闫璐雨,潘菲菲,周燕,等.三峡库区县域生态要素的演变特征及生态修复[J].华中农业大学学报,2026,45(1):167-179.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.015

三峡库区县域生态要素的演变特征及生态修复

闫璐雨[1],潘菲菲[2],周燕[1],李正天[3]

1.武汉大学城市设计学院/湖北省人居环境工程研究中心,武汉 430072;
2.长江勘测规划设计研究有限责任公司,武汉 430010;3.湖北省美术学院环境艺术学院,武汉 430205

摘要 为保护和修复三峡库区城市的生态安全,以重庆市忠县为研究对象,基于形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis,MSPA)方法、电路理论和生态系统服务和权衡的综合评估(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs,InVEST)模型识别忠县2000—2020年3个时期的生态网络与生境质量水平,探究库区城市生态要素的时空变化特征,针对性地提出生态保护红线优化策略。结果显示:随时间推移忠县整体生态环境呈向好趋势,生态源地数量从12个增加至48个,面积从131.13 km²增长至351.03 km²,中部源地分布密集。廊道由23条增加至112条,长度由191.55 km上升至314.94 km后波动下降至292.99 km,空间上呈北密南疏、东密西疏的分布特征。3期生境质量指数分别为0.331 1、0.384 1、0.381 6,呈现先升高后小幅降低趋势,整体生境质量有所提升;林地资源丰富的中部地区生境质量较高,长江两岸及中心城区生境质量较差。生态网络要素与生境质量水平的空间分布和变化存在协同耦合关系,受用地结构变化的影响最显著。对源地实行分区管控策略并优化生态保护红线边界,调整后红线区面积为124.72 km²,同时划定125.57 km²的补划区和189.81 km²的储备区。

关键词 生态网络;生态修复;生态保护红线;生境质量;三峡库区

中图分类号 X176 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0167-13

三峡库区城市作为长江上游重要的生态屏障,同时也是典型的生态敏感区域[1],其地形复杂性和生态脆弱性使得该区域的生态修复成为焦点和难点[2]。改革开放以来,中国经济快速发展推动我国城镇化水平显著提升[3]。城市化进程的持续发展加速了土地覆盖的动态转换[4],1995—2020年库区建设用地面积增幅超8倍[5],这一进程引发了系列生态危机。三峡工程蓄水与快速城镇化的叠加效应,使库区动植物生境面临更大压力,野生动物栖息地呈现退化趋势[6]。此外,人工调控改变了库区生态系统服务的供给格局和过程,对生物多样性存在潜在干扰[7]。同时,建设用地的扩张导致森林和草原被侵占,造成生态功能衰退和自然资源短缺[8-9],生态安全屏障的有效构建面临极大困难[10]。这些变化不仅威胁到自然保护地的完整性,对区域生物多样性造成潜在负面影响[11],也直接威胁区域生态安全和可持续发展[12]。为应对上述挑战,库区已实施了生态屏障带建设、矿山复绿等系列生态保护与修复工程[13],然而面对复合型生态压力,传统点状工程修复已难以应对系统性退化[14],亟需从城市尺度整合生态过程和生态功能,实现生态空间系统性修复[15]。生态网络通过识别关键要素来有效控制生态环境问题,是促进生物多样性保护和区域生态安全发展的关键措施[16]。近年来生态网络构建已成为生态安全格局与生态修复的研究热点。

生态网络(ecological network,EN)是保障生态过程、维护生态安全、提升生态系统服务的有效途径[17],也是实现整体性生态修复的空间框架基础。国土空间规划背景下,基于景观生态学理论的“源地提取-廊道识别-网络构建”方法已成为生态网络识别与构建的主流范式[18],通过构建生态网络能够将以上各类关键景观进行叠加组合,识别要素之间的相

收稿日期:2025-06-12
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3906703);国家自然科学基金项目(72174158;72474164);2024年度湖北省自然资源科技项目(ZRZY2024KJ26);2023年度湖北省建设科技计划项目(2023045)
闫璐雨,E-mail:2573009424@qq.com
通信作者:周燕,E-mail:joyeezhou@whu.edu.cn

互关系[19]。区域生态网络将生态学理论、方法、经验与实际生态保护修复工作紧密相连，为生境质量保护提供了直接且有力的支持。生境质量是区域生态安全的基础和生态系统健康评价的重要指标[20]。生境作为生物赖以生存的场所，其质量反映了一段时期内自然环境为生物生存繁衍创造合适条件的能力[21]，一定程度上可以表征区域生物多样性水平[22]。研究长时序下生态网络要素和生境质量的动态变化，有助于揭示人类活动与自然因素对生态系统结构与功能的长期累积影响[23]，识别生态网络结构的关键薄弱环节和生境质量持续退化的热点区域，为生态保护和修复提供更准确的科学依据和决策支持。对于三峡库区等生态脆弱区而言，此类热点区域正是生态修复的优先实施空间[24]。基于生态网络识别低质源地、断裂廊道等退化关键节点，通过生态保护红线边界优化实施生境扩增与连通性恢复[25]，可显著提升修复效能。

重庆市于2016年完成了生态保护红线划定[26]。然而目前生态红线划定方法往往聚焦于单因子的纵向叠加，忽视了生物信息的横向流动[27]，导致修复目标与生态过程脱节，难以精准支撑退化生境的精细化和系统性修复。因此，有必要将生境质量动态和生态网络结构纳入生态红线优化中，提升红线区域的生态韧性和生态功能完整性。近年来随着城市建设用地进一步扩张，景观连通性遭到了不同程度的破坏[28]，部分红线区域内也存在高强度开发建设情况，给库区城市生态修复带来更大的困难[29]。因此，本研究以保护和修复库区城市生态安全为目的，探索2000—2020年生态要素的时空变化特征并针对性地提出生态保护红线优化策略，以期为库区城市生态保护实践提供有价值的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市忠县是三峡工程移民搬迁重点县，地处长江上游的三峡库区腹心地带，位于30°03′～30°35′N、107°32′～108°14′E。研究区总面积为2 182.84 km²，境内呈“三山两槽”，地形较为破碎崎岖。长江穿越该区域东南部，野生动植物资源较为丰富。三峡水库最终建成蓄水后，长江干流忠县河段的水位由117.5 m抬升至175.3 m，共淹没县域内陆地53.7 km²、城镇9座、交通线路93.6 km。

1.2 研究方法

立足于库区城市生态安全，从空间格局和生态功能2个维度探索重庆市忠县2000—2020年的生态要素时空变化特征。首先基于形态学空间格局分析（morphological spatial pattern analysis，MSPA）方法和电路理论构建生态网络，以“斑块-廊道-基质”景观格局理论为基础分析网络要素的时空特征；同时聚焦区域生物多样性，利用生态系统服务和权衡的综合评估（integrated valuation of ecosystem services and trade-offs，InVEST）模型评价生境质量水平的时空变化。进一步探索生态网络和生境质量的耦合关系，最终落位于空间规划实践，明确区域功能特征及重要性等级（图1）。

1）数据来源与预处理。所用数据主要包括研究区2000、2010、2020年3期土地利用数据、NDVI、DEM和路网数据等（表1）。利用ArcGIS 10.8平台统一处理多源数据，使用中国等积圆锥投影（Albers_Conic_Equal_Area）和世界级地理坐标系（CGS_WGS_1984）。利用重采样工具将NDVI数据的分辨率统一为30 m；将研究区行政边界作为掩膜提取用地类型、高程、NDVI等数据；利用表面分析工具处理DEM获取坡度数据。

2）基于MSPA和景观连接度分析识别生态源地。MSPA方法在生态网络构建方面被广泛应用，强调对区域内重要源地景观连通性的关注。首先基于研究区的用地类型，提取出林地、灌木、草地、水体等4种景观类型作为前景，同时定义这4类空间为生态空间；其他景观类型作为背景。利用Guidos Toolbox软件设置斑块边缘宽度为60 m，邻域分析采用八邻规则[30]，将前景分为核心区、岛状斑块、桥接区、环道区、支线、孔隙和边缘区等互不重叠的7类景观。

基于景观生态学理论，斑块的连接度和面积对生态功能存在很大影响[31]。过于破碎的斑块难以作为生物安全可靠的栖息地，大面积斑块则能够包容更多的物种，因此，从核心区中筛选面积大于1 km²的斑块并利用Conefor 2.6软件计算景观连通性。设置最大连通距离为1 000 m，连通概率为0.5。筛选可能连通性（PC）大于0.05的斑块作为生态源地。综合核心区斑块面积和整体连通性，以0.5为阈值划分一级源地和二级源地。

3）构建综合阻力面。生态空间中物种迁移或能量流动往往会受到自然、社会等多种因素的影响，即

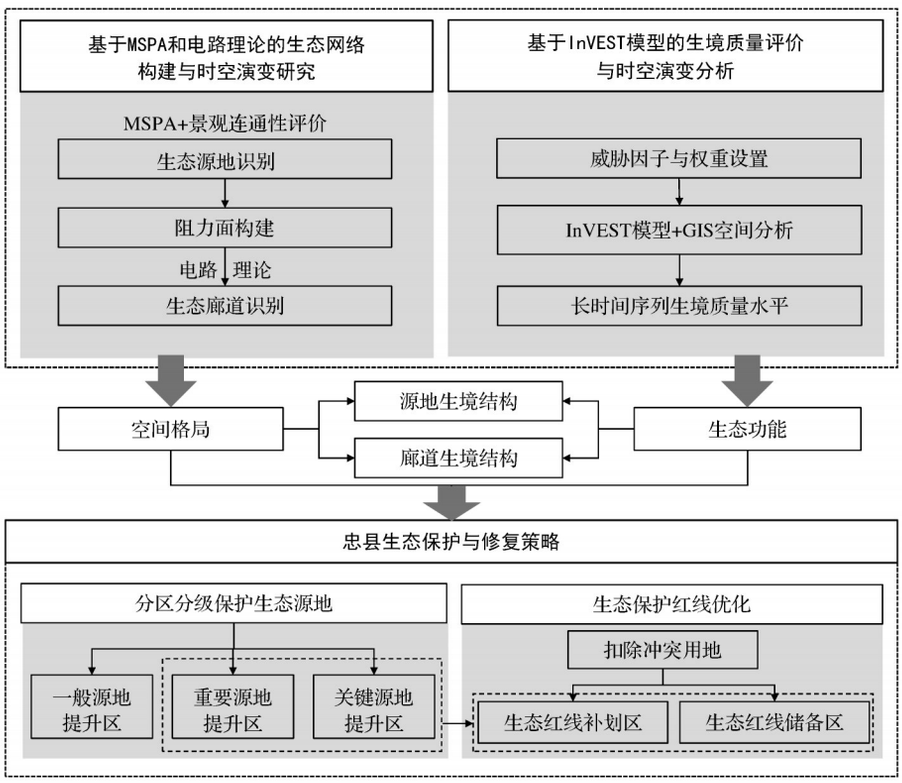


图 1　技术路线

Fig.1　Technical route

表 1　数据概况

Table 1　Overview of data

数据内容 Data content	数据来源 Data source	分辨率/m Resolution
土地利用类型 Land use type	地理空间数据云 Geospatial Data Cloud	30
数字高程模型 DEM	地理空间数据云 Geospatial Data Cloud	30
交通路网 Road network	全国地理信息资源目录服务系统 National Geographic Information Resources Directory Service System	—
归一化植被指数 NDVI	美国国家航空航天局 NASA	1 000
气温 Temperature	国家青藏高原科学数据中心 National Tibetan Plateau Data Center	—
降水量 Precipitation	国家青藏高原科学数据中心 National Tibetan Plateau Data Center	—
人口密度 Population density	中科院资源与环境科学与数据中心 Resource and Environment Data Center, CAS	1 000
国内生产总值 GDP	中科院资源与环境科学与数据中心 Resource and Environment Data Center, CAS	1 000

景观阻力。结合研究区实际和数据可得性，选取高程、坡度、土地利用类型和归一化植被指数作为阻力因子。采用五级制赋予不同的阻力值和权重[32]（表2），并按照自然断点分级法将研究区分为低阻力区、较低阻力区、中阻力区和高阻力区。

4）基于电路理论提取生态廊道。生态廊道是物种迁移和能量流动的重要路径，为物种交流提供有利的生态条件。自然界生物的迁移行为往往呈现出随机性，与电荷在导体中的流动存在一定的相似性。因此，电路理论可以较为有效地模拟生态流的随机性特点，评估区域生态流动的整体状态[33]。利用Linkage Mapper工具箱的All-to-one模式识别区域内潜在廊道，设置最大廊道宽度为500 m。借助Centrality Mapper工具计算辐射度和中心度[34]并以0.3为阈值将生态廊道分为3级。

5）基于InVEST模型评价生境质量。InVEST模型的生境质量（habitat quality，HQ）模块利用每种威胁的相对影响、各类生境对特定威胁的敏感程度

表2 生态阻力值及权重

Table 2 Values and weights of ecological resistance

阻力因子 Resistance factor	阻力值 Resistance value					权重 Weight
	1	2	3	4	5	
土地利用类型 Land use type	林地、灌木 Forest, shrub	草地、水域 Grassland, water	耕地 Cropland	—	建设用地 Construction land	0.65
归一化植被指数 NDVI	≥0.80	0.70～0.80	0.60～0.70	0.50～0.60	<0.50	0.15
高程/m DEM	<250	250～400	400～550	550～800	≥800	0.05
坡度/(°) Slope	<8	8～15	15～25	25～35	≥35	0.15

以及生境与威胁源之间的距离等因素，综合分析用地结构和生境质量威胁因子的信息并生成生境质量分布图。模型设定生境质量较高的区域能够更好地促进生境质量发展，生境质量下降直接反映出生境质量的可持续性和自我恢复能力减弱[35]。确定耕地、建设用地和交通路网作为威胁因子(表3)，结合相关研究确定各类用地的生境适宜度和对威胁因子敏感程度(表4)。按照相等间隔将生境质量评价结果分为差(0～0.2)、较差(0.2～0.4)、中等(0.4～0.6)、良好(0.6～0.8)、优等(0.8～1)5个等级。将生态源地分别与总体生境质量和生境优良区进行叠置分析得到源地的生境结构分布；将电流密度廊道与生境质量叠置分析得到廊道的生境结构分布，提取电流密度廊道覆盖的生境优良区进行渔网分析得到高生境廊道的分布特征。

表3 威胁因子参数

Table 3 Parameters of threat factors

威胁因子 Threat factor	最大影响距离/km Maximum	权重 Weight	衰减类型 Attenuation type
耕地 Cropland	3	0.4	线性Linear
建设用地 Construction land	6	0.9	指数Exponential
交通路网 Road network	2	0.8	线性 Linear

表4 各类用地的生境适宜性及对威胁因子敏感程度

Table 4 Habitat suitability of various land use types and their sensitivity to threatening factors

用地类型 Land use type	生境适宜度 Habitat suitability	威胁源 Threat source		
		耕地 Cropland	建设用地 Construction land	路网 Road network
耕地 Cropland	0.3	0.3	0.5	0.4
林地 Forest	1	0.6	0.8	0.7
灌木 Shrub	0.5	0.6	0.7	0.5
草地 Grassland	0.7	0.5	0.7	0.4
水域 Water	1	0.7	0.9	0.6
建设用地 Construction land	0	0	0	0

2 结果与分析

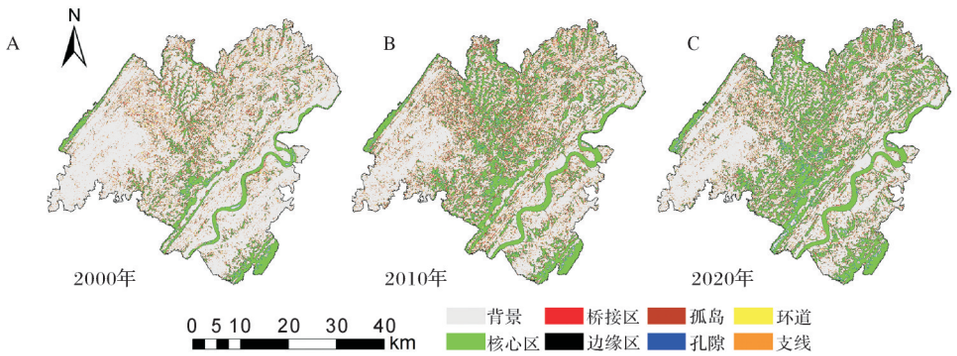
2.1 生态用地时空演变特征

1)景观生态格局。2000年、2010年、2020年3期生态空间面积分别为545.32、891.27、933.35 km^2，分别占研究区总面积的24.98%、40.83%、42.76%。根据MSPA分析结果，核心区在生态空间中占比最大，集中连片的核心区斑块主要位于研究区西部边界的金华山、中部的天池山、东南部的长江水域以及东南部行政边界的石子乡。除长江水域外，其余斑块主要为山地林区，平面布局与山体走向类似，多呈现为楔状空间(图2)。研究区西部和东部长江两侧核心区斑块较少。3期桥接区占比分别为6.31%、7.17%、4.48%，环道占比分别为2.02%、2.56%、2.11%，呈现先升后降的变化趋势。3期支线占比分别为12.73%、10.14%、7.46%，孤岛的面积占比分别为11.87%、5.07%、3.54%，呈持续下降趋势。边缘区在生态空间中占比稳定在23%以上。

2)生态保护红线。将现状红线与2020年土地利用类型叠置分析(表5)，结果表明红线内仍然存在耕地和建设用地等高强度开发的用地，冲突面积为22.57 km^2，占红线总面积的15.33%，严重影响了红线划定的科学性和准确度，不利于后期开展生态空间的系统性保护。

2.2 生态网络时空演变特征

1)生态源地。2000年、2010年、2020年3期各提取出12、36、48个源地，主要由林地和水域组成(表6)。一级源地位于研究区东南部及西部、北部边界，2010年后整体位置没有明显改变(图3A)。2009年三峡水库完成最后一期蓄水，长江水位上升导致江



A：2000年 In 2000；B：2010年 In 2010；C：2020年 In 2020.

图2　MSPA分析结果

Fig.2　MSPA analysis results

内部分已建设孤岛和两岸建设用地被淹没，忠县境内水域面积共扩张了 20.98 km²，长江水域因此成为2000—2010年间最大的生态源地；2010—2020年研究区南部的天池山与中部临近的源地斑块整合成为最大的生态源地，面积为 66.04 km²，占 2020 年源地总面积的 18.81%。二级源地斑块主要位于研究区北部和东北部，以林地为主，说明在此期间林地的扩张对源地的数量和空间分布影响最为显著[36]。研究区西部大片耕地区域和长江两岸人口密集区域无源地分布。2000—2010年研究区北部源地数量和面积显著增加，中部一级源地有明显扩张，但源地的最小面积和平均面积却呈下降趋势；2010—2020年东北部和西南部发展了许多二级源地，斑块的最大、最小面积和平均面积均趋于稳定。

表5　生态保护红线范围内用地构成

Table 5　Land use composition within the ecological protection redline area

用地类型 Land use type	耕地 Cropland	林地 Forest	灌木 Shrub	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land
面积/km² Area	22.50	113.75	0.05	0.01	10.91	0.07
占红线总面积比例/% Proportion of total red line area	15.28	77.23	0.03	0.00	7.41	0.05

表6　生态源地参数

Table 6　Parameters of ecological sources

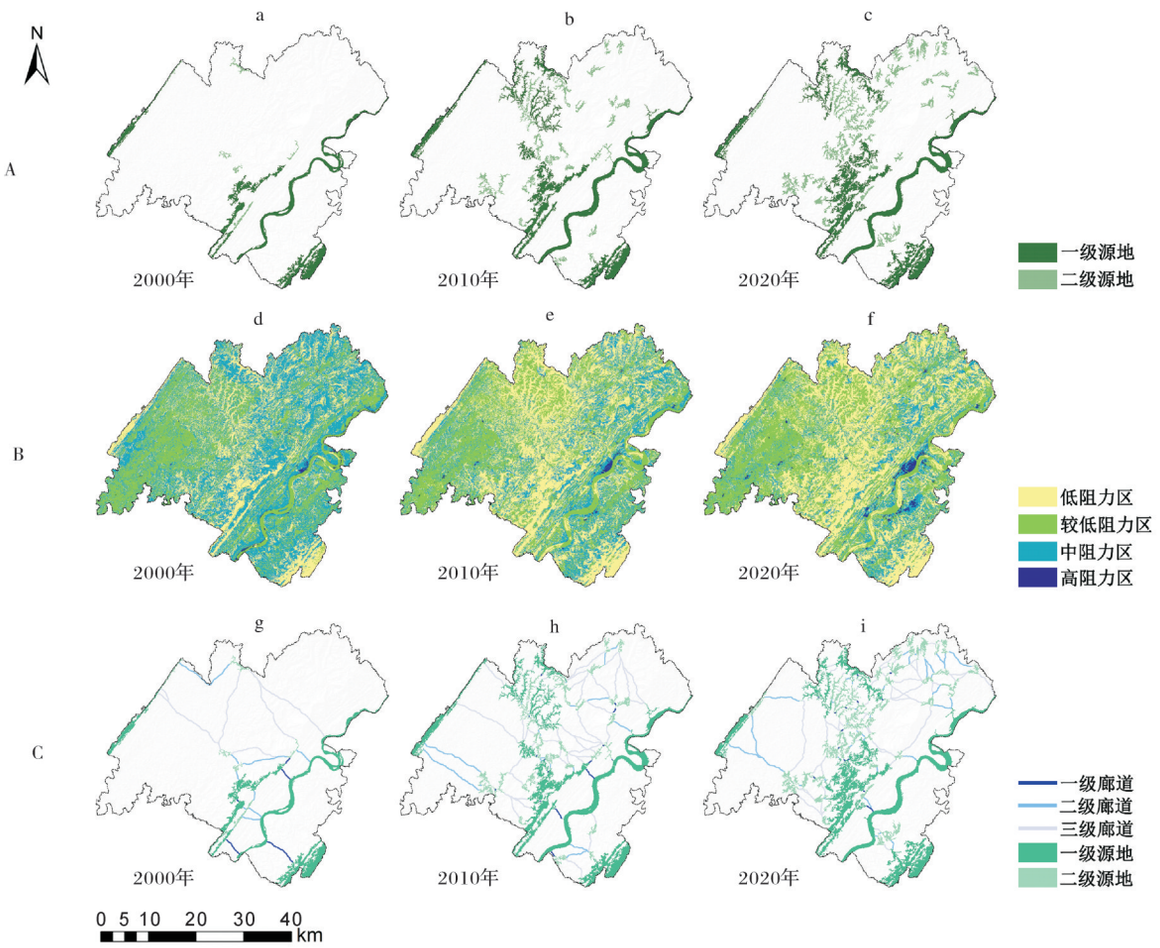
年份 Year	数量/个 Number	总面积/km² Total	最大斑块面积/km² Maximum	最小斑块面积/km² Minimum	平均面积/km² Average
2000	12	131.13	44.76	1.26	10.93
2010	36	278.75	65.75	1.00	7.74
2020	48	351.03	66.04	1.07	7.31

2）生态阻力。低阻力区位于研究区中部、西部和东南部山区（图3B）。中阻力区主要位于研究区西部和长江两侧。高阻力区主要位于中心城区。以西北-东南方向为切面，研究区内阻力由西到东呈现“低-高-低-高-低”的分布状态。研究区3期的平均阻力值分别为2.40、2.20、2.15，呈持续下降趋势。中阻力区整体情况持续改善。与整体趋势不同，高阻力区在20年间的面积演变呈现为先减小后增大。

3）生态廊道。生态廊道总体呈现北密南疏、东密西疏的树网状结构（图3C）。研究区东北部廊道互相交叉现象较明显。最长的廊道位于西部源地稀少的区域。3期分别提取生态廊道23、82、112条，总长度分别为191.55、314.94、292.99 km。总体数量不断上升（表7）。2000—2010年廊道整体向外扩张；2010—2020年廊道重心向东北部偏移，廊道平均长度下降，总长度小幅度下降。

2.3　生境质量时空演变特征

1）区域生境质量水平。研究区生境质量呈现出中部高、东西低的空间分布特征（图4A）。优等生境主要位于研究区中部、西北部和东南部。生境为差的区域主要围绕长江两岸中心城区分布，研究区西部耕地和北部交通干道附近也有零星分布。研究区



A：生态源地 Ecological sources；B：阻力面 Resistance surfaces；C：生态网络 Ecological networks. a：2000年 In 2000；b：2010年 In 2010；c：2020年 In 2020；d：2000年 In 2000；e：2010年 In 2010；f：2020年 In 2020；g：2000年 In 2000；h：2010年 In 2010；i：2020年 In 2020.

图3 生态源地（A）、阻力面（B）及生态网络（C）识别结果

Fig.3 Identification results of ecological sources（A），resistance surfaces（B） and ecological networks（C）

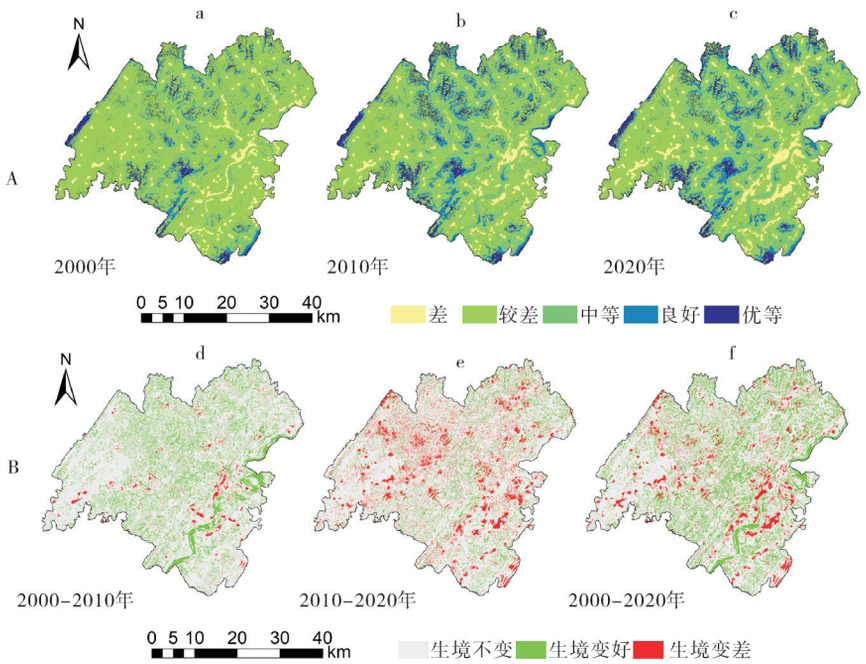
表7 生态廊道参数

Table 7 Parameters of ecological corridors

年份 Year	数量/个 Number	总长度/km Total	最大长度/km Maximum	最小长度/km Minimum	平均长度/km Average
2000	23	191.55	25.29	0.09	8.33
2010	82	314.94	18.27	0.04	3.84
2020	112	292.99	19.61	0.07	2.62

3期的平均生境质量指数分别为0.331 1、0.384 1和0.381 6，呈先上升后小幅下降的趋势，整体生境质量较差。计算得到生境质量等级变化的占比和空间分布（图4B）。2000—2010年研究区内16.82%的生境空间质量变好，集中于长江水域和研究区中部及北部斑块，生境质量“较差”的区域面积减小，生境质量指数上升了16%。2010—2020年研究区内10.71%的生境变差，集中位于长江两侧和研究区西部大量斑块；虽然中部约7.53%零散斑块生境变好，但生境质量指数略有降低。

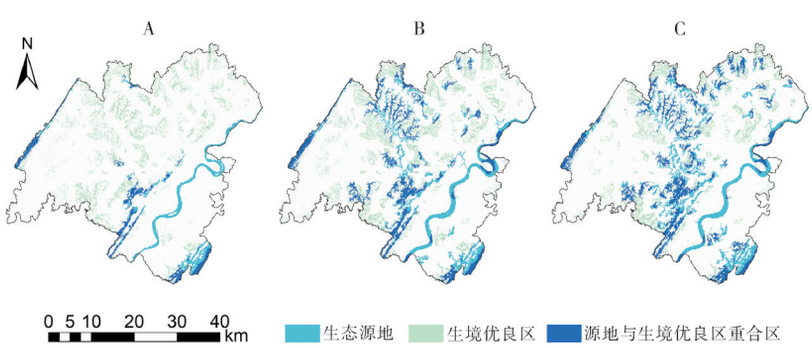
2）源地生境结构。3期源地的生境质量指数平均值分别为0.582 5、0.621 3、0.609 3，达到“良好”等级且均高于研究区平均水平，总体呈现上升优化趋势，2010—2020年略有下降。生态源地与生境优良区3期的空间重合率分别为40.91%、50.80%、49.97%（图5）。二者重合区域主要分布于研究区西部边界、中部林区和东南部小片林区，该片区域景观连通性较好，斑块对生态流的阻碍作用极低，适宜生物生存和迁移，生物多样性长期保持较高水平。其他生物多样性高值区主要分布于研究区北部林地，自身生境适宜性高，远离耕地和建设用地，受道路交通影响小，但斑块零散破碎，难以为生物提供安全的



A：生境质量分区 Zoning of habitat quality；B：生境质量变化与分布 Change and distribution of habitat quality. a：2000 年 In 2000；b：2010 年 In 2010；c：2020 年 In 2020；d：2000—2010 年 Form 2000 to 2010；e：2010—2020 年 Form 2010 to 2020；f：2000—2020 年 Form 2000 to 2020.

图 4　生境质量分区及其变化与分布

Fig.4　Zoning，change and distribution of habitat quality



A：2000 年 In 2000；B：2010 年 In 2010；C：2020 年 In 2020.

图 5　生态源地与生境优良区分布

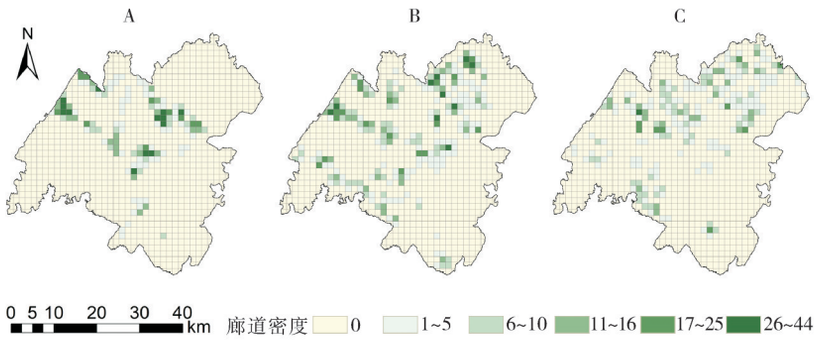
Fig.5　Distribution of ecological sources and high-quality habitat areas

栖息环境；其他重要源地主要分布于东南部林地和长江水域，面积广阔且景观连通性更高。

3）廊道生境结构。3 期廊道覆盖区域生境质量指数平均值分别为 0.370 6、0.389 6、0.375 8，生境优等区占比分别为 4.54%、4.96%、3.60%，均呈先升高后降低趋势。生态廊道覆盖生境优良区主要分布于忠县北部（图 6），忠县东南部、中南部和西部山区由于自身生境质量较高且山体延伸性较好，因此廊道密度较低。2000 年总体生境水平较低，高生境廊道集中于研究区中部；2010 年廊道数量和整体生境质量均有所提高，高生境廊道分布区域向西南部和东北部扩张；2020 年高值区重心向北部迁移，受整体生境水平下降的影响，廊道数量虽然有所增加但整体高生境廊道的分布密度却有所降低。

2.4　生态保护与修复策略

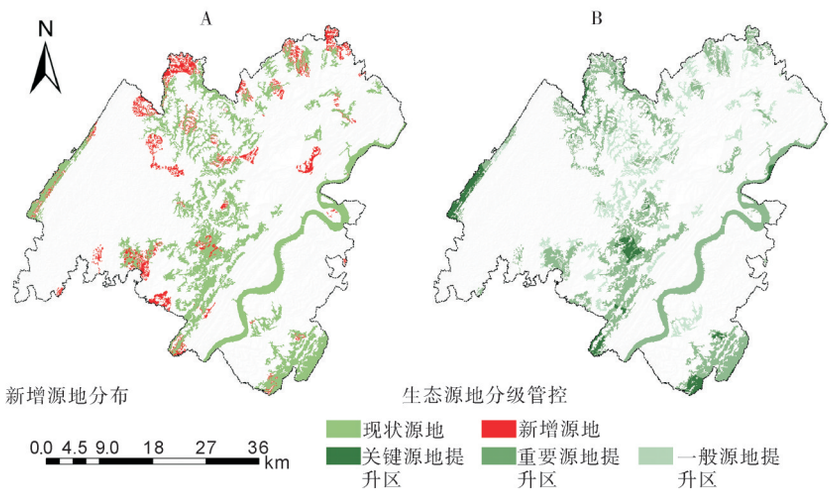
将生境质量高值区与 2020 年生态源地叠加，并将重合区域划定为关键源地提升区，其他生境质量高值区和一级源地为重要源地提升区，二级源地为一般源地提升区（图 7）。现状红线和优化后源地面积分别为 147.29 和 418.10 km^2，二者空间重合率为 64.91%（图 8）。关键源地主要分布于天池山、金华山和长江沿线等高生境质量区。这些区域应划为红线



A:2000年 In 2000; B:2010年 In 2010;C:2020年 In 2020.

图6 高生境廊道渔网分析结果

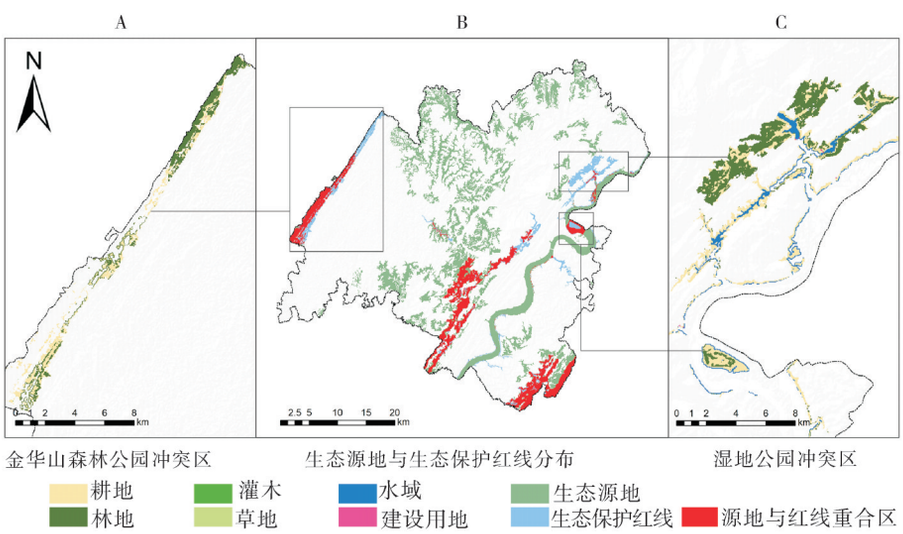
Fig.6 Results of fishnet analysis for high habitat corridors



A:新增源地分布 Distribution of newly added sources;B:生态源地分级管控 Tiered control of ecological source areas.

图7 优化后的生态源地分布

Fig.7 Distribution of optimized ecological sources



A:金华山森林公园冲突区 Jinhuashan Forest Park conflict zone;B:生态源地与生态保护红线分布 Distribution of ecological source areas and ecological protection red lines;C:湿地公园冲突区 Wetland park conflict zone.

图8 生态源地与生态保护红线叠加对比结果

Fig.8 Overlay comparison results of ecological sources and ecological protection redline

保护的核心区，禁止任何形式的开发活动，以保护濒危物种栖息地和关键生态服务功能。建议首先从生态保护红线中扣除 22.57 km²的冲突用地，在关键源地中择优选择区域补齐空缺，保证红线优化之后其生态面积不减少、生态性质不改变、生态功能不衰退[37]。优化后的生态保护红线如图 9 所示，调整后生态保护红线面积为 124.72 km²，结合斑块空间分布、斑块面积、斑块景观连通性和生物多样性水平，将剩余关键源地提升区和部分重要源地提升区设为生态红线补划区[38]，面积共 125.57 km²；将剩余重要源地提升区设为生态红线储备区，面积共 189.81 km²。补划区面积和生态质量远高于 22.57 km²的补划需求，可以由地方政府根据社会经济和生态保护实际情况决定具体的划线区域[39]。同时建议参考源地斑块的分级，对红线范围内的土地同样采用分区分级管控措施，从而节约成本、提高保护效率。

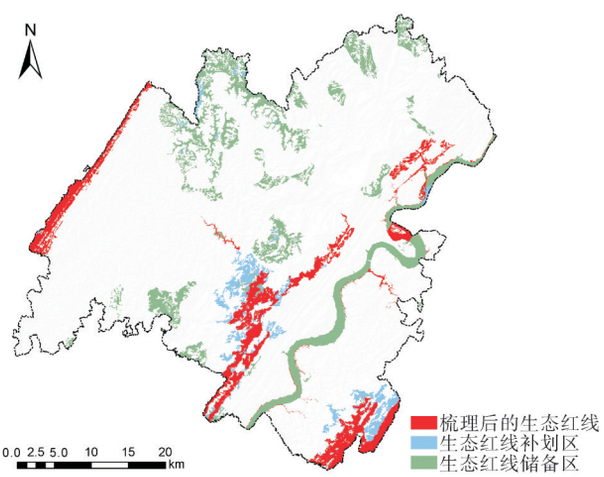


图 9　生态保护红线优化结果

Fig.9　Optimization results of ecological protection redline

3　讨　论

忠县生态网络与生境质量的时空变化反映了空间格局与生态功能的强耦合关系。这种关系在不同时间阶段表现出显著的动态特征和规律。2000—2010 年间，退耕还林工程显著提升了中部和东南部林地的生态质量，使生态源地逐步扩展并形成集群，尤其是在天池山、金华山和石子乡等区域。研究表明，这一时期生态廊道延伸性增强，区域连通性显著提升。类似的研究也显示，生境质量提升和网络连通性增强在区域生态系统功能优化中发挥了关键作用[40]。2010—2020 年间，忠县生态系统呈现出城市化效应与生态保护措施并存的特征。一方面，林地扩张进一步强化了中南部区域生态源地的规模和连通性，促进了最大生态源地的形成；另一方面，中心城区的快速扩张显著增加了高阻力区面积，降低了部分廊道的连通性和生境质量。电路理论分析结果显示，廊道的空间分布受生境质量强烈影响，尤其是在建设用地扩张的区域。生境质量的波动趋势与生态网络要素的动态变化一致，进一步验证了生境质量与连通性之间的协同作用[41]。研究区 3 期生态网络整体连接度分别为 60.82、89.34、109.45，与生境质量指数的皮尔逊相关系数为 0.893 4，表明两者存在一定的线性相关性，其中源地的局部连通性指数 dIIC 对平均生境质量水平影响最大。这些结果表明，生境质量和生态网络的连通性密切相关[42]，二者在时空上的协同互动对生态功能的维护至关重要。需指出的是，当前样本量不足以解析更复杂的驱动机制，未来需构建更精细的长时序面板数据集，进一步研究格局与功能之间的耦合关系。

生态要素流动更多受地理单元的影响而非行政边界的限制，因此在未来研究中考虑将县域外的临近区域也纳入研究区范围。当前研究聚焦空间优化方案，尚未整合政策落地机制、资金可持续性评估、土地权属与多方利益博弈等实操维度，未来研究中需要结合社会经济发展需求验证该治理路径的现实可行性。本研究的红线优化策略建立在生态保护优先情景下，侧重于提升区域景观连通性和生物多样性，未来应考虑经济发展优先、耕地保护优先等多目标、多情景下的优化方法。此外，受限于忠县典型库区城市的特性，该优化方案在不同政策背景区域的适用性需进一步验证，未来可开展多案例对比研究，总结适应不同发展阶段和不同区域特征的弹性优化准则。

本研究以三峡库区城市重庆市忠县为例，从空间格局和生态功能 2 个层面，综合运用 MSPA、景观连通性分析、电路理论、InVEST 模型等方法识别了忠县 2000 年、2010 年和 2020 年的生态网络与生境质量时空变化特征和发展趋势。探索兼顾网络连通性与生物多样性的生态红线优化路径，为库区城市的生态保护和修复提供了新的研究视角。研究表明，2000—2020 年忠县生态网络规模显著扩张，连通性整体改善，生境质量有所提升，但源地破碎化趋势、廊道稳定性降低及局部生境压力增大仍需持续关注。受用地结构变化主导，生态网络结构与生境质

量之间呈现显著的空间协同和动态关联。据此本研究提出源地分区管控策略，以及生态保护红线的边界优化和补划储备的调整方案，旨在通过强化关键源地、提升网络连通性、预留发展空间来提升忠县整体生态安全水平。

研究将生态网络分析与生境质量评估结合，深化了对库区山地城市“格局-过程-功能”耦合关系的认知，为红线优化提供了精细化依据。补划区及储备区等概念的提出为协调严格保护与未来绿色发展提供了弹性空间，是应对库区复杂人地关系的适应性策略，为忠县精准化生态管控与修复提供了直接支持，其方法框架对其他库区城市生态修复与建设开发工作也具有一定的参考价值。

参考文献 References

[1] 王兆林，张露洋，钟澈懿，等.三峡库区生态空间脆弱性时空演变特征[J].水土保持研究，2023，30(1)：348-355.WANG Z L，ZHANG L Y，ZHONG W Y，et al.Temporal and spatial evolution characteristics of ecological space vulnerability in Three Gorges Reservoir Area[J].Research of soil and water conservation，2023，30(1)：348-355(in Chinese with English abstract).

[2] ARIF M，LI C X.Impacts of environmental literacy on ecological networks in the Three Gorges Reservoir，China[J/OL].Ecological indicators，2022，145：109571[2025-06-12].https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109571.

[3] 赵伟，骆佳玲.三峡库区城镇化与生态韧性耦合协调的时空格局演变分析[J].长江流域资源与环境，2024，33(9)：1888-1904.ZHAO W，LUO J L.Spatial-temporal pattern evolution of the coupling and coordination of urbanization and ecological resilience in the Three Gorges Reservoir Area[J].Resources and environment in the Yangtze Basin，2024，33(9)：1888-1904(in Chinese with English abstract).

[4] 李彤，贾宝全，刘文瑞，等.宜昌市生态安全网络要素时空动态及其影响因素[J].生态学报，2023，43(15)：6154-6169.LI T，JIA B Q，LIU W R，et al.Spatio-temporal dynamics and influencing factors of ecological security network elements in Yichang，Hubei Province[J].Acta ecologica sinica，2023，43(15)：6154-6169(in Chinese with English abstract).

[5] AN H，XIAO W D，HUANG J.Relationship of construction land expansion and ecological environment changes in the Three Gorges Reservoir Area of China[J/OL].Ecological indicators，2023，157：111209[2025-06-12].https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111209.

[6] 陆一鸣，李哲，鲁伦慧，等.三峡水库消落带土壤有机碳对人类活动的响应[J].人民长江，2025，56(6)：15-23.LU Y M，LI Z，LU L H，et al.Response of soil organic carbon in riparian zone of Three Gorges Reservoir to anthropogenic activities[J].Yangtze river，2025，56(6)：15-23(in Chinese with English abstract).

[7] YAN Z Y，WANG Y Q，WANG Z，et al.Spatiotemporal analysis of landscape ecological risk and driving factors：a case study in the Three Gorges Reservoir Aarea，China[J/OL].Remote sensing，2023，15(19)：4884[2025-06-12].https://doi.org/10.3390/rs15194884.

[8] ZHU D Y，CHEN T，WANG Z W，et al.Detecting ecological spatial-temporal changes by Remote Sensing Ecological Index with local adaptability[J/OL].Journal of environmental management，2021，299：113655[2025-06-12].https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113655.

[9] TAN S K，LIU Q，HAN S Y.Spatial-temporal evolution of coupling relationship between land development intensity and resources environment carrying capacity in China[J/OL].Journal of environmental management，2022，301：113778[2025-06-12].https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113778.

[10] 李涛，唐涛，邓红兵，等.湖北省三峡地区山水林田湖草系统原理及生态保护修复研究[J].生态学报，2019，39(23)：8896-8902.LI T，TANG T，DENG H B，et al.Ecological theory and restoration practices of the mountain-river-forest-farmland-lake-grasslands system in the Three Gorges Area of Hubei Province[J].Acta ecologica sinica，2019，39(23)：8896-8902(in Chinese with English abstract).

[11] 李海生，杨鹊平，赵艳民.聚焦水生态环境突出问题，持续推进长江生态保护修复[J].环境工程技术学报，2022，12(2)：336-347.LI H S，YANG Q P，ZHAO Y M.Focusing on water eco-environment problems and sustainably promoting ecological conservation and restoration of the Yangtze River[J].Journal of environmental engineering technology，2022，12(2)：336-347(in Chinese with English abstract).

[12] 刘华斌，杨梅，李宝勇，等.基于生态安全的城市绿色廊道系统规划研究：以南昌市为例[J].中国园林，2020，36(4)：122-127.LIU H B，YANG M，LI B Y，et al.Urban green corridor system planning based on ecological security：taking Nanchang City as the example[J].Chinese landscape architecture，2020，36(4)：122-127(in Chinese with English abstract).

[13] HUANG C B，HUANG X，PENG C H，et al.Land use/cover change in the Three Gorges Reservoir Area，China：reconciling the land use conflicts between development and protection[J].CATENA，2019，175：388-399.

[14] 殷利华，赵程亚菲，彭楚月，等.基于三生功能融合的露天生产矿山生态修复景观模式研究：以黄石铜山口矿山为例[J].华中农业大学学报，2024，43(6)：182-190.YIN L H，ZHAO C Y F，PENG C Y，et al.Research on ecological restoration

landscape models for open-pit mines based on integration of production-living-ecological function: a case study of Tongshankou Mine in Huangshi, Hubei Province, China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(6): 182-190 (in Chinese with English abstract).

[15] 勾蒙蒙,刘常富,王云琦,等.三峡库区生态屏障区近自然生态修复与生态安全保障[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(6):9-16.GOU M M, LIU C F, WANG Y Q, et al. Near-natural ecological restoration and ecological security guarantee in the ecological barrier area of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Science of soil and water conservation, 2025,23(6):9-16(in Chinese with English abstract).

[16] 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(in Chinese with English abstract).

[17] 胡西武,贾天朝.基于生态敏感性与景观连通性的三江源国家公园生态安全格局构建与优化[J].长江流域资源与环境,2023,32(8):1724-1735.HU X W, JIA T C. Construction and optimization of ecological security pattern in Three-River-Source National Park based on ecological sensitivity and landscape connectivity[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(8): 1724-1735(in Chinese with English abstract).

[18] MA J F, LI L, JIAO L M, et al. Identifying ecological security patterns considering the stability of ecological sources in ecologically fragile areas[J/OL]. Land, 2024, 13(2): 214[2025-06-12]. https://doi.org/10.3390/land13020214.

[19] 李子豪,陈卉,万山霖,等.基于复杂网络理论的区域生态空间网络格局及稳定性测度:以长三角地区为例[J].中国城市林业,2021,19(5):1-8.LI Z H, CHEN H, WAN S L, et al. Spatial pattern and stability measurement of regional ecological space network based on complex network theory: a case study of Yangtze River Delta[J]. Journal of Chinese urban forestry, 2021, 19(5): 1-8(in Chinese with English abstract).

[20] 李波,杜薇,贺萌,等.城市绿色空间生物多样性感知研究进展[J].中国城市林业,2025,23(2):42-48.LI B, DU W, HE M, et al. Research progress in biodiversity perception in urban green spaces[J]. Journal of Chinese urban forestry, 2025, 23(2):42-48(in Chinese with English abstract).

[21] 赖智勇,廖富强,舒晓波,等.赣江流域生境质量时空格局演化及预测研究[J].长江流域资源与环境,2024,33(10):2236-2250.LAI Z Y, LIAO F Q, SHU X B, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality in Ganjiang River Basin[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(10): 2236-2250(in Chinese with English abstract).

[22] 王琦,任斌斌,王月宾,等.北京城市绿地节肢动物多样性与微环境因子关系[J].华中农业大学学报,2024,43(6):161-170.WANG Q, REN B B, WANG Y B, et al. Relationship between diversity of arthropods and micro environmental factors in urban green spaces of Beijing[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(6): 161-170(in Chinese with English abstract).

[23] 周媛,陈明坤,黎贝,等.基于空间连通性动态变化的城市绿地生态网络优化[J].中国城市林业,2023,21(4):23-32.ZHOU Y, CHEN M K, LI B, et al. Optimization of urban green space ecological network based on dynamic change of spatial connectivity[J]. Journal of Chinese urban forestry, 2023,21(4):23-32(in Chinese with English abstract).

[24] 韩依纹,万明暄,方铁树,等.生态底线约束下的国土生态空间碳储量预测:以襄阳市为例[J].华中农业大学学报,2024,43(3):89-99.HAN Y W, WAN M X, FANG T S, et al. Predicting carbon storage of ecological space under constraints of ecological bottom line: taking Xiangyang City as an example[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(3):89-99(in Chinese with English abstract).

[25] 吴中全,王志章.基于治理视角的生态保护红线、生态补偿与农户生计困境[J].重庆大学学报(社会科学版),2020,26(5):230-243.WU Z Q, WANG Z Z. Red lines for ecological protection, ecological compensation, and difficulties for farmers' livelihoods: from the perspective of governance[J]. Journal of Chongqing University (social science edition), 2020, 26(5):230-243(in Chinese with English abstract).

[26] 马驰骋,杨东峰,李康康.基于电路理论的高原寒地县域生态网络构建[J].中国城市林业,2023,21(5):95-102.MA C C, YANG D F, LI K K. Construction of county ecological network in cold plateau county based on circuit theory[J]. Journal of Chinese urban forestry, 2023, 21(5): 95-102(in Chinese with English abstract).

[27] 官冬杰,殷博灵.重庆市渝东北生态红线区域生态环境质量评估[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(10):105-117.GUAN D J, YIN B L. Assessment of ecological environment quality of ecological red line area in northeast Chongqing[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2020, 39(10): 105-117(in Chinese with English abstract).

[28] 冯义龙,贺萌,李波,等.重庆主城区城市生态网络构建与优化[J].生态环境学报,2025,34(5):699-709.FENG Y L, HE M, LI B, et al. Construction and optimization of urban ecological network in Chongqing main urban area[J]. Ecology and environmental sciences, 2025, 34(5): 699-709(in Chinese with

English abstract).

[29] 严军,陈晨.基于多生态安全格局的生态保护红线划定方法研究[J].生态科学,2023,42(2):100-110.YAN J,CHEN C.Research on delimiting ecological protection red line based on multiple ecological security patterns[J].Ecological science,2023,42(2):100-110(in Chinese with English abstract).

[30] 李波,贺萌,彭琳,等.基于林鸟迁移扩散的重庆市高密度城区生态网络构建研究[J].中国园林,2023,39(7):35-39.LI B,HE M,PENG L,et al.Research on the construction of ecological network in the high-density urban area of Chongqing based on the migration and diffusion of forest birds[J].Chinese landscape architecture,2023,39(7):35-39(in Chinese with English abstract).

[31] 陈利顶,吕一河,赵文武,等.区域生态学的特点、学科定位及其与相邻学科的关系[J].生态学报,2019,39(13):4593-4601.CHEN L D,LÜ Y H,ZHAO W W,et al.The characteristics and subject orientation of regional ecology and its relationship with the other subjects[J].Acta ecologica sinica,2019,39(13):4593-4601(in Chinese with English abstract).

[32] 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(in Chinese with English abstract).

[33] 沈钦炜,林美玲,莫惠萍,等.佛山市生态网络构建及优化[J].应用生态学报,2021,32(9):3288-3298.SHEN Q W,LIN M L,MO H P,et al.Ecological network construction and optimization in Foshan City,China[J].Chinese journal of applied ecology,2021,32(9):3288-3298(in Chinese with English abstract).

[34] 何夏萱,袁奇峰,曾悦,等.基于城市POIs大数据与电路理论的东莞市生态网络构建与评估[J].水土保持通报,2023,43(6):237-247.HE X X,YUAN Q F,ZENG Y,et al.Construction and evaluation of an ecological network for Dongguan City based on urban big data POIs and circuit theory[J].Bulletin of soil and water conservation,2023,43(6):237-247(in Chinese with English abstract).

[35] 朱丹丹,安睿,刘艳芳,等.湖北省生态系统服务协同权衡时空差异及归因分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(4):799-809.ZHU D D,AN R,LIU Y F,et al.Analysis of spatial-temporal difference in synergistic trade-offs of ecosystem services in Hubei Province[J].Resources and environment in the Yangtze Basin,2024,33(4):799-809(in Chinese with English abstract).

[36] 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(in Chinese with English abstract).

[37] 陈晓娟,杨寅群,朱迪,等.沅江流域生态环境保护体系研究[J].人民长江,2022,53(S2):11-14.CHEN X J,YANG Y Q,ZHU D,et al.Ecological environment protection system of Yuanjiang River Basin[J].Yangtze river,2022,53(S2):11-14(in Chinese with English abstract).

[38] 武力,刘慧莹,向超,等.基于SWAT的流域水环境控制单元划分及管控策略[J].人民长江,2022,53(10):14-21.WU L,LIU H Y,XIANG C,et al.Division and control strategy of watershed water environment control unit based on SWAT model[J].Yangtze river,2022,53(10):14-21(in Chinese with English abstract).

[39] 李怡,赵小敏,郭熙,等.基于InVEST和MCR模型的南方山地丘陵区生态保护红线优化[J].自然资源学报,2021,36(11):2980-2994.LI Y,ZHAO X M,GUO X,et al.Optimization of ecological red line in the hilly region of Southern China based on InVEST and MCR model[J].Journal of natural resources,2021,36(11):2980-2994(in Chinese with English abstract).

[40] 程辉,吴胜军,王小晓,等.三峡库区生态环境效应研究进展[J].中国生态农业学报,2015,23(2):127-140.CHENG H,WU S J,WANG X X,et al.Research progress on the effects of the Three Gorges Reservoir on the ecological environment[J].Chinese journal of eco-agriculture,2015,23(2):127-140(in Chinese with English abstract).

[41] 林东挺,吴大放.基于MSPA与电路理论的广州市生态网络构建[J].智能城市,2022,8(12):25-28.LIN D T,WU D F.Construction of Guangzhou ecological network based on MSPA and circuit theory[J].Intelligent city,2022,8(12):25-28(in Chinese with English abstract).

[42] 王海云,匡耀求,文薪荐,等.粤港澳大湾区生态网络构建及廊道优化[J].中国环境科学,2022,42(5):2289-2298.WANG H Y,KUANG Y Q,WEN X J,et al.Ecological network construction and corridor optimization in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J].China environmental science,2022,42(5):2289-2298(in Chinese with English abstract).

Characteristics of evolution and ecological restoration of ecological elements in counties in Three Gorges Reservoir Area

YAN Luyu[1], PAN Feifei[2], ZHOU Yan[1], LI Zhengtian[3]

1.*School of Urban Design/Hubei Human Settlement Environment Engineering Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China*;
2.*Changjiang Survey, Planning and Design Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China*;
3.*School of Environmental Arts, Hubei Institute of Fine Art, Wuhan 430205, China*

Abstract　The Three Gorges Reservoir Area (TGRA) serves as a crucial ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River and represents a typically ecology-sensitive region. Studying the dynamic characteristics of urban ecological elements in the reservoir area is of significant importance for maintaining ecological security and implementing ecological restoration in the region. The morphological spatial pattern analysis (MSPA), circuit theory, and the InVEST model were used to identify the ecological networks and quality of habitat in Zhongxian County, Chongqing Municipality in three periods from 2000 to 2020 to protect and restore the ecological security of cities in TGRA. The characteristics of spatiotemporal evolution of ecological elements in the reservoir area were studied and strategies for the targeted optimization of ecological protection redline (EPR) were proposed. The results showed that the overall ecological environment in Zhongxian County had a positive trend over time, with the number of ecological sources increasing from 12 to 48, the area growing from 131.13 km ^{2} to 351.03 km ^{2}, and the source area was densely distributed in the central region. The number of ecological corridors increased from 23 to 112, with the length of corridor increasing from 191.55 km to 314.94 km before fluctuating to 292.99 km, with a spatial distribution pattern of dense in the north and sparse in the south, and dense in the east and sparse in west. The index for the quality of habitat in the three periods was 0.331 1, 0.384 1, and 0.381 6, with an initial increase followed by a slight decrease, indicating an overall improvement in the quality of habitat. The quality of habitat in the central regions rich in forest resources was relatively high, while that on along both banks of the Yangtze River and in the central urban area was poorer. There was a synergistic coupling relationship between the spatial distribution and changes of elements in ecological networks and the quality of habitat, most significantly affected by changes in the structure of land use. A strategy for zoned management of ecological sources was implemented, alongside the optimization of EPR boundaries. After adjustment, the designated EPR area covers 124.72 km^2, with a compensation zone of 125.57 km^2 and a reserve zone of 189.81 km^2. It will provide a scientific reference for promoting the green development with high-quality in integrated urban-rural zones within the TGRA under the Yangtze River Conservation Initiative.

Keywords　ecological network; ecological restoration; ecological protection redline (EPR); quality of habitat; Three Gorges Reservoir Area (TGRA)

（责任编辑：陆文昌）