

基于生态系统服务的川南经济区生态网络构建

康 澳, 周欣颖, 干晓宇

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 为有利于提高区域生态系统服务功能, 为形成高质量发展的国土空间格, 本研究以川南经济区为研究范围, 采用生态系统服务评估结果提取生态源地, 采用可能连接度指数评价源地重要性程度, 再采用MCR模型识别潜在廊道和生态节点, 得到川南经济区生态网络总体格局。结果显示: (1) 区域生态系统服务功能具有明显的空间异质性, 识别出生态极重要区6133.50 km²; (2) 结合生态功能重要性和景观结构重要性, 共选取27块生态源地, 占研究区面积的12.97%; (3) 识别潜在生态廊道57条, 生态节点21个, 生态断裂点24个。针对网络重点要素提出了优化建议, 构建了“一核五心, 一带多廊”网络格局。

关键词: 生态网络; 生态系统服务; 最小累积阻力模型; 川南经济区

中图分类号: X321 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2024.016003

Construction of ecological network of Southern Sichuan economic zone based on ecosystem services theory

KANG Ao, ZHOU Xin-Ying, GAN Xiao-Yu

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To improve the regional ecosystem service function and form a high-quality development land space grid, this study takes the Southern Sichuan economic zone as the research scope, uses the ecosystem service assessment results to extract the ecological source, and uses the possible connectivity index (PC) to evaluate the importance of the source. Then, the minimum cumulative resistance (MCR) model was used to indentify the potential ecological networks and ecological nodes and the overall pattern of the ecological network in the South Sichuan Economic Zone was obtained. The results show that: (1) The ecosystem service function of the Southern Sichuan economic zone has obvious spatial heterogeneity and 6133.50 km² of extremely important ecological areas were identified. (2) Combined with the importance of ecological function and landscape structure, a total of 27 ecological sources were selected, accounting for 12.97% of the study area. (3) The 57 potential ecological corridors, 21 ecological points and 24 ecological fragile points were identified. Finally, this paper puts forward optimization suggestions for key elements of the ecological network and builds an ecological network pattern of “One core five centers, and one belt multi corridors”.

Keywords: Ecological network; Ecosystem services; Minimum cumulative resistance model; Southern Sichuan economic zone

收稿日期: 2022-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(51108284)

作者简介: 康澳(1999-), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 研究方向为城市生态规划等. E-mail: 643514390@qq.com

通讯作者: 干晓宇. E-mail: ganxy@scu.edu.cn

1 引言

生态网络(Ecological Network)是一种利用廊道将景观资源斑块进行有机连接的网络体系,通过对网络中各要素的识别、保护和修复来维持和提升区域生态安全^[1-3]。它以生物多样性保护与恢复为导向,将城市地域所有绿色空间纳入研究范畴,保证了城市地域生境网络构建的完整性,是推进生态文明建设和高质量发展的重要手段^[4]。

当前的生态网络研究在理论和实践上都产生了较多成果,形成了“源地-廊道-节点”的构建范式,常见的方法有最小累积阻力模型(MCR)、图论法、电路理论等^[5,6]。MCR 模型因能较好地反映景观格局变化和生态过程的相互作用关系而在生态网络领域中得到广泛应用。在网络的构建过程中,生态源地的选取是其关键环节,以往的源地提取方法往往按照自然保护区、风景名胜区的范围进行划定,主观性较强。目前基于 MSPA 形态学分析进行生态源地的提取方法被广泛应用在廊道构建中。MSPA 通过数学形态学原理对栅格图像的空间格局进行度量、识别和分割等处理,能从像元层面识别生态源地的形状、大小和边界^[7]。如杨志广等结合形态学分析方法和景观连接度评价识别了广州市生态源地,并基于最小阻力模型构建了市域生态网络^[8]。然而,MSPA 的源地提取方法注重斑块的形态学特征和结构重要性,较少考虑源地自身的生态功能价值及其对周边环境的影响^[9]。生态源地是关键性生态用地,是具有重要的生态系统服务功能^[10]。目前,越来越多学者引入生态系统服务的概念作为源地生态功能重要性测度标准。生态系统服务是指人类从生态系统获得的各种惠益,在区域及城市尺度上因能较好反映人类需求与生态功能而被广泛应用于生态规划,其测度、评价和管理是认识生态系统与人类福祉联系的重要环节与决策手段^[9,11]。如胡其玉等结合 InVEST 模型对厦漳泉地区生态系统服务进行量化,指导构建了区域级生态网络^[12];王宏亮等通过识别不同生态系统服务聚集情况作为深圳市生态管理分区依据^[13]。因此,本文尝试结合生态系统服务和图论理论,从功能和结构两个层面筛选川南经济区重要生态源地并进行生态网络构建。

随着川南经济区融入成渝双城经济圈的加快,城市化带来的高强度土地开发、高密度人口聚集对区域景观可持续性产生了较大的负面影响,出现了

如生物多样性减少、生态系统服务质量降低、人地矛盾加剧等问题^[14]。本研究采用生态系统服务评估结果为依据提取川南经济区生态源地,并以采用可能连接度指数评价源地重要性程度,再采用 MCR 模型和重力模型识别潜在廊道和生态节点,得到川南经济区生态网络总体格局,针对生态网络中的重点要素提出优化策略,为川南经济区的生态网络构建提供科学借鉴,为形成高质量发展的国土空间格局提供参考。

2 材料与方法

2.1 研究区及数据来源

2.1.1 研究区概况 川南经济区位于四川、贵州、云南、重庆三省一市交界处,包含自贡、泸州、内江、宜宾四市,28 个县(区)($27^{\circ}40' \sim 30^{\circ}2'N$, $102^{\circ}56' \sim 106^{\circ}20'E$),是连接成渝经济区、大西南、长江上游经济带的重要枢纽,是四川省第二大经济体。境内多丘陵山地,地形丰富,海拔在 173~1994 m 之间,整体西南高、东北低,自然本底良好,地处长江上游重要生态涵养区,气候湿润,林地广泛,降水充足。全区面积 34 419.23 km²。

2.1.2 数据来源 2020 年川南经济区土地利用数据(30 m 空间分辨率)、DEM 数字高程模型(90 m 空间分辨率)来自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>);植被净初级生产力(500 m 空间分辨率)、归一化植被指数(250 m 空间分辨率)来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>);气温、降水量、蒸散量等气象数据(1 km 空间分辨率)来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>);土壤可蚀性因子、坡长坡度因子(1 km 空间分辨率)来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>);土壤类型栅格数据(1 km 空间分辨率)来源于联合国粮农组织提供的世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(<https://www.fao.org/home/zh>)。将以上数据利用克里金插值法转换为 500 m×500 m 的栅格数据。

2.2 研究方法

2.2.1 基于生态系统服务的生态源地提取 生态系统服务类型的选择参考《生态保护红线划定指南》(2017 年)及《四川省国土空间生态修复规划》(2021—2035 年),选择水源涵养,土壤保持,生境质量,固碳释氧四种生态系统服务进行定量化分析。具体量化方法如下:

(1) 水源涵养服务

水源涵养服务是指在一定条件下,生态系统将水分存留在系统内部的能力,其与系统内气候、植物、土壤等要素相关. 本文采用 InVEST3.9 软件中的产水量模块(Water Yield)对川南经济区的水源涵养服务进行量化,其计算公式如下:

$$Y_i = [1 - \frac{AET_i}{P_i}] \times P_i \quad (1)$$

式(1)中, Y_i 为栅格 i 上的年产水量(mm); AET_i 为栅格上的实际蒸散发量(mm); P_i 是栅格单元 i 上的年降水量(mm).

(2) 土壤保持服务

本文借助 InVEST 模型 3.9 中 SDR 模块完成土壤保持量的计算. 该模块通过计算潜在土壤侵蚀量(RKLS)与人工管理措施下的实际土壤侵蚀量(USLE)之差,得到土壤保持总量. 其计算公式如下:

$$SR = \sum_i^j [R_i \times K_i \times LS_i \times (1 - C_i \times P_i)] \quad (2)$$

式(2)中, SR 为研究区土壤保持量($t/(hm^2 \cdot a)$), R_i 、 K_i 、 LS_i 、 C_i 、 P_i 分别为空间第 i 个栅格的降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$)、土壤可蚀性因子($t \cdot h/(MJ \cdot mm)$)、坡长坡度因子、植被覆盖因子和人为管理措施因子.

(3) 生境质量服务

生境质量能从整体上反映生态环境的适宜程度,也是维持生态网络和提升人类福祉的重要保障. 本文采用 InVEST3.9 软件中生境质量模块(Habitat Quality)对川南经济区的生境质量服务进行定量化研究. 其计算公式为:

$$Q_{xj} = H_{xj} \times (1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2}) \quad (3)$$

式(3)中, Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数; D_{xj} 为生境退化度,代表土地利用类型 j 栅格 x 对生物的胁迫水平; H_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境适应性; k 为半饱和常数,采用 InVEST 模型的参考取值 0.5.

(4) 固碳释氧服务

固碳释氧服务主要指绿色植物通过光合作用吸收二氧化碳进行碳固定并释放出氧气的过程. 在区域尺度上,植被的净初级生产力(NPP)是固碳释氧服务计算的重要依据. 通过中间物质转化法可以间接求得固碳释氧服务的物质. 其计算公式为:

$$V_g = \sum NPP(x) \times 1.63 \times R + \sum NPP(x) \times 1.19 \quad (4)$$

式(4)中, V_g 代表川南经济区固碳释氧服务总量($g/(m^2 \cdot a)$); $NPP(x)$ 代表某一栅格在某年间的植被净初级生产力($gC/(m^2 \cdot a)$); 1.63 为光合作用方程式中每生产 1 g 干物质所固定的 CO_2 量; R 为 CO_2 中碳的含量,为 27.27%; 1.19 为 1 g 干物质所释放的 O_2 量.

将上述各生态系统服务评价结果按照离差标准化法统一至 0~1 区间,最后将各服务图层等权重叠加,得到综合生态系统服务功能图层. 利用 ArcGIS10.2 自然断点法分为极重要、较重要和一般重要三级. 提取综合生态系统服务评价中极重要区域,并剔除面积小于 $15 km^2$ 的斑块作为川南经济区生态源地^[15].

2.2.2 基于景观连接度的源地等级划分 景观连通性评价是判断各个景观斑块之间的连通性强弱较为有效的办法,维持良好的景观连通性对维持生态系统的稳定和生物多样性有着十分积极的效果. 本文选用 PC 和 dPC 两个景观指数,使用 Conefor2.6 软件对区域尺度下常用的 7 个阈值(500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, 5000 m)进行了模拟,连通概率设为 0.5,通过指数的变化趋势确定最佳距离阈值^[16]. 计算方法如下:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (5)$$

$$dPC = 100\% \times \frac{PC - PC_{\max}}{PC} \quad (6)$$

式(5)(6)中, PC 代表可能连接度指数; n 代表生态源地总数; a_i 、 a_j 代表源地 i 和 j 的面积; p_{ij}^* 是斑块 i 和 j 之间扩散的最大概率; A_L 为景观的总面积. dPC 代表可能连接度指数的变化量,可评价要素对整体景观连接度的重要程度,其值越大则该生态源地在整体格局中越重要^[17].

2.2.3 综合生态阻力面构建 综合生态阻力面描述了物种在不同生境斑块中迁移的难度,反映了生态过程对物种的水平阻力. 生态系统服务水平越高,对物种扩散的阻力就越小,其阻力值就越小^[18,19]. 本文参考 Peng 等人^[18]的研究,将生态系统服务纳入阻力面的构建中,选择土地利用类型、坡度、高程和生态系统服务四个因子构建综合生态阻力面,通过专家打分法对各因子的相对重要程度进行评价,采用 AHP 层次分析法确定权重. 各阻

力因子生态阻力值如表 1 所示.

表 1 川南经济区综合阻力评价指标体系

Tab. 1 Comprehensive resistance evaluation index system

阻力因子	分级指标	阻力值	权重	
土地利用类型	耕地	水田	50	0.45
		旱地	70	
	林地	灌木林地	15	
		疏木林	30	
		其他林地	40	
		高覆盖度草地	40	
草地	中覆盖度草地	50		
		低覆盖度草地	80	
	水域	水域	5	
建设用地	城镇用地	150	0.10	
	农村居民点	120		
	其他建设用地	200		
未利用地	未利用地	100	0.12	
		<8		5
		8~15		15
		15~25		50
		25~35		75
高程/m	高程/m	5	0.33	
		400~600		15
		600~800		50
		800~1000		75
		>1000		100
生态系统服务	生态系统服务	5	0.33	
		15		
		50		
		75		
		100		

2.2.4 基于 MCR 模型的廊道提取 最小累计阻力模型 (Minimum Cumulative Resistance, MCR) 可识别生态流从一个生态源地到另一个生态源地间阻力最小的潜在通道^[20]. 在确立生态源地和综合生态阻力面后, 利用成本距离 (Cost Distance) 工具生成最小累积阻力面, MCR 模型可基于此提取出源地间的最小成本路径 (式 7). 另外, 重力模型通过衡量斑块间相互作用力大小能科学地判定廊道的重要性和建设优先级 (式 8).

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (7)$$

式 (7) 中, MCR 表示最小累积阻力值; f 表示累积

阻力与生态过程的正相关函数; D_{ij} 为源斑块 j 至景观单元 i 的空间距离; R_i 为景观单元 i 处所对应的阻力值.

$$G_{ab} = \frac{N_a N_b}{D_{ab}^2} = \frac{\left[\frac{1}{P_a} \times \ln(S_a) \right] \left[\frac{1}{P_b} \times \ln(S_b) \right]}{\left(\frac{L_{ab}}{L_{\max}} \right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln(S_a) \ln(S_b)}{L_{ab}^2 P_a P_b} \quad (8)$$

式 (8) 中, G_{ab} 是核心斑块 a, b 间的相互作用力强度; N_a 和 N_b 是两斑块的权重系数; D_{ab} 是 a, b 两斑块间潜在廊道阻力的标准化值; P_a, P_b 为斑块 a, b 的阻力值, S_a, S_b 是斑块 a, b 面积; L_{ab} 是斑块 a, b 之间廊道的累积阻力值; L_{\max} 是研究区中所有廊道累积阻力的最大值.

3 结果与分析

3.1 生态系统服务功能分析

根据上述方法评价得到的生态系统服务功能空间分布如图 1 所示. 研究发现, 川南经济区综合生态系统服务以长江为界, 呈现出南高北低的特征 (图 1e). 其中生态系统服务高值区在南部宜宾、泸州市呈聚集连片分布, 而在中部和北部较为分散, 仅在西北内江市小范围聚集. 另外, 水源涵养、土壤保持、生境质量和固碳释氧四种服务的高值区和低值区存在明显的空间分异, 且各服务的高值区分布范围存在明显重叠. 水源涵养服务与其他生态服务呈现权衡关系. 水源涵养功能在空间上呈现出西北向东南递减的变化趋势, 在市域层面内表现出明显的异质性分布. 这里主要是一方面南部存在较多山地、农业用地和建设用地, 由于较大的地形起伏度引起局部地表径流严重, 研究区西南部凉山山系和南部大娄山山系余脉附近的坡地丘陵和海拔较高的山地地区都难以积蓄降水; 另一方面, 由于人为干扰以及较低的植被覆盖率, 导致蒸散量相较于西北部的平缓的森林生态系统更大. 利用自然断点法将综合生态系统服务评价结果分为极重要、较重要和一般重要三个等级 (图 1f). 其中极重要区域面积为 6133.50 km², 占研究区总面积的 17.82%, 主要分布在西部川西高原、四川盆地及云贵高原过渡地带, 89.71% 分布在长江以南. 极重要区均位于距离城市较远的浅丘山林地段, 这里地形丰富, 人为干扰小, 能为生物提供多样生态环境. 较重要区呈圈层状包围在极重要区外围, 总面积为 10784.50 km², 占研究区面积的 31.33%, 能够在其周边起到

良好的缓冲作用. 一般重要区面积为 17 507.97 km², 占比高达 50.85%, 基本覆盖了中部和东北自贡、内江的市域范围, 这里是四川省重要的粮油产地, 耕地面积高达 80%. 总体来看, 生态系统服务

功能的空间异质性与研究区本身的自然地理环境和社会经济发展有着密不可分的联系, 川南经济区生态系统服务功能与人类干扰强度呈现出负相关性.

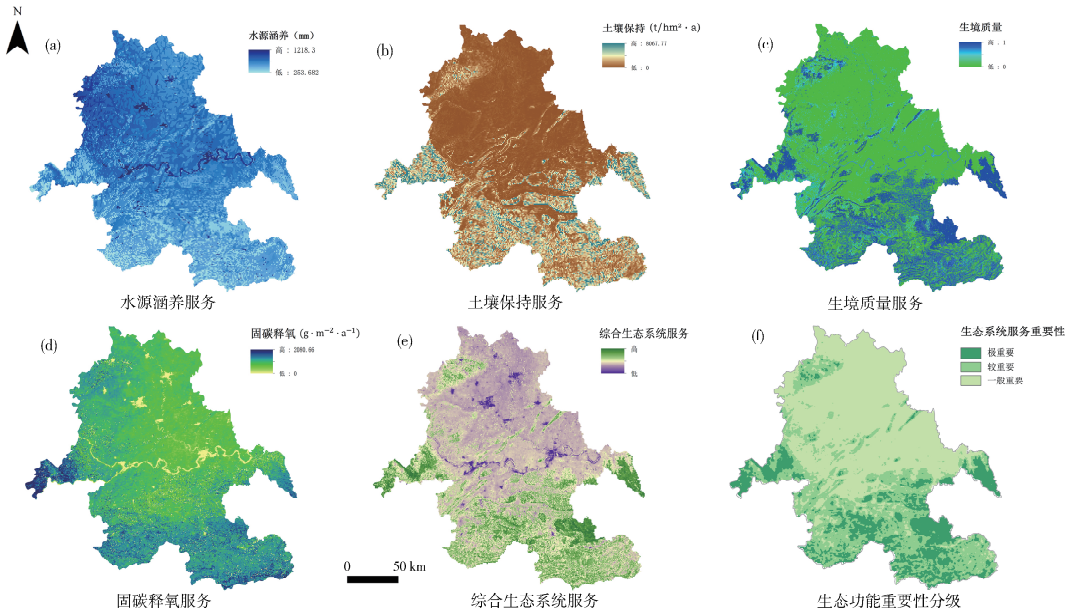


图 1 川南经济区生态系统服务评估结果
Fig. 1 Results of ecosystem service assessment in Southern

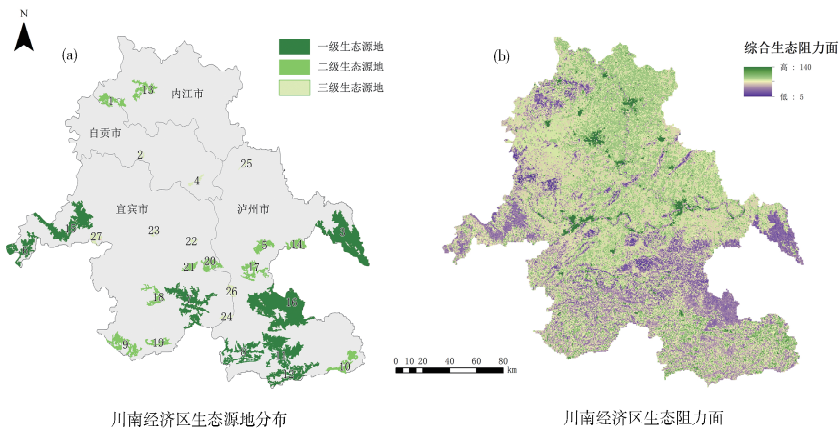


图 2 川南经济区生态源地及综合生态阻力面
Fig. 2 The ecological sources and ecological resistance surface

3.2 川南经济区生态源地提取分析

结合生态系统服务重要性分级结果, 共提取生态源地斑块 27 块, 总面积为 4464.27 km² (图 2a), 占研究区总面积的 12.97%. 从土地利用类型来看, 林地占比最高, 为 66.88%. 其次是草地和水域, 分别为 23.67% 和 9.01%.

根据景观连接度计算结果对各生态源地进行重要性排序, 结果如表 2 所示. 将 $dPC < 0.1$ 的作为三级生态源地, $0.1 \leq dPC < 0.5$ 作为二级生态源地, $dPC \geq 0.5$ 的作为一级生态源地 (图 2a)^[20,21],

得到一级源地 11 块 (3548.35 km²), 二级源地 8 块 (712.15 km²), 三级源地 8 块 (212.77 km²), 分别占生态源地总面积的 79.32%, 15.92% 和 4.76% (图 2a). 由图 2a 可知, 一级源地占生态源地的比例较大, 主要分布在南部的宜宾和泸州两市, 同时具有较好的生态功能和结构完整性, 构成了川南经济区生态源地的主体; 二级源地呈包围状分布在一级源地附近, 仅有 1 号和 13 号源地在北部内江市小范围聚集; 三级源地则零星分布在研究区中部耕地范围, 面积小而破碎, 景观连接度较差.

表 2 川南经济区各生态源地 dPC 重要性

Tab. 2 The importance of dPC of ecological sources

排序	生态源地编号	生态源地面积/km ²	dPC	排序	生态源地编号	生态源地面积/km ²	dPC
1	16	830.620	53.827	15	18	94.430	0.295
2	11	370.670	48.613	16	21	47.680	0.279
3	8	244.200	18.523	17	5	81.420	0.219
4	12	222.730	17.384	18	14	80.070	0.212
5	3	546.170	9.852	19	19	65.170	0.140
6	15	389.350	5.007	20	4	34.240	0.039
7	7	376.970	4.693	21	27	30.970	0.032
8	6	181.200	1.084	22	26	30.190	0.030
9	9	162.140	0.868	23	2	24.680	0.020
10	17	127.960	0.541	24	25	23.630	0.018
11	20	96.340	0.510	25	23	23.310	0.018
12	10	122.130	0.493	26	22	20.070	0.018
13	13	117.990	0.460	27	24	16.680	0.017
14	1	103.260	0.352				

观察表 2 发现,具有较高生态系统服务功能和景观连接度的生态源地斑块往往也有较大的面积,如 16、11、3、15 号源地. 利用 Pearson 相关分析研究生态源地面积和 dPC、综合生态系统服务之间的相关关系,使用相关系数表示相关关系的强弱情况(表 3). 具体分析发现,生态源地面积和 dPC 之间的相关系数值为 0.778;生态源地面积和综合生态系统服务功能之间的相关系数值为 0.598,并且二者均呈现出 0.01 水平的显著性,可知生态源地面积分别和 dPC 指数、综合生态系统服务之间有着显著的正相关关系. 这表明面积更大的生态源地往往同时具有更高的景观连接度和生态系统服务功能,源地的不可替代性高,需要进行重点监测和保护.

表 3 生态源地面积和 dPC、生态系统服务功能相关性分析
Tab. 3 Correlation analysis of ecological source area, dPC and ecosystem service functions

	生态源地面积	dPC	综合生态系统服务功能
生态源地面积	1		
dPC	0.778**	1	
综合生态系统服务功能	0.598**	0.341	1

** 表示在 0.01 水平上显著相关

3.3 综合生态阻力面

综合生态阻力面如图 2b 所示,总体呈现出西

南、南部低,中部高的状态. 从空间格局上看,高阻力值区域主要集中在川南经济区中部和东北部. 这里是内江、自贡、宜宾和泸州四大城市的几何中心,也是成渝城市群发展轴线的主要辐射范围,多条城际铁路和高速公路相交于此,景观斑块被切割而导致破碎程度较高. 另外川南经济区中部也是四川盆地粮油主产区,农业开垦严重,人为干扰较大. 尤其是内江和自贡作为四川省较早的工业重镇和人口超百万大城市,开发时间早,开发程度大,城市化水平高,导致局部范围出现较高的生态阻力屏障.

表 4 生态源地相互作用力强度

Tab. 4 Intensity of interaction between ecological sources

起点生态源地	终点生态源地	相互作用强度	起点生态源地	终点生态源地	相互作用强度
16	17	1200.59	18	19	6.83
7	18	737.02	1	15	5.33
10	12	531.08	21	22	4.84
6	15	484.18	7	23	3.31
9	19	469.78	24	26	2.95
15	27	365.64	2	15	2.61
5	17	329.71	15	23	2.15
1	13	296.14	1	2	1.78
16	26	293.54	2	13	1.73
8	12	273.33	3	25	1.59
7	20	181.21	18	23	1.06
3	14	176.79	18	27	0.88
7	8	164.69	4	25	0.87
7	21	132.28	3	22	0.59
7	26	110.32	9	27	0.58
7	19	107.65	5	22	0.48
7	24	82.88	2	4	0.45
16	24	81.62	4	13	0.44
5	14	70.43	5	25	0.38
10	16	58.58	4	23	0.35
17	20	55.16	23	2	0.33
17	26	38.75	13	25	0.24
8	24	19.39	4	22	0.23
9	18	12.32	2	23	0.13
20	26	9.80	22	23	0.11
5	20	9.40	22	25	0.07
20	22	8.79			

3.4 生态廊道

基于最小阻力模型,利用 Linkage Mapper 软

件共提取生态廊道 57 条, 共计 2005.55 km, 形成北疏南密的空间特征(图 3). 通过最小阻力模型构建出的生态廊道反映了物种潜在流动的最大可能性, 所提取的廊道大部分都偏离了生态源地的几何中心直线, 选择了综合生态阻力更小的较远路径. 从廊道的走向可以看出, 川南经济区在西北-东南方向有着较强的生态引力, 产生了诸多重要廊道. 重力模型通过量化不同源地斑块间相互作用强度, 以便判断区域内潜在生态廊道的相对重要性, 计算结果如表 4 所示. 将两生态源地间相互作用力 $G_{ab} \geq 100$ 的廊道作为一级廊道, $1 \leq G_{ab} < 100$ 的作为二级廊道, $G_{ab} < 1$ 的作为三级廊道^[20,21].

廊道重要性评价结果如图 3 所示. 其中一级廊道 16 条(169.44 km), 主要连接了南部画稿溪国家自然保护区(16 号源地)、叙永仙草湖风景区(8、11、12 号源地)、兴文石海地质公园(7 号源地)和西部老君山国家级自然保护区(15 号源地). 一级廊道分布范围集中, 平均长度仅为 10.19 km, 却串联了研究区内 85% 以上的一、二级源地. 由表 4 可以看出, 源地 16~17、7~18、10~12 之间的相互作用排到前三, 这表明通过一级廊道所连接的生态源地间更有可能存在高频率的物质循环与能量流动, 现有廊道的保护和潜在廊道的建设可为物种生存发展、物质能量流通提供良好的生态介质. 二级廊道 22 条(总长 754.44 km), 平均长度为 36.45 km, 整体呈西北-东南走向, 连接了研究区南北两地的一、二级源地. 其廊道内部长短差异明显, 既有较短路径在南部与一级源地紧密连接, 又有沟通南北方向孤立斑块的通廊. 三级廊道 15 条(1081.67 km), 平均长度为 73.15 km, 连接了研究区内二、三级生态源地. 其大致呈西南-东北走向, 与二级廊道一同构建沟通南北方向的连接通廊. 虽然三级廊道平均距离最长, 源地间相互作用力也较小, 廊道容易在受到干扰后阻断, 但三级廊道占比最大, 分布广泛, 与二级廊道协同可较好弥补中部自贡、内江生态源地间连通性不足的缺点, 保证川南经济区生态网络格局的完整性. 总体上来看, 一级廊道明显短于后两者, 有效连接了分布较近的重要生态源地; 而二、三级廊道连接了川南经济区市域和广域范围.

3.5 生态节点和断裂点

生态节点是生态源地间物质能量流动的交汇点, 它关系到源地之间是否可以建立起有效的生态关联, 一般位于关键廊道相交处. 当节点阻断时, 生态网络的整体连接性将大大降低^[22]. 本文利用

ArcGIS10.2“相交”工具识别廊道交点, 共提取生态节点 21 个(图 3). 生态节点与廊道的有机整合对提供生态功能和景观连接性至关重要, 然而往往易被忽视处于保护管理范围之外^[23]. 考虑其处在多条潜在廊道交点位置, 承载着大量潜在生态流, 是既具有重要生态功能又具有较高生态脆弱性的关键地带, 应重视该节点的生态监测并与周围重要生态源地和廊道进行有机串联, 强化生态节点“枢纽”功能. 最后, 研究区中部、北部有多条较长的生态廊道, 在城市间的物种交流上有着不可或缺的作用. 本文结合川南经济区交通路网数据, 提取生态廊道与城市主要道路的交点共 24 个, 即为生态断裂点, 均位于二、三级廊道上(图 3).

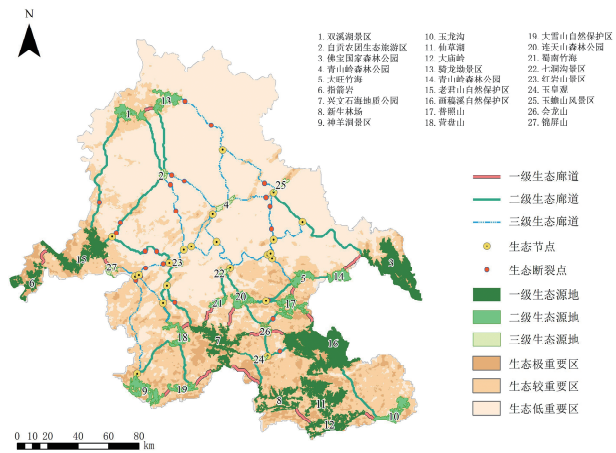


图 3 川南经济区生态网络

Fig. 3 Ecological network in Southern Sichuan Economic Zone

3.6 生态网络格局

川南经济区生态网络主要由生态源地, 生态廊道, 生态节点三部分组成, 整体呈现“一核五心, 一带多廊”的总体格局(图 4). 其中“一核”是指黄荆-画稿溪生态绿核, 其土地利用类型以林地为主, 生物多样性丰富, 构成了研究区南部生态源地主体. 参考识别的 27 块源地斑块, 结合川南经济区自然生态要素, 共得到五个生态绿心, 分别是东部佛宝山生态绿心、西部老君山生态绿心、西南兴文竹海生态绿心、南部叙永仙草湖生态绿心和北部双溪湖生态绿心. “一带多廊”是构成川南经济区生态网络的骨架, “一带”指长江沿岸生态带; “多廊”是指连接东西和南北方向的多条生态廊道, 依托研究区主要水系和自然林地构成了“三纵一横”的嵌套网络, 该生态网络框架与《成渝经济区南部城市群发展规划》中所识别的生态格局基本一致.

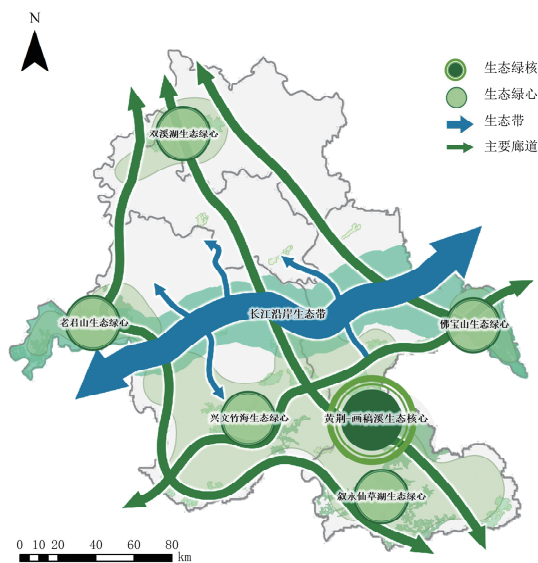


图 4 川南经济区生态安全网络格局

Fig. 4 The spatial pattern of ecological security in Southern Sichuan Economic Zone

4 讨论

目前,关于生态网络构建的研究主要集中在市域尺度,较少从城市群级别的区域尺度开展生态网络的构建和优化分析.因此,借鉴同等尺度的流域尺度的研究方法,本文以川南经济区为研究区域,在提取生态源地时,充分考虑源地自身的生态功能价值及其对周边环境的影响,引入生态系统服务的概念作为源地生态功能重要性测度标准,以生态系统服务评估结果为依据提取生态源地,以可能连接度指数对源地进行重要性评价,利用 MCR 模型和重力模型识别潜在廊道和生态节点,最后得到川南经济区生态网络总体格局.该方法效果较好,且符合川南经济区的绿色发展理念,以及对长江流域生态保护的要求,科学地确定川南经济区国土空间生态修复规划的修复目标和范围,为川南经济区的可持续发展提供重要的决策依据,也为同类型的区域提供借鉴意义.研究结果表明:川南经济区生态极重要区 6133.50 km^2 ,并对生态源地面积, dPC 指数和源地生态系统服务功能进行了相关性分析,发现前者分别与后两者呈现出显著正相关,表明较大面积生态源地同时具有更高的结构和功能重要性,与前人研究符合.生态源地斑块 27 个,总面积为 4464.27 km^2 ,其中一级生态源地 8 个,占比 79.48%,是生态网络格局构建和保护的核心区域.生态廊道 57 条,总长度为 2005.55 km^2 ,整体呈西北-东南走向.其中一级廊道 16 条,二级廊道 22

条,三级廊道 15 条,共产生 21 个生态节点.通过生态源地、生态廊道、生态节点等要素,形成了“一核五心,一带多廊”的生态网络格局.

川南经济区在加快构建川渝滇黔结合部区域经济中心的同时,还肩负打造长江上游绿色发展示范区和筑牢长江上游生态屏障的重任.对现有生态网络进行评价,找到现存问题,即区域生态网络完整性和流通性有待提升.具体表现如下:(1)研究区东北的自贡、内江两市作为四川重要粮油场地,耕地众多而缺少必要的生物栖息地.(2)识别出的西北-东南网络轴线与成渝城市群发展轴线交叉,可能产生生态断裂点.(3)生态空间覆盖辐射不均,表现在川南中部分布的生态岛数量较少且面积较小,北部生态空缺较大.(4)随着城市化进程加快,三级廊道因北部缺乏必要时的生态连接空间,导致廊道距离遥远且累积阻力较大,在受到干扰后级易出现阻断的情况.因此针对上述现状问题,对川南经济区生态网络进行优化,优化建议如下:(1)加强对一级源地采取设立自然保护区等措施进行监管,识别出 6 号指箭岩和 7 号兴文石海地质公园暂时处于空缺状态,应严守生态保护红线管控制度,根据自然保护地体系增设保护区,防止与城镇建设用地粘连.(2)识别出 24 个的生态断裂点对生态廊道连接性和整体性造成消极影响,主要表现在阻隔物种迁徙、物质循环和能量流动等过程.建议生态廊道与城市道路的交点处设置高架桥或景观桥,满足生态廊道的连续性.(3)要合理布局三生空间,适当预留生态用地等方式对研究区北部和中部、自贡和内江等地进行生态源地增补.如实施重点区域的退耕还林工作,保证生态网络在全域范围内的连通性.(4)对于一级廊道进行重点保护和优先建设.优先建设以宜宾(筠连县,珙县,高县,长宁县)、泸州南部(古蔺县,叙永县)为核心的一、二级生态网络,连接黄荆-画稿溪生态核心与兴文竹海-叙永仙草湖两大绿心,巩固形成川南经济区生态网络主体.(5)对于穿越城市的二、三级廊道(如宜宾市内岷江段,内江市内沱江段),将区域生态廊道与城市绿地系统相结合,实现市域到区域生态功能整合,为城市生态绿廊、绿道选线提供参考.

本研究综合考虑了生态系统服务和可能连接度,拓展了源地选取依据,避免了主观性,对区域内生态网络可持续发展具有一定的指导意义,但仍有不足.首先是对廊道宽度未加以考虑,对于不同的生态过程应根据实际情况设定相应的宽度阈值.另

外,生态网络是一个多尺度、多层次、多要素相互嵌套的复杂系统,本文仅尝试了区域尺度的生态网络构建,后续还应对各个尺度的网络进行研究探讨,以满足不同情况的管理和保护需求。

参考文献:

- [1] Liu S L, Hou X Y, Yin Y J, *et al.* Research progress on landscape ecological networks [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 3947. [刘世梁, 侯笑云, 尹艺洁, 等. 景观生态网络研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37: 3947.]
- [2] Guo J X, Hu Z Q, Li H X, *et al.* Construction of municipal ecological space network based on MCR model [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2021, 52: 275. [郭家新, 胡振琪, 李海霞, 等. 基于 MCR 模型的市域生态空间网络构建[J]. *农业机械学报*, 2021, 52: 275.]
- [3] Qu Y, Lu M. Research progress and development trend of ecological network planning [J]. *Urban Dev Stud*, 2016, 23: 29. [曲艺, 陆明. 生态网络规划研究进展与发展趋势[J]. *城市发展研究*, 2016, 23: 29.]
- [4] Wang L R, Feng X L, Chang Q, *et al.* Pattern construction of habitat network for urban green space based on the compound model of InVEST and MCR [J]. *Chin Landscape Archit*, 2020, 36: 113. [王丽蓉, 冯晓蕾, 常青, 等. 基于 InVEST-MCR 复合模型的城市绿色空间生境网络格局构建研究[J]. *中国园林*, 2020, 36: 113.]
- [5] Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, 19: 8. [俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 1999, 19: 8.]
- [6] Tan H Q, Zhang J T, Zhou X S. Construction of ecological security patterns base on minimum cumulative resistance model in Nanjing city [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2020, 40: 282. [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: 282.]
- [7] Gao Y, Mu H K, Zhang Y L, *et al.* Research on construction path optimization of urban-scale green network system based on MSPA analysis method: Taking Zhaoyuan City as an example [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39: 7547. [高宇, 木皓可, 张云路, 等. 基于 MSPA 分析方法的市域尺度绿色网络体系构建路径优化研究——以招远市为例[J]. *生态学报*, 2019, 39: 7547.]
- [8] Yang G Z, Jiang Z Y, Guo C X, *et al.* Construction of ecological network using morphological spatial pattern analysis and minimal cumulative resistance models in Guangzhou City, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29: 3367. [杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 等. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建[J]. *应用生态学报*, 2018, 29: 3367.]
- [9] Shen J K, Wang Y C. Landscape ecological network planning: ecological spaces system building from spatial structural priority to ecosystem services improvement [J]. *Landsc Archit*, 2020, 27: 37. [申佳可, 王云才. 景观生态网络规划: 由空间结构优先转向生态系统服务提升的生态空间体系构建[J]. *风景园林*, 2020, 27: 37.]
- [10] Cheng T T, Gu B. Study on ecological restoration of Dujiangyan after “5·12” Wenchuan earthquake [J]. *J Sichuan Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, 56: 563. [程婷婷, 辜彬. “5·12”汶川地震中都江堰生态恢复[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2019, 56: 563.]
- [11] Liang Y J, Liu L J. Integration of ecosystem services and landscape pattern: A review [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38: 7159. [梁友嘉, 刘丽珺. 生态系统服务与景观格局集成研究综述[J]. *生态学报*, 2018, 38: 7159.]
- [12] Hu Q Y, Chen S L. Optimizing the ecological networks based on the supply and demand of ecosystem services in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou region [J]. *J Nat Resour*, 2021, 36: 342. [胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化[J]. *自然资源学报*, 2021, 36: 342.]
- [13] Wang H L, Gao Y N, Wang Z Y, *et al.* Urban ecological management division based on ecosystem services: a case study of Shenzhen City [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40: 8504. [王宏亮, 高艺宁, 王振宇等. 基于生态系统服务的城市生态管理分区——以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2020, 40: 8504.]
- [14] Zhao W, Zou X Y, Pu H X. Construction of ecological security pattern in Chengdu-Chongqing Twin-City Economic Circle [J]. *China Environ Sci*, 2021, 41: 2423. [赵伟, 邹欣怡, 蒲海霞. 成渝地区双城经济圈生态安全格局构建 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41: 2423.]
- [15] Xie J, Li W. Research on the construction of ecological landscape corridors in the surrounding villages of Nierji Water Conservancy Project in Nenjiang Basin——Taking Moridawadaur Autonomous Banner as an example [J]. *J Northeast Agric Sci*, 2021,

- 46: 139. [谢婧, 李文. 嫩江流域尼尔基水利枢纽周边乡镇生态景观廊道构建研究——以莫力达瓦达斡尔族自治县为例[J]. 东北农业科学, 2021, 46: 139.]
- [16] Huang H, Ping X H, Gao Y L, *et al.* Research on construction and optimization of urban green infrastructure network based on MSPA and Circuit Theory: a case study of Fuzhou, China [C]//CHSLA Proceedings of the 2020 Annual Conference(Volume D). Chengdu: 2020: 660. [黄河, 平潇菡, 高雅玲, 等. 基于 MSPA 与电路理论的城市绿色基础设施网络构建与优化研究——以福州市为例[C]//中国风景园林学会 2020 年会论文集(上册). 成都: 2020: 660.]
- [17] He J H, Pan Y, Liu D F. Analysis of the wetland ecological pattern in Wuhan City from the perspective of ecological network [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40: 3590. [何建华, 潘越, 刘殿锋. 生态网络视角下武汉市湿地生态格局分析[J]. 生态学报, 2020, 40: 3590.]
- [18] Peng J, Yang Y, Liu Y. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 644: 781.
- [19] Liu X. Research of ecological security in Shule River Basin based on land use and landscape pattern [D]. Lanzhou: Northwest Norm Univ, 2015. [刘晓. 基于土地利用景观格局的疏勒河流域生态安全研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.]
- [20] Meng J J, Wang Y, Wang X D, *et al.* Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based on MCR model [J]. *Res Environ Yangtze Basin*, 2016, 25: 1052. [蒙吉军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25: 1052.]
- [21] Huang H, Yu K Y, Gao Y L, *et al.* Building green infrastructure network of Fuzhou using MSPA [J]. *Chinese Landsc Archit*, 2019, 35: 70. [黄河, 余坤勇, 高雅玲, 等. 基于 MSPA 的福州绿色基础设施网络构建[J]. 中国园林, 2019, 35: 70.]
- [22] Zhu J, Su J, Yin H W, *et al.* Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive sources identification and multi-scale nesting [J]. *J Nat Res*, 2020, 35: 1986. [朱捷, 苏杰, 尹海伟, 等. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J]. 自然资源学报, 2020, 35: 1986.]
- [23] Yin H W, Kong F H, Qi Y, *et al.* Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan province China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31: 2863. [尹海伟, 孔繁花, 祁毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31: 2863.]