

基于MCR和重力模型的县域生态安全格局构建

——以福建省永春县为例

晁云舒^{1,2}, 严雨桐^{1,2}, 闫思嘉^{1,2}, 潘辉^{1,2}, 巫丽芸^{1,2}

(1.福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2.福建省南方森林资源与环境工程技术研究中心, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 构建具有区域特色的生态安全格局,为生态环境的保护及县域尺度下的生态安全格局构建和分区管理提供科学参考。[方法] 以福建省永春县为研究对象,参考《生态保护红线划定指南》,选取水土保持、水源涵养、生物多样性保护及对永春县生态具有重要作用的林业保护共4项指标进行定量评估,以识别源地;利用最小累计阻力模型(minimal cumulative resistance, MCR)和重力模型的方法,构建生态廊道并对廊道的重要性进行分级评价,提取生态节点,构建永春县生态安全格局。[结果] 识别出的永春县生态源地共11块,总面积为64.8 km²,占区域总面积的4.45%;构建了55条生态廊道和27个生态节点,其中重要廊道25条,次要廊道30条,集中在中部和东部地区呈网状分布。[结论] 依据生态源地识别和廊道划分结果,构建了永春县以源地为核心,廊道为网络,生态节点为重点的生态安全格局框架,生态源地间相互作用强度差异明显,中部地区源地分布密度和生态廊道稳定性大于西部地区,应作为重点保护区域。

关键词: MCR模型; 生态源地; 重力模型; 生态安全格局; 福建省永春县

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)04-0203-08

中图分类号: X171.1, X37

文献参数: 晁云舒, 严雨桐, 闫思嘉, 等. 基于MCR和重力模型的县域生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 203-210. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.025; Chao Yunshu, Yan Yutong, Yan Sijia, et al. County scale ecological security pattern construction based on MCR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 203-210.

County Scale Ecological Security Pattern Construction Based on MCR Model

—A Case Study of Yongchun County, Fujian Province

Chao Yunshu^{1,2}, Yan Yutong^{1,2}, Yan Sijia^{1,2}, Pan Hui^{1,2}, Wu Liyun^{1,2}

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2.Fujian Southern Forest Resources and Environmental Engineering Technology Research Center, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: [Objective] An ecological security pattern with regional characteristics was constructed in order to provide a scientific reference for the protection of the ecological environment and the construction and zoning management of ecological security patterns at the county level. [Methods] Referring to the *Guide for Delimitation of Ecological Protection Red Lines*, we selected four indicators for quantitative evaluation of ecology at Yongchun County in Fujian Province: soil and water conservation, water conservation, biodiversity protection, and forestry protection. The minimum cumulative resistance (MCR) model and the gravity model were used to build the wildlife corridor, evaluate the importance of the corridor by grades, extract ecological nodes, and construct the ecological security pattern of Yongchun County. [Results] A total of 11 ecological source areas were identified in Yongchun County, with a total area of 64.8 km², accounting for 4.45% of the total area. Fifty-five ecological corridors and 27 ecological nodes were constructed, including 25 important corridors and 30 secondary corridors that were concentrated in the central and eastern regions with a reticular distribution. [Conclusion] According to the results of ecological source identification and corridor division, an ecological security pattern framework for Yongchun County was constructed, with source as the core, corridor as

收稿日期: 2022-10-10

修回日期: 2022-12-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“复杂性灾害风险下的东山岛海岸带生态系统健康响应机制及海岸带综合风险管理研究”(31200365); 福建农林大学林学高峰学科建设项目(72202200205)

第一作者: 晁云舒(1997—), 男(汉族), 安徽省六安市人, 硕士研究生, 研究方向为自然资源管理。Email: 773981961@qq.com.

通讯作者: 巫丽芸(1977—), 女(汉族), 福建省光泽县人, 博士, 副教授, 主要从事海岸带森林与环境研究。Email: lywu2001@163.com.

the network, and ecological nodes as the focus. The interaction intensities between ecological source areas were obviously different. The distribution densities of source areas and the stability of the wildlife corridor in the central region were greater than in the western region, and should be regarded as key protection areas.

Keywords: MCR model; ecological source; gravity model; ecological security pattern; Yongchun County, Fujian Province

目前,中国经济发展进入转型阶段,生态文明和美丽中国建设也被提升到国家发展的战略高度^[1-2]。近年来,随着城市化进程的加快,城市边界的拓展导致了大量的生态用地被侵占,城郊间生境斑块破碎化等问题。这不仅对当地的生物栖息地和生物多样性造成了严重的破坏,而且影响到人类日常生活中的物质和能量的流动,最终危及到人类自身的可持续发展^[3-4]。因此,构建科学合理的生态安全格局不仅可以促进当地经济发展、增进居民福祉,对保护生物多样性、保障生态系统结构的完整性以及保护区域的生态安全都起到了至关重要的作用^[5]。

生态安全格局理论基础基于过程—格局间的耦合关系,强调景观中潜在一些生态空间格局,其由景观的重要元素、空间位置及其相互联系构成,对特定地段的生态过程调控和维护具有重要的作用^[6]。依据该理论,国内外学者在生态安全格局的构建和优化方面做了大量的研究,其研究区域多分布在生态敏感、生态环境脆弱及生境质量不断恶化的地区^[7-8]。生态安全格局构建的方法主要包含最小累计阻力模型(MCR)、电路理论、图论等^[9-11]。近年来也有不少学者依据供需理论,运用 INVEST 模型构建生态安全格局^[12-14]。其中,MCR 模型因其可以较好地反映景观格局演变和生态过程变化之间的相互作用关系,而被研究者们广泛应用在该领域。MCR 模型的除了应用在生态安全格局构建外,还被延伸到了国土资源规划、生态安全红线划定等领域^[15-16]。当前,生态安全格局构建的基本模式多从源地、阻力面和生态廊道 3 方面出发^[17-18]。在源地识别方面,谢花林等^[19]将研究区内的自然保护区识别为源地,陈昕等^[20]则通过重要性、敏感性和景观连通性 3 方面选取指标共同评价源地;在构建生态阻力面方面,尹海伟等^[21]采用专家打分法对不同景观类型阻力进行赋值,谭华清等^[22]利用 PM_{2.5} 浓度和夜间灯光指数对生态阻力面进行修正,以提升结果的准确性。近年来,利用 MCR 模型构建生态廊道也成为廊道模拟的基本模式^[18]。以往的生态安全格局研究中,大多集中在省域、市域尺度,在县域尺度下因基础数据资料不足,导致县域尺度下生态安全格局存在构建不合理,生态保护不到位等问题^[23]。福建省永春县作为国家重点生态功能试点区域,长期以来重视生态环境的保护,当

地政府将生态安全格局构建作为未来城市规划的重要内容。本文以永春县为研究区域,在生态系统服务重要性评价方法中,借鉴《生态保护红线划定指南》(简称《指南》)^[24]。此外,在指标选取中为更好地反映永春县的生态需求和实际情况,征求当地有关部门的意见并参考区域内生态保护用地及生态保护红线划定的成果,将当地具有重要作用的生态公益林、较为集中的林地作为林业保护重要性纳入评价体系,利用 MCR 模型和重力模型,共同构建永春县生态安全格局。本文旨在为县域尺度下城市空间的规划和管控及生态安全格局精确构建提供参考和科学借鉴。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

永春县位于福建省东南部,位于(25°13′15″—25°33′45″N,117°41′55″—118°31′9″E)之间,东邻仙游县,西接漳平市,北部连大田和德化县。永春县境内山多地少,西北部地区地势较高,东部地区地势低缓,南部地区平坦,地势呈西北高东南低的趋势,地貌种类丰富多样。永春县境内总面积 1 468 km²,辖 22 个乡镇,林地面积 70 800 hm²,森林覆盖率超过 66%,林木蓄积量 2.84×10⁶ m³,生态公益林 32 267 hm²,是该省重点林区县之一。县域内林面积较大,包含轴木兰、钟萼木、水松、红豆杉、青檀等诸多名贵树种,拥有牛姆林省级自然生态保护区、永春魁星岩及多处森林公园和湿地公园,具有良好的生态环境条件。

1.2 数据来源

本文所需数据及来源:①永春县 2016 年土地利用数据(栅格)、DEM 数据(栅格)和行政区划数据(矢量)由福建省地质测绘院遥感中心提供(该区以上数据多年来基本稳定);②2020 年 NPP 数据(栅格)来源于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>);③2020 年永春县气象数据(矢量)源自永春县气象局,在 ArcGIS 中用克里金插值法获取;④2020 年永春县林业保护数据(矢量),来源于永春县林业局;⑤以上数据在 ArcGIS 中统一转换为 30 m×30 m 精度并进行数据处理。

2 研究方法

2.1 生态源地识别

生态源地是区域内生态系统相对稳定的区域,是

不同物种聚集地,在促进物种繁衍和维持区域内生物多样性方面具有重要的作用^[25]。此外生态源地还提供生态供给服务以维持区域内生态安全,既具有保护生物多样性的作用,同时也具有维持生态系统调节服务的重要作用。因此,生态系统服务重要性成为源地划定的关键因素,以往的研究中有学者采用定性方法选取自然保护区、森林公园、大型湿地作为重要的生态源地^[26]。本文为研究结果更加客观,从生态系统服务重要性出发,采用定量分析的方法选取指标。参考《指南》中的生态系统服务重要性的划定方法,选取了水土保持重要性、水源涵养重要性、生物多样性保护重要性,同时永春县为保护其生态环境长期开展大量林业保护工程,包括重点公益林和重点树种的保护,这些林业保护工程对维护永春县生态安全具有重要作用,也体现人类活动对于生态保护的正向效益,因此增加了林业保护重要性为生态系统服务重要性指标,通过 4 项生态因子对永春生态系统服务重要性进行定量评价,水土保持因子、水源涵养因子、生物多样性因子的评价方法如下。

$$S_{por} = NPP_{mean} \times (1-K) \times (1-F_{slo}) \quad (1)$$

式中: S_{por} 为水土保持服务能力重要性; NPP_{mean} 为植物净初级生产力; K 为土壤可侵蚀因子, K 参考 2017 年环境保护部和国家发改委联合颁发的《生态保护红线划定指南》中的计算方法,结合永春县土壤类型图中的土壤质地计算获取数值; F_{slo} 为归一化的坡度栅格图。

$$WR = NPP_{mean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1-F_{slo}) \quad (2)$$

式中: WR 为水源涵养服务能力; NPP_{mean} 为植物净初级生产力; F_{sic} 为土壤渗透因子,参考了《生态保护红线划定指南》,根据土壤质地类型由黏土到砂土分

别在 0~1 之间均等赋值得到,砂土赋值为 1,壤土为 0.5,黏土 0; F_{pre} 为多年平均降雨量; F_{slo} 为归一化的区域坡度栅格图。

$$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{temp} \times (1-F_{alt}) \quad (3)$$

式中: S_{bio} 为生物多样性保护服务能力指数; NPP_{mean} 为植物净初级生产力; F_{pre} 为多年平均降雨量; F_{temp} 为多年平均气温; F_{alt} 为海拔因子。

水土保持重要性、水源涵养重要性、生物多样性保护重要性在 ArcGIS 中采用自然断点法将评价结果分为 4 个等级,林业保护重要性等级划分为高、较高、一般、低 4 个等级,将矢量图转为精度为 30 m × 30 m 的林业保护重要性栅格图层数据,获取 4 项指标的单因子重要性图层。以上 4 项生态因子对永春县生态安全都具有不可替代作用,认为其重要性相同,尤其在地质灾害多发的东南山区县更为明显,因此将未分级的 4 项因子栅格图层在 ArcGIS 中利用 Con 函数进行等权叠加,得到永春县生态系统服务重要性,使用自然断点法进一步分级,从评价结果中选择面积大于 2 km² 且重要性最高的斑块作为生态源地^[20]。

2.2 综合阻力面建立

景观单元的差异性会使物种在移动的过程中受到不同的阻力,阻力越大越不利于该地区生态系统服务过程^[9]。本文综合永春县地形、地貌、气候等特征从自然和社会角度选取了坡度、高程等 7 个评价指标作为阻力面构建中的阻力因子。将各阻力因子划分为 5 个等级并赋值,采用 AHP 法确定各因子的权重。再使用 ArcGIS 中空间叠加分析的方法将各因子加权求和,得到生态用地综合阻力面阻力值,并绘制综合阻力面阻力图(图 1)。阻力因子赋值参考相关研究成果^[19],详细分级和赋值详见表 1。

表 1 永春县不同土地利用类型阻力赋值

Table 1 Resistance value of different land use types at Yongchun County

因素	权重	阻力分级				
		1 级	3 级	5 级	7 级	9 级
高程/m	0.113 3	<300	300~600	600~900	900~1 200	>1 200
坡度/(°)	0.113 3	<3	3~8	8~15	15~25	>25
与邻近水域距离/m	0.113 3	<50	50~100	100~150	150~200	>200
距国、省道/m	0.102 4	>4 000	3 000~4 000	2 000~3 000	1 000~2 000	<1 000
NPP/(g · m ⁻²)	0.185 9	>80	60~80	40~60	20~40	<20
水土保持/t	0.185 9	>2 400	1 800~2 400	1 200~1 800	600~1 200	<600
土地利用类型	0.185 9	林地、水域	灌木林、水田	旱地、草地、园地	建设用地、交通用地	裸地、采矿用

2.3 生态廊道及生态节点的识别

生态廊道可以将原本孤立的源地相连,同时为生态系统服务过程提供保障。本研究中生态廊道的构建使用的是国际通用的 MCR 模型,目前在生态学及环境保护等领域广泛运用^[27]。在阻力面构建基础

上,利用 ArcGIS 中的 cost-distance 和 cost-path 模块,获取最小成本路径,整合这些路径可以获取源地之间的潜在生态廊道。生态节点是廊道上生态相对脆弱的点,易受到外界的影响和破坏,然而生态节点在维持源地间物质交换、加强源地间联系以及维系研

究区生态完整性方面有着重要的战略作用^[28]。本文中通过提取生态廊道的交点、廊道和最小路径的交点,剔除重复的点后,将交点处确定为生态节点。

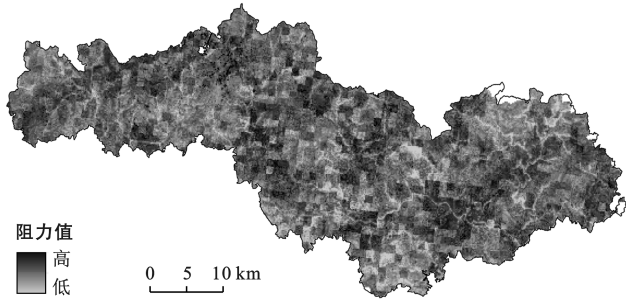


图 1 永春县综合阻力面图

Fig.1 Map of comprehensive resistance surface at Yongchun County

2.4 重力模型

廊道的构建中受诸多因素的影响,形成的生态廊道也会存在较大的差异性,生境质量好,景观阻力较小的源地间形成的廊道对保持生态功能的连通和生态系统安全具有重要的作用^[29]。重力模型可以量化源地间的相互作用力的大小,依此可评价廊道的相对重要性。依据重力模型,构建了 11 块源地之间的相互作用关系矩阵,从而量化生态源地之间相互作用力,并对廊道的重要性进行分级。根据模型计算结果,以 100 为临界值,将值大于 100 的生态廊道,作为重要廊道,其余的廊道为次要廊道。

3 结果与分析

3.1 永春县生态系统服务重要性及源地识别分析

采用单因子评价方法,评价永春县水土保持重要

性、水源涵养重要性、生物多样性重要性以及林业保护多样性。分布空间如图 3 所示,并对 4 类重要性进行面积统计(表 2)。

由图 2 可以看出,水土保持评价结果表明极重要地区面积为 127.23 km²,占总面积的 8.75%,主要分布在东部湖阳镇,中部的仙夹镇以及西部的下洋镇附近,在该地区分布较多的森林公园和国家自然保护区,具有较强的水土保持能力;水源涵养评价结果表明,极重要地区面积为 94.63 km²,面积比例为 6.5%,研究区内分布较多的水库和饮用水水源保护区,对涵养水源起到了重要的作用,在空间分布上具有中部集中,西部零散的特点。中部地区主要集中分布苏坑镇、蓬湖镇和达埔镇地区,在西部地区在桂洋镇和坑仔口镇及周边地区有零星分布;生物多样性结果显示,极重要地区面积为 224.21 km²,面积比例为 15.4%,呈现出条带状分布的特点,从西部的东关镇到中南部的仙夹镇;林业保护重要性评价结果表明,极重要面积为 15.87 km²,占总面积的 1.09%,空间分布上,极重要区域集中分布于永春县的东南部,在北部和西部地区也有零散分布。基于水源涵养、土壤保持、生物多样性、林业保护 4 项指标对研究区生态源地进行识别(图 3),总计筛选出 11 块生态源地,总面积为 64.8 km²,占区域总面积的 4.45%。这些源地基本包含了永春县内重要的牛姆林自然保护区、森林公园及饮用水源保护区,表明源地选择较为准确,基本符合研究区的实际情况。由图 3 的可以看出,生态源地分布密度存在较为明显的差异性,在永春县中部的石鼓镇和仙夹镇,东部的东平镇附近较为集中,少数分布在西部地区的下洋镇和横口乡。

表 2 永春县生态系统服务重要性评价结果

Table 2 Evaluation results of importance of ecosystem services at Yongchun County

项目	一般重要		较重要		重要		极重要	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
水土保持	596.05	40.94	429.78	29.52	302.83	20.79	127.23	8.75
水源涵养	425.71	29.24	628.51	43.17	307.05	21.09	94.63	6.50
生物多样性	221.30	15.20	395.86	27.19	614.54	42.21	224.21	15.40
林业保护	393.68	27.04	1 020.15	70.07	26.21	1.80	15.87	1.09

3.2 MCR 及重力模型分析

基于 MCR 模型在源地间总计构建了 55 条生态廊道,生态节点 27 处,廊道分布(如图 4 所示),呈现中东部密集,西部稀疏的特点。生态廊道间相互链接构成了闭合的网络结构,其中,重要廊道间以石鼓镇为中心点,向达埔镇、仙夹镇、东平镇和介福乡辐射,构成重要廊道网络。次要廊道以蓬湖镇为中心,在下洋镇、吾锋镇、达埔镇和坑仔口镇间形成次要廊道网络。生态节点分布特征和廊道相呼应,呈现中部和南部分布密集,

西部分布稀疏的特点。依据表 3 重力模型矩阵计算结果,55 条生态廊道依据重要程度被划分为两类,重要廊道 25 条,次要廊道 30 条。由图 3 中可以发现,源地间相互作用强度具有明显的不均衡性,因此在源地基础上形成的生态廊道也存在较大差异性。重要廊道主要分布于研究区中部和南部地区,且分布较为密集,东西部地区重要廊道分布较少,多为次要廊道,且分布较为稀疏。说明中部和南部地区源地间相互作用强度较大,廊道的重要性较高,而东部和西部地区源地间相互

3.3 永春县生态安全格局构建

本研究在叠加生态系统服务重要性 4 项指标的基础上,识别生态源地、构建生态廊道和生态节点,得到了以源地—廊道—节点为基础的永春县生态安全格局重要性评价结果(图 5)。从评价结果中可以发现永春县生态安全表现出中南部高,东西部低的特点,生态安全以较重要类型为主,占总面积的 51.84%,集中分布在西部的一都镇和横口乡,在中部地区有零星分布。生态安全极重要地区面积最小,为 125.81 km²,占总面积的 8.57%,与生态源地的空间位置分布相匹配,总体上呈现出一定的破碎化的特点,但在中部和南部的部分地区分布相对集中,表现出一定的集聚效应。极重要生态用地在研究区内比例最小,但这些区域的生态源地分布集中,生态廊道和节点密度较大,对于维护研究区基本的生态功能和保障区域内的生态安全具有重要的作用,也是永春县生态保护的地区。

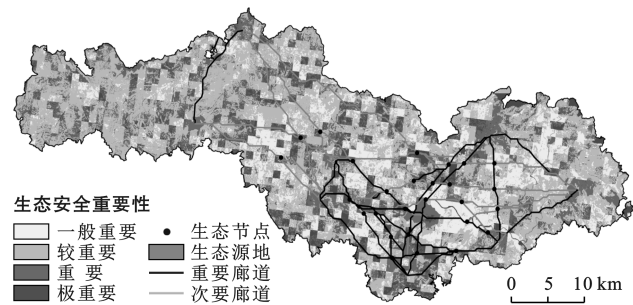


图 5 永春县生态安全格局

Fig.5 Ecological security pattern of Yongchun County

4 讨论与结论

4.1 结论

(1) 永春县生态系统服务重要性识别出的生态源地共 11 块,总面积为 64.8 km²,占区域总面积的 4.45%,主要集中在中部的蓬湖镇、石鼓镇和南部的仙夹镇附近,包含了研究区内重要的自然保护区和森林公园。

(2) MCR 和重力模型,得到生态廊道 55 条,其中重要廊道 25 条,次要廊道 30 条,生态节点 27 个,生态廊道和生态节点在中部分布密集,东部和西部分布稀疏,重要廊道在中部地区呈现网状分布,表明永春县中部地区的生态系统连通性和完整性最高。

(3) 生态系统服务重要性的评价结果显示,永春县整体生态安全重要性不高,存在一定破碎化现象,其中一般重要地区比例最高,主要分布在永春县东部和西部地区,这些地区分布面广,生态安全度较低,属

于非核心保护区域。生态安全极重要的地区比例最低,和源地分布相对应,主要分布在中部地区,该区域内廊道和节点密度高,生态环境质量最好,属于永春县生态保护的核心理区域。

(4) 在未来的生态规划中可采取分区管控策略,以生态源地保护为核心,合理地规划生态廊道,同时优化生态节点的布局,筛选并保护具有重要作用的“踏脚石”,进而获取生态效益。

4.2 讨论

4.2.1 永春县生态保护策略 县级地区是连接城市和乡村的桥梁,如何协调发展和保护的关系是今后亟需解决的问题。以往许多研究中将大面积的土地纳入核心保护区并严格限制开发,这样虽起到了一定的保护作用,却也忽视了当地的发展需求。为平衡生态保护和区域发展的关系,依据永春县生态安全格局研究结果,从源地—廊道—节点三方面出发,提出了分区管理措施有针对性地进行保护。

永春县中部和南部地区生态源地分布相对密集,应以源地的保护为重点,可以采取植树的方式增加绿化面积,提升景观连通性和生态系统的稳定性。西部地区源地分布稀疏,虽生态环境质量较低,但该区域城镇密度小,受人为因素的干扰较少,可采取自然修复的措施不必投入过多经济资源。永春县中部和东部地区生态廊道尤其是重要廊道分布密集,将原本相互孤立的源地连接起来,构成了永春县天然的生态屏障,应优先建设中部地区的重要廊道,在交通线路规划时尽量避免廊道分布密集和廊道交汇的区域,保障区域生态网络连接的完整性。生态节点的分布中可以看出中部和南部地区的节点密度明显高于西部地区,说明中部和南部地区的物质和能量交换频繁高效,这些生态节点也可成为生物移动过程中的“踏脚石”,应优先以中部和南部地区的生态节点建设规划为主,在完善中部和南部地区节点规划的基础上,逐步向东西部地区的节点延伸。在未来的规划中需抓住核心保护区域,将源地—廊道—节点结合分区管理可在不占用较多土地资源的同时,实现发展和保护的“双赢”。

4.2.2 生态安全格局尺度问题 生态安全格局的构建对于协调区域生态文明的建设和未来的规划发展具有重要的意义。其中构建尺度一直是该研究中的热门问题。目前该研究多集中在大、中尺度,对小尺度区域研究较少,但不论何种尺度研究,不同尺度间生态安全格局均存在一定的差异性,尤其在小尺度区域上的研究很难直接用于大尺度区域。虽然,已有许多学者利用生态安全格局进行生态功能区、生态敏感

区的划定,可由于缺乏统一的标准,仍出现了规划区域和城市发展不匹配的问题。所以,小尺度区域的研究更需因地制宜考虑当地实际。本研究在永春县生态安全格局构建中,加入了符合当地生态保护需求的林业保护重要性指标以确保评价结果的准确性,但小尺度地区具有较强的异质性,林业保护指标对于永春县以森林覆盖率较高的地区较为适用,其他地区在使用前仍需考虑到研究区的具体情况,不可照搬套用。因此,本文可以为小尺度下生态安全格局研究提供补充,也可为其他县域尺度生态保护提供一定的借鉴。

4.2.3 与相关研究的比较分析 目前尚未有针对永春县生态安全格局构建的相关研究,故将本研究和其他地区的生态安全格局研究结果进行比较。通过比较发现,本研究识别出永春县生态源地面积比例较小,这可能与生态源地选取因素的差异有关,尹海伟等^[21]在源地选取时将重要的自然保护区和森林公园等确立为源地;吴茂全等^[30]则是把生态安全划分为5个等级,选取前两个等级作为生态源地,而本研究基于生态系统服务重要指标,同时考虑对永春县的核心源地进行保护,剔除了一些面积较小分布零散的非核心斑块。此外,永春县生态安全格局存在一定程度的破碎化现象,这与研究区之间存在空间异质性有关。赵宇豪等^[31]及汉瑞英等^[32]分别选取深圳市和北京市为研究区域,构建出的生态安全格局破碎化程度相对较低,因为其研究对象为生态相对稳定的城市地区,生态系统完整性较高。永春县地处东南山区,地质灾害多发,原有的生态环境条件较差与上述研究区存在较大差异性,也是造成破碎化现象的重要原因。综上所述,源地选取的指标越多源地面积比例就越小,研究区生态环境质量越低生态破碎化现象就越明显。最后,为验证源地划分的准确性,将选取的源地与永春县生态空间划定已有成果做了比对,最终结果包含了永春县内重要的自然保护区和森林公园等区域,说明选取的生态源地符合当地实际情况,而生态破碎化现象也反映出永春县生态安全度不高,未来需进行合理规划加强保护措施,协调好经济发展和生态保护的关系。

本研究中也存在一定的不足之处,和其他地区相比永春县属于小尺度区域,数据获取难度较大,在阻力面赋值时多参考以往经验采用专家打分法,可能导致结果存在一定的主观性。在今后的研究中需综合考虑当地因素,开展更多的实地勘探工作提高数据的精确度,对阻力因子尝试采用非线性变化赋值方法,减少研究中指标赋值主观性造成的影响,更加深入地探讨永春县生态破碎化现象产生的内在原因。

[参 考 文 献]

- [1] 邱硕,王宇欣,王平智,等.基于MCR模型的城镇生态安全格局构建和建设用地开发模式[J].农业工程学报,2018,34(17):257-265,302.
- [2] Li Yangfan, Li Yi, Zhou Yan, et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment [J]. Journal of Environmental Management, 2012,98:127-133.
- [3] Grimm N B, Faethsh, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities [J]. Science, 2008,319(5864):756-760.
- [4] 叶鑫,邹长新,刘国华,等.生态安全格局研究的主要内容与进展[J].生态学报,2018,38(10):3382-3392.
- [5] 刘洋,蒙吉军,朱利凯.区域生态安全格局研究进展[J].生态学报,2010,30(24):6980-6989.
- [6] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].生态学报,1999,19(1):10-17.
- [7] Liu Dan, Chang Qing. Ecological security research progress in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(5):111-121.
- [8] 王耕,周腾禹.基于文献计量分析的区域生态安全研究热点与趋势[J].生态学报,2019,39(18):6950-6957.
- [9] 陈德权,兰泽英,李玮麒.基于最小累积阻力模型的广东省陆域生态安全格局构建[J].生态与农村环境学报,2019,35(7):826-835.
- [10] 张蕾,危小建,周鹏.基于适宜性评价和最小累积阻力模型的生态安全格局构建:以营口市为例[J].生态学杂志,2019,38(1):229-236.
- [11] Lorom, Oretga E, Arce R M, et al. Ecological connectivity analysis to reduce the barrier effect of roads: an innovative graph-theory approach to define wildlife corridors with multiple paths and with out bottlenecks [J]. Landscape and Urban Planning, 2015,139:149-162.
- [12] 赵宇豪,罗宇航,易腾云,等.基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建[J].应用生态学报,2022,33(9):2475-2484.
- [13] Hong Jiang, Jian Peng, Jian Quandong, et al. Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China [J]. Landscape Ecology, 2021,36:2135-2150.
- [14] Zhao Yuhao, Wang Nan, Luo Yuhang, et al. Quantification of ecosystem services supply-demand and the impact of demographic change on cultural services in Shenzhen, China [J]. Journal of Environmental Management, 2022,304:114280.
- [15] 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.

- [16] 刘孝富,舒俭民,张林波.最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用:以厦门为例[J].生态学报,2010,30(2):421-428.
- [17] Lin Qian, Mao Jiaying, Wu Jiansheng, et al. Ecological security pattern analysis based on InVEST and least-cost path model: a case study of Dongguan water village [J]. Sustainability, 2016,8(2):172.
- [18] 张豆,渠丽萍,张桀滢.基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化:以长三角地区为例[J].生态学报,2019,39(20):7525-7537.
- [19] 谢花林,姚干,何亚芬,等.基于 GIS 的关键性生态空间辨识:以鄱阳湖生态经济区为例[J].生态学报,2018,38(16):5926-5937.
- [20] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):471-484.
- [21] 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.
- [22] 谭华清,张金亭,周希胜.基于最小累积阻力模型的南京市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2020,40(3):282-288,296,325.
- [23] Su Yongxian, Chen Xiuzhi, Liao Jishan, et al. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed landexpansions [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016,19(6):35-46.
- [24] 王李睿,邓西鹏,王晨,等.基于生态系统服务重要性与生态敏感性的生态空间划设:以福建省永春县为例[J].生态学杂志,2022,41(1):166-173.
- [25] 邓红兵,陈春娣,刘昕,等.区域生态用地的概念及分类[J].生态学报,2009,29(3):1519-1524.
- [26] 陈竹安,况达,危小建,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的余江县生态网络构建[J].长江流域资源与环境,2017,26(8):1199-1207.
- [27] 张艺璇,位宏,那嘉明,等.基于 MCR 模型的城市生态安全格局构建:以甘肃省平凉市为例[J].南京师大学报(自然科学版),2021,44(3):54-62.
- [28] 李航鹤,马腾辉,王坤,等.基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(8):1036-1045.
- [29] 朱军,李益敏,余艳红.基于 GIS 的高原湖泊流域生态安全格局构建及优化研究:以星云湖流域为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(8):1237-1250.
- [30] 吴茂全,胡蒙蒙,汪涛,等.基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别[J].生态学报,2019,39(13):4720-4731.
- [31] 赵宇豪,罗宇航,易腾云,等.基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建[J].应用生态学报,2022,33(9):2475-2484.
- [32] 汉瑞英,赵志平,肖能文,等.基于最小累积阻力差值模型的北京市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2022,42(3):95-102.

(上接第 161 页)

- [14] 代云豪,管瑶,刘孟琴,等.1990—2020 年阿拉尔垦区生态环境质量动态监测与评价[J].水土保持通报,2022,42(2):122-128.
- [15] 李蕊,陈国清,李玮贤,等.基于遥感生态指数的神东矿区 1995—2020 年生态环境质量的时空变化特征分析[J].水土保持通报,2021,41(3):143-151.
- [16] Qureshi S, Alavipanah S K, Konyushkova M, et al. A remotely sensed assessment of surface ecological change over the Gomishan Wetland, Iran [J]. Remote Sensing, 2020,12(18):2989-.
- [17] 何天星,田宁,周锐,等.基于 GEE 和 RSEI 的长三角一体化示范区生态环境质量动态评估[J].生态学杂志,2023,42(2):436-444.
- [18] 刘海龙,王跃飞,谢亚林,等.太原城市群三生空间时空演变特征及功能[J].水土保持通报,2020,40(5):310-318,327.
- [19] 王建,赵牡丹,李健波,等.基于 MODIS 时序数据的秦巴山区生态环境质量动态监测及驱动力分析[J].山地学报,2021,39(6):830-841.
- [20] 徐涵秋,李春强,林梦婧.RSEI 应使用主成分分析或核主成分分析? [J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):506-513.
- [21] Li Ning, Wang Jiayao, Qin Fen. The improvement of ecological environment index model RSEI [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020,13:1-14.
- [22] 王芳,李文慧,林妍敏,等.1990—2020 年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析[J].环境科学,2023,44(5):2518-2527.
- [23] 吴小波,范晓雨,刘晓敬,等.基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J].生态学杂志,2023,42(3):759-768.
- [24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [25] 余伟伟,苏晓杰.开发区转型发展与城市空间结构重组的互动:以山西转型综合改革示范区为例[J].城乡规划,2021(S1):28-35.
- [26] 徐补生,赵建军,马跃.岚县“大生态”战略加快绿化步伐[N].山西日报,2011-05-20(01).