based on MCR and SPCA. LI Hang-he¹, MA Teng-hui¹, WANG Kun², TAN Min^{1,2}, QU Jun-feng^{1,2,3}① (1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Xuzhou Institute of Ecological Civilization Construction, Xuzhou 221008, China; 3. Low Carbon Energy Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Due to coal mining in northern Peixian County, changes in topography, landforms, and land types have directly affected the ecological security of the entire region. An ecological security pattern needs to be constructed based on the evaluation of regional ecological security conditions. This study took the northern area of Peixian County as the research object, and selected the following eight indicators: elevation, slope, land cover type, vegetation cover, distance from water body, distance from road, distance from mine site, and distance from residential site. The spatial principal component analysis (SPCA) method was used to evaluate the ecological security status of the study area, and the minimum cumulative resistance (MCR) model was used to establish the ecological resistance surface. The GIS spatial analysis technology was used to extract ecological corridors and ecological nodes to construct the ecological security pattern of the study area. The results show that the level of ecological security in the study area is not high. The area with a moderate security level is 447.53 km², accounting for 44.53% of the total study area, and the area with a lower security level is 344.58 km², accounting for 34.28% of the total study area. 31 potential ecological corridors, 31 first-class ecological nodes, and 20 second-class ecological nodes were identified. Those corridors and nodes, together with the ecological source form the ecological security pattern of the study area, which provides a valid reference for ecological planning and ecological sustainable development in northern Peixian County.

收稿日期: 2020-02-18

基金项目: 自然资源部土地整治中心外协项目(2017-01-39)

① 通信作者 E-mail: qjf4209779@163.com

Key words: ecological security pattern; minimum cumulative resistance model; spatial principal component analysis; Peixian

人类活动持续对生态环境产生负面影响,使得生态安全问题备受关注。保障生态安全一直是社会的迫切需求,也是生态领域研究的热点^[1]。生态安全评价即根据自然生态、社会、经济因子的相互作用关系,在特定的时空范围内以一定的标准对生态安全水平进行定性或定量评估^[2],既能反映区域生态安全状况,又可为区域生态安全格局构建提供依据^[3]。生态安全评价通常借助自然-经济-社会框架^[4]、压力-状态-响应(PSR)模型^[5]、驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型^[6]、生态足迹模型^[7]、多因子综合评价模型等来实现,然而多数评价未结合空间分析,结果不能体现区域生态安全的空间分布状态,更难以展示生态安全的空间邻近影响关系,因此无法提出针对性的生态调控措施。而空间主成分分析法(spatial principal component analysis, SPCA)能将多个空间变量在二维空间进行分析转换,提取具有空间信息的多变量主因子,可消除指标间的量纲差异及空间信息缺失的干扰^[8],同时各因子及评价结果均可落实于空间的每个栅格上,空间可视性良好。

作为沟通生态系统服务和人类社会发展的桥梁,生态安全格局被视为区域生态安全保障和人类福祉提升的关键环节^[9],并被确定为国土空间开发保护的三大战略格局之一^[10]。生态安全格局指针对特定的生态环境问题,以生态、经济、社会效益最优为目标,依靠一定的技术手段对区域内的各种自然和人文要素进行安排、设计、组合与布局,得到由点、线、面、网组成的多目标、多层次和多类别的空间配置方案^[11]。依据格局与过程互馈原理,生态安全格局以维持生态系统结构与过程的完整性为基础,提出改善区域生态问题的对策并落实于空间地域^[12],被认为是促进社会可持续发展的重要保障与基本途径^[13]。目前利用最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)构建生态安全格局的研究已经日趋成熟, MCR模型最早由KNAAPEN等^[14]提出并用于景观规划中, MCR模型的实质就是生态流在空间覆盖过程中克服不同景观要素阻力的过程^[15],它能综合考虑生态过程的内在联系,反映物种运动的潜在趋势,从而判断目标单元与源单元的连通性。俞孔坚^[16]基于MCR模型首次提出了景观生态安全格局的概念,之后马克明等^[1]在此基础上提出区域生态安全格局,随后相关研究成为热点并逐渐应用于多个领域。生态安全

格局构建的基本模式在发展实践中形成,主要步骤是确定生态源地、建立阻力面、提取生态廊道和判别安全格局^[17],其中累积阻力面的建立是构建生态安全格局的关键^[18]。

作为江苏省重要的煤炭基地,沛县北部地区高强度的煤炭开采导致塌陷地面积逐年递增,制约着沛北城乡空间一体化发展^[19]。多年来,以工业生产为主导的发展定位使沛县北部生态欠账较多,严重影响了区域的经济效益、生态效益和社会效益的协调发展及稳步增长。2019年沛北省级经济开发区获批,为突出生态优先、绿色发展的理念,笔者以沛县北部地区为研究对象,采用主成分分析方法对其生态安全进行评价,以GIS空间技术作为支撑,构建矿区生态安全格局,以期增强地区生态系统的连通性和紧密性,为沛县北部地区的生态规划和管理提供借鉴和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省徐州市沛县北部(34°28'~34°59' N, 116°41'~117°09' E),西与丰县相邻,东部与山东省济宁市微山县相望,北面为山东省济宁市鱼台县,处于华北平原的东南边缘和淮海经济区的中心位置,涵盖4个街道、7个镇级行政单元和部分微山湖区域,总面积为1 005.10 km²。沛县属暖温带半湿润季风气候区,四季分明,年均降水量约704.4 mm,年均湿度72%。沛县地势西南高而东北低,由西南部海拔41 m向东北部逐降至31 m左右,为典型的冲积平原。境内河网密布,因受地形制约河流多自西南流向东北入湖。东、西流向的主要有杨屯河、沿河、鹿口河等,南、北流向的主要有大沙河、姚楼河、龙口河、徐沛河、苏北堤河、顺堤河等。沛县北部是沛县工业和煤炭资源主要聚集区,分布有5个生产矿井(姚桥、徐庄、孔庄、龙东、张双楼)和3个停产矿井(三河尖、龙固、沛城)(图1),随着煤炭资源的逐年枯竭,沛县北部的土地占压与沉降、生态环境恶化、地下水系统破坏等一系列生态安全问题日益突出。

1.2 数据来源

研究使用的数据包括土地利用数据、DEM数据和归一化植被指数(NDVI)。土地利用数据来自徐州市自然资源和规划局提供的国土资源二次调查数据(2017年),根据研究需要对其进行分析处理;

DEM 数据采用 30 m 分辨率的 GDEM V2 数字高程数据,来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>); NDVI 数据以下载于地理空间数据云平台的 2017 年 6 月 Landsat 8 OLI 卫星影像为基础,分辨率为 30 m,借助 ENVI 5.2 软件的 Band Math 工具计算得到。

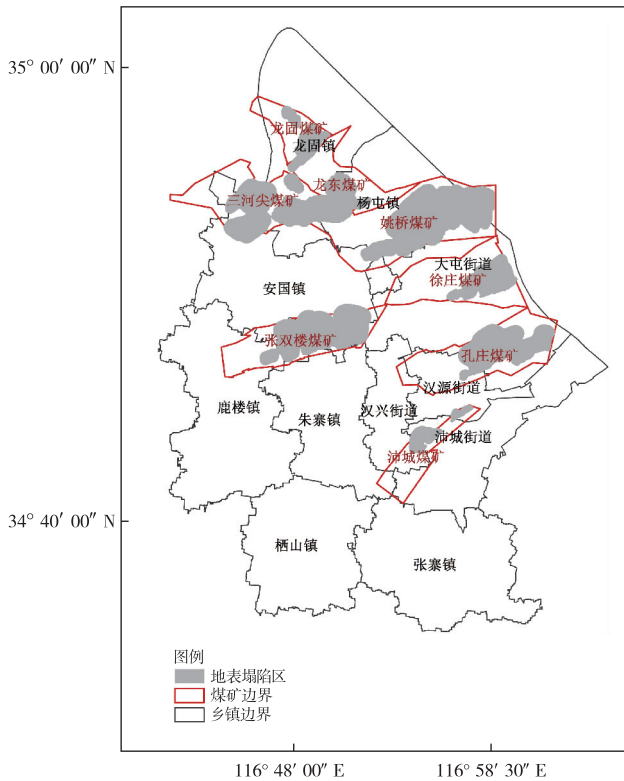


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

1.3 研究方法

1.3.1 生态安全评价指标选择

生态安全评价能反映生态安全状况,是区域生态安全格局构建的直接依据^[20]。评价指标选取时首先要考量区域自然生态环境特征,其次由于研究区涉及受人类影响较大的井工开采煤矿区,还需关注与人类活动相关的指标,最后要考虑数据可获取性的原则。结合沛县北部状况,从生态属性和生态干扰两方面选择高程、坡度、土地覆盖类型、植被覆盖度、距水体的距离、距道路的距离、距矿点的距离、距居民点的距离共 8 个生态安全评价指标。其中,坡度与海拔体现地形因素对区域生态安全的潜在影响;植被覆盖度描述生态系统的重要基础数据,对分析评价区域生态环境意义重大;大面积的水体因其重要的生态系统服务功能通常会有利于区域生态环境的改善;居民点、矿点和道路是人类

活动强度较大的地方,生态干扰随着与其距离的增大而变弱。

按照表 1 中依据将各指标划分为 1~4 级,值越小,抵抗外界干扰能力越强,生态安全水平越高。借助 ArcGIS 10.2 软件 Spatial Analyst 模块中的 Reclassify 工具,将高程和坡度划分为 4 个等级;土地覆盖类型按表 1 的范围划分;植被覆盖度由 NDVI 数据表示,该数据利用研究区遥感影像波段数据在 ENVI 5.2 软件中计算得出;从研究区土地利用数据中筛选出水体、道路、采矿点和建制镇,按对应等级范围构建多环缓冲区,得到距水体的距离、距道路的距离、距矿点的距离和距居民点的距离。最后将所有数据按照划分的 4 个评价等级转换为栅格数据,为下一步数据分析奠定基础。

1.3.2 空间主成分分析法

主成分分析法(PCA)通过将初始空间坐标轴旋转,使彼此相关的多变量空间数据转化成为少数几个不相关的综合指标,实现对高维变量的最佳综合与简化,并客观地确定每个指标的权重。空间主成分分析法(SPCA)则是以统计原理和 GIS 为基础,将每个空间变量对应一个矩阵,把相关的空间变量对因变量的影响程度分配到相应的主成分因子上,且能将主成分因子分析结果清晰地落实到空间所对应的每一个栅格上,使原有主成分分析结果直观地拓展到二维空间,空间可视化效果良好。借助 ArcGIS 软件多元分析功能的 Principal Components 工具,将每个生态安全评价指标对应的栅格数据输入进行主成分分析,可得到每个主成分所对应的空间载荷图和各主成分的累积贡献率。根据生态安全综合指数计算公式,结合主成分载荷矩阵,计算 SPCA 分析得到的前 6 个主成分的方差贡献率,得到各评价因子的权重,最后通过 ArcGIS 栅格计算器将各评价单元进行加权求和,从而得到矿区生态安全的空间分布。

$$E = \sum_{j=1}^m p_{ij}w_j \quad (1)$$

式(1)中, E 为第 i 个评价单元(栅格)的生态安全指数; p_{ij} 为第 i 个单元的第 j 个指标; w_j 为各指标的权重。

1.3.3 生态安全格局构建

最小累积阻力模型是计算物种从源地到目的地运动过程中所需耗费的模型,它考虑了源、距离和基本阻力特征,反映了物种运动的潜在可能与趋势,通过最小累积阻力的大小可以判定源向外扩张的可能性,反映了空间单元与源的连通性^[21]。基于

MCR 模型构建矿区生态安全格局,具体表达式为

$$R_{MC} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (2)$$

式(2)中, R_{MC} 为最小累积阻力值,即生态源地到区域某点的最小累积阻力; f_{\min} 为最小累积阻力与生态

过程的正相关函数; D_{ij} 为从生态源地 j 到某景观单元 i 的空间距离; R_i 为区域某景观单元 i 对运动过程的阻力系数,在该研究中表示生态安全评价指标对源扩散的阻力系数。

表 1 研究区生态安全指标与等级划分

Table 1 Ecological security indicators and classification of the study area

类型	评价因子	参考分级依据	因子分级	生态安全等级
生态属性	高程	按研究区概况以 20 m 为区间取值	<0 m	1
			0~20 m	2
			>20~40 m	3
			>40 m	4
	坡度	蒙吉军等 ^[22]	<7°	1
			7~15°	2
			>15°~25°	3
			>25°	4
	土地覆盖类型	杨姗姗等 ^[23]	有林地、河流水面、湖泊水面、风景名胜及特殊用地、其他林地	1
			其他园地、坑塘水面、果园、水田、其他草地、沼泽地、内陆滩涂	2
			旱地、水浇地、沟渠、设施农用地、水工建筑用地、田坎	3
			铁路用地、公路用地、农村道路、建制镇、村庄、港口码头用地、采矿用地	4
植被覆盖度	潘竞虎等 ^[3]	>0.3	1	
		>0.2~0.3	2	
		0.1~0.2	3	
		<0.1	4	
生态干扰	距水体的距离	付梦娣等 ^[23]	<100 m	1
			100~400 m	2
			>400~800 m	3
			>800 m	4
	距道路的距离	李晶等 ^[24]	>800 m	1
			>400~800 m	2
			200~400 m	3
			<200 m	4
	距矿点的距离	王琦等 ^[25]	>1 500 m	1
			>1 000~1 500 m	2
			500~1 000 m	3
			<500	4
距居民点的距离	李青圃等 ^[18]	>600 m	1	
		>400~600 m	2	
		200~400 m	3	
		<200 m	4	

生态源地提取:源地一般是指生境质量较高,对于研究的生态过程起正向推动作用,具有良好生态稳定性、扩展性的地区。根据研究区自然资源特点、空间分布状况、生境斑块面积及生物多样性的丰富程度,确定对矿区生态环境稳定发展具有重要意义的集中成片的林地,大面积的河流湖泊和风景名胜为源地。根据源地的结构、数量及空间分

布,剔除其中零散分布的小斑块,最终将斑块面积大于 0.03 km²的林地、大于 0.10 km²的河流湖泊和大于 0.04 km²的风景名胜区定为生态源地。

阻力面构建:阻力面的确定是 MCR 模型构建的基础,由于基面特性差异,生态源地在扩展过程中所受到的阻力是不同的。物种在不同景观单元之间进行迁移时会受到阻碍,构建阻力面是计算其在

需要克服阻力情况下扩散路径的基础。采用基于空间主成分分析的生态安全评价要素作为阻力因子,依据生态安全综合评价结果,进一步考虑生态源地和距离因素的影响,利用 ArcGIS 中 Arc-Toolbox 的 Cost Distance 工具生成研究区累积耗费距离表面,即生态阻力面。采用 ArcGIS 中自然断裂点法将阻力面依据综合阻力的大小分为 4 级,分别为低阻力、中等阻力、较高阻力与高阻力。

生态廊道提取:生态廊道是具有生物多样性维护、涵养水源、土壤保持、调蓄洪水等多项生态系统服务功能的廊道类型,是生态源地相互联系、进行物质和能量交流的直接通道,有利于物种在“源”间及基质间的流动,是增强生态系统整体连通性的关键生态组分。提取关键生态廊道对于保障生态源地之间物质和能量流动的畅通,实现区域生态系统功能的完整性具有重要意义。在最小累积阻力面上,廊道就是相邻两“源”之间的阻力低谷和最容易联系的低阻力通道^[26]。借鉴 ArcGIS 的水文分析方法,以累积耗费距离表面为基础,首先进行洼地填充,再计算无洼地的流向、累积汇流量,考虑研究区实际确定累积汇流量阈值为 2 500,提取大于 2 500 的值并赋值为 1,然后将栅格河网矢量化,剔除重复路径,并对矢量化后的线条进行平滑处理,从而确定累积阻力值最低生态廊道的空间位置。

生态节点提取:生态节点一般位于生态廊道上生态功能最薄弱处,即最小路径与最大路径的交点或最小路径的汇集处,对维护区域景观生态结构的整体性、连续性和生态功能的发挥具有战略意义。研究共提取 2 种生态节点,一种是最小耗费路径的汇集点,利用 ArcGIS 的相交功能提取;另一种是累积阻力表面的“脊线”与生态廊道的交点,借助 ArcGIS 的水文分析工具,再通过邻域分析和重分类等操作提取累积阻力表面阻力值最高的“脊线”,利用相交功能求得交点,即为生态节点。

2 结果与分析

2.1 沛县北部生态安全评价

运用空间主成分分析法对生态安全指标进行空间降维分析后,可提取到 8 个主成分的载荷矩阵、特征值及贡献率。从表 2 可以看出,前 6 个主成分的累积贡献率是 96.4%,这说明前 6 个主成分能够充分体现沛北地区生态安全信息。通过深入分析各主成分所对应的原始评价指标载荷可以得出:第 1 主成分中距水体的距离载荷较高(0.724 22),体现出水资源对研究区生态安全的重要影响;距道路

的距离在第 2 主成分中载荷较高(0.774 00),距居民点的距离在第 3 主成分中载荷较高(0.589 41),距矿点的距离在第 4 主成分中载荷较高(0.492 77),这反映出人类活动对生态安全的影响较为显著;第 5 主成分中植被覆盖度载荷较高(0.706 57),说明植被因子对生态安全有较强影响;第 6 主成分中土地覆盖类型载荷较高(0.675 73),表明土地利用因子也是生态安全的重要影响因素(表 3)。

根据各指标的生态安全分布等级可以看出,研究区的高程和坡度 2 个生态安全指标的都具有空间分布差异较小的特点,土地利用类型和植被覆盖 2 个指标的空间分布都较分散,距水体的距离是正向指标,说明离水体越近,安全等级越高。由图 2 可知研究区内有多条河流经过,水资源是影响当地生态安全的主要因子。图 2 还展示了 3 个负向指标的生态安全等级,距离人类活动区越远,安全等级越高,研究区采矿活动较为频繁,极大破坏了生态环境;距离居民点、道路、矿点越近,受到人类活动的干扰胁迫越大,生境破碎化越严重,从而深刻影响了区域生态安全格局。

表 2 主成分的特征值及其贡献率

Table 2 Characteristic values of principal components and their contribution rates

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	1.061 07	31.454 0	31.454 0
2	0.684 70	20.297 0	51.751 1
3	0.451 19	13.374 8	65.125 9
4	0.412 65	12.232 4	77.358 3
5	0.353 00	10.464 2	87.822 5
6	0.289 20	8.572 9	96.395 4
7	0.063 91	1.894 5	98.289 9
8	0.057 69	1.710 1	100

对各生态安全指标等级图进行加权叠加,得到研究区的生态安全综合指数及其空间分布图,依据栅格频率分布将生态安全等级划分为 4 个等级,通过 ArcGIS 进行重分类,得到研究区生态安全等级分布图(图 3),将研究区生态安全空间格局可视化。根据生态安全评价结果的统计数据可知,高度安全水平的面积为 44.45 km²,占研究区总面积的 4.42%;中度安全水平的面积为 447.53 km²,占研究区总面积的 44.53%;较低安全水平的面积为 344.58 km²,占研究区总面积的 34.28%;低度安全水平的面积为 168.54 km²,占研究区总面积的 16.77%。其中,中度安全区和较低安全区面积占比较大,反映出研究区整体生态安全水平不高。

表 3 主成分载荷矩阵

Table 3 Principal component load matrix

评价指标	主成分								权重
	1	2	3	4	5	6	7	8	
高程	0.138 95	-0.000 56	-0.007 77	-0.031 82	-0.052 83	0.020 28	0.224 65	0.962 26	0.033
坡度	0.019 53	0.011 39	0.011 37	0.002 65	-0.014 30	-0.000 33	0.972 64	-0.230 48	0.008
土地覆盖类型	0.527 46	0.066 23	0.235 29	-0.441 77	-0.001 96	0.675 73	-0.035 21	-0.094 96	0.202
植被覆盖度	-0.215 07	-0.043 31	0.362 48	0.440 60	0.706 57	0.347 77	0.027 33	0.073 61	0.122
距水体的距离	0.724 22	-0.483 73	-0.017 72	0.394 66	0.093 23	-0.265 37	-0.026 27	-0.075 10	0.153
距道路的距离	0.315 06	0.774 00	-0.406 52	0.345 51	0.119 60	0.041 29	-0.016 30	-0.027 40	0.244
距矿点的距离	-0.017 30	0.166 68	0.547 79	0.492 77	-0.642 69	0.124 25	-0.021 05	-0.009 67	0.099
距居民点的距离	0.178 30	0.364 35	0.589 41	-0.302 88	0.248 43	-0.578 33	-0.011 02	-0.002 38	0.139

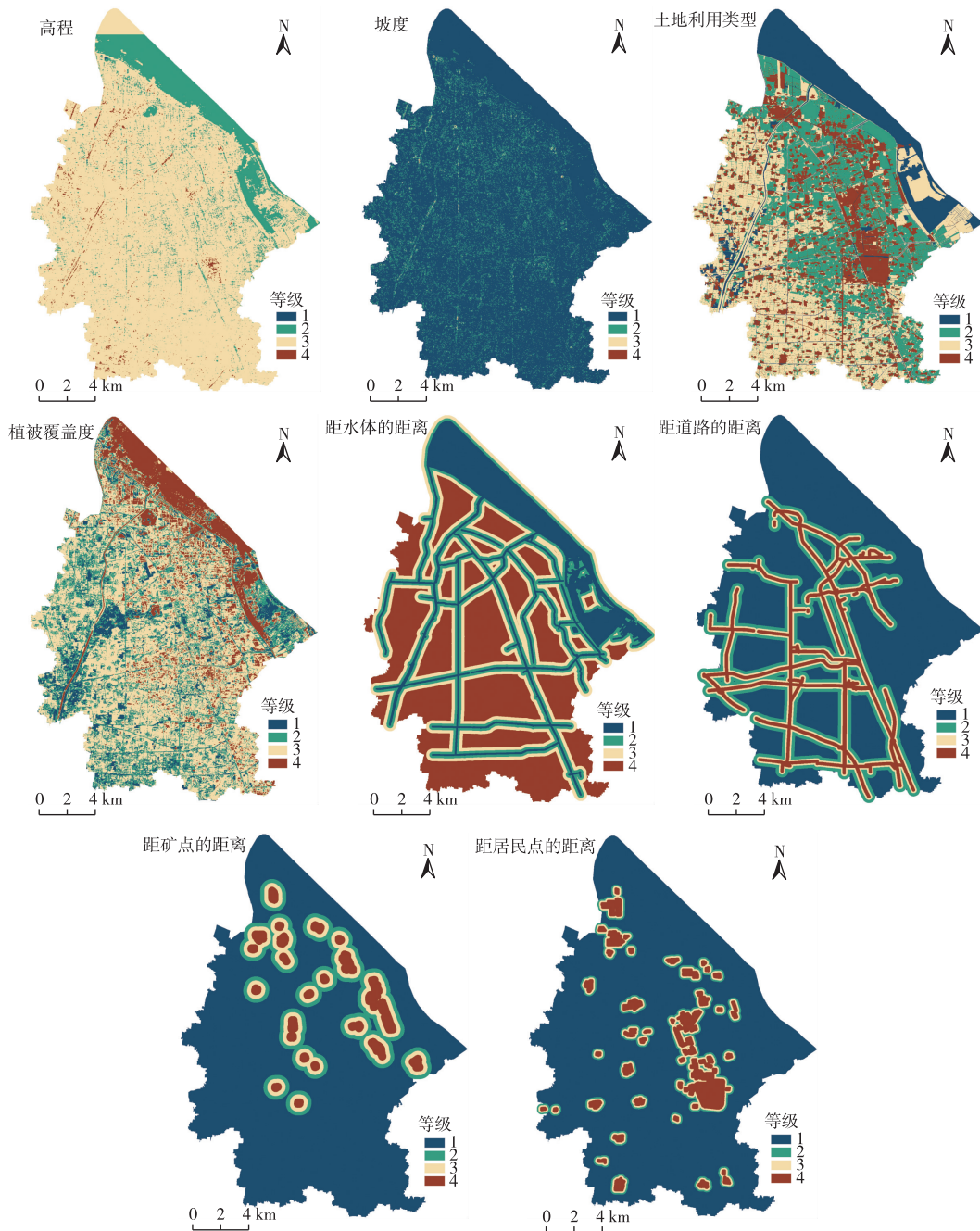


图 2 研究区生态安全评价指标等级分布

Fig. 2 Grade distribution of ecological security evaluation indicators of the study area

高度生态安全水平区面积占比最小,且分布不集中,主要分布在微山湖区域。低度生态安全水平区主要分布在汉兴街道、沛城街道、龙固镇以及大屯街道,这些地区存在资源开发利用强度大、人类活动频繁的问题,一定程度上造成了生态不安全的状况。综上,研究区整体生态安全水平不高,存在高安全水平区少且分散、低安全水平区多等情况,十分不利于区域的生态可持续发展,可利用生态修复相关策略逐步恢复中低安全水平区的生态环境,同时注重水资源和植被的保护,维持好高生态安全水平区的稳定性。

2.2 沛县北部生态安全格局构建

2.2.1 生态源地识别

确定对矿区生态环境稳定发展具有重要意义的集中成片的林地、大面积的河流湖泊和风景名胜区为源地,最终将斑块面积大于 0.03 km^2 的林地、大于 0.10 km^2 的河流湖泊和大于 0.04 km^2 的风景名胜区定为生态源地(图4),统计可得生态源地的面积为 162.10 km^2 。其中最主要的生态源地部分位于微山湖区域,其他生态源地在鹿楼镇和安国镇东南方向集中分布,大多是林地。龙固镇和杨屯镇连片的生态源地主要是水域,位于汉源街道的主要生态源地是沛县公园景区。总体上,生态源地在研究区的东北方向较为集中,其余分布较为分散。

2.2.2 生态阻力面建立

以生态源地为源数据,将生态安全评价结果作为成本阻力面,通过计算成本距离可得到最小累积阻力面,即研究区生态安全格局阻力的空间分布特征(图5)。其中,低阻力区面积最大,共 446.75 km^2 ,占研究区总面积的 44.45% ,主要位于鹿楼镇、安国镇、大屯街道、龙固镇和杨屯街道;中阻力区面积为 318.98 km^2 ,占研究区总面积的 31.74% ,在朱寨镇、汉兴街道、汉源街道分布较为集中;较高阻力区面积为 195.05 km^2 ,占研究区总面积的 19.41% ,大多位于中阻力区的外围,在大屯街道、沛城街道、栖山镇分布较多;高阻力区面积最小,共计 44.32 km^2 ,占研究区总面积的 4.41% ,分布在沛城街道的南部和张寨镇的东部,高阻力区与生态源地的距离较远,两者之间缺少联通。

2.2.3 生态廊道提取

利用最小累积阻力模型生成生态源地各斑块之间的最小成本路径,将其叠加后剔除重复路径,即可得到研究区潜在的生态廊道31条(图6)。潜在生态廊道在鹿楼镇、朱寨镇、安国镇和汉兴街道分布较为集中,其中经过鹿楼镇的有11条。龙固

镇、大屯街道和张寨镇也存在潜在生态廊道,分布较为分散。栖山镇有1条潜在生态廊道。将提取的潜在生态廊道与土地利用现状中的河流水面进行叠加,发现经过鹿楼镇向龙固镇方向延伸的潜在生态廊道与流经研究区的大沙河大致重叠,可定义为河流生态廊道。经过汉兴街道北部的生态廊道延伸向生态源地,与流经沛县中部的徐沛运河相交。对于沛城街道、大屯街道和张寨镇的高阻力区,生态廊道较难构建,生态流难以进入。从生态廊道的分布来看,既有与现实廊道重叠的部分,也有现实中不存在的廊道,可根据实际修正现有生态廊道布局。

2.2.4 生态节点识别

将生态廊道与阻力脊线的交点作为一类生态节点,共31个;将生态廊道之间的交点作为二类生态节点,共20个(图6)。两类生态节点都是生态功能薄弱的关键点,要加强保护。一类生态节点分布较为广泛,其中鹿楼镇存在较多的林地生态源地,张寨镇也有少量生态源地分布。二类生态节点大部分位于经过鹿楼镇、安国镇的主要生态廊道上。生态节点在生态安全格局中处于战略地位,要着力保护生态节点,提高其连通性。

2.2.5 生态安全格局判别

沛县北部的生态安全格局由生态源地、生态阻力面、生态廊道和生态节点共同组成,与实际布局相比廊道和节点的建设均有待完善,要通过生态安全格局各组分的优化布局来升级研究区的生态安全水平。生态源地多数较为分散,要增强对源地的防护力度,维护其生物多样性;潜在生态廊道与实际已有廊道存在重叠段,应在稳固原有生态廊道的基础上进行生态廊道建设。道路型廊道可加强两侧的绿化程度,促进其生态流通作用;生态节点是生态安全格局中的关键点,需要强化其功能并确保其少受干扰。一级生态节点和二级生态节点之间的地带是亟需加强建设的部分。

3 讨论与结论

3.1 讨论

影响研究区生态安全的8个评价指标能与空间每一处栅格对应,极大地增强了评价结果的空间性。一些社会经济指标数据无法落实到空间上,因此未将其纳入指标体系。此外,研究区煤炭开采活动较为频繁,该活动对生态安全影响的无法直接衡量,未来应从多方面加以考虑,从而选取更能代表矿区显著特征的指标。生态安全评价因子的等级

划分在前人研究基础上进行了调整,接下来的研究要结合实际,使等级划分更加合理。

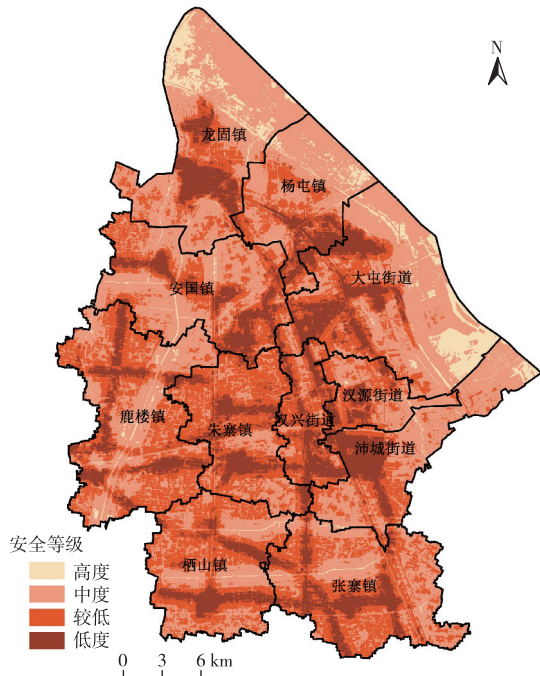


图 3 研究区生态安全等级分布
Fig. 3 Distribution of ecological security levels in the study area



图 4 研究区生态源地
Fig. 4 Ecological source of the study area

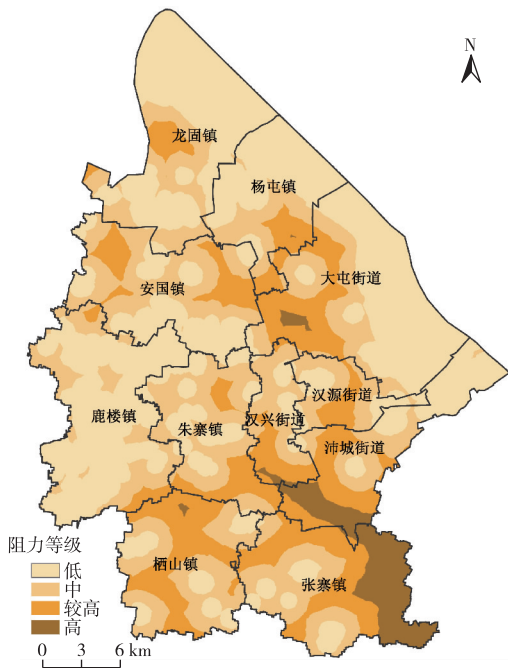


图 5 研究区阻力等级
Fig. 5 Resistance level of the study area

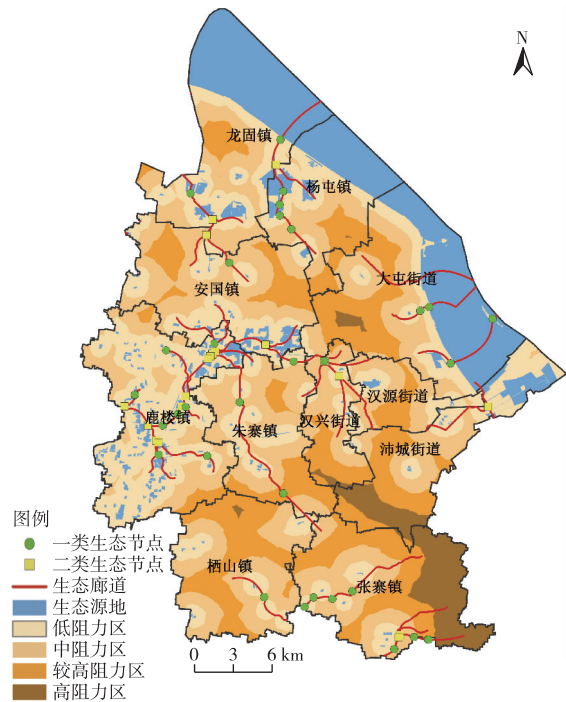


图 6 研究区生态安全格局
Fig. 6 Ecological security pattern of the study area

在选择生态源地时重点考虑了林地、湖泊水面和风景名胜区等地,沛县北部地区为高潜水位,下一步研究可探索采煤形成的塌陷水域作为源地的

可行性。另一方面,王媛等^[27]通过生态敏感性评价和生态系统服务功能重要性评价选取生态源地,黄鑫等^[28]以矿区景观斑块质量评价结果为依据选择

源地,而该研究中生态源地选择较为主观,未来应参照上述研究提高源地选择的科学性。研究区的高阻力区主要分布在沛城街道北部和张寨镇东部,首要原因是这部分区域离生态源地较远。其次,张寨镇位于研究区边界,在研究范围内属于高阻力区,实际中还应考虑与其相邻的其他乡镇生态状况的影响。

3.2 结论

借助空间主成分分析法定量评价沛县北部地区的生态安全,由评价结果分析可知研究区总体上生态安全状况一般,生态安全水平有待提升,中度安全水平的面积为 447.53 km²,较低安全水平的面积为 344.58 km²,两者共占研究区总面积的 78.81%。前 6 个主成分中载荷较高的指标类型表明水资源和人类活动对地区生态安全影响较大,沛县北部地区需着力改善中等生态安全水平以下区域的生态环境。

基于生态安全评价结果和 MCR 模型构建了徐州沛县北部地区的生态安全格局,其中生态源地由林地、河流湖泊和风景名胜区组成,面积为 162.10 km²,阻力面分析中低阻力区面积最大,此外还提取了潜在生态廊道 31 条,生态节点共 51 个。在生态廊道和生态节点的建设中要注重与现实中已存在的廊道相结合,从而加强区域各生态组分间的联通,以促进生态流的循环。

致谢: 感谢江苏自然资源智库中国矿业大学研究基地提供平台和部分数据支持。

参考文献:

- [1] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等.区域生态安全格局:概念与理论基础[J].生态学报,2004,24(4):761-768.[MA Ke-ming, FU Bo-jie, LI Xiao-ya, et al. The Regional Pattern for Ecological Security (RPES): The Concept and Theoretical Basis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 761-768.]
- [2] 史娜娜,肖能文,王琦,等.锡林郭勒盟生态安全评价及生态调控途径[J].农业工程学报,2019,35(18):228-236.[SHI Nana, XIAO Neng-wen, WANG Qi, et al. Ecological Security Evaluation and Ecological Regulation Approach in Xilin Gol League [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18): 228-236.]
- [3] 潘竞虎,刘晓.基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化:以张掖市甘州区为例[J].应用生态学报,2015,26(10):3126-3136.[PAN Jing-hu, LIU Xiao. Assessment of Landscape Ecological Security and Optimization of Landscape Pattern Based on Spatial Principal Component Analysis and Resistance Model in Arid Inland Area: A Case Study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3126-3136.]
- [4] 卢立峰,严力蛟.县域土地生态安全评价:以四川省丹棱县为例[J].生态与农村环境学报,2013,29(3):295-300.[LU Li-feng, YAN Li-jiao. County-Level Land Ecological Security Assessment: A Case Study of Danling County, Sichuan Province [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(3): 295-300.]
- [5] 马年圣,支晓娟,宋雨婷.基于 PSR 和 GM(1,1)模型的西藏耕地生态安全评价与预测[J].干旱区资源与环境,2018,32(11):81-86.[MA Nian-sheng, ZHI Xiao-juan, SONG Yu-ting. Evaluation and Prediction of the Cultivated Land Ecological Security in Tibet Based on PSR and GM(1,1) Model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(11): 81-86.]
- [6] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,等.基于 DPSIR-EES-TOPSIS 模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异[J].水土保持研究,2019,26(6):249-258.[LÜ Guang-bin, LIAO Tie-jun, YAO Qiu-sheng, et al. Spatio-Temporal Variation and Land Ecological Security and Its Evaluation Based on DPSIR-EES-TOPSIS Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 249-258.]
- [7] 陈蓓.基于生态足迹模型的川西南高原地区生态安全评价:以甘孜藏族自治州为例[J].中国农业资源与区划,2019,40(6):185-190.[CHEN Bei. Evaluation of Ecological Security in Plateau Areas of Southwest Sichuan Based on Ecological Footprint Model: A Case Study of Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(6): 185-190.]
- [8] 毛菁旭,尹昌霞,李伟芳,等.东海岸带生态安全评价及景观优化研究[J].海洋通报,2019,38(1):78-86.[MAO Jing-xu, YIN Chang-xia, LI Wei-fang, et al. Study on Ecological Safety Evaluation and Landscape Optimization of the East China Sea Coastal Zone [J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(1): 78-86.]
- [9] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419.[PENG Jian-, ZHAO Hui-juan, LIU Yan-xu, et al. Research Progress and Prospect on Regional Ecological Security Pattern Construction [J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]
- [10] 樊杰.我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略[J].中国科学院院刊,2016,31(1):1-12.[FAN Jie. Theoretical Innovation in Optimization of Protection and Development of China's Territorial Space and Coping Strategy of 13th Five-Year Plan [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(1): 1-12.]
- [11] 蒙吉军,王雅,王晓东,等.基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J].长江流域资源与环境,2016,25(7):1052-1061.[MENG Ji-jun, WANG Ya, WANG Xiao-dong, et al. Construction of Landscape Ecological Security Pattern in Guiyang Based on MCR Model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(7): 1052-1061.]
- [12] 蒙吉军,朱利凯,杨倩,等.鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J].生态学报,2012,32(21):6755-6766.[MENG Ji-jun, ZHU Li-kai, YANG Qian, et al. Building Ecological Security Pattern Based on Land Use: A Case Study of Ordos, Northern

- China[J].Acta Ecologica Sinica,2012,32(21):6755-6766.]
- [13] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):471-484.[CHEN Xin,PENG Jian,LIU Yan-xu,*et al.*Constructing Ecological Security Patterns in Yunfu City Based on the Framework of Importance-Sensitivity-Connectivity[J].Geographical Research,2017,36(3):471-484.]
- [14] KNAAPEN J P,SCHEFFER M,HARMS B.Estimating Habitat Isolation in Landscape Planning[J].Landscape and Urban Planning,1992,23(1):1-16.
- [15] 任慧君.区域生态安全格局评价与构建研究[D].北京:北京林业大学,2011.[REN Hui-jun.Evaluation and Construction of Regional Ecological Security Pattern[D].Beijing:Beijing Forestry University,2011.]
- [16] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].生态学报,1999,19(1):8-15.[YU Kong-jian.Landscape Ecological Security Patterns in Biological Conservation[J].Acta Ecologica Sinica,1999,19(1):8-15.]
- [17] 张豆,渠丽萍,张桀滢.基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化:以长三角地区为例[J].生态学报,2019,39(20):7525-7537.[ZHANG Dou,QU Li-ping,ZHANG Jie-hao.Ecological Security Pattern Construction Method Based on the Perspective Ecological Supply and Demand:A Case Study of Yangtze River Delta[J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(20):7525-7537.]
- [18] 李青圃,张正栋,万露文,等.基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J].地理学报,2019,74(7):1420-1437.[LI Qing-pu,ZHANG Zheng-dong,WAN Lu-wen,*et al.*Landscape Pattern Optimization in Ningjiang River Basin Based on Landscape Ecological Risk Assessment[J].Acta Geographica Sinica,2019,74(7):1420-1437.]
- [19] 邓德芳.新型城镇化视角下资源依赖型区域城乡发展一体化途径研究:以沛北地区为例[C]//中国城市规划学会、贵阳市人民政府.新常态:传承与变革——2015中国城市规划年会论文集(12区域规划与城市经济).贵阳:中国城市规划学会,2015:487-496.[DENG De-fang.A Study on the Integration of Urban and Rural Development in Resource-Dependent Regions From the Perspective of New Urbanization:A Case Study of Peibei[C]//China Urban Planning Society,Guiyang Municipal People's Government.New Normal:Inheritance and Change-Proceedings of 2015 China Urban Planning Annual Conference(12 Regional Planning and Urban Economy).Guiyang:China Urban Planning Society,2015:487-496.]
- [20] 刘洋,蒙吉军,朱利凯.区域生态安全格局研究进展[J].生态学报,2010,30(24):6980-6989.[LIU Yang,MENG Ji-jun,ZHU Li-kai.Progress in the Research on Regional Ecological Security Pattern[J].Acta Ecologica Sinica,2010,30(24):6980-6989.]
- [21] 韩世豪,梅艳国,叶持跃,等.基于最小累积阻力模型的福建省南平市延平区生态安全格局构建[J].水土保持通报,2019,39(2):192-198.[HAN Shi-hao,MEI Yan-guo,YE Chi-yue,*et al.*Construction of Ecological Security Pattern in Yanping District of Nanping,Fujian Province Based on Minimum Cumulative Resistance Model[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2019,39(2):192-198.]
- [22] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等.基于生态红线划分的生态安全格局构建:以江西省为例[J].生态学报,2016,35(1):250-258.[YANG Shan-shan,ZOU Chang-xin,SHEN Wei-shou,*et al.*Construction of Ecological Security Patterns Based on Ecological Red Line:A Case Study of Jiangxi Province[J].Chinese Journal of Ecology,2016,35(1):250-258.]
- [23] 付梦娣,罗建武,田瑜,等.基于最小累积阻力模型的自然保护区网络构建与优化:以秦岭地区为例[J].生态学报,2018,37(4):1135-1143.[FU Meng-di,LUO Jian-wu,TIAN Yu,*et al.*Establishment and Fine-Tuning of Nature Reserve Networks Based on Minimum Cumulative Resistance Model:A Case Study of Mountain Qinling Region[J].Chinese Journal of Ecology,2018,37(4):1135-1143.]
- [24] 李晶,蒙吉军,毛熙彦.基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建:以鄂尔多斯市准格尔旗为例[J].北京大学学报(自然科学版),2013,49(4):707-715.[LI Jing,MENG Ji-jun,MAO Xi-yan.MCR Based Model for Developing Land Use Ecological Security Pattern in Farming-Pastoral Zone:A Case Study of Jungar Banner,Ordos[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2013,49(4):707-715.]
- [25] 王琦,付梦娣,魏来,等.基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以安徽省宁国市为例[J].环境科学学报,2016,36(12):4546-4554.[WANG Qi,FU Meng-di,WEI Lai,*et al.*Urban Ecological Security Pattern Based on Source-sink Landscape Theory and MCR Model:A Case Study of Ningguo City,Anhui Province[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(12):4546-4554.]
- [26] 宁立新,周云凯,白秀玲,等.鄱阳湖区景观格局季相变化及其优化调控研究[J].自然资源学报,2018,33(3):439-453.[NING Li-xin,ZHOU Yun-kai,BAI Xiu-ling,*et al.*Research on the Seasonal Variations and Optimization of Landscape Pattern in Poyang Lake Region,China[J].Journal of Natural Resources,2018,33(3):439-453.]
- [27] 王媛,周长威.黔中城市群景观生态安全格局构建[J].生态与农村环境学报,2019,35(9):1111-1117.[WANG Yuan,ZHOU Chang-wei.Landscape Ecological Security Pattern in Central Guizhou Urban Agglomeration[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2019,35(9):1111-1117.]
- [28] 黄鑫,曹学章,张明,等.基于最小累积阻力模型的内蒙古胜利煤田景观生态安全格局构建[J].生态与农村环境学报,2019,35(1):55-62.[HUANG Xin,CAO Xue-zhang,ZHANG Ming,*et al.*Construction of Landscape Ecological Security Pattern of Shengli Coalfield in Inner Mongolia Based on the Minimum Cumulative Resistance Model[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2019,35(1):55-62.]

作者简介:李航鹤(1996—),女,河南漯河人,硕士生,主要从事生态安全方面的研究。E-mail:hanghe.li@cumt.edu.cn

(责任编辑:陈昕)