

DOI: 10.5846/stxb202012013074

柳建玲, 李胜鹏, 范胜龙, 胡勇. 基于生态安全格局的厦漳泉地区国土空间生态保护修复区与预警点识别. 生态学报, 2021, 41(20): 8124-8134.

Liu J L, Li S P, Fan S L, Hu Y. Identification of territorial ecological protection and restoration areas and early warning places based on ecological security pattern: a case study in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8124-8134.

# 基于生态安全格局的厦漳泉地区国土空间生态保护修复区与预警点识别

柳建玲<sup>1</sup>, 李胜鹏<sup>3</sup>, 范胜龙<sup>1,2,\*</sup>, 胡勇<sup>3</sup>

1 福建农林大学公共管理学院, 福州 350002

2 自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心, 福州 350000

3 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100037

**摘要:**厦漳泉地区是福建省开展生态保护修复的关键区域, 识别、预警国土空间生态薄弱区对实施国土空间生态修复具有重要意义。研究通过 MSPA、MCR 等模型方法识别 2000—2018 年动态稳定性与连通性兼具的生态源地, 提取生态廊道、生态节点等构建该地区的生态安全格局, 采用 FLUS 模型在生态安全格局限制下模拟 2030 年土地利用变化, 综合划分厦漳泉地区国土空间生态保护修复区并展开预警。结果表明, 厦漳泉地区生态安全格局由 12 个生态源地, 66 条潜在生态廊道、13 条重要生态廊道与若干生态节点等构成, 生态源地主要分布在研究区西部, 生态廊道为纵横交错的网状结构, 部分生境较脆弱的县(区)无生态源地与廊道分布, 生态节点集聚特征显著; 2030 年研究区耕地、林地面积呈减少趋势, 建设用地面积增幅显著, 建设用地向四周的耕地与林地呈环状扩张, 挤压生态空间, 威胁生态源地与廊道。综上, 研究划分了 1 个生态源地保护带、2 个生态修复核心区, 并明确生态保护空间预警点, 可为完善国土空间生态安全格局的保护与建设等提供基础信息, 对开展生态保护修复协同治理、提升区域生态环境质量与人民福祉有重要意义。

**关键词:**生态安全格局; 生态保护修复; 预警; MSPA 方法; FLUS 模型; 厦漳泉地区

## Identification of territorial ecological protection and restoration areas and early warning places based on ecological security pattern: a case study in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region

LIU Jianling<sup>1</sup>, LI Shengpeng<sup>3</sup>, FAN Shenglong<sup>1,2,\*</sup>, HU Yong<sup>3</sup>

1 College of Public Administration, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Technology Innovation Center for Monitoring and Restoration Engineering of Southeastern Ecological Fragile Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Fuzhou 350000, China

3 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100037, China

**Abstract:** Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region is located in the southeast of Fujian Province, China. It's a crucial area of ecological protection and restoration in Fujian Province. The identification and warning of fragile ecological area means significantly to implementation of ecological restoration. Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) model, Minimum Cumulative Resistance (MCR) model and other methods were utilized to build ecological security pattern in this region. At the meantime, the ecological sources were dynamically stable and connected. Then, land use change in 2030 was simulated by using the FLUS model under the restriction of the ecological security pattern. It means the area of ecological sources was

基金项目:福建省社会科学研究基地重大项目(FJ2020MJDZ028)

收稿日期:2020-12-01; 采用日期:2021-08-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fsl@fafu.edu.cn

restricted from changing during this period. FLUS model also comprehensively divided the territory ecological protection and restoration area into different kinds and warned the potential risk. The results showed that the ecological security pattern of the study area was composed of 12 ecological sources, 66 potential ecological corridors, 13 important ecological corridors and several ecological nodes. The ecological sources were mainly distributed in the west of the study area, which was composed of mountains, hills and rivers. And the ecological corridors widely spread out into a complicated network. Some counties (districts) with fragile habitats had no ecological sources and corridors distribution like Shishi, Jinjiang. The ecological nodes were massively gathering together in Nan'an and Zhangzhou city. After that, it's predicted in 2030, the area of cultivated land and woodland in the study area would gradually decrease about 2.59% and 1.14% due to great expansion of construction land. As the construction land expanded to the surrounding cultivated land and woodland in a circular way, it was squeezing the ecological space and threatening the ecological sources area and corridors. The expansion patterns of coastal areas and inland areas in the study area were different. The construction land of coastal cities and counties mainly expanded in a belt shape, while the original built-up areas mainly expanded outward in a ring shape. In conclusion, this study separated one ecological sources protection belt and two ecological restoration cores, and pointed out the potential risk of ecological protection space. They were significantly concentrated in Quanzhou and Zhangzhou districts. Meanwhile, it is expected to give some fundamental information to further improvement of ecological security of territorial space. Also, we believe that it can contribute a lot to carry out synergy governance of ecological protection and restoration, as well as to promote regional ecology quality and human's well-being.

**Key Words:** ecological security pattern; ecological protection and restoration; early warning places; Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) model; FLUS model; Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region

快速的土地城市化使生态系统面临了巨大压力,生态环境出现不同程度的退化<sup>[1]</sup>,而社会发展对生态系统服务福祉提出了新需求,社会可持续发展的矛盾由此不断激化。如何在空间上整体分析统筹布局,科学识别重点保护修复区域,是国土空间生态保护和修复的重点与难点。生态安全格局作为生态环境保护与人类福祉提升的桥接点<sup>[2]</sup>,满足了区域生态恢复、生物多样性保护及为社会发展提供生态服务等需求<sup>[3]</sup>。构建合理的生态安全格局能够对生态过程进行积极调控<sup>[4]</sup>,识别生态保护修复区域,破解当前国土空间生态保护修复中的难题。福建省厦门市、漳州市与泉州市(即“厦漳泉地区”)是福建省极具发展活力的都市圈,但生态空间破碎化、生态用地与生物多样性退化等生态问题较为突出,是开展生态保护修复的关键区域,亟需构建生态安全格局,识别与预警国土空间生态保护修复区。

20 世纪 90 年代,俞孔坚提出生态安全格局研究的理论与方法<sup>[5]</sup>,并对生态安全格局进行多空间尺度研究<sup>[6-7]</sup>。当前研究中,“源地—阻力面—廊道”研究已成为构建生态安全格局的基本范式<sup>[1]</sup>,即通过评价法<sup>[8]</sup>、形态学空间格局分析(MSPA)<sup>[9]</sup>等方法选取生态源地,利用赋值法<sup>[10]</sup>或直接选取建设用地等土地利用类型<sup>[11]</sup>等方式构建阻力面,并利用夜间灯光指数或不透水表面等对生态阻力面进行修正,再以最小累积阻力(MCR)模型<sup>[8]</sup>、重力模型<sup>[11]</sup>、电路理论<sup>[12]</sup>等提取潜在或重要生态廊道,叠加生态阻力高值区识别生态节点。但在选取生态源地时较少考虑生态源地的动态稳定性<sup>[13]</sup>,偏重于考虑生态用地斑块自身功能属性,而忽略了斑块在整个基质景观中的空间结构重要性以及与周围环境间的关系<sup>[14]</sup>。因此,本研究通过 MSPA 方法选取 2000—2018 年景观斑块重要性与连通性动态稳定的生态源地,利用生态系统服务价值与生境质量验证生态源地选取的科学性。

生态安全格局构建方法、过程的研究已取得长足的进展,但如何依据生态安全格局对国土空间展开有效修复与保护,亟待深入研究。当前研究中,部分学者构建、分析生态安全格局后,提出生态保护核心区域,如 Huang 等提出“一个中心,两翼和两带”的生态安全保护格局<sup>[15]</sup>;部分学者通过构建安全格局后模拟未来土地利用变化,通过城市建设用地扩张概率等角度以确定生态安全保护紧迫性分级<sup>[16]</sup>或进行生态安全评价以评

定生态安全格局构建效果<sup>[17]</sup>。模拟未来土地利用变化情况以探索当前生态保护方向,能够有效识别未来土地利用带来的生态威胁,能够帮助决策者提前识别防范未来风险。模拟土地利用变化的模型有 CA-Markov、FLUS 模型等,FLUS 模型能够有效处理各种土地利用类型相互转换的不确定性和复杂性<sup>[18]</sup>。

基于此,研究通过 MSPA、MCR 模型等构建生态安全格局,考虑厦漳泉地区未来发展用地需求,利用 FLUS 模型限制生态源地变化以模拟 2030 年厦漳泉地区各用地空间格局,从动态变化视角探索各用地空间扩展方向,预警将受到建设用地扩张影响的区域,探索国土空间生态修复分区与预警点,以期为实现厦漳泉地区国土空间协同修复保护提供科学参考。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区概况

厦漳泉地区(23°23'N—25°56'N, 116°53'—119°05'E)位于中国福建省东南沿海,区域内主要以平原、丘陵、山地等地貌类型为主,有九龙江、晋江等流域。作为福建省东南沿海最大的都市圈,三市的产业、空间、社会、环境保护等建设密不可分。《福建省统计年鉴—2019》<sup>[19]</sup>统计显示,2018 年厦漳泉三市地区生产总值共 17207.02 亿元,占福建全省生产总值的 48%。但厦漳泉地区的生态环境显现出较为严重的退化,社会可持续发展面临挑战。

### 1.2 数据来源

研究中所用土地利用分类数据、净初级生产力(NPP)、VIIRS/DNB 夜间灯光数据、气温与降水数据、GDP 与人口密度空间格网数据等均来自中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),其中土地利用分类数据为 30m 分辨率的栅格数据;坡度、坡向等数据提取于 30m 分辨率的 DEM,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);道路数据来源于中国 1:25 万基础地理数据库(<http://www.webmap.cn/main.do?meth od=index>);其他数据来源于中国农产品成本收益汇编或统计年鉴等。

## 2 研究方法

### 2.1 生态安全格局构建

#### 2.1.1 生态源地识别

生态源地即生态用地保护的“源”<sup>[20]</sup>,是物种生存与迁徙的源,对区域生态安全格局维持有重要意义。研究遵循景观连通性良好、生境质量高、生态系统服务价值高等原则<sup>[14,20-21]</sup>选取生态源地,并利用区域 2018 年生境质量与生态系统服务价值验证生态源地的有效性。

研究基于厦漳泉地区 2000、2010、2018 年 3 期土地利用栅格数据进行 MSPA 分析,对土地利用栅格进行识别、度量与分割,识别研究区动态稳定的生境斑块,结果可得核心区、岛状斑块、孔隙、边缘区、支线、环岛区、桥接区等 7 种景观类型。其中核心区生态适宜性高、生物多样性良好,可作为生态过程的“源”。考虑厦漳泉地区草地呈零散分布且受人类干扰较大,生态功能性较差<sup>[22]</sup>,研究选取林地、水域作为前景,其余土地利用类型作为背景,利用 Guidos Toolbox 软件进行分析<sup>[9,14]</sup>。因此,研究选取 2000—2018 年 MSPA 分析结果的前 30 个重要核心斑块,利用 Conefor 软件<sup>[23]</sup>计算斑块的景观(可能)连通性(PC)与斑块连通的重要性(dPC)。PC 值越大,斑块的连通性越强,dPC 值越大,斑块连通重要性也越强,计算公式<sup>[12]</sup>如式(1)、(2)。

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (1)$$

$$dPC = \frac{PC - PC'}{PC} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $n$  表示研究区的斑块总数, $a_i$ 与 $a_j$ 分别为 $i$ 与 $j$ 的斑块面积, $p_{ij}^*$ 为斑块 $i$  $j$ 间最大的路径连通性, $PC'$ 指删除该斑块后的景观(可能)连通性指数。

## 2.1.2 生态阻力面构建

### (1) 阻力因子选取

生态阻力指物种及生态功能在对空间的控制和覆盖过程所需克服的阻力<sup>[24]</sup>,阻力值越大,物种空间运动越困难,生态系统服务、功能流动过程中损失就越多。研究参考相关研究结果<sup>[11,25-26]</sup>与专家意见,根据景观类型、地形位指数、与道路距离、与水源距离等 4 方面对厦漳泉地区进行阻力赋值,赋值区间[1,1000],对相应指标权重值进行设置,如表 1。

表 1 生态阻力赋值表

Table 1 The table of ecological resistance assignment

指标 Index	权重 Weights	分类 Classifications	相对阻力值 Relative resistance
景观类型 Landscape types	0.50	城镇及其他建设用地	1000
		农村居民点	900
		未利用地	700
		水域	100
		水田	100
		旱地	200
		高覆盖度草地	30
		中覆盖度草地	50
		低覆盖度草地	80
		有林地	1
		灌木林	10
地形位指数 Topographical index	0.2	疏林地与其他	30
		<=0.2	1
		0.2—0.4	30
		0.4—0.6	100
		0.6—0.8	300
与道路距离 Distance from roads	0.15	>0.8	500
		<= 1000m	800
		1000—3000m	500
		3000—5000m	300
		5000—8000m	100
与水源距离 Distance from water sources	0.15	≥8000m	30
		<= 1000m	50
		1000—3000m	200
		3000—5000m	400
		5000—10000m	600
		>10000m	800

### (2) 阻力面修正

人类活动对生态系统影响较大,而夜间灯光数据能够有效表征人类活动的范围和强度<sup>[27]</sup>,故研究利用 VIIRS/DBN 夜间灯光数据对阻力值进行校正,即极差法对其逆向归一化后修正阻力面,公式如式(3)、(4)<sup>[28]</sup>。

$$L_i = \frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (3)$$

$$R_i^* = R_i \times L_i \quad (4)$$

式中, $L_i$ 是归一化后的夜间灯光指数, $L$ 指归一化前各栅格单元的夜间灯光指数, $L_{\max}$ 与 $L_{\min}$ 是归一化前夜间灯

光指数最大值与最小值,  $R_i^*$  指 VIIRS/DBN 夜间灯光指数归一化后修正的栅格单元的阻力值。

### 2.1.3 生态廊道识别

#### (1) MCR 模型

生态廊道是生态系统中物质流、能量流等交换的重要路径<sup>[29]</sup>, 是生态安全格局的一部分。MCR 模型即最小累积阻力模型, 是俞孔坚等<sup>[5]</sup>根据 Knaappen J P 等<sup>[30]</sup>的研究修改而来。MCR 模型可以模拟物种及生态功能在向另一生态源地迁移中对不同景观斑块空间的控制和覆盖过程所需克服最小累积阻力, 最小累积阻力路径是一条极可能有效的生态廊道路径, 即潜在生态廊道, 如式(5)。

$$\text{MCR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (5)$$

式中, MCR 指源地斑块间最小累积阻力值,  $f$  指最小累积阻力与生态过程的正相关关系,  $D_{ij}$  表示从源点  $j$  到栅格  $i$  的空间距离,  $R_i$  为修正后的阻力系数。

#### (2) 重力模型

重力模型可用于定量表征生态源地间潜在廊道重要性, 计算源地与目标间的相互作用大小, 源与目标间的作用力越大则廊道越重要<sup>[11]</sup>, 研究利用重力模型(式(6))构建相互作用矩阵, 识别源地间重要生态廊道, 完善生态安全格局。

$$G_{ij} = \frac{L_{\max}^2 \ln(S_i S_j)}{L_{ij}^2 P_i P_j} \quad (6)$$

式中,  $G_{ij}$  是生态源地  $i$  与  $j$  之间的相互作用力,  $L_{\max}$  是研究区所有廊道累积阻力的最大值,  $S_i, S_j$  是源地  $i$  与  $j$  的斑块面积,  $P_i P_j$  是源地  $i$  与  $j$  之间的阻力值<sup>[11]</sup>。

## 2.2 土地利用变化模拟分析

### 2.2.1 FLUS 模型

FLUS 模型采用 ANN 模型测算各类用地出现概率, 根据自适应惯性竞争机制模拟未来用地变化<sup>[31]</sup>。研究将生态源地设定为限制变化区, 参考 Liang 等<sup>[31]</sup>研究成果, 选取与高速公路距离、与普通公路距离、与铁路距离、与城镇居民点距离、DEM、坡度、坡向、人口密度、降水、气温等 12 个驱动因子用以模拟社会经济发展过程中土地利用变化。由于政策影响, 2015 年至 2018 年研究区沿海存在较大面积的其他建设用地转为水域, 这是短时间内进行的用地调整, 未来可能不会再有类似的转换。若无政策影响, 水域的转换速率基本较为稳定。故使用 2010 至 2015 年水域的变化速率作为未来水域的转换速率, 其他各用地类型的转换速率以 2015—2018 年各用地之间的转换速率为基准。考虑 2015 年之后区域用地政策较为稳定, 研究以 2015 年土地利用类型栅格数据为基础模拟 2018 年土地利用类型, 并作精度验证, 所预测 Kappa 系数为 0.94, 总体精度为 0.96, 符合精度要求。

### 2.2.2 核密度分析

研究提取 2018—2030 年建设用地扩张数据进行核密度分析, 从而探究发生建设用地扩张的热点区域, 刻画建设用地扩张对生态安全格局的威胁, 分析生态保护空间预警点, 计算公式如下:

$$F_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (7)$$

式中,  $F_n(x)$  是核密度值,  $h$  表示带宽,  $n$  表示带宽范围内的点数<sup>[32]</sup>。

## 3 结果分析

### 3.1 生态安全格局构建

#### 3.1.1 生态源地分布

研究通过选取 2000—2018 年稳定的核心区斑块、景观连通性计算等, 最终选取  $dPC$  稳定且面积较大的

12 个核心区斑块作为生态源地。对照现有研究成果<sup>[33-34]</sup>(图 1),验证所选取的生态源地分布同生境质量以及生态系统服务价值高值区空间分布基本一致,所选取的生态源地符合各项原则。生态源地总面积 6978.02 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 27.56%。厦漳泉地区生态源地呈“E”状分布,主要分布于厦漳泉地区内陆丘陵山地区,或其与河流湖泊的连接区域、沿海漳浦县等海湾与丘陵山地连接区等。但晋江市、石狮市基本无生态源地覆盖,主要是由于两市境内地势较为平坦,林地较少,在 2000—2018 年间建设用地面积不断扩张且集中连片趋势得到强化。

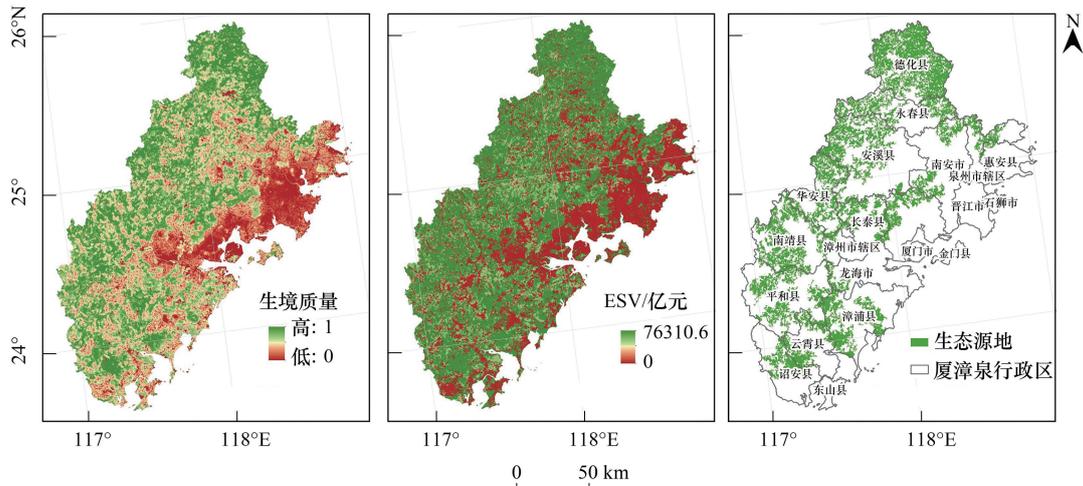


图 1 生境质量、生态系统服务价值(ESV)与生态源地分布图

Fig.1 The map of habitat quality, ecosystem service value (ESV) and ecological sources

### 3.1.2 阻力面的空间分布

研究利用 2018 年夜间灯光数据修正阻力面,生态阻力值范围为 $[0, 840]$ ,为更好地体现阻力值空间分布规律与层次,研究通过自然断点法将阻力值分为 7 类,将阻力值大于 530.35 划分为高值区,对生态源地间的物流与能流有较大的干扰阻碍作用,如图 2。厦漳泉地区生态阻力值呈现中北部高、南部低的趋势,生态阻力高值区在沿海地区呈现大范围面状集中分布、在内陆呈现零星分布,与城镇建成区的分布基本一致,但内陆的中阻力值区域较为集中,主要是坡度产生的影响。

### 3.1.3 生态廊道

研究共计识别 66 条潜在生态廊道(图 3),各潜在廊道之间形成了纵横交错“梯形状”的网络并基本贯穿全域,总长度 3892.03km。有林地、灌木林地、高覆盖度草地等是生态廊道的重要组成部分,部分生态廊道沿九龙江等河流走向。石狮市与晋江市全域、龙海市沿海以及厦门岛、东山县等区域无生态廊道覆盖,主要有三点原因:一是以上区域的土地利用类型缺少林地与水域,且建设用地大部分呈集中分布,生态阻力值高,生态源地间交流障碍大;二是以上区域的部分建设用地零星分布在生态斑块之间,生态斑块断裂无法形成良好的生态集中面;三是岛屿面积有限,无生态源地覆盖,天然的生态阻断使生态系统交流受到较大干扰。

通过重力模型计算生态源地间相互作用力矩阵(表 2),可知源地斑块 6 与 10 之间的相互作用力最大,说明两个生态源地之间的相互作用与关联性最强,生态系统物流与能流在两个生态源地之间交换所需克服的阻力最小,物种迁徙的可能性最大,应该重视此类源地斑块之间的生态廊道建设与保护。因研究设置阻力值较大,故研究根据计算结果将相互作用力大于 10 的廊道作为重要廊道,共计 13 条重要廊道(图 3)。所构建的生态廊道网络中,生态廊道南北间的连通性较差,在漳州市与厦门市生态源地间的连通性较好,重要生态廊道主要集中在主要集中漳州市。重要生态廊道链接的源地间物种迁移可能性较大,主要得益于源地间廊道较短或阻力较小,有利于物质与信息交流或交换。部分重要生态廊道是其他生态源地之间的必经廊道,辐射范围

较广。因此,重要生态廊道对物种迁移和扩散具有重要意义,在保护修复规划中应重点关注。

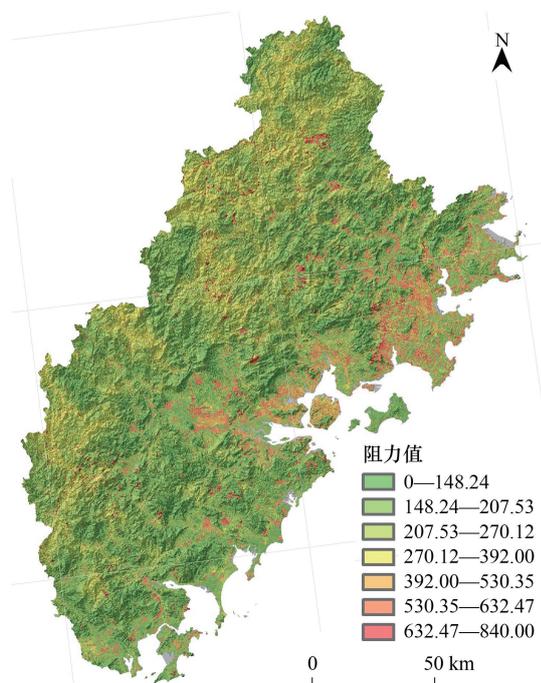


图2 生态阻力面

Fig.2 Ecological resistance surface

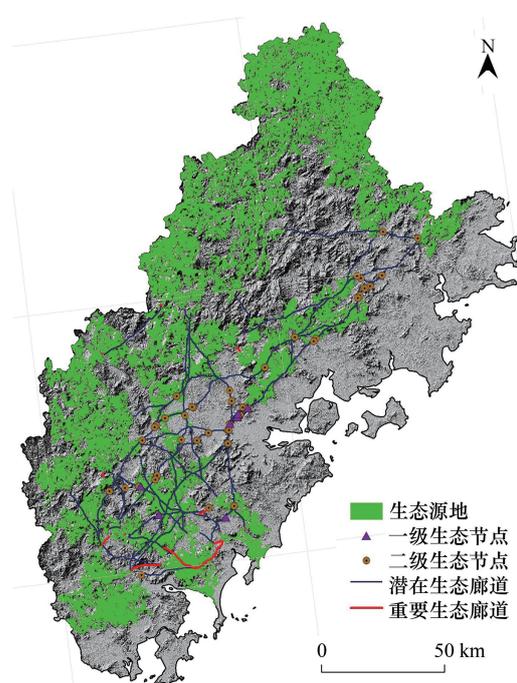


图3 生态安全格局

Fig.3 Ecological security pattern

表2 生态源地斑块间的相互作用矩阵

Table 2 Interaction matrix between patches of ecological sources

生态源地 Ecological sources	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	—	2530.75	3837.31	1.11	0.02	0.03	0.01	0.01	0.07	0.02	0.02	0.01
2	—	—	0.10	0.43	0.02	0.03	0.01	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01
3	—	—	—	1.22	0.16	0.08	0.03	0.05	421.68	0.04	0.05	0.03
4	—	—	—	—	0.18	0.38	0.06	0.10	61.35	0.18	0.14	0.07
5	—	—	—	—	—	0.45	0.46	38.60	2142.84	0.24	0.37	0.45
6	—	—	—	—	—	—	0.34	0.32	10.55	43240.01	3.27	0.32
7	—	—	—	—	—	—	—	1011.67	1502.20	0.29	1.13	8.88
8	—	—	—	—	—	—	—	—	6.55	0.24	0.57	4458.82
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.17	1768.82	9.60
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	76.65	0.44
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.07

### 3.1.4 生态节点识别

生态节点是生态源地间物流与能流等交流过程中受阻力较大的点<sup>[21]</sup>,是生态廊道中迫切需要修复的位置。将生态廊道与阻力值在[530.35,632.47]的阻力面相交得到二级生态节点,与大于632.47的阻力面相交得到一级生态节点(图3)。一级生态节点的分布较为零散,数量相对较少,对于生态廊道的阻断作用较大,不利于生态源地间的物质与能流交换;二级生态节点在数量相对较多且分布相对集中。一级与二级生态节点分布较为紧密,存在一条生态廊道可能被若干一级与二级生态节点阻断的现象,不利于区域生态安全,该现象主要发生在漳州市辖区内。研究区中生态廊道被建设用地与道路的阻断效应显著,生态节点主要是生态廊道与

建设用地或道路交界处,或建设用地与水域对林地、草地之间产生的阻断等情况,显著集中在厦门市、漳州市辖区、龙海市、长泰县、平和县与漳浦县等地区。

### 3.2 土地利用变化模拟

2018—2030 年土地利用变化转移矩阵(如表 3)显示,变化较为显著的是建设用地、耕地与林地,其中建设用地增加了 3.5%,耕地与林地分别减少 2.59%、1.14%。2018—2030 年间最大的地类转换情形是耕地、林地向建设用地转换,耕地转换为建设用地主要集中在惠安县、石狮市、晋江市、厦门市、龙海市与厦门市毗邻地区、九龙江两岸等快速城镇化地区;林地向建设用地转换的地区较为分散。沿海的建设用地主要呈现带状扩张,而内陆主要是原有建成区向外环状扩张。

表 3 2018 年至 2030 年土地利用转移矩阵/km<sup>2</sup>

Table 3 Land use transfer matrix from 2018 to 2030

2018 年	2030 年					
	耕地 Arable land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
耕地 Arable land	4765.15	70.23	27.29	4.38	645.99	0.18
林地 Woodland	78.76	12120.69	87.42	1.66	255.48	0.61
草地 Grassland	0.45	51.54	3892.70	0.59	5.72	0.19
水域 Waters	0.35	0.55	0.84	551.75	10.02	0.10
建设用地 Construction land	14.42	12.98	5.64	1.53	2598.91	0.11
未利用地 Unused land	—	0.07	0.04	0.08	0.06	27.99

### 3.3 生态保护修复区域识别

研究中所构建的生态安全格局明确了生态源地与生态廊道的位置、数量与特征等,明晰了生态阻力值的空间分布,这均为厦漳泉地区国土空间生态保护修复分区的基础参照。研究根据其基本属性与生态学意义,划分厦漳泉地区国土空间生态保护修复分区。其中,生态源地是绝对的保护区,部分生态阻力面高值区不利于生态系统物质交换,对生态系统有一定的干扰,生态阻力高值区内的生态保护与修复工作势在必行,而生态廊道建设与保护以及生态廊道中的战略节点的修复也是国土空间生态修复保护的重点关注区域。因此,研究将厦漳泉地区待保护修复主要区域分为“一带、两核心”,其中“一带”是生态源地保护带,“两核心”是生态节点修复核心区与生态阻力高值修复核心区,如图 4。

研究将 12 个生态源地划分为生态源地保护带,生态源地是生态安全格局构建的基础,以林地和水域为主,所在区域受到人类活动干扰较小,生态资源丰富,需要加以保护以维持稳定的生态供给。生态源地保护带主要分布于研究区内陆县市区及漳州市沿海部分地区,在泉州地区的流通性较差。依托于区域生态保护政策,生态源地消失的可能性低。因此,对生态源地的保护应遵循自然规律,在生态源地区域周围构筑生态屏障缓冲区,维持生态源地的生态质量与生态效益,维护生物多样性,避免生态源地受到损害。惠安县、晋江市等基本无生态源地覆盖区域,随着建设用地的扩张,生态服务功能将会出现短缺。研究建议,对生态源地保护带以

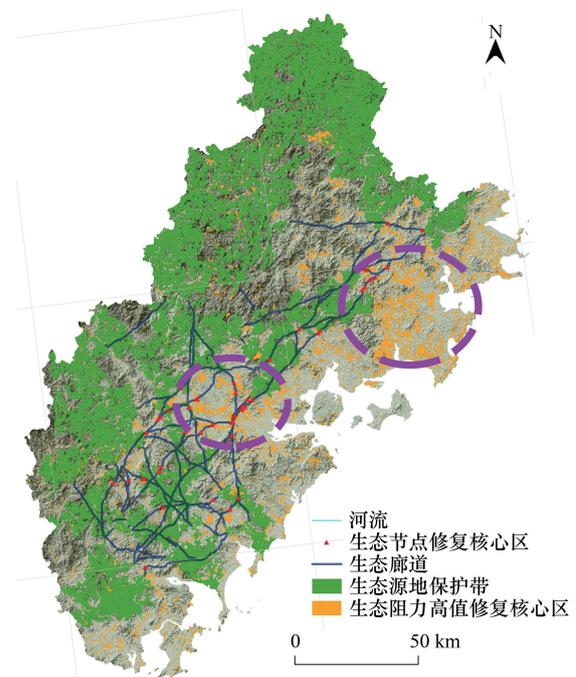


图 4 生态保护修复区域

Fig.4 The places of ecological protection and restoration

“保护保育为主,抗干扰为辅”,在无生态源地覆盖区域培育绿色基础设施,以期形成次级生态源地服务,对现有的生态源地服务功能形成一定的补充,增强区域生态连通性,使生态源地功能效用最大化。

研究根据生态阻力面与生态节点的分布划分两个生态修复核心区:一是生态廊道密布但生态节点聚集的生态节点修复核心区,生态节点是物质交换过程的障碍点与生态脆弱点,使物种在生态源地间的迁徙等活动受限制,不利于区域生态适宜性的保护,如漳州市辖区与龙海市边缘地区、平和县、漳浦县等。对于生态节点的修复,建议要合理确定生态廊道宽度,结合廊道宽度与廊道受阻实际情况开展相应的自然或人工修复,以畅通生态廊道,最大程度地联动区域生态系统服务功能,提高区域整体生态效益。二是生态阻力高值修复核心区,生态阻力高值区对应生境质量与生态系统服务价值低值区,该区域生境适宜性与生态效益较低,对生态源地间的物质交流阻碍较大。区域内主要是建设用地集中区与部分林地间夹杂的建设用地与未利用地等,集中于厦门、泉州地区。区域内林地数量较少且零星分布,耕地与建设用地间套分布、水域如晋江等河流两岸基本为建设用地,无法形成良好的生态源地。因此,该区域生态用地受到的威胁较大,修复与保护区域内生态用地,结合区域受损生态系统特征展开修复,以提升区域生态本底条件为主,结合区域规划布局,在生态阻力高值区建构一定的绿地设施,以保障区域有一定的生态供给;在维持原有生态景观的同时扩大生态用地的影响,增强区域生态系统服务。综上,研究建议该区域的生态保护修复要结合区域受损生态系统特征,跨区域协同修复,以提升区域生态安全格局的整体性并期望形成覆盖全域的生态网络,将有助于提升区域可持续发展水平。

### 3.4 生态保护空间预警点

研究将未来土地利用模拟中对生态安全格局造成胁迫的位置设为关键生态保护空间预警点,如图4。研究通过核密度方法识别2030年建设用地扩张热点区域,通过自然断点法将其分为低、中、高与严重敏感区等4个扩张级别(图5),其中高度与严重敏感区主要分布在惠安县、南安市、石狮市、厦门市、龙海市、漳浦县等区域。叠加建设用地扩张热点区与生态安全格局,可知未来扩张的建设用地不断逼近生态源地,挤压生态源

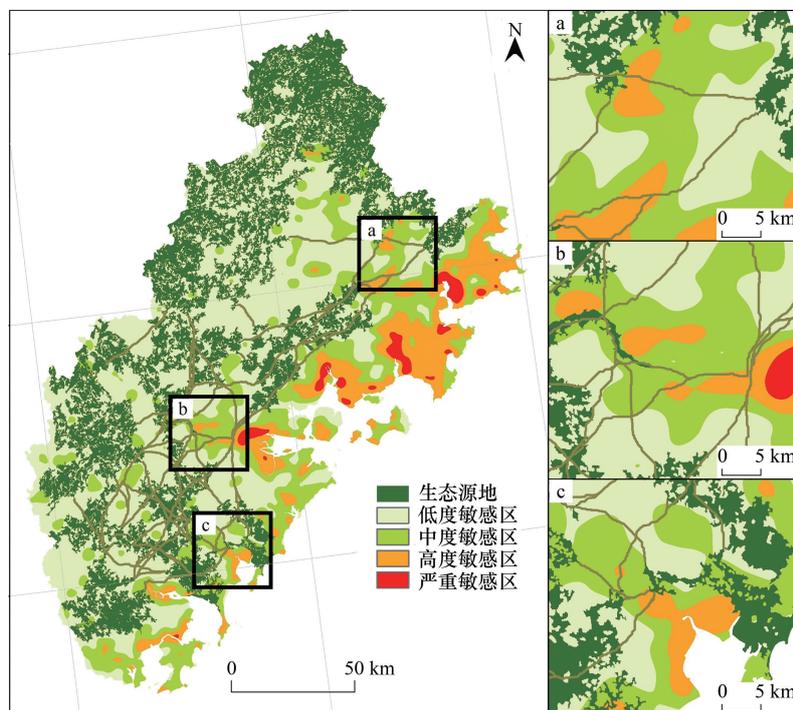


图5 生态保护空间预警点

Fig.5 The early warning area of ecological protection space

地外的生态空间,也对部分生态廊道也造成了阻断,不利于区域整体生态安全格局保护,如德化县、南安市、厦门市、漳州市辖区、漳浦县等区域。生态源地与建设用地之间越邻近,生态源地边缘区受到的胁迫越大,这些潜在受到胁迫的地区作为生态空间预警点应注重构建生态源地缓冲区,以使生态源地受到干扰的程度降到最小。研究中所提取的潜在生态廊道指示了区域生态源地之间相互交流与物质交换的可能有效路径,生态廊道建设的宽度未定,通过生态空间预警点的划分有助于进一步确定生态廊道保护与建设的具体范围与宽度。社会经济与城镇化过程中,建设用地的增长是不可避免的。根据研究结果,研究区建设用地扩张切不可延续当前扩张速率,把握增量建设用地的布局,盘活存量建设用地,确定城镇开发边界,并在国土空间规划中进行重新规划布局,是生态保护的重要措施。因此,研究建议重点关注可能对生态空间造成极大威胁的区域用地类型变化,在满足社会经济发展需求的前提下,尽量减少新增建设用地,合理布局新增建设用地;盘活存量用地,调整原有建设用地规划布局,结合生态保护修复格局确定重点生态保护修复区域,规划具有弹性的国土空间布局,保障生态安全格局的完整性,合理规避相关人为影响的生态胁迫,保证人与自然和谐共生。

#### 4 讨论与结论

在网格尺度下,研究划分与预警生态保护修复区可为厦漳泉地区生态修复保护提供基础信息,并对国内其他区域识别国土空间生态修复区提供借鉴。研究综合利用多源数据考虑生态源地的动态稳定性选取 12 个斑块作为生态源地,并通过研究区的生境质量与生态系统服务价值验证了所选取生态源地的有效性,避免了部分研究选取林地、水域等单一土地类型作为生态源地的不足。利用 MSPA、MCR 模型等方法识别了 66 条潜在生态廊道和 13 条重要生态廊道,识别两级生态节点,以此构建了厦漳泉地区的生态安全格局。以生态安全格局为依据划分生态保护修复分区能够以人类福祉为目标,从系统整体出发识别和配置区域空间要素,以进行国土空间生态保护修复分区识别与划分。且生态保护修复不仅要“治已病”,更要“治未病”,仅停留与过去或现状评价量化研究成果开展保护修复存在一定的弊端。因此,研究通过模拟生态安全格局限制下的 2030 年土地利用变化,对可能受到建设用地扩张胁迫的区域做出预警。基于以上,研究识别了“一带、两核心”生态保护修复分区与未来生态保护空间预警点,基本明晰厦漳泉地区亟待生态保护修复空间位置主要集中在泉州市辖区、晋江市、石狮市、漳州市辖区与龙海市等区域。

研究主要是基于全域综合角度进行构建生态安全格局,暂未考虑区域具体特殊的物种或尺度的生态安全格局,未来研究可考虑针对不同目的的生态修复构筑不同尺度的生态安全格局以识别待保护修复空间。同时,未来可针对研究建议中次级生态源地与预警点缓冲区等的有效构建、生态廊道宽度阈值的设定以及生态修复措施等更加具体化的问题开展深入研究,如研究中建议在厦门市、晋江市、石狮市等地方构建一定规模的城市绿色基础设施形成次级生态源地,但当前城镇化仍在快速发展,区域建设用地本就欠缺,在城市内部如何平衡生态用地和建设用地之间比例的配置以最好地发挥效用是一个亟待解决的问题。

厦漳泉地区生境质量与生态系统服务价值相对较低,基于景观生态学视角构建生态安全格局和生态保护修复分区,以及从土地利用动态变化的角度提出生态保护空间预警是保护区域生态安全的一种有效途径。研究建议,要协同生态保护修复核心区与预警区域以确定区域生态保护修复等级以开展区域整体生态保护修复工作,合理控制建设用地增长,并优化区域国土空间格局以维护区域生态安全格局的完整性。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 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.
- [ 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 ] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [ 4 ] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 干旱区城市生态安全格局优化研究——以内蒙古呼和浩特市为例. 水土保持研究, 2020, 27(4): 336-341.
- [ 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 ] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175.

- [ 7 ] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长远景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [ 8 ] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 宋荣. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建——以广西河池为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2596-2608.
- [ 9 ] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 王晶晶, 徐文彬. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1608-1616.
- [ 10 ] 潘竞虎, 王云. 基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化. 生态学报, 2021, 41(7): 2582-2595.
- [ 11 ] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. 生态学报, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [ 14 ] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 456-459.
- [ 15 ] Huang J M, Hu Y C, Zheng F Y. Research on recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: a case study of Jinan City. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(11): 12414-12427.
- [ 16 ] 于超月, 王晨旭, 冯喆, 吴克宁, 赵华甫. 北京市生态安全格局保护紧迫性分级. 北京大学学报: 自然科学版, 2020, 56(6): 1047-1055.
- [ 17 ] Xie H L, He Y F, Choi Y, Chen Q R, Cheng H. Warning of negative effects of land-use changes on ecological security based on GIS. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135427.
- [ 18 ] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [ 19 ] 福建省统计局, 国家统计局福建调查总队. 福建省统计年鉴-2019. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [ 20 ] 刘媛. 基于 MCR 模型的志丹县土地利用生态安全格局构建[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [ 21 ] Taylor P D, Fahrig L, Henein K, Merriam G. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 1993, 68(3): 571-573.
- [ 22 ] 刘依川, 陈志彤, 陈松林, 应朝阳. 福建省草地资源生态安全评价. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2019, 48(4): 510-516.
- [ 23 ] Saura S, Torné J. Conefor sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(1): 135-139.
- [ 24 ] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(2-3): 91-103.
- [ 25 ] 陈春娣, 吴胜军, Douglas M C, 吕明权, 温兆飞, 姜毅, 陈吉龙. 阻力赋值对景观连接模拟的影响. 生态学报, 2015, 35(22): 7367-7376.
- [ 26 ] 黄苍平, 尹小玲, 黄光庆, 袁少雄, 王钧, 赖勇. 厦门市同安区生态安全格局构建. 热带地理, 2018, 38(6): 874-883.
- [ 27 ] 吴健生, 牛妍, 彭建, 王政, 黄秀兰. 基于 DMSP—OLS 夜间灯光数据的 1995—2009 年中国地级市能源消费动态. 地理研究, 2014, 33(4): 625-634.
- [ 28 ] 杨彦昆, 王勇, 程先, 李维杰, 高敏, 王家录, 傅俐, 张瑞. 基于连通度指数的生态安全格局构建——以三峡库区重庆段为例. 生态学报, 2020, 40(15): 5124-5136.
- [ 29 ] Peng J, Zhao H J, Liu Y X. Urban ecological corridors construction: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 23-30.
- [ 30 ] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [ 31 ] Liang X, Liu X P, Li X, Chen Y M, Tian H, Yao Y. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 177: 47-63.
- [ 32 ] Mo W B, Wang Y, Zhang Y X, Zhuang D F. Impacts of road network expansion on landscape ecological risk in a megacity, China: a case study of Beijing. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1000-1011.
- [ 33 ] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 范胜龙. 基于土地利用情景的福建省生态经济系统协调度时空演变模拟. 水土保持研究, 2021, 28(1): 234-241.
- [ 34 ] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 范胜龙. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4080-4090.