

基于生态保护红线的生态安全格局构建与国土空间修复分区

罗莎莎¹, 赖庆标², 王旭东², 王修成², 冯琰玮^{3*}

(1. 福建省农业科学院农业经济与科技信息研究所, 福州 350003; 2. 福建省地质测绘院, 福州 350005; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 国土空间生态修复分区有助于针对生态服务、农业生产、居民生活等功能分类施策, 具有提高生境质量、保障区域生态安全、促进区域可持续发展的重要作用。该研究以福建省三明市为研究区, 采用生态保护红线划定方法全域识别生态源地, 构建生态源地扩展阻力评价体系, 采用最小累积阻力模型判别生态廊道和生态节点, 提取生态断裂点, 从而构建三明市生态安全格局。根据生态安全等级划分和“三生空间”范围界定, 进行生态修复分区, 并提出针对性生态修复和保护建议。研究结果: 1) 三明市生态源地共有 34 处, 面积 2 185.44 km², 约占三明市国土面积 9.5%, 围绕中部盆地分布于周边丘陵山地, 北部为密集区。2) 判别重要生态廊道和一般生态廊道分别为 12 和 70 条, 提取重要生态节点和一般生态节点分别为 30 和 47 个, 提取生态断裂点 66 个。三明市生态安全格局完整, 生态安全水平总体较高, 但南部地区廊道稀疏却断裂点密集, 网络连通性较低。3) 划分生态安全等级、叠加“三生空间”范围, 将三明市划分成核心重点区 (16.13%)、监测预警区 (25.04%)、缓冲过渡区 (35.53%)、保育防护区 (23.30%) 四大类 12 类生态修复小区。在此基础上, 针对不同修复分区提出生态防护建议, 以期达到南方丘陵地区维护区域生态安全、实现城市高质量发展的目标。

关键词: 生态; 保护红线; 生态安全格局; 生态修复分区; 三明市

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312019

中图分类号: X321; F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-07-0288-10

罗莎莎, 赖庆标, 王旭东, 等. 基于生态保护红线的生态安全格局构建与国土空间修复分区[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 288-297. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312019 <http://www.tcsae.org>

LUO Shasha, LAI Qingbiao, WANG Xudong, et al. Construction of ecological security pattern and land-space restoration zoning based on ecological protection red line[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(7): 288-297. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312019 <http://www.tcsae.org>

0 引言

国土空间生态修复是通过人为干预协助受损的生态系统尽可能恢复至原有结构或功能状态的过程^[1]。长期以来, 高强度人类活动和国土空间开发行为, 使生态环境不断加剧恶化, 极端气候现象、粮食安全危机等复杂的生态安全问题日益突出^[2]。联合国大会宣布《2021—2030 联合国生态系统恢复十年》决议, 呼吁保护和恢复世界各地的生态系统, 以造福人类和自然。其目的是遏制生态系统衰退, 修复受损的生态系统, 并保护那些仍然完好无损的生态系统。党的十八大以来, 党中央做出加强生态文明建设重大决策部署, “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”被列为落实党的十九大报告重要改革举措。可以看出, 生态修复逐渐受到重视, 是当前及未来政府和科研工作重点之

一。国土空间生态修复分区强调整体性与系统性, 是将“山水林田湖草沙”全要素进行整体保护、系统修复与综合治理, 统筹协调各类生态修复工程实现其有机结合的重要手段^[3]。因此, 如何科学有效地构建国土空间生态修复分区技术范式, 加强生态保护并提升生态系统服务功能, 对于丰富生态修复规划理论与实践、提高区域生态环境质量具有重要意义。

从生态安全格局构建和实现角度进行国土空间生态修复分区是当前主流技术模式^[4-7], 已形成“源地识别—阻力面评价—廊道提取—格局构建”的研究范式^[8]。针对源地识别, 部分研究直接指定某些地类或自然保护区为源地^[9-11], 也有研究通过定量评价方法, 如评价生态系统服务重要性和生态敏感性或单独评价其一^[9,12-16], 但从覆盖面来看, 生态系统服务重要性和生态敏感性评价结果仅涵盖生态保护红线范围的一部分, 生态保护红线还包括具有潜在重要生态价值区域以及自然保护区等, 鲜少有研究将生态保护红线纳入生态源地初始考虑范畴^[14], 因此, 有必要拓展生态源地的识别范围, 以奠定构建生态网络的基础。针对阻力面评价, 构建源地扩展阻力面时选取的阻力因子主要有自然和社会人为两个因素层, 但多数研究存在考虑因素不全或因素指标选取单一的情况^[13,15,17], 影响后续生态安全格局构建的科学性

收稿日期: 2023-12-04 修订日期: 2024-03-14

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (72394402); 福建省科技计划-公益类科研院所专项 (2022R1033007)

作者简介: 罗莎莎, 助理研究员。主要研究方向为农村与区域发展。

Email: luoshasha315@163.com

*通信作者: 冯琰玮, 博士后。主要研究方向为区域发展与生态环境。

Email: fengyanwei@igsnr.ac.cn

和可靠性。生态修复分区方法包括综合性评价方法（如生态系统健康评价^[3]、生态安全评价^[18]等）和构建生态安全格局^[4-5,9-10,19]。生态系统健康评价基于生态系统服务四维功能，仅依赖地貌、景观等土地利用数据，缺乏土地质量等更深层次的数据，该方法与生态安全评价均是基于评价结果分级后进行生态修复分区，相较于构建生态安全格局进行生态修复分区的方法而言，未考虑廊道、节点等关键要素对生态过程产生的影响。近年来构建生态安全格局进行生态修复分区应用广泛、研究方法较为集中，主要的分区方式有从“自然本底-主导生态功能-生态胁迫问题”“重要性-脆弱性-服务价值”等多维视角下提出生态修复分区^[20-21]，从单一的生态安全格局出发提出生态修复分区^[9,12,14-15]，或在此基础上结合控制线^[17]、与“三生空间”叠加^[10]等，将生态安全格局与国土空间分区结合，在国土空间规划的框架下细分生态修复区域，更符合当前国土空间规划“一张图”的要求。

三明市位于福建省西部，属于南方丘陵山地带的武夷山生态保护修复板块，是《全国生态功能区划》中武夷山-戴云山生物多样性保护重要区的重要组成部分，是福建省西北部的重要绿色屏障，具有十分重要的生态战略地位。同时，人类活动干扰强度和经济建设开发活动频率增加，以及未来三明市钢铁及装备制造为代表的制造业产业链将继续延伸和多元化发展，使其环境质量保持高位运行的压力较大、资源环境面临严重威胁和破坏的风险较大，亟待保护和修复生态环境，增强生态系统质量和稳定性，提升生态服务功能。而以生态保护红线为初始范围识别生态源地，对于构建科学可靠的生态安全网络尤为重要，将“三生空间”融入生态修复分区，则更具有现实意义。基于此，本研究在划定生态保护红线的基础上全域性科学识别生态源地，全面考虑阻力因子，结合生态廊道、生态节点的分级判定，提取生态断裂点，构建科学可靠的生态安全格局；统筹考虑生态安全等级与“三生空间”分区，进行国土空间生态修复分区，探讨生态保护修复策略，拟为南方丘陵地区城市国土空间规划和生态保护提供参考。

1 数据来源与研究区概况

1.1 数据来源

研究区各项数据年份为 2020 年，其中：行政区划数据来源于三明市自然资源局；土地利用类型、植被净初级生产力、气温、土壤可蚀性数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心；DEM 数据（地理空间数据云）为 SRTM 数字高程模型数据；土壤类型、土壤质地数据来源于 NASA 的 modis 数据；道路网数据来源于三明市交通运输局；降雨量、降雨侵蚀力数据来源于气象站点监测数据；蒸散量数据来源于 Aqua 卫星数据；植被覆盖度数据来源于 GF1 多光谱影像；种质资源保护区数据来源于三明市农业农村局；野生动植物保护区、生态公益林、自然保护地数据来源于三明市林业局。所有数据

的分辨率统一为 30 m×30 m，投影方式为 WGS_1984_UTM_Zone_50N。

1.2 研究区概况

三明市位于福建省西部山区（图 1），地处东经 116°22′~118°39′，北纬 25°30′~27°07′，土地总面积 2.3 万 km²。三明市属山地丘陵地带，海拔介于 54~1833 m，境内山岭耸峙，峰峦叠嶂，丘陵连绵起伏，河谷盆地与溪流错落相间，形成多山地、多丘陵、多峡谷、多盆地的丰富地貌。气候属于亚热带季风气候，人均水资源量 5 601 m³，远高于全国和福建省人均水平。《三明统计年鉴 2023》显示，截至 2022 年，年末全市常住人口 245.5 万人，常住人口城镇化率为 64.4%，地区生产总值 3 110.14 亿元，三次产业增加值占比分别为 10.9%、50.8% 和 38.3%。三明市是全国重点林区、全国集体林区改革试验区、国家森林城市和全国唯一的海峡两岸现代化林业合作实验区，是福建省粮食主产区和杂交水稻制种全国优势产区，是省级以上自然保护区分布最集中和数量最多的设区市。三明市省级以上自然保护区数量约占福建省的 1/3；矿产资源种类相对齐全，能源储量丰富。但由于城镇开发建设范围的扩张、矿山开采活动和坡耕地为主的自然地形等因素，水土流失严重，滑坡、崩塌等地质灾害频发，是福建省水土流失面积最大的设区市，国土空间保护和修复迫在眉睫。

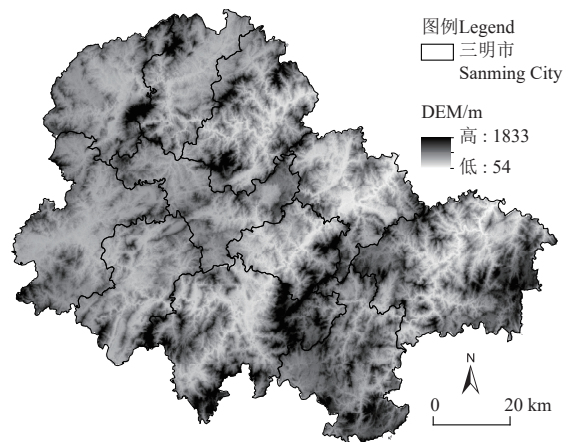


图 1 三明市 DEM 图
Fig.1 DEM of Sanming City

2 研究方法

2.1 生态源地识别

2.1.1 生态保护重要性评价

1) 生态系统服务功能重要性评价

a. 单因素评价

根据《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南（试行）》（以下简称《双评价指南（试行）》）文件和有关文献^[18]，总结出研究区主导的生态系统服务功能为水源涵养、水土保持和生物多样性维护。其中，水源涵养功能评价通过多年平均降雨量、全年平均蒸散量、地表径流量、生态系统类型面积 4 项指标按水量平

衡方程在 ArcGIS 10.2 中进行集成, 将水源涵养量排序前 50% 的区域划为极重要区, 排序后 20% 的区域划为一般重要区, 其余区域划为重要区, 并结合三明市主要河流源头区、重要饮用水水源地等边界对水源涵养极重要区进行修正。水土保持功能评价通过地形坡度和植被覆盖度 2 项指标集成, 具体方法: 将坡度 $\geq 25^\circ$ 且植被覆盖度 $\geq 80\%$ 的森林、灌丛、草地 3 个生态系统类型确定为水土保持功能极重要区; 在此范围外, 将坡度为 $15^\circ \sim 25^\circ$ 且植被覆盖度为 $60\% \sim 80\%$ 的森林、灌丛、草地 3 个类型的生态系统确定为重要区; 极重要区和重要区外的其他区域为一般重要区。生物多样性维护功能评价通过生态系统层次、物种层次、遗传层次 3 项指标集成, 生态系统层次评价通过植被净初级生产力进行评价, 将评价指数排序前 50% 的区域划为极重要区, 排序后 20% 的区域划为一般重要区, 其余区域划为重要区; 物种层次评价将野生动植物保护区直接确定为极重要区, 其余区域划为一般重要区; 遗传层次评价将种质资源保护区直接确定为极重要区, 其余区域划为一般重要区。最后, 将生态系统层次、物种层次、遗传层次的极重要区、重要区、一般重要区分类合并。

b. 生态系统服务功能重要性集成评价

生态系统服务功能重要性集成方法: 首先将水源涵养、水土保持、生物多样性维护 3 个单因素的极重要性合并为生态系统服务功能极重要区。其次, 在极重要区以外, 将 3 个单因素的重要区合并为生态系统服务功能重要区。其他区域则作为一般重要区。

2) 生态脆弱性评价

《双评价指南(试行)》中生态脆弱性包括水土流失、土地沙化、石漠化、海岸侵蚀及沙源流失等单因素评价, 结合三明市实际情况, 选取水土流失作为评价生态脆弱性的因素, 通过降水侵蚀力、土壤可蚀性、坡度、坡长和植被覆盖度 5 项指标代入通用水土流失方程计算水土流失脆弱性指数, 再根据《双评价指南(试行)》将评价结果按照 3.5~5.0, 2.0~3.5 和 0.1~2.0 划分为极脆弱, 脆弱和一般脆弱 3 个等级。

3) 生态保护重要性集成评价

根据《双评价指南(试行)》, 将生态系统服务功能极重要区和生态极脆弱区加总确定为生态保护极重要区, 其余区域全部确定为生态保护重要区。在评价的基础上, 依据地理环境、地貌特点和生态系统完整性确定的边界, 如林线、岸线、分水岭以及生态系统分布界线对生态保护极重要区和重要区进行边界修正, 得到生态保护重要性评价最终结果。

2.1.2 确定生态保护红线范围

根据《生态保护红线划定指南》, 将生态保护极重要区与国家级、省级禁止开发区域, 以及其他有必要严格保护的各类保护地进行校验, 通过边界处理、现状与规划衔接、跨区域协调、上下对接等步骤, 确定生态保护红线边界。

2.1.3 生态源地提取

首先, 采用形态学空间格局分析 (Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA) 方法^[22-23]将自然保护地设置为前景, 对数据进行二值化处理, 并将前景数据划分为 7 种景观类型; 其次, 通过对比生态保护红线范围内不同面积的斑块数量变化情况, 将面积大于 0.7 km^2 、分布相对集中的斑块作为备选生态源地; 再利用 Conefor 2.6, 将斑块连通的距离阈值设定为 2400 m ^[24], 连通概率设置为 0.5, 进行景观连接度评价。最后, 根据可能连通性指数 (probability of connectivity, PC) 确定生态源地。

2.2 生态阻力分析方法

2.2.1 阻力面构建

识别生态源地后, 需对源地扩展过程中克服的阻力进行评价。最小累积阻力 (minimal cumulative resistance, MCR) 模型表示物种在克服不同阻力景观的状态下从源地到达目的地所做的功^[25]。采用俞孔坚修正的 MCR 模型^[26], 计算式如下:

$$MCR = f_{\min} \left(\sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \cdot R_j \right)$$

式中 MCR 表示源扩展到某景观处的最小累积阻力值; f 是个未知的负函数; D_{ij} 表示生态源 i 到景观 j 的空间距离 (km); R_j 表示源 i 在扩展过程中所受阻力值。

2.2.2 生态阻力评价指标体系

在参考相关研究成果^[12,16-17,19-20,25-27]的基础上, 选取共性指标以及反映区域本底情况和人为因素的指标, 共包含 2 个因素层、13 项指标。其中, 自然因素主要包含高程、坡度、起伏度、土地利用类型、土壤有机质含量、土壤类型、土壤侵蚀、植被覆盖度、植被净初级生产力、植被类型、到水系距离共 11 项指标。高程、坡度和起伏度反映了土地自然条件对国土空间格局的影响; 土壤降水侵蚀力和土壤可蚀性越严重, 越不利于生态源地扩展; 土壤有机质含量越丰富、植被净初级生产力越大、距水系越近, 越有利于生态源地扩展。人为因素主要包含 2 项指标, 到城镇中心距离越远、到禁止开发区越近, 表示生态源地受到人类活动的干扰程度越低, 越有利于生态源地扩展。具体指标及分级标准见表 1。

2.2.3 生态廊道判别

廊道是相邻生态源地直接阻力最小的通道^[14]。不同等级的生态廊道根据生态节点位置和数量的不同, 得到相应的建设保护, 可以使廊道体系更加稳定, 生态源地之间连接更加顺畅, 有效提高整个生态网络的连通性和稳定性。首先, 通过 Arcmap10.2 将各阻力评价指标根据表 1 赋值的结果进行空间叠加, 生成景观阻力面。再运用 Arcmap10.2 的成本路径工具计算生态源地相互之间的最小成本路径以生成潜在生态廊道^[28]。然后基于重力模型, 构建源地之间的相互作用矩阵, 根据矩阵结果将相互作用力进行等级划分, 最后根据斑块联系的有效性和连接斑块的相互作用力强弱程度, 区分重要廊道和一般廊道, 由此构成生态廊道体系^[29]。

表 1 阻力面评价指标体系及分级标准与赋值
Table 1 Grading criteria and assignment of resistance surface evaluation index system

因素层 Factor layer	准则层 Criteria layer	指标层 Indicator layer	指标分级标准与赋值 The grading criteria and assignment of indicators				
			I 级 (9)	II 级 (7)	III 级 (5)	IV 级 (3)	V 级 (1)
自然因子 Natural factors	地形 Terrain	高程/m	[53, 361)	[361, 537)	[537, 727)	[727, 971)	≥971
		坡度/(°)	<2°	[2°, 6°)	[6°, 15°)	[15°, 25°)	≥25°
		地形起伏度/m	<84	[84, 131)	[131, 180)	[180, 243)	≥243
	土地 Land	土地利用类型	建设用地、未利用地	耕地	草地	林地	水体
		土壤有机质含量/%	<10	[10, 20)	[20, 30)	[30, 40)	≥40
		土壤类型	盐碱土	初育土	半水成土、人为土	半淋溶土、钙层土	铁铝土、淋溶土
		土壤侵蚀程度 (降水侵蚀力和土壤可蚀性) /%	≥80	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	<20
	生物 Biology	植被覆盖度/%	[4.16, 37.81)	[37.81, 46.52)	[46.52, 52.53)	[52.53, 57.04)	≥57.04
		植被净初级生产力 (g·m ⁻²)	<715	[715, 1 105)	[1 105, 1 418)	[1 418, 1 720)	≥1 720
		植被类型	裸地	草甸、栽培植被	草原	灌木林、乔木林	针叶林、阔叶林
	水系距离/m	≥800	[600, 800)	[400, 600)	[200, 400)	<200	
人为因子 Human	区位 Location	城镇中心距离/m	<1 000	[1 000, 1 500)	[1 500, 2 000)	[2 000, 2 500)	≥2 500
		禁止开发区距离/m	≥2 500	[2 000, 2 500)	[1 500, 2 000)	[1 000, 1 500)	<1 000

2.2.4 生态节点与生态断裂点提取

生态节点是景观格局中生态功能薄弱的环节，位于物种迁移最大耗费路径和最小成本路径的交汇处^[30]。根据廊道上的生态节点密集程度有助于判断廊道的连通性，进而决定可采取的系统保护对策；同时，重要生态节点的位置有利于重要生态工程的决策。在 ArcGIS 平台运用水文分析模块提取最小累积阻力面的脊线，即阻力高值通道，再运用网络分析模块建立拓扑关系提取脊线与重要生态廊道的交点为重要生态节点，其他生态廊道的交点为一般生态节点^[31]。

三明市路网密度大，会将景观格局切割成破碎的生境斑块，造成景观破碎化，使得连续的廊道网络产生一定空间范围的生态间隙，不利于物种的交流扩散^[32]。因此将生态廊道与交通廊道（铁路、公路）的交叉点提取为生态断裂点^[15]。

2.3 生态安全格局分区与生态修复分区

通过对源地、廊道、节点、断裂点的识别，构成三明市生态网络。根据生态阻力评价叠加得到的综合阻力值，利用自然断点法将其从低到高划分为 5 级，对应将三明市划分为 5 类生态安全分区，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。

根据黄金川等^[33]对三生功能的基本内涵，结合三明市土地利用现状分类，将三明市生产、生活和生态空间的土地利用类型范围进行界定（表 2），结合生态安全格局分区，并查阅自然资源、农业农村等有关部门资料，同时进行专家咨询，综合考虑三明市现状和未来发展趋势，判别不同生态修复类型的重点区域，最后划分生态修复分区，有利于明确各分区的空间管制强度和生态修复工程措施，制定科学性、有效性、可操作性强的生态修复策略。

表 2 “三生空间”范围界定
Table 2 Definition of the range of “production-living-ecological” space

三生空间 “Production-living-ecological” space	基本内涵 ^[33] Basic content	用地类型 Type of land use
生产空间 Production space	主要是用于生产经营活动的场所，以承载农业生产、工业和服务功能为主	农用地（不含森林和草地）、工业、物流仓储和商服用地
生活空间 Living space	与承载和保障人居有关，是以提供人类居住、消费、休闲和娱乐等为主导功能的场所	居住用地、公用设施用地、交通服务用地和商服设施用地
生态空间 Ecological space	提供生态产品和生态服务的区域，是保障生态安全、提升居民生活质量不可或缺的重要组成部分	森林、草地、河流、滩涂、水库等

3 结果分析

3.1 生态安全格局

3.1.1 生态源地

1) 生态保护重要性评价

从三明市生态保护重要性单因素评价结果（图 2）中各等级区域所占面积大小可以看出，生物多样性维护功能重要性较强，水土流失脆弱性和水源涵养功能重要性次之，水土保持功能重要性较弱。各因素极重要区空间分布符合山地丘陵地区特点，其中，水源涵养功能极重要区主要分布在闽江源、大金湖、金溪及

周边区域，这些地区降雨量较大，蒸散量和径流量相对较小，且生态系统中不利于水源涵养的类型面积较小，能有效对降水进行截留、渗透、蓄积，并通过蒸发实现对水循环的调控，具有较强的水源涵养功能。水土保持功能极重要区均匀分布在全市范围内的森林地带，包括常绿针叶林和常绿阔叶林，这些地区海拔较高、植被覆盖度高，有利于保护丘陵山区水土资源、建立良好生态环境。生物多样性维护功能极重要区主要分布在武夷山脉、龙栖山、天宝岩、永安地质公园等区域，这些地区多为生态公益林和自然保护地，植

被净初级生产力高、种质资源丰富，能有效发挥生态系统在维持基因、物种、生态系统多样性方面的作用。水土流失脆弱性评价基本为脆弱等级，由于降水侵蚀

力和土壤可蚀性较高、丘陵地区坡度坡长对水土保持存在不同程度的削弱作用，导致三明市全市存在水土流失风险。

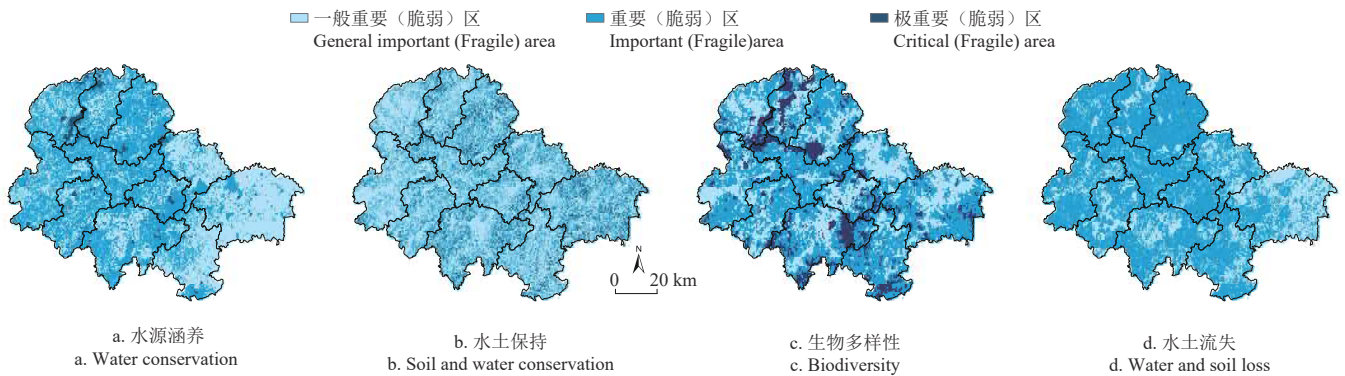


图2 生态保护重要性单因素评价

Fig.2 Single factor assessment of ecological protection importance

根据生态保护重要性集成评价结果 (图3、表3)，三明市生态保护极重要区面积 6 082.98 km²，占市域土地总面积的 26.49%。各县市生态保护极重要区比例总体较为均衡，比例最高的泰宁县 (34.54%) 生态资源丰富，是三明绿色发展的核心区域，其生态保护极重要区主要为大金湖国家地质公园、峨眉峰自然保护区和炉峰山森林自然公园。生态保护极重要区面积最大的永安市位于玳瑁山脉西侧，拥天宝岩、大丰山和薯沙溪等自然保护区，以及西部的永安龙头国家湿地自然公园，其生态环境质量对整个闽江流域和三明市具有举足轻重的作用。

态保护极重要区和具有潜在重要生态价值的其他区域 (图3)。

3) 生态源地提取

基于生态保护重要性评价以及生态保护红线的确定，为降低细碎斑块的不利影响，合并细碎斑块，在生态保护红线范围内，提取集中连片且面积大于 0.7 km² 的高度敏感斑块作为生态源地，最终得到 34 个生态源地 (图 4a)，面积 2 185.44 km²，约占三明市国土面积 9.5%，主要集中分布于北部的建宁、泰宁、将乐县，包括了国家森林公园、重点景区、大型水库、重要林地等，围绕中部盆地分布于周边丘陵山地。

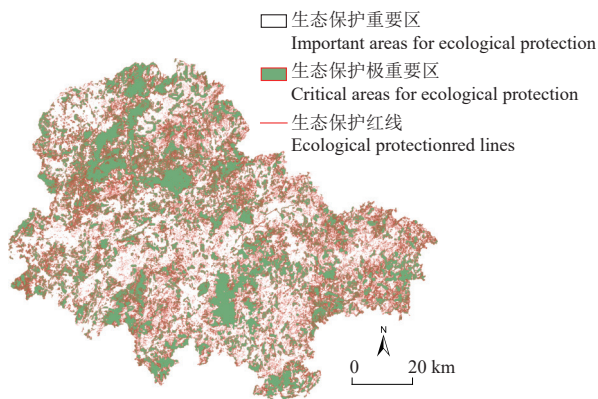


图3 三明市生态保护重要性评价

Fig.3 Ecological conservation importance assessment in Sanming City

2) 生态保护红线划定

从空间上看，三明市生态保护极重要区主要分布于泰宁 (大金湖、峨眉山)、建宁 (金饶山)、将乐 (龙栖山)、明溪 (君子峰)、永安 (玳瑁山西侧)、大田 (大仙峰)、尤溪 (戴云山西侧) 和市辖两区 (瑞云山、大佑山、罗岩山、天阶山) 等地。经过比对，三明市自然保护地全部落入生态保护极重要区，此外，本研究将具有潜在重要生态价值的其他区域 (如二级生态公益林等) 纳入考虑，最终，三明市生态保护红线范围包括生

表3 生态保护重要性评价面积统计

Table 3 Area statistics of ecological protection importance evaluation in Sanming City

行政区 Administrative region	极重要区 Critical area		重要区 Important areas	
	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%	面积 Areas/km ²	比例 Proportion/%
(新) 三元区	285.59	24.80	865.84	75.20
沙县区	464.59	26.86	1 265.27	73.14
明溪县	387.19	21.43	1 419.14	78.57
清流县	456.37	18.96	1 951.09	81.04
宁化县	558.45	25.01	1 674.68	74.99
大田县	903.96	26.43	2 516.42	73.57
尤溪县	368.71	20.50	1 430.13	79.50
将乐县	670.01	29.90	1 571.09	70.10
泰宁县	528.07	34.54	1 000.75	65.46
建宁县	458.61	26.72	1 257.74	73.28
永安市	1 001.42	34.16	1 929.75	65.84
总计	6 082.98	26.49	16 881.89	73.51

3.1.2 生态廊道

在生成潜在生态廊道的基础上，为降低冗余性、减少建设成本，剔除重复廊道和相似廊道后，再基于重力模型，根据源地之间的相互作用力区分重要廊道和一般廊道，构成廊道分级体系 (图 4)。最终得到生态廊道 82 条，总长度约 3 727.4 km。其中重要生态廊道 12 条，一般生态廊道 70 条。最短的生态廊道 0.21 km，连接线路为金溪生态廊道，最长的生态廊道 524.21 km，连接线路为研究区中部的格氏栲国家森林公园与东部闽湖人工

湖水利风景区生态廊道。重要生态廊道位于武夷山、闽江源-大金湖、龙栖山、大丰山、天宝岩等生态源地之间，这些地区廊道密集，各生态源地直接连通性较好。

3.1.3 生态节点与生态断裂点

如图 4 所示，生成生态节点 77 个，其中重要生态节点 30 个，主要位于龙栖山与闽湖生态廊道、莲花山与天宝岩生态廊道、武夷山南麓君子峰、鸣溪、天鹅洞及周边区域，表明这些地区处于阻力高值地带，物种在进行源地之间的迁移需要克服更多的阻力；一般生态节点

47 个，主要位于闽江源-大金湖生态圈、鸣溪、牙梳山、天鹅洞等区域，以及闽江国家森林公园与莲花山生态廊道，天鹅洞与天宝岩生态廊道，炉峰山、君子峰与天宝岩生态廊道。将生态廊道与公路、铁路交通网络相交生成生态断裂点 66 个，主要位于闽江国家森林公园与金溪生态廊道，牙梳山与天宝岩生态廊道，以及格氏栲国家森林公园与天宝岩生态廊道，等等，表明这些区域的城镇等级和经济发展水平较高，主要交通道路网络密度较大，物种迁移和源地扩展容易受到阻碍。

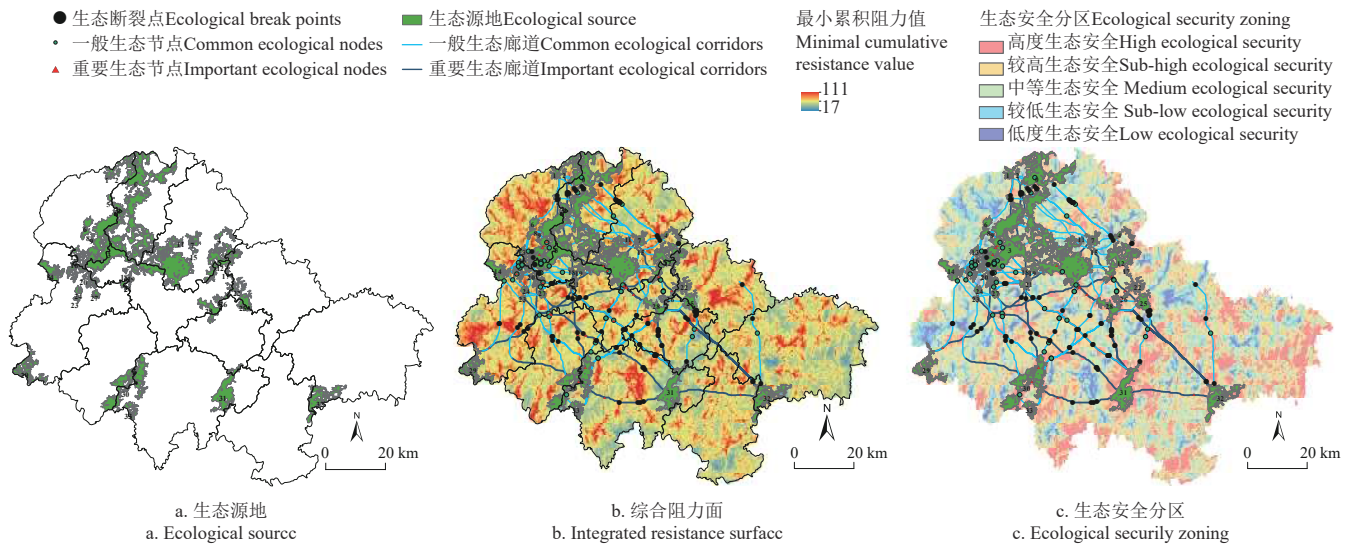


图 4 三明市生态安全格局与综合阻力面

Fig.4 Ecological security pattern and integrated resistance surface of Sanming City

3.1.4 生态安全格局分析

本文在基于划定生态保护红线的基础上全域性科学识别生态源地，全面考虑阻力因子，结合生态廊道与生态节点的分级判定、生态断裂点的提取，构建的生态网络完整，生态安全水平总体较高，但局部问题突出（图 4b）。表现为：1）生态源地多但分布不均，呈北密南疏分布特征；2）南部区域廊道稀疏却断裂点密集，应积极构建尤溪、沙溪与九龙溪水系生态廊道，玳瑁山、戴云山绿色生态廊道，使廊道体系更加稳定、生态源地之间连接更加顺畅，有效提高整个生态网络的连通性和稳定性。

三明市生态安全分区结果见图 4c。具体来看，较高和高度生态安全区占比 58.83%，表明三明市生态安全水平总体较好。其中，高度生态安全区主要包括了水源保护地、山林保护区、水系，例如西部的闽江源—大金湖、牙梳山，中部的金溪、龙栖山，东部的沙溪与九龙溪、汤川，南部的天宝岩、永安地质公园，等等。基本覆盖了生态源地，形成了网络闭合度较高的生态体系。较高生态安全区主要位于山地向盆地过渡的低丘缓坡地带，海拔较高、植被覆盖度较高，土壤类型利于植物生长，生态系统服务功能较明显。

中等生态安全区占比 25.04%，主要位于林地延伸地带、耕地向坡地延伸地带和部分山间洼地，均匀分布于整个三明市，是人类生活空间和自然生态空间交界区域，

海拔较低、地势相对平坦，零散分布农村居民点，土壤有机质含量较高，利于农业生产活动，主要种植特色经济农作物，发展高山特色农业。

较低和低度生态安全区占比 16.13%。其中，较低生态安全区主要位于城郊，与城镇中心距离较近，开发利用可能性较高。低度生态安全区处于人类活动密集的城镇开发建设用地，由于国土空间开发建设强度大、工业发展迅速、人口密度大，引发城市空气污染、水体污染、耕地减少等问题，导致自然景观破碎、生态退化严重、生态系统服务功能破坏。植被净初级生产力低，土壤侵蚀程度较高、有机质含量偏低，对植物生长抑制作用明显。该区域生态廊道数量少且生态断裂点较为密集，廊道连通性差，生态源地扩展阻力大，生态网络极不稳定，生态安全受到较大威胁。

3.2 生态修复分区及生态防护建议

参考有关文献^[9,13,17]，将三明市生态安全等级由低到高初步划分成核心重点区（生态安全等级低、较低）、监测预警区（生态安全等级中等）、缓冲过渡区（生态安全等级较高）、保育防护区（生态安全等级高），再根据自然资源、农业农村等政府有关部门资料及专家意见，最终形成生态修复分区。具体来看，核心重点区占比最低，为 16.13%，该区主要位于城镇建设用地区域和水体，城镇建设用地区域属于高度开发区域，地形起伏度

小, 植被覆盖度低, 土壤类型对植物生长造成的抑制作用较大, 应补充建设人工生态系统, 恢复植被, 消除废弃矿山安全隐患, 同时修复因快速城市化而破碎的生境景观和生态廊道, 提升生态廊道的连通性和整体性; 耕地可能存在土壤有机质含量低等问题, 应提升土壤肥力, 开展耕地质量提升行动; 水体应开展水污染治理。监测预警区占比第二, 为 25.04%, 该区主要位于常绿针叶林, 可能存在土壤侵蚀程度较高、防护林体系不完善等问题, 应加强植树造林、封山育林等措施, 防止水土流失。缓冲过渡区占比最高, 为 35.53%, 介于山地过渡到盆地、低丘的缓坡地带, 应加强生态廊道连通建设, 维持生态系统服务功能稳定, 耕地保护红线内退林还耕, 加强城

郊生态环境建设。保育防护区占比较高, 为 23.30%, 该区主要位于自然保护地, 是生态保护极重要区, 应严格保护, 做好生态保育工作, 通过人工造林、封山育林等措施完善防护林体系, 开展珍稀濒危动植物栖息生境生态修复。三明市生产、生态、生活空间占比分别为 12.39%、2.67%、84.94%, 将生态空间、生产空间和生活空间作为定位依据, 划分成 12 类生态修复小区, 并根据《南方丘陵山地生态保护和修复重大工程建设规划》《福建省市级国土空间生态修复规划编制指南》《关于进一步完善政策措施 巩固退耕还林还草成果的通知》《矿山生态修复技术规范》等政策文件, 针对性提出生态防护建议 (表 4)。

表 4 三明市生态修复分区类型及生态防护建议

Table 4 Types of ecological restoration zones and ecological protection proposals in Sanming City

分区类型 (比例) Type of partition (Proportion)	空间类型 (比例) Type of space (Proportion)	主要空间分布 The main spatial distribution	生态防护建议 Ecological protection advice
核心重点区 (16.13%)	生态空间 (7.72%)	永安龙头湿地、沙溪与九龙溪周边零星地带	退化林修复、低质低效林改造、加快林草植被恢复、污染水体治理
	生产空间 (6.63%)	农业生产区域	土壤重构, 综合治理农业面源污染、全面提高耕地生产能力
	生活空间 (1.78%)	城镇生活空间	消除废弃矿山地质灾害隐患, 修复矿山生态系统
监测预警区 (25.04%)	生态空间 (21.40%)	城镇边缘与耕地周边的林地	加强植树造林、限制木材砍伐、矿石开采, 水土流失综合治理、减少坡面水土流失
	生产空间 (3.29%)	农业生产区域	农田整治, 土壤质量提升, 废弃矿山水土污染治理、植被恢复
	生活空间 (0.35%)	城镇和农村生活空间	可适度开发休闲农业, 引导零散居民点聚集布置, 避免城镇空间破碎化
缓冲过渡区 (35.53%)	生态空间 (33.99%)	莲花山西麓、雪峰山南麓及各生态保护区边缘地带	封山育林、栖息觅食场所重建、生态廊道连通建设, 水源涵养、水土保持、生物多样性功能维持稳定, 禁止矿石开采
	生产空间 (1.45%)	城镇周边农业生产空间	耕地保护红线内退林还耕
	生活空间 (0.09%)	城镇生活空间边缘区	加强城郊生态环境建设, 提高城镇边缘生态环境质量
保育防护区 (23.30%)	生态空间 (23.04%)	武夷山脉、龙栖山、玳瑁山、大丰山东麓	强化生态保育、禁止或限制开发建设活动
	生产空间 (0.24%)	丘陵山地周边零星农业生产空间	宜林则林、宜耕则耕, 加强耕地污染源头防控
	生活空间 (0.02%)	农村生活空间	加强生态环境建设, 防止农村建设用地规模无序扩张

4 讨论

三明市是福建省西北部的重要绿色屏障, 具有十分重要的生态战略地位, 该地区的生态系统服务功能完整性对保障区域生态安全具有重要作用。本研究基于构建科学可靠的生态安全格局, 统筹考虑国土空间, 进行生态修复分区并针对性提出保护修复建议。为弥补当前生态源地提取方法存在覆盖范围不全或主观指定个别地类为源地缺乏客观性等不足, 提高生态源地识别的科学性, 采用生态保护红线划定方法, 全域识别生态源地; 利用最小累积阻力模型, 判别生态廊道和生态节点, 提取生态断裂点; 根据最小累积阻力综合值将生态安全划分成 5 个等级, 由低到高划分成 4 种生态修复类型区, 结合“三生空间”范围, 划定 12 类生态修复小区, 并分别提出针对性生态防护建议。所采用数据和资料来源均真实可靠, 对于精准分区修复和保护生态系统具有一定的现实意义和应用价值, 也可为其他丘陵地区城市提供借鉴和参考。

然而基于最小累积阻力模型生成的生态廊道只是一个表达路径的概念网络^[32], 不同的宽度范围内, 土地利用类型占比差异较大, 景观异质性随廊道宽度增大而增

大, 适宜的宽度才能发挥较强的生态服务功能。因此, 廊道宽度的设计至关重要^[15]。目前, 本研究暂时缺乏对生态廊道宽度设置的深入分析, 未来对不同性质的生态廊道、不同动物需要的迁徙廊道、人工生态系统的生态廊道等宽度的设置还需进一步细化。此外, 生态安全水平随着土地利用和人类活动的强度变化处于动态变化之中, 未来还需对一定时期内生态安全进行动态监测, 并适当预测不同情景下的发展趋势, 以满足国土空间生态修复工作的需要。

5 结论

本研究以中国南方丘陵山区典型城市福建省三明市为研究区, 基于划定生态保护红线方法构建生态安全格局, 进行生态修复分区, 并分别提出针对性生态防护建议, 对于制订生态系统保护修复规划和实施生态保护工程具有一定参考价值。研究主要结论: 三明市生态源地共有 34 处, 约占三明市国土面积 9.5%, 总体来看, 围绕中部盆地分布于周边的丘陵山地; 重要生态廊道和一般生态廊道分别为 12 条和 70 条, 重要生态节点和一般生态节点分别为 30 个和 47 个, 共同构成互联互通的生态网络; 生态断裂点共 66 个, 主要分布于西部和中部交

通网络密集区域; 三明市生态安全本底条件良好, 生态安全等级较高及以上区域占比 58.83%, 但仍存在 16.13% 的区域生态安全等级处于较低及以下; 叠加生态安全等级分区与“三生空间”范围, 将三明市生态修复分区划分成核心重点区、监测预警区、缓冲过渡区、保育防护区四大类 12 类生态修复小区。

[参 考 文 献]

- [1] 彭少麟. 恢复生态学[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 497-511.
- [2] REYNOLDS J F, SMITH D M S, LAMBIN E F, et al. Global desertification: Building a science for dry land development[J]. *Science*, 2007, 316(5826): 847-851.
- [3] 曾晨, 程轶皎, 吕天宇. 基于生态系统健康的国土空间生态修复分区——以长江中游城市群为例[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(12): 3118-3135.
ZENG Chen, CHENG Yijiao, LYU Tianyu. Research on landscape ecological restoration zoning based on ecosystem health: A case study of the urban agglomeration in the middle reaches along the Yangtze River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12): 3118-3135. (in Chinese with English abstract)
- [4] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 204-216.
NI Qinglin, HOU Huping, DING Zhongyi, et al. Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: Taking Jiawang district of Xuzhou city as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 204-216. (in Chinese with English abstract)
- [5] 方莹, 王静, 黄隆杨, 等. 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[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 190-203.
FANG Ying, WANG Jing, Huang Longyang, et al. Determining and identifying key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning based on ecological security patterns: A case study of Yantai city[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 190-203. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 等. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8725-8732.
WANG Xiaoyu, FENG Zhe, WU Kening, et al. Ecological conservation and restoration of life community theory based on the construction of ecological security pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8725-8732. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王回苗, 李汉廷, 谢苗苗, 等. 资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 162-173.
WANG Huihui, LI Hanting, XIE Miaomiao, et al. Construction of ecological security pattern for systematic restoration of industrial and mining land in resource-based cities[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 162-173. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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 Huijuan, LIU Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. *Geo-graphical Research*, 2017, 36(3): 407-419. (in Chinese with English abstract)
- [9] 马世发, 劳春华, 江海燕. 基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟——以粤港澳大湾区为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3441-3448.
MA Shifa, LAO Chunhua, JIANG Haiyan. Ecological restoration zoning of territorial space based on the pattern simulation of eco-security scenario: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3441-3448. (in Chinese with English abstract)
- [10] 冯琰玮, 甄江红, 田桐羽. 基于生态安全格局的国土空间保护修复优化——以内蒙古呼包鄂地区为例[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(11): 2915-2929.
FENG Yanwei, ZHEN Jianghong, TIAN Tongyu. Optimization of land protection and restoration based on ecological security pattern: A case study of Hohhot-Baotou-Ordos Region in Inner Mongolia[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(11): 2915-2929. (in Chinese with English abstract)
- [11] 唐正宇, 冯舒, 俞露, 等. 城市群国土空间生态修复区域诊断——以粤港澳大湾区为例[J]. *热带地理*, 2023, 43(3): 429-442.
TANG Zhengyu, FENG Shu, YU Lu, et al. Diagnosis of territorial space ecological restoration areas in urban agglomeration: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(3): 429-442. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吴健生, 罗可雨, 马洪坤, 等. 基于生态系统服务与引力模型的珠三角生态安全与修复格局研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8417-8429.
WU Jiansheng, LUO Keyu, MA Hongkun, et al. Ecological security and restoration pattern of Pearl River Delta, based on ecosystem service and gravity model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8417-8429. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘学, 杨春艳, 高艳妮, 等. 厦门市生态安全格局识别与生态管控区分级管控研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(13): 5357-5369.
LIU Xue, YANG Chunyan, GAO Yanni, et al. Identification of ecological security pattern and hierarchical management of ecological control area in Xiamen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(13): 5357-5369. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭志龙, 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[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3998-4040.
WU Zhilong, YANG Jiyu, XIE Hualin. Construction, optimization and restoration of ecological security pattern in the Southern hilly and mountainous region of Chian: A case study in Ruijin City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3998-4040. (in Chinese with English abstract)
- [15] 汤峰, 王力, 张蓬涛, 等. 基于生态保护红线和生态网络

- 的县域生态安全格局构建[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 263-272.
- TANG Feng, WANG Li, ZHANG Pengtao, et al. Construction of county-level ecological security pattern based on ecological protection red line and network in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(9): 263-272. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李恒凯, 李淑芳, 郑春燕, 等. 基于生态系统服务功能的东江流域关键性生态空间识别[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 257-266.
- LI Hengkai, LI Shufang, ZHENG Chunyan, et al. Identification of the critical ecological spaces in the Dongjiang River Basin based on ecosystem service function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 257-266. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3406-3414.
- FU Fengjie, LIU Zhenhuan, LIU Hai. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: A case study in Hezhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3406-3414. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王梓洋, 石培基, 张学斌, 等. 基于栅格尺度的生态安全评价及生态修复——以酒泉市肃州区为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(10): 2736-2749.
- WANG Ziyang, SHI Peiji, ZHANG Xuebin, et al. Grid-scale-based ecological security assessment and ecological restoration: A case study of Suzhou district, Jiuquan[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(10): 2736-2749. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨帅琦, 何文, 王金叶, 等. 基于景观生态风险评估的漓江流域生态安全格局构建[J/OL]. 中国环境科学, 2023-11-07. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20221123.001>
- YANG Shuaiqi, HE Wen, WANG Jinye, et al. Ecological security pattern construction in Lijiang River basin based on landscape ecological risk assessment[J/OL]. China Environmental Science, 2023-11-07. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20221123.001>(in Chinese with English abstract)
- [20] 王韵秋, 胡业翠, 高梦雯, 等. 多维视角下广西喀斯特石漠化地区国土空间生态修复分区[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 223-231.
- WANG Yunqiu, HU Yecui, GAO Mengwen, et al. Land-space ecological restoration zoning of karst rocky desertification areas in Guangxi from multi-dimensional perspectives[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(1): 223-231. (in Chinese with English abstract)
- [21] 韦宝婧, 胡希军, 张亚丽, 等. 基于“重要性-脆弱性-服务价值”的国土空间生态保护与修复管控[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 249-258.
- WEI Baojing, HU Xijun, ZHANG Yali, et al. Ecological protection, restoration and management of territorial space using “importance, fragility, ecosystem service value” [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(19): 249-258. (in Chinese with English abstract)
- [22] WICKHAM J D, RIITERS K H, WADE T G, et al. A National assessment of green infrastructure and change for the conterminous united states using morphological image processing[J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 94(3): 186-195.
- [23] SAURA S, VOGT P, VELAZQUEZ J, et al. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(2): 150-160.
- [24] 沈钦炜, 林美玲, 莫惠萍, 等. 佛山市生态网络构建及优化[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3288-3298.
- SHEN Qinwei, LIN Meiling, MO Huiping, et al. Ecological network construction and optimization in Foshan City, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9): 3288-3298. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1386-1396.
- HONG Buting, REN Ping. Assessment of ecological suitability for rural residential land based on minimum cumulative resistance model: A case study in Dujiangyan City[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1386-1396. (in Chinese with English abstract)
- [26] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长前景[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- YU Kongjian, WANG Sisi, LI Dihua, et al. The function of ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1189-1204. (in Chinese with English abstract)
- [27] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1096-1110.
- FENG Yanwei, ZHEN Jianghong, MA Chenyang. Evaluation of ecological carrying capacity and optimization of ecological security pattern in Inner Mongolia[J]. Geographical Research, 2021, 40(4): 1096-1110.(in Chinese with English abstract)
- [28] 杨凯, 曹银贵, 冯喆, 等. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 555-565.
- YANG Kai, CAO Yingui, FENG Zhe, et al. Research progress of ecological security pattern construction based on minimum cumulative resistance model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(5): 555-565. (in Chinese with English abstract)
- [29] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.
- YIN Haiwei, KONG Fanhua, QI Yi, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan Province, Chian[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,

- 31(10): 2863-2874. (in Chinese with English abstract)
- [30] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1611-1618.
CHEN Xiaoping, CHEN Wenbo. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1611-1618. (in Chinese with English abstract)
- [31] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771-784.
HUANG Muyi, YUE Wenze, FENG Shaoru, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 771-784. (in Chinese with English abstract)
- [32] 徐威杰, 陈晨, 张哲, 等. 基于重要生态节点独流减河流域生态廊道构建[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5): 805-813.
XU Weijie, CHEN Chen, ZHANG Zhe, et al. Ecological corridor construction based on important ecological nodes in Duliujian River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(5): 805-813. (in Chinese with English abstract)
- [33] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378-391.
HUANG Jinchuan, LIN Haoxi, QI Xiaoxiao. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 378-391. (in Chinese with English abstract)

Construction of ecological security pattern and land-space restoration zoning based on ecological protection red line

LUO Shasha¹, LAI Qingbiao², WANG Xudong², WANG Xiucheng², FENG Yanwei³✉

(1. Institute of Agricultural Economics and Information, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 2. Fujian Geological Surveying and Mapping Institute, Fuzhou 350005, China; 3. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: An environmental strategy has been initiated, called “ecological protection red lines”, in China. The population, resources and environment can be balanced to promote the economic, social and ecological benefits. The ecological restoration zoning of national land space can be implemented to improve the habitat quality, the regional ecological security and the sustainable development. It is very necessary to identify the ecological source areas with the ecological protection red line as the initial scope, in order to build a scientific and reliable ecological security network. The “production-living-ecological” space can be classified into the land-space ecological restoration zoning. Therefore, taking Sanming City of Fujian Province as the research area, this study aims to construct a more scientific and effective technical paradigm of land-space ecological restoration zoning. Firstly, the importance of ecological protection was assessed to verify the boundaries of prohibited development zones and protected areas, according to the importance of ecosystem services and ecological vulnerability. Then the ecological source areas were identified to delimit the ecological protection red line. Secondly, the resistance factors were considered to construct the evaluation system of expanding resistance for the ecological source land. And the minimum cumulative resistance model was used to evaluate the ecological corridors and nodes. The ecological fracture points were then extracted to construct a scientific and reliable pattern of ecological security. Finally, the land-space ecological restoration zoning was carried out, according to the ecological security level and the scope of “production-living-ecological” space. Then the targeted countermeasures were proposed for the ecological restoration and protection. The research results showed that: 1) There were 34 ecological sources with an area of 2 185.44 km², accounting for about 9.5% of the national territorial area of the City. These ecological sources were evenly distributed in the surrounding hills and mountains around the central basin, which were mainly concentrated in the North of City. 2) 12 important ecological corridors and 70 general ecological corridors were identified to extract 30 important ecological nodes and 47 general ecological nodes, together with 66 ecological breaking points. There were the full pattern and high level of ecological security in general. However, the corridors in the southern region were sparse with the dense ecological breaking points and low network connectivity. 3) The grade of ecological security was divided to superimpose the scope of “production-living-ecological” space. 12 types of ecological restoration areas were divided into four categories, including the core key zone (16.13%), monitoring and early warning zone (25.04%), buffer transitional zone (35.53%), and conservation protective zone (23.30%). The ecological protection was proposed for the different restoration zones. As such, the regional ecological security was achieved in the high-quality development of cities in the southern hilly areas. Ecological restoration planning can be expected to effectively construct in the technical paradigm of ecological restoration zoning of land space, The finding can provide the technical reference for the decision-making on the land space and ecological protection in the hilly areas of South China.

Keywords: ecology; protection red line; ecological security pattern; ecological restoration zone; Sanming City