

DOI: 10.20103/j.stxb.202307131507

孙梓渊, 王赛鸽, 陈彬. 基于生态系统服务的生态安全格局构建与生态韧性评估——以长株潭城市群为例. 生态学报, 2024, 44(11): 4650-4661.

Sun Z Y, Wang S G, Chen B. Construction of ecological security pattern and assessment of ecological resilience based on ecosystem services: A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4650-4661.

基于生态系统服务的生态安全格局构建与生态韧性评估

——以长株潭城市群为例

孙梓渊¹, 王赛鸽², 陈彬^{1,2,*}

1 湖南工商大学资源环境学院, 长沙 410205

2 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 构建生态安全格局对于保障区域生态安全、优化国土生态空间具有重要意义, 科学评估生态韧性是城市高质量发展的重要议题之一。以长株潭城市群为研究对象, 基于“源地识别-阻力面构建-廊道提取”的生态安全格局构建模式, 定量评估固碳释氧、土壤保持和水源涵养三项生态系统服务功能以识别源地, 结合自然和人为因素构建阻力面, 使用 Linkage Mapper 工具基于最小成本路径理论识别生态廊道, 提出了一套基于生态安全格局构建过程的生态韧性评估框架, 并结合 Fragstats 和 Conefor Sensinode 软件对其进行综合评价。研究结果显示: (1) 长株潭城市群共 55 块生态源地, 面积为 7747.75 km², 占城市群总面积的 27.58%, 东部和南部源地较为集中, 西部较分散, 林地是生态源地的主要组成部分; 生态廊道共 113 条, 廊道总长度为 1458.97 km, 平均长度为 12.91 km, 主要分布于研究区西部和北部。 (2) 结合生态源地和生态廊道构建了长株潭城市群“一心一环”生态安全格局, 可有效缓解长株潭城市群中部生态用地“空心化”的格局。 (3) 研究区 55 块生态源地的韧性指数介于 0.1265—0.4682 之间, 空间上呈现出东高西低, 南高北低的特征; 113 条生态廊道的韧性指数介于 0.0027—0.8002 之间, 韧性指数较高的廊道主要分布在研究区东部和南部, 韧性指数较低的廊道分布在西部、中部和北部。西部和中部或将成为影响长株潭城市群生态安全的关键区域, 在城市规划过程中应重点关注。研究结果对优化城市空间布局、维护区域生态安全和促进区域一体化发展具有重要意义, 并为区域生态韧性的评估提供了新的思路。

关键词: 生态安全格局; 生态系统服务; 生态韧性

Construction of ecological security pattern and assessment of ecological resilience based on ecosystem services: a case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

SUN Ziyuan¹, WANG Saige², CHEN Bin^{1,2,*}

1 School of Resource & Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

2 State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Construction of ecological security pattern is of great significance for ensuring regional ecological security and optimizing the territorial ecological space. Ecological resilience assessment is an important issue for high quality urban development. Taking Changsha-Zhuzhou-Xiangtan (CZT) urban agglomeration as the study area, the ecological security pattern (ESP) was constructed based on the method of ecological source identification-resistance surface construction-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72091511, 72103022); 湖南省科技创新计划 (2023RC4008); 北京市自然科学基金 (9222017)

收稿日期: 2023-07-13; **网络出版日期:** 2024-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

ecological corridor extraction. Key ecosystem services such as carbon sequestration and oxygen release, soil conservation, and water conservation were evaluated to identify the ecological sources. The resistance surfaces were constructed by integrating natural conditions and human influences. Ecological corridors were identified by using Linkage Mapper tool based on the least cost path theory. An ecological resilience assessment framework was proposed based on the construction of ecological security pattern, then the ecological resilience was assessed by using Fragstats and Conefor Sensinode. The results showed that: (1) There were 55 ecological sources in the CZT urban agglomeration, with a total area of 7747.75 km², accounting for 27.58% of the CZT urban agglomeration. The ecological sources were mainly located in the east and south, and few were in the west. Forest land was the main component of ecological sources. There were 113 ecological corridors with a total length of 1458.97 km. The length of the ecological corridors ranged from 0.04 km to 102.70 km, and the average length of the corridors was 12.91 km. Most ecological corridors were distributed in the west of the study area. Few were distributed in the center of the study area. (2) Combining the ecological sources and ecological corridors, the “one point and one circle” ecological security pattern of CZT urban agglomeration was constructed. It improved the central area’s ecological condition of CZT urban agglomeration. (3) The resilience index of 55 ecological sources in the study area ranged from 0.1265 to 0.4682. The resilience index of the ecological sources was high in the east and south, but low in the west and north. The resilience index of 113 ecological corridors ranged from 0.0027 to 0.8002. Corridors with high resilience were mainly distributed in the east and south of the study area, while corridors with low resilience were distributed in the west and north areas. The resilience index of ecological corridors in the center of the study area was also low. However, these corridors played an important role in balancing urban development and environmental protection and needed to be protected. The western and central parts of the study area might become the key areas that affect the ecological security of the CZT urban agglomeration the most, and should receive special attention in the process of urban planning. The results can help to optimize urban spatial layout, maintain regional ecological security and promote regional integration development, and provide new insights for assessing regional ecological resilience.

Key Words: ecological security pattern; ecosystem services; ecological resilience

城市化的进程正在不断加快,高强度的土地开发对生态系统服务功能造成了影响,景观连通性降低、生境斑块破碎化等生态环境问题逐渐凸显^[1-2]。生态环境问题的累积一旦超过一定程度,将会危及区域和国家生态安全,影响经济社会可持续发展^[3]。人口聚集、生态用地侵占等一系列城市化问题^[4],也削弱了城市应对生态风险的能力,提升城市生态韧性已刻不容缓。构建生态安全格局可有效识别出城市生态保护的关键位置,为城市空间规划提供依据。合理的城市空间布局也有利于城市的高质量发展^[5]。当前,如何构建生态安全格局和评估城市韧性问题引起了社会各界的广泛关注,成为亟待解决的重要问题。

近年来国内外学者从地理学^[6-7]、景观生态学^[8-9]等视角围绕生态安全格局的构建及优化等开展了大量研究,已形成“源地识别-阻力面构建-廊道提取”的研究范式^[10]。其中,生态源地识别基于“源-汇”理论^[11],是构建生态安全格局的基础。起初部分学者直接选取自然保护区等^[12]作为生态源地,后续逐步引入形态学空间格局分析^[13]、粒度反推法^[14]和生态系统服务功能^[15-17]来识别生态源地,生态系统服务功能评估因其能较好的反映生态过程,识别生态保护中的重要区域而被广泛采用;综合阻力面的构建主要有两种方法,其一是构建生态安全指数并通过空间主成分分析对区域生态安全进行评级,以此构建综合阻力面^[18],其二是对不同景观类型赋以不同阻力系数构建阻力面,并采用修正因子进行修正^[19],后者因其易于操作且能反映出其他因素对阻力值的影响而使用较多;生态廊道提取方面,最小累积阻力模型^[20]或电路理论^[21]均是当前的主流方法,其中 ArcGIS 软件的距离分析工具和 Linkage Mapper Toolbox 以及 Circuitscape 软件为这一过程提供了技术支持。

韧性主要指系统在面对冲击或压力时的抵抗力、适应力和恢复力^[22],生态韧性作为韧性的重要维度受到

学者们的广泛关注^[23-24]。目前,对生态韧性的评估大多从生态风险和环境风险的防控等角度出发,通过构建指标体系分析生态韧性的变化情况^[25]。部分研究仅从单一的风险或社会治理维度对生态韧性进行分析^[26-27]。后续有学者基于韧性视角研究生态安全格局,如 Yuan 等建立了一个影响资源型城市韧性的指标框架对城市生态安全格局开展评价^[28],王思成等基于“源-流-汇”的生态韧性评价方法测度了天津市中心城区的韧性强度^[29],张磊等从韧性的视角开展了天津市土地生态安全评价,以提升生态安全格局的稳定性^[30]。以往研究大多关注生态安全格局或生态韧性二者之一,或是在韧性视角下进行生态安全格局相关的研究,少有文章在构建生态安全格局的基础上进行韧性评估。

构建生态安全格局可为生态韧性研究提供科学的理论依据和中微观尺度上的规划设计框架,在此基础上展开土地利用规划、开发程度控制、开发类型选择等工作^[31]。生态安全格局支撑下的生态韧性体系构建可有效结合生态过程调控,实现自然资源的合理开发与利用。而基于韧性视角构建的生态安全格局具有空间上的韧性,既包括生态系统自身的多功能性和对环境的适应性,又包括其应对外界干扰的冗余度,以及在环境变化中重新达到一种新的稳态^[30]。生态韧性作为基础性要素,重点刻画人与环境的协调度,具有维护城市生态安全格局稳态和提升环境自组织能力的双重作用^[32]。生态韧性评价结果还可作为判断区域生态安全格局是否处于安全状态的阈值之一^[33]。将生态安全格局构建和生态韧性评估结合,可将生态韧性进行空间可视化,直接诊断出维持城市生态安全格局稳态的关键要素和功能,有的放矢地制定优化策略,从而在规划和建设中优化生态空间的配置^[29]。生态安全格局和生态韧性本身就具有高度的相关性,在韧性评价过程中纳入源地识别、阻力面构建和廊道提取等因素可提升韧性评价的科学性。二者结合对于提升区域生态韧性、维护区域生态安全、改善城市生态环境都颇具意义^[34]。长株潭城市群整体景观连通性较低,破碎的生境斑块对物种迁移等生态过程产生了严重阻碍^[35]。此外,城市群的快速发展对生态用地的挤占,削弱了生态系统服务功能,使区域生态安全和生态韧性受到了严重威胁。相关学者主要聚焦于长株潭城市群的生态安全评估和景观空间格局演变分析。曾永年等通过分析长株潭城市群核心区景观空间演化过程,揭示出长株潭城市群城镇发展由初期的凌乱分散转向局部紧凑和区域合理布局的空间扩张规律^[36]。李毅等以长株潭核心区为研究对象,分析 2000—2018 年景观格局的时空变化特征,结果显示长株潭核心区耕地、林地均在减少,建设用地增加明显,草地和水体面积总体保持稳定^[37]。欧阳晓等以长株潭城市群为例,结合生态系统服务与生态系统健康,构建了生态风险评估框架,分析了 2000 年和 2018 年长株潭城市群生态系统服务、生态系统健康和生态风险时空变化规律^[38]。虽然大量学者对长株潭地区进行了深入研究,但对生态安全格局构建和生态韧性评估方面的研究尚不多见。

鉴于此,本研究首先基于“源地识别-综合阻力面构建-廊道提取”的模式,构建长株潭城市群生态安全格局,以综合生态系统服务功能高低作为源地选取标准,采用夜间灯光数据和地形位指数修正综合阻力面,使用 Linkage Mapper 提取生态廊道。其次,结合生态安全格局构建过程分生态源地韧性和生态廊道韧性两个方面确定了三层指标体系,结合 Fragstats 和 Conefor Sensinode 软件评估长株潭城市群的生态韧性,并提出区域生态安全保护策略和韧性提升策略,以期为优化城市空间布局、维护区域生态安全以及提升城市风险应对能力提供参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

长株潭城市群包含长沙、株洲、湘潭三市,位于中国湖南省中东部(111°53'—114°15'E, 26°03'—28°41'N),总面积为 28096 km²,如图 1 所示。据统计,长株潭城市群 2022 年地区生产总值为 2.03 万亿元,占全国的 1.68% 左右,人口 1699.44 万人,是中部地区发展的核心增长极之一。长株潭城市群土地利用类型以林地、耕地和城乡居民地为主,林地分布在研究区边界,城乡居民地集中于研究区中心;此外湘江自北向南穿入,被视为长株潭城市群的“水上生态走廊”。空间上长株潭三市沿湘江呈“品”字形分布,其核心城区每两者间直线距离不

到 50km,具有良好的发展前景。但是随着城市化的加剧,人类主要活动区域正不断挤占生态用地,生态格局正发生剧烈变化,重要生态用地逐渐减少,景观破碎度不断提高,严重威胁区域安全。

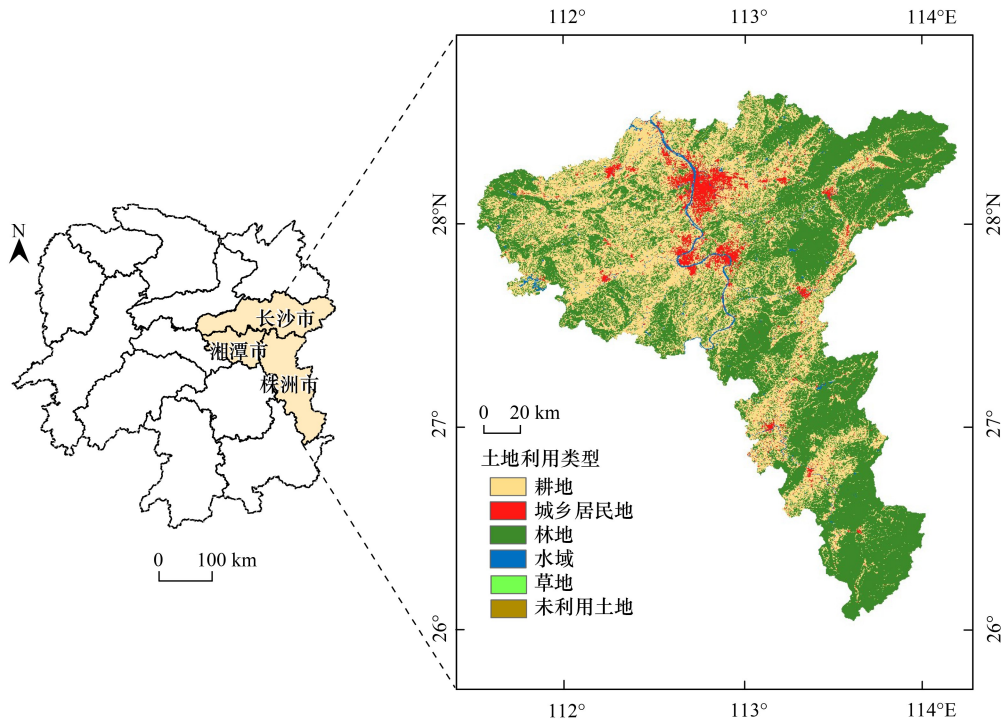


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

1.2 数据来源

本研究采用的数据主要包括:数字高程模型 DEM 数据(30m 分辨率)、土地利用类型数据(30m 分辨率,耕地、城乡居用地平均分类精度 85% 以上,其余用地 75% 以上)、归一化植被指数 NDVI 数据(30m 分辨率)、坡度数据(30m 分辨率)、土壤数据(100m 分辨率)、气象数据(1000m 分辨率)、夜间灯光数据(1000m 分辨率)、路网数据、水系数据以及中国地级市行政边界数据,具体数据类型、获取时间和来源如表 1 所示。为了便于分析和处理,以数字高程为底图对其他数据进行配准,并转换到 WGS_1984_Albers 投影坐标系中。综合考虑基础数据特点和可计算性,将所有数据重采样后转换为 30m×30m 空间分辨率。

表 1 研究区数据来源

Table 1 Data sources of the study area

数据类型 Data type	数据时间 Data time	数据精度 Data precision	数据来源 Data sources
数字高程模型 Digital elevation model	2020 年	30m	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
土地利用类型 Land use type	2020 年	30m	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	2020 年	30m	国家生态科学数据中心(http://www.nesdc.org.cn)
坡度数据 Slope data	2020 年	30m	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
土壤数据 Soil data	2020 年	100m	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
气象数据 Climate data	2020 年	1000m	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
夜间灯光数据 Nighttime light data	2020 年	1000m	Harvard Dataverse(http://dataverse.harvard.edu)
路网数据 Road system data	2020 年	—	Open Street Map 平台(http://www.openstreetmap.org)
水系数据 River system data	2020 年	—	Open Street Map 平台(http://www.openstreetmap.org)

2 研究方法

2.1 生态源地识别

针对区域典型生态系统,定量评估生态系统服务的供给能力,识别生态系统服务供给的重要区域,可以作为源地选取的有效方法^[39]。本研究考虑长株潭城市群的土地利用特征和生态环境状况选取固碳释氧、土壤保持、水源涵养三个方面评估长株潭城市群生态系统服务功能^[40]。以净初级生产力表示固碳释氧功能,借助 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型计算^[41]:

$$NPP(i, t) = LAR(i, t) \times \alpha(i, t) \quad (1)$$

式中, $NPP(i, t)$ 代表 t 时段内植被在 i 栅格上的净初级生产力, $LAR(i, t)$ 代表 t 时段内植被在 i 栅格上吸收的光和有效辐射, $\alpha(i, t)$ 代表 t 时段内植被在 i 栅格上的光能转化率。

本研究采用修正的通用土壤流失方程 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 计算土壤保持功能, 根据潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值计算土壤保持量^[42]:

$$SC = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式中, SC 为年均土壤保持量 ($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), R 为降雨侵蚀力因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$), K 为土壤可蚀性因子 ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 为植被覆盖因子, P 为土壤保持措施因子。

水源涵养能力通过水量平衡法来估算, 水量平衡法基于系统整体性原理, 考虑水分输入与输出来核算生态系统持水量, 需要降水量、蒸散量和地表径流量三个参数即可估算, 简单易操作, 能够较为准确的计算水源涵养量, 已得到广泛应用。计算公式如下^[43]:

$$WC = \sum_{i=1}^n (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中, WC 为水源涵养量 (m^3), P_i 为降雨量 (mm), R_i 为地表径流量 (mm), ET_i 为蒸散发 (mm), A_i 为 i 类生态系统的面积 (m^2), n 为研究区生态系统类型总数。地表径流量 R_i 为降雨量 P_i 与地表径流系数的乘积, 地表径流系数主要通过查阅文献资料^[43] 获得。

完整而稳定的生态系统服务功能对维持区域生态安全具有重要作用^[44], 生态系统服务功能具有同等重要性, 因此本研究将三种生态系统服务功能进行等权叠加分析, 采用自然断点法对生态系统服务功能分级, 选取生态系统服务功能较高的区域作为生态源地。

2.2 阻力面与廊道构建

阻力面反映了生物迁移遇到的障碍^[40], 本研究参考李权荃等对阻力面构建方法的研究结论^[35], 使用阻力系数和修正因子法构建综合阻力面。选取数字高程、土地利用类型、归一化植被指数和坡度数据构建长株潭城市群综合阻力面, 阻力值的设置参考彭洁等相关研究^[45], 对评价因素特征划分区间并设定 10—100 的数值, 数值越大代表阻力越大。各评价因素权重采用层次分析法计算得到, 具体赋值如表 2 所示。

本研究结合夜间灯光数据 (Nighttime Light, NTL) 与地形位指数构建综合修正指标, 用于修正长株潭城市群综合阻力面。夜间灯光数据可以持续反映城市化、经济状况和人口密度等人为因素的空间分布特点^[46]; 地形位指数由数字高程与坡度数据综合计算得到, 能有效地刻画生物迁徙遇到的自然阻力^[47]。地形位指数和阻力面修正指标计算公式如下:

$$D_i = \ln \left[\left(\frac{G_i}{G_{ave}} + 1 \right) \times \left(\frac{PD_i}{PD_{ave}} + 1 \right) \right] \quad (4)$$

$$S_i = \alpha D_i + \beta L_i \quad (5)$$

$$RE_i = \frac{S_i}{S_a} \times RE \quad (6)$$

式中, D_i 为栅格 i 的地形位指数, G_i 和 PD_i 分别表示栅格 i 的数字高程和坡度; G_{ave} 和 PD_{ave} 分别表示长株潭城市

群的平均高程和平均坡度; S_i 为地形位指数 D_i 与夜间灯光数据 L_i 加权后的综合修正指标, α 和 β 为参数, RE_i 为修正后的综合阻力值, S_a 为栅格 i 对应的土地利用类型 a 的平均综合修正指标, RE 为栅格 i 在空间中某一方向上的阻力值。

表 2 综合阻力面权重因子赋值

Table 2 Comprehensive resistance surface weighing factor assignment

评价因素 Evaluation factors	权重 Weights	分类区间 Range	阻力值 Resistance value	评价因素 Evaluation factors	权重 Weights	分类区间 Range	阻力值 Resistance value
数字高程模型 Digital elevation model	0.1380	<400m	10	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.2561	>0.8	10
		400—800m	20			0.6—0.8	20
		800—1200m	40			0.3—0.6	40
		1200—1600m	80			0.1—0.3	80
		>1600m	100			<0.1	100
土地利用类型 Land use type	0.4778	林地;水域	10	坡度数据 Slope data	0.1281	<2°	10
		草地	20			2°—6°	20
		耕地	40			6°—15°	40
		未利用土地	80			15°—25°	80
		城乡居民地	100			>25°	100

生态廊道是生态源地之间信息传递的最优路径,对维持生态系统功能体系的空间完整性起着关键作用^[48]。本研究基于综合阻力面和生态源地,借助 ArcGIS 10.8 软件中的 Linkage Mapper 工具箱,选择 Linkage Pathways-Build Network and Map Linkages 工具,基于最小成本路径理论识别生态廊道。

2.3 生态韧性评估

本研究结合生态安全格局构建过程以生态源地韧性和生态廊道韧性为目标层,参考 Yuan 等^[28]的设置选取生态源稳定性、生态源复杂性、生态源连通性、生态源内部因素和生态源外部因素五个方面评估源地韧性,选取廊道连通性、廊道内部因素和外部因素三方面评估廊道韧性。共设置 8 个准则层和 18 个指标层,权重赋值采取层次分析法进行确定,具体指标体系和权重赋值见表 3。利用 Fragstats 4.2 软件计算生态源地的稳定性和复杂性指数,使用 Conefor Sensinode 2.6 计算生态源地和廊道的连通性指数,使用 ArcGIS 计算生态源地和廊道的内外部因素以及廊道的核密度。为方便叠加运算,本研究对各指标进行无量纲处理。采用多因素综合评价模型计算生态韧性^[28],结果用韧性指数表示,指数越高表明生态系统越稳定,具体公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n W_i \times RI_i \quad (7)$$

式中, RI 为韧性指数, W_i 为指标 i 的权重, RI_i 为指标层各指标 i 的核算结果。

3 结果与分析

3.1 生态源地的确定

长株潭城市群三项生态系统服务功能计算结果均表现出明显的空间异质性特征,等权叠加得到综合生态系统服务功能,并使用自然断点法将其划分为极重要、高度重要、中等重要、较重要和一般重要五个等级。单一生态系统服务功能和综合生态系统服务功能结果如图 2 所示。固碳释氧功能整体呈现出中心低外围高的特征,长沙市东部、株洲市南部和湘潭市西部主要为林地,植被覆盖率高,因而固碳释氧功能较高,而城区由于人类活动较多导致固碳释氧功能较低。土壤保持功能整体呈现出东南高西北低的特征,研究区东部和南部主要为林地,具有较高的土壤保持功能;其余区域大多为农耕区和城乡居民地,土壤保持功能较低。水源涵养呈现出东部和南部林地区域以及水域较高,其余地区偏低特征。综合生态系统服务功能在空间分布上呈现出东部和南部高,中部、西部和北部低的特征。选取综合生态系统服务中等重要、高度重要和极重要区域作为生

态源地,共识别出 55 块生态源地,总面积为 7747.75 km²,以林地为主,占长株潭城市群总面积的 27.58%。生态源地平均面积为 140.87km²,最大斑块面积为 1529.06km²。空间上研究区东部和南部各 11 块生态源地,西部和北部分别为 17 块和 5 块,中部 11 块,具体生态源地分布如图 2 所示。

表 3 生态源地与生态廊道韧性指标体系

Table 3 Index system of ecological source and ecological corridor resilience

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	权重 Weight	指标层 Solution layer	权重 Weight	属性 Attribute
生态源地韧性 The resilience of ecological sources	生态源地稳定性	0.4540	核心区指数	0.2270	+
			斑块丰富度	0.2270	+
			边缘密度	0.0885	+
			景观形状指数	0.0885	+
			连通性指数	0.0885	+
	生态源地连通性	0.1770	整体连通性指数	0.0885	+
			生态源重要性	0.0600	+
			生态源数量	0.0131	+
			源地面积	0.0229	+
			源地与道路距离	0.0480	-
生态廊道韧性 The resilience of ecological corridors	生态源地外部因素	0.0960	源地与河流距离	0.0480	+
			核密度	0.0857	+
			连通性指数	0.2572	+
			整体连通性指数	0.2572	+
			廊道长度	0.0796	-
	生态廊道连通性	0.6000	廊道类型	0.1204	+
			廊道与道路距离	0.1000	-
			廊道与河流距离	0.1000	+

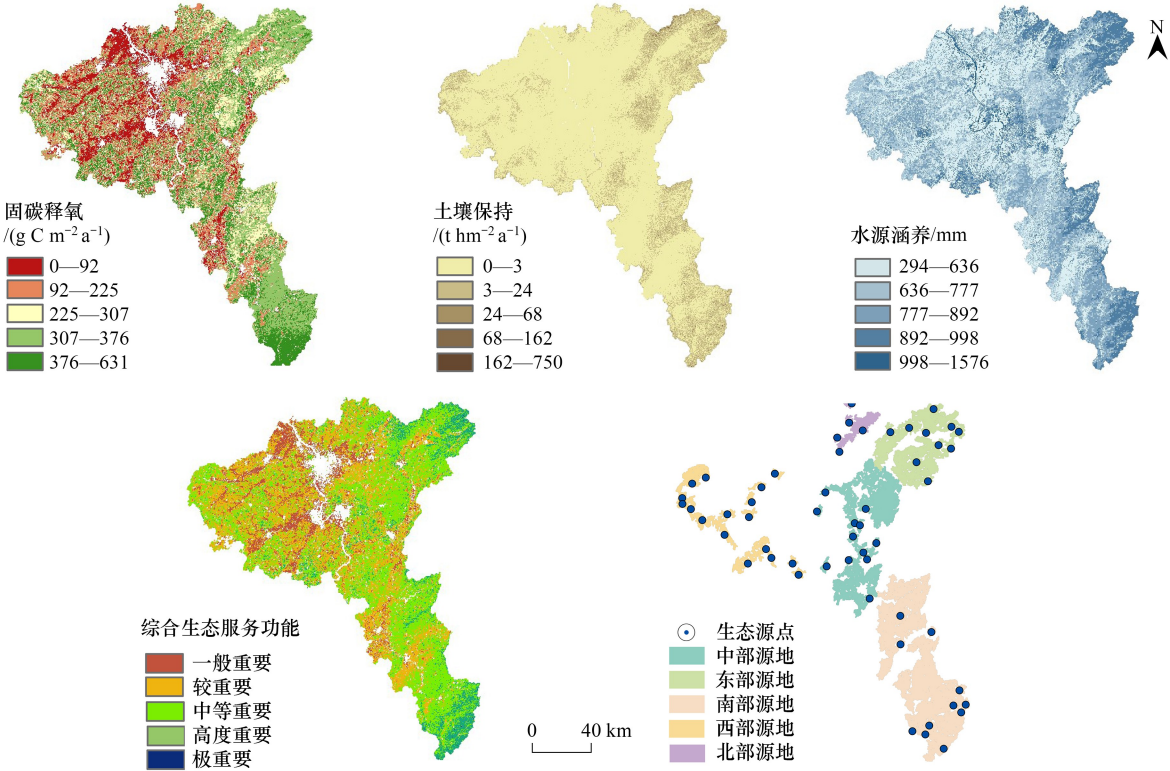


图 2 长株潭城市群 2020 年的生态系统服务功能与生态源地

Fig.2 The ecosystem services and ecological sources of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration in 2020

3.2 综合阻力面的构建

以土地利用类型、数字高程、坡度数据、归一化植被指数为源数据使用 ArcGIS 中重分类模块和栅格计算器模块计算长株潭城市群各要素阻力值,单因子阻力面和综合阻力面结果如图 3 所示。其中土地利用类型阻力值较高部分集中于城乡居民地和耕地,而林地阻力值较低。数字高程阻力随着海拔的增加逐步增大,使得长株潭东部和南部数字高程阻力值明显高于其他区域;坡度阻力值类似呈现出东部和南部高,西部和北部低的特征;归一化植被指数阻力值在水域和城乡居民地较高,其余区域阻力值较低。修正前综合阻力面对人类活动和自然因素的干扰体现不明显,修正后的综合阻力面更能体现人类活动的影响,且人为干扰对综合阻力面的影响远远大于自然因素的影响。

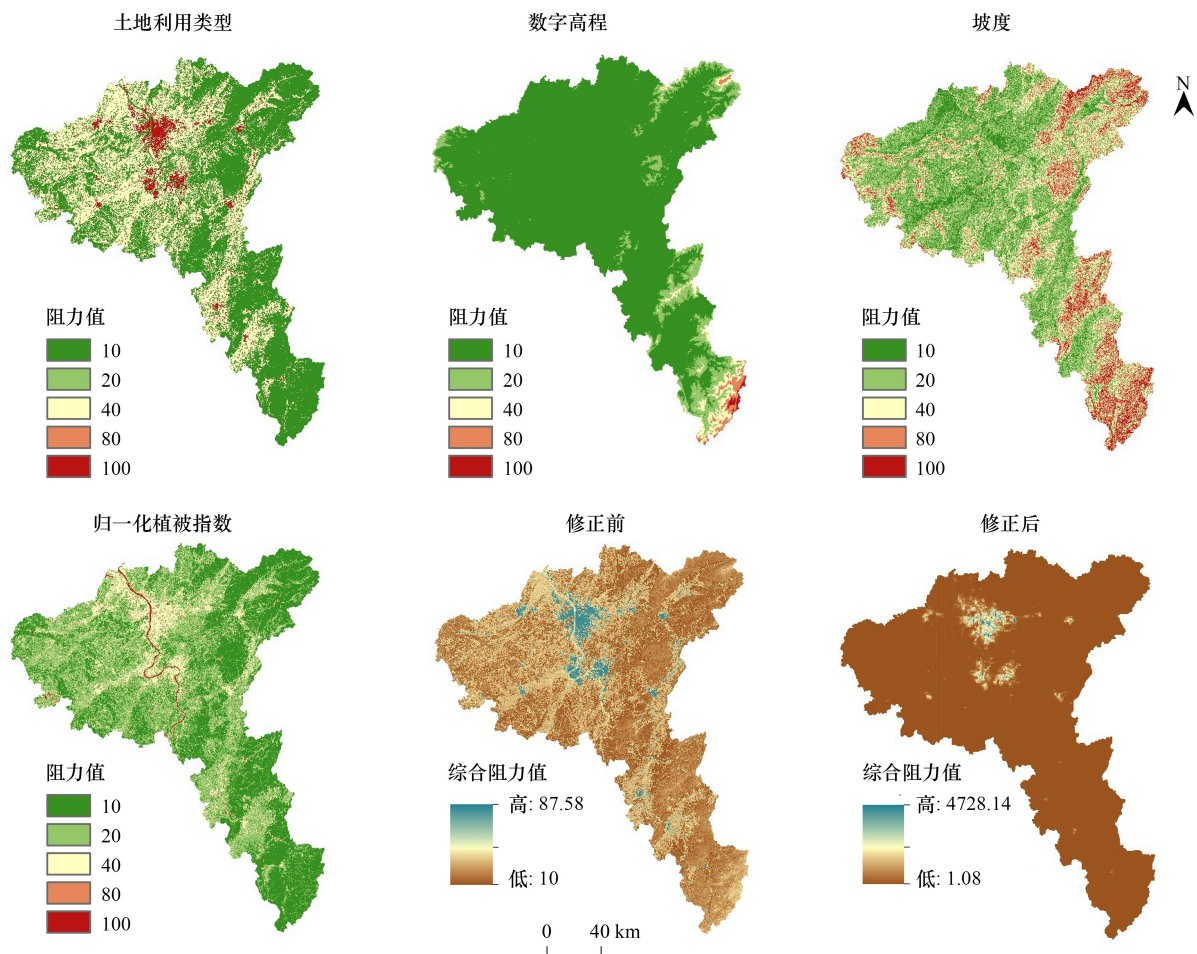


图 3 长株潭城市群 2020 年的单因子阻力面与综合阻力面

Fig.3 Single-factor resistance surface and comprehensive resistance surface of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration in 2020

3.3 廊道识别与生态安全格局构建

使用 ArcGIS 软件中的 Linkage Mapper 插件识别出研究区生态廊道共 113 条,廊道长度介于 0.04—102.70km 之间,总长度为 1458.97km,平均长度为 12.91km,如图 4 所示。空间分布上,研究区东部和南部区域由于生态源地整体性较高,生态廊道相对较短;研究区西部和北部生态源地较为分散,且源地面积较小、数量较多,致使 50km 以上的廊道主要集中在研究区西北部。此外研究区中心为城市区域,高度集中的城市建设对生态廊道的构建过程有强烈的阻隔效应。城市中心包围下生态源地仅能与东部和西部生态源地形成五条生态廊道。整体上,长株潭城市群生态廊道呈现出中疏外密的特征。

由识别出的生态源地和生态廊道构建长株潭城市群“一心一环”的生态安全格局,如图 4 所示。“一心”

指位于长株潭三市主要城区中心位置的生态源地(简称“绿心”),“绿心”总面积为 15.63km²。“绿心”在长株潭生态安全格局中具有极其重要的地位。一方面“绿心”处于长株潭三市主要城区的包围之中,具有维持城市发展与生态保护平衡的作用,需加强保护措施。另一方面“绿心”与连接“绿心”的生态廊道共同组成长株潭主要城区的自然屏障。“一环”指以“绿心”为中心,由长株潭城市群其他源地和廊道共同构成的类环状区域,“环”内生态源地和生态廊道将为长株潭城市群提供持续的生态系统服务功能。

3.4 生态韧性评估结果

本研究基于生态安全格局构建过程提出一套生态韧性的评估框架,为消除生态韧性各指标之间量纲的影响,在评估前对所有指标进行去量纲化。使用 ArcGIS 10.8、Conefor Sensinode 2.6 插件和 Fragstats 4.2 软件综合评估长株潭城市群生态源地和生态廊道的韧性,采用自然断点法将韧性指数分为五个等级,结果如图 5 所示。研究区 55 个生态源地的韧性指数介于 0.1265—0.4682 之间,韧性指数排名前三的生态源地分别位于株洲南部、株洲中部和长沙东部,韧性指数分别为 0.4682、0.3692 和 0.3444,三个源地的整体连通性以及各类景观指数均较高,这类生态源地在外界干扰下能尽快恢复到初始状态;研究区西部景观破碎度较大,源地斑块形状较复杂,受到外界干扰时恢复较慢,具有较低的生态韧性。生态源地韧性整体上呈现出东高西低、南高北低的特征。

生态廊道韧性方面,研究区 113 条生态廊道的韧性指数介于 0.0027—0.8002 之间。空间上韧性较高的生态廊道主要分布在研究区东部和南部,韧性较低的生态廊道分布在研究区中部、西部和北部。研究区中心两条生态廊道韧性指数分别为 0.0592 和 0.0245,均处于较低水平,该廊道处于长株潭三市主要建成区中心,周围路网密布,易受外界干扰且恢复能力较弱。该廊道是中部区域的核心廊道,一旦遭到破坏将影响整个长株潭城市群的生态安全,因此需对该生态廊道采取保护措施,充分发挥该廊道的辐射作用,确保研究区应对外部冲击的能力。

4 讨论

4.1 长株潭城市群生态安全格局构建与生态韧性评估

近年来,随着长株潭城市群的人口增长和城市化的快速扩张,城市群内的土地利用格局发生了巨大改变,生态系统服务也呈现出区域差异性^[40]。耕地和城乡居民地的扩张,致使大量生态用地被侵占,景观破碎化程

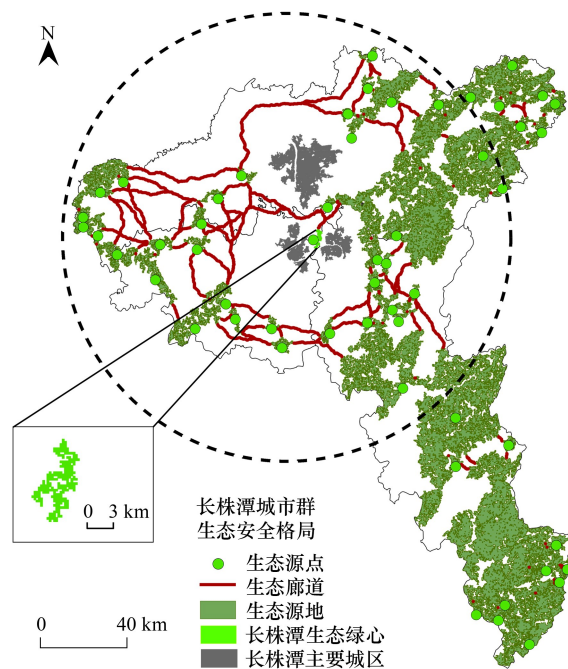


图 4 长株潭城市群 2020 年的生态安全格局

Fig. 4 The ecological security patterns of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration in 2020

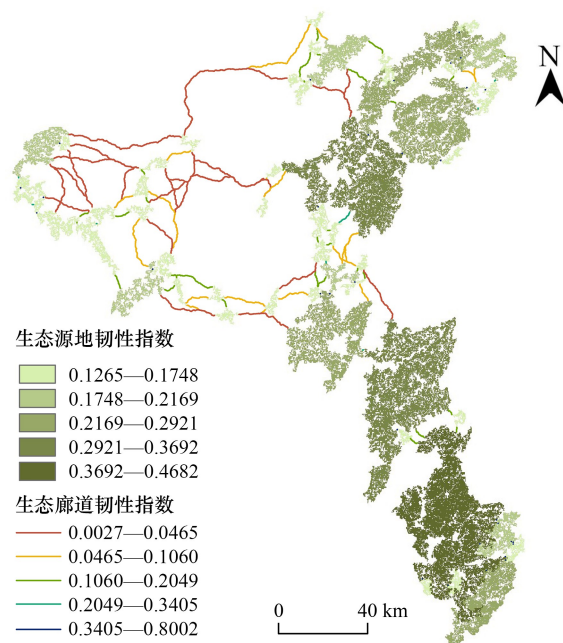


图 5 长株潭城市群 2020 年的生态源地韧性和生态廊道韧性

Fig. 5 The resilience of ecological sources and corridors of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration in 2020

度增加,生态源地面积减小以及生态廊道的缩短,加剧了城市发展与生态保护之间的矛盾。

本研究以长株潭城市群为研究区,基于生态系统服务重要性识别生态源地,结合夜间灯光数据和地形位指数修正综合阻力面,使用 Linkage Mapper 工具基于最小成本路径理论识别生态廊道,并提出了一套基于生态安全格局构建过程的生态韧性评估框架,并结合 Fragstats 和 Conefor Sensinode 软件对生态韧性进行综合评估。生态系统服务具有是国家实施生态补偿和构建生态安全屏障的重要基础和依据^[43]。研究发现,林地和城乡居民用地对生态系统服务的影响较大,林地作为自然资本,为城市群提供正向且稳定的生态系统服务,包括固碳释氧、土壤保持等^[44];而城乡居民用地则对生态系统服务有着负面影响,会加大城市的生态环境压力。因地制宜的选取生态系统服务有助于科学地识别生态源地^[49],确保所选源地既能维持生态系统自身提供的服务功能,又能保证生态系统对外界影响的抗干扰能力。利用夜间灯光数据和地形位指数修正基本阻力面充分考虑了长株潭城市群的城市扩张情况和地形地貌特征,相较于直接利用地类赋值的阻力面^[45]或仅考虑夜间灯光^[46]与地形位指数^[47]之中的某一个因素更具科学性,可细致描述物种迁移阻力的人为阻力和空间分异特征,保证廊道识别的精准性。研究构建的生态安全格局相较于已有研究^[34]更具系统性,强调源地与廊道之间的关联性,可有效缓解长株潭城市群中部生态用地“空心化”的趋势。

城市扩张和社会经济的发展将不可避免地导致区域生态系统的丧失和生态系统服务的退化^[15],这也是区域面临较大生态风险的主要原因。仅仅依靠构建生态安全格局无法较好地反映研究区生态环境的特性,且以往研究多是对生态安全格局中源地和廊道的定量描述^[50]。本研究在构建生态安全格局的基础上进一步进行生态韧性评估,且评估出的源地韧性和廊道韧性考虑了源地和廊道应对风险时的恢复特性^[28],有效地识别出长株潭城市群生态源地和生态廊道中较为薄弱的环节。长株潭城市群西部地区生态源地虽然提供较高的生态系统服务,但其连通性较差,面积较小,距离道路较近,面临外部冲击的可能性较大,且短时间难以恢复到原始状态,具有较低的韧性。中部地区廊道距离城乡居民区和道路较近,且廊道较长,相较于林地区域的生态廊道更易受到人为影响。总体来看长株潭城市群中部和西部地区属于高风险低韧性区域,在城市规划转型时期,可重点关注中部和西部地区的生态投入,提高该地区应对突发环境应急事件的能力。本研究可为缩小长株潭城市群东西部生态建设差距,促进长株潭城市群一体化发展提供参考。

4.2 研究不足与展望

生态安全格局的构建和生态韧性的评价是一个复杂的过程^[39],本文仅考虑了固碳释氧、土壤保持、水源涵养三项生态系统服务功能来确定生态源地,生态系统服务功能的选择和评估方法有待进一步完善。建议补充和完善生态系统服务类型,将气候灾害控制服务和人类休闲娱乐服务的功能纳入评估体系以识别生态源地。综合阻力面权重和生态韧性权重的确定采用的较为基础的层次分析法,未来研究可对赋权方法进行优化,采用熵权法、变异系数法等。基于生态安全格局进行生态韧性评估采用的正向和负向指标进行权重加权的方式,可能会导致部分指标被高估,部分指标被低估,后续研究可考虑融入社会和经济因素构建多维度生态韧性评估体系,以全面反映区域的生态韧性情况。

在新型城镇化和打造韧性城市的要求下,未来长株潭城市群防范生态风险和提升城市生态韧性主要指向三条路径。其一是巩固长株潭城市群生态绿心的重要作用,对绿心区实施空间管控分区,分禁止开发区、限制开发区和控制建设区。禁止开发区内,除生态建设、景观保护建设、必要的公共设施建设和当地农村居民住宅建设外,不得进行其他项目建设;在限制开发区内可以进行土地整理、村镇建设和适当的旅游休闲设施建设;在控制建设区内,禁止工业和其他可能造成环境污染的建设项目。其二是推动长株潭城市群西部生态建设,逐步清退荒废建设用地,充分发挥生态廊道的辐射作用,整合西部地区生态用地,将西部小而多的生态源地转化为较大的生态源地。其三是通过长株潭一体化规划引导和法律约束增强城市生态韧性,严格划定三区三线,加强城市群建设用地管控,设定并严守资源利用上限,合理布局城市绿地系统,将蓝绿生态网络穿插于城市建成环境中。

5 结论

本研究以长株潭城市群为研究对象,采用“源地识别-综合阻力面构建-廊道提取”的研究模式构建生态安全格局,并在生态安全格局基础上进行生态韧性评估,主要研究结论如下:

(1)研究区综合生态系统服务呈现出东部和南部高,西部、北部和中部低的空间分布特征,生态系统服务较高的地区多为林地,城乡居民地生态系统服务最低,呈现出“中空”的分布特征。

(2)研究区生态源地共 55 块,总面积为 7747.75km²,占长株潭城市群总面积的 27.58%,源地平均面积为 140.87km²,最大斑块面积为 1529.06km²。生态源地主要分布在研究区东部和南部,林地是生态源地的主要组成部分。

(3)研究区生态廊道共 113 条,廊道长度介于 0.04—102.70km 之间,总长度为 1458.97km,平均长度为 12.91km。生态廊道主要分布于研究区西部和北部,东部和南部整体景观连接度较好,生态廊道相对较少且较短,中部仅有五条生态廊道。

(4)研究区生态源地韧性指数介于 0.1265—0.4682 之间,整体上呈现出东高西低,南高北低的特征。韧性较高的生态廊道位于研究区北部,韧性较低源地的分布在研究区西部和中部。生态廊道韧性指数介于 0.0027—0.8002 之间,韧性较高的生态廊道主要分布在研究区东部和南部,韧性较低的生态廊道分布在研究区中部、西部和北部。西部和中部或将成为影响长株潭城市群生态安全的关键区域,在城市规划过程中应重点关注。

参考文献 (References):

- [1] 应凌霄,孔令桥,肖燚,欧阳志云.生态安全及其评价方法研究进展.生态学报,2022,42(5):1679-1692.
- [2] 陈利顶,周伟奇,韩立建,孙然好.京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策.生态学报,2016,36(22):7125-7129.
- [3] 叶鑫,邹长新,刘国华,林乃峰,徐梦佳.生态安全格局研究的主要内容与进展.生态学报,2018,38(10):3382-3392.
- [4] 汪翡翠,汪东川,张利辉,刘金雅,胡炳旭,孙志超,陈俊合.京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析.生态学报,2018,38(12):4307-4316.
- [5] 王少剑,崔子恬,林靖杰,谢金燕,苏坤.珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究.地理学报,2021,76(4):973-991.
- [6] 彭建,李慧蕾,刘焱序,胡熠娜,杨旸.雄安新区生态安全格局识别与优化策略.地理学报,2018,73(4):701-710.
- [7] 张晓琳,金晓斌,韩博,孙瑞,梁鑫源,李寒冰,周寅康.长江下游平原生态网络识别与优化——以常州市金坛区为例.生态学报,2021,41(9):3449-3461.
- [8] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局.生态学报,1999,19(1):8-15.
- [9] 于婧,汤昇,陈艳红,张蕾,聂艳,邓文胜.山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建——以张家界市为例.生态学报,2022,42(4):1290-1299.
- [10] 彭建,赵会娟,刘焱序,吴健生.区域生态安全格局构建研究进展与展望.地理研究,2017,36(3):407-419.
- [11] 陈利顶,傅伯杰,赵文武.“源”“汇”景观理论及其生态学意义.生态学报,2006,26(5):1444-1449.
- [12] 许文雯,孙翔,朱晓东,宗跃光,李杨帆.基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别.生态学报,2012,32(4):260-268.
- [13] 潘卫涛,岳邦瑞,姚龙杰,薛建锋,李军峰.耦合风险与服务的市域生态安全格局构建——以陕西省咸阳市为例.应用生态学报,2023,34(1):178-186.
- [14] 陆禹,余济云,陈彩虹,余宇晨,罗改改.基于粒度反推法的景观生态安全格局优化——以海口市秀英区为例.生态学报,2015,35(19):6384-6393.
- [15] 王云,潘竟虎.基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例.生态学报,2019,39(10):3455-3467.
- [16] 卫新东,林良国,冯小龙,王晓峰,孔德豪,蔺康莉,杨洁.神木市生态安全格局构建与生态问题定量诊断.生态学报,2023,43(1):82-94.
- [17] 陈昕,彭建,刘焱序,杨旸,李贵才.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.地理研究,2017,36(3):471-484.
- [18] 潘竟虎,刘晓.基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例.应用生态学报,2015,26(10):3126-3136.
- [19] 王玉莹,金晓斌,沈春竹,鲍桂叶,刘晶,周寅康.东部发达区生态安全格局构建——以苏南地区为例.生态学报,2019,39(7):2298-2310.

- [20] Ouyang X, Xu J, Li J Y, Wei X, Li Y H. Land space optimization of urban-agriculture-ecological functions in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China. *Land Use Policy*, 2022, 117: 106112.
- [21] 周璟, 王宏卫, 谈波, 马晨, 王晓琴, 代芯妍. 开都河流域生态安全格局构建与生态修复分区识别. *生态学报*, 2022, 42(24): 10127-10137.
- [22] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. *生态学报*, 2022, 42(1): 116-126.
- [23] 肖圣, 多玲花, 邹自力. 基于“风险—连通性—潜力”的南昌市生态韧性评估. *应用生态学报*, 2023, 34(3): 733-741.
- [24] 万慧琳, 王赛鸽, 陈彬, 夏楚瑜, 苏锐. 三江平原湿地生态风险评价及空间阈值分析. *生态学报*, 2022, 42(16): 6595-6606.
- [25] 石龙宇, 郑巧雅, 杨萌, 刘玲玉. 城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展. *生态学报*, 2022, 42(14): 6016-6029.
- [26] Meyer K, Hoyer-Leitzel A, Iams S, Klasky I, Lee V, Ligtenberg S, Bussmann E, Zeeman M L. Quantifying resilience to recurrent ecosystem disturbances using flow-kick dynamics. *Nature Sustainability*, 2018, 1(11): 671-678.
- [27] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [28] Yuan Y, Bai Z K, Zhang J N, Xu C C. Increasing urban ecological resilience based on ecological security pattern: a case study in a resource-based city. *Ecological Engineering*, 2022, 175: 106486.
- [29] 王思成, 运迎霞, 贾琦. 基于“源—流—汇”指数分析的天津市中心城区生态韧性评价. *西部人居环境学刊*, 2020, 35(1): 82-90.
- [30] 张磊, 王君一, 李茜, 高旭, 黄秋, 王丽君. 韧性视角下的天津市土地生态安全评价. *安全与环境学报*, 2018, 18(5): 2045-2051.
- [31] 聂文彬, 史琰, 杨凡, 南歌格, 包志毅. 基于综合生态安全格局的山地景观韧性体系构建研究——以浙江莫干山为例. *中国园林*, 2022, 38(2): 127-132.
- [32] Reyers B, Moore M L, Haider L J, Schlüter M. The contributions of resilience to reshaping sustainable development. *Nature Sustainability*, 2022, 5(8): 657-664.
- [33] 陈利顶, 孙然好, 孙涛, 杨磊. 城市群生态安全格局构建:概念辨析与理论思考. *生态学报*, 2021, 41(11): 4251-4258.
- [34] Bai H N, Weng L F. Ecological security pattern construction and zoning along the China-Laos Railway based on the potential-connectedness-resilience framework. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109773.
- [35] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 韩博, 李寒冰, 周寅康. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价. *生态学报*, 2023, 43(4): 1461-1473.
- [36] 曾永年, 何丽丽, 靳文凭, 吴孔江, 徐艳艳, 于菲菲. 长株潭城市群核心区城镇景观空间扩张过程定量分析. *地理科学*, 2012, 32(5): 544-549.
- [37] 李毅, 肖腊梅, 胡文敏, 易敏, 谢宜章. 长株潭核心区土地利用变化时空格局及驱动力多维分析. *经济地理*, 2021, 41(7): 173-182.
- [38] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价——以长株潭城市群为例. *生态学报*, 2020, 40(16): 5478-5489.
- [39] 朱陇强, 郭泽呈, 肖敏, 秦梦瑶, 颜耀文. 干旱旱区县域生态安全格局构建——以临洮县为例. *生态学报*, 2022, 42(14): 5799-5811.
- [40] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 王炎, 周旺明, 周莉, 于大炮, 赵福强. 基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例. *生态学报*, 2020, 40(18): 6486-6494.
- [41] Yu D Y, Shi P J, Han G Y, Zhu W Q, Du S Q, Xun B. Forest ecosystem restoration due to a national conservation plan in China. *Ecological Engineering*, 2011, 37(9): 1387-1397.
- [42] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 365-376.
- [43] 杜世勋, 刘海江, 张梦莹, 王亚璐, 刘雪佳, 刘军会. 水源涵养型国家重点生态功能区生态系统服务功能评估. *生态学报*, 2022, 42(11): 4349-4361.
- [44] 韩宝龙, 束承继, 蔡文博, 贾倩, 王效科, 欧阳志云. 植被群落特征对城市生态系统服务的影响研究进展. *生态学报*, 2021, 41(24): 9978-9989.
- [45] 彭洁, 蔡海生, 张学玲, 张婷, 吕大伟. 基于主导生态功能的抚河流域国土空间生态安全格局分析. *生态学报*, 2022, 42(18): 7430-7444.
- [46] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Urban Ecosystems*, 2017, 20: 701-714.
- [47] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 王鑫, 张瑜, 张蕾. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1190-1200.
- [48] 王琦, 王辉, 虞虎. 基于生态安全格局的国家公园边界划定——以雅鲁藏布大峡谷国家公园为例. *自然资源学报*, 2023, 38(4): 951-965.
- [49] Dabalù A, Dahdouh-Guebas F, Dunn D C, Everett J D, Lovelock C E, Hanson J O, Buenafe K C V, Neubert S, Richardson A J. Priority areas to protect mangroves and maximise ecosystem services. *Nature Communications*, 2023, 14: 5863.
- [50] 杨帅琦, 何文, 王金叶, 李何英, 姚月锋. 基于MCR模型的漓江流域生态安全格局构建. *中国环境科学*, 2023, 43(4): 1824-1833.