

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.012.

张海铃, 叶长盛, 胡梦姗. 基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复关键区域识别及修复策略[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 393-402.

ZHANG Hailing, YE Changsheng, HU Mengshan. Identification and Restoration Strategy of Key Areas of Ecological Restoration in Urban Agglomeration Around Poyang Lake Based on Ecological Security Pattern[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 393-402.

基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复 关键区域识别及修复策略

张海铃, 叶长盛, 胡梦姗

(东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013)

摘要:为维护生态系统的整体平衡及实现受损生态系统的可持续发展,以环鄱阳湖城市群为例,通过生态服务功能重要性和生态敏感性评价确定生态源地,运用最小累积阻力模型和电路理论提取生态廊道,基于“点—线—网”模式构建生态安全格局,通过识别网中的生态“夹点”、生态障碍点等,确定了环鄱阳湖城市群生态修复关键区域。结果表明:(1)环鄱阳湖城市群生态源地面积共 $1.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布在西部九岭山区、东南部武夷山区以及东北部怀玉山区等区域,地类以林地为主,生态廊道共364条,总长7 640.24 km,呈现中部稀疏、四周密集的空间特征;(2)基于生态安全格局构建,识别环鄱阳湖城市群生态保护修复关键区域包括31处生态“夹点”区域、23处生态障碍点区域,破碎空间面积6 053.39 km^2 。综上,源地和廊道的分布呈现东西部密集,中部稀疏的特征,借助生态安全格局和电路理论识别的“夹点”与障碍点更符合物种运动的真实规律,可见格局构建能够有效地识别生态修复关键区域。

关键词:生态安全格局;生态修复;最小累积阻力模型;电路理论

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0393-10

Identification and Restoration Strategy of Key Areas of Ecological Restoration in Urban Agglomeration Around Poyang Lake Based on Ecological Security Pattern

ZHANG Hailing, YE Changsheng, HU Mengshan

(East China University of Technology, College of Earth Sciences, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to maintain the overall balance of the ecosystem and realize the sustainable development of the damaged ecosystem, the urban agglomeration around Poyang Lake was taken as an example, the ecological source area was determined by evaluating the importance of ecological services and ecological sensitivity, the ecological corridor was extracted by using the minimum cumulative resistance model and circuit theory, and the ecological security pattern was constructed based on the ‘point-line-network’ model. The key areas of ecological restoration in urban agglomeration around Poyang Lake were determined by identifying ecological ‘pinch points’ and ecological obstacle points in the network. The results show that: (1) the ecological source area of Poyang Lake urban agglomeration covered a total area of $1.24 \times 10^4 \text{ km}^2$, mainly distributed in Jiuling Mountain area in the west, Wuyi Mountain area in the southeast and Huaiyu Mountain area in the northeast; the land type was mainly woodland; there were 364 ecological corridors with a total length of 7 640.24 km, showing the spatial characteristics of sparse in the middle and dense around; (2) based on the ecological security pattern, the key areas for ecological protection and restoration of urban agglomeration around Poyang Lake were identified as follows: 31 ecological ‘pinch point’ areas, 23 ecological obstacle point areas, with

收稿日期:2021-12-19

修回日期:2022-01-06

资助项目:国家自然科学基金“环鄱阳湖城市群城镇化生态风险综合评价与预警研究”(42061041)

第一作者:张海铃(1999—),女,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为土地利用变化与规划。E-mail:zhanghailing316@163.com

通信作者:叶长盛(1977—),男,江西临川人,博士,教授,主要从事城乡发展、土地资源利用与保护研究。E-mail:yes519@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

a broken space area of 6 053.39 km². To sum up, the distribution of source sites and corridors is characterized by dense eastern and western parts and sparseness in the middle. The ‘pinch points’ and obstacle points identified by the ecological security pattern and circuit theory are more in line with the real patterns of species movement. It can be seen that the pattern construction can effectively identify key areas for ecological restoration.

Keywords: ecological security pattern; ecological restoration; minimum cumulative resistance model; circuit theory

自工业革命以来,生产力水平得到显著提高,随着人类施加于自然的活动越来越剧烈,生态环境问题日益突出,国土空间生态修复迫在眉睫^[1]。从20世纪50年代的黄土高原水土流失治理^[2]到90年代的“退耕还林”政策等^[3],生态修复研究一直是我国重点关注的问题之一。党的十八大以来,习近平总书记曾多次提出“山水林田湖草生命共同体”这一概念,强调要对山水林田湖进行统一保护、统一修复^[4],这在一定程度上为生态修复研究指明了方向。从生态安全格局构建角度考虑展开国土空间修复工作,与以往只从某一角度或某一局部区域进行生态修复的研究不同,其更充分地考虑到生态系统的整体性和协调性,有利于从整体思维上实现生态系统的可持续发展^[5-6]。同时从城市群角度展开分析,可在较大尺度上维护生态系统的完整性,探索大湖流域地区社会经济与自然环境协调发展模式,构建区域开发与保护格局,也可进一步根据各城市的具体情况,通过制定相关规划,加强区域联动,更好地推进南昌大都市区和流域上下游地区之间的协同发展及生态修复工作的开展。

生态安全格局研究起源于景观学^[7],早期的格局构建是为了保护生物多样性,目前逐渐向着社会经济与生态环境的协同发展演变^[8]。生态安全格局构建包括源地识别、阻力面构建、廊道提取等内容。生态源地,即人类活动较少、生物多样性丰富、生态系统服务价值较高的区域,是构建生态安全格局的基础^[9],目前学者多基于粒度反推法^[10]、形态学空间格局分析法^[11]、生态系统服务重要性等^[12]方面展开研究。阻力面是指生物在迁移过程中遇到的障碍^[13],主要通过土地利用类型赋值得到^[14],也有学者借助坡度、高程等因子进行阻力面构建^[10-11],同时利用夜间灯光数据进行阻力面修正^[15]。生态廊道,即生态源地间生物迁徙的连通性通道^[3],目前学者多基于最小累积阻力模型和电路理论展开相关研究^[6,14]。最小累积阻力模型通过最小成本路径确定源地间阻力最低的廊道,电路理论通过随机漫步理论识别电流密度高低值,进而确定生态廊道与关键节点区域。目前关于生态安全格局的研究较多,已形成了“源地—阻力面—廊道”的研究范式^[12],生态修复相关的研究也日益成熟,但基于生态安全格局视

角展开生态修复工作的研究还较少,较多是从生态安全格局构建角度探讨山水林田湖草统一修复或生态修复分区^[3,6],且多集中于小尺度城市区域,对于城市群尺度上的相关研究较为缺乏。

十九大以来,生态文明建设和城市高质量发展愈演愈烈,环鄱阳湖城市群作为长江中游城市群的重要组成部分,在我国区域发展格局中占有重要地位。推动城市的高质量发展,不仅要保障经济的高质量增长,更要强调生态环境的绿色发展^[16]。然而随着城市化进程加快,该区内部湿地退化、景观类型多样性不断减少^[17]、城市生态安全受到严重威胁,生态保护修复迫在眉睫。本文以环鄱阳湖城市群为研究区,以InVEST模型、RUSLE模型和GIS空间分析方法确定环鄱阳湖城市群生态系统服务高值区域和生态极敏感区域,识别生态源地,同时选择土地利用类型、坡度、起伏度及植被覆盖度因子构建阻力面,根据ArcGIS开发工具Linkage Mapper工具提取生态廊道,叠加电路理论识别环鄱阳湖城市群国土空间生态修复的关键区域,旨在为该区国土空间生态修复工作的展开指明方向,以期在国土空间规划和城市高质量发展的大背景下协调经济发展与生态保护之间的矛盾^[12],促进中部崛起以及为环鄱阳湖城市群的可持续健康发展提供基本参考。

1 研究区概况

环鄱阳湖城市群位于江西省北部26°57′—30°04′N,113°34′—118°28′E,主要包括南昌、九江、景德镇、上饶、鹰潭、宜春、新余、萍乡等地级市全部行政辖区和抚州市临川区、东乡区、金溪县、崇仁县,以及吉安市新干县、峡江县,区域总面积 9.23×10^4 km²,占江西省土地总面积的55.30%。城市群位于亚热带湿润季风区,气候温和,光照充足,降雨量充沛,生物资源丰富多样。地形多以平原、丘陵为主,研究区土地利用类型以林地为主,林地面积为 4.94×10^4 km²,森林覆盖率达53.57%。区域内河湖众多,水资源丰富,鄱阳湖位列其中,且省内五大流域均汇入鄱阳湖,境内生态环境良好,在调节长江水位和维护湖区生态平衡方面发挥了重要作用,对于维护长江中下游地区

的生态安全具有重要意义。该区省级以上自然保护区共 25 处,生态公益林总面积约 $4.75 \times 10^6 \text{ hm}^2$,重要生物栖息湿地总面积 $5.21 \times 10^5 \text{ hm}^2$,重要水源涵养区总面积 $9.49 \times 10^4 \text{ hm}^2$,是江西省生态安全保护的重要区域。2019 年,环鄱阳湖城市群地区生产总值 1.88×10^4 亿元,占全省的 75.92%。随着“一带一路”、中部崛起、长江中游城市群、赣江新区等国家战略的实施,城市化进程不断加速,土地利用强度加大,环鄱阳湖城市群面临着区域内湿地面积减少、生物栖息地破碎化程度加剧、部分生态廊道被阻断等问题,因此该区域的生态修复工作成为维护江西省生态安全的重中之重。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文涉及到的数据包括环鄱阳湖城市群土地利

用数据、气象数据、数字高程模型数据、归一化植被指数数据、土壤数据、潜在蒸散量数据等。其中,2017 年江西省土地利用数据来自地理空间数据云;气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网和中国科学院资源环境科学与数据中心,包括气温和降水数据;归一化植被指数(NDVI)数据采用中国科学院资源环境科学与数据中心提供的 2017 年中国生长季 1 km 植被指数(NDVI)空间分布数据集。数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云平台,空间分辨率为 30 m;土壤数据来源于国家地球系统科学数据中心,空间分辨率为 30 m;潜在蒸散量数据来源于美国地质勘查局(USGS)提供的 MODIS 影像 MOD16A2 产品,植被净初级生产力(NPP)数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(具体见表 1)。为了便于模型运算,本文将所有数据都统一为通用横轴墨卡托投影(UTM 投影),并重采样至 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 分辨率。

表 1 数据来源及用途

数据类型	数据用途	数据格式	数据来源
土地利用数据	土地利用类型	栅格数据	地理空间数据云
	年均降雨量	文本数据	中国气象科学数据共享服务网
气象数据	年均潜在蒸散量	栅格数据	美国地质勘查局(USGS)
	多年平均降水量	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
	多年平均气温	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
DEM 数据	地形因子		
	海拔因子	栅格数据	地理空间数据云
	坡度		
	起伏度		
土壤数据	土壤可蚀性因子	栅格数据	国家地球系统科学数据中心
归一化植被指数数据	植被覆盖度因子	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
植被净初级生产力数据	多年植被净初级生产力平均值	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心

2.2 研究方法

2.2.1 生态保护重要性评价 (1) 生态系统服务功能重要性评价。水源涵养属于调节服务,对于维持生态安全具有重要作用^[18]。InVEST 模型中的 Water Yield 模块是基于 Fu^[19]和 Zhang 等^[20]提出的水量平衡估算方法,计算得出研究区产水量。公式如下:

$$Y_{xj} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}) \times P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为土地利用类型 j 在栅格 x 上的年产水量(mm); P_x 为栅格单元 x 年降雨量; AET_{xj} 为土地利用类型 j 在栅格 x 上的年实际蒸散量。

土壤保持服务是衡量一个区域防止土壤流失的侵蚀控制能力以及对泥沙的调节能力^[21]。基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE),主要通过计算土壤潜在侵蚀量与土壤实际侵蚀量之差,得出研究区土壤保持能力。

$$A_c = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式中: A_c 为土壤保持量; R 为降雨量侵蚀因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为地形因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

生物多样性是生态系统最主要的功能之一,江西省是全国生物多样性最丰富的省份之一,《江西省生态功能区划》也明确指出生物多样性在该区属于极重要范畴,故本文以《生态保护红线划定指南》中提供的 NPP 定量评估方法评价生物多样性维护功能的重要性。

$$S_{\text{bio}} = \text{NPP}_{\text{mean}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times (1 - F_{\text{alt}}) \quad (3)$$

式中: S_{bio} 为生物多样性维护服务能力指数; NPP_{mean} 为多年植被净初级生产力平均值; F_{pre} 为多年平均降水量; F_{tem} 为多年平均气温; F_{alt} 为海拔因子。

(2) 生态敏感性评价。根据《江西省生态功能区划》可知,江西省水土流失问题依然突出,因此本文选取水土流失敏感性因子作为衡量环鄱阳湖城市群生

态敏感性的指标。公式如下:

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i} \quad (4)$$

式中: SS_i 为水土流失敏感性指数; R_i 为降雨侵蚀力; K_i 为土壤可蚀性; LS_i 为坡长坡度; C_i 为植被覆盖度。

2.2.2 最小累积阻力模型 最小累积阻力模型主要原理是确定物种由源地到目的地之间或在两个生态源地之间移动时所需要克服的阻力,进而寻找耗费成本最小的路径^[15,22]。生态阻力面的构建是识别生态廊道的前提条件,阻力面的形成包括自然因素和人为干扰因素,参考前人研究^[22-23],本文选取土地利用类型、坡度、地形起伏度以及植被覆盖度作为主要阻力因子,按照层次分析法确定各因子权重值(表 2),利用 ArcGIS 将各因子阻力面进行叠加分析,最终得到研究区综合阻力面。MCR 模型公式如下:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (5)$$

式中: MCR 为最小累积阻力值; D_{ij} 为物种从源栅格 j 到景观单元 i 栅格的空间距离; R_i 为景观单元 i 栅格对某物种运动的阻力系数; f 为最小累积阻力与生态过程为正相关关系。

表 2 综合阻力面因子权重与系数

阻力因子	权重	指标	阻力系数
土地利用类型	0.532	耕地	100
		林地	1
		草地	100
		水域	10
		建设用地	1000
		未利用地	500
		0~5	1
坡度/(°)	0.186	5~15	10
		15~25	50
		25~35	75
		>35	100
		<20	1
起伏度/m	0.186	20~50	10
		50~70	50
		70~100	70
		>100	100
		0~0.2	70
NDVI	0.096	0.2~0.4	50
		0.4~0.6	30
		0.6~0.8	10
		>0.8	1

2.2.3 电路理论 生态廊道在保护生物多样性、改善破碎栖息地生境质量、维护生态系统完整性等方面发挥了重要作用^[24],目前生态廊道的相关研究多是

基于最小累积阻力模型和电路理论展开的。电路理论是学者 McRae^[25]提出的,通过对电阻、电流等物理概念赋予不同的生态含义,将生态景观视为一个导电表面,将物种视为随机漫步者^[26],利用电子在电路中随机游走的特性,将生态流视为电流,通过电流密度确定物种在迁移过程中所遇到的阻力情况,进而通过景观节点间的高电流密度识别出对区域景观连接具有重要意义的路径^[27]。电路理论不仅可以通过识别物种的多个运动路径以确定不同景观间存在的潜在的廊道,也能够较好地检测景观的连通性,模拟物种的真实运动情况^[28]。故本文基于电路理论,利用 Linkage Mapper 模块中 Linkage Pathways Tool 工具提取环鄱阳湖城市群生态廊道区域。

2.2.4 生态“夹点”和生态障碍点识别 生态“夹点”是确保源地之间连通性的重要节点,在维持生态系统完整性方面发挥着不可替代的作用^[5,23]。由于生态“夹点”的不可替代性,因此生物在迁徙过程中很大程度上会选择此区域,或者说,只能选择此区域进行移动,故其一旦受到破坏,对于生态系统整体性和生物多样性的影响将是致命的,因此生态“夹点”区域是整个生态修复工作的重点保护区域。利用 Linkage Mapper 模块中 Pinchpoint Mapper 工具,其在叠加了研究区最小成本路径和电路理论的基础上,首先利用 Circuitscape 软件识别电流密度高值区域,再根据 Pinchpoint Mapper 排除对区域连通性贡献不大的区域,进而确定其中阻力最小的运动路径及临界夹点,最终识别研究区生态廊道中的重要节点区域。本文基于 raster centrality 选项下 Pairwise(成对模式)和 All-to-one(多对一模式)两种模式识别研究区“夹点”区域,Pairwise 模式是在所有成对的核心区域之间运行电流。All-to-one 模式则是把一个核心区域连接到地面,并将电流注入其余的核心,迭代所有核心区。基于两者结果叠加,确定环鄱阳湖城市群生态“夹点”区域。

生态障碍点则是影响源地之间生态廊道连接质量的障碍区域,也是生态修复的重点区域^[29]。障碍点的出现受多种因素影响,一般受人为干扰影响较大,结合研究区土地利用类型,针对不同问题采取不同的解决措施,尽可能通过生态修复降低该区域阻力值,提高景观之间的连通性。本文利用 Linkage Mapper 模块中 Barrier Mapper 工具,识别生态廊道中的高度障碍区域,将最小搜索半径设置为 500 m,最大搜索半径设置为 1 500 m,通过移动窗口法搜索研究区障碍点。Barrier Mapper 工具的运行是基于 Linkage Pathways Tool 工具提取生态廊道后展开的,该工具既能检测出阻碍物种迁徙的完全障碍

点,也能检测出存在一定阻碍但不完全影响物种迁徙的障碍区域^[5],本文仅考虑了对于物种迁徙存在完全阻碍的障碍区域,以此确定环鄱阳湖城市群生态障碍点区域。

3 结果与分析

3.1 生态源地提取

3.1.1 生态系统服务功能重要性 据各模型计算后,将各项结果按照自然断点法分为5个等级,由低到高分别表示不重要、一般重要、中等重要、重要、极重要,并将3项服务结果进行叠加分析,最终得到环

表3 环鄱阳湖城市群生态保护重要性结果

生态系统服务功能重要性	水源涵养	土壤保持	生物多样性保护	生态系统服务重要性结果	生态敏感性评价	水土流失敏感性	生态保护重要性结果
不重要	8700.00	36712.00	23039.75	11256.25	不敏感	4901.00	8962.25
一般重要	2425.50	31914.50	31728.50	25685.25	轻度敏感	21483.75	29641.75
中等重要	18818.75	15510.25	22222.00	31880.25	中度敏感	29870.75	17114.25
重要	42786.50	6599.50	10211.75	17699.50	高度敏感	24360.75	25376.00
极重要	19571.75	1566.25	5100.50	5781.25	极度敏感	11686.25	11208.25

3.1.2 生态敏感性评价 据公式(4),按自然断点法将结果分为5级,由低到高分别表示不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极度敏感,得到研究区水土流失敏感性结果(表3)。研究区水土流失极敏感区域面积为 $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$,占区域总面积的12.67%,主要集中在东部山区和西部山区。高度敏感区与极度敏感区分布情况相似,而中度敏感、轻度敏感以及不敏感区域均分布在鄱阳湖平原周围。将生态系统服务功能重要性评价结果与生态敏感性评价结果进行叠加,并按自然断点法将结果分为5级,得到环鄱阳湖城市群生态保护重要性评价结果分布情况(图1)。

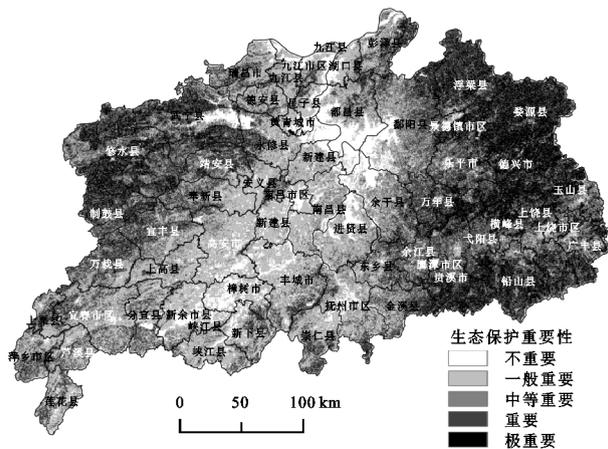


图1 生态保护重要性结果

3.1.3 生态源地识别 考虑到景观整体连通性,以及剔除掉一些面积较小、破碎化程度较高的斑块对生态安全格局构建结果不会产生太大影响,因此本文基于生态保护重要性结果,提取第5级中面积大于10

环鄱阳湖城市群生态系统服务功能重要性结果(表3)。环鄱阳湖城市群生态系统服务功能极重要区域面积为 $5\,781.25 \text{ km}^2$,主要分布在东部怀玉山区、武夷山区以及西部九岭山区,斑块面积整体较小,主要地类为林地。这些地区人为活动较少,对环境产生的负面影响较小,因此生态系统服务价值要高于其他区域。研究区生态系统服务功能重要区域同样主要分布在西部山区和东部山区,中等重要区域主要分布在西部幕阜山、九江市东部、上饶市西部和鄱阳湖平原西部区域,一般重要区域主要分布在鄱阳湖平原中部、南部区域,不重要区域主要分布在鄱阳湖区附近。

表3 环鄱阳湖城市群生态保护重要性结果 km^2

km^2 、第4级中面积大于 100 km^2 的斑块作为初步生态源地,继而又考虑到鄱阳湖区作为江西省重要的湿地资源和候鸟栖息地,及其在维护区域生物多样性、保护湿地及缓解生态压力等方面的重要作用,故同样将其纳入源地范围,最终得到140块生态源地(图2)。环鄱阳湖城市群生态源地面积为 $1.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,占区域总面积的13.43%。从空间分布来看,生态源地主要集中在西部九岭山区、东部怀玉山区和武夷山区及萍乡市区等。生态源地区域地类主要以林地为主,面积为 $7\,544.96 \text{ km}^2$,其次为水域和耕地,也有部分未利用地和建设用地分布其中,面积较少。

3.2 生态廊道

对各阻力因子按权重赋值,最终得到环鄱阳湖城市群阻力值区域分布情况。研究区阻力值高值区域主要分布在南昌市区、九江市区、新余市区等人类建设活动密集区域,低值区域主要分布在鄱阳湖区、东部山区和西部山区等人类活动较少的区域。利用Linkage Mapper工具构建生态廊道需输入研究区生态源地数据和阻力面数据,以模型输出的最小成本路径(LCP)作为研究区的生态廊道。基于此确定环鄱阳湖城市群生态廊道共364条(图2),廊道总长 $7\,640.24 \text{ km}$,从廊道整体长度情况来看,研究区内长度小于 10 km 的廊道居多,占总数的58.52%,较多集中于东部山区,长度大于 10 km 的廊道多分布在鄱阳湖平原两侧区域。主要原因是生态源地多集中在东部和西部区域,故其廊道数量多且短,整体连通性较好,而鄱阳

湖平原附近生态源地数量较少,且距离东、西部山区距离较远,故廊道数量少且长,景观连通性较差。研究区生态廊道分布呈中部稀疏、四周密集的特点。基于生态源地、阻力面以及生态廊道数据,共同构成环鄱阳湖城市群生态安全格局(图2)。

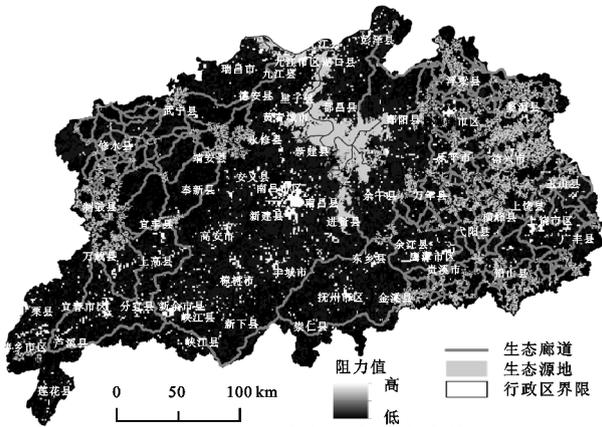


图2 环鄱阳湖城市群生态安全格局

3.3 生态修复关键区域识别

3.3.1 生态“夹点”区域识别及修复 本文基于 Pairwise(成对模式)和 All-to-one(多对一模式)两种模式识别环鄱阳湖城市群生态“夹点”区域。在 Pairwise 模式下的高电流密度区域较多,电流密度最大值为 1 038.61,在 All-to-one 模式下,最大电流密度为 1 644.45(图3)。

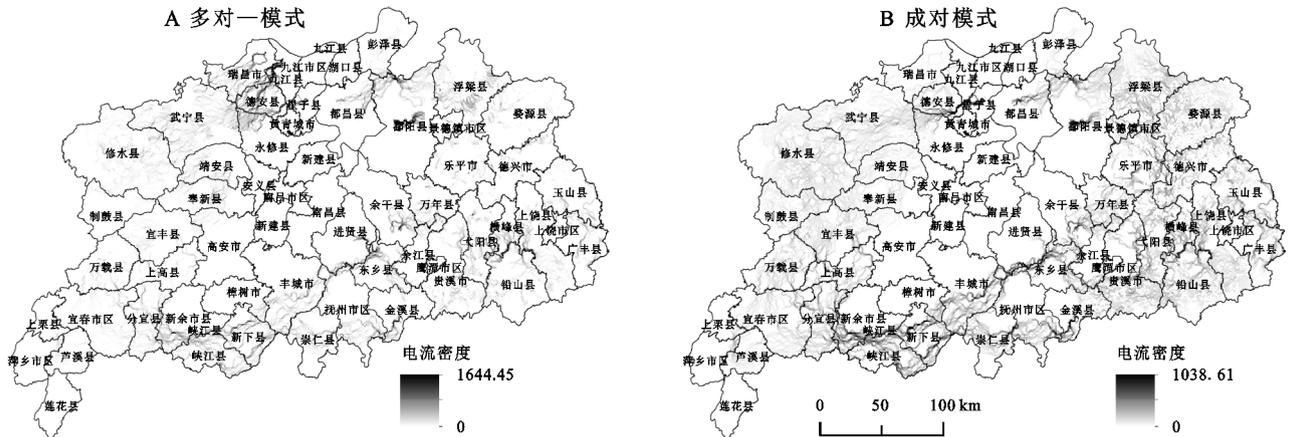


图3 生态“夹点”电流密度

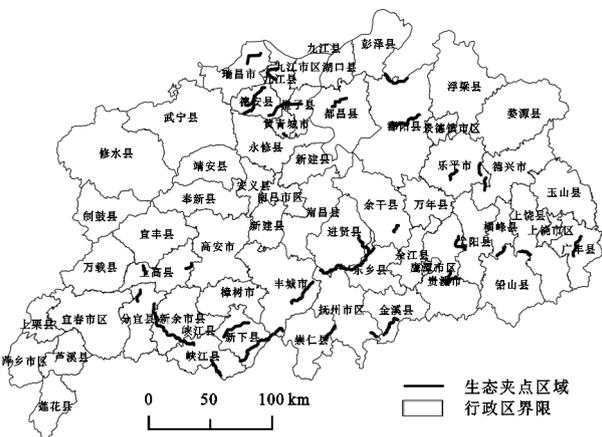


图4 环鄱阳湖城市群生态“夹点”区域

利用自然断点法,将其分为3类,确定高密度电流值所在区域,并将两者结果相叠加,得到研究区生态“夹点”区域共31处(图4),总长644.24 km。在这31处生态“夹点”区域中,有15处与自然河流廊道相交,其中12处也与生态廊道重叠。河流廊道作为天然廊道,本身所带有的生态功能不容忽视,一方面,严格落实江西省河长制制度,借助大数据建设流域资源环境承载力监测预警数据信息平台,严守流域环境质量底线;另一方面,对于水域周边的种植养殖、旅游开发等活动实行严格的管控,强化河湖岸线管理保护。其余16处生态夹点,有12处与生态廊道重叠,宜春市3处,上饶市、吉安市和抚州市各2处,新余市和鹰潭市各1处,抚州市和南昌市交界区域1处;剩余4处主要分布在九江市、抚州市和景德镇市,具体情况见表4。与土地利用类型叠加,研究区主要土地利用类型为林地,且主要分布在九江市。九江市林地资源丰富,全市森林覆盖率达56.44%,因此在保护的过程中,要因地制宜。如林长制的全面推行,旨在实施林业生态“增绿、护绿、用绿”工程,创新林业生态绿色共享机制,以建立高效完备的森林资源保护体系,全面提升全市森林资源保护和发展水平。

3.3.2 生态障碍区域识别及修复 基于 Linkage Mapper 模块中 Barrier Mapper 工具,未勾选相对于 LCD 改进得分选项得到研究区生态障碍区电流密度分布图(图5),利用自然断点法将其分为3类,基于电流密度高值区,识别出环鄱阳湖城市群生态障碍点共23处(图6),面积为736.48 km²,其中有7处分布在上饶市,宜春市5处,九江市4处,3处分布在景德镇市,吉安市2处,鹰潭市1处,抚州市和南昌市交界区域有1处(表5)。据生态障碍点分布情况来看,上饶市分布最多,其中仅玉山县便有4处生态障碍点区域,主要原因是岩瑞镇矿产开采活动频繁,会造成地表塌陷,且尾矿砂的堆放会压占大量土地,进而阻碍物种迁移,其次玉山县

地形多以山地、丘陵为主,同样会对物种迁徙造成困难。除上饶市外,宜春市生态障碍点分布最多,且主要分布在宜春市区及周围县区,主要是因为城市区域建筑密集且人类活动剧烈,故而会阻碍物种的迁徙。与土地利用数据叠加,生态障碍区主要的土地利用类型为耕地,面积为 367.50 km²,占生态障碍区总面积的 49.90%。对于耕地的修复,首先要减少化肥农药的使用,解决耕地土壤酸化、重金属污染和残膜污染等突出问题,严格保障

耕地环境安全;其次,结合各市县实际情况,有序实施退耕还林、退耕还湖和退耕还湿工作,以维护生态系统稳定。对于障碍区内的建设用地,可通过加强城市内部绿化建设,以提高城市植被覆盖率和废弃地利用率,上饶市通过将城市废弃地改造为社区口袋公园的做法完善了城市公园体系,这不仅改善了生态环境,也提升了人居质量,其他区域也可根据其用地现状,增加城市绿地,改善城市生态环境。

表 4 环鄱阳湖城市群生态“夹点”区域分布情况

土地利用现状	长度/km	市域	具体分布	修复建议
河流	10.22	景德镇市	乐平市饶河名口镇河段	清理河道淤泥,采用具体生物技术改善河道底泥情况,为河道恢复自净能力创造条件;严守水资源红线
	11.99		乐平市饶河浯口镇河段	
	8.04	上饶市	余干县信江峡山林场河段	
	9.44		铅山县信江鹅湖镇河段	
	24.32		鄱阳县西河石门街道河段	
	19.14		广丰县丰溪河五都镇河段	
	54.55	抚州、南昌市	抚河抚州市区大岗镇、进贤县李渡镇河段	
	20.61	九江市	九江县长河新合镇河段	
	13.03		德安县博阳河磨溪乡河段	
	31.12		德安县博阳河宝塔乡河段	
23.67	德安县博阳河邹桥乡河段			
林地	25.70	吉安市	峡江县赣江界埠镇河段	
	25.98	鹰潭市	贵溪市西溪河雷溪乡河段	
	63.20	新余市	新余市区袁河河下镇河段	
	10.43	上饶市	铅山县新滩乡西部	
	8.98	宜春市	徐家渡镇中部区域	
	10.95	新余市	分宜县杨桥镇与操场乡交界处	
	7.97	宜春市	上高县与高安市交界处	
	53.32	吉安、宜春市	新干县与丰城市交界区域	
林地、耕地	16.11	吉安市	峡江县水边镇附近	严守耕地红线,加强高标准基本农田建设;退耕还林,培育幼林
	10.98	景德镇、上饶市	乐平市与德兴市交界区域	
	14.61		崇仁县航埠镇附近	
林地、水域	22.23	抚州市	金溪县左坊镇北部区域	
	6.47		抚州市区鹏田乡中部	
	16.99	九江市	瑞昌市南阳乡附近	
	33.38	上饶市	鄱阳县游城乡附近	
林地、耕地、水域	16.63	九江市	都昌县汪墩乡与徐埠镇交界处	严格执行《江西省耕地草地河湖休养生息规划(2016—2030年)》
	28.88	宜春市	丰城市杜市镇附近	
	25.23	抚州、南昌市	进贤县与东乡县交界处	
	20.07	鹰潭、上饶市	贵溪市与弋阳县交界处	

3.3.3 破碎生态空间识别及修复 由于修补破碎空间能够改善环境同时提高生态系统整体的连通性,故也应该将其作为国土空间生态修复的关键区域对待,本文将生态系统服务价值低值区域作为生态修复破碎空间(图 7)。研究区待修复的破碎空间面积为 6 053.39 km²,占研究区总面积的 6.56%,主要地类

为耕地,其次为林地、水域和建设用地。破碎空间面积整体较小,但分布较为广泛。在该研究区内,主要集中在宜春市、南昌市和九江市,面积分别为 1 826.15, 941.05, 689.08 km²。破碎空间的形成多是由于城市扩张导致斑块支离破碎,这也是城市空间演进的客观现象^[30]。南昌市、九江市和宜春市作为江西省经济较为发

达的3个区域,对于其城市破碎空间的修复,首先要根据各地实际情况,在昌九地区,可以通过整合城市内部绿地资源,拓展城市绿地公园建设,提高景观之间的连通性;在较大范围上,围绕“山水林田湖”格局,以赣江

新区作为纽带,加快推进绿色城镇化、绿色产业集聚发展。在宜春市,除却以绿地作为缓冲区外,也可借助湿地资源,通过建立湿地公园提高河湖水系的连通性,以提高生态系统之间整体景观的连通性。

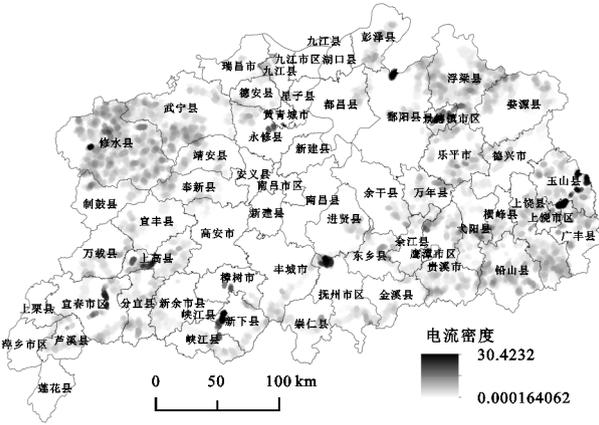


图5 生态障碍点电流密度

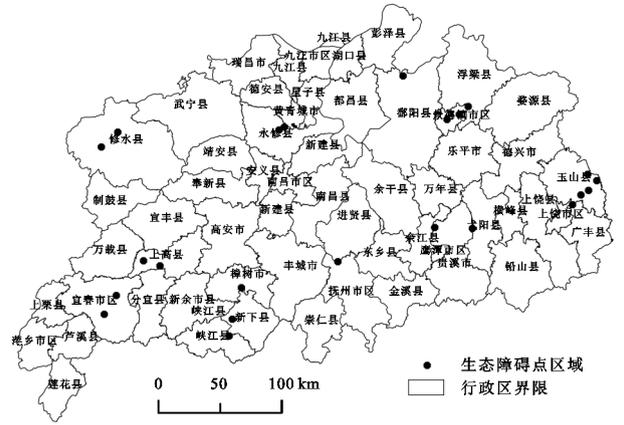


图6 环鄱阳湖城市群生态障碍点区域

3.4 生态修复关键区域的修复策略

借助电路理论,通过识别研究区生态源地、阻力面以及生态廊道确定生态“夹点”区域、生态障碍点区域和破碎生态空间。生态“夹点”区域多处与生态廊道相重叠,生态障碍点区域多处于低阻力值与高阻力

值交界区域,破碎空间分布较为广泛,三者对于维持生态景观的连通性都具有重要意义。作为南方重点集体林区和重要生态屏障,环鄱阳湖城市群的生态修复工作迫在眉睫,故提出以下修复策略。

表5 环鄱阳湖城市群生态障碍点区域分布情况

土地利用现状	面积/km ²	市域	具体分布	修复建议	
耕地、建设用地、其他用地	26.27	上饶市	玉山县岩瑞镇西南部	(1) 强化土地用途管制,严格落实耕地保护责任追究制度;统筹推进农用地、低效建设用地和生态保护修复等综合整治	
	8.82		玉山县冰溪镇西部		
	45.73	景德镇市	鲇鱼山镇与吕蒙乡交界区域		
耕地、水域、林地、其他用地	78.34	吉安市	峡江县仁和镇与新干县界埠镇交界区域		(2) 根据《江西省天然林保护修复制度实施方案》,严格划定天然林保护重点区域;对于已破坏的林业资源,实施退耕还林,减少人为活动干扰
	82.96	抚州市、南昌市	抚州市大岗镇、云山镇与进贤县李渡镇交界处		
	25.34	九江市	修水县渣津镇		
	25.95		修水县西港镇附近		
	14.23		永修县虬津镇与艾城镇交界处		
	14.98		永修县虬津镇与云山企业集团交界处		
	45.95	上饶市	鄱阳县石门街镇附近		
63.79		玉山县与广丰县交界区域	(3) 对过度开发利用、水生态超载的重点河湖,按照“一河(湖)一策”的原则精准施策		
39.42		玉山县岩瑞镇附近			
10.69	鹰潭市	贵溪市鸿塘镇北部区域			
7.11	鹰潭市、上饶市	贵溪市与弋阳县交界处			
7.11	宜春市	西村镇东部			
26.75		上高县田心镇东北部			
57.66		上高县田心镇与翰堂镇交界区域			
17.01	景德镇市	竟城镇北部区域			
22.42		浮梁县与景德镇市区交界处			
耕地、林地、建设用地	57.14	宜春市		宜春经济开发区管理委员会附近	
	21.95	吉安市	峡江县与新干县交界处		
耕地、林地、草地	24.20	上饶市	玉山县双门镇南部区域		
耕地、其他用地	12.66	宜春市	樟树市洲上乡南部		

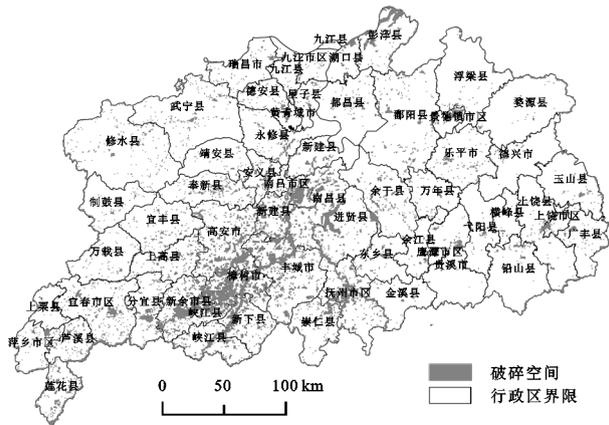


图7 破碎生态空间

对于生态“夹点”区域的保护,研究区各市县结合自身实际,根据不同的地类,可实行不同的解决措施。对于耕地、草地和水域的保护,实行耕地休耕、轮作,积极开展土壤改良和地力培肥修复工作;其次,严格控制天然草地面积不减少,建设具有南方特色的草地畜牧业可持续发展格局;同时严守水资源红线,建立河湖水域岸线空间用途管制制度,全面养护耕地、草地、河湖资源。对于林地的保护,在保护天然林面积不减少的情况下,加强森林资源监测队伍能力建设,完善监测体系和林长制责任制。对于生态障碍点区域的修复,针对耕地,结合环鄱阳湖城市群地理条件,在地表水和地下水资源过度开发地区,减少高耗水作物种植面积,做好耕地超承载力退出工作,改善农业生态环境。针对林地,除实行退耕还林外,也可尝试开发不同的林业产业模式,如宜春市林下种植、林下养殖模式,其次要结合各地自然地理条件,因地制宜栽种适合的优良树种,如长江“最美岸线”林业生态修复工程的实施,对于环鄱阳湖城市群乃至整个长江经济带的生态修复工作都具有重要的借鉴意义。针对水域,以江西省国土空间规划为依据,开展陆域防控治理,岸线美化优化等生态建设行动,利用湿地公园、森林公园和水利风景区等打造绿色滨水长廊,同时加强政府监督管理。针对建设用地,改造城市内部老城区以及低效用地,大力推进土地综合整治,以及废弃、退化、污染、损毁土地的治理、改良和修复。对于破碎空间的修复,重点在于依靠周围环境,将破碎地块通过各种生物工程措施融入周围景观,如城市绿地和湿地公园等的扩建、绿色产业的集群发展,同时也可借助破碎地块有效整合城市资源,以加强城市基础设施建设。

总的来说,在生态修复过程中,处理好开发与保护的关系,对于人烟稀少、自然环境良好的区域尽量减少人类干扰活动,对于已经受损区域,做好相关规

划有序开展修复工作,同时对修复成果加强政府监管和社会监督力度,提高全社会保护环境的意识。

4 讨论与结论

(1) 环鄱阳湖城市群生态源地面积共 $1.24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占研究区总面积的 13.43%, 主要分布在九江市、宜春市西北部、上饶市东北部、景德镇市等区域, 土地利用类型以林地为主; 生态阻力面高值区域主要分布在各市城区区域; 研究区生态廊道共 364 条, 总长 7 640.24 km, 分布呈中部稀疏、四周密集的特点。叠加上述数据, 即可得到研究区的生态安全格局。

(2) 在电路理论的基础上, 识别出研究区生态保护修复关键区域包括: 生态“夹点”区域 31 处, 总长 644.24 km, 其中 12 处既与河流廊道相交, 同时也与生态廊道重叠; 生态障碍点区域 23 处, 面积为 736.48 km^2 , 有 7 处分布在上饶市, 主要地类为耕地; 生态破碎空间面积为 6 053.39 km^2 , 主要地类为耕地。

(3) 针对经济发展速度较快的区域, 如南昌市、九江市等, 可以借助区域条件, 加快昌九一体化构建, 推进新型工业化、城镇化, 生态化与农业现代化的协调发展, 以此引导环鄱阳湖城市群实现绿色崛起。针对耕地、林地和水域等, 做到开发与保护并重, 坚持保护优先, 建立山水田林湖为一体的生态保护空间。

本文从生态系统整体性出发, 基于生态安全格局构建识别研究区生态保护重要区域以及生态待修复关键区域, 在此基础上有针对性地提出相关修复建议, 这对于新时代背景下统筹山水林田湖草系统治理, 系统推进国土空间生态修复具有重要意义。但本文仍存在一些不足, 具体表现在: 在选取生态源地时, 未将自然保护区数据和生态保护红线数据考虑进来, 若能将生态源地数据与其叠加, 结果会更加科学合理; 其次, 仅根据 Linkage Pathways Tool 工具提取生态廊道, 而未对生态廊道宽度对生物迁徙的影响进行深入思考; 且在确定生态障碍区域时, 仅识别了影响生物迁徙的完全障碍区, 未考虑对生物迁移存在障碍但不完全阻碍的区域。故在以后的研究中, 可以针对这方面的不足, 加强相关研究。

参考文献:

- [1] 彭建, 李冰, 董建权, 等. 论国土空间生态修复基本逻辑[J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 18-26.
- [2] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [3] 马世发, 劳春华, 江海燕. 基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟: 以粤港澳大湾区为例[J]. 生态

- 学报,2021,41(9):3441-3448.
- [4] 田野,冯启源,唐明方,等.基于生态系统评价的山水林田湖草生态保护与修复体系构建研究:以乌梁素海流域为例[J].生态学报,2019,39(23):8826-8836.
- [5] 张美丽,李智,张益琛,等.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以河北省阜平县为例[J].水土保持研究,2021,28(3):299-307.
- [6] 苏冲,董建权,马志刚,等.基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别:以四川省华蓥山区为例[J].生态学报,2019,39(23):8948-8956.
- [7] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].生态学报,1999,19(1):10-17.
- [8] 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[J].生态学报,2018,38(10):3382-3392.
- [9] 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[J].生态学报,2019,39(7):2298-2310.
- [10] 周浪,李明慧,周启刚,等.基于电路理论的特大山地城市生态安全格局构建:以重庆市都市区为例[J].水土保持研究,2021,28(2):319-325,334.
- [11] 谢婧,李文.1990—2017年哈尔滨市城乡生态耦合及其安全格局构建[J].水土保持通报,2021,41(1):317-326.
- [12] 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[J].地理学报,2018,73(4):701-710.
- [13] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):471-484.
- [14] 付凤杰,刘珍环,刘海.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以贺州市为例[J].生态学报,2021,41(9):3406-3414.
- [15] 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.
- [16] 赵剑波,史丹,邓洲.高质量发展的内涵研究[J].经济与管理研究,2019,40(11):15-31.
- [17] 刘耀彬,邱浩,戴璐.生态安全约束下城市群空间网络结构动态演变及关联特征分析:以环鄱阳湖城市群为例[J].华中师范大学学报:自然科学版,2020,54(4):522-535.
- [18] 陈姗姗.南水北调水源区水源涵养与土壤保持生态系统服务功能研究[D].西安:西北大学,2016.
- [19] Fu B P. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. *Sci. Atmos. Sin.*, 1981, 5(1): 23-31.
- [20] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2). DOI: 10.1029/2003WR002710.
- [21] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.
- [22] 徐羽.江西省土地利用生态安全格局[D].南昌:江西师范大学,2017.
- [23] 方莹,王静,黄隆杨,等.基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别:以烟台市为例[J].自然资源学报,2020,35(1):190-203.
- [24] 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.
- [25] McRae B H. Isolation by resistance[J]. *Evolution*, 2006, 60(8): 1551-1561.
- [26] An Y, Liu S, Sun Y, et al. Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory[J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2059-2076.
- [27] 黄九明.基于电路理论的济南市生态安全格局构建研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [28] Merrick M J, Koprowski J L. Circuit theory to estimate natal dispersal routes and functional landscape connectivity for an endangered small mammal [J]. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1163-1179.
- [29] 倪庆琳,侯湖平,丁忠义,等.基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区:以徐州市贾汪区为例[J].自然资源学报,2020,35(1):204-216.
- [30] 朱佩娟,贺清云,朱翔,等.论城市空间破碎化研究[J].地理研究,2018,37(3):480-494.