

基于电路理论的特大山地城市生态安全格局构建 ——以重庆市都市区为例

周浪^{1,3}, 李明慧^{1,3}, 周启刚^{2,3}, 孟浩斌^{1,3}, 彭春花^{1,3}, 刘栩位^{1,3}

(1.重庆工商大学 环境与资源学院, 重庆 400067; 2.生态环境空间信息数据挖掘与大数据集成重庆市重点实验室, 重庆 401320; 3.重庆工商大学 公共管理学院, 重庆 400067)

摘要:为保障山地城市区域生态安全和实现可持续发展,以重庆市都市区为研究区,采用 2018 年土地利用现状数据和遥感数据,构建了生态服务重要性与生态敏感性评价体系,通过粒度反推法测算最优条件的栅格粒度,从而综合确定生态源地;以坡度、起伏度、土地利用类型确定阻力值,采用电路理论构建生态廊道,最终形成了重庆市都市区生态安全格局。结果表明:(1) 200 粒度下连通性最优,此粒度下的生态源地面积为 1 616.98 km²,占研究区总面积的 29.76%,在空间分布上呈现六纵分布态势。(2) 生态源地之间存在生态廊道共计 29 条,关键廊道 22 条,总长度约为 50.83 km,潜在廊道 7 条,总长度约为 108.21 km。(3) 生态源地与生态廊道构成了“一圈两带两中心”的生态安全格局。可见,必要的设置生态提升带,切实保护了区域内的生态空间。

关键词:特大山地城市; 重庆市都市区; 电路理论; 生态安全格局

中图分类号:X321

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0319-07

Construction of Ecological Security Pattern in Very Large Mountainous City Based on Circuit Theory —Taking Chongqing Metropolitan Area as an Example

ZHOU Lang^{1,3}, LI Minghui^{1,3}, ZHOU Qigang^{2,3}, MENG Haobin^{1,3}, PENG Chunhua^{1,3}, LIU Xuwei^{1,3}

(1.College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Spatial Data Mining and Big Data Integration for Ecology and Environment, Chongqing 401320, China; 3.School of Public Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to ensure the ecological safety of mountainous cities and achieve sustainable development, the Chongqing metropolitan area was used as the research area, and the land use status data and remote sensing data in 2018 were used to construct an evaluation system for the importance of ecological services and ecological sensitivity, and the granularity was reversed. The method measured the grid granularity of the optimal conditions to comprehensively determine the ecological source; the resistance value was determined by slope, undulation, and land use type, and the ecological corridor was constructed by the circuit theory, which finally formed the ecological security pattern of Chongqing urban area. The results showed that: (1) the connectivity is optimal at 200 granularity. The ecological source area under this granularity is 1 616.98 km², accounting for 29.76% of the total area of the study area, showing a six-vertical distribution in spatial distribution. (2) there are a total of 29 ecological corridors between ecological sources, 22 key corridors with a total length of about 50.83 km, and 7 potential corridors with a total length of about 108.21 km. (3) ecological sources and ecology corridors constitute an ecological security pattern of ‘one circle, two belts and two centers’. It was necessary to set up ecological promotion belts to effectively protect the ecological space in the region.

Keywords: extra-large mountainous cities; Chongqing metropolitan area; circuit theory; ecological security pattern

收稿日期:2020-05-16

修回日期:2020-06-03

资助项目:重庆市技术创新与应用发展重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0021);重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0497)

第一作者:周浪(1996—),男,重庆长寿人,在读硕士研究生,研究方向为环境规划与管理。E-mail:1156753397@qq.com

通信作者:周启刚(1976—),男,重庆铜梁人,博士,教授,博士生导师,主要从事环境规划与管理研究。E-mail:zqg1050@126.com

近年来,我国经济与社会的高速发展加快了城镇的扩张步伐。而快速城市化因其不合理的开发利用行为势必将对城市地域的生态环境基底造成深刻影响^[1],并致使空气质量恶化、生物多样性锐减、城市热岛效应加剧等生态问题,严重威胁区域生态安全^[2]。通过识别和提取对维持区域生态系统安全稳定具有重要意义的空间要素,对其系统结构及空间格局提出切实有效的优化指导,是缓解紧张人地关系,保障城市—自然复合生态系统可持续高效运转的关键性格局^[3]。

生态安全格局构建作为一个多学科交叉的新兴研究主题,受到国内外学者的高度关注并在该领域展开了大量研究^[4-5]。国内俞孔坚首次从生物多样性保护的切入点开展景观生态安全格局研究^[6],之后优化 Forman 的景观利用格局理论^[7],提出“生态源地识别—阻力面建立—生态廊道构建”,逐渐成为生态安全格局构建的主流范式^[8]。针对城市这类经济高度发达,人口相对集中,人地关系较为紧张的研究区域,学者对广州^[9]、北京^[10]等平原城市根据其差异化的研究区状况,从生态系统服务、生态敏感性及景观功能等多角度选取评价指标,并选用拟合程度较高的数学模型进行分析,最终构建城市生态安全格局。对于山地城市而言,构建山地生态安全格局是城市与生态和谐发展的基础,同时也是为维持山地城市生态稳定、平衡生态系统的重要手段^[11],但当前针对空间结构复杂的山地城市生态安全格局的构建鲜有研究。

生态安全格局中的廊道大多采用最小累积阻力模型识别^[12-13],但其仅能体现源地间的最小成本距离,不能有效反映生态过程的流通性。McRaeB^[14]首次将物理学中的电路理论融入景观生态学、景观遗传学领域,将景观面看作一个电导面,用电子在电路中随机流动的特性来模拟物种个体或基因在景观中的迁移扩散过程,从而预测物种的扩散和迁移运动规律、识别景观面中多条具有一定宽度的可替代路径,同时电路理论可通过源地之间电流的强弱确定生境斑块和廊道的相对重要性^[15],有效反映生态过程的流通性,能够快速、精准地识别生态廊道更为科学的构建生态安全格局^[16-17]。

综上,针对重庆市都市区这一空间结构较为复杂的山地城市,本文以建立山地城市生态安全格局为目标,采用粒度反推法确定研究区的数据最优尺度,依次识别生态源地、判定阻力面,并将电路理论的随机游走特性运用至生态廊道的提取,从而构建重庆市都市区生态安全格局。本文旨在探索重庆市生态保护策略差异化的同时,为特大山地城市生态安全研究体系提供研究基础。

1 研究区概况

重庆市地处川东平行岭谷地区,地形起伏较大,以低山、丘陵为主,市区四周地势高,中心地势低,导致热场不易扩散,地表增热明显,是一个典型的山地城市^[18]。同时重庆市都市区(东经 106°03′22″—107°01′19″,北纬 29°09′12″—30°07′09″)是承载政治、经济、文化等多要素的中心,其范围包括渝北区、渝中区、江北区、北碚区、沙坪坝区、大渡口区、南岸区、九龙坡区、大渡口区、巴南区共 9 个行政区单元,辖区总面积达 5 472.68 km²。“两江四山”构成了重庆都市区生态基底,气候为亚热带季风性湿润气候,夏季高温闷热,都市区热岛效应显著。本研究以重庆市都市区为研究对象,以此为构建山地城市生态安全格局提供重要依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究涉及到的数据包括 2018 年的重庆市都市区土地利用数据、DEM 数据、气象数据、土壤数据及 NDVI 等数据类型。其中研究区土地利用数据来源于美国地质勘测局(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)的 Landsat8 OLI 遥感影像解译,划分为水域、草地、耕地、未利用地、建设用地和林地 6 类,数据空间分辨率为 30 m×30 m;DEM 来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),生成高程数据和坡度数据的空间分辨率为 30 m×30 m;气象数据来源于中国气象科学数据共享服务(<http://data.cma.cn/>);土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心的 1:100 万世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集;通过 Landsat8 OLI 遥感数据反演出 NDVI。

2.2 研究方法

2.2.1 粒度反推法 粒度反推法是一种通过景观格局的连通性和整体性分析自动选择生态源地的方法^[19]。此方法源于数学的反证法,先假设研究区存在多种生态源地结构,在不同粒度的栅格下测算生态源地整体连通性,从形成的多种生态景观组分结构结果中择取最优景观组分结构,选择整体连通性最高对应的栅格粒度,从而可以确定最优的生态源地结构^[20]。

2.2.2 生态源地识别 生态源地是指研究区域中具有较高生态系统服务价值的斑块,能对景观过程发展产生较大价值的景观组分^[21],生态源地是生态系统相对稳定的区域,对维持生物多样性具有重要的生态学意义。长江与嘉陵江交汇于重庆市都市区内,是两江流域的重要水源涵养区,生物多样性丰富,同时具有

复杂的自然生态条件和社会经济特征^[22]。针对本研究区域的生态本底状况,从植被覆盖、地形地貌、水体、保护区和多种生态服务能力角度考虑,来构建生态敏感性评价体系和生态系统服务重要性评价体系,通过两个评价体系进行叠加分析,采用变异系数法确定指标权重,按照自然断点法对计算结果进行综合划分,将识别出的最优生态斑块作为本研究区的生态源地。

(1) 生态敏感性评价体系。生态敏感性评价是指当生态系统受到外界不良影响干扰时,其发生生态环境问题的可能性大小,是生态环境评价的重要组成部分^[23]。本研究根据研究区山地资源、河流资源丰富的特点,按照主导因素综合性和代表性原则^[24],选取植被覆盖度、高程、坡度、土地利用类型、水体、生态保护区 6 项指标构建生态因子敏感性评价体系,并对

6 类生态因子运用变异系数法进行加权叠加计算,以自然断点法划分等级,最终获得评价结果。计算公式如下:

$$P_i = \sum_{i=1}^n F_i W_i$$

式中: P_i 为生态敏感性综合评价得分; W_i 为第 i 个因子影响权重; F_i 为第 i 个因子的生态敏感性指数。

(2) 生态系统服务重要性评价体系。生态系统服务重要性评价是针对区域生态系统典型生态服务功能能力的评估,包括对生态系统服务功能的区域分异规律分析,以及对生态系统服务功能重要区域的识别^[25]。结合重庆市都市区的环境特征,选择生物多样性保护、土壤保持、水源涵养 3 种生态系统服务功能指标来构建评价体系(表 1)。

表 1 生态系统服务重要性评价体系

指标	计算公式	参数
水源涵养	$SS_b = \sqrt[3]{\prod_{a=1}^3 C_a}$	SS_b 为第 b 空间单元水源涵养重要性综合指数; C_a 为 a 因素重要等级值
水土保持	$A = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P)$	A 为预测土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力; K 为土壤可侵蚀因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子
生境质量	$Q_{xj} = H_{xj} (1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z})$	Q_{xj} 为土地利用类型 j 中像元 x 的生境质量; H_{xj} 为生境适宜性; D_{xj} 为生境胁迫水平; $K = D_{xj} / 2$ 为半饱和常数; $z = 2.5$ 为归一化常量

2.2.3 生态综合阻力面构建 物种在水平空间上运动、扩散,在斑块之间的流动与传递,在很大程度上受到地形因子、土地利用类型以及人为活动干扰的影响^[26]。其中,土地利用类型和地形是生态“源”向外扩散遭遇阻力的主要影响因素^[21]。研究区域集复杂性、脆弱性、敏感性于一体的生态环境特征,参考相关研究^[27-28],选取地貌因子和土地利用类型作为主要阻力因子,利用 ArcGIS 软件对各阻力面加权叠加得到综合阻力面。由于不同的阻力因子干扰能力不同,影响景观生态安全格局源地扩散的阻力也不同,变异系数法可以客观准确地确定权重,本研究采用该方法来确定研究区各阻力值的权重。

2.2.4 生态廊道识别 生态廊道是沟通生态源地物种、信息和能量流动的重要桥梁,是生态源地间最容易联系的低阻力生态通道,可以增强景观组分之间的联系和防护等功能,对于景观格局连通性具有重要作用。电路理论中的连接模型与随机游走相结合能够较好地评价最小成本路径,其原理见图 1^[29]。本研究基于电路理论来识别研究区的生态廊道,生态廊道是相邻“源”间生态流的低阻力生态通道,可通过电路理论中的电流密度来识别廊道,电流密度较高的区域,表明该区域的连接度较好,生态通道阻力较低。本研究利用 Circuitscape 软件与 ArcGIS 的 Linkage Mapper Toolkit 插件来识别生态廊道。

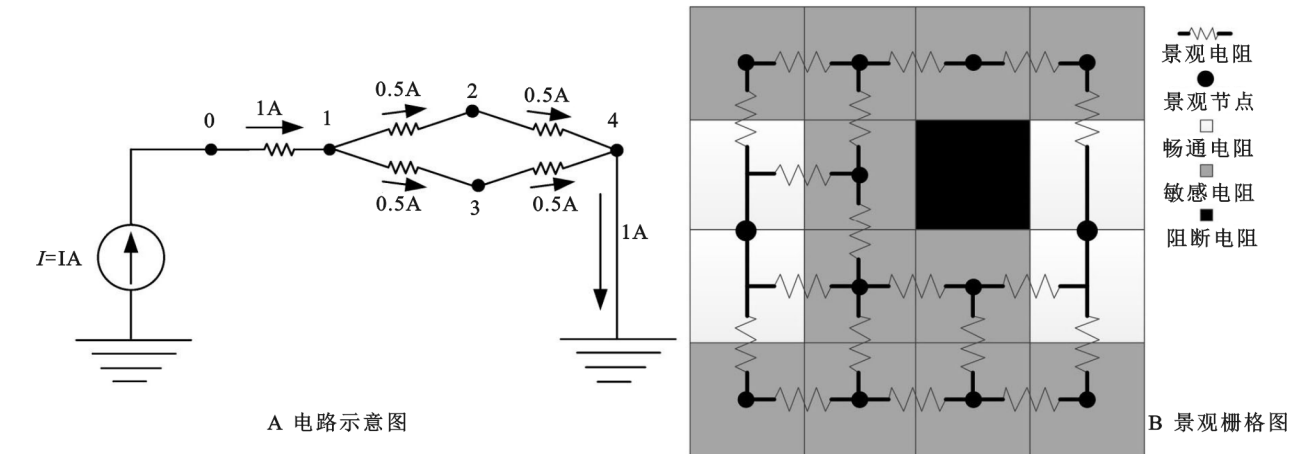


图 1 电路理论原理

3 结果与分析

3.1 生态源地识别

3.1.1 不同粒度水平下的生态源地连通性 生态源地的识别是指提供重要生态系统服务与生态敏感的斑块。针对区域典型生态系统,定量评估生态系统服务的供给能力与生态敏感性,识别生态系统服务供给的重要区域与生态敏感区域,两者叠加可以作为源地识别的有效方法^[30]。在识别生态源地之前,需要确定研究区最优生态源地结构,因此根据粒度反推法的原理,从不同粒度水平的整体连通性判断出最优的生态源地结构^[31]。从生态系统服务重要性和生态敏感性叠加结果中提取一级生态源地,运用 Conefor 软件计算 30,50,100,200,300,400,500 m 共 6 种不同粒度下生态源地的整体连通性,最终确定最优生态源地结构,其中 500 m 粒度下融合较多,生态源地数量大幅减少,无法与其他粒度下的源地数量保持一致,故不分析 500 m 粒度下的生态源地结构,其余选取各粒度下的 50 个核心区域计算核心区域整体连通性结果见图 2。200 m 粒度下,整体连通性起伏较大,其余粒度整体连通性较为平缓。不同粒度下生态源地的整体连通性平均值大小随粒度的增加呈抛物线式,其中 200 m 粒度下生态源地的整体连通性的平均值最大达到峰值,结合核心区域的整体连通性的波动范围确定 200 m 粒度时连通性最优。

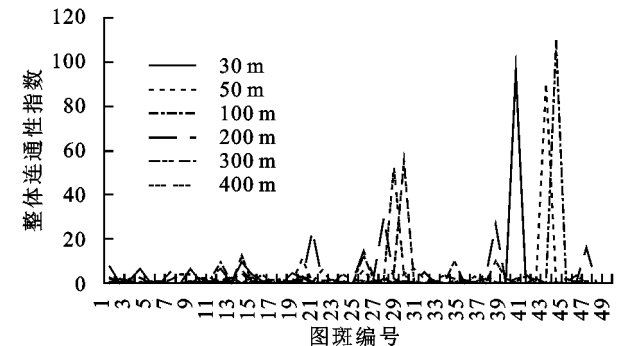


图 2 研究区整体连通性

3.1.2 生态源地的确定 由上述可知 200 m 粒度是生态源地整体连通性最好的参照,因此,将各数据栅格化,并将栅格大小统一为 200 m×200 m。基于研究区水土保持、水源涵养、生境质量 3 类生态系统服务功能叠加结果形成生态系统服务功能重要性评价结果,运用自然断点法将评价结果划分为极重要区、高等重要区、中等重要区、较重要区、一般重要区,形成重庆市都市区生态系统服务空间格局(图 3A),不同级别重要区面积及占比见表 2。极重要区域面积 22.38 km²,占研究区总面积的 0.44%,分散分布于研究区的各山脉处。高度重要区域面积 452.53 km²,

占研究区总面积的 8.33%。中等重要区域与较重要区域面积相差不大,分别为 1 843.87,18 677.00 km²,共占研究区总面积的 68.29%。一般重要面积 1 248.29 km²,占研究区总面积的 22.97%。

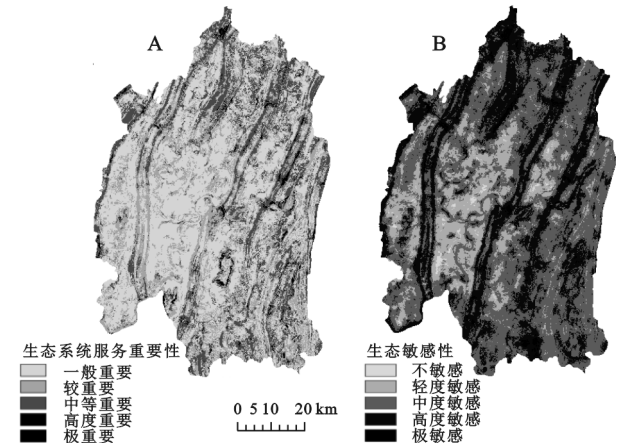


图 3 特大山地城市都市区生态系统重要态敏感性空间格局等级

表 2 生态系统服务重要性与生态因子敏感性评价结果

生态系统服务重要性			生态敏感性		
评价等级	面积/km ²	占比/%	评价等级	面积/km ²	占比/%
一般重要性	1248.29	22.97	不敏感	4.95	0.09
较重要	1867.00	34.36	轻度敏感	200.55	3.69
中等重要	1843.87	33.93	中度敏感	2035.34	37.46
高度重要	452.53	8.33	高度敏感	2573.25	47.35
极重要	22.38	0.41	极度敏感	619.97	11.41

对坡度、海拔、水域、土地利用类型、植被覆盖度、生态保护区 6 类生态因子的生态敏感性进行单因子评价,将单因子评价结果叠加形成生态敏感性评价结果,运用自然断点法将评价结果划分为极敏感、高度敏感性、中度敏感、一般敏感、不敏感,形成重庆市都市区生态敏感性空间格局(图 3B),不同级别敏感区面积及占比见表 2。极敏感区域面积 619.97 km²,占研究区总面积的 11.41%,分散分布于研究区以坡度大、海拔高的生态保护区的林地范围内。高度敏感区域面积 47.35 km²,面积占比最大,占研究区总面积的 47.35%。中度敏感区域面积 2 035.34 km²,占研究区总面积的 37.46%。轻度敏感区域面积较小,为 200.55 km²,共占研究区总面积的 3.69%。不敏感区域面积最小,为 23.95 km²,仅占研究区总面积的 0.09%。

由上述分析可知,研究区的生态系统重要性整体较低,生态敏感性整体较高,对研究区生态系统服务重要性与生态因子敏感性的分析结果等权叠加,将研究共计区划分 4 级区域,1 级区域面积最小共计 824.69 km²,2,3 级区域面积分别为 1 375.07,1 217.631 km²,4 级区域面积共计 2 016.68 km²。在划分出的 4 级区域中剔除

小于 10 km² 的碎小图斑,最终确定生态源地图斑数为 14,面积合计 1 616.98 km²,占研究区总面积的 29.76%,其空间分布见图 4。总体来看研究区单块生态源地面积较大,宽度较宽,形态多以条带状为主,主要沿缙云山、中梁山、南山等山脉分布,呈现六纵空间格局,符合典型的山地城市山脉生态系统服务功能强,生态敏感性高的特点,而山脉之间较平缓的区域,城市发展良好,主要体现城市功能。

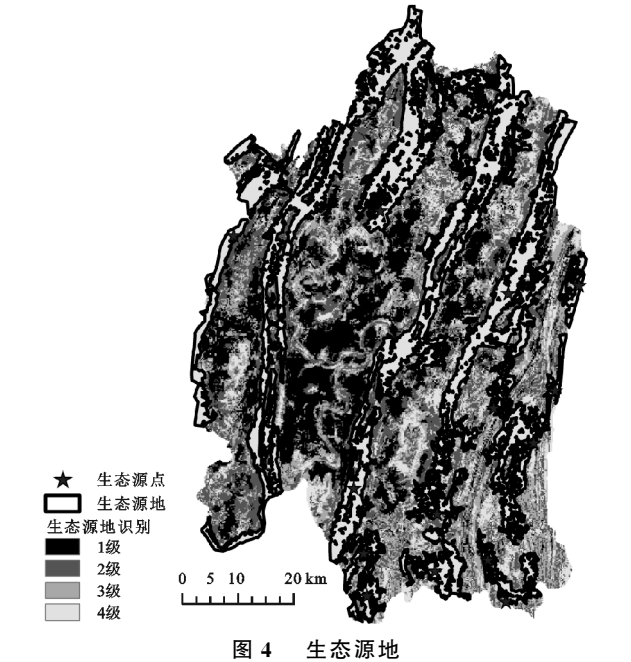


图 4 生态源地

3.2 最小累积模型判定的生态阻力面

基于特大山地城市都市区的土地利用类型构建生态阻力面,在土地利用类型上反映出城市的建设用地对生态阻力值最大,水体的生态阻力值最低。在空间上阻力面的分布是以组团的形式存在,被区域内其他阻力值较低的土地利用类型所分割;基于坡度和起伏度的生态阻力面构建,起伏度生态阻力值与坡度的生态阻力值的空间分布特征一致,在空间分布上阻力

值较大的区域成条带状分布,特大山地城市都市区的起伏度生态阻力值大小空间分布上呈现由西到东生态阻力值由最低值增加再降低的变化规律;坡度生态阻力值在空间分布上呈现出由西到东先增加后降低的变化规律,其中在城市建设区内坡度和起伏度的生态阻力值较低。运用最小累积模型形成综合阻力面(图 5),在空间分布上综合生态阻力值差异明显,高阻力值集中在研究区的中部、东部和东南部,在研究区的北部和东北部阻力值最低。

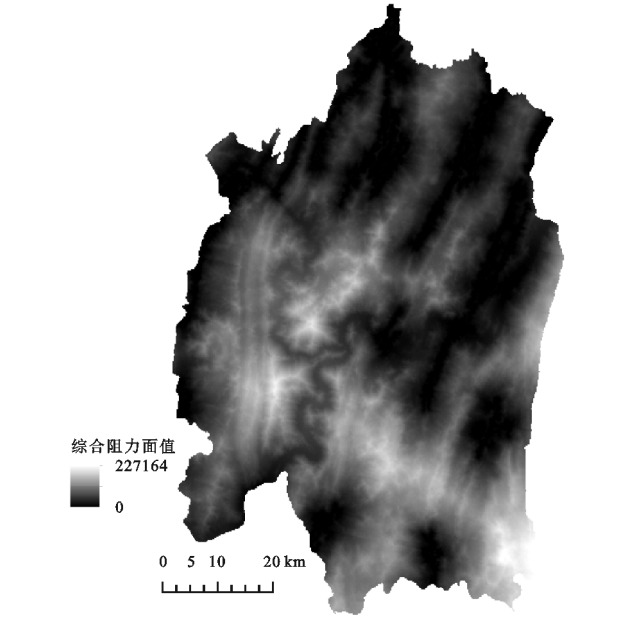


图 5 综合阻力面

3.3 基于电路理论的生态廊道识别与生态安全格局构建

生态廊道通过连接不同生态斑块,增加区域景观连通性和获取生态效益,是维护区域生态安全的基本骨架^[32]。基于生态源地与生态阻力面,结合电路理论结果(表 3),对重庆市都市区生态廊道进行识别(图 6)。结合电路理论识别出活跃和非活跃的生态廊道。

表 3 生态源地成对模式下的累计电流密度

源地编号	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1.98	1.67	4.07	0.37	3.18	2.29	1.84	3.08	4.66	4.45	4.16	5.79	5.20
2		1.14	4.06	1.18	2.55	0.56	2.11	2.84	3.96	4.02	3.56	5.07	4.74
3			3.15	0.21	1.55	0.03	1.22	1.90	3.02	3.08	2.61	4.14	3.80
4				2.26	3.27	3.23	0.32	2.17	4.74	3.77	3.98	5.92	4.60
5					0.53	0.43	0.10	1.12	2.55	2.38	2.03	3.71	3.12
6						0.95	1.66	1.17	1.39	1.54	0.46	2.72	2.22
7							1.43	1.74	1.29	2.56	1.51	1.93	3.21
8								0.46	3.15	2.29	2.44	4.31	3.11
9									2.58	0.11	1.40	3.80	0.95
10										2.83	0.63	0.57	3.35
11											1.29	4.08	0.33
12												1.93	1.61
13													4.59

注:表中各值均为原始值除以 1 000 所得。

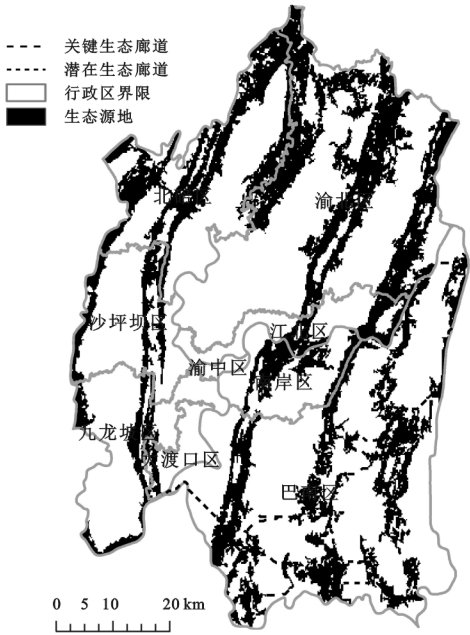


图 6 重庆市都市区生态廊道分布

从生态廊道数量特征上看,由于重庆市都市区生态源地较为破碎,生态阻力大,因此呈现出短小的特点。连接 14 块生态源地有 29 条生态廊道,关键廊道 22 条,总长度约为 50.83 km,潜在廊道 7 条,总长度约为 108.21 km。关键廊道中,大于 1 km 的廊道共 12 条,长度为 46.69 km,是源地之间连接的主要廊道。潜在廊道中,大于 10 km 的廊道共 5 条,长度为 95.05 km。部分关键廊道和潜在廊道在某些位置重合,可能是因该区域斑块阻力值较小导致^[31]。

从生态廊道空间分布来看,结合图 7 研究区各下辖区关键和潜在廊道长度柱状图,关键廊道分布在渝北区、北碚区、南岸区及巴南区,其长度分别占关键廊道总长度的 0.35%,1.50%,5.04%,93.11%。潜在廊道分布在九龙坡区、南岸区及巴南区,其长度分别占潜在廊道总长度的 6.8%,18.19%,75.01%。

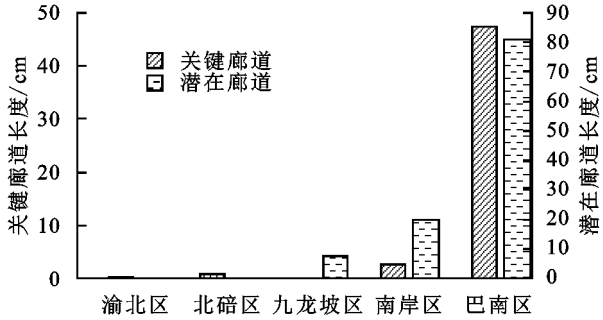


图 7 重庆市关键廊道及潜在廊道分布

从图 7 可以看出,研究区西部和北部仅存在一条关键廊道,主要是因为位处缙云山、中梁山和龙王洞山的生态源地横跨 7 个重庆市下辖区,三者之间形成了一条宽阔的带状生态源地,宽度大、面积大的特点使其面临的生态压力相对较低。同时,由于巴南区

生态源地数量多、较为破碎,因此绝大部分的关键廊道和潜在廊道主要分布在重庆市巴南区南部,并且由该区域向外发散至整个研究区。

生态安全格局是对区域生态空间进行国土空间格局优化的空间配置方案,由一系列功能各异、相对独立的景观单元结合生态廊道构成,对维护景观格局整体性及区域生态安全具有重要意义^[33]。以生态源地作为缓冲区面要素,根据每个生态源地的面积大小,分别设置 1,2,3 km 等不同宽度的缓冲区作为生态源地的辐射区(图 8)。经统计,现有生态源地的辐射面积为 4 543.92 km²,达到研究区总面积的 83.32%。现状生态源地辐射未覆盖区域除了分布在研究区边缘,在研究区中部和南部也存在较大范围的未覆盖区。

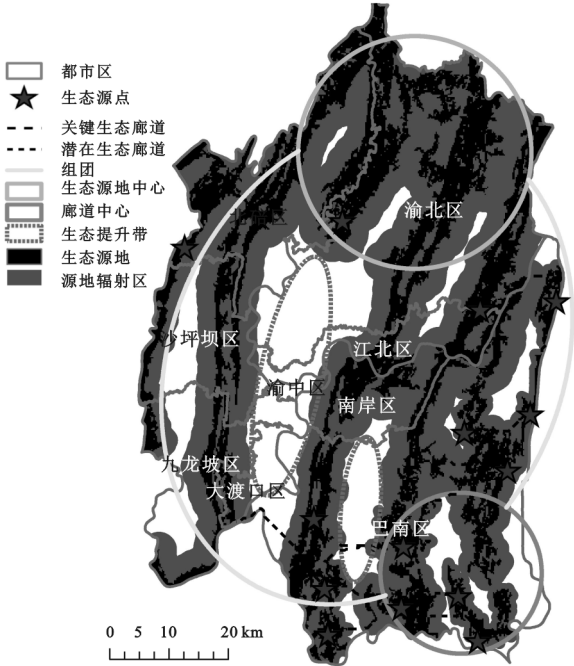


图 8 生态安全格局

基于对重庆市都市区生态源地、关键廊道和潜在廊道的分析,本文提出构建“一圈两带两中心”生态安全格局。其中,“一圈”指研究区所形成的都市生态圈,“两带”指研究区生态源地未辐射的生态提升带,“两中心”指以巴南区东南部向北散射的廊道中心与研究区北部向南散射的生态源地中心。生态提升带需要重点新增生态源地,加快绿色基础设施建设,控制城市开发边界,高效利用城市生产、生活空间,保护生态空间范围,以优化城市生态安全结构。生态源地中心林业资源丰富,可发展旅游业、绿色产业,为研究区提供水源涵养、土壤保持等多种服务功能。廊道中心主要承担物种迁移的传输通道、生物生存繁殖的生境等基础功能^[25],物质流动频繁,需加强生态保护,保证都市生态圈的生态过程的畅通性。

4 结论与讨论

(1) 200 m 粒度下连通性最优,生态源地在空间分布上呈现六纵分布态势。从不同粒度水平的整体连通性判断出 200 m 粒度下生态源地结构最优;研究区生态源地面积 1 616.98 km²,占研究区总面积的 29.76%,研究区单块生态源地面积较大,宽度较宽,形态多以条带状为主,主要沿缙云山、中梁山、南山等山脉分布,呈现六纵空间分布态势。

(2) 生态廊道长度较短,主要分布与研究区的南部区域。生态廊道共计 29 条,关键廊道 22 条,总长度约为 50.83 km,潜在廊道 7 条,总长度约为 108.21 km。绝大部分的关键廊道和潜在廊道主要分布在重庆市巴南区南部,并且由该区域向外发散至整个研究区。

(3) 以生态源地辐射范围和生态廊道共同构建以“一圈两带两中心”生态安全格局。现有生态源地的辐射面积为 4 543.92 km²,达到研究区总面积的 83.32%。现状生态源地辐射未覆盖区域的中部与南部区域作为生态提升带,切实保护区域生态空间。

本文以生态系统服务重要性与生态敏感性共同确定生态源地,以随机游走与最小成本路径结合的电路理论识别关键生态廊道与潜在生态廊道,结合生态源地的辐射范围共同构建生态安全格局,进而提出优化策略,保障研究区生态质量,提升居民的居住满意度,对生态宜居城市建设具有重要参考意义。但受数据获取的限制,本文仅从静态视角,识别生态源地与生态廊道,而生态要素与城市发展的动态变动时生态源地和廊道的情况有待进一步探讨。

参考文献:

[1] Arnaiz-Schmitz C, Schmitz M F, Herrero-Jauregui C, et al. Identifying socio-ecological networks in rural-urban gradients: Diagnosis of a changing cultural landscape[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612, 625-635.

[2] 欧定华,夏建国,张莉,等.区域生态安全格局规划研究进展及规划技术流程探讨[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1):163-173.

[3] 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.

[4] Li Y F, Sun X, Zhu X D, et al. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(19):2251-2260.

[5] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing

planet[J]. *Science*, 2015, 347(6223):736-747.

[6] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning[J]. *Landscape and Urban Planning*. 1996, 36(1):1-17.

[7] Forman R T. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.

[8] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 1999, 19(1):3-5.

[9] 龚建周,夏北成,陈健飞.快速城市化区域生态安全的空间模糊综合评价:以广州市为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(10):4992-5001.

[10] 康相武,刘雪华,张爽,等.北京西南地区区域生态安全评价[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12):2846-2852.

[11] 李云燕,赵万民.西南山地城市雨洪灾害防治多尺度空间规划研究:基于水文视角[J]. *山地学报*, 2017, 35(2):212-220.

[12] 赵文祯,韩增林,闫晓露,等.基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建:以大连市瓦房店为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(3):546-562.

[13] 杨彦昆,王勇,程先,等.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[J]. *生态学报*, 2020, 40(15):5124-5136.

[14] McRae B H. Isolation by resistance[J]. *Evolution*, 60(8):1551-1561.

[15] 刘佳,尹海伟,孔繁花,等.基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化[J]. *生态学报*, 2018, 38(12):4363-4372.

[16] Peng J, Yang Y, Liu Y X, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644:781-790.

[17] Jin G, Shi X, He D W, et al. Designing a spatial pattern to rebalance the orientation of development and protection in Wuhan[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(11):569-582.

[18] 张晓娟,周启刚,黄丽昕,等.重庆市主城区地表温度与植被覆盖指数关系研究[J]. *土壤通报*, 2018, 49(2):293-302.

[19] 唐丽,罗亦殷,罗改改,等.基于粒度反推法和 MCR 模型的海南省东方市景观格局优化[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(12):3393-3403.

[20] 陆禹,余济云,罗改改,等.基于粒度反推法和 GIS 空间分析的景观格局优化[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(2):534-545.

[21] 和娟,师学义,付扬军.基于生态系统服务的汾河源头区域生态安全格局优化[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(4):814-825.

- 与土地覆被变化的若干特征[J].资源科学,2020,42(1):3-19.
- [9] 马柱国,符淙斌,周天军,等.黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J].中国科学院院刊,2020,35(1):52-60.
- [10] 李永乐,余小光.南水北调西线工程对黄河流域生态环境的影响分析[J].水土保持学报,2005,19(4):160-163,172.
- [11] 金凤君,马丽,许堞.黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J].资源科学,2020,42(1):127-136.
- [12] 陈强,陈云浩,王萌杰,等.2001—2010年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析[J].应用生态学报,2014,25(10):2811-2818.
- [13] 姚子艳,张丽娟,唐世浩,等.20世纪80年代以来全球耕地变化的基本特征及空间格局(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017,27(7):771-785.
- [14] 谈明洪,李圆圆.1992-2015全球耕地时空变化(英文)[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019,10(3):235-245.
- [15] 鄯文聚,吴克宁,张小丹.中国耕地健康问题及防治对策[J].中国发展,2019,19(4):34-37.
- [16] 孔祥斌,张蚌蚌,温良友,等.基于要素—过程—功能的耕地质量理论认识及其研究趋势[J].中国土地科学,2018,32(9):14-20.
- [17] 卫新东,王筛妮,员学锋,等.陕西省耕地质量时空变化特征及其分异规律[J].农业工程学报,2018,34(3):240-248.
- [18] 张志雷,孔祥斌,张青璞.京津冀鲁地区耕地等别空间分布特征研究[J].农业工程学报,2018,34(S1):230-237.
- [19] 钱凤魁,张靖野,王秋兵.东港市耕地质量空间相关性分析及驱动机制研究[J].土壤通报,2018,49(5):1048-1053.
- [20] 魏洪斌,吴克宁,赵华甫,等.中国中部粮食主产区耕地等别空间分布特征[J].资源科学,2015,37(8):1552-1560.
- [21] 周忠惠.气候变化对黄河流域陕西段的农业影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [22] 王玥.黄河流域陕西段古村落文化的保护与发展[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [23] 刘光华,楼劲.黄河文化丛书·黄河人[M].兰州:甘肃人民出版社,2001:29.
- [24] 郭丽英, Di L P, Tian Q.2000—2015年京津走廊耕地和建设用变化监测研究(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019,29(5):702-718.
- [25] 张青璞,孔祥斌,鄯文聚,等.重庆市国家级农用地分等汇总前后等别分布规律[J].农业工程学报,2010,26(10):297-303.
- [26] 朱传民,郝晋珉,陈丽,等.基于耕地综合质量的高标准基本农田建设[J].农业工程学报,2015,31(8):233-242.
- [27] 刘彦随,王介勇,郭丽英.中国粮食生产与耕地变化的时空动态[J].中国农业科学,2009,42(12):4269-4274.
- [28] 胡存智.中国耕地质量等级调查与评定(全国卷)[M].北京:中国大地出版社,2010.

(上接第325页)

- [22] 李辉,周启刚,焦欢,等.基于TM影像的重庆市都市区NDVI时空变化特征[J].水土保持研究,2015,22(6):250-255.
- [23] 易丹,赵小敏,郭熙,等.基于生态敏感性评价和CA-Markov模拟的平原型城市开发边界划定:以南昌市为例[J].应用生态学报,2020,31(1):208-218.
- [24] 宋婷,李岱青,张林波,等.秦巴山脉区域生态系统服务重要性评价及生态安全格局构建[J].中国工程科学,2020,22(1):64-72.
- [25] 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.
- [26] 柏小玲,王兴友,柏小家.华蓥山(邻水段)生态系统服务功能重要性评价[J].江苏城市规划,2019(9):21-28.
- [27] 宋伟东.基于生态功能重要性和敏感性的安徽省生态安全格局构建[J].阜阳师范学院学报:自然科学版,2019,36(3):103-109.
- [28] 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.
- [29] 倪庆琳,丁忠义,侯湖平,等.基于电路理论的生态格局识别与保护研究:以宁武县为例[J].干旱区资源与环境,2019,33(5):67-73.
- [30] 彭建,李慧蕾,刘焱序,等.雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J].地理学报,2018,73(4):701-710.
- [31] 曾黎,杨庆媛,杨人豪,等.三峡库区生态屏障区景观格局优化:以重庆市江津区为例[J].生态学杂志,2017,36(5):1364-1373.
- [32] 陈利顶,傅伯杰,赵文武.“源”“汇”景观理论及其生态学意义[J].生态学报,2006,26(5):1444-1449.
- [33] 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.