

DOI: 10.5846/stxb202106061490

邬志龙, 杨济瑜, 谢花林. 南方丘陵山区生态安全格局构建与优化修复——以瑞金市为例. 生态学报, 2022, 42(10): 3998-4040.

Wu Z L, Yang J Y, Xie H L. Construction, optimization and restoration of ecological security pattern in the southern hilly and mountainous region of China: A case study in Ruijin City. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3998-4040.

南方丘陵山区生态安全格局构建与优化修复 ——以瑞金市为例

邬志龙^{1,2}, 杨济瑜³, 谢花林^{1,2,*}

1 江西财经大学生态文明研究院, 南昌 330013

2 江西财经大学土地管理研究中心, 南昌 330013

3 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330013

摘要: 构建科学合理的生态安全格局、落实生态保护修复与空间优化是促进区域生态系统健康运行和社会经济可持续发展的重要途径。以南方丘陵山区瑞金市为例, 综合生态敏感性评价与最小阻力模型, 解构瑞金市生态安全格局及其自然生态与社会经济特点, 并提出生态保护修复与空间优化方案。结果显示: (1) 瑞金市生态源地共有 123.22 km², 占总国土面积 5%, 主要为重要山林地和水域, 环绕中部盆地呈卫星状分布; (2) 潜在廊道 119 条, 生态节点 72 个, 在周边山地呈闭合网络状, 但中部盆地廊道单一、节点密集, 网络连通性较低; (3) 瑞金市是典型的高原型阻力面, 中部盆地城镇发展区、沟域经济延伸带、西部工矿挖采点生态阻力高、源地辐射弱, 应生态预警与重点修复。瑞金市生态保护修复与空间优化应宏观统筹、分区推进、精细落实, 划分生态修复核心区、生态监测预警区、生态保护缓冲区和生态保护重点区, 明确空间管控原则、分区推进生态保护, 围绕“源地-廊道-节点”落实生态修复。

关键词: 生态安全格局; 敏感性评价; 最小累积阻力模型; 空间优化; 生态保护修复; 南方丘陵山区

Construction, optimization and restoration of ecological security pattern in the southern hilly and mountainous region of China: A case study in Ruijin City

WU Zhilong^{1,2}, YANG Jiyu³, XIE Hualin^{1,2,*}

1 Institute of Ecological Civilization, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China

2 Land Management Research Centre, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China

3 College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330013, China

Abstract: Establishing ecological security patterns, and implementing ecological restoration and spatial optimization are important ways to promote the health of regional ecosystems and the sustainable development of society and economy. Using Ruijin City, a southern hilly and mountainous region of China, as a case, this study demonstrated the regional ecological security patterns and the bio-physical and socio-economic characteristics through ecological sensitivity assessment and a least resistance model. Then the strategies for ecological restoration and spatial optimization were finally proposed. The results show that: (1) the identified ecological source areas in Ruijin City is 123.22 km², accounting for 5% of the total area. They are mainly composed of important mountainous forests and water bodies, and distributed around the central basin. (2) There are 119 potential corridors and 72 ecological nodes, which form a closed network in the surrounding mountains. However, the central basin only possesses a single corridor with dense nodes and low network connectivity. (3) The

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861036); 中国博士后科学基金面上项目(2018M630738); 江西省自然科学基金项目(20192BAB213023); 江西省教育厅科技项目(GJJ200504)

收稿日期: 2021-06-06; 网络出版日期: 2022-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiehl_2000@163.com

mountainous Ruijin City turns to be a typical plateau resistance surface. The urban areas under development in the central basin, the economic extension zone in the gully area, and the west mining areas, where the ecological resistance is extremely high while the radiation from the ecological source is weak, should be ecologically pre-warned and restored with priority. In terms of spatial optimization and ecological protection and restoration in Ruijin City, the work should be arranged macroscopically as a whole, propelled regionally and implemented meticulously. Moreover, the ecological restoration core area, the ecological monitoring and pre-warning area, the ecological protection buffer area, and the ecological protection key area should be classified with distinct principles for spatial regulation. Specific countermeasures for regional ecological protection and restoration should be based on the “source-corridor-node” pattern.

Key Words: ecological security pattern; sensitivity evaluation; minimum cumulative resistance model; spatial optimization; ecological protection and restoration; southern hilly and mountainous region

在快速城市化、工业化背景下,社会经济发展与生态环境保护的双重博弈,致使生态空间不断被压缩、生态安全问题日益突出^[1-2]。因此,党的十八大、十九大明确指出将优化生态安全格局提升到国家战略高度^[3],并强调“实施重要生态系统保护和修复重大工程,优化生态安全屏障体系,构建生态廊道和生物多样性保护网络,提升生态系统质量和稳定性”。生态安全格局是景观格局优化的空间表现,需对维护和控制某种生态过程起关键性作用的局部、点以及位置关系进行优化配置^[4]。生态修复是对受损国土空间、退化生态系统进行恢复与重建^[5]。构建科学合理的生态安全格局是维系生态安全的宏观把握,实施精准有效的生态修复则是提高生态安全的具体抓手,两者相辅相成、相得益彰,对维持景观格局整体性和生态系统功能完整性具有重要的理论和现实意义^[6]。

自 20 世纪 90 年代生态安全格局相关理论和方法的系统提出^[7],“识别源地—构建阻力面—提取廊道及节点”已逐渐成为生态安全格局研究的基本范式^[4,8]。生态源地是指具有重要生态功能和较强敏感性的大型生境斑块,是生态系统服务供给的发源地和汇集地,通常根据生态系统服务功能价值^[9-10]、生态敏感性^[11-12]、生境质量^[13]等综合评价提取。阻力面是反映物种空间扩散和潜在流动所面临的阻碍和困难程度,大多通过地类赋值^[14-15]、指数修正^[16-17]和最小阻力模型^[18]构建。生态廊道是物种迁移扩散的最小阻力通道,维系着生态系统内部要素间的能量流、物质流、信息流,常用识别方法有成本路径法^[19]、电路理论^[20-21]、图论方法^[22]等。生态节点则是生态廊道上占据重要区位的关键性、战略性节点,并由此衍生出生态战略点^[23]、生态夹点^[20]、生态障碍点^[6]、生态断裂点^[9]等多种概念类型。合理有序的“源地-廊道-节点”结构框架是支撑区域生态功能健康运行和社会经济可持续发展的前提和基础^[15]。

目前,国内外学者将此框架应用于省域^[24]、城市群^[25]、城市^[14,26]、县(区)^[27]、乡镇^[28]等不同尺度和矿区^[29]、旱区^[30]、城市森林^[31]、湿地^[32]等典型客体的生态安全格局研究,并在技术方法上做了大量改进。然而,基于“源地-廊道-节点”的生态格局研究大多沦为刻板教条式分析,缺乏对生态安全格局成因的深入探究和社会经济因素的充分考量^[33],也鲜有对生态安全预警和生态修复区域的有效识别^[34-35],以至于未能提出具体有效的生态安全格局优化和生态保护修复措施建议,理论指引和实践操作性不强。而现有生态修复又以工程修复措施为主,缺乏生态要素统筹修复意识,不利于生态系统整体功能发挥^[6,36]。生态安全格局的宏观优化与生态保护修复的具体实施未能很好地结合起来,缺乏宏观与细节、整体与局部的有效衔接。此外,生态安全格局构建相关技术方法的改进,对数据要求越来越高,操作过于复杂,反而不利于生态安全格局的研究分析。因此,生态安全格局研究应更多关注两方面的科学问题:1) 如何快速有效地解构区域生态安全格局及其空间要素组分,厘清其自然生态与社会经济内涵特点;2) 如何基于“源地-阻力面-廊道与节点”生态格局识别生态预警与保护修复核心区域,提出具体有效的生态保护修复与空间优化方案,统筹宏观空间规划和具体生态措施。

南方丘陵山区作为我国生态安全战略格局中“两屏三带”的重要组成部分,生态区位重要、生态问题突

出,被纳入全国首批山水林田湖草生态保护修复试点,将开展系列生态建设与保护修复工作,投资巨大、工程繁多^[37]。因此,研究南方丘陵山区生态安全格局优化及其保护修复具有典型代表性和现实迫切性。鉴于此,本文以南方丘陵山区瑞金市为例,综合生态敏感性评价与最小阻力模型,识别生态源地,梳理潜在廊道和生态节点,解构瑞金市生态安全格局及其空间组分,分析其自然生态与社会经济内涵特点,划分生态预警与保护修复核心、重点区域,提出生态保护修复与空间优化方案,以期为南方丘陵山区乃至全国生态安全构建及其优化修复提供参考借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

瑞金市位于江西省东南部,武夷山脉南段西麓,赣江东源贡水上游,处于赣闽粤三省交界,是中西部省市沟通东南沿海的中转要地(图 1)。瑞金市总国土面积 2448km²,其中,耕地面积 238km²,林地面积 1850km²,森林覆盖率达 75.6%。其地势周边高、中部低,盆地面积大,属江西四大盆地之一。瑞金市地处华中气候区与华南气候区的过渡带,属亚热带季风湿润型气候,热量丰富、雨量充沛,光照充足,四季分明。境内地表水资源丰富,多年平均径流总量 21.156 亿 m³,有绵江河、九堡河、万田河、梅江河、古城河等主干河流,流域总面积 2449km²,水库 17 座,储水量 1.98 亿 m³。

瑞金市是一个典型的丘陵山区城市,同时是享誉中外的“红色故都”、共和国摇篮。由于丰富的历史文化和独特的自然资源,瑞金市大力发展旅游经济。然而,近年来随着社会经济的快速发展,瑞金市建设扩张、绿地挤占、污水排放与农村大规模的毁林垦荒、脐橙种植、工矿挖采等,造成较为严重的水土流失、环境污染和生态退化,生态环境保护与社会经济发展的矛盾日渐突出。生态脆弱、资源紧张,与密集的人口分布、高强度的经济活动迫使瑞金市亟需加强生态安全格局的宏观把控和生态保护修复的精细实施。因此选取瑞金市研究丘陵山区生态安全格局具有一定的典型性和代表性。

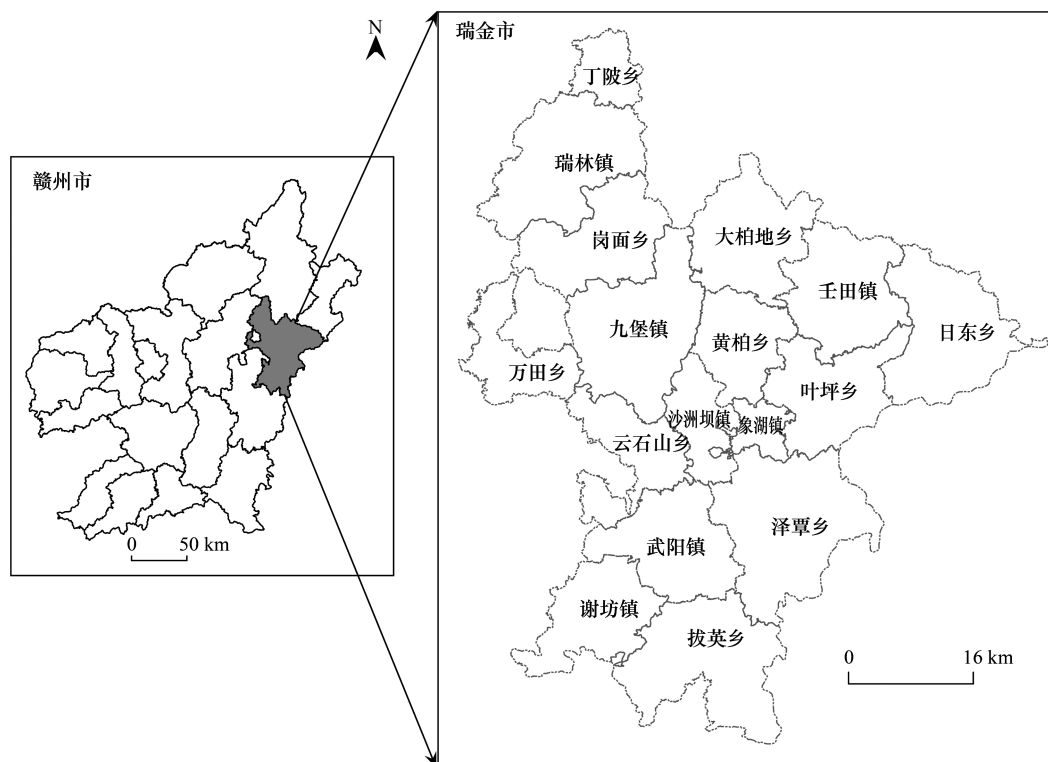


图 1 瑞金市地理位置

Fig.1 Geographical location of Ruijin City

1.2 数据来源

本文的主要数据包括:瑞金市 2017 年土地利用变更调查数据,源自瑞金市自然资源局,土地利用类型分为耕地、园地、林地、草地、交通运输用地、水域、城镇村及工矿用地和其他土地(图 2);数字高程模型(DEM 30m 分辨率),源自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),用于提取高程、坡度数据;中国区域 2019 年归一化植被指数(NDVI 250m 分辨率),源自地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>),用于植被覆盖度分析;其他参考性数据文件还包括瑞金市社会经济空间规划等,来源于瑞金市发展和改革委员会等部门。

2 研究方法

2.1 生态敏感性评价

2.1.1 评价因子选取与等级划分

生态敏感性是指生态系统对人类活动干扰和自然环境变化的反映程度,表征区域发生生态环境问题的难易程度和可能性大小^[11]。瑞金市作为典型的丘陵山区,面临地质灾害(如滑坡、泥石流)、水土流失、环境污染、景观破碎、生物多样性减少等多种生态风险和环境问题,受自然生态条件和人为干扰因素的综合影响,因此在敏感性评价中宜采取多个因子进行综合评价。参考已有研究^[12,18,38]和瑞金市实际情况,本文选取坡度、高程、植被覆盖度、水域、地类 5 个指标对瑞金市生态敏感性进行综合评价。其中,坡度、高程、植被覆盖度、水域充分反映瑞金市丘陵山区自然生态特点,地类指标则综合反映人类活动对自然生态的干扰。参照国家生态环境部发布的《生态功能区划技术暂行规程》的分级标准^[39],将评价因子生态敏感性分为高度敏感、较高敏感、中度敏感、较低敏感和低度敏感 5 个等级,并分别赋值 9、7、5、3、1,具体分类标准如表 1 所示。

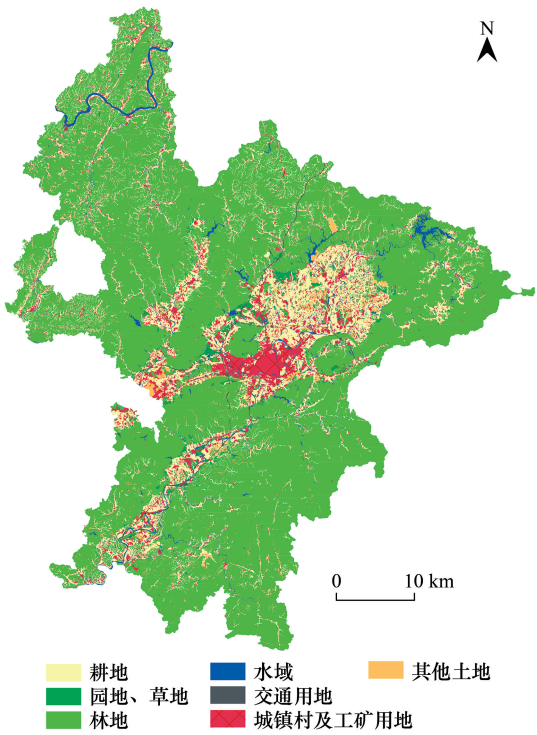


图 2 瑞金市土地利用现状图
Fig.2 Land use and land cover in Ruijin City

表 1 生态敏感性分析因子等级及其权重

生态因子 Ecological indicator	生态敏感性等级 Ecological sensitivity grade					权重 Weight
	1	3	5	7	9	
坡度 Slope/(°)	<5	5—10	10—15	15—25	>25	0.16
高程 Elevation/m	<200	200—300	300—500	500—800	>800	0.12
植被覆盖度 Vegetation coverage/%	<0.38	0.38—0.58	0.58—0.8	0.8—0.9	>0.9	0.28
距水域距离 Distance to waters/m	>500m 缓冲区	200—500m 缓冲区	100—200m 缓冲区	50—100m 缓冲区	<50m 缓冲区	0.24
地类 Land use type	建设用地、 未利用地	耕地	园地、牧草地	林地、滩地	河流、坑塘、 水库	0.20

2.1.2 因子权重赋值

通过层次分析法和专家咨询,对比不同因子的相对重要性,对坡度、高程、植被覆盖度、水域、地类这 5 个因子进行评分、确定权重。运用 Yaahp 软件,构建判断矩阵,将每一行和各纵列的因子进行两两比较,进行评分,对判断矩阵最大特征根的特征向量归一化后,得到各因子的权重值。进行一致性检验,确保检验系数 CR

$=0<0.1$, 具有完全一致性, 最终确定瑞金市生态敏感性评价因子的权重(表 1)。

2.1.3 空间叠加与源地识别

应用 ArcGIS 10.6 软件, 通过裁剪、建立缓冲区、要素转栅格、重分类等工具将坡度、高程、植被覆盖度、水域、地类这 5 个指标因子分别赋予对应的等级数值, 得到单因子生态敏感性分析图。根据单因子分级标准, 利用栅格计算器对各因子进行加权叠加计算, 得到综合瑞金市生态敏感性综合得分, 并利用自然断点将敏感程度划为高度敏感、较高敏感、中度敏感、较低敏感和低度敏感 5 类。

生态源地是物种维持和扩散的源点^[40], 往往是生态高度敏感地区。因此, 本文在生态敏感性评价基础上, 结合瑞金市土地利用与土地覆被现状, 选取生态敏感性高、斑块面积大且集中连片的区域作为生态源地。通过对比瑞金市已有生态红线^[41], 本文最终以大于 0.8km^2 的、集中连片的高度敏感斑块作为生态源地。

2.2 生态阻力分析

2.2.1 最小累积阻力模型

最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance Model, MCR)是模拟物种从源地穿越不同景观基质过程中所耗费代价的最小成本路径^[42], 阻力面则反映了物种空间运动的趋势^[43]。MCR 模型最早由 Knaapen 等^[44]提出, 后经俞孔坚^[45]加以改进, 目前广泛应用在景观生态战略点的判别^[46]。基本公式如下:

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

式中, MCR 为最小累积阻力值; f 表示最小累积阻力模型与生态过程的正相关关系, 是个未知单调递增函数; $\sum$ 表示栅格 i 与源 j 之间穿越所有单元的距离和阻力的累积^[47]; D_{ij} 表示生态要素从源 j 到景观单元 i 的空间距离(单位 m); R_i 表示景观单元 i 对某种生态要素运动的阻力值。

2.2.2 生态阻力因子指标体系

结合研究区的实际情况, 综合考虑指标的可获取性以及易于量化的原则, 分别从自然干扰和人为影响中选取 7 个指标作为阻力评价因子, 构建生态安全阻力面。阻力面是指生态流在景观单元中流动时的受阻程度。自然干扰因子包括 NDVI、坡度、土地利用强度。NDVI 可以指示植被空间密度以及影响局部气候, 坡度可以衡量物种迁徙的难易程度以及土地资源在空间上的分布, 土地利用强度能够表征要素与土地之间的作用关系, 要素与土地之间的作用关系越强, 其阻力值越高。距县道距离、距公路/高速距离以及距居民点距离则是干扰因子。距离越近, 则干扰越强, 即阻力越强; 反之, 则阻力越弱。通过阅读大量文献^[18,29,42,47]参考阻力等级以及阻力值的划分, 运用层次分析法和 Yaahp 软件计算各阻力因子对应权重值, 并进行一致性检验。最终得到各阻力因子等级权重如表 2 所示, 检验系数 $CR=0.007<0.1$, 具有较好的一致性。

2.2.3 生态廊道及节点提取

廊道是两相邻源地之间的最小阻力通道。运用 ArcGIS 10.6 中的重分类、缓冲区分析建立单因子阻力面, 将得到的 7 个单因子阻力面加权叠加得到综合阻力面, 再运用成本距离计算累积耗费阻力面。分别将各个生态源地依次作为起点和终点, 运用 ArcGIS 成本路径分析, 识别生态廊道。依据密度分析工具, 结合生态源地的重要性识别出重点廊道和一般廊道^[18,48]。生态节点位于生态廊道中生态功能较脆弱的地方, 对生态流的运行具有关键作用^[23]。基于生成的潜在廊道, 运用等值线工具生成阻力等值线, 根据生态廊道与阻力等值线的交点识别生态节点。其中, 最大阻力等值线与生态廊道的交点为重要生态节点, 其他等值线与生态廊道的交点为一般生态节点, 形成有梯度层次的生态节点体系。一条生态廊道上往往有一个重要节点和多个一般节点, 既能识别重要生态节点从而决定重要生态工程建设, 又能通过生态节点密集程度判别生态廊道的连通性能进而展开系统保护。梯度化的生态节点体系建设保护可以使生态廊道更加稳定, 增强与生态源地间的连通性, 进而使整个生态网络的连通性与稳定性得到提高。

2.3 生态安全分级与空间优化

综合上述生态源地、生态廊道以及生态节点共同构建出瑞金市的生态安全格局。用自然断点法对最小累

积阻力面中的阻力值进行重分类,将研究区生态安全等级划分为五类,分别为高度生态安全区、较高生态安全区、中等生态安全区、较低生态安全区、低度生态安全区。基于源地-廊道-节点和生态安全等级分区,通过部门走访(自然资源局、农业农村局、生态环境局、发展改革委等)、专家咨询和野外调研,综合了解瑞金市城建、农业、生态、社会、经济等空间运行的现状、困境和未来趋势,判别生态预警与保护修复核心区、重点区,明确空间管制原则和生态修复工程措施,从而制定科学有效、切实可行的生态保护修复与空间优化方案。

表 2 生态阻力因子等级及其权重
Table 2 Factor grade and its weight in ecological resistance analysis

阻力因子 Resistance factor		权重 Weight	阻力分级 Resistance grade	阻力值 Resistance value
自身因子 Attribute factor	NDVI	0.213	[0.75,1]	0
			[0.6,0.75)	20
			[0.4,0.6)	50
			[0.2,0.4)	80
			[0,0.2)	100
	坡度/(°)	0.236	[0,5)	1
			[5,12)	20
			[12,25)	50
			[25,35)	80
			[35,65)	100
	土地利用强度	0.095	其他土地	0
			林地	1
			水域	10
			园地、草地	25
			耕地	50
干扰因子 Disturbance factor	距县道距离/m	0.118	城镇村及工矿用地	80
			交通用地	100
			[0,150)	100
			[150,300)	80
			[300,450)	60
	距公路、高速距离/m	0.173	[450,600)	40
			[600,800)	20
			>800	0
			[0,400)	100
			[400,800)	80
	距居民点距离/m	0.165	[800,1200)	60
			[1200,1600)	40
			[1600,2000)	20
			>2000	0
			[0,200)	100
		[200,400)	80	
		[400,800)	50	
		[800,1200)	30	
		>1200	0	

3 结果分析

3.1 生态源地识别

3.1.1 生态敏感性分析

从图 3 单因子敏感性可以看出,地类、坡度敏感性较大,植被、高程敏感性中等,水域敏感性最小。各因子敏感性具有典型的丘陵山区特点,即:受地形地貌影响,中部盆地与四周丘陵山地差异显著。其中,土地利用

类型直观反映人类活动对自然生态的干扰,中部盆地及山涧沟域由于地势平坦、土地开发强度大,生态活力和生态敏感性明显较低;四周丘陵山地由于海拔较高、坡度较陡难以开发利用,受人类活动干扰较小、植被覆盖保留较好,但易发生岩土崩落、山体滑坡,因而具有较高的生态敏感性;此外,由于盆地和山涧沟域水系汇集,距离水域较近地区常年易受水流冲刷而发生水土流失,因而水域因子敏感性较高。

综合五个单因子敏感性结果,运用栅格计算器加以权重计算得到瑞金市综合敏感性结果。从整体上看,瑞金市综合敏感性呈现“中部盆地与山涧沟域低敏感,四周丘陵山地高敏感”的特点,且敏感区多为重要水库水源地和山地生态林场。其中,敏感区集中连片面积较大的有东北部的日东水库与罗汉岩景区、日东林场,南部的拔英林场等,分别占研究区面积的 15.29%、11.59%以及 26.69%。

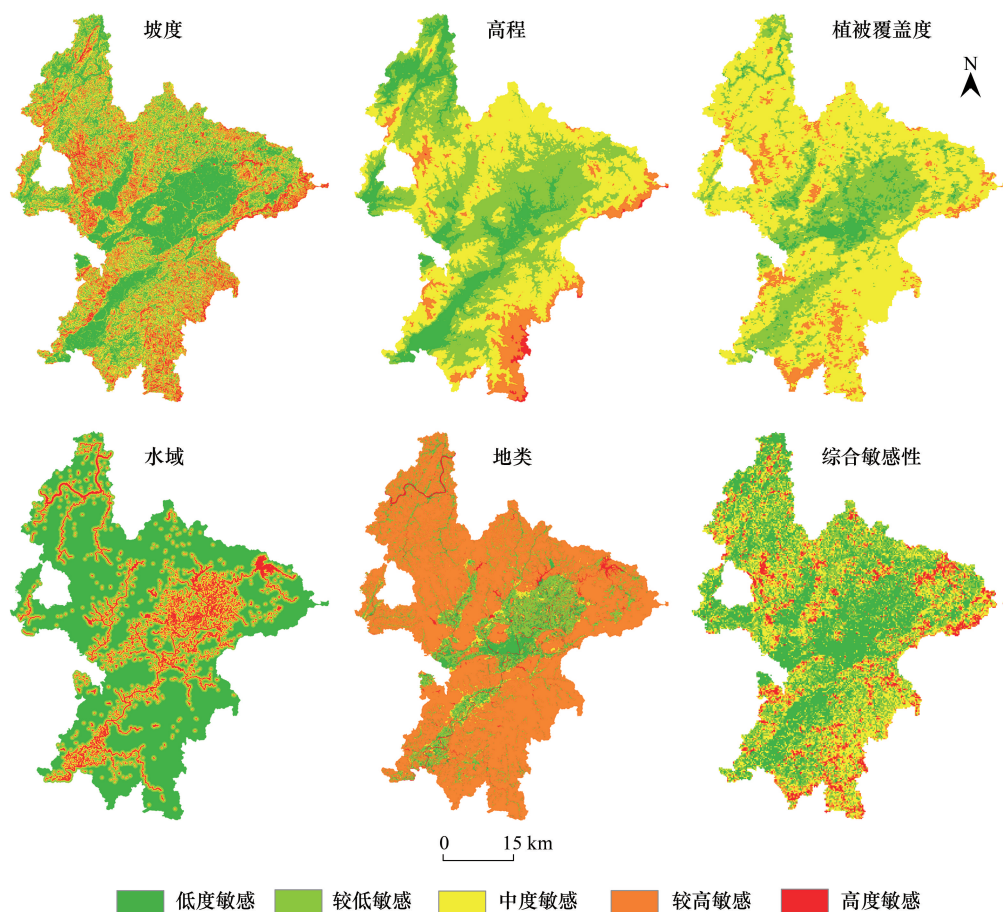


图3 生态敏感性分析

Fig.3 Ecological sensitivity analysis

3.1.2 生态源地提取

基于生态敏感性空间要素识别,为降低细碎斑块的不利影响,合并细碎斑块,并参考瑞金市生态红线,提取集中连片且面积大于 0.8km^2 的高度敏感斑块作为生态源地,最终得到 20 个生态源地(表 3)。可以看到,瑞金市生态源地较多,主要包括了国家森林公园、重点景区、大型水库、重要林地等,围绕中部盆地均匀地分布于周边丘陵山地。

3.2 生态廊道和生态节点构建

3.2.1 阻力面构建

运用 ArcGIS 10.6 对各因子阻力值进行分析计算,生成了单因子阻力面(图 4)。可以看出,阻力值高的地区多为植被覆盖低、人口密集、土地利用强度大的城镇化地区、工矿区和道路沿线地区,这些地区人类活动频

繁,生态破坏较大。运用栅格计算器进行加权计算得到综合阻力面(图 5),可以看出,中部盆地、西部工矿区以及西南部山涧沟域生态阻力较大,西北部和北部次之,且呈现阻力值由盆地中心向外辐射降低的特点。根据俞孔坚(1998)对阻力面的类型界定^[39],瑞金市生态阻力面是较为典型的高原型阻力面,具有典型的山地特点。

表 3 瑞金市重要生态源地
Table 3 Important ecological sources in Ruijin City

源地编号 Ecological source number	源地名称 Ecological source name	特征类型 Categories	源地面积/km ² Ecological source area
1			8.10
2			8.67
3	拔英林场	重要林地	6.05
4			4.18
5			5.88
6	武阳水土涵养区	重要生境	6.76
7	绵江林场	重要林地	8.63
8	沙洲水库	大型水库	5.52
9	沙陇水库	大型水库	2.99
10	日东林场	重要林地	14.29
11	九堡水土涵养区	重要生境	5.79
12	赣江源国家森林公园	国家森林公园	4.01
13	柏村林场	重要林场	3.13
14	龙山水库水源地	大型水库	2.87
15	环溪水库水源地	大型水库	0.88
16	日东水库与罗汉岩景区	重点景区	18.85
17	铜钵山	重要林地	7.81
18	瑞林水土涵养区	重要生境	2.47
19	元培林场	重要林地	3.34
20	丁陂水土涵养区	重要生境	3.00

3.2.2 廊道和节点构建

本文通过成本距离计算得到研究区最小累积耗费阻力面,再运用成本路径分析生成潜在生态廊道,依据廊道重复的次数以及源地重要程度区分一般廊道和重要廊道;选取最大阻力等值线与生态廊道的交点为重要生态节点、其他等值线与生态廊道的交点为一般生态节点,构建有梯度层次的生态节点体系。最终得到潜在廊道 119 条,其中,一般廊道 41 条,重要廊道 78 条;生成生态节点 72 个,其中重要节点 19 个,一般节点 53 个。

从图 5 可以看到,瑞金市生态廊道的整体空间连接程度较好,且闭合度较高。其中,重要生态廊道和重要生态节点主要分布于南部的拔英-泽潭生态林场、东部的日东国家水库水源地和西部的九堡-绵江林场等区域。这些区域内生态廊道多而密集,较好地连接了各个重要生态源地;生态节点稀疏却区位重要,能高效控制景观过程,强化空间联系。而中部盆地与山涧沟域等生态阻力值较大的区域,生态廊道单一细长且易发生生态断裂,廊道的生态沟通功能较弱,如连接中部沙洲水库、北部丁陂水土涵养区的生态廊道普通节点密集,建设投入要求较大。

3.3 生态安全格局分析

基于生态敏感性评价与 MCR 生态阻力分析,综合源地、潜在廊道、生态节点,可知瑞金市生态安全格局总体较好,表现为:(1)“源地-廊道-节点”生态网络完整但仍有不足。源地多而均匀,廊道密集且闭合度高,重要节点战略性强,但部分廊道悬挂且断裂风险大(图 5)。(2)生态安全水平总体较高但局部问题突出(图 6),

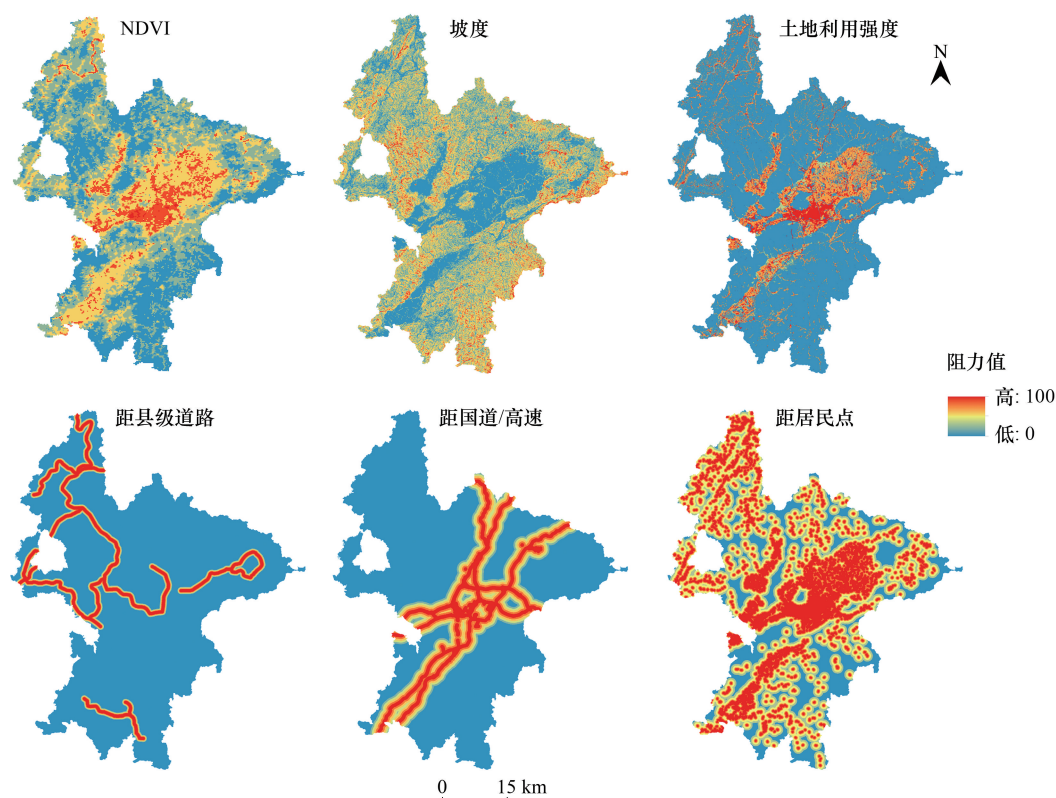


图4 单因子阻力面

Fig.4 Resistance surface of each factor

具体体现在:

高度生态安全区和较高生态安全区总面积为 1767.17km^2 , 占总国土面积的 72.36% , 且空间分布均匀, 说明瑞金市生态安全水平总体较高。其中, 高度生态安全区主要是山林生态保护区、大型水库水源地、重要河流缓冲区, 如南部集中连片的拔英林场, 东部大面积的日东林场和赣江源国家森林公园, 东北部龙山-日东大型水库, 北部九堡水土涵养山林地, 西北部瑞林-丁陂梅江河缓冲区等, 环绕中部盆地均匀分布于瑞金市周边。几乎所有的生态源地和大部分的重要生态廊道都分布于高度生态安全区, 形成了空间分布均匀、网络闭合度较高的生态结构体系。较高生态安全区主要是山地向盆地、沟域过渡的低丘缓坡地带, 是人类活动空间向自然空间转换的边缘区域, 表现为自然景观与人文景观交错演替, 如退耕还林。这部分区域由于海拔较低、坡度较缓、生境质量较好, 既为生态空间保护提供缓冲, 又为丘陵山区社会经济发展提供后备空间资源。

中等生态安全区有 438.76km^2 , 占总国土面积的 17.97% , 主要为沟域经济延伸带, 分布于山涧沟域和中部盆地边缘, 自西南向东北延伸, 也有小部分区域分布在北部山涧洼地。由于地势相对平坦、水土肥沃, 山涧沟域与洼地有较丰富的耕地、园地资源, 同时零星农村居民点分布于此, 经营种植烟叶、莲子、脐橙等山区特色经济作物。中等生态安全区由于受人类活动干扰程度不深, 生态安全维持在中等稳定水平。

较低生态安全区与低度生态安全区总面积为 236.13km^2 , 占总国土面积的 9.67% , 主要为中部盆地城镇发展核心区、农业人口密集区和西部多个工矿挖采区。城镇发展区由于城镇建设、工业发展、水体污染等原因, 生态阻力大、物种连通性低, 俨然已成为生态孤岛; 城区周边城乡结合部农业人口密集, 由于规模集约农业和密集分布的农村居民点对土地高强度的开发利用, 自然景观破碎、生态系统退化; 西部工矿挖采点零星分布, 却是对生态系统的严重掠夺, 引起大面积的土地塌陷、粉尘污染, 造成严重的生态损害。较低生态安全区与低度生态安全区内生态廊道较少, 但却密集分布着各类生态节点, 尤其是中部连接沙洲坝水库的生态廊道, 需要

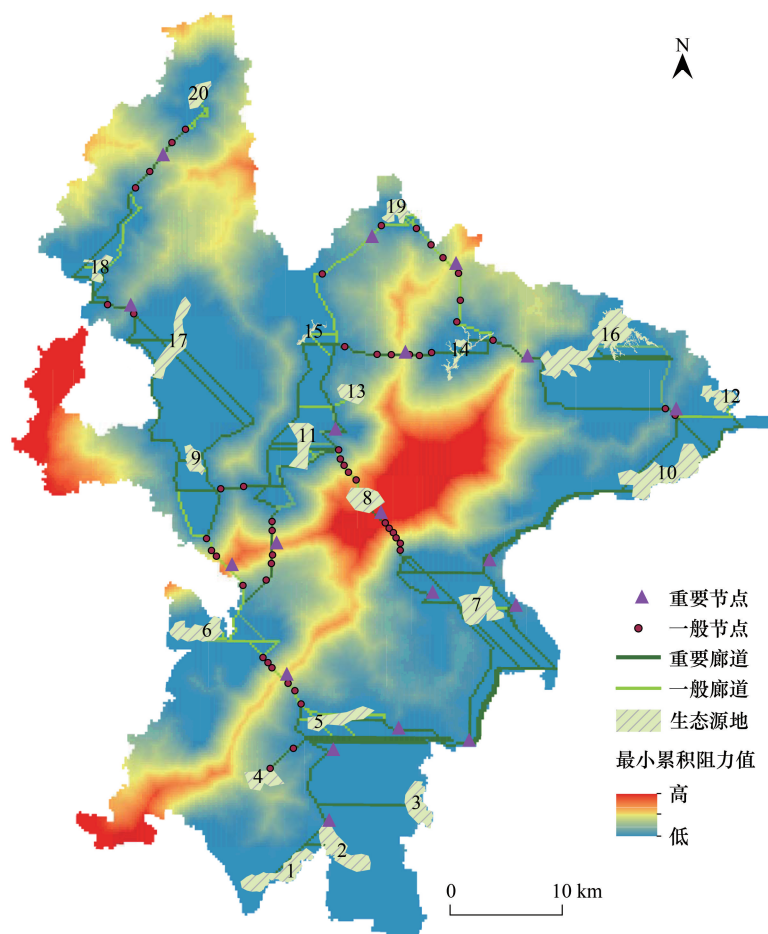


图5 瑞金市生态安全格局与综合阻力面

Fig.5 Ecological security pattern and total resistance surface in Ruijin City

修复的生态断裂点较多。

3.4 生态保护修复与空间优化

(1) 统筹优化生态保护与经济发展空间运行

基于瑞金市生态安全格局,划定生态修复核心区、生态监测预警区、生态保护缓冲区和生态保护重点区(图7),优化融合“三生”空间,协调生态保护与经济发展。其中,生态修复核心区主要针对低度生态安全区和部分较低生态安全区,尤其是中部盆地城市发展区和西部工矿开采区。结合城市开发边界线,控制城市空间无序扩张;严格矿产开采审批,限制矿区空间规模。生态监测预警区涵盖中等生态安全区和部分较低生态安全区,结合基本农田和耕地保护红线,限制经济开发强度,监测保护农田生态空间。生态保护缓冲区主要涵盖较高生态安全区,保护低丘缓坡地带,防止人类活动对自然空间的侵占,预留后备空间资源。生态保护重点区为高度生态安全区,应涵盖所有重要山林地、水库水源地、风景名胜地等生态源地,结合生态红线,勘界定标,守住生态保护底线空间。

(2) 分区推进生态保护修复工程

基于瑞金市生态空间保护修复分区,明确不同区域生态修复重点任务,分类推进生态工程实施(图7)。对生态修复核心区的城市区域,应重点实施公园绿地建设、污染水体治理和城乡结合部破碎景观修复;对工矿开采区则需因地制宜制定科学合理的生态重建方案,宜林则林、宜草则草,积极推进土地平整、景观修复。对生态监测预警区,重点推进农田整治、水利建设和土壤污染修复治理,测土配方提升农地质量,动态监测、预警

农田保护。对生态保护缓冲区,进一步实施退耕还林工程,严格管控脐橙种植毁林垦荒现象;同时加大低丘缓坡的边坡治理,防控水土流失,保护后备国土空间资源。对生态保护重点区,宜继续封山育林,禁止一切开发,严格保护生态源地。

(3) 建设完善源地-廊道-节点生态网络

基于已建立的生态安全格局,对瑞金市生态源地、生态廊道和生态节点进行系统保护建设。现存生态安全格局中,中部城镇发展核心区形成典型的生态孤岛,廊道稀疏却节点密集。应结合瑞金市东西向、南北向双“十”字铁路、公路和县级道路网络,增宽路旁绿化,建设形成以防护性、生产性绿地为主的绿色生态走廊;积极构建绵江河生态水体廊道、梅江河生态水体廊道,尤其是中部盆地城镇发展区,修建天桥、隧道适当增加城区生态廊道,连片成网,消除孤岛。在节点处加强生态保护,严格限制生态节点处的开发建设,修建人工绿林,修复生态环境脆弱的节点,提高节点质量。从生态系统原真性与完整性、生态功能连通性、空间布局合理性、保护管理有效性等多个角度统筹整合现有保护地,确保赣江源国家森林公园、罗汉岩景区、绵江河与梅江河水系、日东等大型水库、以及铜钵山等各大山体之间的有效沟通,增强山水林田湖草协同关系,重塑生态景观网络化格局。

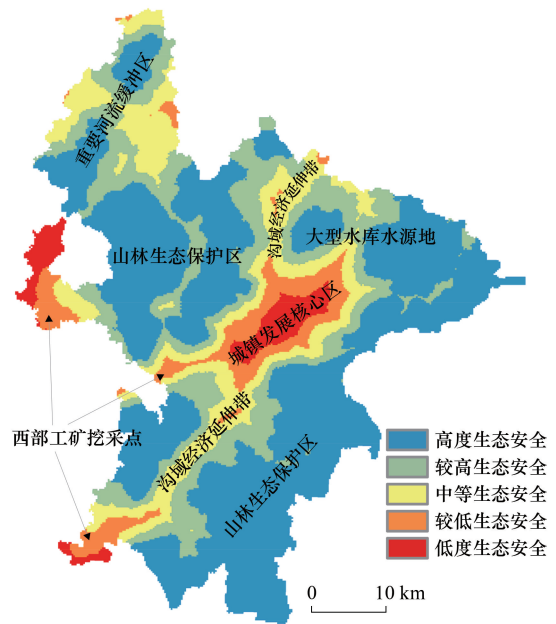


图6 瑞金市生态安全区划及其社会生态属性

Fig.6 Ecological security regionalization and social-ecological attribute of Ruijin City

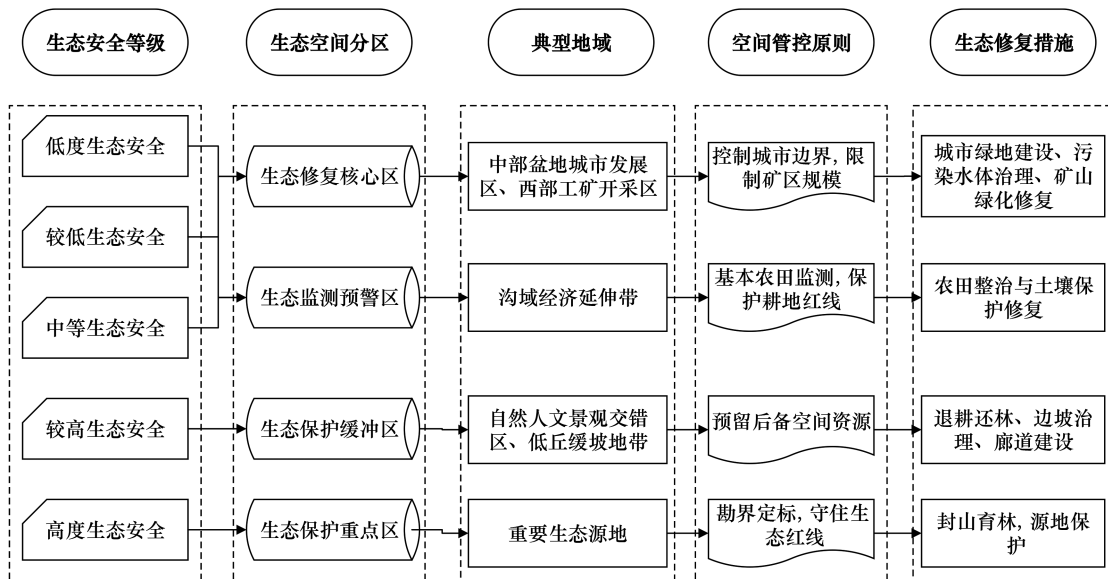


图7 瑞金市生态保护修复与空间优化方案

Fig.7 The plan for ecological protection & restoration and spatial optimization in Ruijin City

4 结论与讨论

4.1 结论

本文以南方丘陵山区瑞金市为例,综合生态敏感性评价与最小阻力模型,识别生态源地,梳理潜在廊道和

生态节点,厘清瑞金市生态安全格局及其空间组分,划分生态预警与保护修复核心区、重点区,提出生态保护修复与空间优化方案。得出以下结论:

(1)“源地-廊道-节点”生态网络完整但仍有不足。瑞金市生态源地有 123.22km², 占总国土面积 5%, 主要为重要山林地和水域,环绕中部盆地呈卫星状分布;潜在廊道 119 条,生态节点 72 个,在周边山地呈闭合网络状,但中部盆地廊道单一、节点密集,网络连通性较低。

(2)生态安全水平总体较高但局部问题突出。瑞金市高度生态安全区和较高生态安全区占总国土面积 72.36%,涵盖了大部分山林生态保护区、大型水库水源地、重要河流缓冲区,且空间分布较为均匀合理。中等生态安全区占 17.97%,主要为沟域经济延伸带,分布于山涧沟域和中部盆地边缘,自西南向东北延伸。较低生态安全区与低度生态安全区占 9.67%,主要为中部盆地城镇发展核心区、农业人口密集区和西部多个工矿挖采区,生态阻力高、源地辐射弱,应生态预警与重点修复。

(3)生态保护修复与空间优化应宏观统筹、分区推进、精细落实。基于瑞金市生态安全格局,融合生态安全等级、对接经济活动空间,划分生态修复核心区、生态监测预警区、生态保护缓冲区和生态保护重点区,明确各区域空间管控原则,分区推进生态保护,围绕“源地-廊道-节点”精细落实生态修复。生态修复核心区重点开展城市绿地建设、污染水体治理、矿山绿化修复;生态监测预警区主要对沟域经济生态系统监测预警,开展农田整治和土壤修复;生态保护缓冲区进一步实施退耕还林,管控脐橙种植毁林垦荒,保护低丘缓坡后备空间资源;生态保护重点区落实勘界定标、封山育林,强化生态源地保护。

4.2 讨论

本文构建的生态敏感性评价与最小阻力模型简单易操作,能够快速有效地解构丘陵山区生态安全格局及其空间要素组分。基于生态阻力分级的生态安全区划充分反映了丘陵山区自然生态和社会经济特点,避免了单纯的“源地-廊道-节点”教条式分析。本文在部门走访、专家咨询和野外调研基础上提出了具有针对性的生态保护修复与空间优化方案,对协调丘陵山区人地矛盾、缓解发展与保护冲突具有一定现实意义和实践价值,也能为其他类似区域的生态保护修复提供参考借鉴。

然而,生态安全格局优化及其后期生态效应验证是一个系统性问题,涉及长时间尺度的生态过程,且影响生态安全的生态过程发生包括水平方向和竖直方向。目前,本文缺乏对竖直方向和时间尺度的生态格局、过程分析,未来将围绕山区地域生态安全垂直定级评价和空间优化生态效应评价进行竖直方向和时间动态的深入研究。

参考文献(References):

- [1] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, Turner I B L, Mortimore M, Batterbury S P J, Downing T E, Dowlatabadi H, Fernández R J, Herrick J E, Huber-Sannwald E, Jiang H, Leemans R, Lynam T, Maestre F T, Ayarza M, Walker B. Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 2007, 316(5826): 847-851.
- [2] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 林乃峰, 徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. *生态学报*, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [3] 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. *中国科学院院刊*, 2016, 31(1): 1-12.
- [4] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 刘焱序. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 627-635.
- [5] 白中科, 周伟, 王金满, 赵中秋, 曹银贵, 周妍. 再论矿区生态系统恢复重建. *中国土地科学*, 2018, 32(11): 1-9.
- [6] 付凤杰, 刘珍环, 刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例. *生态学报*, 2021, 41(9): 3406-3414.
- [7] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 1-17.
- [8] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 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.
- [9] 和娟, 师学义, 付扬军. 基于生态系统服务的汾河源头区域生态安全格局优化. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 814-825.
- [10] 赵文祯, 韩增林, 闫晓露, 钟敬秋. 基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建——以大连市瓦房店为例. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 546-562.
- [11] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. *生态学报*, 2000, 20(1): 9-12.
- [12] 刘海龙, 王炜桥, 王跃飞, 丁娅楠, 田庆春. 汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征. *生态学报*, 2021, 41(10): 3952-3964.

- [13] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [14] Wang C X, Yu C Y, Chen T Q, Feng Z, Hu Y C, Wu K N. Can the establishment of ecological security patterns improve ecological protection? An example of Nanchang, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140051.
- [15] Kang J M, Zhang X, Zhu X W, Zhang B L. Ecological security pattern: a new idea for balancing regional development and ecological protection. A case study of the Jiaodong Peninsula, China. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26: e01472.
- [16] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. *地理学报*, 2018, 73(4): 701-710.
- [17] 黄隆杨, 刘胜华, 方莹, 邹磊. 基于“质量—风险—需求”框架的武汉市生态安全格局构建. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 615-626.
- [18] 张璨, 方世明. 山水资源型城镇的生态安全格局构建研究——以武汉市黄陂区为例. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(8): 1835-1845.
- [19] Li S C, Zhao Y L, Xiao W, Yue W Z, Wu T. Optimizing ecological security pattern in the coal resource-based city: a case study in Shuozhou City, China. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108026.
- [20] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [21] 李涛, 巩雅博, 戈健宅, 齐增湘, 谢水波. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建——以湖南省衡阳市为例. *应用生态学报*, 2021, 37(2): 2555-2564.
- [22] 吴健生, 马洪坤, 彭建. 基于“功能节点—关键廊道”的城市生态安全格局构建——以深圳市为例. *地理科学进展*, 2018, 37(12): 1663-1671.
- [23] 俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型. *地理学报*, 1998, 53(S1): 11-20.
- [24] 谢慧玮, 周年兴, 关键. 江苏省自然遗产地生态网络的构建与优化. *生态学报*, 2014, 34(22): 6692-6700.
- [25] 林伊琳, 赵俊三, 陈国平, 张萌. 基于 MCR-FLUS-Markov 模型的滇中城市群国土空间格局优化. *农业机械学报*, 2021, 4: 1-18. (2021-02-26). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=NYJX20210224001&uniplatform=NZKPT&v=HkstRf7%25mmd2BPSA2NtAHaAKuMBuDtQNbUdhWBH%25mmd2FYWimSXzEihJRhKMa4ZlcL4GmsTL9B>.
- [26] 张亮, 岳文泽, 陈阳. 基于斑块复合属性特征的城市生态安全格局构建——以杭州市为例. *生态学报*, 2021, 41(11): 4632-4640.
- [27] 高阳, 刘悦忻, 钱建利, 郭游, 胡迎山. 基于多源数据综合观测的生态安全格局构建——以江西省万年县为例. *资源科学*, 2020, 42(10): 2010-2021.
- [28] 鄢广奎, 赵兵. 丘陵区生态安全格局构建分析——以广安市小井乡为例. *四川环境*, 2019, 38(4): 105-112.
- [29] 李恒凯, 刘玉婷, 李芹, 王秀丽. 基于 MCR 模型的南方稀土矿区生态安全格局分析. *地理科学*, 2020, 40(6): 989-998.
- [30] 杨亮洁, 王晶, 魏伟, 杨永春, 郭泽呈. 干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化——以石羊河流域为例. *生态学报*, 2020, 40(17): 5915-5927.
- [31] 袁轶男, 金云峰, 聂晓嘉, 凌瑞, 吴沙沙, 兰思仁. 基于生态安全格局的城市森林生态网络优化. *中国城市林业*, 2020, 18(6): 78-83.
- [32] 李文俊. 基于绿色基础设施识别的南溪湿地生态旅游区游憩空间网络构建[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [33] 韩宗伟, 焦胜, 胡亮, 杨宇民, 蔡青, 黎贝, 周敏. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2244-2256.
- [34] 谢花林, 姚干, 何亚芬, 张道贝. 基于 GIS 的关键性生态空间辨识——以鄱阳湖生态经济区为例. *生态学报*, 2018, 38(16): 5926-5937.
- [35] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 王鑫, 张瑜, 张蕾. 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. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1190-1200.
- [36] 白中科, 周伟, 王金满, 赵中秋, 曹银贵, 周妍. 试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理. *中国土地科学*, 2019, 33(2): 1-11.
- [37] 林圣玉, 莫明浩, 王凌云. 赣州市山水林田湖草生态保护修复问题识别和技术探析. *中国水土保持*, 2021, (1): 28-31.
- [38] 王浩, 马星, 杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(5): 1705-1715.
- [39] 国务院西部地区开发领导小组办公室, 国家环境保护总局. 生态功能区划技术暂行规程. [2002-07-30]. <https://www.doc88.com/p-5520128592.html?r=1>.
- [40] 彭建, 贾靖雷, 胡熠娜, 田璐, 李慧蕾. 基于地表湿润指数的农牧交错带地区生态安全格局构建——以内蒙古自治区杭锦旗为例. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1990-1998.
- [41] 江西省人民政府. 江西省生态保护红线正式发布. [2018-07-06]. http://www.jiangxi.gov.cn/art/2018/7/6/art_393_136449.html.
- [42] 洪步庭, 任平. 基于最小累积阻力模型的农村居民点用地生态适宜性评价——以都江堰市为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(6): 1386-1396.
- [43] 李晖, 易娜, 姚文璟, 王思琪, 李志英, 杨树华. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. *生态学报*, 2011, 31(20): 5928-5936.
- [44] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [45] Yu K J. Ecological security patterns in landscapes and GIS application. *Geographic Information Sciences*, 1995, 1(2): 88-102.
- [46] 俞孔坚, 乔青, 李迪华, 袁弘, 王思思. 基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1932-1939.
- [47] 张继平, 乔青, 刘春兰, 王海华, 裴厦. 基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究. *生态学报*, 2017, 37(19): 6313-6321.
- [48] 何珍珍. 基于景观格局的塔里木盆地北缘绿洲生态安全研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.