doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.038

环鄱阳湖城市群生态安全格局构建与优化

陈竹安[1,2]　谭浦旭[1,3]　郑希平[1,4]　陈雅斯[1]

(1. 东华理工大学测绘与空间信息工程学院, 南昌 330013;
2. 东华理工大学江西省流域生态过程与信息重点实验室, 南昌 330013;
3. 东华理工大学自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013;
4. 东华理工大学南昌市景观过程与国土空间生态修复重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 以环鄱阳湖城市群为例,将生态系统服务、电路理论模型及复杂网络模型相结合,建立基于“生态安全格局-拓扑特征-生态保护斑块”的生态安全格局研究框架。首先利用 InVEST 模型计算 2000—2020 年的生态系统服务分布并识别生态源地,而后基于电路理论模型构建生态安全格局,最后利用复杂网络模型分析网络结构拓扑特征,并对 2020 年生态网络进行增边优化并识别生态保护斑块。研究表明:研究区三期总体生态安全格局表现出北高南低的分布格局,且生态安全水平随时间推移逐步下降。2000—2020 年,生态网络节点的重要性与聚集程度均有所下降,生态节点间相互联系被削弱,生态网络整体质量下降。采用度低者优先的策略对 2020 年生态网络进行模拟增边优化,提高了网络的鲁棒性,使得网络的结构稳定性和分布均衡性均有改善,缓解了研究区生态质量南北不平衡的现象。结果表明从多角度综合性视角出发,充分利用现有的生态斑块资源配合生态廊道的优化措施可以有效提高生态安全格局的稳定性。

关键词: 环鄱阳湖城市群; 生态安全格局; 生态保护斑块; 电路理论模型; 复杂网络模型

中图分类号: X821　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0397-13　　**OSID**:

Construction and Optimization of Ecological Security Pattern in Poyang Lake Urban Agglomeration

CHEN Zhu'an[1,2]　TAN Puxu[1,3]　ZHENG Xiping[1,4]　CHEN Yasi[1]

(1. *School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *China*
2. *Jiangxi Key Laboratory of Watershed Ecological Process and Information, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *China*
3. *Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake of Ministry of Natural Resources, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *China*
4. *Nanchang Key Laboratory of Landscape Process and Territorial Spatial Ecological Restoration, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *China*)

Abstract: Taking the Poyang Lake urban agglomeration as an example, combined ecosystem services, circuit theory models, and complex network models to establish a research framework for ecological security patterns based on the “ecological security pattern - topological features - ecological protection patches” approach. Firstly, the InVEST model was used to calculate the ecosystem service values from 2000 to 2020 and to identify ecological source areas. Then, based on the circuit theory model, an ecological security pattern was constructed. Finally, the complex network model was employed to analyze the topological features of the network structure. The ecological network for 2020 was optimized by edge addition, and ecological protection patches were identified. The results showed that the overall ecological security pattern of the study area in the three phases showed a high north, low south distribution, with the ecological security level gradually declining over time. From 2000 to 2020, both the importance and clustering degree of the ecological network nodes were decreased, weakening the interconnections between ecological nodes and resulting in a decline in the overall quality of the ecological network. By applying a

收稿日期: 2024-06-30　修回日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168010)、教育部人文社会科学研究项目(22YJCZH150)和江西省社会科学基金“十四五”地区项目(22DQ44)

作者简介: 陈竹安(1978—),男,副教授,主要从事土地利用变化及其生态环境效应研究,E-mail: cza53@qq.com

"low-degree-first" strategy for edge addition optimization to the 2020 ecological network, the network's robustness was improved. This optimization enhanced both the structural stability and distribution balance of the network, alleviating the north-south imbalance in ecological quality within the study area. The results indicated that from a comprehensive, multi-angle perspective, effectively utilizing existing ecological patch resources in conjunction with optimization measures for ecological corridors can significantly improve the stability of the ecological security pattern. Additionally, the ecological importance of the Poyang Lake area was prominent, playing a crucial role in enhancing ecological connectivity between the northern and southern regions of the study area. It was identified as a key region for future ecological protection and restoration efforts.

Key words: Poyang Lake urban agglomeration; ecological security pattern; ecological protection patches; circuit theoretical model; complex network

0 引言

随着城市化进程日益加快,城市持续扩张并导致生态源地日渐破碎,降低了区域内的生态系统服务功能和可持续发展能力[1]。生态保护与修复可有效缓解生态保护与经济发展的矛盾,也是维护生态安全、改善人类福祉的重要保障[2]。维护国家生态安全是生态文明建设的重要环节[3],生态安全格局是由生态源地、生态廊道及其他生态要素所构成[4],而生态系统服务重要性评价可以为生态安全格局研究提供一定的科学基础[5]。

生态网络构建模型主要分为 3 大类,分别是最小累计阻力(MCR)模型[6]、重力模型[7]以及电路理论模型[8-9]。生态源地的选取包括单一要素指标(如土地利用类型[10]、生境质量[11]等)和综合性指标(如生态系统服务功能重要性[12-13]及生态脆弱性[14]等)。文献[15]在对三门峡市生态系统保护与修复重点区域的研究中就涉及到了以生态系统服务功能重要性测度为基础的生态源地识别方法。复杂系统与复杂性科学所关注的研究对象是系统中个体相互关联作用的拓扑结构[16],而复杂网络理论在生态学领域的应用在近些年也逐步成为热点[17-18]。其中,文献[19]将复杂网络基本理论应用于生态网络的逐级分层分析。文献[20]将景观生态学、复杂网络模型和空间分析技术结合,提出了"生态屏障-拓扑特征-碳补偿"的生态屏障模型研究框架。

在总结了国内外关于生态网络、生态安全格局、复杂网络等研究后发现,学者们多基于多要素综合性指标选取生态源地、构建生态阻力面,而后构建生态网络,从生态安全格局要素的空间分布角度提出优化建议。在生态网络研究上,虽然近些年来部分学者将复杂网络模型与生态学相结合,对生态网络的拓扑结构进行了研究以达到对整个研究区生态鲁棒性的研究与优化,但在生态源地选取上则多是以单一要素指标为准,且生态网络的分析优化对提高区域内整个生态环境水平存在一定局限性。故将生态安全格局分析与生态复杂网络分析优化相结合,从跨学科、多角度的综合性视角分析生态安全格局的研究领域有一定的扩展需求。本文考虑到生态系统服务可以较好地表现生态源地的多功能性、空间相关性以及结构复杂性,因此以环鄱阳湖城市群为例,结合生态系统服务重要性评价、电路理论模型以及复杂网络模型,探究生态安全格局的演变趋势与优化路径。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

环鄱阳湖城市群位于江西省北部,东经 113°34′~118°28′,北纬 26°57′~30°04′,属于亚热带湿润季风气候,气候温和,降水量充沛。研究区以我国第一大淡水湖(鄱阳湖)为核心,由环绕鄱阳湖的城市组成,面积共 9.23×10^4 km^2。

1.2 数据来源

此次研究基础数据主要有:土地覆被数据、降水量数据、蒸散量数据、土壤数据、基岩深度数据、DEM 数据、路网数据,统一坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_50N 投影坐标系,具体数据来源见表 1。

表 1 数据来源及说明

Tab.1 Data sources and description

类型	名称	来源	精度
栅格数据	土地覆被数据	中国科学院资源环境科学数据	30 m
	降水量数据	国家地球系统科学数据中心	1 km
	蒸散量数据	国家地球系统科学数据中心	1 km
	土壤数据	世界土壤数据库(HWSD)	1 km
	基岩深度数据	世界土壤信息数据库(ISRIC)	1 km
	DEM 数据	地理空间数据云	30 m
矢量数据	路网数据	2020 年数据来源于 Open Street Map,2000、2010 年路网数据是在 2020 年数据的基础上,借助 2000、2010 年《江西省交通基本情况图》反推获得	
	行政边界数据	中国科学院资源环境科学数据	
	流域数据	中国科学院资源环境科学数据	

2　研究方法

首先构建研究区生态安全格局，基于 InVEST 模型计算出研究区生态系统服务价值并提取生态源地。而后，综合研究区各个生态阻力要素得出综合生态阻力面，其次基于电路理论模型识别出研究区生态廊道、生态夹点等各生态安全要素。再而，以复杂网络模型为基础，利用 Gephi 软件分别对 2000、2010、2020 年的生态复杂网络进行拓扑结构的演变历程分析，得出现有生态安全格局优化的需求。最后，对 2020 年生态网络按照度低者优先原则进行优化，并按照生态廊道的辐射范围精确识别出生态保护斑块，具体研究步骤如图 1 所示。

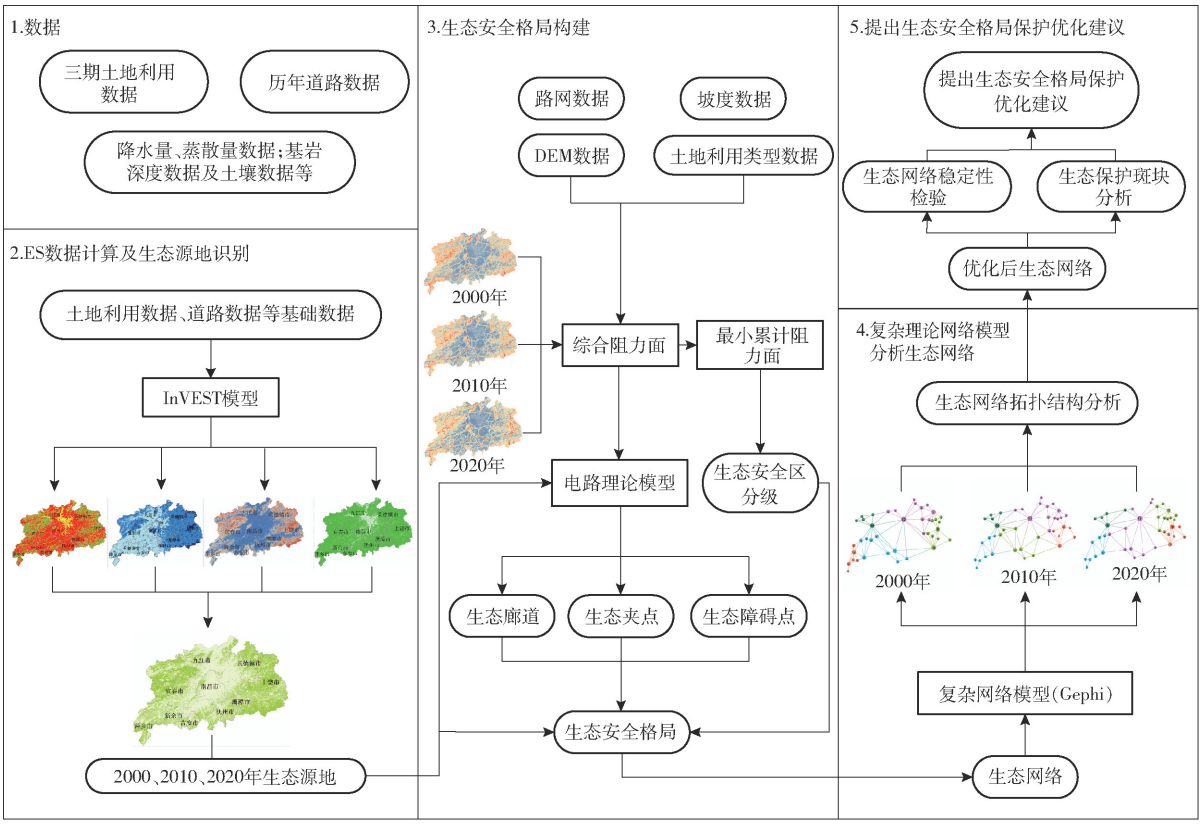


图 1　研究框架

Fig. 1　Research framework

2.1　基于生态系统服务价值的生态源地识别

本研究基于生境质量、产水量、土壤保持量以及碳储量等多个数据指标综合得出了环鄱阳湖城市群的生态系统服务，并以此识别生态源地。结合前人研究，本文基于 InVEST 软件对研究区生态系统服务价值进行计算，以此选取生态源地作为构建生态安全格局的基础。

2.1.1　生境质量

生境质量模块是 InVEST 模型中用于评估威胁源对生境产生的不利影响，并计算其生境退化程度的模块，其操作简单、数据需求量小、空间表达能力强，已经成功应用于国、省、市、县级等不同尺度的生境质量研究[21]，公式为

$$Q_{xj}=H_{xj}\left(1-\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2+k^2}\right) \tag{1}$$

式中　Q_{xj}——土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数

D_{xj}——土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化程度指数

H_{xj}——土地利用类型 j 中栅格 x 的生境适应性指数

k——半饱和参数

2.1.2　产水量

产水量模块是基于水平衡计算原理，综合降水量、潜在蒸散量、土地利用类型、土壤深度以及植被可利用含水率等数据，计算得到流域或研究区的产水量，公式为

$$Y_x=\left(1-\frac{A_x}{P_x}\right)P_x \tag{2}$$

式中　Y_x——栅格 x 的产水量，mm

A_x——栅格 x 的年实际蒸散量，mm

P_x——栅格 x 的年降水量，mm

2.1.3　土壤保持量

土壤保持量模块的计算原理是美国的通用水土

流失方程(USLE),与 SWAT 模型类似,涉及考虑的参数有降雨侵蚀因子、土壤可蚀性因子、坡长因子、坡度因子、植被和经营管理因子、水土保持措施因子等,模块输出的相应结果包括潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量,土壤保持量等于潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值,计算公式为[22]

$$H_x = R_x K_x L_{Sx} \tag{3}$$

$$U_x = R_x K_x L_{Sx} C_x P_x \tag{4}$$

$$S_x = H_x - U_x + E_x \tag{5}$$

式中 H_x——栅格 x 潜在土壤侵蚀量,t

U_x——栅格 x 实际土壤侵蚀量,t

R_x——栅格 x 潜在降水侵蚀因子,MJ·mm·hm²/(h·a)

K_x——栅格 x 土壤可侵蚀因子,t·h·mm/MJ

L_{Sx}、C_x、P_x——栅格 x 坡长坡度因子、植被和经营管理因子、水土保持措施因子

S_x——栅格 x 土壤保持量,t

E_x——栅格 x 泥沙持流量,t

2.1.4 碳储量

碳储量模块用于评估生态系统的碳储量,该模型将生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库:地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳。

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \tag{6}$$

式中 C_{tot}——碳总量,t/hm²

C_{above}——地上生物含碳量,t/hm²

C_{below}——地下生物含碳量,t/hm²

C_{soil}——土壤含碳量,t/hm²

C_{dead}——死亡有机碳量,t/hm²

2.2 生态阻力面识别

生态阻力面识别是构建生态廊道的重要步骤,而生态廊道是生态安全格局的重要组成部分。故本文依据研究区的综合情况以及所收集到的各类基础数据,参考前人的研究成果[23],分别筛选出了自然因子及人类活动因子以构成生态阻力面。其中自然因子包括高程、坡度、土地利用类型,人类活动影响因子包括铁路、主干道、次干道以及高速公路等,具体因子权重详见表 2。

表 2 阻力因子分级赋值及权重

Tab. 2 Score and weight of resistance factors

阻力因子	分级指标	阻力值	权重
高程/m	<50	1	0.15
	50~150	2	
	150~250	3	
	250~350	4	
	>350	5	
坡度/(°)	<3	1	0.17
	3~8	2	
	8~15	3	
	15~25	4	
	>25	5	
土地利用类型	林地	1	0.15
	耕地	2	
	其他用地	3	
	水域	4	
	建设用地	5	
与铁路距离/m	>2 000	1	0.14
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	
与主干道距离/m	>2 000	1	0.13
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	
与次干道距离/m	>2 000	1	0.13
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	
与高速公路距离/m	>2 000	1	0.13
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	

2.3 生态安全格局构建

2.3.1 生态廊道识别

廊道是生态网络中的线状或带状区域,具有为物种提供栖息地及迁徙通道的作用[23]。本文运用 Linkage Mapper 软件识别生态廊道,该软件是基于最小成本路径方法计算物种与能量在各个生态源地之间迁徙和扩散所遇到的累计阻力。本文设置成本加权距离阈值为 10 km 识别生态廊道,并利用 Centrality Mapper 模块对廊道的中心度进行识别,采用自然断点法将生态廊道分级,并结合前文提取的生态源地构成研究区生态安全格局基础框架。

2.3.2 其他生态安全格局要素识别

在电路理论中,以电流模拟研究区生物流与能量流的流通情况,电流密度最高的区域为生态夹点,即研究区中物种迁徙密度最高的区域,是生态保护中的关键节点。本文运用 Pinchpoint Mapper 模块,选择“All to one”模式识别生态夹点,并参考前人研究[24],设置廊道加权成本距离为 1 km。生态障碍点

是指生态廊道中生态阻力最大的区域，本文运用 Barrier Mapper 模块，设置搜索半径为 700 m，计算生态廊道各区域初始值的改进得分，并将改进得分较高的区域识别为生态障碍点。在生态安全区划分上，借助 ArcGIS 软件，采用自然断点法将最小累计阻力面由低至高划分为 5 级生态安全区。生态节点是生物迁徙过程中关键位置，是最容易受到干扰和破坏的节点。本文利用水文分析工具提取出最小累计阻力面脊线，将其与生态廊道进行相交，取交点作为生态节点，同时将位于高阻力区域的生态节点标记为关键节点，其余的为一般节点[25]。

城市生态安全格局是城市自然生命支持系统的关键性格局[26]，本文综合研究区生态源地、生态廊道、生态夹点和障碍点、生态节点及生态安全区，构建出研究区总体生态安全格局。

2.4　生态安全格局优化

2.4.1　生态网络拓扑结构分析

基于复杂网络理论，本文将研究区生态源地抽象成网络节点，将生态廊道抽象成网络的连边，构成研究区关于生态网络的复杂网络。依据节点间相互连接关系求出复杂网络的邻接矩阵，最后利用 Gephi 软件进行网络节点的度分析。生态网络节点的度是指与该生态节点相连的生态廊道的数量，生态节点的度越大，则说明该生态节点在整个生态网络中的重要性越高；网络平均度则指网络中每个生态节点度的平均值。此外，本研究还计算了邻近中心性指数、介数中心性指数、特征向量中心性指数、三角形数以及 Pang Rank 值等共 6 项拓扑结构参数[27]，以此反映网络的拓扑结构特征。最后，依据复杂网络模型基本原理，采用度低者优先的策略（Low degree first，LDF）[28]在网络边缘度低的节点间进行增边，以促进网络整体的南北平衡，增加整体网络的鲁棒性。

2.4.2　生态网络鲁棒性分析与生态保护斑块识别

生态网络的鲁棒性可理解为当网络整体结构因遭受到破坏而发生改变时，网络仍然能够维持其结构和功能的能力[29]。本文选择基于生态节点的度进行随机攻击和蓄意攻击的生态网络鲁棒性模拟，以分析整个生态网络的全局网络效率的变化趋势。

将研究区内面积在 30 ~ 40 km^2 的生态斑块视为陆域生态保护斑块，面积大于 10 km^2 的水域视为水域生态保护斑块。结合优化后的生态网络，依据前人研究成果[30]，将鄱阳湖源地周边生态廊道 1 200 m 辐射范围涉及到的生态保护斑块视为核心生态保护斑块，其他生态廊道 1 200 m 辐射范围涉及到的视为重要生态保护斑块，廊道辐射范围外的视为一般生态保护斑块。

3　研究结果

3.1　生态安全格局识别

3.1.1　ES 数据与生态源识别

选取生境质量、产水量、土壤保持量以及碳储量 4 个要素，并按照等权叠加的方式获得研究区生态系统服务重要性（ES）数据（图 2a）。将 ES 数据按照自然断点法分为核心斑块、重要斑块以及一般斑块 3 级，并将核心斑块中面积大于 50 km^2 的生态斑块识别为生态源地（图 2b），以作为构建生态廊道以及生态安全格局的基础数据。

2000 年识别面积大于 50 km^2 的核心生态斑块 40 块共计 16 076.69 km^2 作为生态源地，占研究区总面积 17%。2010 年识别生态源地 40 块，总面积 16 488.58 km^2，占研究区总面积 17.87%。2020 年识别生态源地 40 块，总面积 15 871.19 km^2，占研究区总面积 17.20%。另外，考虑到鄱阳湖作为长江中游地区最大的湖泊，对生物的迁徙与能量信息的流通有很大的促进作用且水域本身对生物流动有很大的吸引作用，故将鄱阳湖主湖区也作为生态源地之一。

3.1.2　生态阻力面与生态廊道识别

生态阻力面识别是构建生态安全格局的重要环节，本研究依据表 2 计算研究区综合阻力面，并将阻力由低至高分为 1 ~ 5 级（图 3a）。由综合阻力面可知，道路对生物迁徙与能量信息的流通有明显的阻碍作用，研究区高阻力区域基本上沿着道路分布，道路等级越高其生态阻碍作用越明显。结合生态源地与综合生态阻力面，运用 Lingkage Map 软件识别生态廊道并分级（图 3b）。研究区 2000 年共计算出生态廊道 91 条，总长度 2 466.195 km；2010 年共计算出生态廊道 88 条，总长度 2 530.635 km；2020 年共计算出生态廊道 85 条，总长度 2 121.837 km，具体统计情况见表 3。由表 3 可知，虽然研究区一级生态廊道数量有所增加，但研究区以二、三级生态廊道居多，一级廊道占比较少，同时，二、三级生态廊道数量与生态廊道总体数量均逐步减少，这表明研究区物质与能量的流通性正逐步降低。此外，北部地区多为一、二级生态廊道且长度较短，南部地区多为三级生态廊道且长度较长，生物联系北高南低。

3.1.3　生态安全要素识别

在已构建的生态廊道基础上，运用 Pinchpoint Mapper 模块计算得出电流分布情况，并选取高电流

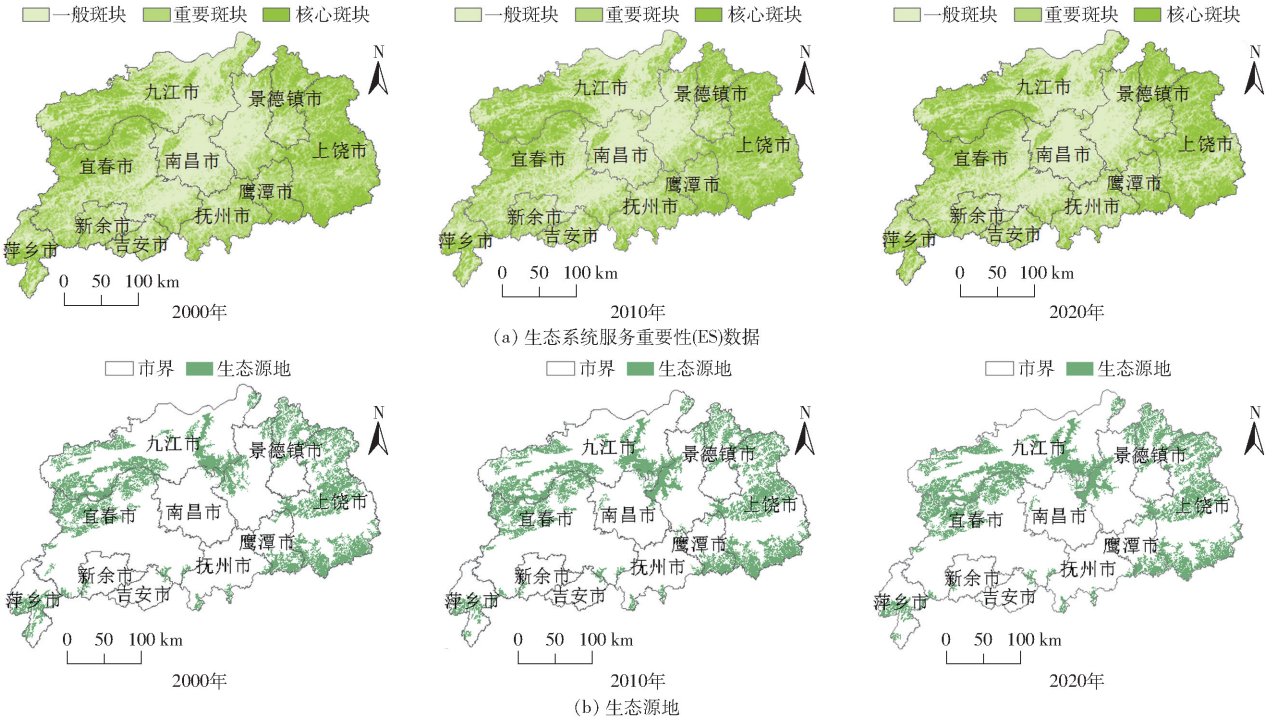


图 2 生态源地空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of ecological sources

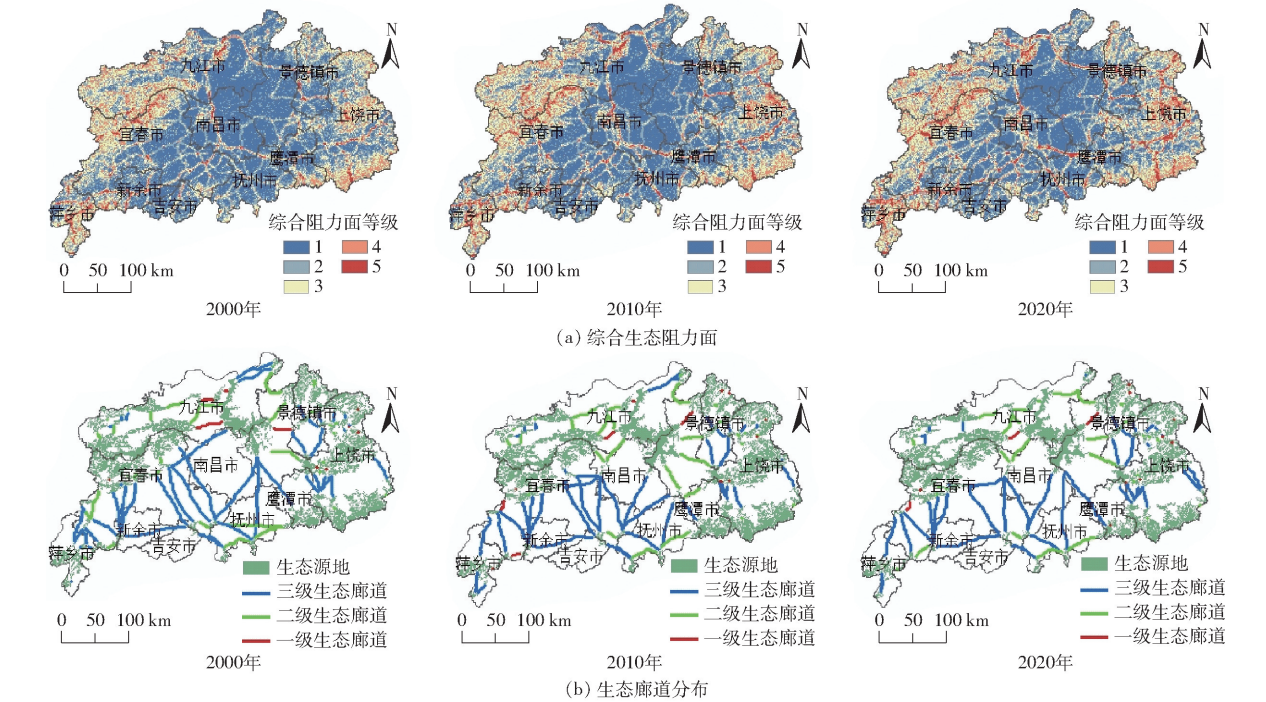


图 3 三期综合阻力面与生态廊道分布

Fig. 3 Three comprehensive resistance surface and ecological corridor distributions

表 3 生态廊道统计

Tab. 3 Ecological corridor statistics

年份	一级廊道		二级廊道		三级廊道		总数/个
	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%	
2000	11	12.08	37	40.56	43	47.25	91
2010	14	15.91	39	52.70	35	39.77	88
2020	13	25.29	32	37.64	40	47.06	85

区域作为生态夹点(图 4a);运用 Barrier Mapper 模块计算生态廊道各区域初始值的改进得分,以表示廊道上的阻力值并识别出研究区生态障碍点分布(图 4b);运用 ArcGIS 软件将最小累计阻力面脊线与生态廊道的交点识别为生态节点(图 4c)。生态夹点在空间分布上总体呈现逐步减少且北多南少的格局,即大部分主要分布在宜春市中部-鄱阳湖周

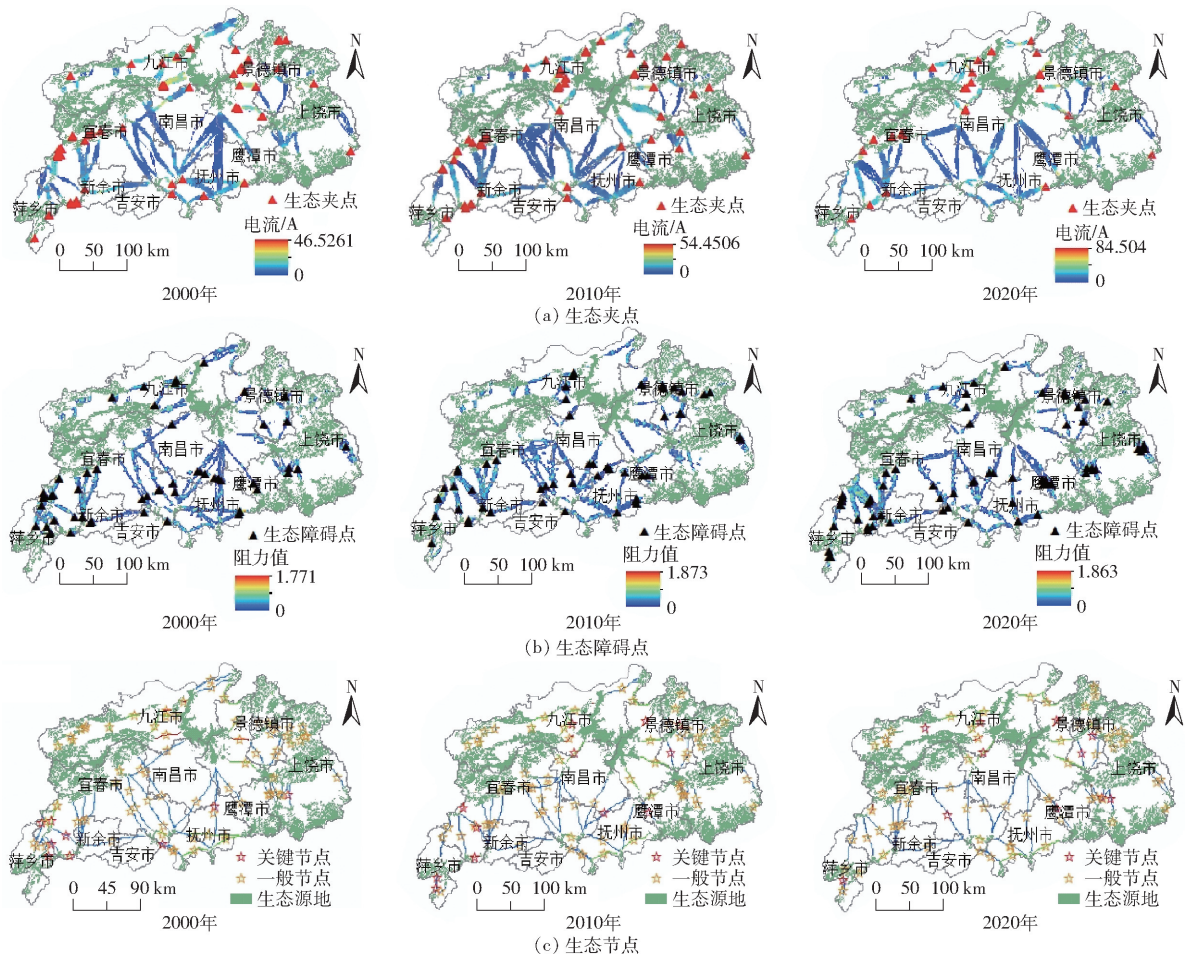


图 4　生态安全要素

Fig. 4　Ecological security elements

边-景德镇北部沿线，而只有少数的生态夹点分布在南部地区的萍乡市东北部-抚州市中部沿线。生态障碍点在空间分布上与生态夹点相反，呈现出逐步增多且南多北少的现象，这表明研究区生态环境质量南北极度不平衡，且近 20 年来生态网络流通性能逐步被削弱，生态廊道上的生态阻力正在逐步增大且分布广泛。生态节点在空间分布上，无论是关键节点还是一般节点其总体数量均表现为南多北少的空间分布格局，这表明研究区南部地区的生态环境更为脆弱，其物质信息流通更容易受到干扰和破坏。

3.1.4　生态安全格局构建与分析

生态安全区是整个生态安全格局中各生态要素空间分布及其相互作用的基础背景，本文以最小累计阻力面为基础数据，采用自然断点法按照最小累计阻力值分为 5 级，构成生态安全格局基础背景。此外生态源地的质心是生态源地的核心地带，可以将其视为生态源点，然后综合生态源地、生态廊道等多种生态要素构建出 2000、2010、2020 年生态安全格局（图 5），综合多个生态要素在空间上的分布情况可以判断出研究区不同地区的综合生态水平。

由图 5 可知，从生态源地以及生态廊道、生态夹点等多种生态要素的空间分布上可以明显看出研究区生态水平呈现北高南低的分布格局。而鄱阳湖区作为研究区的核心生态源地，与其连接的生态廊道最高达 12 条，同时周边地区其他生态要素种类丰富且数量众多，在整个生态安全格局中的生态支撑作用十分明显，故将与鄱阳湖生态源地相关联的各生态要素进行统计分析（表 4）。由表 4 可知，三期与鄱阳湖生态源地相关联的各生态要素占总数量比例均较大，生态廊道占比 12.50% ~13.19%，生态廊道长度占比 16.13% ~28.19%，生态夹点占总数比例最高可达 39.19%，最低 33.33%；生态节点也多分布在鄱阳湖周边地区，总数占比始终保持在 13.33% ~16.88% 之间。众多生态要素围绕鄱阳湖分布，这反映了鄱阳湖地区生态水平较高，生态环境良好，是研究区内的关键生态枢纽和“生态高地”，同时也是生态安全格局的核心地带。

3.2　生态安全格局优化

3.2.1　生态复杂网络演变特征

本文将生态源点和生态廊道分别作为复杂网络

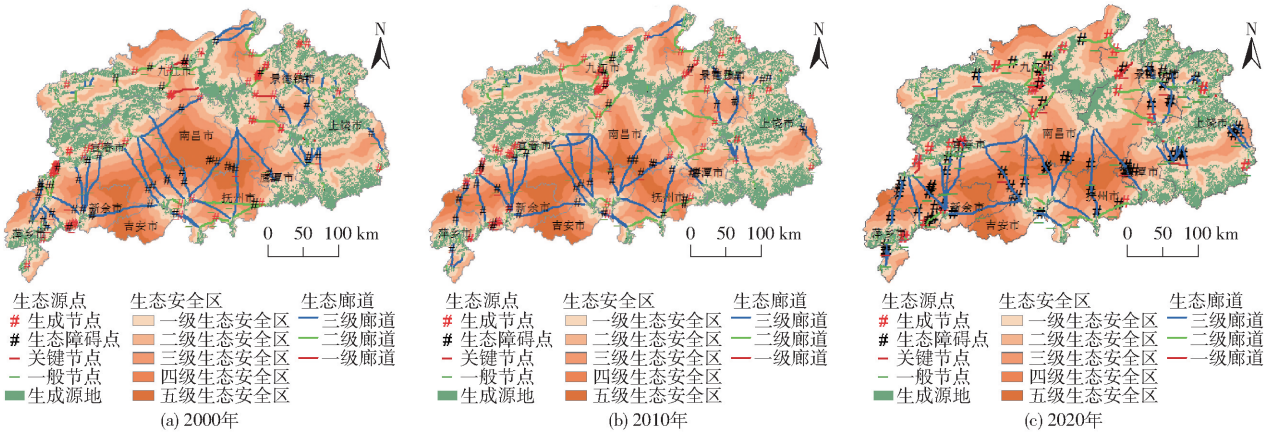


图 5 生态安全格局

Fig. 5 Patterns of ecological security

表 4 鄱阳湖源地生态要素统计

Tab. 4 Statistics of ecological factors in source area of Poyang Lake

年份	生态廊道数量		生态廊道长度		生态夹点数		生态节点数	
	数量/个	占比/%	长度/km	占比/%	数量/个	占比/%	数量/个	占比/%
2000	12	13.19	695.10	28.19	29	39.19	12	16.44
2010	11	12.50	408.23	16.13	19	33.33	10	13.33
2020	11	12.94	507.81	23.93	12	38.71	13	16.88

的节点和边,构造出基于生态网络的无向无权复杂网络,并选取度、邻近中心性指数、介数中心性指数、特征向量中心性指数等 6 项参数对三期的复杂网络拓扑结构演变特征进行统计分析(图 6)。由图 6 可知,三期生态网络高度值生态节点偏少且网络节点重要性逐步下降,网络整体节点间相互响应时间逐渐变慢,物种迁徙与能量循环交通枢纽偏少,节点间相互依赖程度提高,整体网络的密度逐渐降低,三期网络整体生态质量下降,生态网络优化需求逐步明显。

此外,鄱阳湖生态源地在整个生态网络中起着促进生物信息流通、维护生态网络稳定的关键作用,其在生态网络中的各项拓扑特征指数较高(表 5)。由图 6 与表 5 可知,2000—2020 年鄱阳湖生态源地节点度为 12、11、11,与周边生态源地生态联系紧

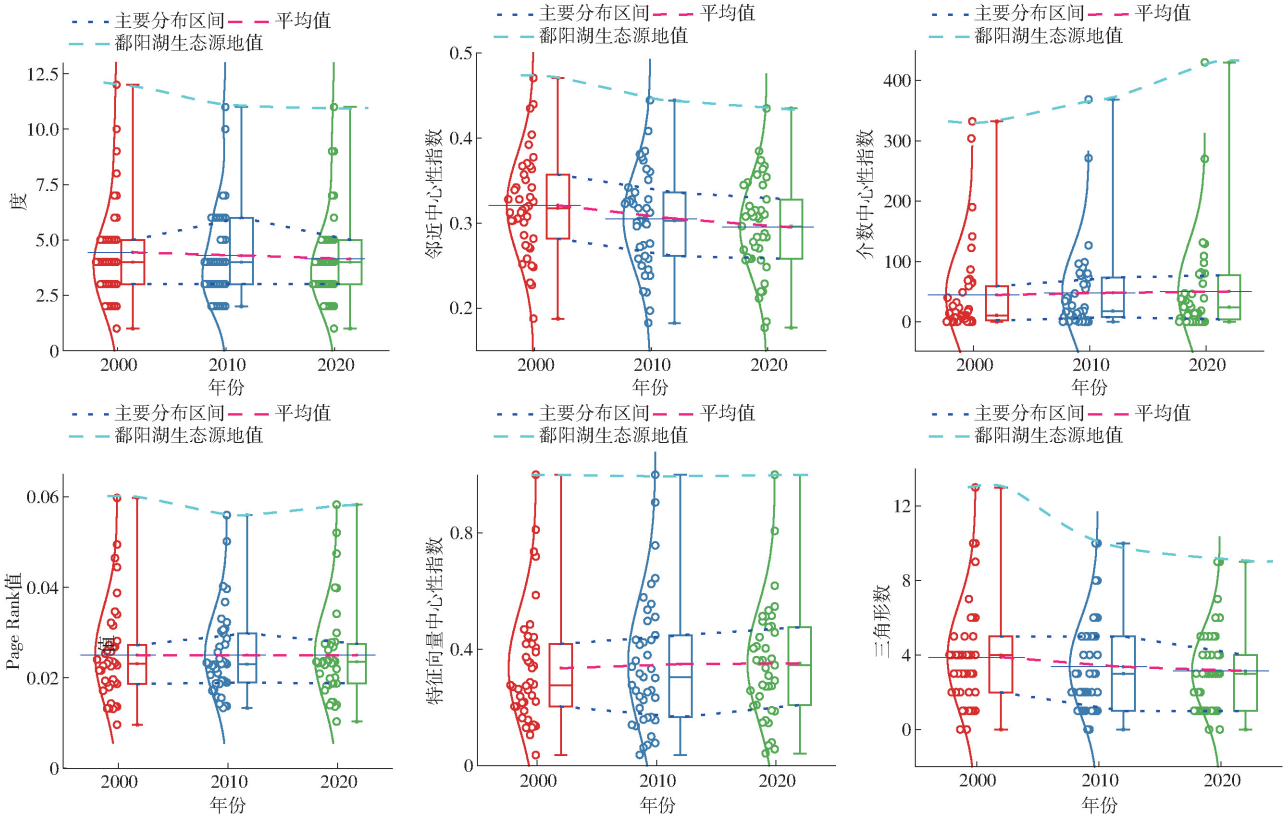


图 6 复杂网络拓扑特征

Fig. 6 Complex network topology characteristics

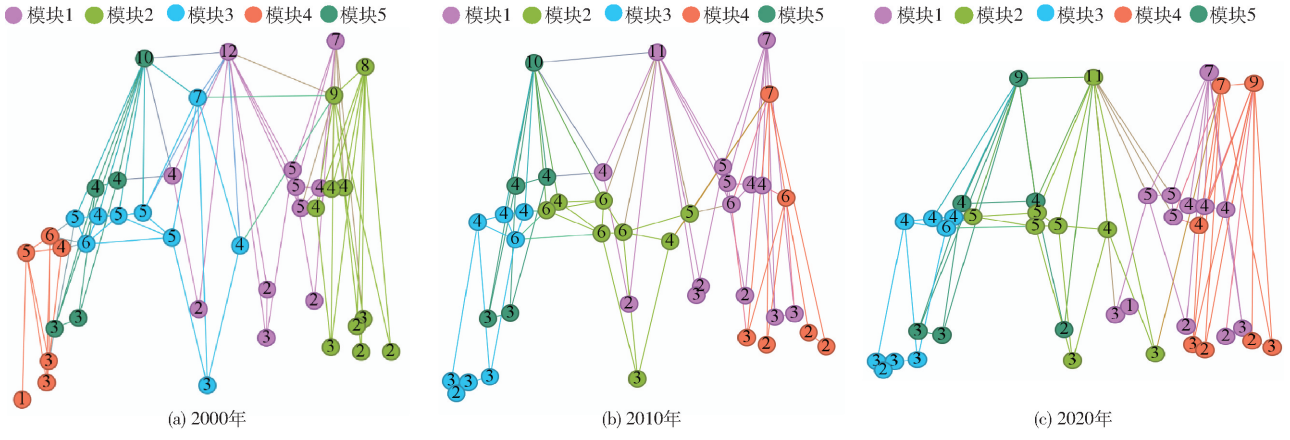
表 5　鄱阳湖生态源地复杂网络拓扑特征

Tab. 5　Complex network topology characteristics of Poyang Lake

年份	度	邻近中心性指数	介数中心性指数	Page Rank 值	特征向量中心性指数	三角形数
2000	12	0.471	332.114	0.059	1	13
2010	11	0.444	368.593	0.055	1	10
2020	11	0.435	429.988	0.058	1	9

密；三期邻近中心性指数分别为 0.471、0.444、0.435，表明鄱阳湖生态源地与其周边源地的相互响应周期较短，响应速度较快；2000—2020 年节点介数中心性指数分别为 332.114、368.593、429.988，表明鄱阳湖源地在整个网络中发挥着关键作用；2000—2020 年 Page Rank 值分别为 0.059、0.055、0.058，这反映了鄱阳湖源地在网络整体中的高度重要性；2000—2020 年特征向量中心性指数保持为 1，表明鄱阳湖源地及其周边源地对整个生态网络均存在高度影响力，周边地区对鄱阳湖有强烈的生态依赖性；此外高数量的三角形数也从侧面印证了以鄱阳湖为中心的生态社群耦合关系紧密，鄱阳湖生态源地是整个生态网络的关键。

本文将网络的节点按度由低至高分级，度在 1～3 的为 3 级节点、4～6 的为 2 级节点、7 以上的为 1 级节点，并在 Gephi 软件中进行分层分析和模块化分析（图 7（节点数字表示节点的度）、表 6）。分层分析可以很好反映出网络节点的生物信息流通情况，3 期生态网络中 1 级节点数逐渐增加，2、3 级节点数逐渐减少，每 1 级各节点的具体度也逐渐变小，表明网络节点的生态连接功能逐渐弱化。模块化分析则以每个模块的聚类系数反映生态网络中各节点相互聚集程度，2000、2010 年鄱阳湖周边生态模块聚类系数均为 26.83%，2020 年聚类系数为 19.51%。虽然模块聚类系数总体下降，生态凝聚水平总体降低，但高水平的模块聚类系数表现了鄱阳湖及其周边地区生态源地高度集聚，相互生态联系紧密，对网络整体生态稳定作用较大。



(a) 2000年　(b) 2010年　(c) 2020年

图 7　复杂网络分析

Fig. 7　Complex network analysis

表 6　生态网络模块化分析

Tab. 6　Modular analysis of ecological network　%

年份	模块 1	模块 2	模块 3	模块 4	模块 5
2000	26.83	24.39	21.95	14.63	12.20
2010	26.83	24.39	19.51	17.07	12.20
2020	29.27	19.51	19.51	17.07	14.63

3.2.2　生态网络优化与生态保护斑块识别

针对 2020 年生态网络进行优化，生态网络总体增边策略是在网络的低度节点间以及网络的边缘节点间增加生态廊道，以促进整个生态网络的均衡性。生态网络增边优化后生态廊道总数达到 100 条，其中新增生态廊道 15 条，新增廊道总长 1 117.92 km，占总长度 34.51%。

依据研究区生态系统服务指标，选取 2020 年面积在 30～40 km^2 的生态斑块为陆域生态保护斑块，提取研究区内面积大于 10 km^2 水域为水域生态保护斑块。研究区新增生态保护斑块 45 块，共计 2 482.20 km^2。以 1 200 m 为廊道辐射距离对 2020 年研究区内生态廊道进行缓冲区分析。将鄱阳湖源地周边生态廊道 1 200 m 辐射范围涉及到的生态保护斑块视为核心生态保护斑块，其他生态廊道 1 200 m 辐射范围涉及到的视为重要生态保护斑块，廊道辐射范围外的视为一般生态保护斑块（图 8）。鄱阳湖核心生态保护斑块 13 块，共计 1 062.25 km^2，占比 42.79%；廊道重要生态保护斑块 9 块，共计 606.53 km^2，占比 24.44%；其他一般生态保护斑块 23 块，共计 813.42 km^2，占比 32.77%。

由图 8 可知，优化后的生态廊道巩固了整体网络边缘节点的稳定，增强了南部地区破碎生态源地间的生态联系，提高了边缘地区生态安全格局水平。

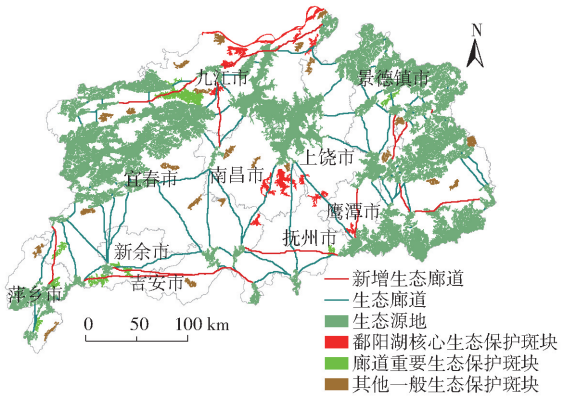


图 8 生态保护斑块增强(优化)及生态网络优化

Fig. 8 Ecological protection patch enhancement (optimization) and ecological network optimization

鄱阳湖核心生态保护斑块面积共计 1 062.25 km^2,占总生态保护斑块面积比例高达 42.79%,表明鄱阳湖生态廊道辐射范围内存在大量较高生态水平的地区,这些地区通过生态廊道与鄱阳湖生态源地相互联结增强了鄱阳湖对整个研究区生态安全格局的影响,生态潜力巨大。从空间分布来看鄱阳湖核心生态保护斑块主要分布在鄱阳湖的南北方向,这表明鄱阳湖在加强研究区南北地区生态联系,维持生态网络稳定,缩小研究区生态安全格局“北高南低”现象等诸多方面起到了重要作用。

3.2.3 优化后生态网络鲁棒性检验

本文依据网络节点度对 2020 年增边优化前后的生态网络分别进行蓄意攻击和随机攻击情况模拟,选取了网络平均度、平均聚类系数、最大连通子图比以及全局效率 4 个指标以检验生态网络优化的效果(图 9)。

由图 9 可知,2020 年生态网络优化前后平均度曲线整体向上移动,曲线起始值由原来的 4.15 提高至 4.83,蓄意攻击情景下的网络平均度最大增加 0.81,随机攻击情境下的网络平均度最大增加 1.17。平均聚类系数曲线起始值由原来的 0.51 提高至 0.59,蓄意攻击情景下平均聚类系数最大增加 0.21,随机攻击情境下平均聚类系数最大增加 0.29。蓄意攻击情境下,最大连通子图比最大增加 0.51,随机攻击情境下,最大增加 0.23;全局效率蓄意攻击情境下最大增加 13 个百分点,随机攻击情境下最大增加 18 个百分点。综上所述,生态网络经过增边优化后各项鲁棒性指标无论是在蓄意攻击情景下还是在随机攻击情景下均得到了一定程度提高,表明优化后网络结构更加稳定,抗毁性能有所增强,这对提高研究区生态质量,缩小南北生态水平差距有一定的促进作用。

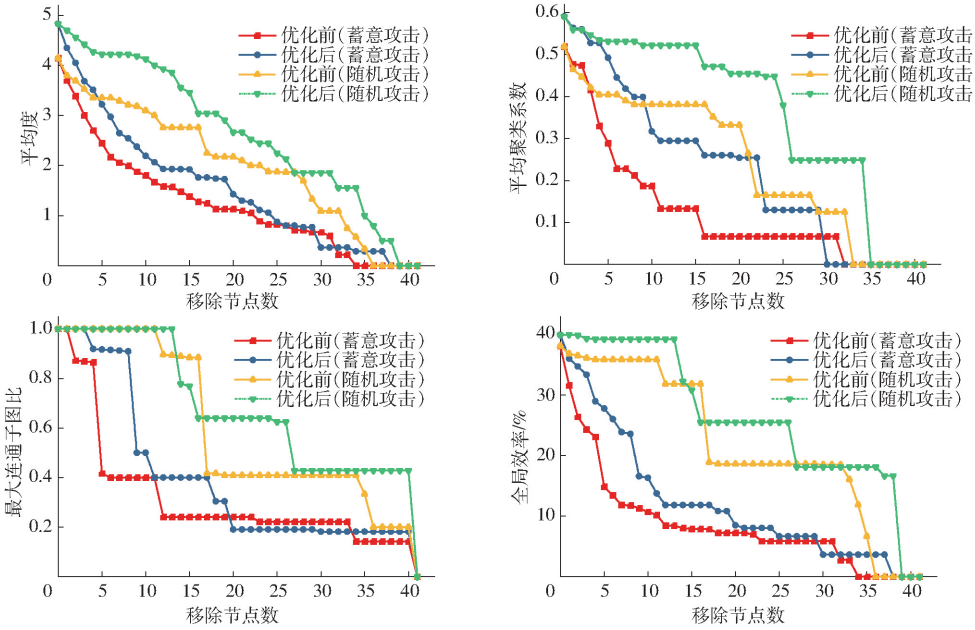


图 9 优化后生态网络鲁棒性

Fig. 9 Robustness of optimized ecological network

4 生态安全格局优化建议

4.1 增强对关键地区的生态保护与修复措施

基于生态安全格局现状,本文提出“固高保低”的生态修复方针,即巩固提高研究区内高水平生态源地如鄱阳湖、九岭山等生态源地在地域上的生态支撑作用,尤其需要重点保护鄱阳湖生态源地。同时,针对研究区南部、西南部以及南昌市部分地区的低水平生态源地,如玉华山、大王山、武功山、罗山及新余市西侧生态源地等地区,需要建立一套完善的生态保护机制,防止生态源地进一步破碎化。此外还需加强修复生态廊道上的生态障碍区及生态脆弱区生态环境保护,如科学规划和种植人工林地构建

“生态踏脚石”斑块使物种在迁徙时可以得到休息和能量补充,保障生物流通量,以确保生态源地间物种迁徙及能量信息流通顺畅。

4.2　合理规划生态空间,优化生态网络

生态系统服务重要性指标受城镇建设用地影响较大,研究区内生态源地基本被河流沿岸的居民地切割成多个斑块,生态源地之间物种迁徙困难。因此建议合理规划城镇扩张方向,加强对土地用途的管制措施,在城市与城市之间预留出足够的生态豁口,为物种与能量信息的流通预留空间,保护现有生态廊道的稳定性。

虽然三期生态网络节点的度分布符合统计规律,具有初步 Poisso 分布特征[31],网络较均匀,但仍有待改善。因此,从复杂网络角度出发,对现有生态网络结构进行合理增边优化以均衡生态网络,从而增强其抗毁性,是提高生态源地间物种与信息联系,改善研究区生态质量的方法之一。

4.3　识别生态保护斑块,挖掘生态潜力

研究区内除了现有的生态源地,还存在许多生态系统服务功能重要性次一级的区域,而这些区域对于物种迁徙和能量信息的流通也有重大作用,比如位于生态廊道中间的区域可视为“生态踏脚石”,为物种迁徙提供临时栖息地。尤其是鄱阳湖周边地区的核心生态保护斑块,其生态区位重要性较高,在加强周边地区生态联系、提高地区生态水平方面生态潜力巨大,这些生态保护斑块也是生态保护、生态修复过程的重点区域之一。

5　结论

(1)2000—2020 年,环鄱阳湖城市群生态质量总体呈现出了明显的北高南低的空间格局,且生态安全水平随时间推移逐步下降,生态优化需求明显。此外,鄱阳湖的生态区位重要性显著,其与周边源地构建的生态廊道等级高,生态夹点、生态节点等诸多要素分布广泛,生态潜力巨大,是研究区内的关键生态枢纽,同时也是今后生态保护与修复的重点关注对象。

(2)2000—2020 年,生态网络节点的重要性与聚集程度均有所下降,网络社群模块逐渐破碎化,网络密度降低。采用度低者优先策略进行 2020 年生态网络的模拟增边优化,提高了网络的鲁棒性,增强了南部地区破碎生态源地间的生态联系,使得网络的结构稳定性和分布均衡性均有改善,缓解了研究区生态质量南北不平衡的现象。另外,核心生态保护斑块主要分布在鄱阳湖的南北部,其在加强研究区南北地区生态联系等方面起重要作用。

参　考　文　献

[1] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅,等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2863 – 2874.
YIN Haiwei, KONG Fanhua, QI Yi, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(10): 2863 – 2874. (in Chinese)

[2] TAO Q, GAO G, XI H, et al. An integrated evaluation framework for multiscale ecological protection and restoration based on multi-scenario trade-offs of ecosystem services: case study of Nanjing City, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 140: 108962.

[3] 张琨, 林乃峰, 徐德琳, 等. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1057 – 1063.
ZHANG Kun, LIN Naifeng, XU Delin, et al. Research advance on ecological security in China: assessment models and management measures[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(12): 1057 – 1063. (in Chinese)

[4] 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[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407 – 419. (in Chinese)

[5] 刘金花, 杨朔, 吕永强. 基于生态安全格局与生态脆弱性评价的生态修复关键区域识别与诊断——以汶上县为例[J]. 中国环境科学,2022,42(7): 3343 – 3352.
LIU Jinhua, YANG Shuo, LÜ Yongqiang. Identification and diagnosis of critical areas for ecological rehabilitation based on eco-security patterns and ecological vulnerability assessment: a case study over Wenshang County[J]. China Environmental Science, 2022, 42(7): 3343 – 3352. (in Chinese)

[6] 陈梦圆. 基于 MCR 模型的环杭州湾生态安全格局研究[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2023.
CHEN Mengyuan. Study on ecological security pattern around the Hangzhou Bay based on MCR model[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2023. (in Chinese)

[7] 弓灏洁, 常金生, 杜雨阳. 基于 MCR 和重力模型的县域生态网络构建[J]. 测绘通报, 2023(11): 23 – 29,81.
GONG Haojie, CHANG Jinsheng, DU Yuyang. The construction of county ecological network based on MCR and gravity model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(11): 23 – 29,81. (in Chinese)

[8] ZHANG L, QIANG Z, XU E. Improving the ecological network optimization with landscape connectivity: a case study of Neijiang City, Sichuan Province[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(19): 54753 – 54769.

[9] LIU H, WANG Z, ZHANG L, et al. Construction of an ecological security network in the Fenhe River Basin and its temporal and spatial evolution characteristics[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137961.
[10] 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(3): 275 - 284.
GUO Jiaxin, HU Zhenqi, LI Haixia, et al. Construction of municipal ecological space network based on MCR model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 275 - 284. (in Chinese)
[11] 杜雨阳, 王征强, 于庆和, 等. 基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建——以秦岭(陕西段)为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1069 - 1078.
DU Yuyang, WANG Zhengqiang, YU Qinghe, et al. Construction of a regional ecological security pattern based on a habitat quality model and circuit theory: a case study of the Qinling Mountains (Shaanxi section)[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5): 1069 - 1078. (in Chinese)
[12] HUANG K, LI P, WANG X, et al. Integrating circuit theory and landscape pattern index to identify and optimize ecological networks: a case study of the Sichuan Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(44): 66874 - 66887.
[13] WU Y, HAN Z, MENG J, et al. Circuit theory-based ecological security pattern could promote ecological protection in the Heihe River Basin of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(10): 27340 - 27356.
[14] 孙玉杰,闫刚,刘玲俐,等. 耦合生态脆弱性和生境质量的生态安全格局构建——以南京市溧水区为例[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 397 - 405.
SUN Yujie, YAN Gang, LIU Lingli, et al. Construction of ecological security pattern based on coupling ecological vulnerability and habitat condition[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2023, 54(3): 397 - 405. (in Chinese)
[15] ZHOU G, HUAN Y, WANG L, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify priority conservation and restoration areas from an ecological network perspective[J]. Science of the Total Environment, 2023, 873: 162261.
[16] 刘晓平,唐益明,郑利平. 复杂系统与复杂系统仿真研究综述[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23): 6303 - 6315.
LIU Xiaoping, TANG Yiming, ZHENG Liping. Survey of complex system and complex system simulation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(23): 6303 - 6315. (in Chinese)
[17] 黄悦,李红波,欧国良. 武汉城市圈生态网络鲁棒性模拟及稳定性分析[J]. 生态科学, 2024, 43(1): 63 - 73.
HUANG Yue, LI Hongbo, OU Guoliang. Robustness simulation and stability analysis of ecological network in Wuhan metropolitan area[J]. Ecological Science, 2024, 43(1): 63 - 73. (in Chinese)
[18] 仇实,于强,刘泓君,等. 基于生态环境质量评价的酒泉市生态空间网络优化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 199 - 208.
QIU Shi, YU Qiang, LIU Hongjun, et al. The optimization of ecological spatial network in Jiuquan City based on the evaluation of ecological environment quality[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2024, 48(2): 199 - 208. (in Chinese)
[19] 王戈, 于强, YANG Di,等. 基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 258 - 266,312.
WANG Ge, YU Qiang, YANG Di, et al. Hierarchical ecological network structure based on complex network analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 258 - 266,312. (in Chinese)
[20] HUANG K, PENG L, WANG X, et al. Incorporating circuit theory, complex networks, and carbon offsets into the multi-objective optimization of ecological networks: a case study on karst regions in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 383: 135512.
[21] 陈竹安,刘子强,张立亭,等. 南昌市 LUCC 多情景模拟和生境质量时空演变与预测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 170 - 180.
CHEN Zhu'an, LIU Ziqiang, ZHANG Liting, et al. Multi-scenario simulation of LUCC and spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality in Nanchang City[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 170 - 180. (in Chinese)
[22] 石建丽,仲俊涛,马勇洁,等. 青海湖流域土壤保持服务功能模拟及驱动因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(6): 1286 - 1297.
SHI Jianli, ZHONG Juntao, MA Yongjie, et al. Spatio- temporal evolution and driving factors of soil conservation function in Qinghai Lake basin based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(6): 1286 - 1297. (in Chinese)
[23] 陈竹安, 况达, 危小建,等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的余江县生态网络构建[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1199 - 1207.
CHEN Zhu'an, KUANG Da, WEI Xiaojian, et al. Developing ecological networks based on MSPA and MCR: a case study in Yujiang County[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(8): 1199 - 1207. (in Chinese)
[24] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344 - 3352.
SONG Lili, QIN Mingzhou. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3344 - 3352. (in Chinese)

[25] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 等. 基于“HY－LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2995－3009.
WEI Baojing, SU Jie, HU Xijun, et al. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on “HY－LM”[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2995－3009. (in Chinese)
[26] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长预景[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1189－1204.
YU Kongjian, WANG Sisi, LI Dihua, et al. The function of ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1189－1204. (in Chinese)
[27] 宋宏利, 王悦悦, 张启斌, 等. 邯郸西部生态空间网络结构时空演变及其与固碳功能相关性研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 226－237, 248.
SONG Hongli, WANG Yueyue, ZHANG Qibin, et al. Spatial-temporal evolution of ecological spatial network structure in western Handan region and its correlation with carbon sequestration function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 226－237, 248. (in Chinese)
[28] 侯宏冰, 郭红琼, 于强, 等. 基于 LMBA 策略的鄂尔多斯市生态空间网络优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 219－227.
HOU Hongbing, GUO Hongqiong, YU Qiang, et al. Ecospatial network optimization in Ordos based on LMBA strategy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 219－227. (in Chinese)
[29] 汪昊, 吴正平, 程洁, 等. 基于复杂网络的电网结构静态鲁棒性分析[J]. 通信电源技术, 2018, 35(1): 33－35, 38.
WANG Hao, WU Zhengping, CHENG Jie, et al. Static robustness analysis of power network structure based on complex network[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(1): 33－35, 38. (in Chinese)
[30] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2406－2412.
ZHU Qiang, YU Kongjian, LI Dihua. The width of ecological corridor in landscape planning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2406－2412. (in Chinese)
[31] 高贵兵, 岳文辉, 欧文初. 制造系统局域世界网络演化模型及其复杂性度量[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(8): 2016－2024.
GAO Guibing, YUE Wenhui, OU Wenchu. Multi-local-world network modeling and complexity measure of manufacturing system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(8): 2016－2024. (in Chinese)

(上接第 396 页)

[23] LABAO A B, NAVAL P C. Cascaded deep network systems with linked ensemble components for underwater fish detection in the wild[J]. Ecological Informatics, 2019, 52: 103－121.
[24] LU X, LI B, YUE Y, et al. Grid R－CNN[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019: 7355－7364.
[25] YANG Z, LIU S, HU H, et al. RepPoints: point set representation for object detection[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2019: 9656－9665.
[26] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 99: 2999－3007.
[27] ZHANG X, WAN F, LIU C, et al. FreeAnchor: learning to match anchors for visual object detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(6): 3096－3109.
[28] ZHU C, HE Y, SAVVIDES M. Feature selective anchor-free module for single-shot object detection[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019: 840－849.
[29] TIAN Z, SHEN C, CHEN H, et al. FCOS: fully convolutional one-stage object detection[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2019: 9626－9635.
[30] ZHANG S, CHI C, YAO Y, et al. Bridging the gap between anchor-based and anchor-free detection via adaptive training sample selection[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020: 9756－9765.
[31] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector[C]//Proceedings of the Computer Vision—ECCV 2016, 2016: 21－37.
[32] CHOI H T, LEE H J, KANG H, et al. SSD－EMB: an improved SSD using enhanced feature map block for object detection [J]. Sensors, 2021, 21(8): 2842.
[33] REIS D, KUPEC J, HONG J, et al. Real-time flying object detection with YOLOv8[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2305.09972, 2023.
[34] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad－CAM: visual explanations from deep networks via gradient-based localization[J]. International Journal of Computer Vision, 2020, 128(2): 336－359.