

基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化

黄木易¹, 岳文泽², 冯少茹¹, 蔡接接¹

(1. 安徽建筑大学环境与能源工程学院, 合肥 230601; 2. 浙江大学土地管理系, 杭州 310058)

摘要:以大别山核心区精准扶贫对象岳西县为研究单元,选择10个生态阻力因子建立生态安全评价指标体系,利用ArcGIS构建生态阻力面,应用空间数据探索分析方法(Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA)、最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)和重力模型对生态安全进行诊断和潜在生态廊道识别提取。研究表明:(1)岳西县生态安全较高及高等级区域占县域总面积37.79%,而较低及低等级区域占51.89%,整体呈现北低南高的空间特征,生态安全水平总体偏低。(2)ESDA分析显示,生态安全空间分布全局Moran's I 指数为0.6374, LISA图显示岳西县生态安全等级主要以高高(HH)、低低(LL)两种聚集类型为主,在空间上呈明显的片状集聚分布特征。在此基础上,选择生境良好的自然保护区及大型风景区斑块为生态源,生成累积耗费阻力面,基于MCR最小累积阻力模型构建生态源之间的最小累积耗费路径,提取潜在生态廊道90条,生态节点103个,利用重力模型识别出21条重要潜在生态廊道,其中,一级和二级潜在生态廊道分别为13条和8条。(3)结合岳西县旅游产业空间发展规划,提出了“一环三带”生态网络框架空间布局模式及优化对策,该模式可作为岳西县生态经济发展格局的有效补充。

关键词:生态安全;空间异质性;最小累积阻力模型;生态廊道;大别山区岳西县

生态安全是国家安全的重要组成部分,是区域与国家经济安全与社会安定的生态环境基础和支撑。十八大报告将生态安全确定为我国三大战略格局目标之一。构建国家的生态安全格局,是保障国家生态安全的重要抓手与根本措施^[1]。同样,区域生态安全格局优化对于解决区域生态问题具有不可替代的作用,具有广阔的应用前景^[2]。生态安全是生态风险和生态健康的综合表现^[3]。十九大报告将生态安全格局构建、生态系统质量提升及优化保障措施等确定为国家战略内容。近年来,随着LUCC研究的不断深入,土地利用变化引起的生态安全问题逐渐受到各界广泛关注。因此,在土地利用过程中,应从生态安全格局视角,重视生态用地在维持生态系统功能中的作用,加强生态用地保护力度,保障区域生态红线和生态安全。国际上当前主要关注人类活动扩张对区域性及全球性生态环境影响、生态安全及其相关的经济政策等问题^[4-6]。而国内相关研究则主要聚焦于生态安全指标体系及方法^[7]、生态安全评价^[8]、生态系统评估及调控对策^[9-10]等方面,总体

收稿日期: 2018-12-07; 修订日期: 2019-02-19

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(14AZD124); 安徽高校人文社会科学研究重大项目(SK2018ZD043); 安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKQ2016D23); 安徽省科技创新战略与软科学研究项目(201806a02020046)

作者简介: 黄木易(1978-),男,安徽芜湖人,博士,副教授,主要从事城镇化、流域生态环境的空间信息挖掘及耦合模型研究。E-mail: huangyang78@163.com

通讯作者: 岳文泽(1977-),男,安徽淮南人,博士,教授,博士生导师,主要从事城镇化、城市土地优化利用与配置、土地信息与大数据应用研究。E-mail: wzyue@zju.edu.cn

上,在生态安全的形成机制、生态过程内在机理等方向上的研究相对偏弱^[11]。

目前,“识别源地—构建阻力面—提取廊道”的研究模式已被广泛应用于生态安全相关研究领域^[12]。在生态安全格局构建方法中,最小累积阻力模型(MCR)^[13-14]由于综合考虑了土地利用(景观)单元间的水平联系,较好地反映了生态安全格局的内在有机联系和生态过程内在联系^[15],具有良好的实用性和扩展性^[16]。因此,MCR模型被广泛应用在土地利用变化、生物多样性保护、城市规划中。相对于生态安全格局评价而言,如何找到抓手开展生态安全格局的优化在实践上具有更加重要的价值。在生态安全评价中,如果能够识别出一些关键结点、重要的生态廊道和热点区域,并基于此提出优化策略,进而提升该方法的实际应用价值,这对于管理政策启示更具有针对性,国家的生态安全战略也将真正落到实处。

大别山区横跨鄂豫皖三省,为中国典型的集山区、库区、多省交界区、革命老区、贫困区、水土流失严重区于一体的特殊区域,是中国中部地区的重要生态功能区和长江中下游地区的重要生态屏障^[17]。作为革命老区、贫困集中连片地区,同时又是生态脆弱区,大别山片区经济社会发展相对滞后,生态环境较为脆弱,生态问题与贫困问题交织,经济社会发展与生态环境保护的矛盾日益突出,而关于大别山区生态安全诊断及优化等方面的研究不足。在精准扶贫战略背景下,开展生态安全格局优化研究显得尤为重要。在2013年2月国务院正式批复《大别山片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011-2020年)》方案中,就曾要求将区域经济发展、生态环境保护与扶贫攻坚进行有机结合。因此,大别山区生态安全研究对于改善生态环境质量,优化生态服务系统功能、促进扶贫产业和生态经济协调发展具有重要的理论与实践意义。本文结合研究区的自然、经济、生态等特点,选择相关的生态安全影响因子指标和数据,基于MCR模型进行大别山核心区的生态安全评估,构建生态安全格局,识别重要生态廊道并提出优化策略,研究结果在一定程度上可为大别山区精准扶贫的产业经济发展及生态安全建设等方面提供相应的决策支持。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

按照《中国农村扶贫开发纲要(2011-2020年)》,大别山区和六盘山区、秦巴山区、武陵山区、乌蒙山区、滇桂黔石漠化区、滇西边境山区、大兴安岭南麓山区、燕山-太行山区、吕梁山区、罗霄山区等是中国11个集中连片特殊困难地区。安徽岳西县、霍山县,河南商城县是大别山区核心地区,如图1所示。岳西县位于大别山腹地(115°50′~116°33′E, 30°39′~31°11′N),属于北亚热带湿润季风气候,总面积2398 km²。岳西县境内地形复杂,小区域气候差异大。全县土壤垂直带状分异显著,以黄棕壤和山地棕壤为主。全县地处常绿阔叶林与落叶阔叶林过渡带,植物种类繁多,是安徽省主要生物基因库之一^[18]。

1.2 数据来源

主要利用2017年4月30日Landsat-8/OLI影像数据(轨道号分别为122/38、122/39,来源于地理空间数据云:<http://www.gscloud.cn/>)、DEM数据(分辨率90 m,来源于美国对地观测全球高程SRTM数据)和其他相关数据(主要有岳西县1:100000土壤类型

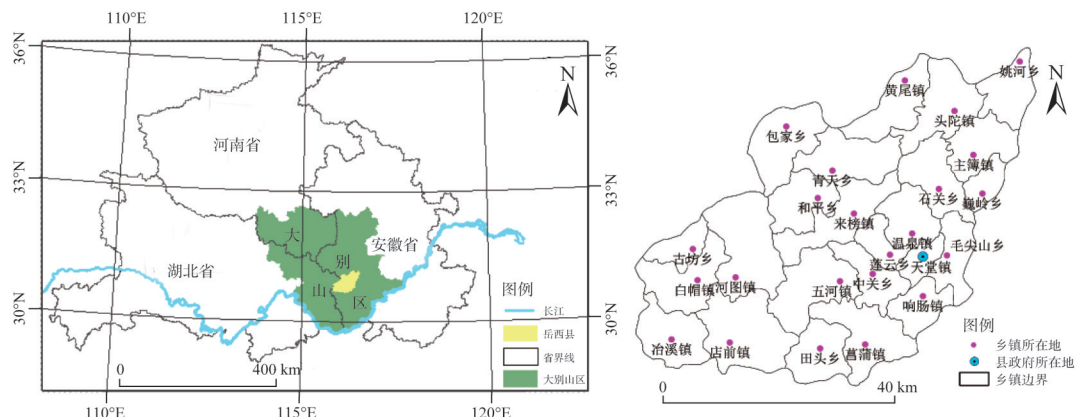


图1 岳西县范围及地理区位

Fig. 1 Scope and location of the Yuexi County

图、岳西县行政区划图、城乡规划局相关规划专题图件等)。遥感影像数据处理过程包括:利用ENVI 5.4对遥感影像进行纠正、拼接、直方图匹配和影像裁剪等图像预处理;在ENVI 5.4中对按边界提取后的研究区影像进行解译分成林地、水域、农用地和建设用地4大类景观类型。经精度检验,Kappa系数达0.75以上,满足研究需要;其他数据处理方式主要为空间分析提取及数字化等。

1.3 研究方法

1.3.1 空间数据探索分析(ESDA)

探索性空间数据分析法(Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA)主要基于空间中的样本值之间的相关性及其程度分析来探索空间对象的分布特征。由于研究对象岳西县域范围不大,本文利用ArcGIS创建网格,在1000 m×1000 m网格幅度下对生态阻力面进行Zonal统计,然后提取生成点数据关联到网格,在OpenGeda中进行生态安全的全局Moran's *I*指数计算,并生成岳西县生态安全评价等级Moran's *I*散点图及LISA聚集图。

1.3.2 最小累积阻力模型(MCR)法

最小累积阻力模型主要利用生物通过不同景观类型克服阻力而形成的耗费成本来反映通行可达性的一种模型。目前广泛应用的MCR模型为俞孔坚^[13]在Knaapen J P等^[14]基础上修改的,其公式如下:

$$MCR = f \times \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (1)$$

式中: MCR 表示从生态源斑块 j 在空间中扩散至某点的最小累积阻力值; f 为 MCR 与变量间乘积($D_{ij} \times R_i$)的函数; D_{ij} 表示目标斑块源 j 至其他斑块源 i 所经过的空间距离; R_i 表示斑块源 i 在空间中某一方向上的扩散阻力系数; \min 表示评价单元对于不同源的累积阻力取最小值。本文模型中的生态源地斑块主要选择生境质量良好、生态服务价值较高的对象为目标,如生态湿地公园、森林保护区、自然保护区、风景名胜区等绿地斑块。阻力因子的确定是阻力面模型建立的关键步骤。本文依据自然因素与社会经济因素相结合,并遵循可获取性和易量化性原则,选择自然因素和社会经济因素共10个指标作为阻力面模型中的阻力评价因子,构成生态安全评价指标体系。阻力因子共分为4个等级,阻力系数分别以1、2、3和4表示,值越大表明阻力越大,耗费成本越高。运用ArcGIS 10.2

建立生态安全阻力面模型,利用Cost-distance模块计算生态源累积耗费阻力表面。基于MCR利用Cost-path工具进行生态源地之间的最小累积耗费路径作为潜在生态廊道识别的依据。

1.3.3 重力模型

大型生境斑块是区域生物多样性的空间保障^[19]和重要源地,而生态廊道系统是保障生态源地之间物质与能量流通连接的路径,其对于生物多样性保护、生境质量优化和生态系统功能的完整性具有重要意义^[20]。本文利用重力模型来量化MCR模型提取的生态源之间潜在生态廊道的重要性,从而识别出重要的潜在生态廊道,并形成生态安全网络。重力模型计算公式^[21]如下:

$$G_{ab} = \frac{N_a \cdot N_b}{D_{ab}^2} = \frac{\left[\frac{1}{P_a} \times \ln S_a \right] \left[\frac{1}{P_b} \times \ln S_b \right]}{\left(\frac{L_{ab}}{L_{\max}} \right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \cdot \ln S_a \cdot \ln S_b}{L_{ab}^2 \cdot P_a \cdot P_b} \quad (2)$$

式中: G_{ab} 是生态源斑块 a 、 b 二者间的相互作用力; N_a 、 N_b 分别为生态源斑块 a 、 b 二者的权重; D_{ab} 是生态源斑块 a 、 b 二者间潜在生态廊道阻力的标准化值; P_a 为生态源斑块 a 的阻力值; S_a 为生态源斑块 a 的面积; L_{ab} 是生态源斑块 a 、 b 二者间潜在生态廊道的累积阻力值; L_{\max} 为全部生态源斑块之间的潜在生态廊道累积阻力值中的最大者。

2 结果分析

2.1 大别山核心区岳西县生态安全评价

2.1.1 生态阻力因子指标体系构建

构建科学合理的生态阻力因子指标体系对于区域生态安全评价具有重要的意义,如高程、坡度会影响土地资源在空间上的分布及其利用方式;土地利用类型会影响生态源地内部及生态源地之间的物质能量及信息交流;植被覆盖度会改善区域局部小气候,并能对生物多样性的有效恢复和保护起到积极的作用;河流具有对环境有害物质净化和改善生态功能的作用,距离河流越近,越有利于生态源地的扩展。相反,交通道路等指标因子,主要考虑其对周边土地利用存在的影响,产生土地利用结构及景观格局变化。一般来说,距离道路如果越近,城镇建设扩张的引力越大,从而越不利于生态源地的空间拓展。本文基于相关研究文献^[22-30]并结合研究区的实际情况,最终选择坡度、高程、土地利用类型、植被覆盖度、距景点距离、距工业用地距离、距水体距离、距道路距离、距居民点距离和土壤侵蚀等10个阻力因子指标。基于相关研究将各评价指标按生态安全水平等级由高到低分为1~4级,并且根据相关文献和专家打分,将各生态评价阻力因子赋予相应的权重,如表1所示。对各阻力因子采用ArcGIS 10.2距离分析和重分类工具,得到各个因子重分类图,见图2。

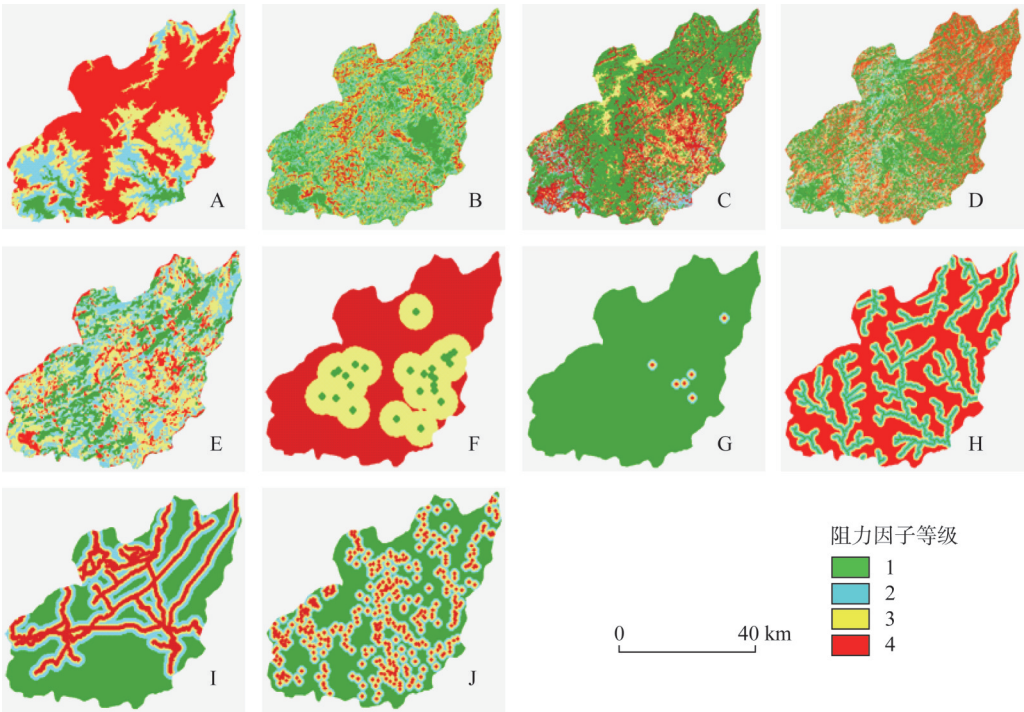
2.1.2 生态阻力面建立及生态安全评价

根据表1中的阻力因子和权重,利用ArcGIS建立生态因子综合阻力面,对碎小图斑进一步过滤后,得到岳西县生态安全评价等级空间分布。生态因子综合阻力面空间分布显示,岳西县生态阻力值最小为1.2183,最大为3.5180,均值为2.5264(图3)。为了使乡镇水平上的分级更加合理,先以均值2.5264为界限对阻力面进行二值化,然后利用乡

表1 岳西县生态安全因子等级划分

Table 1 Classification of ecological security factors in Yuexi county

评价因子	序号	分级参考来源	单位	阻力值				权重
				1级	2级	3级	4级	
高程	A	文献[24]	m	<200	200~400	400~600	>600	0.150
坡度	B	文献[26]	°	<7	7~15	15~25	>25	0.200
土地利用类型	C	文献[23]	—	林地	水域	农用地	建设用地	0.050
植被覆盖度	D	文献[27]	—	>65%	50%~65%	35%~50%	<35%	0.150
土壤侵蚀	E	文献[28]	t·km ⁻² ·a ⁻¹	<2500	2500~5000	5000~10000	>10000	0.050
距景点距离	F	文献[24,29]	m	<1000		1000~5000	>5000	0.005
距工业用地距离	G	文献[22]	m	>1500	1000~1500	500~1000	<500	0.045
距水体距离	H	文献[25]	m	<100	100~500	500~1000	>1000	0.200
距道路距离	I	文献[30]	m	>2000	1000~2000	500~1000	<500	0.100
距居民点距离	J	文献[22,30]	m	>1500	1000~1500	500~1000	<500	0.050



注：A：高程因子；B：坡度因子；C：土地利用类型因子；D：植被覆盖度因子；E：土壤侵蚀因子；F：距景点距离因子；G：距工业用地距离因子；H：距水体距离因子；I：距道路距离因子；J：距居民点距离因子。

图2 岳西县生态安全阻力因子重分类等级图

Fig. 2 Grade distribution of reclassification maps of ecological security factors in Yuexi county

镇边界经 Zonal 工具对生态安全阻力栅格面进行统计，并依据研究区生态阻力值“低于均值的栅格面积”与“高于均值的栅格面积”的比值进行分级。对岳西县各乡镇内的该比值范围（0.2983~2.5647）进行生态安全5级分类，即低安全（0.2983~0.4057）、较低安全（0.4058~0.6262）、中等安全（0.6263~1.0774）、较高安全（1.0775~1.5547）和高安全（1.5548~2.5647）。空间分布显示，岳西县生态安全格局表现为南高北低的特征，其中高

生态安全区域主要为冶溪镇和菖蒲镇,占县域面积9.95%;较高生态安全区域为古坊乡、白帽镇、店前镇、五河镇、天堂镇、响肠镇和温泉镇,占县域面积27.84%;中等安全区域分布于田头乡、中关乡和毛尖山乡,占县域面积10.32%;较低生态安全区域主要分布于河图镇、和平乡、来榜镇、连云乡、石关乡、巍岭乡和头陀镇,占县域面积29.84%;低生态安全区域主要分布于包家乡、青天乡、黄尾镇、主簿镇和姚河乡,占县域面积22.05%,见图4。生态安全评价结果显示,较高及高生态安全区域面积占县域总面积37.79%,而较低及低生态安全区域面积占51.89%,表明岳西县生态安全水平总体偏低。分析表明,中等安全以上的区域主要与河流水系分布关系密切。这些区域地形相对平缓,植被覆盖度较高,生物多样性丰富。低度安全的区域主要为海拔较高、坡度较大的山区,这些区域由于自然条件和人为活动因素的影响,地表植被稀疏,较易发生水土流失,生态环境相对脆弱。

2.2 大别山核心区岳西县生态安全空间异质性分析

为了进一步探索岳西县生态安全水平在空间上的分布及集聚的空间异质特性,基于ArcGIS 10.2,将整个岳西县划分为生成1000 m×1000 m的网格,利用该网格对生态阻力面进行空间统计后,将栅格中心点阻力值再连接到网格。利用计量工具OpenGeda进行空间异质性分析。

分析显示,岳西县生态安全的全局Moran's I 指数为0.6374,说明存在空间自相关,Moran's I 一般采用Z方法进行显著性检验。Moran's I 指数和Z-Score检验的意义在于,当Moran's $I > 0$, Z-Score > 1.96 (P -Value < 0.05) 时, Moran's I 数值能表明其空间正相关程度的显著性大小。本文中,生态安全评价指数的Z-Score等于48.2945 (P -Value=0.0000),远大于1.96,表明岳西县生态安全等级空间分布呈现很强的空间正相关。局部自相关Moran's I 指数数值将空间分为“高高(HH)、低低(LL)、高低(HL)和低高(LH)”四

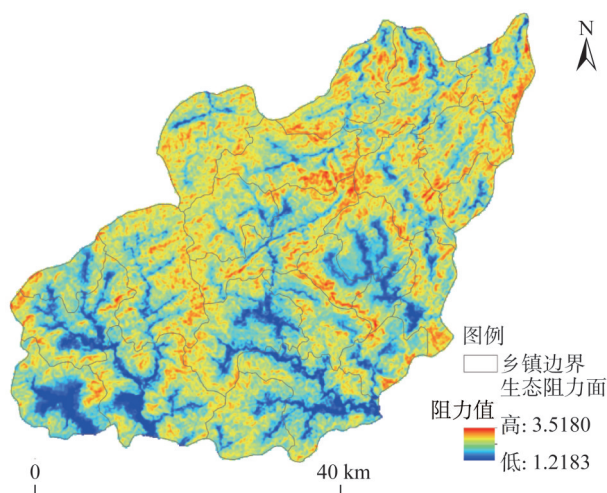


图3 岳西县生态栅格阻力面

Fig. 3 Grid map of ecological resistance in Yuexi county

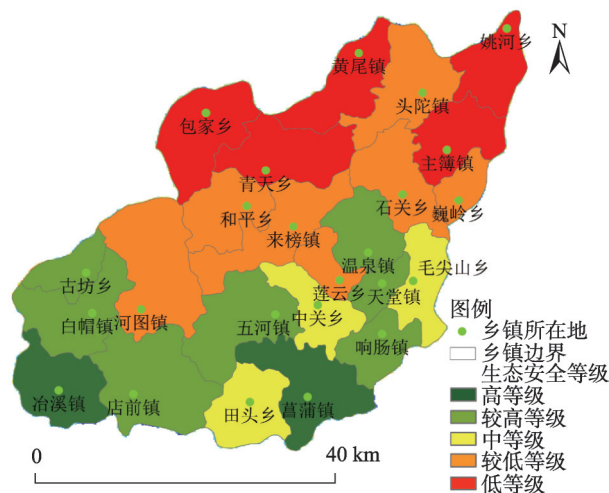


图4 岳西县生态安全等级划分

Fig. 4 Classification of ecological security in Yuexi county

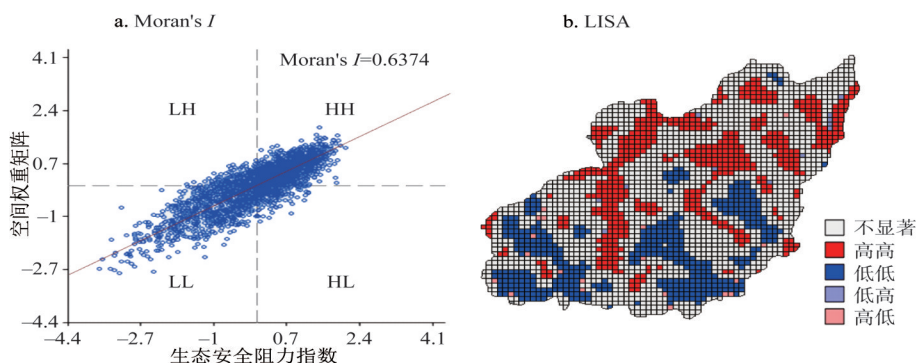
图5 岳西县生态安全评价等级Moran's I 散点图及LISA聚集图

Fig. 5 The LISA aggregation of land ecological security evaluation index in Yuexi county

部分,其中,HH聚集区表示生态安全阻力指数高的中心地区其周边生态安全阻力指数也较高,体现在空间关联中为扩散效应;LL聚集区表示中心地区和相邻地区的生态安全阻力指数都较低,属于低等级区;落入HH和LL区的生态安全阻力指数在地理空间上存在显著的空间正相关。HL聚集表示中心地区生态安全阻指数值高邻值低,在空间关联中表现出极化效应;LH聚集表示中心地区生态安全阻力指数低邻接高,在空间关联中属于过渡区。其中不显著的网格单元为生态安全阻力指数空间性不强的区域,根据本文的生态安全阻力指数的空间LISA聚类图显示,岳西县生态安全阻力指数主要以高高(HH)、低低(LL)两种聚集类型为主,在空间上呈明显的片状集聚分布特征,而高低(HL)和低高(LH)类型在空间上的聚集效果不明显,如图5所示。对于高高(HH)分布区域,其生态系统较脆弱,地质灾害和水土流失高度敏感,应当加强生物多样性保护,生物措施与工程相结合进行水土流失控制,适度开展生态型旅游,发展观光农业。而对于低低(LL)区域应当在国土空间规划及生态规划指导下,进一步严格用途管制,保障土地合理利用,协调城镇用地有序扩张、加强耕地保护与生态保育等工作。

2.3 大别山核心区岳西县潜在生态廊道提取及空间格局优化

2.3.1 潜在生态廊道的识别提取

生态廊道是相邻的生态源地之间低累积阻力谷线通道,主要由植被、水体等生态要素构成的,是具有保障物种和能量流通、保护生物多样性、维持生态系统稳定性等生态服务功能的条带状景观要素^[14,20],生态源地和廊道共同构成了生态服务功能网络的主要组成部分^[31]。基于最小累积阻力模型能有效确定生态功能网络中廊道的最佳路径,从而形成潜在生态廊道。目前,生态源地的识别方法主要依据其生物多样性和生态系统服务两个方面,分为直接识别和构建综合评价指标体系识别两种方法,直接识别法比较常用,且较便捷,但具有一定的缺陷^[32]。根据岳西县旅游资源的现状及生态、旅游产业作为扶贫工程项目的背景,选择具有良好生境条件的风景和自然保护区大型斑块作为生态源地,具体选取10个大型生境斑块作为区域生物多样性的源地,总面积为256.52 km²。这些斑块是研究区生物物种的主要活动范围和重要栖息场所,更为物种的生存、繁衍提供重要保障,因此,具有极其重要的生态系统功能和生态学价值。基于岳西县生态因子阻力面,为各生态源地斑块建立累积耗费阻力面,利用MCR模型得到各源地之间最小累积耗费路径,从而识别研究区潜在生态廊道的空间分布。最后,利用重力模型计算生态源地

斑块之间的相互作用力，作为识别和提取重要潜在生态廊道的依据。

本文利用 ArcGIS 10.2，以选取的生态源地斑块作为源输入。首先利用 Cost distance 建立生态源累积耗费阻力面，结果显示，岳西县生态累积耗费阻力面中最低阻力值为 0，最高值为 52782.8。高阻力值主要分布于县域东北部和中部地区，区域内有城镇和乡村分布。低阻力值区域分布较广泛，主要在县域西南部，范围内为生境质量较高区域，见图 6。其次，基于生态源累积耗费阻力面，应用 MCR 最小累积阻力模型采用 Cost path 工具分别生成每个生态源地斑块与其他生态源地斑块之间的最小累积耗费路径，从而构成研究区的各生态源斑块间的潜在生态廊道，最后计算各潜在生态廊道的累积阻力值。见表 2 和图 6。本文共生成 90 条潜在生态廊道，通过重力模型计算，提取识别重要廊道 21 条，其中重要性值在 50~100 之间的二级潜在廊道 8 条，重要性值大于 100 的一级潜在廊道 13 条。重要性小于 50 的为一般廊道，共 69 条。研究表明，一级、二级廊道为面积较大的核心型、中枢型生态源斑块之间的生态廊道，是物种间流通的低阻力通道，为生态景观网络结构中的关键部分。除此以外的一般廊道主要表现为距离较长、所穿越的阻力区等级种类多，因此累积阻力值较大，不利于生态流的交换。

由表 2 可见，研究区选择的生态源斑块之间的相互作用强度的重要性值差异显著。其中，最小值为 11.1292，表明斑块 5 与斑块 10 之间的相互作用最弱，生态源斑块间的景观阻力很大；而最大值为 775.7783，表明生态源斑块 2 与斑块 3 之间的相互作用力最强，二者之间的生态廊道景观阻力较小，生境条件质量较高。由于生态廊道对于生物物种的丰富度、迁移与扩散等具有重要作用^[19]，因此生态安全建设过程中，必须严格控制与保护重要生态廊道。同时，对于一般廊道的生态格局也应在绿地系统等规划中加以改善和优化，从而提高这一类生态廊道的生境适宜性^[19]。

2.3.2 生态网络框架空间布局模式及优化对策

生态网络框架包括路径（生态廊道）、关键结合点（生态节点）和局部（面），生态

表 2 岳西县潜在生态廊道重要性识别
Table 2 Identification of the importance of potential ecological corridors in Yuexi county

重要性值	生态源斑块										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
生态源斑块	1	—	220.7892	96.5339	57.4688	31.7698	47.9108	32.7094	58.6744	44.8643	29.8911
	2	—	—	775.7783	200.6901	70.7435	118.2498	49.2884	30.1409	28.1914	20.4705
	3	—	—	—	600.5939	123.3771	267.0343	58.9505	22.0793	22.0166	18.0512
	4	—	—	—	—	388.4055	522.7442	64.3838	16.1716	16.1476	14.0607
	5	—	—	—	—	—	214.0658	58.4684	11.4995	11.4219	11.1292
	6	—	—	—	—	—	—	165.3681	19.9354	20.5207	19.0215
	7	—	—	—	—	—	—	—	15.1764	18.7530	21.8282
	8	—	—	—	—	—	—	—	—	203.1091	65.0220
	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	274.5304
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：（1）表中 1~10 数值表示各生态源斑块的序号，按顺序分别表示：1 为“鹞落坪自然保护区”、2 为“驮尖风景区”、3 为“明堂山风景区”、4 为“天峡风景区”、5 为“司空山风景区”、6 为“妙道山风景区”、7 为“天仙河景区”、8 为“云峰峡谷景区”、9 为“乐诚寺旅游景区”、10 为“桔井园自然保护区”；（2）表中重要性值在 [50,100] 区间的为二级廊道，大于 100 的为一级廊道，重要性小于 50 的为一般廊道。

流网络对于自然界的能量流、信息流和生物流的交换具有重要作用,也是加强研究区生态安全建设的关键^[33]。其中,节点与廊道的有机整合对于景观连接性和生态系统功能发挥至关重要^[34]。生态节点是生态源间物种的跳板或转折点,一般位于生态廊道中的生态功能最薄弱处,主要由最小路径与最大路径交叉点或最小路径的汇集处交点构成,加强生态节点的生态环境建设有利于降低生态廊道的耗费成本,提升区域生态网络的生态服务功能^[29]。因此,结合生态源地、廊道与生态节点进行生态规划布局,构建出“点—线—面”相互交融的生态服务功能网络体系,对于加强大别山核心区生态系统功能健康与服务的可持续性具有重要意义。本文最终提取大别山核心区岳西县潜在生态廊道90条,总长度约825.66 km,其中一、二级廊道长度仅占总长的27.22%。另外,基于生成的潜在生态廊道和最小累积阻力面,应用ArcGIS空间分析功能分别提取了研究区潜在生态廊道之间的生态节点72个,生态廊道与最大阻力路径之间的生态节点31个。

基于MCR和重力模型识别提取了重要潜在生态廊道,但其只是一种概念上的网络路径,在生态规划设计、建设中,生态廊道空间布局应当占有一定宽度才能更好地发挥其生态服务功能^[35]。研究表明,宽度对廊道的生态功能发挥具有重要影响,不同物种的迁徙活动对廊道宽度需求不同,过窄的廊道会对敏感物种不利,同时降低廊道的过滤污染物等功能,而通过增加廊道的宽度可以减少“边缘效应”对物种分布迁徙的不利影响。因此,为了保障生物多样性,可适当覆盖尽可能多的环境梯度类型,增加环境异质性^[20]。考虑到研究区范围不大,以及研究区生态源斑块宽度范围在大致在2~12 km,应当尽可能的将高质量生境斑块包括在内,通过缓冲区空间分析模拟对比,最终将规划的生态廊道宽度设定为6 km。结合大别山核心区岳西县大型生态源斑块、重要潜在生态廊道及生态节点的空间分布实际情况,并以主要生境源地斑块的有效连接为原则,最终提出“一环三带”的生态网络框架布局模式,见图7。其中,“一环”主要是基于一级廊道为主体,由生态源斑块“1、2、3、7、8、9和10”组合构成,空间上连接成西南至北部的生态旅游廊道,与县域空间规划中的“绿色生态经济聚能环”相吻合;“三带”主要基于一、二级生态廊道为主体,分别由生态源

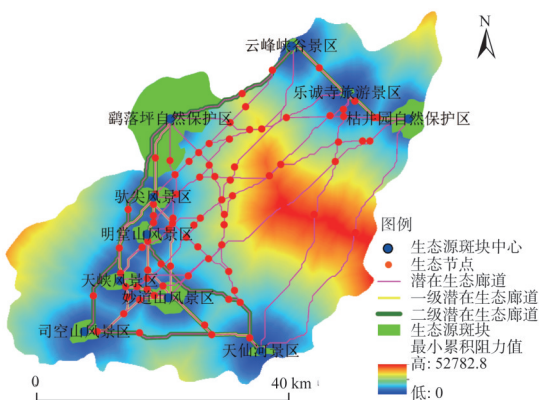


图6 累积耗费阻力面、潜在生态廊道与节点分布
Fig. 6 Grid map of cumulative cost distance for ecological sources and potential eco-corridors and eco-nodes

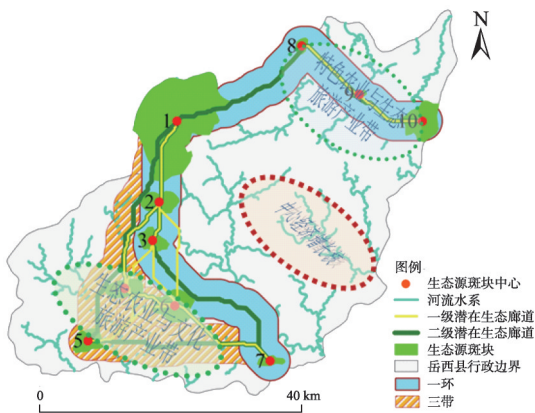


图7 岳西县生态网络框架空间布局
Fig. 7 The map of ecological framework with layout of 'patch-corridor-point' in Yuexi county

斑块“1和5”“5和6”及“5和7”三个组合构成,生态网络框架的廊道规划区主要包括店前镇、河图镇、冶溪镇、古坊乡、白帽镇、五河镇、岩河乡、田头乡和菖蒲镇。“一环三带”的生态网络框架主要基于重要潜在生态廊道为路径,以低阻力值廊道上的大型生态源地为核心,以生态节点为支撑,形成具有一定宽度的“斑块—廊道—节点”生态网络结构,该4条廊道是岳西县生态安全格局的重要生态通道,具有保护生物多样性等生态系统服务功能。

本文模拟规划的“一环三带”的生态网络框架模式较好地将区域内大型和枢纽型生态源地相连接,能够有效保障物种空间流通性,促进生态流的运行,对于景观连接性和生态系统功能发挥至关重要。因此,“一环三带”的生态网络框架模式是岳西县生态产业发展“一核(中心经济增长核)两带(南部生态农业与文化旅游产业带、北部特色农业与生态旅游产业带)”空间布局的有效补充,统筹规划“经济增长核”的中心城区与“南部生态农业与文化旅游产业带”“北部特色农业与生态旅游带”的生态流通网络建设,对于保障生态产业经济的稳定发展,维护区域生态安全格局具有重要的意义。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以大别山核心区岳西县为研究对象,依据生态阻力因子指标,建立生态阻力表面,分析岳西县生态安全水平空间分布特征,选择大型风景区和自然保护区为生态源,构建生态源地生态积累耗费阻力面。最后利用MCR模型及重力模型进行潜在生态廊道的提取,并进行重要潜在生态廊道的识别。其主要结论如下:(1)选取10个生态阻力因子建立生态安全评价指标体系,并构建生态阻力面,对岳西县生态安全水平进行诊断。研究表明:岳西县生态安全较高及高等级区域占县域总面积32.79%,而较低及低等级区域占51.89%,生态安全呈现北低南高的空间特征,总体上岳西县生态安全水平偏低。(2)生态安全空间分布的ESDA分析显示,全局Moran's I 指数为0.6374, LISA聚类图显示,岳西县生态安全等级主要以高高(HH)、低低(LL)两种聚集类型为主,在空间上呈明显的片状集聚分布特征。(3)结合岳西县生态经济发展和旅游扶贫产业布局规划,选择岳西县自然保护区及大型风景区斑块为生态源,生成生态累积耗费阻力面,基于MCR最小累积阻力模型构建生态源之间的最小累积耗费路径,提取潜在生态廊道90条,总长825.66 km,应用空间分析方法提取生态节点103个,利用重力模型识别出21条重要潜在生态廊道,长度占总长的27.22%,其中,一级潜在生态廊道13条,二级潜在生态廊道8条。(4)依据岳西县景观和区域发展实际现状,提出了建设和保障生态经济发展和旅游经济开发的“一环三带”生态网络框架布局模式,该模式可作为岳西县生态产业空间布局的重要补充,为岳西县生态安全规划提供决策依据。

针对大别山核心区岳西县生态网络框架的布局模式,在生态安全格局优化对策上需关注以下几点:(1)通过国土空间规划及相关生态功能区规划,严格用途管制,保护区域内各级各类风景区、自然保护区等重要生态源斑块的完整性,通过绿地规划增大斑块面积,提高生态网络框架中的生态源斑块的生境质量,增强生物种对斑块的生境适宜性,加强生态网络框架中的生态源地保护与建设。(2)加强一、二级生态廊道的保护,提升一般生态廊道的连接度。潜在生态廊道与生态高阻力路径交汇的生态节点比较敏

感,需加强中心城区范围内生态廊道连接的生态节点的培育与建设,将有助于提升生态源斑块之间的连接度,从而有利于增强南北产业带的生态连通性。(3)进一步完善生态网络结构。结合现有的旅游路线及绿地网络,合理规划区域内道路、河流水系、防护林带等廊道。另外,由于岳西县向外交通道路主要以中心城区天堂镇为中心向外辐射分布,因此,应当加强环状生态廊道及带状生态廊道与道路交叉的生态敏感点建设和重大交通设施及市政设施廊道生态防护工作。(4)加强生物物种与所选择生态源斑块之间的适宜性分析。岳西县是安徽省主要生物基因库之一,动植物资源丰富,而针对性地选择相应的生物确定适宜的生态阻力路径,将更能为有效保护生态多样性及构建生境安全格局提供规划布局依据。最后,生态网络空间优化需进一步加强区域生态敏感性与社会经济、产业布局等耦合关联分析,生态安全建设更要紧密结合区域的生态治理工程、生态产业和旅游扶贫项目开发及生态补偿机制等进行整体布局和规划实施。

3.2 讨论

加强大别山区生态安全格局构建对于促进贫困山区生态扶贫产业布局、协调经济发展与生态安全建设具有重要意义。近年来,基于MCR模型的生态安全格局法被广泛应用于城市规划、土地利用、生态评价等问题的研究中。基于MCR模型的生态安全研究较传统方法在影响因子的生态过程表达、空间可视化等方面具有一定的优势。本文主要采用栅格数据,基于最小累积阻力模型方法对大别山核心区进行生态安全评价、生态廊道提取及生态网络框架构建。整体上,研究结果较符合岳西县实际情况。在目前实施的岳西县空间规划(2017-2030年)中,强调了生态网络构建在生态安全建设中的重要性,但生态安全格局的构建、潜在重要生态廊道的分析提取等研究不足。本研究基于MCR模型采用定量方法,提取的不同级别潜在生态廊道的层次性较为丰富、廊道在空间上的定位更加明晰,在一定程度上可为岳西县生态规划和景观格局优化提供具有参考价值的布局模式。研究方法和结果对于未来大别山区生态安全建设研究也具有一定的理论和实践意义。需要注意的是,该方法主要利用自然因子栅格数据进行分析,存在数据量大、人文与社会经济、政策等影响因子欠缺且该类指标难以空间量化等问题。针对自然地理条件复杂,社会经济不断发展的大别山区,应当进一步加强整合人文、社会和自然因子与区域生态安全的耦合分析,研究结果将更为科学、准确,从而为大别山区生态文明建设过程中的生态安全格局构建、产业布局优化和生态经济发展提供科学决策依据。

参考文献(References):

- [1] 欧阳志云,崔书红,郑华.我国生态安全面临的挑战与对策.科学与社会,2015,5(1):20-30. [OUYANG Z Y, CUI S H, ZHENG H. The challenges and coping strategies for ensuring ecological security in China. Science and Society, 2015, 5 (1): 20-30.]
- [2] 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.生态学报,2004,24(4):761-768. [MA K M, FU B J, LI X Y, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 761-768.]
- [3] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容.应用生态学报,2002,13(3):354-358. [XIAO D N, CHEN W B, GUO F L. On the basic concepts and contents of ecological security. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 354-358.]
- [4] BRAND U, VADROT A. Epistemic selectivities and the valorisation of nature: The cases of the Nagoya Protocol and the intergovernmental science-policy platform for biodiversity and ecosystem services (IPBES). Law, Environment and Development Journal, 2013, 9(2): 202-220.

- [5] LIU J, MOONEY H, HULL V, et al. Sustainability systems integration for global sustainability. *Science*, 2015, 347(6225): 1258832.
- [6] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [7] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348. [FU B J, YU D D, LYU N. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 341-348.]
- [8] 李建春, 袁文华. 基于GIS格网模型的银川市土地生态安全评价研究. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 988-1001. [LI J C, YUAN W H. Assessment of urban land ecological security in Yinchuan city based on the grid method. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 988-1001.]
- [9] 陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 等. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策. *生态学报*, 2016, 36(22): 7125-7129. [CHEN L D, ZHOU W Q, HAN L J, et al. Developing key technologies for establishing ecological security patterns at the Beijing-Tianjin-Hebei urban megaregion. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7125-7129.]
- [10] BAI Y, JIANG B, WANG M, et al. New ecological redline policy (ERP) to secure ecosystem services in China. *Land Use Policy*, 2016, 55(798): 348-351.
- [11] 刘国华. 西南生态安全格局形成机制及演变机理. *生态学报*, 2016, 36(22): 7088-7091. [LIU G H. Formation and evolution mechanism of ecological security pattern in Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7088-7091.]
- [12] 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. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484. [CHEN X, PENG J, LIU Y X, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484.]
- [13] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15. [YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 8-15.]
- [14] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HAMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [15] 蒙古军, 燕群, 向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 590-596. [MENG J J, YAN Q, XIANG Y Y. The optimization of ecological security pattern based on land use and assessment of schemes in Ordos. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(2): 590-596.]
- [16] 朱敏, 谢跟踪, 邱彭华. 海口市生态用地变化与安全格局构建. *生态学报*, 2018, 38(9): 3281-3290. [ZHU M, XIE G Z, QIU P H. Ecological land use change and construction of ecological land security pattern in Haikou city. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3281-3290.]
- [17] 张晓玲, 周结斌. 安徽省大别山区生态补偿现状、问题和建议. *治淮*, 2016, (12): 47-49. [ZHANG X L, ZHOU J B. Current situation, problems and suggestions of ecological compensation in Dabie Mountain Area of Anhui province. *Zhi Huai*, 2016, (12): 47-49.]
- [18] 舒肖明, 杨达源, 董杰. 山区生态足迹的计算与分析: 以大别山区岳西县为例. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2): 243-247. [SHU X M, YANG D Y, DONG J. Analysis of ecological footprint in mountain area: Taking Yuxi county as an example. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2): 243-247.]
- [19] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863-2874. [YIN H W, KONG F H, QI Y, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2863-2874.]
- [20] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. *生态学报*, 2005, 25(9): 2406-2412. [ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of ecological corridor in landscape planning. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2406-2412.]
- [21] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1611-1618. [CHEN X P, CHEN W B. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1611-1618.]
- [22] 李玉平, 蔡运龙. 河北省土地生态安全评价. *北京大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(6): 784-789. [LI Y P, CAI Y L. Security evaluation of land ecology in Hebei province. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(6): 784-789.]
- [23] 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. *生态学杂志*, 2016, 35(1):

- 250-258. [YANG S S, ZOU C X, SHEN W S, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: A case study of Jiangxi province. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(1): 250-258.]
- [24] 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. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4546-4554. [WANG Q, FU M D, WEI L, et al. Urban ecological security pattern based on source-sink landscape theory and MCR model: A case study of Ningguo city, Anhui province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4546-4554.]
- [25] 李晶, 蒙古军, 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. *北京大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(4): 707-715. [LI J, MENG J J, MAO X Y. MCR based model for developing land use ecological security pattern in farming-pastoral zone: A case study of Jungar Banner, Ordos. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(4): 707-715.]
- [26] 蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. *生态学报*, 2012, 32(21): 6755-6766. [MENG J J, ZHU L K, YANG Q, et al. Building ecological security pattern based on land use: A case study of Ordos, Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6755-6766.]
- [27] 卓静. 基于3S技术的陕北地区生态环境遥感动态监测及评价. 西安: 西北大学, 2008. [ZHUO J. Dynamic monitoring and evaluation of eco-environment based on 3S technology in the northern of Shaanxi province. Xi'an: Northwestern University, 2008.]
- [28] 中华人民共和国水利部. SL190-1996土壤侵蚀分类分级标准. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 190-1996 Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1997.]
- [29] 潘竟虎, 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. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3126-3136. [PAN J H, LIU X. 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3126-3136.]
- [30] 刘孝富, 段培强, 王维, 等. 成都地震重灾区生态影响分区及恢复对策. *环境科学研究*, 2010, 23(6): 711-718. [LIU X F, DUAN P Q, WANG W, et al. Research on ecological impact regionalization and restoration strategy in areas of Chengdu heavily impact by earthquake. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(6): 711-718.]
- [31] 刘宇舒, 赵天宇. 景观生态视角下镇域生态服务评价与网络构建. *中国园林*, 2015, 31(10): 71-75. [LIU Y S, ZHAO T Y. Township ecosystem service evaluation and network construction based on landscape ecology. *Chinese Landscape Architecture*, 2015, 31(10): 71-75.]
- [32] 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. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [33] 朱军, 李益敏, 余艳红. 基于GIS的高原湖泊流域生态安全格局构建及优化研究: 以星云湖流域为例. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(8): 1237-1250. [ZHU J, LI Y M, YU Y H. Study of construction and optimization of ecological security pattern of lake basin in Plateau based on GIS: A case study of Xingyun Lake Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(8): 1237-1250.]
- [34] BENEDICT M A, MCMAHON E T. Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 2002, 20(3): 12-17.
- [35] 蒋思敏, 张青年, 陶华超. 广州市绿地生态网络的构建与评价. *中山大学学报: 自然科学版*, 2016, 55(4): 162-170. [JIANG S M, ZHANG Q N, TAO H C. Construction and evaluation of green space ecological network in Guangzhou. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, 55(4): 162-170.]

Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area

HUANG Mu-yi¹, YUE Wen-ze², FENG Shao-ru¹, CAI Jie-jie¹

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. Department of Land Resources Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Taking Yuexi county, the core area of Dabie Mountain, which is a focus in China's targeted poverty alleviation campaign, as the research unit, and based on remote sensing and GIS platform, we selected ten ecological resistance factors, namely, elevation, slope, land use type, vegetation coverage, soil erosion, and distance from tourist spot, industrial land, water area, road, residential areas, to establish an ecological security evaluation index system. With the aid of ArcGIS, ecological security level was evaluated and potential ecological corridor recognition was extracted, through Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) method, Minimum Cumulative Resistance (MCR) model and gravity model, to build ecological resistance. The results showed that: The high and higher level regions accounted for 37.79% of the total area of the county, while the low and lower ranking regions accounted for 51.89%, which present the spatial characteristics that the low level ecological security units were distributed in the north part, while the high level ones were in the south part, and that the overall ecological security level was relatively low in the county. Secondly, the spatial distribution characteristics of ecological security by means of ESDA analysis method indicated that the global Moran's I index was 0.6374, and LISA figure showed that there were mainly high (HH) and low (LL) types of aggregation for ecological security level, and the ecological security had a significant spatial clustering characteristic in Yuexi county. On this basis, good habitat in the nature reserve and large scenic spot patches were chosen as the ecological source, which is the first step for ecological source cumulative cost resistance surface generated by cost distance tool of ArcGIS. Then, the minimum cumulative cost path and the potential ecological corridor were identified and constructed based on MCR model. The results showed that a total of 21 important potential ecological corridors and 103 ecological nodes were identified and extracted, including 13 first-level corridors and 8 secondary corridors by means of gravity model. Finally, according to the characteristics of the tourism poverty alleviation industry and ecological economic development in the study area, the paper put forward the layout model of "one ring and three zones" ecological corridor network framework and some optimization countermeasures. This model is an effective supplement to the development pattern of ecological economy industry in Yuexi county.

Keywords: ecological security; spatial heterogeneity; minimum cumulative resistance model; ecological corridor; Yuexi county, Dabie Mountain Area