

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.020

杨欣,肖豪立,王艺霏.长江中游城市群生态网络构建、优化与协同治理[J].水土保持学报,2024,38(1):300-309,318.

YANG Xin, XIAO Haoli, WANG Yifei. Construction, optimization and synergistic governance of the ecological network of urban agglomeration in the Middle Reaches of Yangtze River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 300-309, 318.

长江中游城市群生态网络构建、优化与协同治理

杨欣^{1,2}, 肖豪立^{1,2}, 王艺霏^{3,4}

(1.华中农业大学公共管理学院,武汉 430070;2.华中农业大学生态与环境经济研究所,武汉 430070

3.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: [目的] 科学构建长江中游城市群生态网络,为跨区域生态保护和协同治理提供科学依据。[方法] 遵循“源地识别—阻力面构建—廊道提取”框架构建多时点生态网络,基于网络属性和人类活动进行网络评价。[结果] (1)研究区生态源地面积由 2000 年的 $2.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 下降到 2020 年的 $2.29 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布在湖北省西北部山区、江西、湖南交界处的山脉及鄱阳湖流域等地区。生态廊道数量由 69 条下降为 42 条,总长度由 $1.53 \times 10^4 \text{ km}$ 下降到 $1.16 \times 10^4 \text{ km}$ 。研究区内生态阻力逐渐上升,网络重心由湖北省转移至湖南省,形态上由“三横两纵”的条带式分布转变为集中组团式分布。生态网络全局集程度、网络连通性均在减弱,总体上呈现结构收缩、功能减弱的变化趋势。网络周围 5,15 km 范围受人类活动影响最为明显。(2)在网络优化中,基于生态网络与交通网络交汇识别 102 个断裂点,基于源地间距离设置 17 个踏脚石。在生态网络 5,15 km 的范围设立“核心保护带”和“生态控制带”,总长 1 505 km。[结论] 在协同治理中,省级层面上湖北、江西两省应当完善流域跨省生态补偿机制,湖南、江西两省应当强化协同机制实施中的司法保障;市级层面上针对管理重点实行差别化管控,通过规划潜在生态廊道推进市域层面协同治理。优化后的生态网络集程度由 0.22 提升至 0.30,有效提升区域间生态连通性。

关键词: 生态网络; MSPA; MCR 模型; 网络评价; 协同治理; 长江中游城市群

中图分类号: F301.24; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0300-10

Construction, Optimization and Synergistic Governance of the Ecological Network of Urban Agglomeration in the Middle Reaches of Yangtze River

YANG Xin^{1,2}, XIAO Haoli^{1,2}, WANG Yifei^{3,4}

(1.College of Public Administration, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Ecology and Environmental Economics, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China)

Abstract: [Objective] This study is aimed to scientifically construct the ecological network of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River, and to provide scientific basis and theoretical reference for cross-regional ecological protection and collaborative governance. [Methods] Multi-temporal ecological network was conducted based on the framework of “source identification-resistance surface construction-corridor extraction”, and network evaluation was done based on network attributes and human activities. [Results] (1) Ecological sources were mainly concentrated in the mountainous of northwestern Hubei Province, junction of Jiangxi and Hunan, and the basin of Poyang Lake basin, with the area reducing from $2.67 \times 10^7 \text{ km}^2$ in 2000 to $2.29 \times 10^7 \text{ km}^2$ in 2020. The number of ecological corridors decreased from 69 to 42, and the total length decreased from $1.53 \times 10^4 \text{ km}$ to $1.16 \times 10^4 \text{ km}$. The resistance of study area

收稿日期:2023-05-24

修回日期:2023-08-25

录用日期:2023-09-10

网络首发日期(www.cnki.net):2023-12-19

资助项目:国家自然科学基金项目(71704061);教育部人文社科基金规划项目(21YJA790072);武汉市曙光计划项目(2023020201020349);中央高校基本科研业务费专项(2662023YJ001,2662023PY015)

第一作者:杨欣(1988—),女,博士,副教授,主要从事土地资源经济与可持续发展研究。E-mail: yangxin@mail.hzau.edu.cn

通信作者:杨欣(1988—),女,博士,副教授,主要从事土地资源经济与可持续发展研究。E-mail: yangxin@mail.hzau.edu.cn

increased gradually, the center of gravity of network had shifted from Hubei Province to Hunan Province, transforming from a strip distribution of “three horizontals and two verticals” to a concentrated group distribution. The overall degree of aggregation and network connectivity of the ecological network were weakening, and showing a trend of structural contraction and functional weakening overall. (2) In network optimization, 102 ecological “breaking points” were identified, and 17 stepping stones were set based on the distance between the source and destination. A “core protection belt” and an “ecological control belt” were set up within 5 and 15 km of the network, with length of 1 505 km. [Conclusion] In synergistic governance, at the provincial level, Hubei and Jiangxi provinces should improve the cross-provincial ecological compensation mechanism for river basins, while Hunan and Jiangxi provinces should strengthen the judicial guarantee in the implementation of the synergistic mechanism. At the city level, differentiated management and control would be implemented for key management areas, and potential ecological corridors would be planned to promote synergistic governance at the city level. The integration of the optimized ecological network was improved from 0.22 to 0.30, effectively improving ecological connectivity between regions.

Keywords: ecological network; MSPA; MCR model; network evaluation; synergistic governance; urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River

Received: 2023-05-24

Revised: 2023-08-25

Accepted: 2023-09-10

Online(www.cnki.net): 2023-12-19

生态网络是一种可以将生态源地、生态廊道等要素进行空间有机连接的网络体系^[1],健康的生态网络是推动土地可持续利用和维护生态系统服务功能的保障^[2]。随着城市化、工业化的快速推进,人类活动对于生态环境的破坏日益加剧,造成生态用地岛屿化、破碎化、生物多样性锐减等一系列问题^[3-4],严重影响城市群生态安全格局和区域可持续发展。城市群作为高度城市化阶段所形成的空间组织形式,其面临的经济发展与环境保护之间的矛盾往往存在显著的空间外溢现象^[5-6]。近年来跨区域协同治理机制逐渐被重视^[7]。党的二十大报告强调“推进美丽中国建设,坚持山水林田湖草沙系统治理,协同推进生态优先、绿色低碳发展”。因此,如何识别城市群尺度上的生态问题,探究跨区域生态治理模式和生态安全格局优化路径,推动区域间生态系统协同治理与保护,不仅是近年来学术界重点关注的问题,也是建设社会主义美丽中国和优化国土空间生态治理的基础^[8-10]。

国内外学者围绕生态网络的相关研究可以总结为 3 个方面:(1)从构建方法看,“源地识别—阻力面构建—廊道提取”是目前生态网络研究的主流范式^[11]。形态学空间格局(morphological spatial pattern analysis, MSPA)通过评价土地利用类型的景观连通性筛选源地,增加了源地识别和廊道提取的科学性^[12]。阻力面构建包括直接赋值和构建指标体系 2 种方法,其他如夜间灯光数据^[13]、生境质量^[14]、道路^[15]等因素也被应用于阻力面修正中。最小累计

通过计算源地斑块与目标斑块之间的最小累计成本类模拟最小成本路径,在提取源间廊道时得到广泛应用^[4]。(2)从研究尺度上来看,早期波兰、荷兰等欧洲国家曾构建全国范围的生态网络以推动理论发展和自然保护地建设^[16],当前研究可根据研究对象划分为流域尺度和城市群尺度。流域尺度上,中外学者针对不同承担区域内生态安全和景观连通功能的重点流域展开研究,如亚马逊流域^[17]、黄河三角洲^[4]、长江三角洲^[11]等地区。城市群尺度上,高密度的城市群面临的经济发展与环境保护之间的冲突逐渐被重视,已有学者针对重点城市群如京津冀^[3]、闽三角^[18]、粤港澳大湾区^[8]等展开研究,推动城市群绿色、高质量发展^[19]。(3)生态网络与跨区域协同治理的结合逐渐受到学者重视。BODIN 等^[20]将生态网络与社会网络结合奠定了生态环境协同治理的理论框架,后续在自然资源分配和管理(渔业资源、水资源等)中广泛应用^[20-21],部分学者^[9,22]从协同需求出发,针对区域间协同对象制定跨区域协同生态治理路径。

上述研究为本文提供了有益借鉴,但仍存在不足:(1)已有研究多集中单一时间截面的研究,对囊括多时点的生态网络变化的研究较少;(2)网络评价多基于来自图论的定量评价,较少研究考虑人类活动对于网络的影响;(3)基于生态网络的协同治理研究多集中在理论层面,对于城市群层面跨区治理的实证研究还有待丰富。处于快速城镇化与就地工业化等多重胁迫下的长江中游城市群,是长江经济带三大城市群之一,也是长江经济带人口最密集、生态环境问题

最为突出的地区之一^[23]。作为我国面积最大的城市群,在经济主导的发展模式下城市群内部城市间生态联系减弱,资源环境的胁迫效应日益明显。因此,本研究以长江中游城市群为例,基于前人^[4,11]研究结果,使用 MSPA、景观连通性指数确定生态源地,统筹经济发展与生态保护双重目标构建生态阻力面,运用 MCR 模型和重力模型构建 2000—2020 年生态网络,并使用基于人类活动影响和图论的综合评价方法对长中游城市群生态网络进行评价,最后从生态协同治理视角提出跨区域的生态网络优化管控措施,以期长江中游地区生态的“系统治理、协同治理”提供科学依据与可靠建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江中游城市群(101°55′—122°31′E, 25°59′—34°29′N)由武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群组成的超大城市群,横跨湖北、江西、湖南三省,总面积约为 $3.27 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)。地形以丘陵、平原为主,呈现四周高中部低的分布。截至 2020 年,长江中游城市群人口达 1.3 亿, GDP 达 9.4 万亿^[24]。2010—2020 年,长江中游城市群快速发展时期的经济发展与生态保护矛盾逐渐加剧,耕地面积由 $1.26 \times 10^5 \text{ km}^2$ 下降至 $1.21 \times 10^5 \text{ km}^2$, 下降 1.48%, 林地、草地面积小幅下降(分别下降 0.49%, 0.16%), 建设用地扩张明显, 比重由 2.76% 上升到 4.64%^[25], 生态空间受到明显蚕食。尽管 2015 年出台的《长江中游城市群发展规划》^[26] 明确了生态保护的重要地位, 但在生态廊道建设和生态修复方面的针对性不强。制定跨区域生态协同治理方案, 提升区域间协同治理水平是实现长江中游城市群可持续发展的必然要求。

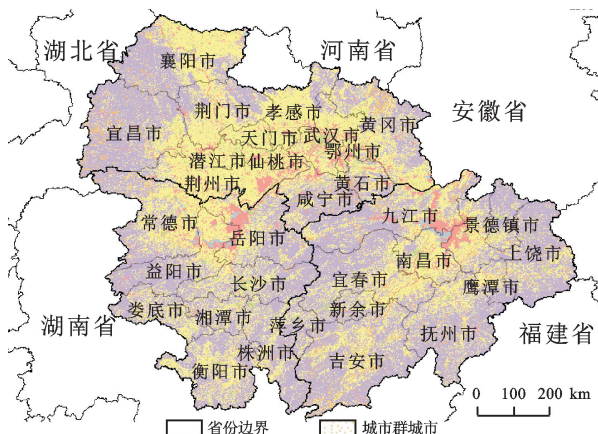


图 1 研究区概况
Fig. 1 Study area

1.2 研究方法

1.2.1 基于 MSPA 方法的生态源地识别 MSPA 分析方法是一种基于数学形态运算, 它可以将二值栅格图

像识别并分割为 7 个互斥类别描述空间格局、监测受宽度影响的边缘效应及用地空间的时序变化信息等, 通过对栅格图像的空间格局进行分析, 结果中核心区对生物多样性的保护具有重要意义, 可作为生态源地选取的依据。该方法不仅能从像元层面上辨识出具有连通重要性的 7 大景观类型的方法, 且受空间尺度影响小, 被广泛应用于生态源地识别的相关研究中^[27]。

1.2.2 景观连通性分析 可能连通性指数(PC)和连通重要性指数(dPC)作为景观连通性的重要指标能够较好反映出生态斑块之间的连通程度^[4]。利用 Conefor 2.6 软件和其 ArcGIS 10.4 中的插件计算可能连通性指数(PC)和连通重要性指数(dPC), 计算方法为:

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

$$dPC = 100 \times \frac{PC - PC_{i \rightarrow remove}}{PC} \quad (2)$$

式中: n 为研究区生态斑块总数; A_L 为研究景观总面积(m^2); a_i 、 a_j 分别为斑块 i 、 j 的面积(m^2); p_{ij}^* 为物种在生态斑块 i 和 j 扩散的最大概率。将 dPC 从高到低排序, 选取 dPC 超过 1 的作为最终生态源地。

1.2.3 最小阻力面模型 生态阻力面表示由源地扩散时的障碍, 本文考虑经济驱动和生态制约构建综合阻力面。选取反映生态保护目标的自然条件因素(土地利用类型^[11]、高程^[28]、坡度、距离自然保护区的距离^[22])及反映经济发展、城市化等与人类活动密切相关的因素(如距离高速、铁路以及居民点的距离^[22]等)组成长江中游城市群生态阻力因子指标体系(表 1)。

MCR 模型通过计算源地向周围扩散过程中的最小累计阻力来识别物种迁移和扩散的最佳路径, 是生态网络构建中的基本方法。本文采用俞孔坚^[29]修正的 MCR 模型, 利用 ArcGIS 10.4 中的路径成本和路径距离功能生成潜在生态廊道, 公式为:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (3)$$

式中: D_{ij} 为物种从源地斑块 j 到目标斑块 i 的空间距离(m); R_i 为目标斑块 i 的扩散阻力。

1.2.4 重力模型 生态廊道相对重要性可通过定量评价生态源地间相互作用强度判定^[3]。本文利用重力模型筛选出生态源地间相互作用较强的生态廊道, 公式为:

$$G_{ij} = \frac{L_{\max}^2 \times \ln S_i \times \ln S_j}{L_{ij}^2 \times p_i \times p_j} \quad (4)$$

式中: G_{ij} 为源地斑块 i 和 j 之间的相互作用力; S_i 、

S_i 分别为斑块 i 和 j 的面积(m^2); P_i 、 P_j 分别为斑块 i 和 j 的阻力值; L_{max} 为所有生态廊道的最大累计阻力值; L_{ij} 为源地斑块 i 和 j 之间的累计阻力值。

通过筛选得到重要生态廊道,作为构建生态网络的连接路径,实现源地间生态累计阻力的空间化。

表 1 生态阻力因子等级划分

Table 1 Classification of ecological resistance factors

阻力因子	阻力值					权重
	5	4	3	2	1	
高程/m	>1.0	0.8~1.0	0.4~0.8	0.2~0.4	<0.2	0.08
坡度/(°)	>30	25~30	15~25	7~15	<7	0.08
土地利用类型	建设用地	未利用地	水域	园地、耕地、草地	林地	0.32
距自然保护区距离/km	<0.3	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	>2.0	0.09
距高速距离/km	<0.3	0.3~0.6	0.6~0.8	0.8~1.2	>1.2	0.12
距铁路距离/km	<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0	0.13
距居民点距离/km	<0.25	0.25~0.50	0.50~1.00	1.00~2.00	>2.00	0.18

1.2.5 空间句法 本文采用起源于图论的空间句法(space syntax)方法评价生态网络^[22]。本文采用连接值(Connectivity, C_i)、平均深度(mean depth, MD_i)和集程度(integration, G_i)表征网络特性,通过 Axwman 软件计算,公式^[30]为:

$$C_i = k \tag{5}$$

$$MD_i = \frac{TD_i}{n-1} \tag{6}$$

$$G_i = \frac{n \left[\log_2 \left(\frac{n+2}{3} \right) - 1 \right] + 1}{(n-1)(MD_i-1)} \tag{7}$$

式中: C_i 为连接值; k 为源地 i 直接连接的廊道数量; MD_i 为平均深度; TD_i 为总深度; G_i 为集程度; n 为节点数量。连接值反映生态源点在网络中的中心性;平均深度反映节点 i 到其他所有节点最小成本;集程度表示某一生态廊道到网络中其他廊道的可达性。

1.3 数据来源

本研究所需数据包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年土地利用数据、行政边界数据、人类活动强度、自然保护区数据、基础地理数据、DEM 高程等数据,其中土地利用数据、行政边界数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>);人类活动强度数据来源于 WCS 野生生物保护网站(<https://wchumanfootprint.org/>),自然保护区数据来自于中国自然保护区生物标本资源共享平台;基础地理数据包括公路、铁路和居民点数据,来源于国家地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>);DEM 高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);相关社会经济数据来自于统计年鉴和各省市区地方年鉴^[31]。本文采用 500 m 分辨率栅格数据划分数据处理的基本单元。

2 长江中游城市群生态网络构建与评价

2.1 长江中游城市群生态网络构建

2.1.1 生态源地识别 参考吴钰茹等^[4]、马才学等^[11]的操作原则并结合长江中游城市群的实地情况,本研究筛选面积排序在前 30 的 MSPA 分析核心区作为潜在斑块,计算其连通性重要程度并排序,将 $dPC>1$ 核心区斑块作为长中游城市群的生态源地。另外,将本研究基于 MSPA 和景观联通性识别得到的鄱阳湖生态源地结果与陈小平等^[32]运用 GIS 空间分析功能得出的鄱阳湖生态源地对比发现,两者源地面积误差低于 15% 且空间分布相似,说明该方法具有较强的可靠性(图 2)。

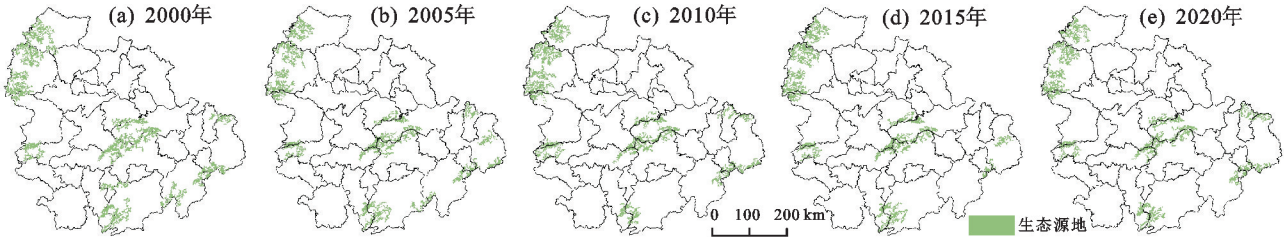


图 2 2000—2020 年城市群生态源地分布

Fig. 2 Ecological sources distribution of urban agglomeration from 2000 to 2020

2000—2020 年研究区分别为 2.67×10^4 , 2.39×10^4 , 2.35×10^4 , 2.11×10^4 , 2.29×10^4 km^2 , 源地面积总体上呈下降趋势。生态源地用地类型以山区林地为主,主要分布在湖北省西部宜昌、襄阳一带的武当、

荆山山脉,鄂湘赣 3 省交界处的幕阜山脉以及赣南、赣西的井冈山、怀玉山等山脉。

2.1.2 生态阻力面时空变化特征分析 在 ArcGIS 10.4 中使用栅格计算器根据不同阻力因子及权重加权求和,得到长江中游城市群不同城市的综合生态阻力面(图 3)。根据阻力值分布将研究区划分为 4 个等级:高、中、较低、低 4 个阻力区。2000—2010 年增

加 2 个高阻力区,分别是襄阳市和萍乡市。2010—2020 年新增 2 个中阻力区鄂州市和九江市。武汉城市圈的设立带动周围城市的经济建设快速发展,周边的鄂州、孝感等城市呈现了以武汉为核心的生态阻力“高一高”聚集的分布模式。长江沿线环境质量下降和鄱阳湖周边地区水质恶化生态压力上升,需通过识别“断裂点”等方式进行恢复。

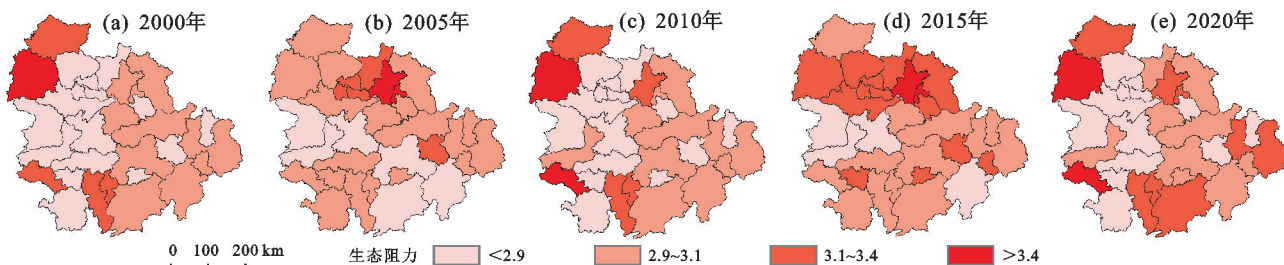


图 3 2000—2020 年城市群生态阻力时空变化

Fig. 3 Temporal and spatial changes of ecological resistance of urban agglomeration from 2000 to 2020

2.1.3 生态网络构建与特征分析 基于 MCR 模型,通过源地间最小生态阻力识别潜在生态廊道,利用重力模型构建相互作用矩阵筛选重要生态廊道。将相互作用强度 100

作为筛选重要生态廊道的阈值^[2],其他作为一般生态廊道。将筛选完的重要生态廊道进行拓扑合并和简化,得到长江中游城市群不同时期的生态网络(图 4)。

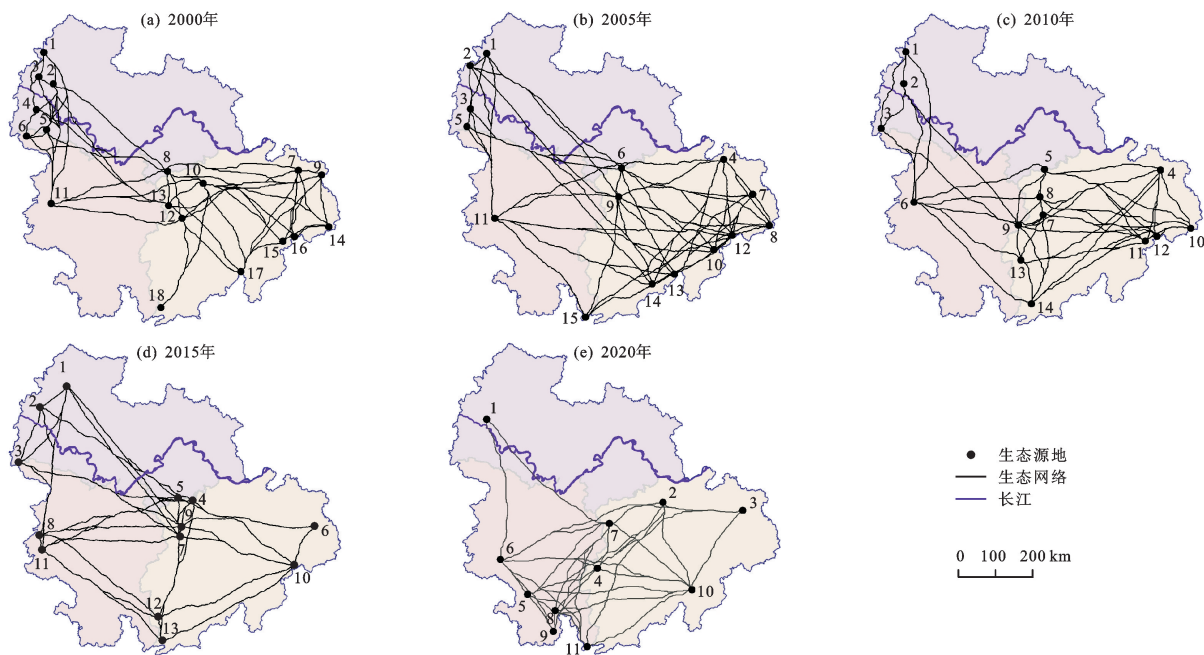


图 4 2000—2020 年城市群生态网络

Fig. 4 Ecological network of urban agglomeration from 2000 to 2020

整体来看,2000—2020 年生态网络中分别包含生态廊道 69,68,57,55,42 条,数量不断下降。总长度由 2000 年的 1.53×10^4 km 减少到 2020 年的 1.16×10^4 km,反映出源地间联系不断减弱,抗干扰能力下降。从形态来看,网络中心不断向南移动,幕阜山脉、衡山、九岭山和罗霄山脉(包括武功山、万洋山)等山脉成为重点生态源地,保障了区域生态连通性和稳定性。形态上由“三横两纵”的条带状分布逐渐转为集中组团式分布。分省份来看,湖北省内源间

廊道数量明显减少,大巴山东部—武当山一带生态阻力明显提升,工业发展和交通网建设对于源地保护区的影响凸显。自 2007 年武汉城市圈被批复后湖北省大力推动交通一体化建设,形成了包括武咸、武黄在内的城市圈铁路网,导致湖北省境内的廊道连接急剧减少。湖南省境内 2000—2020 年网络质量提升,幕阜山—连云山和九岭山—武功山一带网络密度提升,逐渐成为区域生态网络的核心。江西省和湖南省交界处廊道数量明显增加,由北向南沿山脉最小累计阻

力方向延伸。网络的集聚和重心的转移反映出湖南省境内湘赣交界处生态环境保护与管理工作的成效。衡山保护区自 2007 年升级为国家级自然保护区后在生态管理取得了突出的成果。同时,自 2015 年湖南、江西两省签署《湘赣两省跨界污染纠纷协议》以来,两省在环境保护、司法监督等跨区域协同机制建立上进行了一系列探索,是长江中游城市群协同治理的参考。

2.2 长江中游城市群生态网络评价

2.2.1 生态网络属性评价 本研究基于空间句法方法,通过连接值、平均深度和全局集程度对网络进行评价,得到网络属性(表 2)。

表 2 2000—2020 年生态网络主要属性变化
Table 2 Changes in the main attributes of ecological networks from 2000 to 2020

年份	廊道数量	连接值	平均深度	全局集程度
2000	69	18.57	7.91	0.28
2005	61	17.41	7.80	0.25
2010	57	20.84	7.41	0.25
2015	66	12.40	7.24	0.24
2020	42	19.70	6.84	0.22

连接值表示的是某一源地与其直接联系的廊道数量。从 2000—2020 年,源地连接廊道数量在前 10 年小幅上升后趋于稳定,表示在 2000—2010 年网络质量有所改善,在廊道数量减少的情况下连接值上升,基本保证了能量顺畅流通。平均深度表示源地间联系需要耗费的路程,这一数值从 2000 年的 7.91 下降到 2010 年的 7.41 后,在 2020 年进一步降至 6.84。形态收缩导致网络覆盖范围面积减少、长度降低,网络内部的流动成本降低。全局集程度同样持续下降,2000—2010 年从 0.27 降为 0.25,并进一步降至 0.22,表明各源地与网络内所有节点联系的紧密程度不断减弱,一体化程度减弱。

结合生态网络的形态变化可知,研究区内的网络形态在研究时段内处于收缩中转移的态势,2010 年城市群内部生态网络结构处于功能最佳时期,在廊道数量变少的情况下基本维持了源地间能量流通的通畅。主要城市群如武汉城市圈、长湘潭城市群均在 2007 年全国资源节约型和环境友好型社会建设综合改革配套改革试验区设立后成立,所以 2010 年时依然维持了较好的生态格局。

随着区域发展的快速演进,交通网络建设和城市扩张等经济活动导致城市群生态网络展现出结构收缩、功能减弱的趋势。

2.2.2 人类活动影响评价 本文通过绘制生态网络和人类活动强度与生态网络距离关系图,反映人类活动对于网络的干扰程度。基于 WCS 野生生物保护

网站得到的人类活动强度图(图 5)显示,研究区人类活动呈现以城市为中心,通过道路扩散的趋势,与廊道交汇处明显阻断能量流动,出现生态“断裂点”^[22]。重点水域如鄱阳湖、洞庭湖等受人类活动影响较小的源地成为了廊道跨越的关键地区。衡山、武当山国家森林公园等因划定了自然保护区范围而为源间廊道的通畅提供了坚实保障。

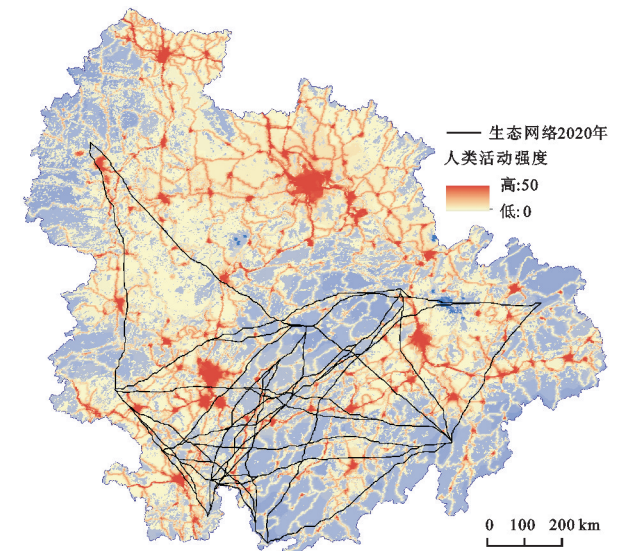


图 5 人类活动强度
Fig. 5 Intensity of human activity

快速发展的交通网络是人类活动导致生态廊道断裂的主要因素,而我国近 20 年的绝大部分的交通网络都是基于既有线路延伸发展形成的^[33]。因此,本研究基于最新时点的 2020 年生态网络,绘制人类活动强度与生态网络的距离—强度图(图 6)。

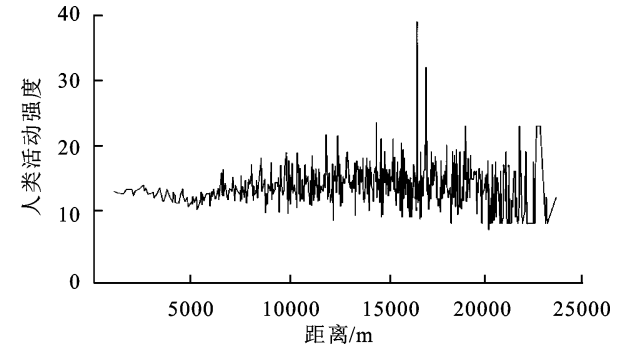


图 6 生态网络—人类影响“距离—强度”分布
Fig. 6 “Distance—intensity” distribution of ecological networks—human impact

距离交通网络 5 km 以内,生态廊道受到的影响较小,表示 5 km 为生态网络保持功能稳定的基本距离。随着距离生态网络的距离扩大人类活动强度不断增强,在大约 15 km 处出现突然上升,表示在该范围内网络功能明显下降,是对应廊道受到蚕食和受到明显影响的距离。当前不同保护区的设置起到了有

效疏通生态物质扩散的作用,应在此基础上根据不同范围内的人类活动强度进行进一步管理与优化。

3 基于协同治理的长江中游城市群生态网络优化

本文基于交通网络数据,以研究时段内结构功能较为完整的 2010 年网络为优化参考,共识别断裂点 102 个,其中高速断裂点 52 个,铁路断裂点 50 个(图 7)。



图 7 研究区生态断裂点分布

Fig. 7 Map of ecological breaking points

依托生态用地和保护区范围将廊道与交通网络的交汇点设为断裂点进行修复。江西省内主要依托于湖泊、湿地与山脉地区开展修复工作,例如,九江市境内依托于鄱阳湖湿地修复昌九城际铁路、京九高速铁路等与廊道交汇造成的断裂;鹰潭市境内依托龙虎山风景区设立的断裂点用以修复 G60 高速和沪昆高速铁路与廊道交汇造成的断裂。湖南省境内主要依托山脉和湖泊开展断裂点修复工作。G60 高速横穿湘赣边界,在萍乡市和株洲市境内建设符合动物生活习惯的天桥、涵洞、隧道等设施,防止动物误入公路。湖北省断裂点主要集中在沪汉蓉铁路的西侧及其与不同高速公路(G50、G55)的交汇处,该地区主要受到湖北省西部山区地形的影响阻碍了生态物质的扩散。同时应当注意武汉周围地区的廊道建设工作,加强城市绿地和绿色基础设施建设以提高城市生态网络的韧性。

对于长距离廊道,通过设立“踏脚石”的方式有助于提升网络的抗干扰性,本文确定 17 个“踏脚石”(图 8)。

研究区内最长的廊道在源地 6 和源地 10 之间,长度超过 500 km,横跨湘赣两省,在此廊道上设立 2 个踏脚石,即 17,18 号。其余廊道综合考虑源地间距离和交通、地形等因素,除在源地 1 与 2、2 与 6 之间分别设立 2 个踏脚石外,远距离廊道上均设立 1 个踏

脚石。森林公园、湿地、湖泊以及其他划定的保护区等生态用地均可作为踏脚石设立的备选区域。例如,踏脚石 1 设立于荆州市公安区,依托过境的长江和公安崇湖国家湿地公园开展源地的保护工作,有利于鸟类迁移与栖息;踏脚石 2 位于咸宁市赤壁市,位于鄂东南低山丘陵,能够为野生动物通过景观提供所需的资源和栖息地。筛选的“踏脚石”具有较高的生态价值和景观连通性,能够有效提升区域生态网络的整体功能,将其作为潜在生态源地进行保护和建设。



图 8 生态廊道踏脚石布局

Fig. 8 Map of ecological corridor stepping stones

4 基于“三带三区”的长江中游城市群生态协同治理

本文提出以“三带三区”为核心的跨区生态协同治理模式(图 9),其中“三带”注重省际层面的协同治理,“三区”注重市域层面的合作。三条保护带组成了长江中游城市群生态网络的基本屏障,以生态廊道布局为框架基于不同地区景观特点(如洞庭湖、幕阜山脉等)和生态治理重点划定“武汉城市圈生态缓冲与人居环境提升区”“鄱阳湖/洞庭湖水系联通与水源涵养区”“湘赣边界山林生物多样性保护区”推动区域间生态保护与环境治理。

“三带”的设立中,筛选相互作用强度值 50~100 的一般生态廊道(表 3),选取源地 1 和源地 2、源地 1 和源地 5、源地 3 和源地 11 之间的廊道作为保护带修建依据。

在此基础上根据 3.2 中不同范围人类活动的影响程度在 5,15 km 的范围内分别实施不同程度的生态控制措施,其中在 5 km 的范围内禁止任何形式的土地开发活动,并通过生态修复工程恢复生态功能,15 km 的范围内减少社会生产和人类活动,禁止水环境污染等生态破坏活动(图 9)。

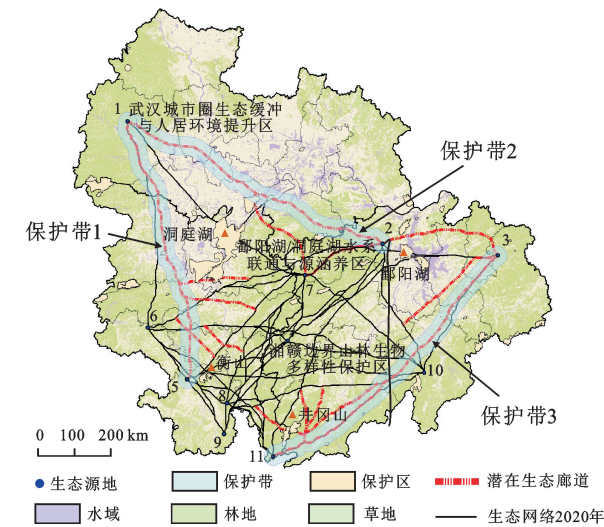


图 9 长江中游城市群“三区三带”协同治理

Fig. 9 Synergistic governance of “three regions and three belts” in the urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

保护带 1 长度 468 km,主要用地类型为林地和水域。保护带 1 北部起源于鄂西山区,横跨洞庭湖、衡山山脉等生态区,这些地区植被覆盖度高、野生动物丰富,是维护城市生境质量的关键生态屏障。管理中涉及到湖北、湖南省地协同治理。两省已针对长江流域生态协同保护出台《关于建立长江流域生态综合治理检察公益诉讼跨区域协作机制的实施意见》,为

两省流域协同治理提供司法保障,未来同样应当注重山地、丘陵等地类的生态保护,实施森林质量精准提升工程。保护带 2 长度 507 km,主要地类为林地和水域。保护带 2 主要在湖北省境内,沿长江流向自西北向东南分布,途径潜江、仙桃、九江等市。管理中涉及湖北、江西两省,是实现长江保护和流域治理的关键区域。该区域应重视重要河流、湖泊、湿地如洪湖湿地、鄱阳湖湿地和长江新螺段白鱉豚等景观的生态修复工作。湖北省内多地已开展跨区域生态补偿工作,签署了包括《通顺河流域跨市断面水质考核生态补偿协议》《府澧河流域横向生态保护补偿协议》在内的多项生态补偿协议,下一步应积极推动湖北、江西两省跨区域生态补偿机制,强化鄂赣两省生态一体化治理水平。保护带 3 长度 530 km,主要地类为林地和草地。保护带 3 主要位于江西境内,部分位于湖南省境内山区,覆盖大灵山、芙蓉山等山脉,形成了覆盖赣西生态格局的屏障。整体保护带以一般生态廊道为基础,在现有生态网络周围呈环状分布,是当前区域生态安全格局的重要补充。湘赣两省自 2015 年签署《湘赣两省跨界污染纠纷协议》以来,积极在环境保护、执法监督等领域探索跨区域协同治理的合作机制,形成了涪水流域生态补偿、河长制协作等多项协议,为协同机制运行提供了有力司法保障。

表 3 基于重力模型的源地斑块相互作用矩阵

Table 3 Interaction matrix of ecological sources based on the gravity model

源地斑块编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		78.71	38.71	82.28	78.33	156.02	105.58	61.83	61.09	39.75	37.30
2			686.60	530.43	149.04	163.53	1 202.69	174.16	163.52	513.68	113.90
3				166.64	71.31	77.82	217.76	79.95	80.05	447.18	76.00
4					610.54	420.20	1 272.68	936.31	663.17	392.35	329.97
5						1 741.30	314.93	2 907.42	1 643.30	128.62	310.16
6							313.38	660.70	547.01	119.08	207.49
7								325.55	273.99	338.01	163.89
8									8 854.27	176.97	648.35
9										172.79	545.55
10											198.97

“三区”划定同样基于现有生态景观和廊道规划,并结合源地识别中的斑块重要性评价最终确定。“武汉城市圈生态缓冲与人居环境提升区”设立在武汉西部的城市圈范围内,目的是针对人类活动影响严重的区域进行生态建设,提升人居环境。基于 MSPA 识别的“核心区”,依靠武汉市木兰山、仙桃市洪湖湿地以及鄂州市梁子湖等生态景观划定保护区,通过人工造林、设置缓冲隔离带等措施进行生态建设,降低人类活动影响的空间外溢。“鄱阳湖/洞庭湖水系联通与水源涵养区”分别设立于以鄱阳湖为核心的九江、

南昌市和以洞庭湖为核心的岳阳、益阳等市。鄱阳湖和洞庭湖是长江流域重要水系,南昌市和九江市应共同强化鄱阳湖湿地水源涵养、调节气候、维护生物多样性等功能;岳阳、常德等市应加强联合执法工作,划定生态保护红线,打击生态破坏行为。在岳洞庭湖南侧规划潜在生态廊道,长度 124 km,合力推动市级层面洞庭湖湿地保护和流域治理工作。“湘赣边界山林生物多样性保护区”设立于湘赣边界的山区,目的是针对网络核心区开展生态保护和修复。为强化林地保护,依据生态节点间的引力值在井冈山附近新增的 4

条潜在生态廊道,总长度 431 km(图 9a),主要位吉安、株洲两市,搭建了两市在林区管理中的纽带;同样图 9b 为在衡山附近新增的 3 条潜在生态廊道,总长 258 km,促进衡阳、湘潭等市对于森林源间廊道保护政策的制定。优化后研究区生态网络平均深度为 6.82,全局集程度 0.30,相较于规划前(平均深度 6.84,全局集程度 0.22)明显提高,表明生态网络的优化对改善长江中游城市群生态环境质量具有重要的意义。

5 结论

(1)研究区生态源地面积由 2000 年的 $2.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 下降到 2020 年的 $2.29 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布在湖北省西北部山区、江西、湖南交界处的山脉以及鄱阳湖流域等地区。生态廊道数量由 69 条下降为 42 条,总长度由 $1.53 \times 10^4 \text{ km}$ 下降到 $1.16 \times 10^4 \text{ km}$ 。研究区内生态阻力逐渐上升,生态网络整体重心由湖北省转移至湖南省,形态上由“三横两纵”的条带式分布转变为集中的组团式分布。生态网络全局集程度、网络连通性均在减弱,总体上呈现结构收缩、功能减弱的变化趋势。网络周围 5,15 km 范围受人类活动影响最为明显。

(2)在网络优化中,基于生态网络与交通网络交汇识别 102 个断裂点,基于源地间距离设置 17 个踏脚石。在生态网络 5,15 km 的范围设立“核心保护带”和“生态控制带”,总长 1 505 km,构建区域生态屏障。在协同治理中,省级层面上湖北、江西两省应当完善流域跨省生态补偿机制,湖南、江西两省应当强化协同机制实施中的司法保障;市级层面上设立“武汉城市圈生态缓冲与人居环境提升区”“鄱阳湖/洞庭湖水系联通与水源涵养区”“湘赣边界山林生物多样性保护区”,通过规划潜在生态廊道推进市域层面协同治理。优化后的生态网络集程度由 0.22 提升至 0.30,有效提升区域间生态连通性。

本文通过构建长江中游城市群 2000—2020 年动态生态网络,有效识别由于与交通网络交汇或距离过长造成的廊道断裂,并能在网络的动态变化过程中进行有针对性地进行优化与保护。此外,本文基于人类活动影响确定的保护区范围补充了廊道宽度的确定方式,有助于降低人类活动对于网络的影响。最后本文在《长江中游城市群发展规划》以及各地区间出台的协议强调市域层面合作的基础上深化了跨区域协同治理具体内容,并提出了“跨区域、跨部门、跨政策”的协同治理措施,是对长江中游城市群省际层面的协同治理和市域层面的环境合作的有效补充和科学参考。

本研究中重要生态廊道的阈值、筛选生态源地的景观连通性值没有考虑研究区内特殊的物种分布和生态特性;生态阻力面的构建中也应根据研究区的特殊条件如地形、气候等做进一步修正,以提高研究的准确性。

参考文献:

- [1] 李红波,黄悦,高艳丽.武汉城市圈生态网络时空演变及管控分析[J].生态学报,2021,41(22):9008-9019.
LI H B, HUANG Y, GAO Y L. Analysis on the spatio-temporal evolution and regulation of the ecological network in Wuhan metropolitan area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9008-9019.
- [2] ZHOU D, LIN Z, MA S, et al. Assessing an ecological security network for a rapid urbanization region in Eastern China[J]. Land Degradation and Development, 2021, 32(8): 2642-2660.
- [3] 刘晓阳,魏铭,曾坚,等.闽三角城市群生态网络分析与构建[J].资源科学,2021,43(2):357-367.
LIU X Y, WEI M, ZENG J, et al. Ecological network analysis and construction: A case study of the urban agglomeration of the Min River Delta, China[J]. Resources Science, 2021, 43(2): 357-367.
- [4] 吴钰茹,吴晶晶,毕晓丽,等.综合模型法评估黄河三角洲湿地景观连通性[J].生态学报,2022,42(4):1315-1326.
WU Y R, WU J J, BI X L, et al. Application of the least cost distance model and the circuit theory model in the evaluation of wetland landscape connectivity in the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1315-1326.
- [5] 赵先超,田一豆,张潇湘.长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析[J].水土保持学报,2023,37(5):215-225.
ZHAO X C, TIAN Y D, ZHANG X X. Spatio-temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in Changzhutan urban agglomeration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 215-225.
- [6] 方创琳,张国友,薛德升.中国城市群高质量发展与科技协同创新共同体建设[J].地理学报,2021,76(12):2898-2908.
FANG C L, ZHANG G Y, XUE D S. High-quality development of urban agglomerations in China and construction of science and technology collaborative innovation community[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 2898-2908.
- [7] 苟登文,宫清华,陈爱兵,等.粤港澳大湾区生态协同治理策略研究综述[J].生态科学,2022,41(2):249-258.
GOU D W, GONG Q H, CHEN A B, et al. A review of ecological coordination governance strategies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Ecological Science, 2022, 41(2): 249-258.
- [8] 朱治双,廖华.京津冀及周边大气污染联防联控政策实施效果评估[J].中国地质大学学报(社会科学版),2022,22(2):142-156.
ZHU Z S, LIAO H. Evaluation on the effects of joint prevention and control of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and its surrounding areas[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2022, 22(2): 142-156.

- tion), 2022, 22(2):142-156.
- [9] 冯舒,唐正宇,俞露,等.城市群生态网络协同构建场景要素与路径分析[J].生态学报,2022,42(20):8223-8237.
FENG S, TANG Z Y, YU L, et al. Collaborative construction of ecological network in urban agglomerations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20):8223-8237.
- [10] 刘智勇,贾先文,潘梦启.省际跨区域生态环境协同治理实践及路径研究[J].东岳论丛,2022,43(11):184-190.
LIU Z Y, JIA X W, PAN Q M. Study on the practice and path of inter-provincial cross-regional ecological and environmental collaborative management [J]. Dongyue Tribune, 2022, 43(11):184-190.
- [11] 马才学,杨蓉萱,柯新利,等.基于生态压力视角的长三角地区生态安全格局构建与优化[J].长江流域资源与环境,2022, 31(1):135-147.
MA C X, YANG R X, KE X L, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in Yangtze River Delta based on the perspective of ecological pressure [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(1):135-147.
- [12] 王玉莹,沈春竹,金晓斌,等.基于 MSPA 和 MCR 模型的江苏省生态网络构建与优化[J].生态科学,2019, 38(2):138-145.
WANG Y Y, SHEN C Z, JIN X B, et al. Developing and optimizing ecological networks based on MSPA and MCR model [J]. Ecological Science, 2019, 38(2):138-145.
- [13] XU H, WANG M, SHI T, et al. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI) [J]. Ecological Indicators, 2018, 93:730-740.
- [14] 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[J].农业资源与环境学报,2022,39(5):1069-1078.
DU Y Y, WANG Z Q, YU Q H, et al. Construction of a regional ecological security pattern based on a habitat quality model and circuit theory [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5):1069-1078.
- [15] MIAO Z, PAN L, WANG Q, et al. Research on urban ecological network under the threat of road networks: A case study of Wuhan [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(8):e342.
- [16] KALEV S, JURI J, ARE K, et al. Development of national ecological networks in the Baltic countries in the framework of the pan-European Ecological Network [M]. Warsaw: IUCN Office for Central Europe, 2002.
- [17] PINTO-COELHO D, MARTINS M, GUIMARAES JUNIOR P R. Network analyses reveal the role of large snakes in connecting feeding guilds in a species-rich Amazonian snake community [J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(11): 6558-6568.
- [18] 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[J].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 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12):4373-4382.
- [19] TAN L M, ARBABI H, LI Q, et al. Ecological network analysis on intra-city metabolism of functional urban areas in England and Wales [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 138:172-182.
- [20] BODIN Ö, TENGÖ M. Disentangling intangible social-ecological systems [J]. Global Environmental Change, 2012, 22(2):430-439.
- [21] RATHWELL K J, PETERSON G D. Connecting social networks with ecosystem services for watershed governance: A social-ecological network perspective highlights the critical role of bridging organizations [J]. Ecology and Society, 2012, 17(2):21-45.
- [22] MU H W, LI X C, MA H J, et al. Evaluation of the policy-driven ecological network in the Three-North Shelterbelt region of China [J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 218:104305-104316.
- [23] 邹磊,刘慧媛,王飞宇,等.长江中游城市群绿色发展水平的地区差异及其影响因素[J].中国科学:地球科学, 2022, 52(8):1462-1475.
ZOU L, LIU H Y, WANG F Y, et al. Regional difference and influencing factors of the green development level in the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(8):1462-1475.
- [24] 何利杰,杜梦晴,韦晶,等.长江中游城市群土地利用变化对 PM_{2.5} 污染的影响及空间溢出效应[J].长江流域资源与环境,2023,32(5):1018-1029.
HE L J, DU M Q, WEI J, et al. Impact of land use change on PM_{2.5} pollution and its spatial spillover effect in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(5):1018-1029.
- [25] 曾晨,程轶皎,吕天宇.基于生态系统健康的国土空间生态修复分区:以长江中游城市群为例[J].自然资源学报, 2022, 37(12):3118-3135.
ZENG C, CHENG Y J, LV T Y. Research on landscape ecological restoration zoning based on ecosystem health: A case study of the urban agglomeration in the middle reaches along the Yangtze River [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(12):3118-3135.
- [26] 长江中游城市群发展规划[Z].国务院,2015.
Development Plan for City Clusters in the Middle Reaches of the Yangtze River [Z]. State Council, 2015.

(下转第 318 页)

- GUO Q S, KANG Y, ZHAO Y J, et al. Changes in the contents of N, P, K, pH and organic matter of the soil which experienced the hydro-fluctuation in the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(3): 7-10.
- [32] 郭燕,程瑞梅,肖文发,等.三峡库区消落带土壤化学性质年际变化特征[J].林业科学,2019,55(4):22-30.
- GUO Y, CHENG R M, XIAO W F, et al. Inter-annual variation of soil chemical properties in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(4): 22-30.
- [33] 樊大勇,熊高明,张爱英,等.三峡库区水位调度对消落带生态修复中物种筛选实践的影响[J].植物生态学报,2015,39(4):416-432.
- FAN D Y, XIONG G M, ZHANG A Y, et al. Effect of water-level regulation on species selection for ecological restoration practice in the water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(4): 416-432.
- [34] 窦文清,贾伟涛,张久红,等.三峡水库消落带植被现状、适生策略及生态修复研究进展[J].生态学杂志,2023,42(1):208-218.
- DOU W Q, JIA W T, ZHANG J H, et al. Research progress of vegetation status, adaptive strategies and ecological restoration in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(1): 208-218.
- [35] TANG Q, FU B J, COLLINS A L, et al. Developing a sustainable strategy to conserve reservoir marginal landscapes [J]. *National Science Review*, 2018, 5(1): 10-14.
- [36] 高进长,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡库区消落带分区固土护岸模式[J].世界科技研究与发展,2014,36(6):623-628.
- GAO J Z, BAO Y H, HE X B, et al. Patterns of soil conservation and revetment by district at water-level-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir [J]. *World Sci-tech R & D*, 2014, 36(6): 623-628.
- (上接第 309 页)
- [27] 姚采云,安睿,窦超,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的三峡库区林地生态网络构建与评价研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(9):1953-1962.
- YAO C Y, AN R, DOU C, et al. Research on construction and evaluation of forest land ecological network in three gorges reservoir area based on MSPA and MCR model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 1953-1962.
- [28] 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[J].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 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 771-784.
- [29] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].生态学报,1999,19(1):8-15.
- YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 8-15.
- [30] JIANG B, HUANG J. A new approach to detecting and designing living structure of urban environments [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 88: e101646.
- [31] 国家统计局.2021 年中国城市统计年鉴 [M].北京:中国统计出版社,2021.
- National Bureau of Statistics. China urban statistics year-book 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [32] 陈小平,陈文波.鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J].应用生态学报,2016,27(5):1611-1618.
- CHEN X P, CHEN W B. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1611-1618.
- [33] 谢辉,巴可伟.长江中游城市群湖北区域综合交通布局规划研究[J].综合运输,2020,42(4):19-24.
- XIE H, BA K W. On the comprehensive transportation planning of Hubei urban agglomeration in the Middle of the Yangtze River [J]. *China Transportation Review*, 2020, 42(4): 19-24.