

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

张晓琳¹, 金晓斌^{1,2,3}, 赵庆利⁴, 任婕¹, 韩博¹,
梁鑫源¹, 周寅康^{1,2,3}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 3. 江苏省土地开发整理技术工程中心, 南京 210023; 4. 自然资源部土地整治中心, 北京 100035)

摘要: 有效生态网络构建可保障区域生态安全, 是实现区域可持续发展的重要路径。基于生态节点的内涵解析, 建立了“资源型战略点—结构型战略点—结构型薄弱点”的多层级生态节点识别体系, 利用金坛区 2015 年的遥感影像、土地利用数据、POI 数据等, 通过多目标遗传算法、最小阻力模型等方法, 构建了金坛区层级生态网络, 并采用表征网络拓扑结构和节点效用性等指标, 定量评价生态节点优化前后的生态网络性能, 取得以下主要研究结论: (1) 多层级生态网络在节点效用、网络整体性能上显著优于一般网络, 且在复杂生态水网区域具有较强适用性; (2) 金坛区现状生态网络分布不均匀, 生态节点布局亟待优化, 经优化节点覆盖率提升了 17.70%, 节点分布均匀度降低 45.45%, 平均聚类系数提升了 87.36%; (3) 多层级生态节点体系具有实践应用性, 应针对不同类型生态节点采取差别化管理策略。

关键词: 生态节点; 布局优化; 遗传算法; 生态网络; 区域生态安全

工业革命以来, 伴随城镇化、工业化快速推进, 人类对资源过度开发和滥用, 导致了一系列环境问题^[1]。为保护区域生态环境, 促进区域可持续发展, 联合国世界环境与发展委员会 (WCED) 在 1987 年的《我们共同的未来》报告中提出要维护“环境安全”^[2]。1989 年国际应用系统分析研究所 (IASA) 首次提出构建“生态安全”^[3], 开展区域生态安全研究已经成为迫切需求。为确保区域生态安全, 十八大报告将生态文明建设作为“五位一体”总体布局之一。十九大报告对生态文明建设提出更高要求, 提出“统一行使所有国土空间用途管制和生态保护修复职责, 统筹山水林田湖草系统治理”的国家战略, 国土空间生态修复应运而生。作为推进生态文明建设的重要抓手, 国土空间生态修复强调以“整体保护、系统修复、综合治理”方式, 从中宏观空间尺度上统筹自然资源管理, 构建区域生态安全格局^[4]。基于“基质—斑块—廊道”的景观生态学理论, 生态网络构建与优化已成为量化区域生态安全格局的重要手段^[5-7]。立足国土空间生态系统整体性、系统性、完整性的特点, 国土空间生态修复应构建多尺度的生态网络结构, 充分发挥系统功能^[4]。如何有效构建区域生态网络, 保障生态系统结构和功能完整性, 显得尤为重要^[8-10]。

生态网络通过识别关键生态节点^[11], 提取重要生态廊道^[12], 形成区域生态安全格局骨架, 使景观中的生态过程在物质、能量上达到高效^[13], 在增强景观连通性、生物多样性

收稿日期: 2019-10-06; 修订日期: 2019-12-16

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAD06B02)

作者简介: 张晓琳 (1994-), 女, 河北邢台人, 硕士, 主要从事土地利用与景观生态研究。

E-mail: 2933793970@qq.com

通讯作者: 金晓斌 (1974-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用变化与土地资源管理研究。E-mail: jinxb@nju.edu.cn

性方面发挥着重要作用^[14,15]。基于“识别源地—构建阻力面—提取廊道”路径，构建区域生态网络的方法已趋于成熟^[16]。生态节点作为生态网络重要组成部分，其影响范围和空间分布对生态网络节点覆盖度、整体连通性、稳定性等产生较大影响^[6,7,17]。在生态节点识别上，依据生态节点的不同内涵和作用，传统生态节点有着不同识别方法。从自身生态功能角度出发，关键生态节点是区域中具有重要生态功能或生态敏感性、脆弱性斑块的几何中心点或重心点^[7,18]，一般通过因素评价方法进行识别^[19,20]。从所处空间位置角度出发，考虑生态网络所受外界干扰的程度，“生态节点”位于生态廊道最薄弱处，对生态流的运行起关键作用^[21,22]。此类生态节点识别方法多通过累积阻力面模型构建，生成区域生态廊道，进一步根据空间位置类型识别生态节点。由于生态节点存在定义模糊、界限不清等问题，其位置判定并不统一。对此类生态节点的判定位置进行总结，大致有六种类型：阻力面的“山脊线”与生态廊道的交点，记为Ⅰ类生态节点^[22]；阻力面“脊线”与“谷线”的交点，记为Ⅱ类生态节点^[21]；等阻力线交点或切点，记为Ⅲ类生态节点^[23,24]；生态廊道的交点，记为Ⅳ类生态节点^[23,25,26]；生态廊道的转折点，记为Ⅴ类生态节点^[27]；生态廊道与小型生态源地交点，记为Ⅵ类生态节点^[27]。目前传统生态节点识别方法较多，且多注重其位于生态廊道薄弱处的特性，却往往忽略其在整体景观格局中处于重要战略位置的特点^[21-27]。通过节点布局优化实现全局最优目标，常见于无线传感器网络、城市物流网络的节点布局研究，利用群智能算法、图论、force-directed 仿真模型等方法，优化节点布局来达到提升网络覆盖率、减少重叠区和盲区、降低能耗等多种目标^[17,28,29]。多目标遗传算法（MO-GA）作为群智能算法的一种，通过仿效生物界中的“物竞天择、适者生存”的演化法则，利用选择（Selection）、交叉（Crossover）、变异（Mutation）三种基本算子，使后代种群比前代更加适应于环境，最终迭代产生的末代种群经过最优个体解码（decoding），作为多目标问题的近似最优解。该方法具有收敛性优、鲁棒性高等特点，在解决全局最优问题上具有显著优势^[28-30]。采用多目标遗传算法识别整体景观格局中最优的战略位置，丰富和完善生态节点内涵及识别方法，为生态节点布局与优化提供新的研究思路。

改革开放以来，人口、产业不断向东部沿海发达区集聚，人地矛盾越发突出，区域生态安全面临威胁^[1]。同时该地区拥有得天独厚的自然条件和地理环境，区域整体生态环境较优。其中长江中下游地区地形以低山、丘陵、平原为主，水网密集^[15]。受水网分割等因素影响，区域整体生态用地细碎，景观类型多样，生态网络较为复杂^[31]，应用传统生态节点识别方法，在区域全局生态网络构建上具有一定局限。主要体现在生态节点本身不易辨别且误差较大；生态节点空间分布随机，区域生态网络覆盖有限等方面。同时面对高强度的经济发展需求和人口承载压力，维护江南水乡区的特色自然环境，保障区域生态安全，显得尤为迫切。基于此，本文拟立足景观生态战略点的概念内涵，以长江中下游区域的常州市金坛区为例，系统性解析各类生态节点，构建多层次生态节点体系，同时利用多目标遗传算法，优化生态节点识别提取方法，为县域复杂生态网络构建提供支撑。

1 多层次生态节点解析

1.1 生态节点内涵解析

生态网络是区域生态安全格局骨架，其中生态源地作为生态安全格局的基础，具有

重要生态功能和一定辐射能力^[16]。生态廊道将不同生态源地相连,是网络中重要组成部分,发挥着维护网络稳定性的作用。基于景观格局规划思想^[18],除生态源地、生态廊道外,区域生态安全格局还存在其他关键地段。借鉴俞孔坚^[32,33]提出“景观生态战略点”的概念,生态节点应至少具有两种基本特性:空间属性、功能属性。在功能属性上,具有重要生态功能或生态敏感性、脆弱性的生态源地应为生态节点^[34,35],该类点记为资源型战略点。在空间属性上,在整体景观格局中发挥重要空间战略位置或易受人类破坏的关键地段应为生态节点^[33],前者记为结构型战略点,后者记为结构型薄弱点。依据生态系统整体性、系统性理论,结构型战略点并不唯一,而是共同作用来维持生态系统稳定性,从而影响生态网络整体连通性和节点覆盖度。而结构型薄弱点对水平生态过程影响较大,往往位于生态流频繁的生态廊道上,是生态廊道中的重要点和薄弱点,应加以建设和保护。资源型战略点、结构型战略点和结构型薄弱点共同构成生态网络中的生态节点,并发挥着不同功能和效用。

从节点影响范围来看,资源型战略点具有最大的影响范围,往往由生态源地及其缓冲区组成^[16],起到生态源的作用;结构型战略点、结构型薄弱点具有一定影响范围,前者以提升生态流传递效率为目的,后者以疏通生态廊道、保护生态网络为目的。从节点空间分布来看,资源型战略点主要位于较大生境斑块的几何中心点或重心点^[7,18];结构型薄弱点位于生态廊道薄弱处,即上述 I~VI类生态节点;结构型战略点并不依靠现有景观格局直接确定,而基于多目标优化算法识别,达到最佳生态网络连通性、最大有效覆盖度。从节点可移动性角度来看,由于区域生态源地的斑块较大,并具有重要生态功能,其产生的资源型战略点本身不具有移动性,属于固定性点;受人类需求和开发程度的影响,结构型战略点的空间位置随时间动态变化,属于可移动性点。基于不同类型生态节点的属性特征和影响范围等,对生态节点内涵进行解析,详见图1。

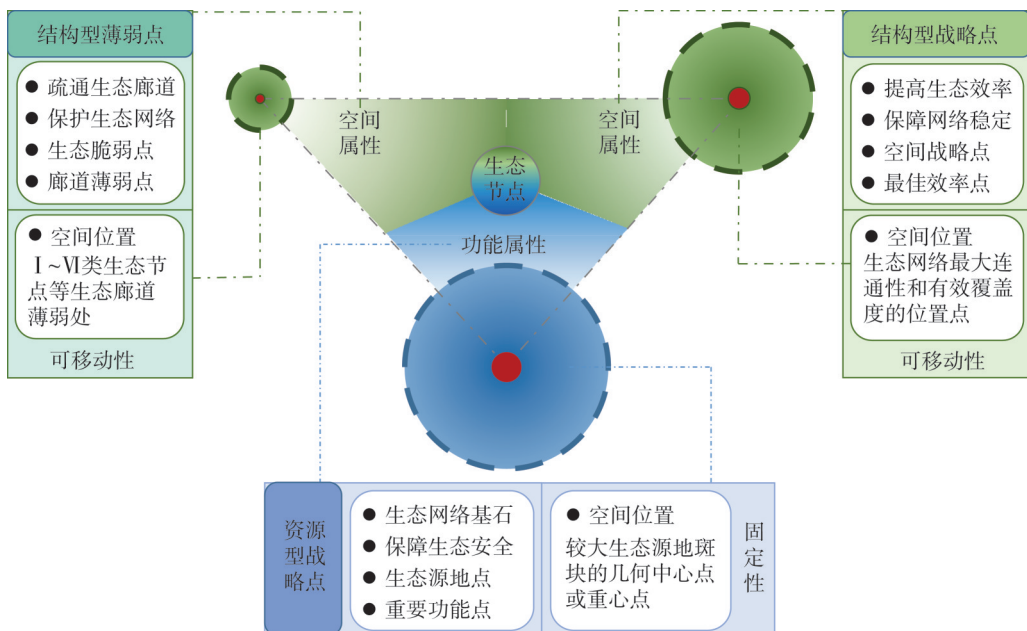


图1 生态节点内涵解析

Fig. 1 Analysis of ecological nodes

1.2 生态节点体系构建

一般生态网络中的生态节点包括两种类型，即资源型战略点和结构型薄弱点，其组建生态网络的路径是先识别生态源地，明确资源型战略点，再通过构建景观阻力面，提取廊道方式，确定结构型薄弱点，进而形成“资源型战略点—生态廊道—结构型薄弱点”的区域生态网络^[16]。但生态节点还应包括结构型战略点，将结构型战略点纳入多层次生态节点体系，识别区域生态安全关键战略点，是非常重要的中间环节。为达到改善生态网络鲁棒性、提升节点覆盖率和网络连通度等多种目的，基于“资源型战略点—结构型战略点—生态廊道—结构型薄弱点”的区域生态网络构建模式亟需实践。

资源型战略点基于对区域生态安全具有重要意义的生态源地产生，是生态网络构建的奠基者^[12]。关于生态源地的识别，多依据指标定量评价确定^[16]。生态红线是在生态空间范围内具有特殊重要生态功能或生态环境敏感脆弱的区域，是保障和维护生态安全的底线。为进一步科学评估生态红线，2017年原环境保护部、国家发展和改革委员会发布了《生态保护红线划定指南》。将经过科学修订的生态红线应用于生态源地识别，符合生态源地科学内涵和现实管控要求^[16,36]，为生态网络构建提供先决条件。基于资源型战略点，需在多目标、多条件限制的需求下，借助群智能算法识别结构型战略点。多条件限制指的是：(1) 由于资源型战略点具有固定性，本身具有一定影响范围，考虑生态节点效率，结构型战略点位置选择不能重复；(2) 从结构型战略点自身生态属性出发，非生态用地的城市建设用地不能选择。多目标优化指的是：在保证节点覆盖率连通同时，节点数量最少，避免节点出现较多冗余^[28]。结构型战略点辅助资源型战略点共同构成初步生态网络骨干节点，在此基础上识别结构型薄弱点。结构型薄弱点位于廊道薄弱处，通过构建阻力面，提取生态廊道方式识别，是构成最终生态网络的辅助点。按节点识别顺序排序，生态节点的层级体系呈倒金字塔形状，详见图2。

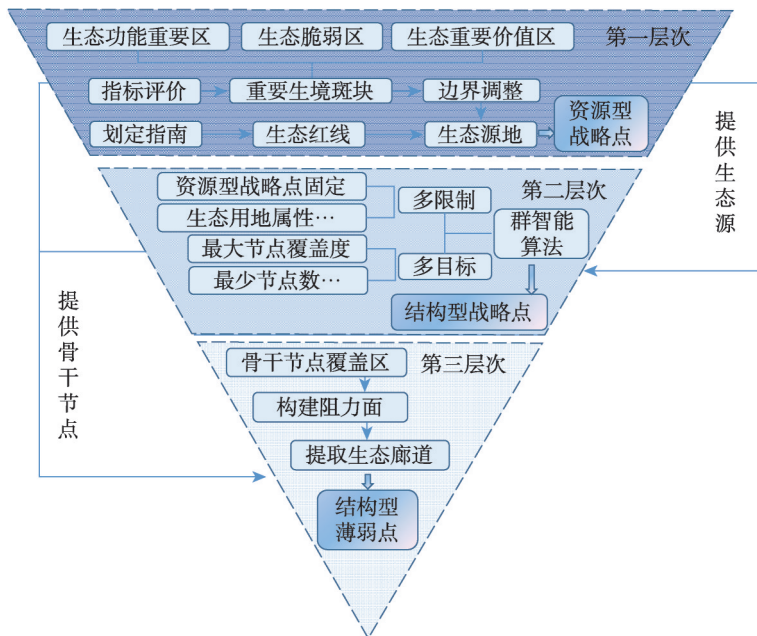


图2 多层次生态节点体系构建

Fig. 2 The construction of multi-level ecological nodes

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

常州市金坛区地处江苏省南部, $119^{\circ}17'45''\sim 119^{\circ}44'59''\text{E}$ 、 $31^{\circ}33'42''\sim 31^{\circ}53'22''\text{N}$ 之间, 位于宁沪杭三角地带, 区域总面积为 975.73 km^2 , 其中农用地 453.36 km^2 、建设用地 192.14 km^2 、水域 324.88 km^2 (图3)。全区紧邻太湖, 自然环境条件优越, 西缘为南北走向的茅山低山丘陵, 东部为长江三角洲西部的冲积湖积平原, 南部为以长荡湖为中心的生态水网, 属于典型江南水乡。金坛区经济较发达, 2017年评为中国综合实力百强区、中国工业百强区。“十二五”以来全区经济社会发展迅速, 2011年地区生产总值为365.1亿元, 2018年实现地区生产总值801.93亿元, 是2011年的2.2倍。随着快速经济发展, 区内面临土地开发程度变高, 生物多样性水平下降, 水文过程遭到破坏以及生境斑块连通性降低等现实问题。为保护丘陵、湖泊地区生态基底空间, 促进“山、湖、城”资源统一筹划, 金坛区提出建设“山水生态城市、精致休闲城市”的总体目标, 与苏南同步实现基本现代化。新时期, 面对金坛区建设生态强区的目标, 如何有效构建区域生态网络, 保障区域生态安全格局, 显得尤为迫切。

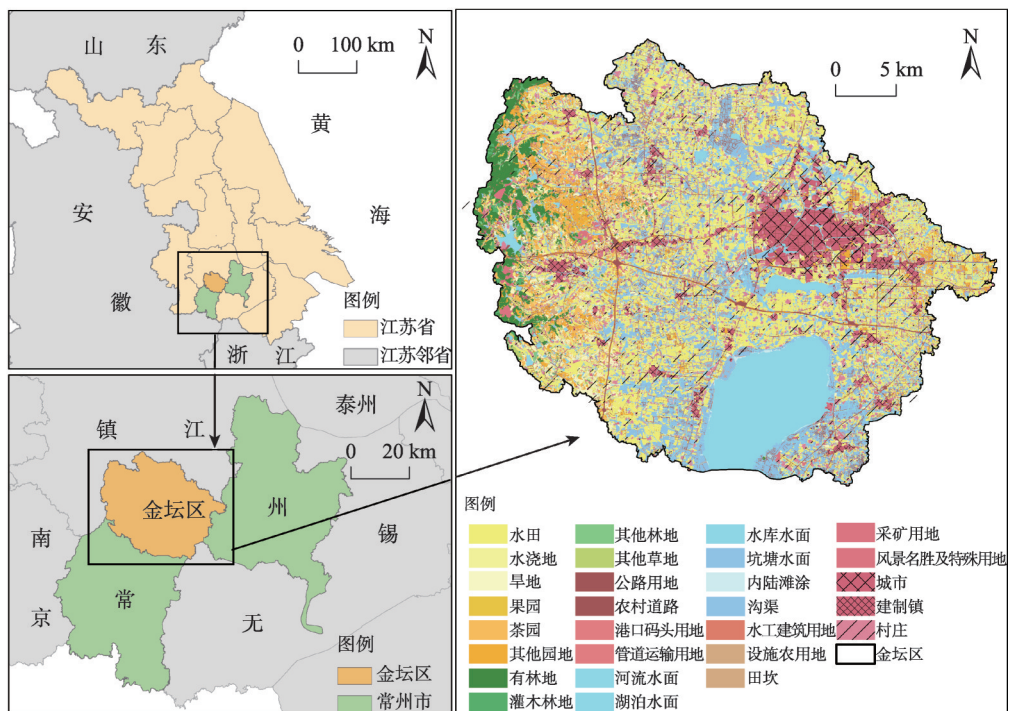


图3 研究区位置示意图

Fig. 3 Location of the study area

2.2 数据来源与处理

本文采用土地利用数据、遥感影像数据、POI数据、生态保护红线划定等相关数据建立数据库, 基础数据来源及其说明见表1, 所有数据均统一行政区边界(2015年, 高斯-克吕格投影, 1980年西安坐标系)。从土地利用数据提取并导出耕地、交通运输用

表1 数据来源及说明
Table 1 Data sources and description

数据类型	数据产品	来源	空间分辨率
土地利用数据	土地变更调查数据(2015年)	金坛区土地变更调查成果数据库	1 : 10000
遥感影像数据	Landsat 8 OLI_TRIS(2015年)	地理空间数据云	30 m
基础设施数据	POI数据(2015年)	高德地图API	—
江苏省生态保护红线	江苏省国家级生态保护红线(2018年)	江苏省自然资源厅	1 : 50000
DEM	ASTER GDEM V2版	地理空间数据云	30 m

地、城镇村及工矿用地、其他设施用地等四类与建设生态节点强冲突的用地，其他类型为建设生态节点的可能用地。选取金坛区夏季少云的Landsat 8 OLI影像（2015年），利用ENVI 5.1软件对影像进行大气校正、几何校正、图像拼接等操作，提取相应波段得到金坛区NDVI数据。将土地利用数据与POI点数据进行空间关联，按属性字段join_count转换成30 m×30 m的栅格，代表基础设施点密度数据。从土地利用变更数据库提取铁路、公路、农村道路等道路图层，与基础设施点密度、DEM数据、NDVI数据，共同修正土地利用阻力值，最终得到景观阻力面。

2.3 研究方法

2.3.1 资源型战略点识别

基于生态源地识别第一层次生态节点。将国家级生态红线与金坛区边界进行裁剪，对细小斑块进行删除处理，然后进行图斑融合，得到金坛区两处生态源地。然后选取生态源地斑块中心点作为资源型战略点的空间位置^[7,16]。由于生态网络的构建注重尺度分析^[5]，考虑基础数据的分辨率，以30 m粒度为起点，并每隔15 m输出栅格，分析不同粒度下景观指数变化趋势。结果显示，景观指数在75~120 m变化最明显，结合区域地貌及土地利用情况，采用中等偏大90 m为最佳分析粒径^[32]。基于DEM提取流域特征与粒径分析结果，再结合前人研究^[7,18]，确定资源型战略点影响范围为生态源地及其向外扩展的2 km缓冲区。

2.3.2 结构型战略点识别

基于多目标遗传算法识别第二层次生态节点。遗传算法GA（Genetic Algorithm）是一种模拟自然界生物进化的发展规律，在自然选择原理和自然遗传机制基础上发展起来的迭代式自适应概率性搜索方法^[28]。其优化过程始于一组随机解，称为“种群（Population）”，种群中每一个个体为一个解，个体解的优劣通过适应度函数评判的“适值（Fitness）”来确定，适值高的个体适应能力强，具有较高的生存概率。子代（Offspring）种群由父代通过选择、交叉、变异等遗传算法算子产生，经反复迭代最终找到全局最优解。

结构型战略点识别过程是一个多条件、多目标的优化问题。设定基本条件限制：结构型战略点分布位置应在可建设生态节点的用地上；避免与资源型战略点过多交叉重叠，结构型战略点应尽量分布在资源型战略点影响范围之外；结合资源型战略点的影响范围，影响范围设定为以结构型战略点为圆心、半径为2 km的圆形区域。设置多目标的适应度函数：在保证连通性情况下，放置结构型战略点数量尽可能少，且节点连通性和节点覆盖度达到最佳位置^[24]。整个优化过程通过MATLAB代码编程实现。

结构型战略点识别的适应度函数数学模型为：

(1) 位于资源型战略点影响范围之外且可建设生态节点的区域, 为结构型战略点解空间, 其解空间的监测区域为二维平面: $\{S(x, y): 0 \leq x \leq \text{Length}, 0 \leq y \leq \text{Width}\}$, 其中 Length、Width 分别为可行解在空间上的长和宽;

(2) 根据监测区域的大小估算需要的结构型战略点 n 个, 节点坐标为 (x, y) ;

(3) 节点 i, j 之间的距离用 d_{ij} 表示;

(4) 所有结构型战略点影响范围相同, 均为以节点坐标 (x, y) 为圆心, 半径为 r 的圆;

(5) 把所有节点看作一个无向图, 用 A 表示无向图的邻接矩阵, 当 $d_{ij} < r$ 时, 节点 i, j 可以直接互相通信, 称 i, j 之间有一条弧, 对应的 A_{ij} 为 1。

(6) 达到最大节点连通性目标函数 f_1 为:

$$f_1 = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{M-1} \left(e^{-d_{ij}^2/b_d} \right)}{b_M} \quad (1)$$

式中: b_d 为距离基值, 用于判断两节点的重合程度; b_M 为重合节点数量的基值, 其值取决于监测区域节点数目。 d_{ij} 越小, 则式 (1) 的值越大, 重合度越大; b_d 越小, 重合判断越精细。

(7) 达到最大节点覆盖度目标函数 f_2 为:

$$\text{节点 } v_i \text{ 的覆盖区为: } C(v_i) = \left\{ P(x, y) \mid \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \leq r \right\} \quad (2)$$

若节点 v_i 覆盖区与其他节点覆盖区重叠, 记为 $C'(v_i)$, 则节点 v_i 的有效覆盖区记为 $C''(v_i)$, $C''(v_i) = C(v_i) - C'(v_i)$ 。若将所有结构型战略点的有效覆盖区域记为 S' , 则 $S' = \bigcup_i C''(v_i) \cup C'(v_i)$ 。若监测区域记为 S , 则监测区覆盖率为:

$$f_2 = \frac{\iint_{x,y} S'}{\iint_{x,y} S} \times 100\% \quad (3)$$

(8) 总适应度函数为:

$$f = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 \quad (4)$$

式中: α_1, α_2 为子目标函数对应的权值, 满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, 这里取值 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

2.3.3 结构型薄弱点识别

基于前两步结果, 利用最小累计阻力模型 (Minimum Cumulative Resistance, MCR)^[33], 计算区域生态廊道, 生成初步生态网络。首先, 构建累积阻力面。生物迁移主要受地形条件、土地利用方式、人类活动等阻力影响^[15,16], 结合区域实际情况, 选择土地利用、景观格局、基础设施、道路交通等阻力类型。按照物种生境适宜度、人类活动干扰度以及土地利用方式, 对不同类型阻力因子进行打分 (1~1000)。其中打分值最低为 1, 代表生境适宜性最高; 打分值最高为 1000, 代表生境适宜性最低 (表 2)。依托 ArcGIS 进行标准化处理, 得到不同类型下的阻力值, 范围为 [0, 1]。综合权重赋值, 得到累积阻力面。然后, 基于 MCR 模型^[33] 计算资源型战略点斑块、结构性战略点斑块到其他景观单元的累积距离, 利用 Linkage Mapper 工具生成生态廊道。最后, 将累积阻力面的“山脊线”与生态廊道的交点^[22], 作为结构型薄弱点。利用 GIS 空间分析中的水文分析模块, 提取阻隔生态流和物种扩散的最大阈值, 然后对得到的栅格数据矢量化, 经平滑处理后, 最终获取阻力面的“山脊线”。依据 GIS 空间分析中的相交工具, 提取“山脊线”与生态廊道

的交点，即结构型薄弱点。

2.3.4 生态网络性能分析

本文选择复杂网络分析中衡量网络拓扑结构和节点效用性的6个评价指标（表3），揭示生态网络的性能。在节点效用方面，选用节点覆盖率 $C^{[17]}$ 、节点分布均匀度 $DE^{[17]}$ 、平均节点连接数 $A^{[37]}$ 指标，衡量网络中节点冗余及效用发挥情况；在网络整体性方面，选用平均聚类系数 $CC^{[37]}$ 、网络连通性 $J^{[38]}$ 、网络密度 $D^{[37]}$ 等指标，衡量网络整体性能。其中节点覆盖率 C 、网络连通性 J 、网络密度 D ，通过表3中的相应公式计算得到。节点分布均匀度 DE 、平均聚类系数 CC 、平均节点连接数 A 指标结果，通过Pajek软件读取生态网络拓扑结构并计算获得。

3 结果分析

3.1 层级生态节点识别

(1) 生态源地的提取与资源型战略点的生成

表2 不同类型阻力系数和权重赋值

Table 2 Resistance coefficient and weight assignment for different types

影响因子	类型分级	阻力	权重
土地利用类型 (土地利用阻力)	林地	1	0.3
	草地	4	
	其他用地	120	
	耕地	400	
	水域	400	
	道路用地	800	
	建设用地	1000	
植被覆盖度 (景观格局阻力)	>0.8	1	0.25
	0.6~0.8	20	
	0.3~0.6	200	
	0.1~0.3	500	
	<0.1	1000	
基础设施数量 (基础设施阻力)	<40	1	0.25
	40~145	200	
	145~390	700	
	>390	1000	
距道路中心线距离/m (道路阻力)	100~200	200	0.2
	50~100	500	
	<50	1000	

表3 生态网络性能分析指标

Table 3 Indicators for ecological network performance analysis

指标	公式	描述	意义
节点覆盖率 C	$\frac{S1+S2+S3}{S_{总}} \times 100\%$	表征生态节点影响范围面积与区域整体生态用地面积比率。其中 $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 为资源型战略点、结构型战略点、结构型薄弱点影响范围； $S_{总}$ 为区域总面积	节点覆盖率越高，代表区域生境斑块联系越紧密，生态网络越稳定。单个生态节点覆盖率越大，生态节点发挥效能越大，反之亦然
节点分布均匀度 DE	—	—	节点分布均匀性越低，代表生态节点在研究区内的空间分布越均匀，节点发挥效能越大
平均节点连接数 A	—	—	平均节点连接数越大表示通过网络的路径越多，节点发挥效能越大，网络连接越复杂
平均聚类系数 CC	$\frac{\sum_{i=1}^N CC_i(i)}{N}$ 其中 $CC_i(i) = 2E_i(i)/(k_i(k_i - 1))$	N 为整个网络中节点数； $CC_i(i)$ 为节点 i 的聚类系数； k_i 为节点 i 的邻居； $E_i(i)$ 为 k_i 节点实际存在的边数； $k_i(k_i - 1)/2$ 为理论上最大边数	平均聚类系数越高，表明在生态网络格局中景观生态流的流动性越强，生态网络更稳定
网络连通性 J	$\frac{\sum_{i=1}^n m_i}{N}$	m_i 为第 i 节点所邻接的边数	网络的连通性越高，其稳定性越好
网络密度 D	$\frac{2M}{N(N-1)}$	M 为网络中实际连接数	复杂网络中节点之间连接的紧密性

国家级生态红线数据经删除细小斑块、融合重叠图斑等操作后,得到金坛区两大生态源地,分别为位于西部山区的茅山风景名胜区和南部的长荡湖重要湿地,总面积为83.12 km²,占区域总面积的8.52%。资源型战略点位于生态源地斑块中心,其影响范围为生态源地及其边界向外扩展的2 km缓冲区,面积达225.07 km²,占区域总面积的23.07%。

(2) 生态用地的提取与结构型战略点识别

结构型战略点应位于可建设生态节点的用地类型上,将园地、林地、草地、水域等生态用地类型进行提取,得到生态用地面积为428.25 km²。生态用地作为解空间,利用多目标遗传算法识别结构型战略点的最优位置。多目标遗传算法运行需要指定初始种群Pop (Initial population),即结构型战略点个数。经多次尝试,得到不同初始种群下资源型战略点位置,并通过比较节点冗余情况、平均节点覆盖率以及节点连通率,确定初始种群Pop=30为最佳选择。不同资源型战略点的对比结果,详见表4与图4。当结构型战略点个数为30时,节点连通率达86.67%,而且平均节点覆盖率达到最高,节点分布更均匀。

表4 不同资源型战略点的结果对比

Table 4 Comparison of different resource-based strategic points

初始种群 个数/个	节点覆盖 面积/km ²	平均节点 覆盖率/%	节点 连通率/%
Pop=50	625.15	1.28	96.00
Pop=30	473.95	1.62	86.67
Pop=20	231.03	1.18	70.00
Pop=10	125.06	1.28	50.00

(3) 初步生态网络构建与结构型薄弱点识别

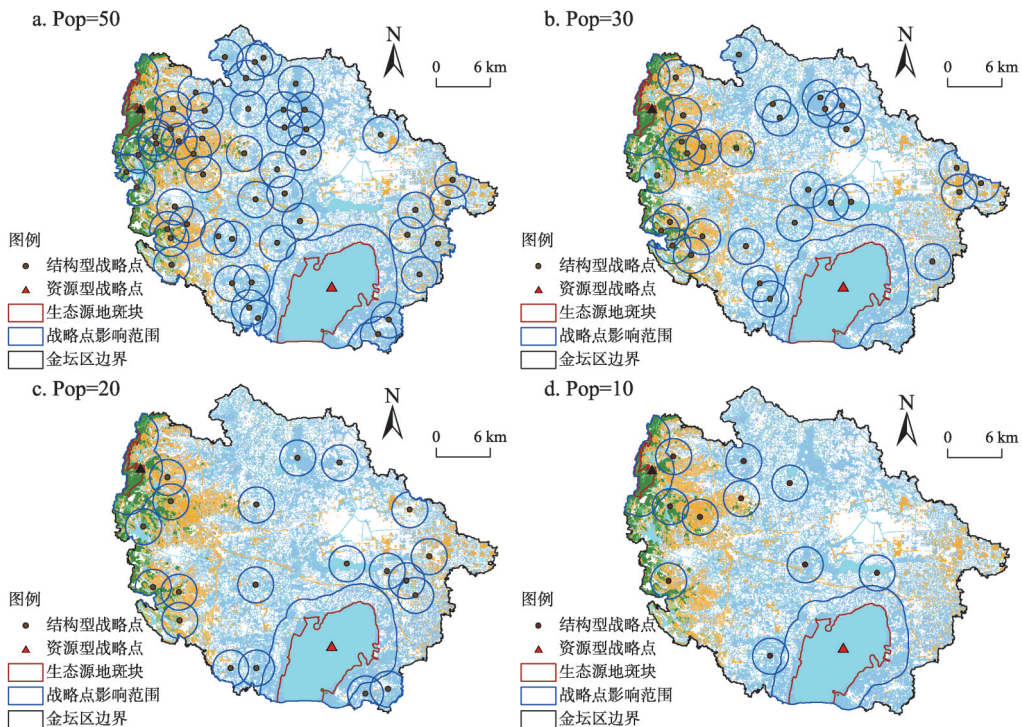


图4 不同初始种群下的战略点及其影响范围分布

Fig. 4 The distribution of strategic points and their impact ranges under different initial populations

为了便于优化结果对比, 研究将采用传统方法生成的生态网络(N1)作为对照。一般选择面积较大的生境斑块作为生态源地^[33], 再利用最小阻力模型生成区域生态廊道。由前两步计算, 可知战略点个数为32个。取面积排序前32的生境斑块, 作为N1生态源地, 总面积为98.41 km²。为与第一步生成的生态源地区分, 将第一步生成的两大生态源地记为“Ⅰ类生态源地”, 其余30个为“Ⅱ类生态源地”。在保证与N1节点个数相同、生态源地面积相似条件下, 确定优化后生态网络(N2)的结构型战略点斑块大小。经计算, 设定结构型战略点斑块的半径为500 m。结构型战略点斑块(Ⅱ类生态源地)与资源型战略点斑块(Ⅰ类生态源地)构成生态网络N2的生态源地, 由此形成初步生态网络N1、N2(图5)。从图5看出, 一般方法下初步生态网络N1覆盖范围有一定局限, 局部网络呈现集聚; 经节点优化后的初步生态网络N2能较好地覆盖全区域, 网络连接也较N1复杂。初步生态网络N1生态源地更贴近现状生态用地情况, Ⅰ类生态源地中心点为固定生态节点, 其余生态节点为现状生态节点, 即待优化点。生态网络N2的结构型战略点为区域理想生态节点, 其分布详见图5c。

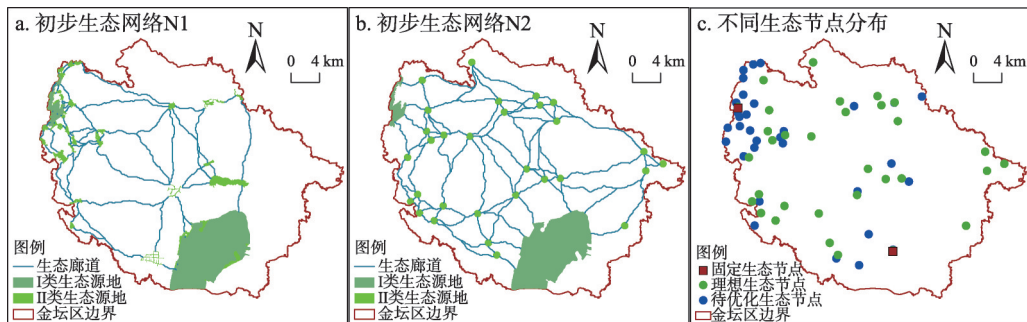


图5 研究区初步生态网络及节点分布

Fig. 5 Preliminary ecological network and node distribution in the study area

将累积阻力方面的“山脊线”与生态廊道相交, 识别结构型薄弱点。一般生态网络N1提取了315个结构型薄弱点, 优化后的生态网络N2生成442个结构型薄弱点。这是由于优化后的网络节点分布较为均匀, 能尽量覆盖到全区域, 而一般方法选择的生态源地分布较集中, 导致平均节点覆盖率下降, 与“山脊线”相交的频率大幅下降, 进而造成结构型薄弱点减少。与初步生态网络相比, 由于结构型薄弱点的差异, 优化后的生态网络N2比优化前生态网络N1在网络性能分析上更具优势。从图6可看出, 生态网络N2比N1空间分布更广泛, 节点间连接也更复杂, 同时生态网络拓扑关系更加复杂。图6c、图6d中的网络拓扑关系中不同节点颜色代表所属组团, 节点大小代表该节点度数, 节点越大代表节点度数越大, 连接此节点的生态廊道越多。

3.2 生态网络综合评价

为凸显层级生态节点的识别、重组对生态网络结构的改善程度, 研究将初级生态网络、最终生态网络均开展综合评价, 以便纵向比较网络优化的过程。

(1) 初步生态网络对比评价

从节点效用、网络整体性出发, 采用衡量网络拓扑结构和节点效用性的6个评价指标, 定量评价优化前后的初步生态网络, 结果见表5。从表中可以看出, 优化后的生态网络整体优于一般网络: ① 优化后节点覆盖率明显提升, 表明通过优化显著提高了生态

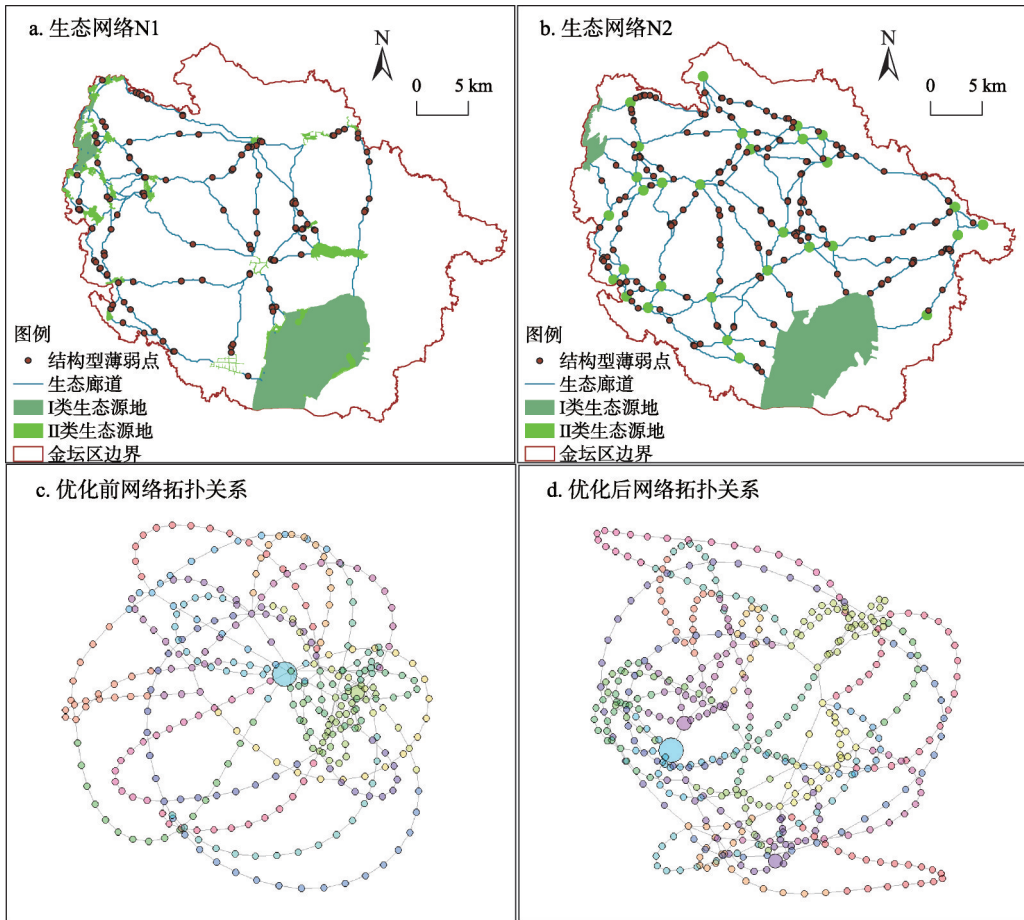


图6 研究区生态网络及节点分布

Fig. 6 Ecological network and node distribution in the study area

表5 初步生态网络评价结果对比

Table 5 Comparison of preliminary ecological network evaluation results

初级生态网络	节点覆盖率 $C/\%$	节点分布 均匀度 DE	平均节点 连接数 A	平均聚类 系数 CC	网络 连通性 J	网络 密度 D
N1	28.362	0.174	2.724	0.429	4.938	0.159
N2	48.574	0.099	3.154	0.441	5.125	0.165

源地覆盖率；② 优化后节点分布均匀度大幅减少，表明经过优化节点分布更均匀，覆盖范围更广；③ 平均节点连接数由之前的2.724增加到3.154，表明网络连接更复杂；④ 平均聚类系数由0.429变为0.441，表明优化后节点聚集程度小幅提升；⑤ 网络连通性由4.938提升到5.125，网络稳定性更高；⑥ 网络密度由0.159增加到0.165，网络密度小幅增加，节点之间连接更为紧密。

(2) 最终生态网络对比评价

将最终得到的生态网络进行指标评价，结果详见表6。从表中可以看出，优化后的生态网络整体优于一般网络：① 节点覆盖率为75.608%提升至93.305%，经过优化节点覆盖范围明显增大，区域整体生态安全得到有效保障；② 节点分布均匀度由0.022减少

表6 生态网络评价结果对比

Table 6 Comparison of ecological network evaluation results

生态网络	节点覆盖率 <i>C</i> %	节点分布 均匀度 <i>DE</i>	平均节点 连接数 <i>A</i>	平均聚类 系数 <i>CC</i>	网络 连通性 <i>J</i>	网络 密度 <i>D</i>
N1	75.608	0.022	1.151	0.182	2.282	0.006
N2	93.305	0.012	1.120	0.341	2.211	0.005

到0.012，约减少至未优化前的45.45%，经过优化节点分布更均匀、覆盖范围更广；③平均聚类系数由0.182提升为0.341，整体提升了87.36%，优化后节点聚集程度大幅提升，生态网络也更稳定；④平均节点连接数、网络连通性、网络密度指标变化较小，这是由于结构型薄弱点数量最多且位于生态廊道，与其他生态节点的连接较少，导致涉及网络连接数量等指标对比不明显。整体来看，优化后的最终生态网络在节点效用、网络性能上优于一般性网络。

3.3 生态节点构建策略

有效生态网络构建应基于根据区域实际，构建发挥最大效能的潜在生态网络。由于多目标遗传算法在寻找全局最优解、识别区域最佳点上，具有非常广阔的应用前景，将群智能算法与生态节点识别结合起来，从而能更客观地确定关键战略点位置，对构建有效生态网络具有重要意义。根据《金坛市城市总体规划（2013-2030年）》，至2030年，受保护区要达到国土面积的30%以上，重点对天荒湖湿地保护区等9个生态斑块实施局部保护策略，但并未对生态节点进行系统保护与建设。建议在生态斑块划定基础上，重点依据层级生态节点识别结果，制定个别保护、重点培育、广泛维护等三种差异化保护策略。在生态修复策略上，加强资源型战略点和薄弱型战略点的修复和保护，并注重结构型战略点的建设和培育。

(1) 资源型战略点的个别保护策略。资源型战略点甄选方式以符合实际、注重质量为目标，是区域最为关键的少数节点。依靠资源型战略点的重点保护策略维护生态网络的基本稳定，金坛区两个资源型战略点主要集中在西部茅山区域和南部长荡湖区域，景观类型以林地、湖泊为主。在生态保护修复策略上，资源型战略点节点数量少且是区域重要生态源，需合理确定斑块数量、位置、规模及边界，对资源型战略点进行重点维护和修复，以保障生态源的健康、稳定。

(2) 结构型战略点的重点培育策略。结构型战略点识别方式以整体覆盖、全局最优为目标，对提升整体网络连接效率、实现区域生态节点有效覆盖发挥重大作用。依靠结构型战略点的重点培育策略维护生态网络的初步稳定，金坛区30个结构型战略点分布较分散，景观类型以林地、湖泊、草地为主。在生态保护修复策略上，受区域未来规划、相关政策影响，节点位置可能会小幅动态变化。因此该类生态节点的培育，需结合相关规划，分阶段确定节点位置和边界。后期应注意培育和建设，同时避免大规模人为活动。

(3) 结构型薄弱点的广泛维护策略。结构型战略点识别方法以保护廊道、提高精度为目标，是生态网络中组成数量最多的生态节点，对保障网络连接、提升网络稳定性具有重要作用。依靠结构型薄弱点的广泛维护策略维护生态网络的整体稳定，金坛区442个结构型薄弱点分布广泛，景观类型以林地、草地、园地为主。受人类开发活动影响，节点位置动态变化。在生态保护修复策略上，需对结构型薄弱点进行动态监测，采

取必要措施对结构型薄弱点进行保护。后期注意监管和维护,对破坏廊道连通的开发活动及时制止,避免破坏性的人为活动。

4 结论与讨论

本文立足生态节点内涵,建立了基于多目标遗传算法的层级生态节点体系,利用表征网络拓扑结构和节点效用性指标对优化前后的生态网络进行了评价,主要研究结论如下:

(1) 基于多目标遗传算法的层级生态网络,可显著提升网络整体性能。在初步生态网络构建上,优化后生态网络的节点覆盖率、节点分布均匀度、网络连通性等得到改善,其中节点覆盖度提升20.21%,节点分布均匀度降低43.1%,通过优化显著提高了生态源地覆盖率,节点分布也更均匀,覆盖范围更广;在最终生态网络构建上,优化后生态网络的节点覆盖率、节点分布均匀度、平均聚类系数得到明显改善,其中节点覆盖率提升了17.70%,节点分布均匀度降低了45.45%,平均聚类系数提升了87.36%,经优化生态节点分布更广泛且均匀,覆盖范围明显增大,节点聚集程度得到较大提升,生态网络更加稳定。

(2) 金坛区现状生态网络分布不均匀,生态节点布局亟待优化。金坛区水网分布密集,资源本底较优,但同时快速的经济给区域生态网络带来较大冲击,如城镇区域对生境斑块间有效连接造成障碍,生态节点分布不均匀,节点覆盖范围有限等。现状生态网络分布较为集中,且未覆盖全区域,给区域整体生态安全带来较大风险。现状生态节点呈现集聚现象,集中在西部山区和南部长荡湖周边,尚未覆盖较大的东部区域。

(3) 层级生态节点体系的建立,为国土空间生态保护修复提供支撑。结合国土空间生态保护修复的自然资源管理要求,开展区域生态保护修复应重点关注和建设资源型战略点、结构型战略点、结构型薄弱点等节点类型,以更好地保障区域生态安全。在生态节点构建策略上,资源型战略点应采取个别保护策略,识别方式以符合实际、注重质量为目标;结构型战略点应采取重点培育策略,识别方式以整体覆盖、全局最优为目标;结构型薄弱点应采取广泛维护策略,识别方式以保护廊道、提高精度为目标。层级生态节点体系较全面地涵盖生态节点不同内涵,明确不同类型节点作用与对应识别方法,可同时应用于水网密集区的复杂生态网络搭建,具有一定实践意义和区域推广性。

当前,国土空间生态保护修复亟待系统解决方法,是未来国土空间综合整治与空间规划研究的重要内容。开展区域生态保护修复,需明确区域生态保护修复对象、范围和目标,有针对性地开展整治活动。一是注重生态节点保护规划。在生态红线划定、生态管控区选择上,依据资源型战略点和结构型薄弱点分布,对区域具有重要生态功能的节点进行保护。二是注重生态节点工程建设。在开展生态保护修复工程建设方面,应对结构型战略点进行重点培育,通过合理选择位置、扩大节点面积、减少人为活动方式,优化生态节点布局,提升节点效用和节点连通性。受静态基础数据的限制,本文构建的层级生态网络有待完善,相应的复杂生态网络构建机制也值得进一步深入。后期,将考虑开展多时相的区域生态网络分析,进一步细化各项参数设置,深化节点识别量化和网络分析方法,提高区域节点的识别精度,以提升对复杂生态网络的认识。

参考文献(References):

- [1] 张晓琳, 金晓斌, 范业婷, 等. 1995-2015年江苏省土地利用功能转型特征及其协调性分析. 自然资源学报, 2019, 34(4): 689-706. [ZHANG X L, JIN X B, FAN Y T, et al. Spatial-temporal characteristics and coordination status of the land use function transition in Jiangsu province from 1995 to 2015. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 689-706.]
- [2] WCED. *Our Common Future*. Changchun: Jilin People's Press, 1997.
- [3] WANG G X, CHENG G D, QIAN J. Several problems in ecological security assessment research. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1551-1555.
- [4] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1-10. [CAO Y, WANG J Y, LI G Y. Ecological restoration for territorial space: Basic concepts and foundations. *China Land Science*, 2019, 33(7): 1-10.]
- [5] 傅丽华, 莫振淳, 彭耀辉, 等. 湖南茶陵县域生态空间网络稳定性识别与重构策略. 地理学报, 2019, 74(7): 1409-1419. [FU L H, MO Z C, PENG Y H, et al. Stability identification and reconstruction strategy of ecological space network at the county scale: A case study of Chaling county, Hunan province. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1409-1419.]
- [6] 于强, 杨澜, 岳德鹏, 等. 基于复杂网络分析法的空间生态网络结构研究. 农业机械学报, 2018, 49(3): 214-224. [YU Q, YANG L, YUE D P, et al. Investigation on complex spatial ecological network structure based on complex network analysis method. *Transactions of the CSAM*, 2018, 49(3): 214-224.]
- [7] YU Q, YUE D P, WANG Y H, et al. Optimization of ecological node layout and stability analysis of ecological network in desert oasis: A typical case study of ecological fragile zone located at Dengkou county (Inner Mongolia). *Ecological Indicators*, 2018, 84: 304-318.
- [8] 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. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771-784. [HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain area. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 771-784.]
- [9] 岳德鹏, 于强, 张启斌, 等. 区域生态安全格局优化研究进展. 农业机械学报, 2017, 48(2): 1-10. [YUE D P, YU Q, ZHANG Q B, et al. Progress in research on regional ecological security pattern optimization. *Transactions of the CSAM*, 2017, 48(2): 1-10.]
- [10] 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. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392. [YE X, ZOU C X, LIU G H, et al. Main research contents and advances in the ecological security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3382-3392.]
- [11] LIU J Y, YANG Z F, CHEN B, et al. An ecological network perspective in improving reserve design and connectivity: A case study of Wuyishan Nature Reserve in China. *Ecological Modelling*, 2015, 306: 185-194.
- [12] LIANG J, HE X, ZENG G, et al. Integrating priority areas and ecological corridors into national network for conservation planning in China. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 22-29.
- [13] 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. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1237-1250. [ZHU J, LI Y M, YU Y H. Study of construction and optimization of ecological security pattern of lake basin in plateau based on GIS: A case study of Xingyun Lake Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(8): 1237-1250.]
- [14] CHI Y, XIE Z L, WANG J. Establishing archipelagic landscape ecological network with full connectivity at dual spatial scales. *Ecological Modelling*, 2019, 399: 54-65.
- [15] 王玉莹, 金晓斌, 沈春竹, 等. 东部发达区生态安全格局构建: 以苏南地区为例. 生态学报, 2019, 39(7): 2298-2310. [WANG Y Y, JIN X B, SHEN C Z, et al. Establishment of an ecological security pattern in the eastern developed regions: A case study of the Sunan district. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2298-2310.]
- [16] 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. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710. [PENG J, LI H L, LIU Y X, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 701-710.]
- [17] 苏凯, 岳德鹏, YANG D, 等. 基于改进力导向模型的生态节点布局优化. 农业机械学报, 2017, 48(11): 215-221. [SU

- K, YUE D P, YANG D, et al. Layout optimization of ecological nodes based on improved Force-directed Model. *Transactions of the CSAM*, 2017, 48(11): 215-221.]
- [18] WILLIAM W B. Land mosaics: The ecology of landscapes and regions. *Landscape & Urban Planning*, 1996, 36(3): 229-231.
- [19] XU X B, YANG G S, TAN Y. Identifying ecological red lines in China's Yangtze River Economic Belt: A regional approach. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 635-646.
- [20] WANG Y, GAO J X, ZOU C X, et al. Identifying ecologically valuable and sensitive areas: A case study analysis from China. *Journal for Nature Conservation*, 2017, 40: 49-63.
- [21] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1420-1437. [LI Q P, ZHANG Z D, WAN L W, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1420-1437.]
- [22] 何珍珍, 王宏卫, 杨胜天, 等. 渭干河—库车河绿洲景观生态安全时空分异及格局优化. *生态学报*, 2019, 39(15): 5473-5482. [HE Z Z, WANG H W, YANG S T, et al. Spatial-temporal differentiation and pattern optimization of landscape ecological security in the Ugan-Kuqa River Oasis. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5473-5482.]
- [23] GUO R, WU T, LIU M, et al. The Construction and optimization of ecological security pattern in the Harbin-Changchun Urban Agglomeration, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7): 1-18.
- [24] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化. *生态学报*, 2016, 36(21): 6969-6984. [ZHANG Y J, YU B X. Analysis of urban ecological network space and optimization of ecological network pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6969-6984.]
- [25] DONG R C, ZHANG X Q, LI H H. Constructing the ecological security pattern for sponge city: A case study in Zhengzhou, China. *Water*, 2019, 11(2): 1-17.
- [26] 殷炳超, 何书言, 李艺, 等. 基于陆海统筹的海岸带城市群生态网络构建方法及应用研究. *生态学报*, 2018, 38(12): 4373-4382. [YIN B C, HE S Y, LI Y, et al. Development and application of an ecological network model for a coastal megalopolis based on land-sea integration. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4373-4382.]
- [27] 胡炳旭, 汪东川, 王志恒, 等. 京津冀城市群生态网络构建与优化. *生态学报*, 2018, 38(12): 4383-4392. [HU B X, WANG D C, WANG Z H, et al. Development and optimization of the ecological network in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4383-4392.]
- [28] 刘玉英, 史旺旺. 一种基于遗传算法的无线传感器网络节点优化方法. *传感技术学报*, 2009, 22(6): 869-872. [LIU Y Y, SHI W W. Optimal distribution of detecting node of measure control system based on wireless sensor network. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(6): 869-872.]
- [29] 樊富有, 杨国武, 乐千恺, 等. 基于量子遗传算法的无线视频传感网络优化覆盖算法. *通信学报*, 2015, 36(6): 98-108. [FAN F Y, YANG G W, LE Q Q, et al. Optimized coverage algorithm of wireless video sensor network based on quantum genetic algorithm. *Journal on Communications*, 2015, 36(6): 98-108.]
- [30] SACHA G, ANS M M, ANNA F C, et al. Evolutionary algorithms for species distribution modelling: A review in the context of machine learning. *Ecological Modelling*, 2019, 392: 179-195.
- [31] 韩博, 金晓斌, 沈春竹, 等. 基于景观生态评价与最小阻力模型的江南水乡土地整治规划. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 235-245. [HAN B, JIN X B, SHEN C Z, et al. Jiangnan water town land consolidation planning based on landscape ecological evaluation and minimum cumulative resistance model. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(3): 235-245.]
- [32] YU K J. Security patterns and surface model in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(5): 1-17.
- [33] 俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型. *地理学报*, 1998, 53(s1): 11-20. [YU K J. Ecologically strategic points in landscape and surface model. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(s1): 11-20.]
- [34] ANDREA D M, SIMONE C, MAURIZIO M, et al. Urban-rural ecological networks for landscape planning. *Land Use Policy*, 2016, 50: 312-327.
- [35] 牛腾, 岳德鹏, 张启斌, 等. 潜在生态网络空间结构与特性研究. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 166-175. [NIU T, YUE D P, ZHANG Q B, et al. Study on the spatial structure and characteristics of potential ecological networks. *Transactions of the CSAM*, 2019, 50(8): 166-175.]
- [36] XU X B, TAN Y, YANG G S, et al. China's ambitious ecological red lines. *Land Use Policy*, 2018, 79: 447-451.

- [37] 苏凯, 于强, YANG D, 等. 基于多场景模型的沙漠—绿洲交错带林草生态网络模拟. 农业机械学报, 2019, 50(9): 243-253. [SU K, YU Q, YANG D, et al. Simulation of forest-grass ecological network based on Multi-scene Model in typical desert-oasis ecotone. Transactions of the CSAM, 2019, 50(9): 243-253.]
- [38] 周涛, 但媛, 朱军功. 城市道路网连通性评价指标探析. 城市交通, 2015, 13(1): 60-65. [ZHOU T, DAN Y, ZHU J G. Assessment of urban roadway network connectivity. Urban Transport of China, 2015, 13(1): 60-65.]

Identification and optimization of hierarchical ecological nodes based on multi-target genetic algorithm: Take Jintan district of Changzhou as an example

ZHANG Xiao-lin¹, JIN Xiao-bin^{1,2,3}, ZHAO Qing-li⁴, REN Jie¹, HAN Bo¹,
LIANG Xin-yuan¹, ZHOU Yin-kang^{1,2,3}

(1. College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Provincial Land Development and Consolidation Technology and Engineering Center, Nanjing 210023, China; 4. Land Reclamation Center of the Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: Effective ecological network construction can guarantee regional ecological security, which is an important path to achieve regional sustainable development. Based on the analysis of the connotation of ecological nodes, this paper establishes a multi-level ecological node identification system based on "resource-based strategic point - structural strategic point - structural weak point", and uses remote sensing images, land use data, POI data, etc. of Jintan district in 2015. This paper also employs multi-target genetic algorithm, minimum resistance model and so on. The hierarchical ecological network in the ideal state of Jintan district was constructed, and the ecological network was quantitatively evaluated by using indexes such as the network topology and nodes utility. Based on the above, the following main conclusions were obtained: (1) Multi-level ecological network is significantly better than the general network in terms of nodes utility and overall network performance. And the water network area has a strong applicability. (2) As the current situation of the ecological network distribution is uneven, the ecological nodes' layout needs to be optimized. The optimized node coverage increased by 17.70%, the uniformity of node distribution decreased by 45.45%, and the average clustering coefficient increased by 87.36%. (3) Multi-level ecological node system has practical application, and different management strategies should be adopted for different types of ecological nodes.

Keywords: ecological nodes; layout optimization; genetic algorithm; ecological networks; regional ecological security