

DOI: 10.5846/stxb202112303711

彭洁, 蔡海生, 张学玲, 张婷, 吕大伟. 基于主导生态功能的抚河流域国土空间生态安全格局分析. 生态学报, 2022, 42(18): 7430-7444.

Peng J, Cai H S, Zhang X L, Zhang T, Lü D W. Spatial pattern analysis of ecological security in Fuhe River Basin based on dominant ecological function. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7430-7444.

基于主导生态功能的抚河流域国土空间生态安全格局分析

彭洁, 蔡海生*, 张学玲, 张婷, 吕大伟

江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室/江西农业大学富硒农业产业发展研究中心, 南昌 330045

摘要: 从主导生态功能的角度分析探讨生态安全格局, 是明晰流域内生态安全、保护生物多样性的重要途径。以抚河流域为研究对象, 采用多源空间数据, 根据研究区自然条件和生态状况, 基于主导生态功能定量评估水源涵养、水土保持、生物多样性 3 个生态系统服务功能, 结合粒度反推法和热点分析选取生态源地, 综合自然条件和人类活动影响因素构建阻力面, 运用电路理论构建生态廊道, 识别生态修复关键区域, 提出生态安全格局优化对策。研究表明: (1) 抚河流域内有 25 块生态源地, 主要为林草地, 共 5574.63 km², 60 条生态廊道, 共 1126.91 km; (2) 基于生态安全格局识别生态修复关键区域, 包括生态夹点 26 处、总长度为 182.99 km, 生态障碍点 19 处、总面积为 167.09 km², 生态断裂点 146 处, 破碎生态空间 3283.79 km²; (3) 结合生态安全格局和生态修复关键区域, 构建“三轴六区”生态安全空间布局优化体系。研究对维护抚河流域的生态安全、实行国土空间生态系统修复具有指导意义。

关键词: 生态安全格局; 主导生态功能; 生态修复关键区域; 抚河流域

Spatial pattern analysis of ecological security in Fuhe River Basin based on dominant ecological function

PENG Jie, CAI Haisheng*, ZHANG Xueling, ZHANG Ting, LÜ Dawei

Ecology Key Laboratory of Poyang Lake watershed in Jiangxi Province/Development Research Center of Selenium-rich Agricultural Industry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract: Analyzing and exploring ecological security patterns from the perspective of dominant ecological functions is an important way to clarify the ecological security and protect biodiversity in the watershed. Taking the Fuhe River Basin as the research object, according to the natural conditions and ecological status of the study area, this paper used multi-source spatial data to quantitatively evaluate ecosystem services including water connotation, soil conservation and biodiversity based on the dominant ecological functions. This paper selected the ecological sources by combining Granularity Inverse Method and hot spot analysis to construct the resistance surfaces by integrating natural conditions and factors influenced by human activities, and to construct the ecological corridors by applying circuit theory. On these bases, this paper identified key areas of ecological restoration and proposed measures to optimize ecological security patterns. The results showed that there were 25 ecological sources covering area of 5574.63 km², mainly forest and grassland, with 60 corridors totaling 1126.91 km between them. The key ecological restoration areas were identified based on ecological security pattern, including 26 ecological pinch points totaling 182.99 km, 19 ecological barrier points totaling 167.09 km², 146 ecological

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660140); 江西省十三五社科规划项目(17YJ11); 江西省高校人文社科规划项目(GL17113); 江西省土地开发整理中心项目(9131207800)

收稿日期: 2021-12-30; 采用日期: 2022-05-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caihsh@263.net

break points, and fragment ecological land totaling 3283.79 km². Combining the ecological security pattern and key areas of ecological restoration, the “three axes and six zones” ecological security spatial layout optimization system was constructed. It would help to provide scientific guidance for maintaining the ecological security of the Fuhe River Basin and implementing the restoration of the national spatial ecosystem.

Key Words: ecological security pattern; dominant ecological functions; key areas of ecological restoration; Fuhe River Basin

随着社会经济的持续发展,生态环境不断恶化,生态安全问题已经引起了社会各界的广泛关注和各级政府的高度重视。党的十九大报告中强调了生态安全格局的重要地位,它是国家安全体系的重要基石,对于保障国家生态安全、筑牢国家生态安全屏障具有重要作用^[1]。生态安全格局的研究对于保护生态系统结构,维持生态系统功能,保障生态安全具有重要意义^[2]。生态安全格局的构建其核心在于体现生态优先的理念,主导功能是指事物作为全局主体应起到支配地位、主导作用的核心功能^[3]。抚河流域作为鄱阳湖五大流域之一,是重要的小流域生态系统,因此针对抚河流域开展生态系统服务功能重要性评价是体现生态优先理念、突出主导生态功能的重要途径。

在景观生态学中,对于景观格局的构建主要基于“斑块-廊道-基质”^[4]这一理论模式。俞孔坚是国内提出生态安全格局的第一人^[5],他创建的“识别源地-构建阻力面-提取廊道”框架,成为了国内外学者构建生态安全格局的研究范式。对于源地识别,现有研究大多基于研究区域内的自然保护区、面积较大且集中连片的生态用地等^[6-8],大多只考虑某类生态功能重要性,无法全面客观进行评价,没有从主导生态功能的角度去进行综合考虑。对于阻力面构建,现有研究大多只考虑土地利用类型的差异对生态安全格局造成的阻力影响^[9-10],而忽略了同一地类中内部差异的影响。而从廊道提取来看,应用最广泛的是最小累积阻力模型(MCR)^[11-12],利用成本距离分析工具,针对构建的阻力面提取出连接生态源地的生态廊道,但是该方法无法直接识别廊道中的关键节点^[13]。目前,在生态安全格局的研究中,对于生态夹点、生态障碍点及生态断裂点等生态修复关键区域的研究还比较缺乏。

抚河是鄱阳湖水系五大支流之一,流域内有大量的湿地、森林资源和丰富的生物资源,在提供多重生态功能和维系区域生态安全方面意义重大。然而,随着城镇化进程的快速推进,流域内城镇建设用地不断扩张,人口激增,大量自然资源被无序开发,导致流域内的生态格局发生改变,并引发了一系列生态环境问题。本文选择抚河流域为研究区,从主导生态功能的角度出发,按照“确定生态源地—构建阻力面—提取廊道”的研究框架,将生态系统服务功能评价、粒度分析法和热点分析法相结合识别源地,基于 Linkage Mapper 构建生态安全格局并对此进行生态修复关键区域识别,最终确定研究区生态安全空间布局优化体系,对维护抚河流域的生态安全、实现国土空间生态修复具有重要意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

抚河流域位于江西省东部,地处 115°36′—117°10′E, 26°30′—28°50′N,流域面积 20534km²,占鄱阳湖流域总面积的 13.09%,是鄱阳湖流域中重要的组成部分(图 1)。流域地势南高北低,面向鄱阳湖倾斜,主河贯穿流域南北,由赣、闽边界武夷山西麓广昌县流出,上游段为盱江,主要包括南丰、广昌等地区,中游段为南城至廖家湾,下游段为抚州市以下河段^[14]。两岸山丘多为红砂岩,林木稀少,泥沙下倾,水土流失较为严重。研究区域属亚热带湿润季风气候,气候温和、雨量充沛。流域内河网密集,湖泊水库较多,因流域内经济高速发展,生物多样性保护和土地开发利用冲突较为严重。

1.2 数据来源

研究数据来源如表 1 所示。

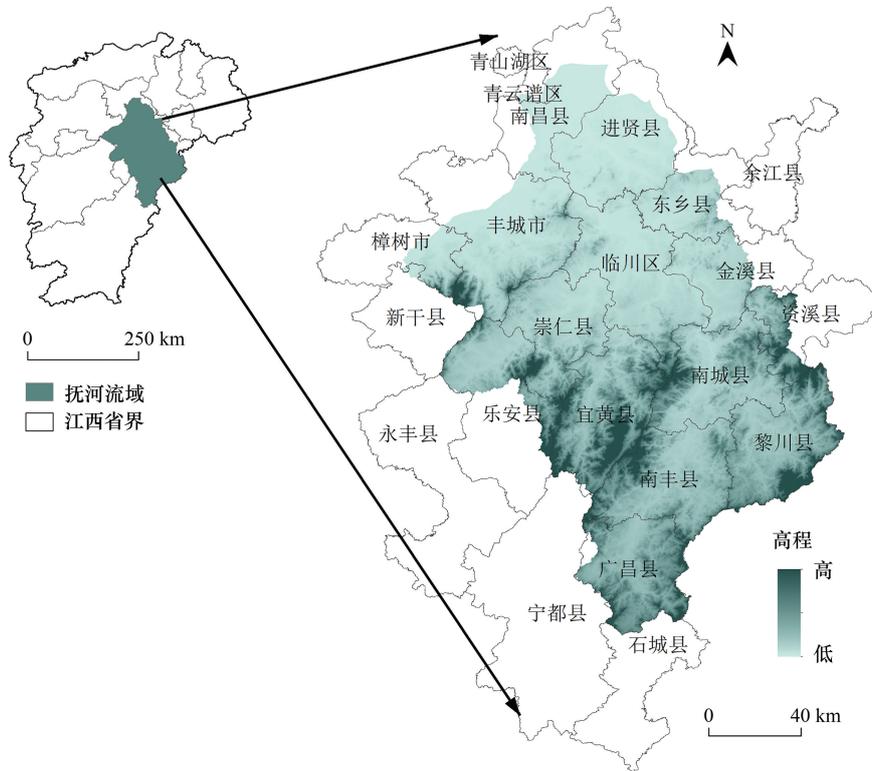


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

表1 数据来源

Table 1 Data source

数据类型 Data type	数据获取时间 Time of data acquisition	数据来源 Data sources
数字高程模型 Data elevation model	2020 年	地理数据空间云平台 (http://www.gscloud.cn)
植被净初级生产力 Net primary productivity	2020 年	MOD17A3 产品 (https://modis.gsfc.nasa.gov/), 数据重采样成 30m 分辨率
土壤类型 Soil type	2020 年	资源环境数据云平台 (http://www.resdc.cn/)
土地利用类型 Land use type	2020 年	全球地理信息公共产品 GlobeLand30 (http://www.globallandcover.com/)
河流数据 River system data	2020 年	地理国情监测云平台 (http://www.dsac.cn/)
交通数据 Traffic data	2020 年	Open Street Map 数据平台
气象数据 Climate data	2020 年	中国气象科学数据共享服务网 (http://data.cma.cn/)
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	2020 年	由 Landsat 5/TM、Landsat 8/OLI 2020 年遥感影像数据 (30m 分辨率), 在 ENVI 平台上通过数据预处理后计算得出
植被覆盖度 Fractional vegetation cover	2020 年	

2 研究方法

2.1 确定生态源地

生态源地是指提供重要生态系统服务的斑块,针对区域典型生态系统,定量评估生态系统服务的供给能力,识别生态系统服务供给的重要区域,可以作为源地选取的有效方法^[15-16]。针对研究区生态状况,本文选取水源涵养、水土保持以及生物多样性进行定量评价,其中借助 InVEST 模型中生境质量模块和生境风险模

块计算抚河流域的生境质量和生境风险系数,将生境风险系数修正生境质量得到的综合生境质量^[17]作为评估对象生物多样性的表征^[18],其中,综合生境质量=初始生境质量×(1-标准化生境风险);其次,将水源涵养、水土保持、生物多样性3个评价结果加权,得到生态系统服务重要性,评价结果依据自然断点法分为极重要、重要、较重要、一般重要和不重要^[19];根据粒度反推法^[20]确定景观连通性最好的粒度水平,将该粒度下的生态斑块与生态系统服务极重要和重要斑块相交得到初级生态源地;最后采用热点分析法^[21]提取生态源地。

(1) 生态系统服务功能

① 水源涵养

水源涵养功能指生态系统在涵养水源的过程中参与流域水循环、调节水文过程并产生生态效益的能力,对维持生态系统平衡至关重要。本文通过水量平衡方程来评价水源涵养功能,水量平衡法是计算降水量与蒸散发量及其他消耗水量的差值^[22],计算公式为:

$$T = \sum_{i=1}^n (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \quad (1)$$

$$R_i = \bar{P} \times \alpha_i \quad (2)$$

式中: T 为研究区水源涵养总量(t); P_i 为研究区不同生态系统类型年总降水量(mm); R_i 为研究区年不同生态系统类型地表径流量(mm); ET_i 为研究区不同生态系统类型蒸散发量(mm); A_i 为第*i*类生态系统类型面积(km^2); i 为研究区第*i*类生态系统类型; n 为研究区域生态系统类型总数; \bar{P} 为研究区多年平均降水量(mm); α_i 为不同生态系统类型平均地表径流系数^[23-25]。

② 水土保持

水土流失是一个由降雨作为主要侵蚀动力的自然过程,以降水直接冲走表层土壤为主要表现形式。水土保持是避免水土流失的措施,水土保持功能评价是针对水土流失过程中土壤保持能力的评价。水土保持评价模型根据修正土壤流失模型 RUSLE 估算潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量,两者作差后得到土壤保持量。

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times LS - R \times K \times LS \times C \times P = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中: A_c 为土壤保持量($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); A_p 为潜在土壤侵蚀量; A_r 为实际土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子($\text{t hm}^2 \text{h hm}^{-2} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); L, S 为地形因子; C 为地表植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子^[19,26-27]。

③ 生物多样性

a. 生境质量模型

生境质量表明栖息地能够为物种提供生存资源和环境的潜力以及繁育的潜力,与生物多样性存在一定的正相关性,因此在一定程度上能够表征生物多样性的^[2]。本文利用 InVEST 模型中的生境质量模块(HQ)计算生境质量。根据 InVEST 模型指南、相关文献以及抚河流域自然条件^[28-29],选取洼地、风景名胜及林地、河流湖泊、草地、滩涂为生态用地,其他用地为非生态用地,将农田、城镇、村庄、工矿及水工建筑用地作为生境胁迫因子。

b. 生境风险评价模型

生境风险被定义为人类活动减少近岸栖息地的质量从而使其生态系统服务受损的可能性。InVEST 模型中生境风险评价模块(HRA)能帮助评价人类活动给生态系统健康带来的威胁^[30]。本文生境和胁迫因子的选择与生境质量模型相同,并且按照 InVEST 模型的指南设置参数。

(2) 粒度反推法

粒度反推法是根据反证法思想,先基于景观格局现状生成多种不同粒度的景观组分结构,再利用测定指标反映景观组分结构随粒度变化的特征,通过连通性分析确定最优生态景观组分结构和景观组分数后,从景观整体效应的角度为分析生态源地的选取提供参考^[20,31]。本文选择林地、草地、水域作为生态用地,生成 50m、100m、200m、400m、600m、800m、1000m、1200m 不同粒度的栅格图,选取景观格局指数中 NP、PD、LSI、PLADJ、COHESION、DIVISION、AI、CONNECT 八大指标^[23]来表征景观的连通性和整体性并利用 Fragstats 软件

来计算,通过分析选取最优粒度大小,将该粒度下的生态斑块与得到的生态系统服务极重要和重要斑块相交,得到初级生态用地。

(3) 热点分析法

通过生态系统服务和粒度反推法选取的初级生态源地的斑块较分散,规模较小、不连片且零星分布,热点分析法基于 Getis-Ord-Gi* 统计法^[32],对生态系统服务重要值的高低在空间上的聚类情况进行分析,破碎且不集中连片的斑块随着距离阈值的增加而不断被剔除,距离相近且相连的斑块聚集,形成规模较大的斑块^[33-34],高值聚类区域则是最终生态源地。

2.2 阻力面和廊道构建

本文选取 8 个评价因子作为综合生态阻力面指标体系,并进行 10—100 内的阻力赋值,数值越大代表阻力越大,同时运用层次分析法^[19]对评价因子的权重进行赋值,将各个评价因子加权后得到综合阻力面。各评价因子的阻力值设置主要参考现有研究,如表 2 所示。

基于综合生态阻力面,运用 Linkage Mapper 插件中的 Linkage Pathway Tool 模块,根据综合生态阻力面和生态源地绘制源间生态廊道。

表 2 综合生态阻力面权重因子赋值

Table 2 Comprehensive ecological resistance surface weighting factor assignment

评价因子 Evaluation factors	阻力值赋值 Resistance value assignment					权重 Weights	参考源 Reference sources
	10	20	40	80	100		
土地利用类型 Land use type	林地、水域、沼泽地	草地、其他用地	耕地	未利用地	建设用地	0.3533	张美丽等 ^[20]
高程 Elevation/m	<100	100—300	300—600	600—1200	>1200	0.0636	黄木易等 ^[35]
坡度 Slope/(°)	<2°	2°—6°	6°—15°	15°—25°	>25°	0.0939	王雪然等 ^[36]
土壤类型 Soil type	红壤、黄壤、黄棕壤	紫色土、水稻土、潮土	山地草	新积土	粗骨土	0.1365	吕大伟等 ^[37]
植被覆盖度 Fractional vegetation cover	<0.1	0.1—0.3	0.3—0.6	0.6—0.8	>0.8	0.2590	张晓琳等 ^[38]
距水体距离 Distance to waters/m	<1000	1000—4000	4000—8000	8000—16000	>16000	0.0430	罗文霞等 ^[39]
距道路距离 Distance to roads/m	>8000	4000—8000	2000—4000	1000—2000	<1000	0.0211	马才学等 ^[40]
距采矿用地距离 Distance to mines/m	>10000	5000—10000	2000—5000	1000—2000	<1000	0.0296	李久林等 ^[41]

2.3 识别关键节点

(1) 生态夹点识别

生态夹点是由 McRae 等^[42]基于电路理论提出的概念,是指区域生态安全格局中体现景观连通性的重要节点。将生物流比作电流,生物经过此处的概率相当于电流流经此处的密度,密度越大则将的区域去除或破坏后对生态系统稳定性造成的影响越大,则该区域就称为生态夹点。本研究利用 Linkage Mapper 插件中的 Pinchpoint Mapper^[43]工具对生态夹点进行识别,其中电流密度高值区则为夹点区,该区域对防止生态源地退化具有重要作用,因此对其应该重点保护,是生态修复的关键区域之一^[44]。

(2) 生态障碍点

生态障碍点是指生物在生境斑块中运动时的受阻区域,通过计算清除障碍点后电流恢复值的大小来识别^[45],去除或修复该区域可以增加整体的景观连通性。本研究利用 Linkage Mapper 插件中的 Barrier Mapper^[46]工具对生态障碍点进行识别,并与土地利用类型相结合,分析障碍点的土地利用状况,从而提出相应的保护修复措施。

3 结果与分析

3.1 综合提取生态源地

经计算得到生态系统服务重要性(图 2)。利用 Fragstats 计算不同粒度水平下的景观格局指数(表 3)。经主成分分析(见表 4、表 5),成分 1 和成分 2 的特征值大于 1,且累计贡献率为 96.061%,因此提取前两个成分,其次主成分 1 中表征整体性的指数成分载荷较高,主成分 2 中表征连通性的指数成分载荷较高,因此将主成分 1 选为整体性指标,主成分 2 选为连通性指标。基于成分矩阵中的数据,经计算得不同粒度下综合整体连通性得分(图 3),随着粒度的增加,景观结构综合得分呈下降趋势,在粒度为 400m 时开始转为负值,此时得分的绝对值最小,表明 400m 粒度下的景观整体连通性最为稳定,因此选择 400m 粒度为最优粒度大小。将 400m 粒度的景观格局与生态服务系统重要性进行相交,对结果进行冷热点分析,选取热点区域为最终生态源地,生态源地与抚河流域生态保护红线重叠率达 71.11%,如图 4 所示,选取生态源地的科学性和准确性得到了验证。抚河流域生态源地共 25 块,共 5574.63km²,占研究区面积的 27.14%,主要集中在抚河流域南部地区,贯穿流域南北的抚河将生态源地一分为二,西部地区是维护生物多样性功能的重要区域。生态源地包括草地、耕地、林地、水域用地和未利用地,其中林地、草地、水域用地占抚河流域生态用地面积的 36.87%,而林地在生态源地内面积占比最大,达到了 91.58%。

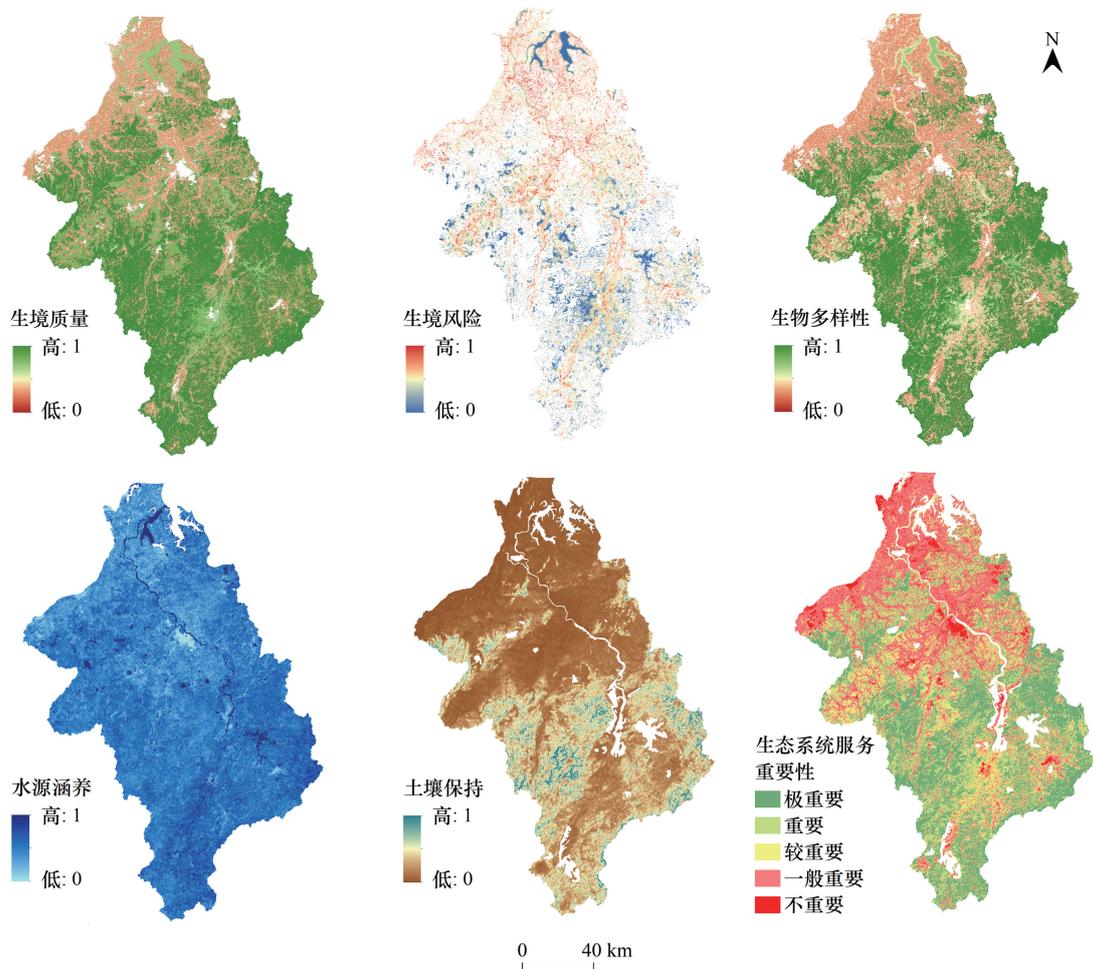


图 2 生态系统服务重要性评价过程及分级结果

Fig.2 Evaluation process and classification results of the importance of ecosystem services

表 3 不同粒度下的景观格局指数

Table 3 Landscape pattern index under different granularities

粒度 Granularity/m	NP	PD/ (n/100ha)	LSI	PLADJ/%	COHESION/%	DIVISION	AI/%	CONNECT
50	103584.00	2.45	130.72	93.66	99.93	0.65	93.70	0.06
100	38347.00	0.91	81.92	92.08	99.88	0.65	92.15	0.07
200	11560.00	0.27	47.98	90.76	99.80	0.53	90.89	0.10
400	3357.00	0.08	27.54	89.46	99.64	0.52	89.72	0.15
600	1545.00	0.04	19.64	88.83	99.54	0.49	89.20	0.14
800	878.00	0.02	15.36	88.42	99.36	0.49	88.91	0.00
1000	555.00	0.01	12.51	88.32	99.32	0.47	88.93	0.00
1200	379.00	0.01	10.71	88.05	99.42	0.41	88.78	0.00

NP: 斑块数 Number of Patches; PD: 斑块密度 Patch Density; LSI: 景观形状指数 Landscape Shape Index; PLADJ: 邻接比率 Proportion of Like Adjacency; COHESION: 斑块结合度指数 Patch Cohesion Index; DIVISION: 景观分维度指数 Landscape Division Index; AI: 聚合度指数 Aggregation Index; CONNECT: 连通性指数 Connectance Index

表 4 方差贡献率

Table 4 Variance contribution rate

成分 Elements	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extraction sums of squared loadings		
	总计 Total	方差百分比 Variance percentage/%	累积 百分比 Accumulation/%	总计 Total	方差百分比 Variance percentage/%	累积百分比 Accumulation/%
1	6.521	81.518	81.518	6.521	81.518	81.518
2	1.163	14.543	96.061	1.163	14.543	96.061
3	0.213	2.661	98.722			
4	0.098	1.231	99.953			
5	0.003	0.044	99.997			
6	0.000	0.003	99.999			
7	0.000	0.001	100.000			
8	0.000	0.000	100.000			

表 5 成分矩阵

Table 5 Component matrix

景观格局指数 Landscape pattern index	成分 Elements		景观格局指数 Landscape pattern index	成分 Elements	
	A1	A2		A1	A2
NP	0.941	-0.255	COHESION	0.919	0.318
PD	0.941	-0.255	DIVISION	0.940	0.079
LSI	0.994	-0.101	AI	0.996	-0.027
PLADJ	0.995	0.029	CONNECT	0.221	0.956

3.2 构建区域生态安全格局

3.2.1 构建生态阻力面

基于之前表 3 构建的指标体系得到单因子阻力面以及综合阻力面(图 5)。结果表明:抚河流域高阻力区域主要分布于抚河流域北部,是人类活动的主要区域,主要受到城镇建设用地、交通用地的阻碍作用,阻力值越大,表明生物流穿过该斑块所消耗的成本越高。最终构建的综合阻力面为后续生态廊道的构建搭建了框架。

3.2.2 构建生态廊道

生态廊道是联系生态源地之间的纽带,为物种的迁徙提供场所,具有维护生物多样性、保障生物流安全等生态服务的功能,是景观格局中重要的线状景观要素。基于生态源地和综合阻力面,借助 Linkage Mapper 识别生态廊道,构建抚河流域生态安全格局(图 6)。研究区中识别出 60 条生态廊道,共 1126.91km。廊道在临川区分布最多,区内总长度为 423.88km,占比 37.61%,在资溪县最少,只有 0.18km,占比 0.02%。河流湖泊是

重要的天然生态廊道,所有生态廊道中有 23 条廊道经过抚河流域内河流湖泊,其中有 11 条廊道经过抚河,4 条廊道经过崇仁河,4 条廊道经过盱江,2 条廊道经过黎滩河,2 条廊道经过洪源湖。

3.3 生态修复关键区域识别及其修复对策

3.3.1 生态夹点区域识别与修复对策

基于生态安全格局识别生态夹点。抚河流域生态廊道的电流密度由蓝到深红逐渐加强,深红色区域为夹点区域,对景观生态具有重要作用。将电流密度与综合阻力面进行叠加,用自然断点法分为 4 级,最高一级则为生态夹点,如图 7 所示。识别出生态夹点区域共 26 处,总长度为 182.99km,其中最长为 11.93km,位于临川区北部地区,最短为 0.021km,位于黎川县东部地区。在所有生态夹点中,共有 3 处位于河流廊道,7 处位于水库。河流廊道作为天然的生物通道,在整个生态安全格局中具有重要地位,但由于受到如用地侵占、填河造田、污染排放等人类活动的影响,河流廊道不断减少,且河流健康状况也每况愈下。因此针对河流廊道中的生态夹点区域,重点实施控排治污项目,提高水的流动性,建立河流保护区,加强对河流违法排污的监督及清淤工作。水库作为许多生物的栖息场所,相当于一个小型的水下生态系统,因此构建健康的水生态系统显得至关重要,提高水的自净能力,建立健全水库管护机制,做到源头控输入,周围重生态,库内抓管理。另有部分生态夹点位于林地和草地,此类区域应注重加强绿色种养,人工修复退化草地,提高植被覆盖度、物种丰度,对退化林地进行工程修复,加强林地保护,建立自然保护区等。

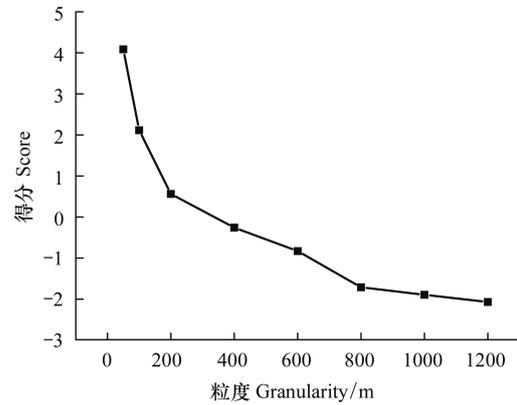


图 3 不同粒度下整体连通性得分

Fig.3 Overall connectivity score under different granularities

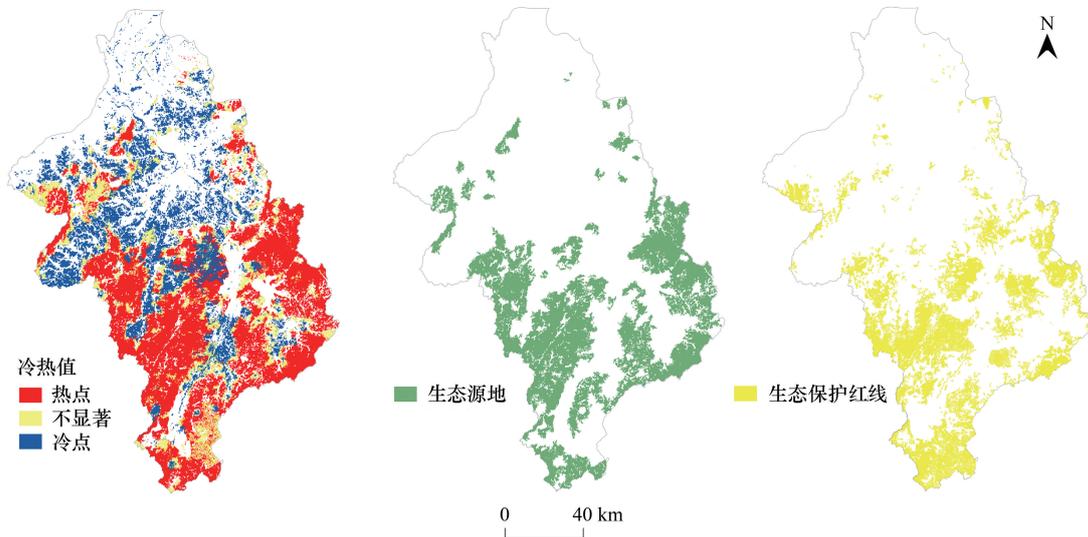


图 4 抚河流域生态源地识别情况及与生态保护红线对比

Fig.4 Identification of ecological sources in Fuhe River Basin and comparison with ecological protection red line

3.3.2 生态障碍点识别与修复对策

研究识别出抚河流域生态障碍点的电流密度,同样将结果与综合阻力面进行叠加并分级,选取最高一级为生态障碍点,如图 8 所示。抚河流域生态障碍点区域共 19 处,总面积为 167.09km²,其中面积最大的 2 个县分别为:临川区 47.81km²,占比 28.62%,东乡县 37.60km²,占比 22.50%。而南丰县面积最小,只有 0.78km²,

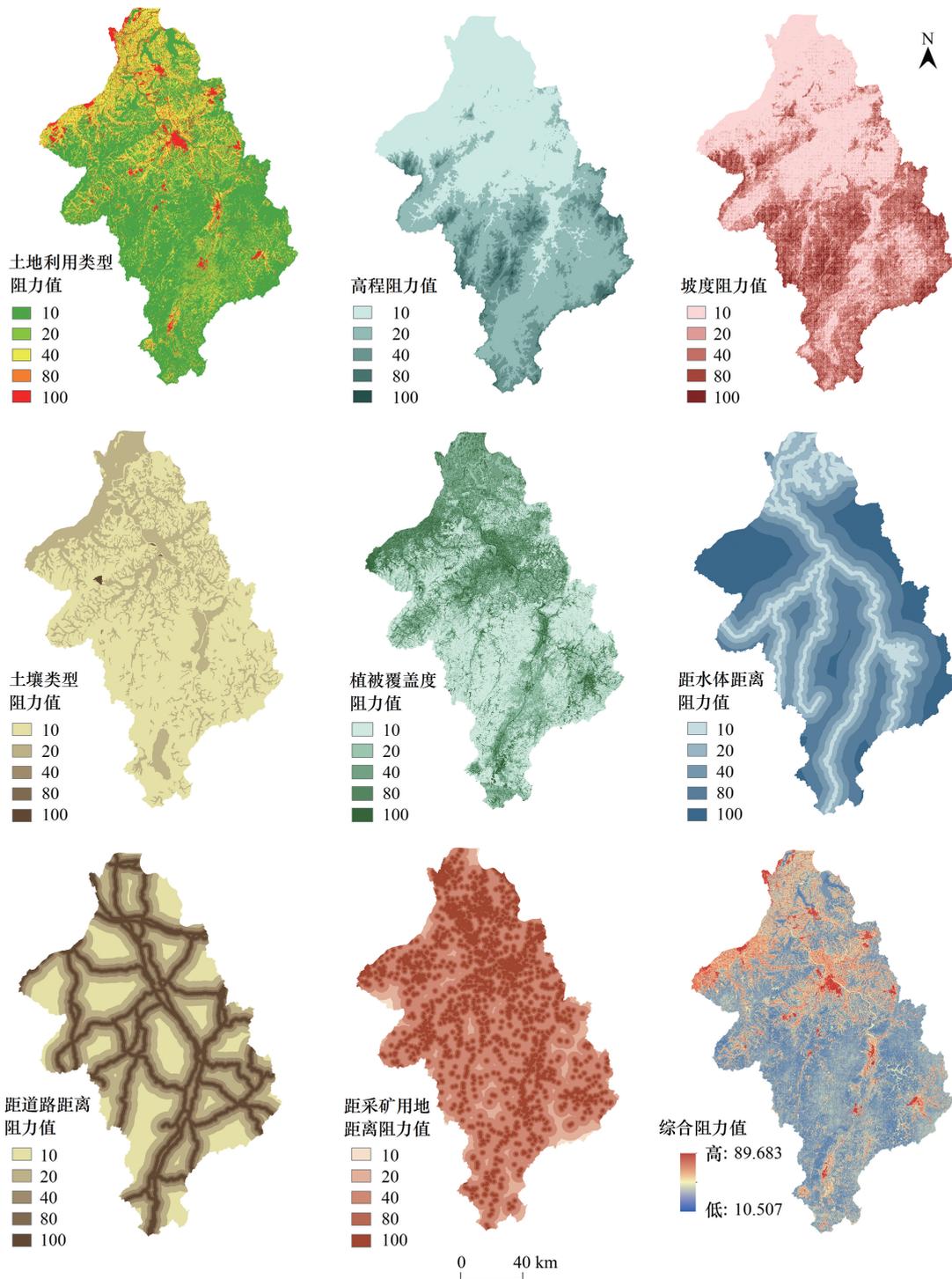


图5 抚河流域单因子阻力面及综合阻力面

Fig.5 Single-factor resistance surface and comprehensive resistance surface in Fuhe River Basin

占总面积的 0.47%。从土地利用类型来看,抚河流域生态障碍点区域均为非生态用地,主要为城镇村、工矿用地、耕地和未利用地。因此对生态障碍点的修复可以采取人工造林的方式,提高森林覆盖率,在保证耕地红线的基础上进行适量退耕还林,加强生态修复,对废弃矿山进行矿山生态修复,同时减少农业面源污染,控制污染物排放,并根据各县市发展情况,适当进行绿地建设。

3.3.3 生态断裂点识别与修复对策

本研究中主要将大型交通道路(高速公路、国道、省道)与生态廊道的交汇处作为生态断裂点区域。纵横交错的交通道路对生物流动过程会产生阻碍作用,并且会使景观的破碎化程度加剧,对生物流动安全造成一定的威胁。抚河流域生态断裂点区域共 146 处(图 9),其中生态廊道与高速公路相交 62 处,与国道相交 33 处,与省道相交 51 处。由于高速、国道和省道属于不可拆卸的交通设施,故可以在生态断裂点处开展相关修复措施,如搭建天桥,建立桥下涵洞等人工生态廊道,保证野生动物流动通畅,建立廊道监测机制,及时排除廊道干扰因素等。

3.3.4 破碎生态空间识别与修复对策

在生态系统服务重要性的冷热点分析中,冷点区域代表生态系统服务重要性较低,而且斑块聚集程度较为破碎,因此将其定为关键修复区域之一。抚河流域中破碎生态空间面积共 3283.79km²,集中分布于临川区、崇仁县、宜黄县、丰城市、乐安县、南丰县、进贤县的林地、耕地以及水域中(图 10)。生态空间破碎化主要由建设用地无序扩张、地质灾害频发、道路截断等因素引起,由于斑块较为破碎,难以开展集中统一的修复工程,因此应因地制宜对生态用地进行重组,例如针对斑块较大区域可以开展地形修复等工程,在景观连通性上进行相应提升,对于其他较为分散的斑块,可以结合当地的规划采取异地造林等生态修复工程,逐步恢复景观的整体性,详见表 6。

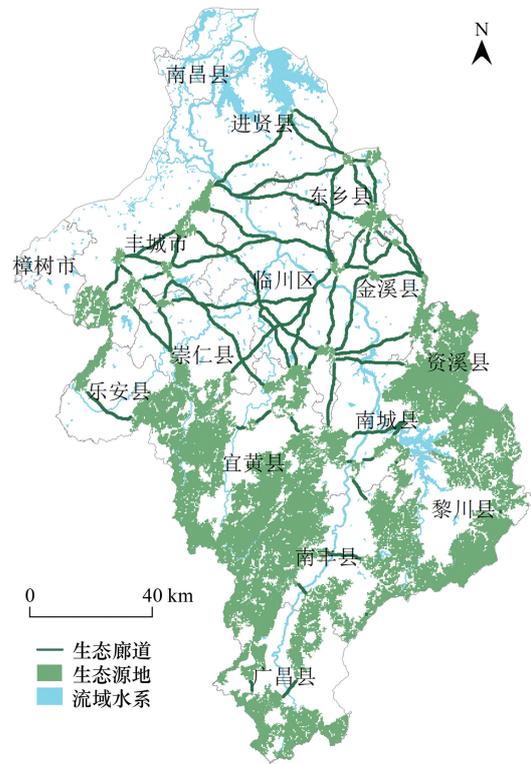


图 6 抚河流域生态安全格局空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecological security pattern in Fuhu River Basin

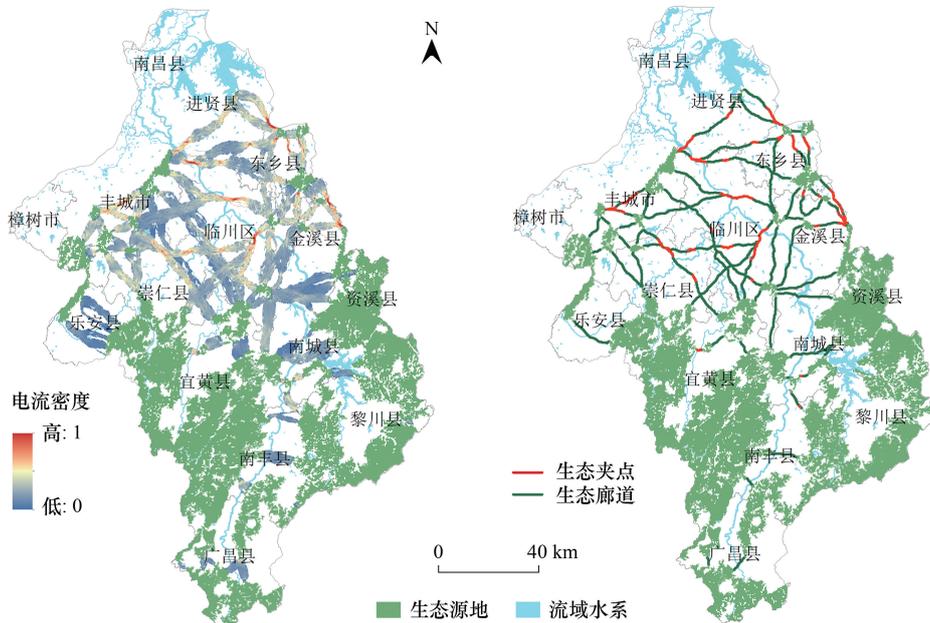


图 7 抚河流域生态夹点及其生态电流密度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecological pinchpoints and ecological current density in Fuhu River Basin

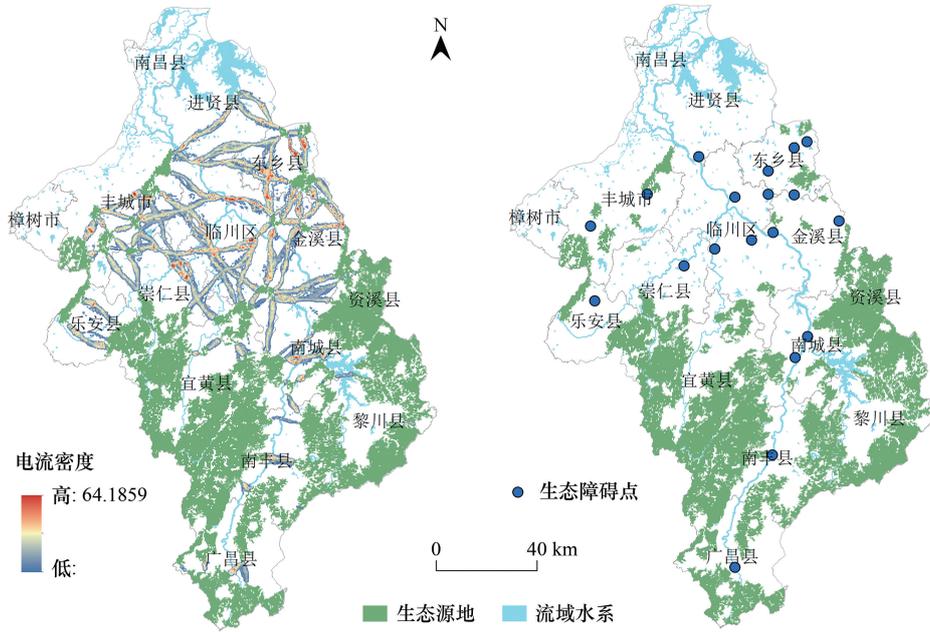


图 8 抚河流域生态障碍点及其生态电流密度空间分布

Fig.8 Spatial distribution of ecological barrierpoints and ecological current density in Fuhe River Basin



图 9 抚河流域生态断裂点空间分布

Fig.9 Spatial distribution of ecological breakpoints in Fuhe River Basin

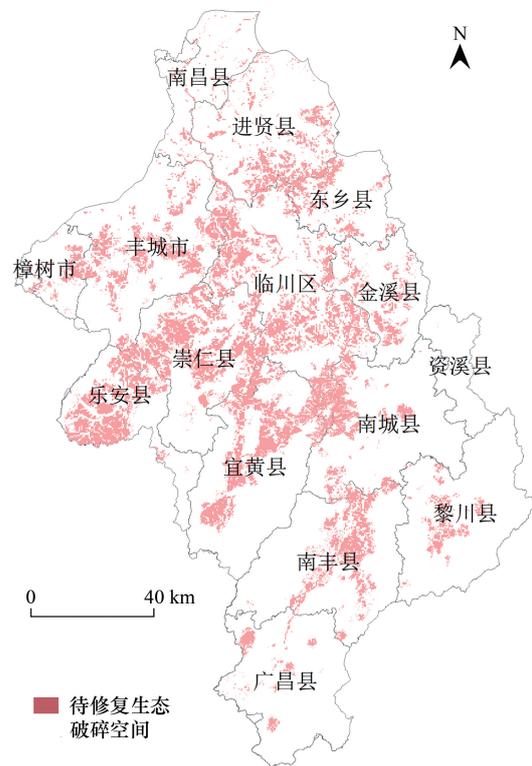


图 10 抚河流域生态破碎空间分布

Fig.10 Spatial distribution of ecological fragmentation in Fuhe River Basin

表 6 抚河流域生态保护待修复关键区域

Table 6 Key areas to be restored for ecological protection in Fuhe River Basin

待修复区域 Area to be repaired	土地利用现状 Land use status	具体分布 Specific location	建议修复方向 Suggested repair direction		
生态夹点区域 Ecological pinch points area	河流	临川区	大岗镇与李渡镇交界处抚河河段,另有一处在该处稍上方与抚河河段相交,以及温泉镇与上顿渡镇交界处崇仁河部分河段	治理污染河流,提高水的流动性,建立河流保护区,加强对河流违法排污的监督以及清淤工作;构建健康的水生态系统,提高水的自净能力;建立健全水库管护机制,做到源头控输入,周围重生态,库内抓管理;加强绿色种养,人工修复退化草地;提高植被覆盖度、物种丰度,对退化林地进行工程修复,加强林地保护,建立自然保护区	
		宜黄县	凤岗镇南部崇宜水部分河段		
	水库	临川区	大岗镇与李渡镇交界焦石坝水库		
		进贤县	衙前乡与邓家乡交界处秧塘水库及前庄水库		
		崇仁县	孙坊镇石路水库、河上镇王司水库,六家桥乡与许坊乡交界处树下水库		
		南丰县	洽湾镇保安山水库		
		林地、草地	进贤县		文港镇、池溪乡、衙前乡、李渡镇
			临川区		大岗镇、云山镇、展坪乡、罗湖镇、东馆镇
			丰城市		杜市镇、落市镇、秀市镇
			东乡县		邓家乡、詹圩镇、孝岗镇
		崇仁县	孙坊镇、河上镇、郭圩乡		
		南城县	新丰街镇		
生态障碍点区域 Ecological barrier points area	城镇村及工矿用地、耕地、未利用地	马圩镇东南部、罗湖镇西部、黎圩镇西南部、秋溪镇西北部、浒湾镇西南部、天井源乡北部、株良镇东部	采取人工造林的方式,提高森林覆盖率;在保证耕地红线的基础上进行适量退耕还林,加强生态修复;对废弃矿山进行矿山生态修复;减少农业面源污染,控制污染物排放;根据各县市发展情况,适当进行绿地建设		
	耕地、未利用地	秀古镇、巴山镇东北部、			
	耕地、城镇村及工矿用地	李渡镇东南部、孝岗镇中部、杜市镇、太阳镇中部、河湖乡中部、崇岗镇与钟岭街道交界处、山碛镇中部			
生态断裂点 Ecological break points	高速公路	62 处廊道-高速公路交叉点	搭建天桥,建立桥下涵洞等人工野生动物生态廊道;建立廊道监测机制		
	国道	33 处廊道-国道交叉点			
	省道	51 处廊道-省道交叉点			
破碎生态空间 Fragment ecological land	林地、耕地、水域	临川区、崇仁县、宜黄县、丰城市、乐安县、南丰县、进贤县	开展异地绿化、地形修复等生态修复工程		

3.4 生态安全空间布局优化体系建设

根据郭荣朝等^[47]提出的空间“廊道组团网络化”模式构建,以及潘竟虎等^[48]在黄河流域甘肃段的研究,结合抚河流域生态环境实际情况,依据空间相互作用、协调并进以及保障整体连通性原则,以基于主导生态功能识别出的生态源地,利用综合阻力面构建的生态廊道以及识别出的生态修复关键区域等核心要素为基础,将其进行优化重组,构建以抚河为主轴的“三轴六区”生态安全空间布局优化体系(图 11)。

“三轴”主要指结合研究区生态状况、廊道分布进行划分得到的关键生态廊道,包括黎山-仙桂峰-沁湖生态廊道、长垄水库-清芝峰-芙蓉山-清凉山生态廊道以及以抚河为主的清丰山溪-金山岭-芙蓉山-抚河源生态廊道,依据生态安全的差异,关键生态廊道将研究区划分为不同生态功能区。

“六区”包括下游西岸生态治理区、下游东岸水土保持生态修复区、中游西岸生态修复区、中游东岸生态保护修复区、上游西岸生态保育区、上游东岸生态保育区。其中,下游西岸生态治理区内除了清丰山河北侧

外,大部分被破碎生态空间覆盖,存有少量生态源地,并且含有部分生态夹点、障碍点和断裂点,由于生态夹点区域对生态系统稳定性的维护有重要作用,并且生态断裂点会阻碍生物流动过程,对生物流动安全造成一定的威胁,因此该区需要重点保护生态夹点区域并对生态断裂点和障碍点实行相应生态修复治理工程。下游东岸水土保持生态修复区的水土保持功能较低,水土流失较严重,基本无生态源地,斑块破碎化也较严重,且生态断裂点占该区比重较大,因此针对该区需进行相关水土流失治理和生态修复工程。中游西岸生态保护修复区内含有大量破碎生态空间,生态廊道占全区最多,但同时生态断裂点也相应较多,说明该区道路廊道对生态环境的阻隔影响较大,加剧了生态空间破碎化,因此该区应针对断裂点进行相应廊道疏通生态修复工程,并且对于生态廊道和生态源地进行相应生态保护工程。中游东岸生态修复区内含有一定数量的生态断裂点,破碎生态空间较少,因此该区针对断裂点和破碎斑块应进行相应生态修复工程。上游西岸生态保育区和上游东岸生态保育区分布有抚河流域主要生态源地,生态系统服务重要性高,并且源地斑块集中连片,故该区应阻止人类活动对生态环境的侵扰,尽量禁止对生态环境有害的开发活动,避免对栖息地环境造成恶劣影响。

4 结论与讨论

本文以抚河流域为研究对象,从主导生态功能的视角出发,按照“确定生态源地-构建阻力面-提取廊道-识别关键节点”的研究框架,构建生态安全格局并进行生态修复关键区域识别,最终确定研究区生态安全空间战略优化布局。结论如下:

(1) 抚河流域生态源地 25 块,共 5574.63km²,林地、草地、水域用地占抚河流域生态用地面积的 36.87%,而林地在生态源地面积占比最大,达到了 91.58%;生态廊道 60 条,共 1126.91km,廊道在临川区分布最多,区内总长度为 423.88km,占比 37.61%。

(2) 研究识别出抚河流域生态修复关键区域包括:生态夹点共 26 处,总长度为 182.99km,其中 3 处位于河流廊道,7 处位于水库;生态障碍点 19 处,总面积为 167.09km²,均为非生态用地,主要为城镇村、工矿用地、耕地和未利用地;生态断裂点共 146 处,生态廊道与高速公路相交 62 处,与国道相交 33 处,与省道相交 51 处;破碎生态空间共 3283.79km²,其中临川区、崇仁县分布最广。

(3) 结合生态安全格局和生态修复关键区域,将其进行优化重组,构建以抚河为主轴的“三轴六区”生态安全空间布局优化体系。“三轴”包括黎山-仙桂峰-沁湖生态廊道、长垄水库-清芝峰-芙蓉山-清凉山生态廊道以及以抚河为主的清丰山溪-金山岭-芙蓉山-抚河源生态廊道。“六区”包括下游西岸生态治理区、下游东岸水土保持生态修复区、中游西岸生态修复区、中游东岸生态保护修复区、上游西岸生态保育区、上游东岸生态保育区。

本文基于生态安全格局理论,融入了主导生态功能的概念,突出了生态优先的理念,并结合粒度反推法和热点分析法对源地进行识别,全面考虑了生态系统的整体性和连通性,使结果更具科学性;阻力面结合了自然

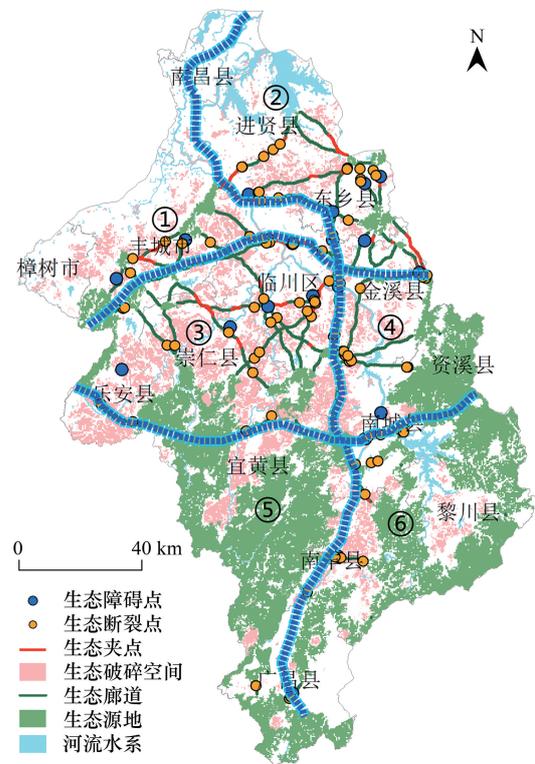


图 11 抚河流域生态安全空间优化总体方案

Fig.11 The overall plan for the optimization of the ecological safety space in the Fuhe River Basin

图 11 中①—⑥分别表示下游西岸生态治理区、下游东岸水土保持生态修复区、中游西岸生态修复区、中游东岸生态保护修复区、上游西岸生态保育区、上游东岸生态保育区

和人为因素的综合影响,并结合电路理论,使廊道结果更加客观;在运用 Linkage Mapper 识别生态修复关键区域的基础上形成生态安全空间布局优化体系,对维护抚河流域的生态安全、实行生态系统修复具有指导意义。最后提出本文需要进一步深入研究的问题:首先,用生境风险系数修正生境质量得到综合生境质量还有待进一步深入验证;其次,识别出的生态修复关键区域在修复之后连通性是否提升还有待进一步研究;此外,按照生态安全空间优化布局进行修复势必会改变抚河流域的土地利用结构,因此明晰由土地利用结构的改变导致生态系统稳定性的变化也是未来研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 王文萱,李明孝. 基于 DPSIR 的湖南省土地生态安全时空变化. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2724-2736.
- [2] 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.
- [3] 蔡海生,陈艺,查东平,曾珩,邵晖,洪士林. 基于主导功能的国土空间生态修复分区的原理与方法. 农业工程学报, 2020, 36(15): 261-270.
- [4] 傅伯杰,陈利顶,马克明,王仰麟. 景观生态学原理及应用(第二版). 北京:科学出版社, 2011: 56-68.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 袁少雄,宫清华,陈军,王均,黄光庆,刘峰. 广东省自然保护区生态网络评价及其生态修复建议. 热带地理, 2021, 41(2): 431-440.
- [8] Cen X T, Wu C F, Xing X S, Fang M, Garang Z, Wu Y Z. Coupling intensive land use and landscape ecological security for urban sustainability: an integrated socioeconomic data and spatial metrics analysis in Hangzhou city. *Sustainability*, 2015, 7(2): 1459-1482.
- [9] 朱捷,苏杰,尹海伟,孔繁花. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1986-2001.
- [10] 余宇晨,陈彩虹,贺丹,陆禹. 基于 MCR 模型和 Kriging 的海口市景观格局优化分析. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 233-238.
- [11] 杨天荣,匡文慧,刘卫东,刘爱琳,潘涛. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. 地理研究, 2017, 36(3): 441-452.
- [12] 王媛,周长威. 黔中城市群景观生态安全格局构建. 生态与农村环境学报, 2019, 35(9): 1111-1117.
- [13] 王云,潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3455-3467.
- [14] 朱圣男,刘卫林,万一帆,黄一鹏,吴滨,刘丽娜,杨船洋. 抚河流域干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性. 水土保持研究, 2020, 27(6): 131-138.
- [15] 彭建,李慧蕾,刘焱序,胡熠娜,杨旻. 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.
- [16] 朱陇强,郭泽呈,肖敏,秦梦瑶,颜耀文. 半干旱区县域生态安全格局构建研究——以临洮县为例. 生态学报, 2022(14): 1-13, doi: 10.5846/stxb202101220239.
- [17] 方莹,王静,黄隆福,翟天林. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203.
- [18] 李子,张艳芳. 基于 InVEST 模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析. 水土保持学报, 2021, 35(4): 178-185.
- [19] 虞昕,周轶晗,陈天依,徐可,胡业翠. 基于生态服务重要性的河池市生态安全保障研究. 能源与环保, 2021, 43(3): 39-43, 58-58.
- [20] 张美丽,李智,张益琛,郑建乐,林常威,王树涛. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以河北省阜平县为例. 水土保持研究, 2021, 28(3): 299-307.
- [21] 孙枫,章锦河,王培家,魏国恩,储光,曹禹. 城市生态安全格局构建与评价研究:以苏州市区为例. 地理研究, 2021, 40(09): 2476-2493.
- [22] 王云飞,叶爱中,乔飞,李宗省,缪驰远,狄振华,龚伟. 水源涵养内涵及估算方法综述. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1041-1071.
- [23] 姜虹,张子墨,徐子涵,丹宇卓,叶玉瑶,李家志,彭建. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建. 生态学报, 2022, 42(5): 1981-1992.
- [24] 朱琪,袁泉,于大炮,周旺明,周莉,韩艳刚,齐麟. 基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3463-3473.
- [25] 查东平,蔡海生,廖兵,刘慧丽,苗世源. 江西省水源涵养功能重要性评估技术研究. 江西科学, 2020, 38(3): 335-340.
- [26] 赵筱青,石小倩,李驭豪,李益敏,黄佩. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区. 地理学报, 2022, 77(3): 736-756.
- [27] 蔡海生,查东平,张学玲,陈艺,曾珩,邵晖,洪士林. 基于主导生态功能的江西省国土空间生态修复分区研究. 地学前缘, 2021, 28

- (4): 55-69.
- [28] Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [29] 刘汉仪, 林媚珍, 周汝波, 钟亮. 基于 InVEST 模型的粤港澳大湾区生境质量时空演变分析. *生态科学*, 2021, 40(3): 82-91.
- [30] 陈晔倩, 李杨帆, 祁新华, 陈文惠, 林金煌. 基于栖息地风险评价模型的海岸带滩涂湿地风险评价——以闽三角为例. *生态学报*, 2018, 38(12): 4214-4225.
- [31] 王朋冲. 翁牛特旗景观格局特征及优化分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [32] 陈艺, 蔡海生, 张学玲, 曾珩, 邵晖, 洪士林. 基于 MCE 的饶河流域国土空间生态质量综合评价及其空间分异. *生态学报*, 2021, 41(6): 2236-2247.
- [33] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. *地理研究*, 2017, 36(3): 429-440.
- [34] Wang S, Li W J, Li Q, Wang J F. Ecological security pattern construction in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on hotspots of multiple ecosystem services. *Sustainability*, 2022, 14(2): 699.
- [35] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 771-784.
- [36] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控——基于空间形态学-最小累积阻力模型. *生态学报*, 2022, 42(5): 1968-1980.
- [37] 吕大伟, 蔡海生, 张学玲, 罗海玲, 曾珩, 张婷. 基于遥感生态指数的弋阳县生态安全格局构建及优化. *农业现代化研究*, 2021, 42(3): 545-556.
- [38] 张晓琳, 金晓斌, 赵庆利, 任婕, 韩博, 梁鑫源, 周寅康. 基于多目标遗传算法的层级生态节点识别与优化——以常州市金坛区为例. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 174-189.
- [39] 罗文霞, 钟康正, 周晓娟, 吕晨阳, 谢跟踪, 邱彭华, 张金萍. 海口市江东新区 30 年来海岸带城市扩展与生态格局演变. *生态学报*, 2022, 42(6): 2164-2174.
- [40] 马才学, 杨蓉萱, 柯新利, 马智宇. 基于生态压力视角的长三角地区生态安全格局构建与优化. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(1): 135-147.
- [41] 李久林, 徐建刚, 储金龙. 基于 Circuit 理论的城市生态安全格局研究——以安庆市为例. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(8): 1812-1824.
- [42] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [43] Merrick M J, Koprowski J L. Circuit theory to estimate natal dispersal routes and functional landscape connectivity for an endangered small mammal. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1163-1179.
- [44] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 王炎, 周旺明, 周莉, 于大炮, 赵福强. 基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例. *生态学报*, 2020, 40(18): 6486-6494.
- [45] 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.
- [46] McRae B H, Hall S A, Beier P, Theobald D M. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits. *PLoS One*, 2012, 7(12): e52604.
- [47] 郭荣朝, 宋双华, 苗长虹. 城市群结构优化与功能升级——以中原城市群为例. *地理科学*, 2011, 31(3): 322-328.
- [48] 潘竟虎, 李磊. 利用 OWA 和电路模型优化黄河流域甘肃段生态安全格局. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 259-268.