

王子琳, 李志刚, 方世明. 基于遗传算法和图论法的生态安全格局构建与优化——以武汉市为例 [J]. 地理科学, 2022, 42(10): 1685-1694. [Wang Zilin, Li Zhigang, Fang Shiming. Construction and optimization of ecological security pattern based on genetic algorithm and graph theory: A case study of Wuhan City. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(10): 1685-1694.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.10.001

基于遗传算法和图论法的生态安全格局构建与优化 ——以武汉市为例

王子琳¹, 李志刚¹, 方世明²

(1. 武汉大学城市设计学院/湖北省人居环境工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072; 2. 中国地质大学(武汉)公共管理学院/国土资源部法律评价工程重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 以武汉市为例, 通过分析生态系统服务价值、生态敏感性、景观连通性及生态需求识别武汉市陆地和水域生态源地, 利用遗传算法获取最优生态源地。在此基础上, 利用最小累积阻力模型(MCR)分别提取陆地和水域生态廊道, 将生态源地与生态廊道叠加构建 2017 年武汉市生态安全格局。研究表明: 2017 年武汉市生态源地总面积约为 1 917.342 km², 其中陆地和水域生态源地面积分别为 780.217 km² 和 1 137.125 km²; 利用遗传算法识别的最优陆地和水域生态源地分别为 65 和 32 个, 所提取的生态廊道总长度为 2 305.37 km, 其中陆地和水域生态廊道长度分别为 1 497.86 km 和 807.51 km; 武汉市生态安全格局呈现“三横、三纵、三团簇”特征。此外, 分别新增了 8 个陆地和水域生态垫脚石及 5 个生态源地, 运用图论法对比优化前后相关指标, 发现优化后可构建更完善的生态安全格局, 优化方案可行。该生态安全格局构建与优化方法可为高速发展的大都市的生态安全格局研究提供更科学的参考。

关键词: 生态安全格局; 生态源地; 生态廊道; 遗传算法; 图论法; 武汉

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)10-1685-10

中国快速工业化和城镇化给城市生态系统带来了巨大压力^[1], 由此产生生态服务功能退化, 生态格局失衡, 生态安全形势日益严峻等一系列问题。而生态安全与社会、自然可持续发展息息相关, 如何构建科学的生态安全格局成为现阶段生态保护和管理研究中的重要内容。

生态安全格局最早被定义成“为造福人类而连接公园和其他绿色空间的自然区域”^[2], 相关研究在国外经历了适应性评价、指标最优评价、“格局-过程”评价 3 个阶段^[3], 由 Warntz 提出的利用生态阻力面构建生态安全格局^[4]开辟了探索的新视角, 之后出现了对景观连通性^[5]和廊道体系^[6]的研究。20 世纪 90 年代以来中国逐步开始对生态安全格局进行探索^[7]。随着环境问题日益突出, 相关研究逐渐从早期关注静态的单一的景观斑块配置, 深入到注重人类活动影响、生态过程的动态模拟和综合优化。

目前国内生态安全格局研究可分为 3 类: 一是对各单一生态系统过程要素所构建的生态安全格局进行叠加, 得到综合生态安全格局^[8]; 二是以景观生态学为基础, 通过“源地-廊道”结构, 判别不同水平生态安全格局^[9]; 三是综合不同学科、理论对生态安全格局的理解, 着力于对区域生态对象的调整配置进行定量分析^[10], 总体上形成了“提取生态源地-设置阻力面-MCR 识别生态廊道”的基本研究框架^[7,11,12]。而对生态安全格局的优化研究可追溯至 20 世纪 40 年代伦敦等城市的生态结构布局调整^[13], 此后出现了通过生态廊道、基质、斑块重组来实现生态结构优化的研究^[14], 在此基础上, 有学者引入图论原理, 以廊道、基质、斑块间复杂的连通和覆盖关系作为生态安全格局优化依据^[15,16]。现有研究多强调生态安全优化的设计方案, 以定性的过程性探讨为主, 对优化效果量化的结果性分析不足。

收稿日期: 2021-03-19; **修订日期:** 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41201574, 41771167) 资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41201574, 41771167).]

作者简介: 王子琳(1995-), 女, 广西桂林人, 博士研究生, 主要从事自然资源保护、规划与评价。E-mail: zilin_wang@whu.edu.cn

通讯作者: 方世明。E-mail: fsmcug@qq.com

生态安全格局是指生态系统健康完整、生态功能良好且可持续的区域空间状态^[12]。虽国内外相关研究已较为成熟,但仍有不足之处:首先,廊道提取量化依据不足、主观性太强,主要表现在主观消除或合并小面积的生态源地,并用剩下的源地提取生态廊道,或将所有生态源地用于生态廊道提取,造成廊道冗余或廊道可信度不高等问题;其次,对生态安全格局的优化研究不够深入,主要表现在只判定生态安全格局优化区域而不分析优化效果。针对以上问题,本文采用遗传算法选取用于构建生态廊道的最优生态源地,提高廊道准确性、连通性和清晰度,运用图论法对比生态安全格局优化前后的各项指标,定量评判优化效果和优化方案的可行性。

1 研究方法数据来源

1.1 研究区域概况

武汉是湖北省省会,处长江中游区段,地理位置为 113°41'E~115°05'E, 29°58'N~31°22'N,自然区位条件优越;全市以平原地貌为主,北部低山岗垄、南部丘陵凸地,地势较为平坦(图 1);水系发达,淡水资源丰富,湿地面积较大,动植物种类丰富,生态基底较好。而其作为长江经济带核心城市,经济高

速发展的同时也带来了严峻的生态压力,武汉面临着生态保护和经济发展双重需求。因此,研究生态安全格局的构建对于维护武汉生态平衡、优化发展质量、提升发展水平具有重要意义,对其他快速发展的大都市的生态安全格局构建具有参考价值。

1.2 数据来源与处理

本文主要运用 LUCC 数据、DEM 数据、夜间灯光数据、NDVI 数据、社会经济数据、气象数据、基础地理数据构建武汉市生态安全格局,相关数据来源及预处理见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 基于复合维度的生态源地识别

生态源地一般由生态基底较好、稳定连贯的斑块构成^[1,17]。本文在传统的生态系统服务价值、生态敏感性、景观连通性等生态源地识别指标的基础上,增加了生态需求维度共同构建生态源地指标系统,详细的指标测算和方法^[17-30]如表 2。

1.3.2 基于遗传算法的生态廊道提取

生态廊道是区域内物种、能量流动的途径^[31],是沟通各生态源地的线状载体。本文运用遗传算法模拟用于生态廊道提取的最优源地的选取,该算法利用 MATLAB 编程,将问题的求解过程转换成生物进化“优胜劣汰”的编码过程^[32],以获取最优解,从而得到清晰、连贯和辐射度好的生态廊道。采用二进制编码,条件满足的源点取 1,不满足的取 0,主要步骤如图 2。

在初始化种群时,设置初始进化迭代数 $m=0$,最大迭代数 $M=200$ 。分别舍弃 120 831 个和 933 个最小面积的陆地及水域生态源地后,对剩下的 50 万个陆地生态源地设置 $N_l=500$, $P_l=1\ 000$,对剩下的 2 万个水域生态源地设 $N_w=200$, $P_w=100$;此外,本文根据源地斑块的面积大小、源地斑块与所在区域的几何中心的距离确定适应度函数,具体的量化标准参照表 3。

由于大面积源地对调节区域生态安全、保障物质能量流动起到更关键的作用,故对面积设 0.7 的权重,而源地位置权重为 0.3,公式如下:

$$f_l = 0.7 \times \sum_{i=1}^{500000} L_{si} + 0.3 \times \sum_{i=1}^{500000} L_{li} \quad (1)$$

$$f_w = 0.7 \times \sum_{i=1}^{20000} W_{si} + 0.3 \times \sum_{i=1}^{20000} W_{li} \quad (2)$$

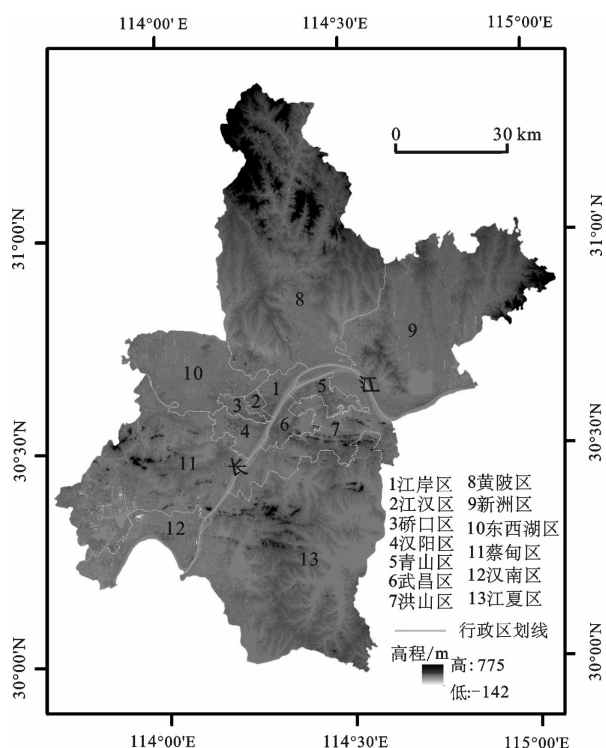


图 1 武汉市高程

Fig.1 The elevation of Wuhan City

表 1 武汉市生态安全格局研究主要数据来源及预处理

Table 1 The main sources and preprocessing of ecological security pattern data in Wuhan

数据类型	数据子类	数据来源/年份/精度	数据预处理
土地利用/土地覆被变化 (LUCC)数据	—	清华大学地球系统科学中心提供的全球土地覆被数据集①/2017年/30 m×30 m	合并、裁剪、解译
DEM数据	—	地理空间数据云GDE MDE M数字高程数据②/2017年/30 m×30 m	合并、裁剪、提取
夜间灯光数据	—	美国国家海洋大气管理局(NOAA)③/NPP-VIIRS数据/2017年/500 m×500 m	裁剪、提取
NDVI数据	—	地理空间数据云 MODIS陆地标准产品④、MOD13Q1/2017年/250 m×250 m	合并、裁剪、提取
社会经济数据	粮食价格数据	《中国农产品价格调查年鉴》⑤/2018年/—	进行相关计算
	粮食单产数据	《武汉统计年鉴2018》⑥、《湖北统计年鉴2018》⑦/2018年/—	进行相关计算
	人口数据	中国科学院资源环境数据中心⑧/2015年/—	裁剪
	GDP数据	中国科学院资源环境数据中心⑧/2015年/—	裁剪
气象数据	降雨数据	中国气象数据网⑨/2017年/500 m×500 m	(取7~10月份均值)空间插值、掩膜提取
基础地理数据	水系数据	地理空间数据云⑩、中国内陆水体信息产品	裁剪、提取、缓冲区处理
	道路数据	OpenStreet Map开放共享数据库⑪/2017年/—	裁剪、提取、缓冲区处理

注: ①<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>; ②<https://www.gscloud.cn/search>; ③https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_compo_sites.html; ④<https://www.gscloud.cn/search>; ⑤<https://max.book118.com/html/2019/0421/8131105010002020.shtm>; ⑥<http://tjj.wuhan.gov.cn/tjfw/tjnj/>; ⑦<https://tjj.hubei.gov.cn/tjsj/sjksx/tjnj/qstjnj/>; ⑧<https://www.resdc.cn/>; ⑨http://data.cma.cn/dataService/cdcindex/datacode/F.0009.0001/show_value/normal.html; ⑩<https://www.gscloud.cn/search>; ⑪www.openstreetmap.org; —为无此项。

式中, f_l 、 f_w 分别为陆地、水域生态源地的适应度函数; L_{si} 和 L_{li} 分别为第 i 个陆地生态源地的面积和位置赋分; W_{si} 和 W_{li} 分别为第 i 个水域生态源地的面积和位置赋分。

基于所求最优源地, 本文参考传统的廊道提取方法, 运用土地利用类型构建基本阻力面, 引入夜间灯光数据模拟人类活动修正基本阻力面, 再利用 MCR 提取生态廊道^[33], 计算方法参考文献 [11, 33]。由于武汉水域众多, 且陆地和水域对相关物质能量流动的阻力不同, 根据相关研究, 分别基于陆地、水域生态源地对不同地类设置不同的基本阻力值以更准确地模拟陆地、水域生态流情况^[11], 再利用 ArcGIS 10.2 提取陆地、水域生态廊道。

1.3.3 基于图论法的生态安全格局优化

现有的研究在空间尺度上划定生态安全格局优化范围后, 对优化效果进行定量分析较少, 难以判定优化方案的可行性。由于图论法可从数字角度揭示事物的空间分布格局^[34], 本文采用该方法对优化前后的结果进行对比, 判定优化效果和优化方案的可行性。采用平均连通数、可能连通率、成本消耗度 3 个指数来反映连接结构、网络连接性和网络的成本耗费, 公式如下:

$$\alpha = \frac{Q_L}{Q_P} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{Q_L}{3(Q_P - 2)} \quad (4)$$

$$C = 1 - \frac{d_p}{d_L} \quad (5)$$

式中, α 为平均连通数, Q_L 为廊道数量, Q_P 为源地数量, $\alpha < 1$ 表示无环路的树形结构, $\alpha = 1$ 为有单一的环状网络结构, $\alpha > 1$ 表示有环路且更为复杂的连通结构; β 为可能连通率, $\beta \in [0, 1]$, $\beta = 0$ 表示有源地未连通, $\beta = 1$ 表示每个源地皆连通; C 为成本消耗度, d_p 为源地之间的直线距离, d_L 为源地之间的廊道长度, C 越大, 表示两点的直线距离与廊道长度相差较大, 即物种沿着廊道迁移的成本消耗越大, 反之则越小。

2 结果分析

2.1 生态源地识别分析

利用 ArcGIS 10.2, 将生态系统服务价值、生态敏感性、景观连通性、生态用地被需求程度图层等权重叠加, 得到生态综合重要性图层, 再利用自然断点法将综合重要性分为 5 级, 选极重要区域作为生态源地, 因武汉市水域众多, 故将生态源地进一

表 2 复合维度下的生态源地识别指标系统构建

Table 2 Construction of ecological source identification index system under compound dimensions

维度和指标层	公式	测算方法和技术	指标选取和测算的依据
生态系统服务价值(ESV)	$ESV_i = \sum S_i \times VC_i$ $ESV = \sum_i ESV_i$ <p>式中, S_i表示土地利用类型^①i的面积大小/hm^2, VC_i是土地利用类型i的生态系统服务价值系数/(元/hm^2)</p>	ArcGIS 10.2、生态服务价值当量因子法	[17~19]
生态敏感性	<p>地质灾害敏感性(GHS)</p> $GHS = \sum_{i=1}^n X_i \times W_i$ <p>式中, X_i为土地利用类型(0.264), 植被覆盖率(0.132), 坡度(0.089), 距主要道路(0.058)、大面积水域(0.162)和小面积水域(0.077)的欧式距离, 降雨侵蚀力^②(0.218)7项指标, W_i为采用层次分析法(AHP)确定的权重(括号内值)</p>	ArcGIS 10.2、多指标决策、层次分析法	[20~26]
水污染敏感性 ^③ (WPS)	$WPS = X_1 \times 0.5 + X_2 \times 0.5$ <p>式中, X_1为人类活动强度, X_2为距水域距离影响度, 0.5为二者的权重</p>		
景观连通性	<p>连通性指数(PC)</p> $PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times p_{ij}}{A^2}$ <p>式中, a_i、a_j分别为生境斑块i和j的面积, p_{ij}为生境斑块i与j之间最大连通路径值, A为所有斑块总面积, n为生境斑块数量</p>	ArcGIS 10.2、Confor Sensinode 2.6、Confor Inputs for ArcGIS 10.X插件	[27,28]
连通重要性值(dPC)	$dPC_i = 100 \times \frac{PC - PC_{i-removed}}{PC}$ <p>式中, $PC_{i-removed}$为去掉生境斑块i后的景观可能连通性指数</p>		[29,30]
生态需求(e)	$e = x_1 \times \lg x_2 \times \lg x_3$ <p>式中, x_1是土地开发利用强度, x_2为人口密度, x_3为GDP</p>	ArcGIS 10.2	[11,28]
生态用地被需求程度(E)	$E_i = \frac{e_i - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}}$ <p>式中, e_i为斑块i的生态需求, e_{\min}为生态需求最小值, e_{\max}为生态需求最大值</p>		[11,28]

注: ①用地类型包括林地、草地、耕地、湿地、水体、建设用地(价值系数为0)、未利用地共7类; ②根据Arnoldus提出的R值方程进行计算^[23]; ③水污染敏感性中采用夜间灯光数据指示人类活动强度, 考虑到植被和降雪及寒暑假人口流动对灯光数据的影响, 最终选择10月份数据进行处理。

步划分为陆地及水域生态源地(图3)。可知生态源地总面积约为1 917.342 km², 约占武汉市总面积的22.33%, 占生态用地总面积26.60%, 主要分布在黄陂区北部、新洲区东部及南部以及江夏区域内。其中水域生态源地面积为1 137.125 km², 约占生态源地总面积的59.31%, 江夏区、黄陂区、蔡甸区的水域生态源地面积分别占总水域生态源地的53.16%、13.63%、10.55%, 且以江夏区东部梁子湖及西南部湖泊水体以及长江汉水条带状分布为中心辐散分布; 陆地生态源地面积约为780.217 km², 主要分布黄陂区、江夏区、新洲区, 各区内陆地生态源地面积分别占总陆地生态源地面积的38.04%、28.28%和13.21%。

2.2 生态廊道提取分析

运用遗传算法最终获取65个最优陆地生态源

地和32个最优水域生态源地(图4a); 利用ArcGIS 10.2, 以单个生态源地质心为起点, 以其他质心为终点, 分别求出陆地、水域生态源地的回溯距离及成本距离, 最终以最小成本路径作为2017年武汉市陆地生态廊道和水域生态廊道(图4b、图4c)。由图可得, 生态廊道总长度为2 305.37 km, 其中陆地生态廊道长度为1 497.86 km, 以武汉中心城区为核心在远城区外环呈环状分布, 在江夏区、黄陂区、新洲区呈簇枝状分布; 水域生态廊道长度为807.51 km, 以长江汉水为中轴向四周辐散, 连接各支流湖泊, 总体呈“丰”字形分布。生态廊道大体避开了人类生产生活中心, 可作为源地间物种迁移和能量流通的桥梁。

2.3 生态安全格局构建分析

将2017年武汉市生态源地及生态廊道图层叠

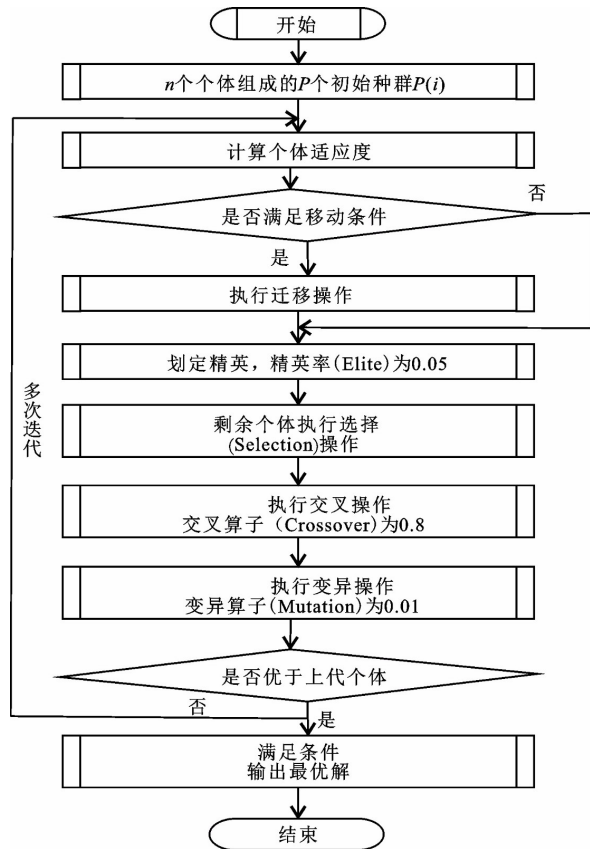


图2 遗传算法流程图

Fig.2 Flowchart of genetic algorithm

加, 得到武汉市生态安全格局(图 5a)。可知, 武汉市生态源地符合武汉市地形地类特征, 定位到木兰山、云雾山、将军山、九真山、青龙山、吴家山等主要远城区山脉, 以及中心城区长江、汉水和远城区府河、梁子湖、汤逊湖、上涉湖、武湖、涨渡湖等主要水体区域, 而环状陆地廊道及“丰”字形水域廊道可基本实现域内生态源地间的连通。

在空间形态上, 武汉市生态安全格局特征大体呈现“三横、三纵、三团簇”架构(图 5b)。其中, “三横”包括北部大别山余脉林地轴、中部建成区与生

态用地交叉轴和南部湖泊水域连接轴; “三纵”分为西部低山农田跨越轴、中部长江水系承接轴及东部林地水域交错轴; “三团簇”分别是“北部低山林地团簇”“东北山麓林区团簇”“南部岗丘水域交叉团簇”, “团簇”多为大面积连片的林地或林地与水域交织地带, 生态基底较好, 是域内生态源地主要布区, 对维持武汉市生态系统稳定安全至关重要。“三横、三纵”跨越中心建设用地与各生态用地的交错区域, 以市中心长江为核心交叉架构武汉市物质能量流路径, 连通“三团簇”及其他点块状生态源地。

2.4 生态安全格局优化分析

武汉市“三横、三纵、三团簇”生态安全格局虽能架构环状交叉的源地连通布局, 但以廊道、源地密度和二者之间连接的复杂程度为依据对图 5 进行判别, 可知黄陂区中南部、东西湖区西部郊区、蔡甸区西南部、新洲区中部偏东南一带及江夏区西南部 5 个区域“团簇”及廊道辐射单薄, 生态功能较弱, 生态安全稳定性有待提高; “三纵”、北部大别山余脉林地轴的右半轴和南部湖泊水域连接轴对应区域存在生态源地稀疏的长廊道, 影响了生物流动性。据此, 本文在团簇及廊道辐射薄弱的区域对应划分出产业园区恢复区、新农村建设生态区、绿色农业发展区、卫星城市衔接区、重要水源涵养区 5 个优化区域的大致范围, 取各优化区域面的质心代表新增生态源地, 促进生态流功能, 其中重要水源涵养区质心为新增水域生态源地, 其余 4 个区域质心为新增陆地生态源地; 此外, 针对以上长廊道, 在连接距离较远的两个生态源地的单一生态廊道的中点和无生态源地的廊道分支处增加生态垫脚石以促进生态源地间的联系。经分析, 以上位置点共 16 个, 其中, 新增的陆地和水域生态垫脚石各 8 个, 可作为生物栖息地和物质能量流的中转休息站(图 6)。

表 3 源地斑块的面积大小和与所在分区的几何中心的距离的量化标准

Table 3 The quantification standard of the area size of the source patch and the distance from the geometric center of the region

陆地生态源地面积/m ²	L_s	水域生态源地面积/m ²	W_s	源地距所在分区中心的距离/m	L_i 或 W_i
$\geq 1 \times 10^6$	9	$\geq 2.0 \times 10^5$	9	0~1 000	9
$8 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$	7	$1.7 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$	7	1 000~2 000	7
$6 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5$	5	$1.5 \times 10^5 \sim 1.7 \times 10^5$	5	2 000~3 000	5
$3 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$	3	$1.3 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5$	3	3 000~5 000	3
$\leq 3 \times 10^5$	1	$\leq 1.3 \times 10^5$	1	>5 000	1

注: L_s 和 L_i 分别为陆地生态源地的面积和位置赋分; W_s 和 W_i 分别为水域生态源地的面积和位置赋分。

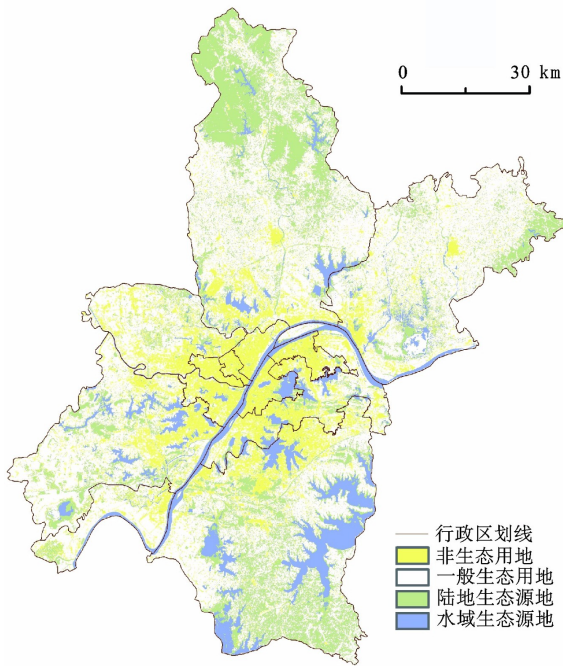


图3 2017年武汉市陆地、水域生态源地

Fig.3 Land and water ecological sources of Wuhan in 2017

新增生态源地和生态垫脚石后的陆地生态廊道总长度为 1 480.50 km, 比优化前略短, 而优化后水域生态廊道长度为 822.16 km, 比优化前稍长。通过图论法, 比较优化前后的平均连通数、可能连通率、成本消耗度(表 4), 可知优化后的生态廊道是一个更复杂的连通网络, 连通性更强, 且节点连通率增加、成本消耗较少。可见增加生态源地和生态垫脚石后, 在廊道长度变化不大的情况下, 可扩散

廊道辐射范围、促进物质生态流的顺利高效进行、提高武汉市生态整体连通性和稳定性、保障边界生态安全, 从而提高武汉全域范围内的生态安全性, 即划定的 5 个生态安全格局可优化区域较为合理, 该优化方案可行。

3 结论与讨论

本文引入遗传算法构建 2017 年武汉市生态安全格局, 对传统的“源地-廊道”生态安全格局构建基本框架进行了改进, 此外, 通过关键生态格局的识别与保护来探索武汉市生态安全的提升空间范围及优化策略, 运用图论法对比优化前后的生态安全格局, 判定优化效果和优化方案可行性。主要研究结论如下: ① 2017 年武汉市生态源地总面积约为 1 917.342 km², 其中陆地生态源地面积为 780.217 km², 占比 40.69%, 主要分布在黄陂区北部和新洲区东部低山林地以及江夏区中南部岗岭山丘; 水域生态源地面积为 1 137.125 km², 占比 59.31%, 布局在较大面积的江河湖泊地带。② 运用遗传算法分别获取了 65 个最优陆地生态源地和 32 个最优水域生态源地, 所得的生态廊道总长度为 2 305.37 km, 总体上能辐散武汉全域。其中陆地生态廊道长度为 1 497.86 km, 占比 64.97%, 在武汉市远城区外环呈环状分布; 水域生态廊道长度为 807.51 km, 占比 35.03%, 以长江汉水为中轴向四周扩散, 连接各地支流, 呈“丰”字形分布。③ 2017 年武汉市生态安全格局大体表现为“三横、三纵、三团簇”特征,

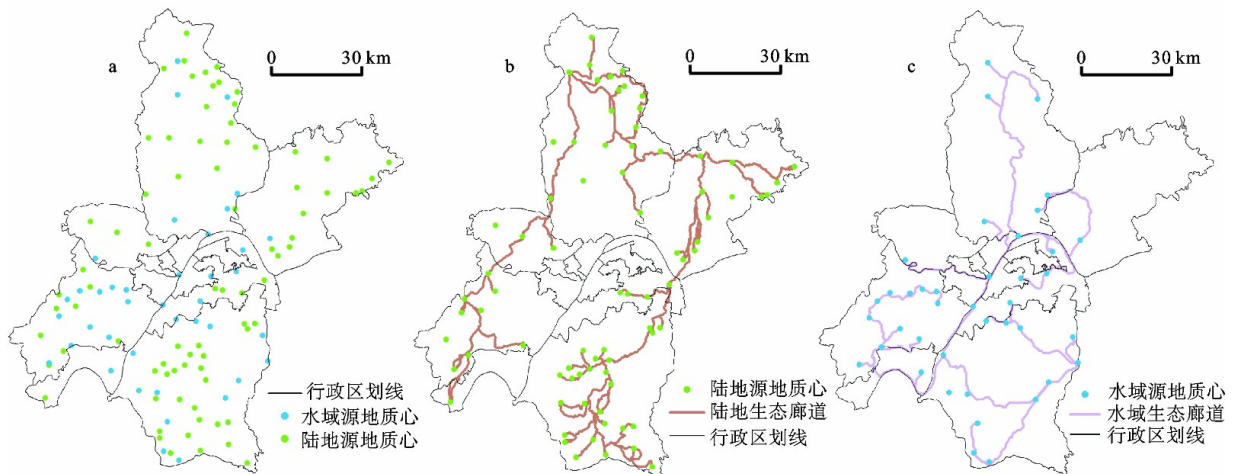


图4 2017年最优生态源地(a)、武汉市陆地生态廊道(b)和水域生态廊道(c)

Fig.4 The optimal ecological sources (a), the land ecological corridor (b) and the water ecological corridor (c) of Wuhan in 2017

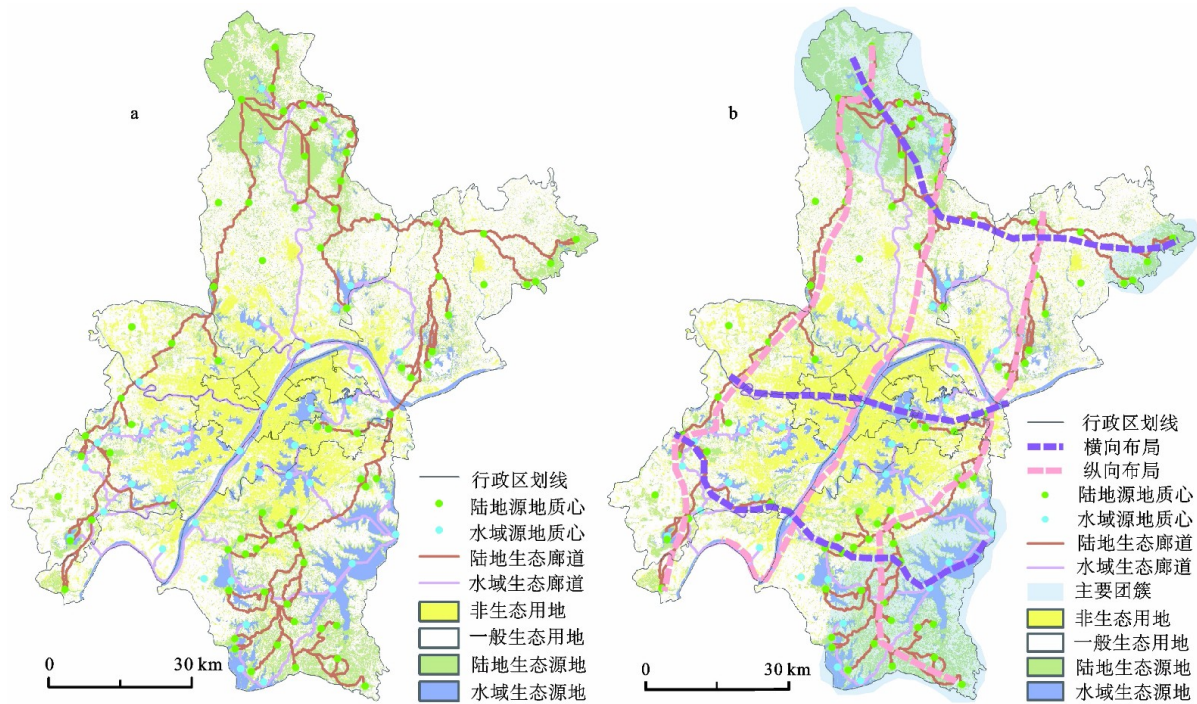


图5 2017年武汉市生态安全格局(a)及其空间形态特征(b)

Fig.5 Ecological security pattern (a) and spatial morphological characteristics of ecological security pattern (b) of Wuhan in 2017

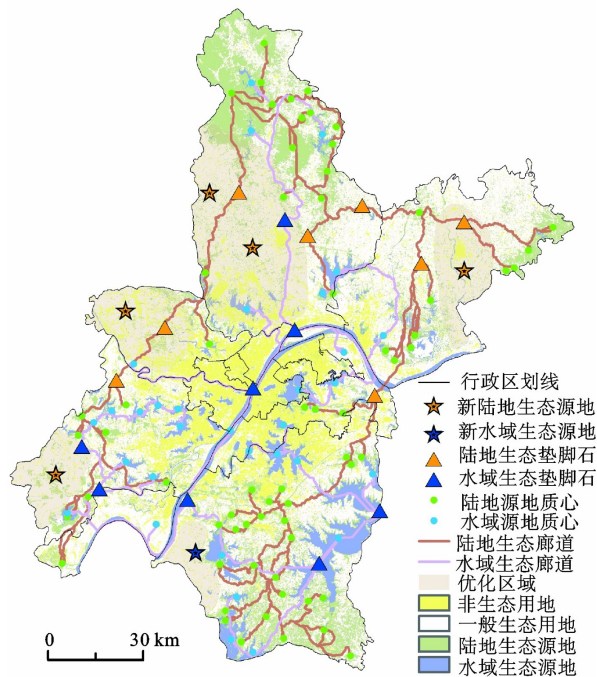


图6 2017年武汉市生态安全格局优化区域范围

Fig.6 Regional scope of ecological security pattern optimization in Wuhan in 2017

基本能架构环状交叉的源地连通布局。④ 通过新增 5 个生态源地、8 个陆地生态垫脚石和 8 个水域

表4 优化前后相关参数对比

Table 4 Comparison of relevant parameters before and after optimization

	优化前 长度/km	优化后 长度/km	优化前平 均连通数	优化后平 均连通数
陆地生态廊道	1497.86	1480.50	1.38	1.52
水域生态廊道	807.51	822.16	1.19	1.28
	优化前可 能连通率	优化后可 能连通率	优化前成 本消耗度	优化后成 本消耗度
陆地生态廊道	0.48	0.70	0.48	0.42
水域生态廊道	0.42	0.64	0.40	0.40

生态垫脚石缓解武汉边缘地带生态安全薄弱的问题。利用图论法计算优化前后的平均连通数、可能连通率、成本消耗度,可知优化后的生态廊道是一个更复杂的连通网络,连通性更强,且节点连通率增加、成本消耗较少,该优化方案可行,优化效果较好。

本文运用遗传算法模拟物种优胜劣汰的客观规律,采用定量方法选取最优生态源地,提取清晰、连贯、可信度高的生态廊道,有效的克服了现有研究直接将所有生态源地作为廊道的源点或主观剔除面积较小的生态源地而导致的所提取的生态廊道重叠冗余或准确性不足的缺陷,进而构建贴近现实的

生态安全格局。此外,通过分析所构建的2017年武汉市生态安全格局的不足并对其进行改进,新增5个生态源地、8个陆地生态垫脚石和8个水域生态垫脚石作为原生态安全格局的补充,运用图论法对优化前后的生态安全格局进行量化对比,在一定程度上弥补了现有研究只划定优化区域却忽视优化效果的不足,可为相关研究提供新思路,也可为城市规划者进行生态红线划定或规划新增生态用地提供有力的数据支撑。

本文也存在一定的问题,因计算景观连通性的软件存在一定的局限性,对节点数量、距离阈值等要求较高^[11,28,29],本文在舍弃部分斑块以提取核心生境斑块时仅考虑了各地类斑块面积大小和位置分布;此外,直接以“团簇”辐射单薄、源地和廊道稀疏作为生态安全格局优化区域的判定标准。二者皆具有一定的主观性,在未来的研究中,可探索更合理的方法,利用相关模型作为核心斑块和生态安全格局优化区域的提取依据,以进一步提高生态安全格局的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 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. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]
- [2] Beier P, Spencer W, Baldwin R F et al. Toward best practices for developing regional connectivity maps[J]. *Conserv Biol*, 2011, 25(5): 879-892.
- [3] 滕明君.快速城市化地区生态安全格局构建研究——以武汉市为例[D].武汉:华中农业大学,2011. [Teng Mingjun. Research on the construction of ecological security pattern in rapidly urbanized areas—A case study of Wuhan city. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.]
- [4] Warntz W. The topology of a socio-economic terrain and spatial flows[J]. *Papers in Regional Science*, 1966, 17: 47-61.
- [5] Michele R, Crist B W G H. Assessing the value of roadless areas in a conservation reserve strategy[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 181-191.
- [6] Lique C, Kleeschulte S, Dige G et al. Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: A Pan-European case study[J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 268-280.
- [7] 祝玲,林爱文,陈飞燕.基于生态敏感性和生态系统服务价值的生态安全格局构建与优化[J].*国土与自然资源研究*, 2019, 40(3): 58-63. [Zhu Ling, Lin Aiwen, Chen Feiyan. Construction and optimization of ecological security pattern based on ecological sensitivity and ecosystem service value. *Territory & Natural Resources Study*, 2019, 40(3): 58-63.]
- [8] 俞孔坚,李海龙,李迪华,等.国土尺度生态安全格局[J].*生态学报*, 2009, 29(10): 5163-5175. [Yu Kongjian, Li Hailong, Li Dihua et al. National scale ecological security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5163-5175.]
- [9] 韩宗伟,焦胜,胡亮,等.廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建[J].*自然资源学报*, 2019, 34(10): 2244-2256. [Han Zongwei, Jiao Sheng, Hu Liang et al. Construction of ecological security pattern based on coordination between corridors and sources in national territorial space. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2244-2256.]
- [10] 何玲,贾启建,李超,等.基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟[J].*农业工程学报*, 2016, 32(3): 275-284. [He Ling, Jia Qijian, Li Chao et al. Land use pattern simulation based on ecosystem service value and ecological security pattern. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3): 275-284.]
- [11] 黄隆杨,刘胜华,方莹,等.基于“质量-风险-需求”框架的武汉市生态安全格局构建[J].*应用生态学报*, 2019, 30(2): 615-626. [Huang Longyang, Liu Shenghua, Fang Ying et al. Construction of Wuhan's ecological security pattern under the "quality-risk-requirement" framework. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 615-626.]
- [12] 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. [Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484.]
- [13] Longley P, Batty M, Shepherd J et al. Do green belts change the shape of urban areas? A preliminary analysis of the settlement geography of South East England[J]. *Regional Studies*, 1992, 26(5): 437-452.
- [14] 杨天荣,匡文慧,刘卫东,等.基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局[J].*地理研究*, 2017, 36(3): 441-452. [Yang Tianrong, Kuang Wenhui, Liu Weidong et al. Optimizing the layout of eco-spatial structure in Guanzhong urban agglomeration based on the ecological security pattern. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 441-452.]
- [15] 徐嵩,王鹤,孔维东.防灾视角下基于MCR模型的山地生态安全格局优化研究——以京津冀山区为例[J].*灾害学*, 2021, 36(2): 118-123. [Xu Song, Wang He, Kong Weidong. Mountainous optimization of ecological security pattern based on MCR Model from the perspective of disaster prevention: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei mountainous Area. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(2): 118-123.]
- [16] Xiao He, Liu Yunhui, Yu Zhenrong et al. Combination of eco-profile and least-cost model for eco-network planning[J].

- Chinese Geographical Science, 2014, 24(6): 113-123.
- [17] 彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 361-367. [Peng Baofa, Zheng Yu, Liu Yu. Coupling ecosystem services and regional ecological security pattern. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 361-367.]
- [18] Costanza R, Darge R, Degroot R et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [19] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [20] 贾三满, 张群, 路璐. 北京大清河流域生态涵养区生态环境敏感性评价[J]. 城市地质, 2019, 14(3): 1-6. [Jia Sanman, Zhang Qun, Lu Lu. Evaluation on eco-environment sensibility in ecological conservation area of Daqing River watershed of Beijing. *Urban Geology*, 2019, 14(3): 1-6.]
- [21] 康娅琳. 武汉市城市湖泊湿地生态敏感性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. [Kang Yalin. Study on ecological sensitivity of urban lake wetland in Wuhan city. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.]
- [22] 孙保平, 赵廷宁, 齐实. USLE在西吉县黄土丘陵沟壑区的应用[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(黄土高原试验区土壤侵蚀和综合治理减沙效益研究专集), 1990(2): 50-58+15. [Sun Baoping, Zhao Tingning, Qi Shi. USLE application in the loess hilly and gully region of Xiji County. *Research of Soil and Water Conservation*, 1990(2): 50-58+15.]
- [23] Arnoldus H M J. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco[J]. *FAO Soil Bulletin*, 1977, 34: 39-51.
- [24] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. *Transactions of the ASAE*, 1983, 26(1): 153-157.
- [25] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1-9+18. [Zhang Xiankui, Xu Jinghua, Lu Xiuqin et al. A study on soil erosion equation in Heilongjiang Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992, 12(4): 1-9+18.]
- [26] 于泳, 高强, 高华斌. 湖北省降雨侵蚀力时空分布特征初步研究[J]. 长江科学院院报, 2008(3): 18-22. [Yu Yong, Gao Qiang, Gao Huabin. A preliminary study on spatial and temporal distribution of rainfall erodibility in Hubei Province. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008(3): 18-22.]
- [27] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133. [Wu Jiansheng, Zhang Liqing, Peng Jian et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4125-4133.]
- [28] 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. [Zhang Dou, Qu Liping, Zhang Jiehao et al. Ecological security pattern construction method based on the perspective of ecological supply and demand: A case study of Yangtze River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7525-7537.]
- [29] 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[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(2-3): 91-103.
- [30] 臧卓, 张亚男. 不同尺度下城市绿地景观格局与连通性研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(25): 49-55. [Zang Zhuo, Zhang Yanan. Study on landscape pattern and connectivity with different scale of urban green space. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(25): 49-55.]
- [31] 蔡青, 曾光明, 石林, 等. 基于栅格数据和图论算法的生态廊道识别[J]. 地理研究, 2012, 31(8): 1523-1534. [Cai Qing, Zeng Guangming, Shi Lin et al. Ecological corridor recognition based on raster data and graph theory algorithm. *Geographical Research*, 2012, 31(8): 1523-1534.]
- [32] 张晓琳, 金晓斌, 赵庆利, 等. 基于多目标遗传算法的层级生态节点识别与优化——以常州市金坛区为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 174-189. [Zhang Xiaolin, Jin Xiaobin, Zhao Qingli et al. Identification and optimization of hierarchical ecological nodes based on multi-target genetic algorithm: Take Jintan district of Changzhou as an example. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 174-189.]
- [33] 李恒凯, 刘玉婷, 李芹, 等. 基于MCR模型的南方稀土矿区生态安全格局分析[J]. 地理科学, 2020, 40(6): 989-998. [Li Hengkai, Liu Yuting, Li Qin et al. Analysis of ecological security pattern of southern rare earth mining area based on MCR model. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(6): 989-998.]
- [34] Zhao Shuming, Ma Yifei, Wang Jinling et al. Landscape pattern analysis and ecological network planning of Tianjin City[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 46: 126479.

Construction and Optimization of Ecological Security Pattern Based on Genetic Algorithm and Graph Theory: A Case Study of Wuhan City

Wang Zilin¹, Li Zhigang¹, Fang Shiming²

(1. School of Urban Design/Hubei Habitat Environment Research Center of Engineering and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 2. School of Public Administration/Key Laboratory of Legal Evaluation Project of Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Ecological security pattern is the bridge between ecosystem services and human society development, and it is a healthy spatial pattern of ecosystem existing in landscape. Most of the studies on corridor extraction have insufficient quantitative basis and strong subjectivity. For example, all ecological sources are directly used for the extraction of ecological corridors, or after subjectively eliminating or merging small ecological source areas, the remaining ecological source areas are used to extract ecological corridors, which is easy to cause the problems of corridor redundancy or low credibility. In addition, the research on the optimization of the ecological security pattern is not in-depth enough, which is mainly manifested in the determination of the optimized areas of the ecological security pattern without quantitative analysis of the optimization effect. This paper takes Wuhan City as an example, by analyzing ecosystem service value, ecological sensitivity, landscape connectivity and ecological needs, Wuhan land and water ecological sources were identified. And using genetic algorithm to obtain the optimal ecological source, on this basis, the minimum cumulative resistance model (MCR) was used to extract the land and water ecological corridors, respectively. The ecological source and ecological corridor are superimposed to construct the ecological security pattern of Wuhan in 2017. The results show that in 2017, the total area of ecological source in Wuhan was about 1 917.342 km², of which the land and water ecological source areas were 780.217 km² and 1 137.125 km², respectively. The number of the optimal land and water ecological sources identified by the genetic algorithm is 65 and 32 respectively. The extracted ecological corridors have a total length of 2 305.37 km, and the length of land and water ecological corridors is 1 497.86 km and 807.51 km, respectively. The ecological security pattern in Wuhan presents the characteristics of “three horizontal, three vertical and three clusters”, and in general, the ecological security pattern can construct a circular intersecting layout of ecological sources. In addition, eight new land ecological stepping stones, 8 new water ecological stepping stones and 5 new ecological sources were added in this paper. The graph theory method was used to compare the relevant indexes before and after optimization, and it was found that a more perfect ecological security pattern could be constructed after optimization, the optimization effect is good and the optimization scheme is feasible. The construction and optimization method of ecological security pattern can provide a more scientific reference for the study of ecological security pattern in rapidly developing metropolises.

Key words: ecological security pattern; ecological sources; ecological corridor; genetic algorithm; graph theory; Wuhan