

DOI: 10.20103/j.stxb.202210192969

安睿, 窦超, 陆砚池, 仝照民, 王楠楠, 刘艳芳, 庞惠心, 刘耀林. 耦合 SOM-MCR 模型的多特征生态安全格局构建——以武汉城市圈为例. 生态学报, 2023, 43(22): 9486-9499.

An R, Dou C, Lu Y C, Tong Z M, Wang N N, Liu Y F, Pang H X, Liu Y L. Construction of multi-feature ecological security patterns by coupling SOM-MCR Model: A case study of Wuhan Metropolitan Area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9486-9499.

耦合 SOM-MCR 模型的多特征生态安全格局构建 ——以武汉城市圈为例

安睿, 窦超, 陆砚池, 仝照民, 王楠楠, 刘艳芳, 庞惠心, 刘耀林*

武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072

摘要: 面向“绿色城市圈”发展理念, 构建武汉城市圈生态安全格局是实现区域经济社会和生态协同发展的重要途径。传统研究采用的多指标叠加分析丢失了各因子蕴含的原始信息, 仅可以识别同质化生态源地。将自组织映射神经网络模型(SOM)融入“重要性-敏感性-连通性”框架, 依据生态系统服务组合划分生态功能区→识别多类型生态源地; 综合自然因素与人类影响修正生态阻力面, 并应用最小累积阻力模型(MCR)构建多特征生态安全格局。主要结论如下: 武汉城市圈存在两类典型“高重要-低敏感-高连通”的生态源地, 包括 9756 km² 的粮食供给区(孝感市、天门市、潜江市和仙桃市)和 6791 km² 的固碳释氧区(黄冈市东北和咸宁市东南), 应作为生态安全核心区; 低连通粮产地分布于武汉市近郊与鄂州市, 低连通碳汇源地分布在黄石市东南, 宜作为生态保护功能区; 共识别 39 条生态廊道, 按照两端源地属性可划分为粮产连通轴、碳汇连通轴和跨类连通轴; 综合构建了“一环、三翼、多联通”的武汉城市圈多特征生态安全格局。该格局有机融入了生态功能区划理念, 有助于城市圈“因地制宜”采取相应的保护与修复策略。

关键词: 生态安全格局; 重要性-敏感性-连通性; 多分类源地; 自组织映射神经网络(SOM); 最小累积阻力模型(MCR)

Construction of multi-feature ecological security patterns by coupling SOM-MCR Model: A case study of Wuhan Metropolitan Area

AN Rui, DOU Chao, LU Yanchi, TONG Zhaomin, WANG Nannan, LIU Yanfang, PANG Huixin, LIU Yaolin*

School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Under the guidance of “green city circle” concept, building the ecological security pattern of Wuhan Metropolitan Area contributes to realizing the synergistic development of regional economy, society, and ecology. The multi-indicator overlay analysis adopted in traditional studies loses the original information embedded in each factor and can only identify homogeneous ecological sources. This study incorporated a Self-Organizing Mapping Neural Network model (SOM) into the importance-sensitivity-connectivity framework, which could delineate ecologically functional areas based on ecosystem service portfolios and then identify multi-type ecological sources. After modifying the ecological resistance surface by integrating natural factors and human influence, the Minimum Cumulative Resistance model (MCR) was applied to form the multi-feature ecological security pattern. The main conclusions are as follows: there were two types of typical “high importance-low sensitivity-high connectivity” ecological sources in Wuhan Metropolitan Area, including 9756 km² grain production area (Xiaogan, Tianmen, Qianjiang, and Xiantao) and 6791 km² carbon sink area (northeast of Huanggang and southwest of Xianning), which should be regarded as the ecological security core area. Besides, low-connected grain

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42230107)

收稿日期: 2022-10-19; 网络出版日期: 2023-10-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yaolin610@163.com

production sources were located in the suburbs of Wuhan and Ezhou, and low-connected carbon sink sources were located in the southeast of Huangshi, which were suitable as ecological protection functional areas. Furthermore, 39 ecological corridors were identified, which could be divided into grain production connecting axis, carbon sink connecting axis and cross category connecting axis according to the source attributes at both ends. In summary, a multi-feature ecological security pattern of “One Ring, Three Wings and Multiple Connections” were established in Wuhan Metropolitan Area. This pattern organically integrated the concept of ecological function zoning, which could help the city circle to adopt appropriate protection and restoration strategies according to local conditions.

Key Words: ecological security patterns; importance-sensitivity-connectivity; multi-type ecological sources; self-organizing mapping neural network model; minimum cumulative resistance model

近年来,高强度土地开发等人类活动直接影响了地球表层生态系统的连通性和稳定性,引发了诸多生态环境问题,如生态系统退化、水土流失等^[1-3]。人与自然的矛盾日趋加剧,直接危及区域生态安全、影响社会经济可持续发展^[4]。对此,俞孔坚教授首次在国际上提出了建立生态安全格局的理论和方法^[5],该方法综合考虑了生态景观元素、空间位置和联系强度,逐渐成为维持区域物质流通和能量循环、保障生态系统健康和安全的重要途径^[6]。党的十八大报告首次将“生态安全格局构建”提升到战略高度,融入经济、政治、文化和社会建设的全过程。2020年自然资源部印发的《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》也强调“构建连续、完整、系统的生态保护格局,优先确定国土保护空间”^[7]。武汉城市圈积极响应国家总要求,提出“将经济协同发展的武汉城市圈,扩展为生态协同发展的‘绿色城市圈’”目标。因此,面向国土空间规划需求,科学、合理地构建武汉城市圈生态安全格局具有重要作用^[8]。

“生态源地识别→生态阻力面设置→生态廊道提取”是生态安全格局构建的基本模式^[9]。其中,生态源地是物种生存和扩散的起点,与周围环境发生复杂的物质、能量和信息交换^[10]。直接使用自然保护区、风景名胜等作为生态源地易受行政管制因素影响,易忽略潜在的生态重要区^[2]。一般而言,生态源地需要为人类提供重要生态系统服务功能;抵抗环境变化带来的生态问题;维持自身景观过程和生态流的完整性^[11-12]。因此,已有研究常设定“重要性-敏感性-连通性”多维指标体系^[2,13],采用多因素叠加分析和自然间断点分级方法,将具有较高评价结果的斑块间接识别为生态源地。生态阻力面反映了生态过程的空间障碍,根据土地覆被分类赋值忽略了相似用地内部的阻力差异,因此研究者常综合自然因子(植被覆盖度、地形起伏度等)与人口活动(不透水面指数、夜间灯光等)修正阻力面^[14-15]。生态廊道是物质和能量在源地间交互的最短通路,常采用最小累积阻力模型(MCR)^[16-18]、电路理论^[19-20]、蚁群模型^[21]等,其中MCR模型能较好拟合不同景观对生态流的阻力作用,是当前采用的主流方法。

虽然研究者常构建多维指标体系以准确识别生态源地,但传统的叠加分析掩盖了这些因子蕴含的原始信息,仅能识别出同质化的生态源地^[13,22]。这存在三个潜在问题:①不同源地的主导生态系统服务存在差异,忽略源地的类别特征可能误导政策实施;②源地是指标加权求和后综合最优的体现,单一指标的突出可能掩盖其他指标的劣势,导致生态源地错判;③加权过程需要人为确定因子权重和分级标准,识别结果缺乏客观性和可比性。因此,本研究拟采用自组织映射神经网络(SOM)算法识别多分类的生态源地^[23]。SOM模型是一种无监督的降维→聚类算法,其无监督特性可避免主观评价、赋权和分级过程,通过降维将评价因子蕴含的高维信息映射到低维平面上,而后根据低维平面上的因子组合特征将研究单元划分至聚类簇^[24]。该模型定量分析了生态系统服务的地域差异性和相似性,可实现保留因子原始信息的生态分区过程^[25]。

综上所述,本文将SOM模型融入“重要性-敏感性-连通性”框架,可根据生态系统服务组合划分生态功能区→识别多类型生态源地;继而采用最小累积阻力模型(MCR)提取生态廊道,结合两端源地属性对廊道分类;由此构建了武汉城市圈的多特征生态安全格局。相比于传统方法,多特征生态安全格局融合了生态功能区划理念,着重考虑了不同区域提供各类型生态系统服务的能力及其组合特征^[26-27]。这对城市圈“因地制宜

宜”采取相应的保护与修复策略,实现区域可持续发展具有重要作用。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

“武汉都市圈”又称“1+8 城市圈”(图 1),是由武汉市及其周边 100 km 半径内黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、天门和潜江 9 市组成的区域经济联合体。“十四五”以来,“推动长江中游城市群协同发展,加快武汉都市圈建设,打造全国重要增长极”成为国家战略。城市圈系统内要素、结构和功能的联系日益密切,成为宏观格局、过程与决策的热点研究尺度^[28–29]。截至 2020 年末,武汉城市圈以湖北省 1/3 的土地面积(5.78 万 km²)承载了超 50%的人口(3096 万)和 60%的 GDP(2.63 万亿元),区域经济协同发展成效显著。同时,面向生态文明建设与区域高质量发展要求,9 市共同签署了《武汉城市圈城市生态环境合作协议书》,明确了从经济协同转向生态协同(绿色城市圈)的发展目标。因此,协调经济发展与生态保护的双重需求,科学、合理地构建武汉城市圈生态安全格局具有重要作用^[30–31]。

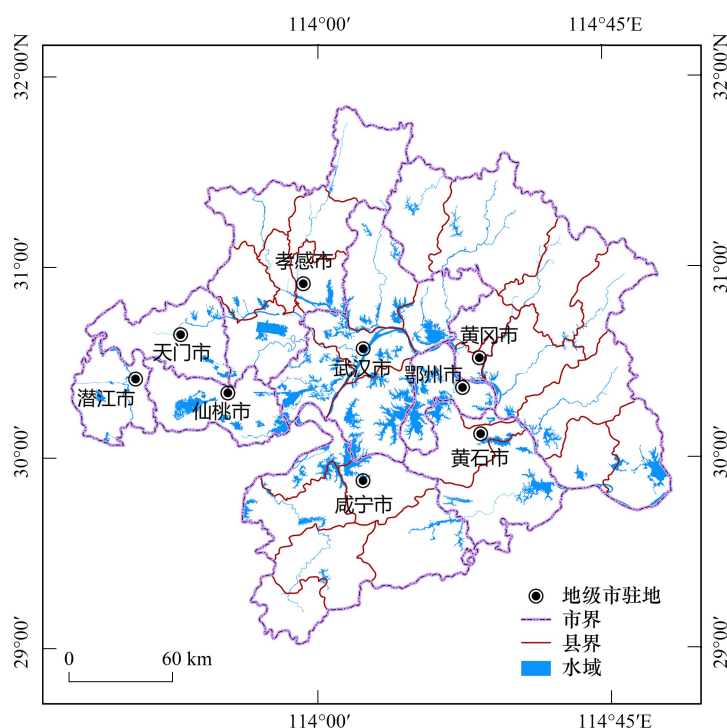


图 1 武汉城市圈行政区划图

Fig.1 Administrative division of Wuhan Metropolitan Area

1.2 数据来源

本文选用了测绘、遥感、气象、土壤等多源数据,基准时点为 2020 年,基准分辨率为 30 m。具体数据来源如下:土地利用数据(GLC_FCS30)来源于地球大数据科学工程数据共享服务系统(<https://data.casearth.cn/sdo/detail/5fbc7904819aec1ea2dd7061>);数字高程模型(DEM)采用地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 GDEM V2;气象数据(年均温度和降水)来源于中国气象科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>);NPP/VIIRS 夜间灯光数据采集自科罗拉矿业大学学术网站(https://eogdata.mines.edu/nighttime_light/annual/v21/),年平均水分蒸散量数据来源于 NASA 的 8 天合成 MOD16A2 数据产品(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v061/>);土壤数据来源于世界土壤数据库 HWSD(<https://www.fao.org/soils-portal/>);归一化植被指数(NDVI)、基础地理信息数据(道路网络等)均由湖北省自然资源厅提供。

2 研究方法

2.1 生态源地识别

2.1.1 生态系统服务重要性和生态敏感性评价因子设计

生态源地是物种生存、扩散与维持的起点,应具备较高的生态系统服务功能和较强的抗干扰能力^[12]。因此,本文首先计算生态系统服务重要性(生境质量、水源涵养、固碳释氧、粮食供给)、生态敏感性(水土流失敏感性、地质灾害敏感性)共6项源地识别指标^[2],详细信息如表1:

表1 生态系统服务重要性 & 生态敏感性评价指标体系

Table 1 Index system of the ecological service importance & the ecological sensitivity

目标层 Target	指标层 Index	模型选择 Model	定量方法(单位) Quantitative method (unit)	参考文献 References
生态系统服务重要性 Ecological service importance	生境质量	InVEST 模型生物多样性模块	$Q_{xj} = H_{xj} \times \left[1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj} + k^2} \right]$ 。其中, Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数; D_{xj} 为生境退化度,代表土地利用类型 j 栅格 x 的生境退化程度; H_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境适宜性指数; k 为半饱和常数	[16]
	水源涵养	水量平衡方程	$WCF = SC/WY$, $SC = P - E - SR$, $WY = P - E$ 。其中,WCF为栅格水源涵养量(mm); SC 为实际蓄水量(mm); WY 为产水量(mm); P 、 E 、 SR 分别为多年平均降水量(mm)、水分年均蒸散量(mm)和地表径流量(mm)	[32]
	固碳释氧	CASA 模型	$P_{NP}(x, t) = R_{APA}(x, t) \times \varepsilon(x, t)$ 。其中, $P_{NP}(x, t)$ 为栅格 x 在植被在 t 时段内的净初级生产力($g\ m^{-2}月^{-1}$); $R_{APA}(x, t)$ 为栅格 x 植被在 t 时段内所吸收的光合有效辐射($MJ\ m^{-2}月^{-1}$); $\varepsilon(x, t)$ 为栅格 x 植被在 t 时段内的光能转化率(g/MJ)	[33]
	粮食供给	空间插值法	按区域耕地栅格上年归一化植被指数 NDVI 在空间上分配区域年总粮食产量(统计年鉴)	[9]
生态敏感性 Ecological sensitivity	水土流失敏感性	RUSLE 模型	$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$ 。其中, A 为实际年平均土壤侵蚀模数($t\ km^{-2}a^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子($MJ\ mm\ km^{-2}h^{-1}a^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子($t\ h\ MJ^{-1}mm^{-1}$); L 和 S 分别为坡长和坡度因子; P 为土壤保持措施因子	[18]
	地质灾害敏感性	Binary Logistic 回归方程	$P = \frac{1}{1 + e^{-(2.971 \times R + 2.937 \times L + 1.826 \times S - 9.82 \times V - 2.278 \times D_1 + 0.793 \times D_2 + 5.068)}}$ 。其中, P 为地质灾害敏感性指数; R 为降水量(mm); L 为坡长; S 为坡度($^{\circ}$); V 为植被覆盖度; D_1 为距河流的距离(m); D_2 为距公路的距离(m)	[13]

2.1.2 基于自组织映射神经网络的多分类生态源地识别

已有研究常采用多指标综合评价后分级的方法识别生态源地,存在分级标准不一致、丢失因子原始信息的问题。SOM 算法可以将多维评价因子蕴含的信息映射至低维空间,根据特征组合将研究单元划分至各聚类簇,实现保留因子原始信息的生态功能分区^[24,34]。因此,基于上步构建的“重要性—敏感性”指标框架,本文应用 SOM 模型将研究区划分为多类型生态系统服务簇,将其中具备“高质量—低敏感”复合生态系统服务功能的聚类簇作为初判生态源地。

SOM 模型的网络结构由输入层和竞争层(输出层)组成。其中输入层神经元数为 n , $X^P(P = 1, 2, \dots, n)$;竞争层是由 m 个神经元组成的一维或二维平面阵列(常用六边形网格表示),记为 $A_j(j = 1, 2, \dots, m)$ 。输入层与竞争层神经元是全连接的。其迭代过程描述如下^[23,25]:

①模型初始化。模型随机抽取样本向量 X^P 中部分数据作为训练集,并随机初始化竞争层内部各个神经元的权重 $W_j(j = 1, 2, \dots, m)$,经归一化处理得 $\hat{X}^P$ 和 $\hat{W}_j$,设置初始学习率 $\alpha(0)$ 、初始优胜邻域 $N_j^*(0)$ 及其半径 $\eta(0)$ 以及最大迭代次数 $T_{\max}$ 。

②寻找获胜神经元。在竞争层中比较样本向量 $\hat{X}^p$ 和权值向量 $\hat{W}_j$ 的相似度。欧式距离越小,相似度越大。确定与 $\hat{X}^p$ 相似度最高的权值向量 $\hat{W}_j^*$,对应的获胜神经元记为 j^* 。

$$d_j = \|\hat{X}^p - \hat{W}_j\| = \sqrt{(x_1 - w_{j1})^2 + (x_2 - w_{j2})^2 + \dots + (x_k - w_{jk})^2}$$

$$\|\hat{X}^p - \hat{W}_j^*\| = \min_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} \{d_j\}$$

③定义优胜邻域并更新权值。以获胜神经元 j^* 为中心,确定 t 时刻的优胜邻域 $N_{j^*}(t)$ (邻域范围一般随迭代过程衰减);采用 Kohonen 规则更新该邻域内神经元权重 $w_i(t+1) = w_i(t) + \eta(t, N)(x - w_i(t))$,其中 $\eta(t, N)$ 为迭代次数 t 和拓扑距离 N 的关系式,优胜邻域外的神经元权值不变。

④更新学习率和邻域函数,并重新对权值做归一化处理。从第②步开始重复,当迭代次数 $t > T_{\max}$ 或权值趋于稳定时训练结束,输出聚类结果。

2.1.3 考虑景观连通性的生态源地分级

生态源地斑块的连通性是指征生态系统稳定性和整体性的关键因素之一^[10,13]。因此,考虑“连通性”特征对初判生态源地进行分级是必要的。相较于整体连通性指数(IIC)的二元定义(1为连通,0为不连通),基于斑块间距离构建的可能连通性指数PC更具合理性;进一步计算斑块重要性指数dPC_i,它通过比较移除*i*斑块前后整个区域PC值的变化量来指征重要性,值越高表示该斑块对景观连通性的保持越重要。公式如下:

$$I_{pc} = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_i \times a_j \times P_{ij}^*}{A_L^2}$$

$$dPC_i = \frac{I_{pc} - I_{pc \text{ remove}}^i}{I_{pc}} \times 100\%$$

式中, $I_{pc} \in [0, 1]$ 表示景观中所有斑块的连通性指数。 n 表示斑块总数, a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和斑块 j 的面积, A_L 是研究区的总面积, P_{ij}^* 是物种在斑块 i 和斑块 j 之间扩散的概率; dPC_i 代表斑块 i 的重要性指数, $I_{pc \text{ remove}}^i$ 是去除 i 斑块后的连通性指数。

2.2 生态阻力面构建

生态过程(如物种迁徙)会受到自然条件和人为活动的阻碍,生态阻力面可以有效反映近地表的水平阻力^[1]。采用专家打分法初步设置各土地利用类型的基本阻力系数:林地 1,水田 20,旱地、草地 30,水体 50,城镇建设用地 500,其他用地 400。为体现同一用地类型内部差异,综合考虑地形起伏度(自然阻力)和夜间灯光指数(人类影响)对基本阻力面进行修正,具体如下式所示^[12-13]:

$$R_i = R_0 \times (0.5 \times \frac{R_i}{R_a} + 0.5 \times \frac{NL_i}{NL_a})$$

式中, NL_i 为栅格 i 的夜间灯光指数; NL_a 为栅格 i 对应的景观类型 a 的平均灯光指数; R 为基于景观类型赋值的栅格 i 的基本阻力系数。

2.3 生态廊道提取

生态廊道是源地间能量和物质流动的载体,是保持区域间生态过程连通性、完整性的关键组分^[2]。采用最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型综合考虑源、距离和景观介面三种因素,计算物种在不同源地间运动需要耗费的代价,选取最小累积阻力路径作为生态廊道。本文拟根据廊道两端源地的类型,对廊道实施分类管控。

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

式中, MCR 为最小累积阻力值; D_{ij} 为物种从源地 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 为景观单元 i 对物种运动的阻

力系数; $f_{\min}$ 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务重要性和生态敏感性评价结果

基于生态系统服务重要性和生态敏感性的单因子评价结果,采用自然间断点分为低、较低、中等、较高和高级(图2)。其中生境质量、水源涵养和固碳释氧功能高值区主要位于黄冈市北部、咸宁市和黄石市东南部等地。其中,黄石市位于大别山南麓,咸宁市和黄石市地处幕阜山北麓,区域内山地和丘陵地貌占比高,受

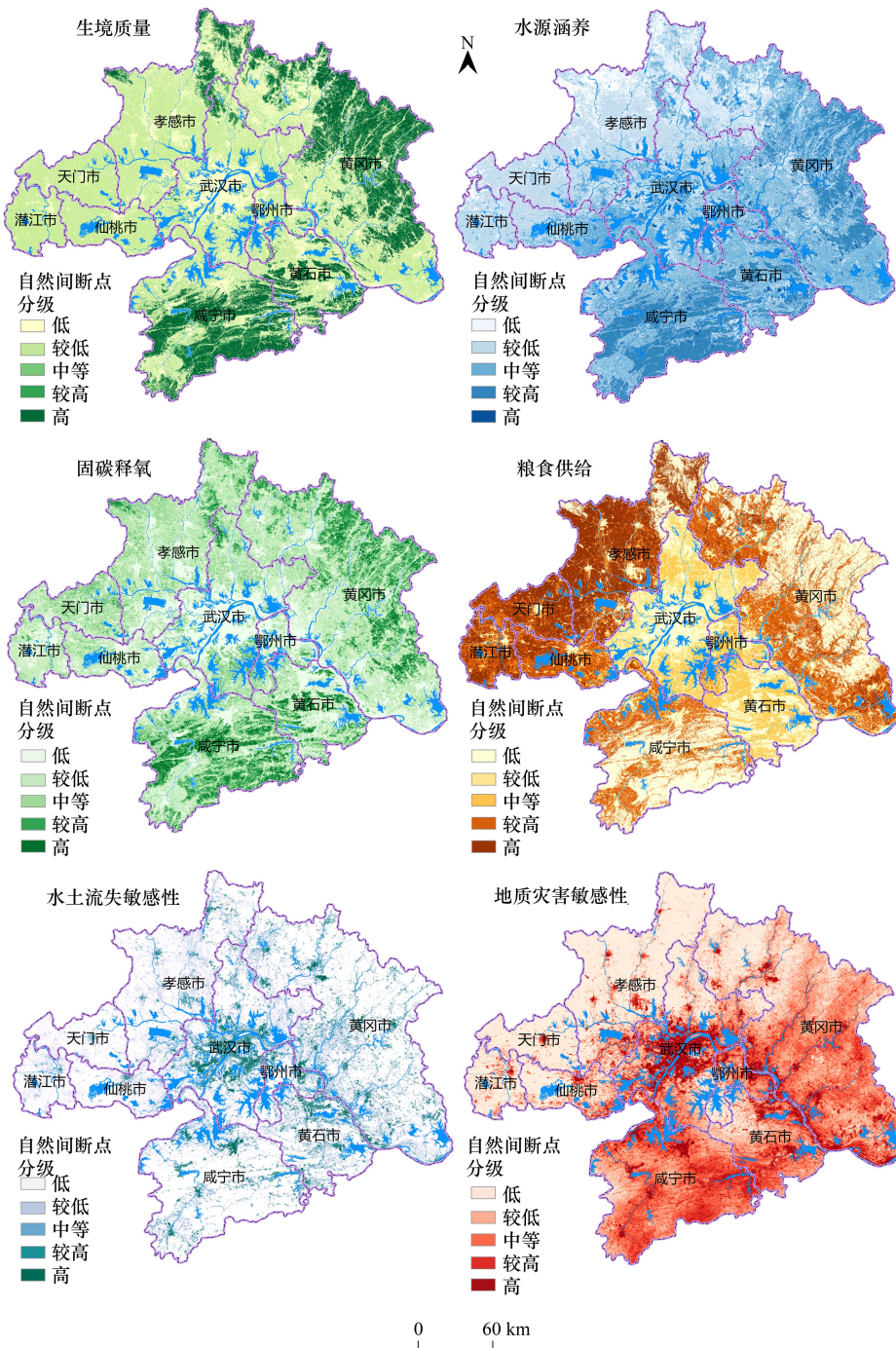


图2 生态系统服务重要性 & 生态敏感性空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the ecological service importance & the ecological sensitivity

人类活动影响小且植被覆盖度高。粮食生产功能高值区主要位于孝感市南部、天门市、潜江市和仙桃市,这些区域地处江汉平原、土地肥沃,是重要的粮棉油生产基地^[31]。

水土流失高风险区多沿境内主要河流、湖泊延伸,在大型建成区周边集聚分布,长江、汉江及梁子湖等大型河湖水岸的城市建成区应予以关注。地质灾害高风险区主要出现在各城市建成区及东部山地丘陵区,建成区缺乏植被覆盖、山地坡长坡度较大是重要成因。

3.2 基于 SOM 与景观连通性的生态源地初步识别及修正

3.2.1 基于 SOM 的生态系统服务重要性—生态敏感性聚类

将上述 6 维度评价因子输入 SOM 模型,设置竞争层维度为 10×10 ,初始学习率为 2,应用 MiniSom 程序包运行,迭代在 1500 次后趋于稳定;模型输出 100 维的权重数组,每一数组包含 6 个因子值,进一步使用 K-means 聚类,最小的 Davis-Bouldin 指数对应的聚类数为 5^[34]。由此,研究区被划分为 5 类典型的“重要性—敏感性”组合簇(图 3)。根据簇内多维因子的权重组合命名,簇 1:高生境低敏感粮食供给区;簇 2:高生境高敏感粮食供给区;簇 3:灾害敏感区;簇 4:高生境低敏感固碳释氧区;簇 5:低生境低敏感粮食供给区。

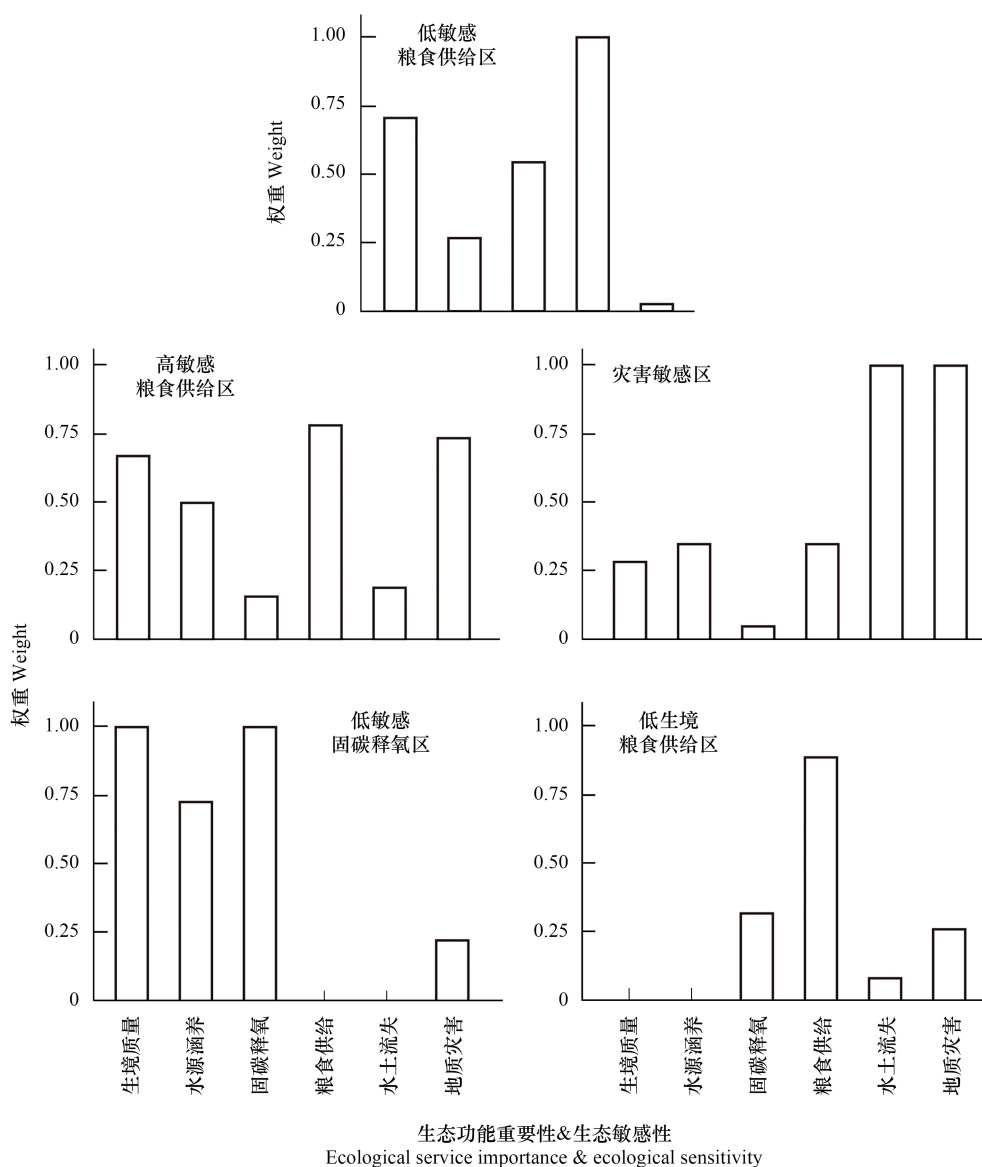


图 3 各“重要性-敏感性”聚类簇权重组合

Fig.3 Weight combination of each "importance-sensitivity" cluster

如表 2 和图 4 所示,簇 1 集中分布在孝感市、天门市、潜江市和仙桃市(占区域总面积均超过 50%),这些区域地面平坦、受人类活动影响少、生境质量较好且具备一定的碳汇能力,适宜大范围连片的种植业生产。簇 2 零散分布在武汉市周边,以及鄂州市、黄冈市的长江沿岸,这些地区生境质量较好,承担一定的粮食生产功能,但临近城际道路、易发地质灾害。簇 3 集中分布在各城市的建成区周边,武汉市占比最高(16.88%),区域开发程度高、植被覆盖度低,易发地质灾害和水土流失^[10]。簇 4 集中分布在黄冈市(40.48%)、黄石市(31.99%)和咸宁市(51.24%),区内生境质量高、具有良好的水源涵养和固碳能力。簇 5 主要分布在孝感市、黄冈市和咸宁市的山间带,这些零散耕地坡度较大,生境质量和水源涵养能力均较差。

表 2 各“重要性—敏感性”聚类簇面积统计

Table 2 Area statistics of each “importance-sensitivity” cluster

行政区 District	低敏感粮食供给区 Food supply area with low sensitivity		高敏感粮食供给区 Food supply area with high sensitivity		灾害敏感区 Disaster sensitive area		低敏感固碳释氧区 Carbon sequestration area with low sensitivity		低生境粮食供给区 Food supply area with low habitat quality	
	面积/ km ²	占比/%	面积/ km ²	占比/%	面积/ km ²	占比/%	面积/ km ²	占比/%	面积/ km ²	占比/%
武汉市	2826	40.11	1393	19.77	1189	16.88	455	6.46	1182	16.77
黄石市	824	20.18	651	15.95	544	13.32	1307	31.99	758	18.57
鄂州市	537	39.79	344	25.50	194	14.40	76	5.59	199	14.72
孝感市	4747	55.60	413	4.84	310	3.63	1227	14.38	1841	21.56
黄冈市	2898	17.58	1583	9.60	1371	8.31	6675	40.48	3962	24.03
咸宁市	1201	13.23	939	10.35	644	7.10	4650	51.24	1641	18.08
仙桃市	1754	72.22	414	17.04	57	2.33	2	0.08	202	8.33
天门市	2165	84.66	65	2.54	35	1.37	4	0.15	288	11.28
潜江市	1687	86.62	74	3.81	36	1.85	3	0.17	147	7.54
城市圈	18640	34.83	5877	10.98	4380	8.18	14399	26.91	10220	19.10

3.2.2 考虑景观连通性的生态源地分级

簇 1 和簇 4 均具备高生境质量和低生态敏感性,分别承担了粮食生产功能和固碳释氧功能,因此我们提取出这两类生态簇分别作为 I、II 类生态源地(图 5)。以 50 km² 为阈值过滤细碎图斑后,我们计算了斑块重要性指数 dPC,以 1、3 为间断值,划分出低、中、高连通性的生态源地^[13]。如表 3 和图 5 所示,武汉城市圈源地总面积为 22539 km²,空间分布不均(四周多、中心少)。其中高连通的 I 类源地面积占 43.29%,连片分布在孝感市、天门市、仙桃市和潜江市;高连通的 II 类源地占 30.13%,集中分布在黄冈市东北和咸宁市东南部。由于源地和建设用地冲突强烈,部分区域生境相对破碎。武汉市、鄂州市以低连通 I 类源地为主(超过 60%),黄石市以低连通 II 类源地为主(68.02%)。

至此,我们成功将 SOM 模型融入“重要性-敏感性-连通性”框架,识别出两类“高重要、低敏感和高连通”的生态源地,可作为多特征生态安全格局构建的基础。

3.3 耦合 MCR 的生态廊道识别及多特征生态安全格局构建

3.3.1 生态阻力面构建

依据地类赋值的基本阻力面,各城市建成区阻力最

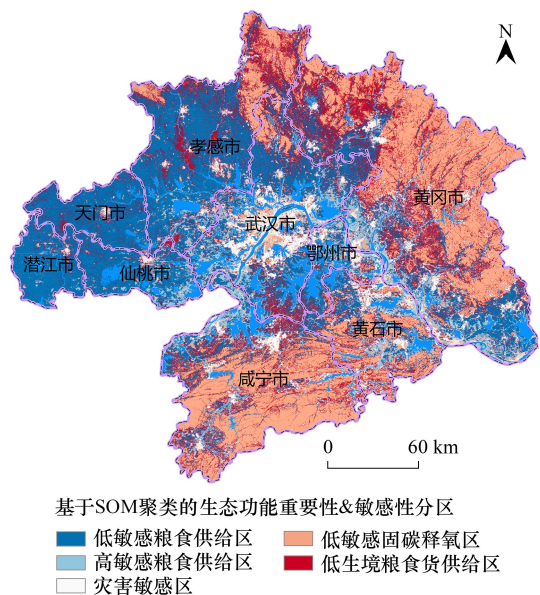


图 4 各“重要性-敏感性”聚类簇空间分布

Fig.4 Spatial distribution of each “importance-sensitivity” cluster

SOM: 自组织映射神经网络 Self-organizing mapping neural network model

高,黄冈市北部、黄石市和咸宁市东南部林区阻力值最低;其他区域以水田为主,导致孝感市、天门市等大范围区域阻力值均为 20。修正后的生态阻力面融合了自然环境和人类活动的影响,武汉市—鄂州市呈团簇状阻力高值区,孝感、天门等市相同地类内部出现明显的阻力差异,可为生态廊道识别提供有效支撑^[15](图 6)。

表 3 考虑连通性分级的“高重要-低敏感”生态源地面积统计

行政区 District	I 类源地(低敏感粮食供给区) Ecological source Class I (Food supply area with low sensitivity)				II 类源地(低敏感固碳释氧区) Ecological source Class II (Carbon sequestration area with low sensitivity)				源地面积汇总 Area summary/ km ²	
	低连通		高联通		低连通		中连通		高联通	
	面积/ km ²	占比/%	面积/ km ²	占比/%	面积/ km ²	占比/%	面积/ km ²	占比/%	面积/ km ²	占比/%
武汉市	1171	62.97	549	29.51	140	7.52				1859
黄石市	337	31.98			716	68.02				1052
鄂州市	236	100.00								236
孝感市	22	0.46	4178	86.54	628	13.00				4828
黄冈市	952	17.35			689	12.56	338	6.16	3509	63.94
咸宁市	161	4.37			251	6.80			3282	88.83
仙桃市			1648	100.00						1648
天门市			2121	100.00						2121
潜江市	351	21.78	1260	78.22						1611
城市圈	3230	14.33	9756	43.29	2423	10.75	338	1.50	6791	30.13

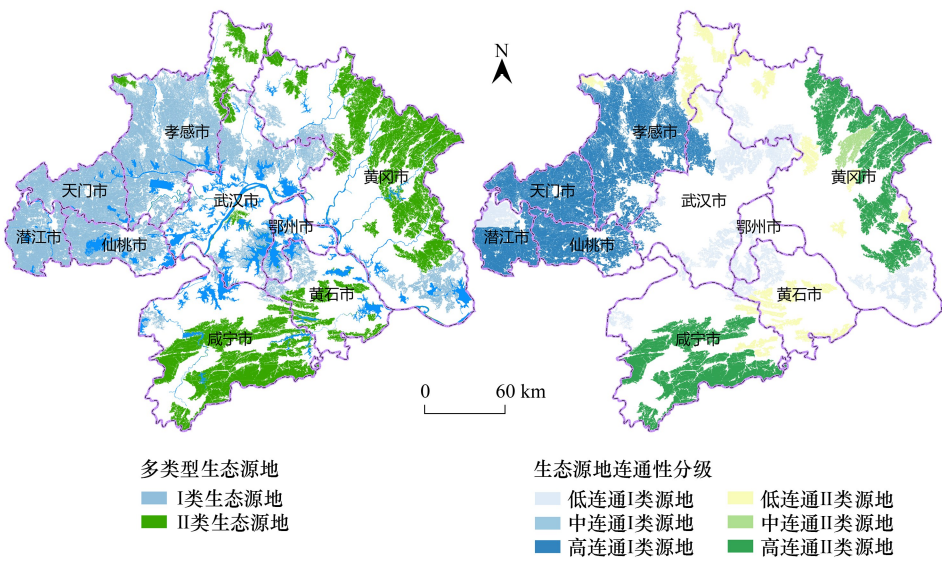


图 5 考虑连通性分级的“高重要-低敏感”生态源地空间分布

Fig.5 Spatial distribution of “high importance-low sensitivity” clusters considering connectivity classification

3.3.2 生态廊道提取与分类

向 Linkage Mapper 工具箱中输入多类型生态源地和阻力面,识别出 39 条生态廊道(图 7),长度介于 1.06—104.95 km 之间,共计 1047.68 km。集中分布在①武汉—孝感—黄冈市交界处;②鄂州—黄冈—黄石市交界处。如表 4 和图 7 所示,将廊道与两端源地类型关联起来,可将廊道划分为三类:① I 类廊道两端均为粮产源地,主要出现在武汉市郊区(12 条)和鄂州市(6 条),供给耕地间的生态流动;② II 类廊道两端均为碳汇源地,主要出现在黄冈市西北部(6 条)、孝感市北部(6 条)和黄石市东部(15 条),以短距离廊道为主(平均长

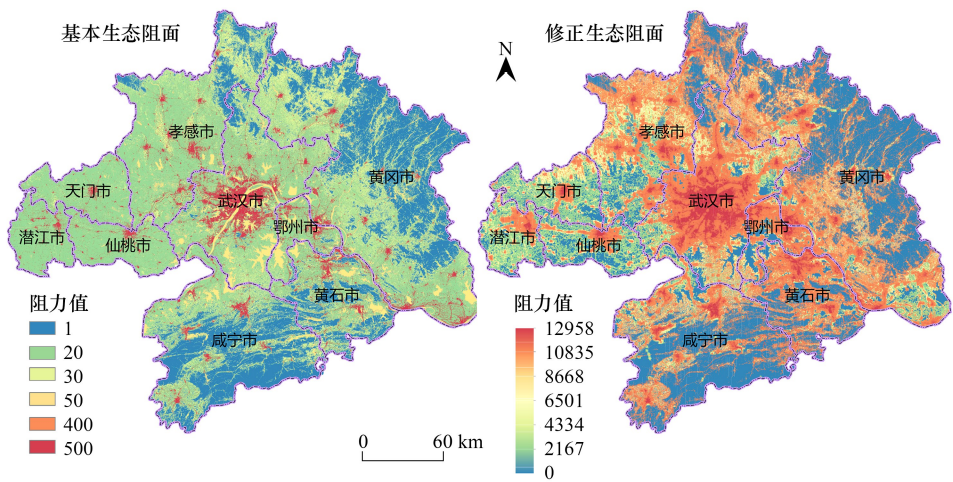


图 6 基本阻力面和修正阻力面空间分布

Fig.6 Spatial distribution of basic and modified resistance surface

度低于 15 km);③ I—II 类廊道两端分别为粮产和碳汇源地,主要连接了黄冈市西北部林地—武汉市北郊耕地,黄冈市东南部林地—鄂州市耕地,以及咸宁市林地—武汉市南郊耕地。

进一步可视化廊道宽度(承载生态流的能力),提取出累积电阻小于 10000 的栅格(图 7),红色越深代表累积阻力值越低,对应的生态流潜力越高^[20]。咸宁市—仙桃市的潜力廊道最宽,武汉市与鄂州市交界的梁子湖区同样提供了高潜力廊道。但是,鄂州市—黄冈市的潜力廊道宽度较小,容易成为断点。

表 4 生态廊道长度、数量分类统计

行政区 District	I 类廊道(粮产廊道) Class I (Corridor linking food supply areas)		II 类廊道(碳汇廊道) Class II (Corridor linking carbon sequestration areas)		I—II 类廊道(跨类廊道) Class I—II (Corridor linking food supply and carbon sequestration areas)		廊道长度汇总 Length summary	
	数量	长度/km	数量	长度/km	数量	长度/km	数量	长度/km
武汉市	12	87.65			2	44.20	14	131.85
黄石市			15	149.44	2	23.67	17	173.11
鄂州市	6	90.47			1	46.69	7	137.16
孝感市			6	74.96	1	15.02	7	89.98
黄冈市	4	71.37	6	107.62	9	180.87	19	359.85
咸宁市	1	20.34	9	53.40	2	81.99	12	155.73

3.3.3 多特征生态安全格局

如图 8,综合考虑源地、廊道类型,构建了“一环、三翼、多连通”多特征生态安全格局。“一环”为环武汉粮产连通轴,沟通新洲区、梁子湖等武汉外城区粮产源地;“三翼”包括城市圈西部的江汉平原粮产核心区、北部的大别山碳汇核心区以及南部的幕阜山碳汇核心区;“多连通”主要包含三部分,①城市圈西北部:木兰山—天台山碳汇连通轴连接江汉平原与大别山“两翼”,通过跨类连通轴接入“一环”;②城市圈东南部:大别山碳汇核心区通过跨类连通轴连接梁子湖、武穴市粮产功能区,途径凤凰山-龙凤山碳汇连通轴进入幕阜山核心区;③城市圈中南部:幕阜山核心区通过跨类连通轴接入“一环”,接入江汉平原核心区。

4 讨论

当前,武汉城市圈既是“长江经济带”等国家战略的重要支点,又是“生态文明建设”和“高质量发展”的

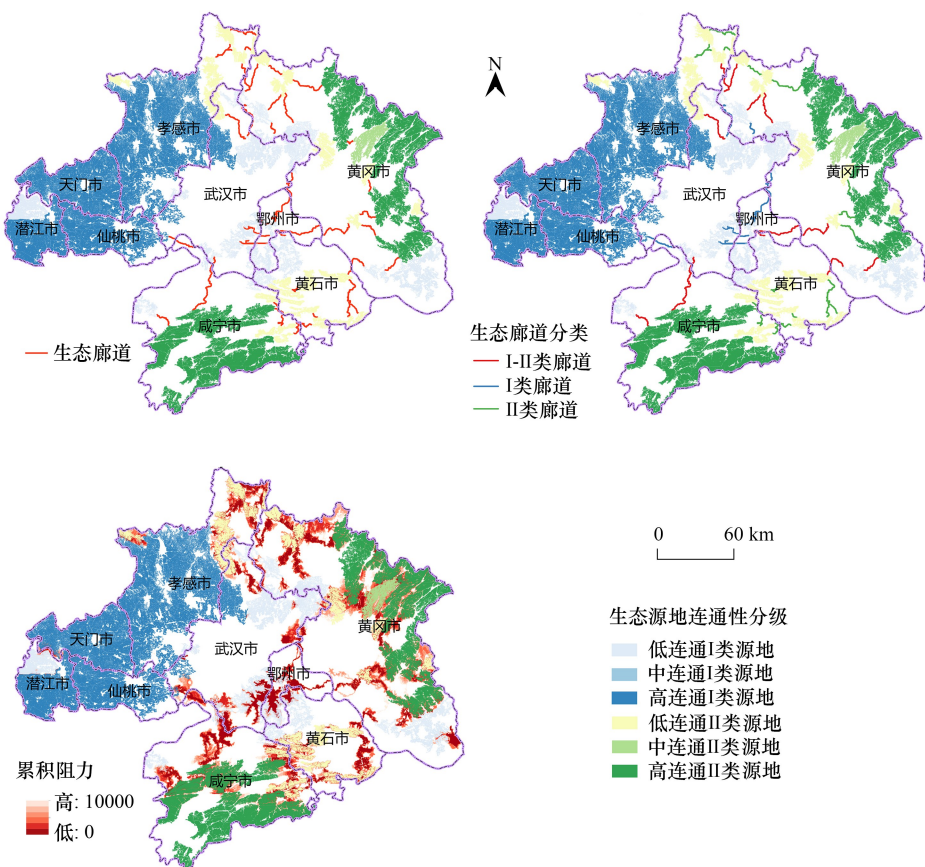


图7 分类生态廊道空间分布

Fig.7 Spatial distribution of classified ecological corridors

MCR: 最小累积阻力模型 Minimum cumulative resistance model

排头兵。因此,科学、合理地构建城市圈生态安全格局对区域经济、社会和生态协同发展具有重要意义。源地识别是生态安全格局构建的基础。如图9所示,传统研究常综合“重要性-敏感性-连通性”体系,采用多因素叠加分析和自然间断点分级方法,将评价结果的高值区设定为生态源地^[9,13]。但是,这一操作只是一种综合最优的体现,它忽略了指标层各因子蕴含的原始信息,仅能识别均质化的生态源地^[12,18]。例如(图4),“低敏感粮食供给区”和“低敏感固碳释氧区”均具备“高重要-低敏感”特征,传统方法会将它们视为同类生态源地,这忽略了用地的主导功能,易误导政策实施。此外,综合评价方法掩盖了多维因子间组合特征,易导致生态源地错判。例如,“高敏感粮食供给区”可能因为粮食供给功能的突出掩盖了“高敏感”特征,实际上并不适于作为生态源地。

因此,本文从“重要性—敏感性”指标层因子(30 m 精度栅格)出发,引入 SOM 模型将叠加分析调整为聚类过程^[23,25]。根据各聚类簇中多维因子的权重组合,将研究区划分为5类典型的生态系统服务簇,将其中具备“高重要-低敏感”特征的两类簇作为初判生态源地:包括12986 km²的粮食供给区和9552 km²的固碳释氧区。转换为图斑单元,计算dPC指数对“连通性”分级,获得高连通的粮产源地共9756 km²,集中分布在孝感市、天门市、潜江市和仙桃市,区内地面平坦、适宜种植业生产,应作为粮产核心区。高连通的碳汇源地共6791 km²,集中分布在黄冈市东北和咸宁市东南,区内植被覆盖度高、生态系统服务功能优良,宜作为碳汇核心区。此外,低连通的粮产源地分布于武汉市郊区与鄂州市,低连通的碳汇源地分布在黄石市东南,这些地区自身具备一定的生境质量和抗干扰能力,经由廊道连通可为生态过程提供支撑,宜作为生态保护功能区。进一步应用MCR模型识别不同源地间最小成本路径作为生态廊道^[11-12],根据廊道两端连接的源地类型,可将

廊道划分为粮产连通轴、碳汇连通轴和跨类连通轴。

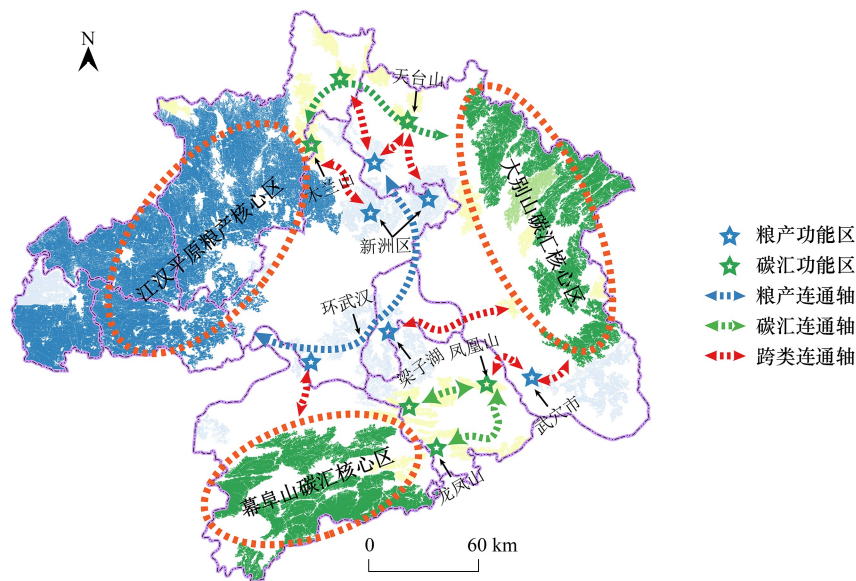


图 8 武汉城市圈多特征生态安全格局

Fig.8 Multi-feature ecological security pattern of Wuhan Metropolitan Area

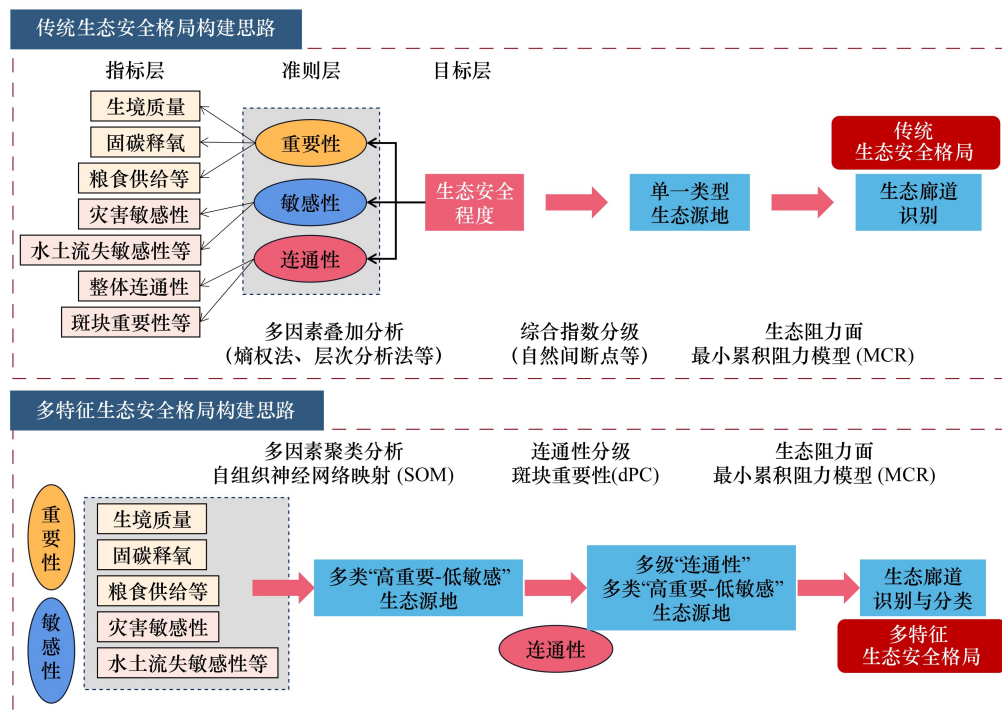


图 9 传统/多特征生态安全格局构建思路对比

Fig.9 Comparison of the ideas between the traditional and multi-feature ecological security pattern constructions

总体上,本文有机耦合了 SOM-MCR 模型,提出了一种考虑生态功能分区的多特征生态安全格局建构框架,这为分区分管、精准施策提供可能^[35-36]。以武汉城市圈“一环、三翼、多联通”的多特征生态安全格局为例。其中,①“一环”为环武汉粮产连通轴,链接新洲区、梁子湖等武汉外城区-鄂州市粮产功能区。在粮食生产的同时,应依托周边湖泊、湿地等生态要素,加强生态培育形成环城绿带,搭建城市圈中部的生态脊梁;

②“三翼”为“一环”外围呈三角形的江汉平原粮产核心区、大别山碳汇核心区以及幕阜山碳汇核心区。碳汇核心区与《武汉市生态环境保护“十四五”规划》中的“两带”框架一致^[31],应着力加强自然保护区、风景名胜区和森林公园建设,严控开发性活动的形式、强度、规模和范围,构筑生态安全屏障;新增了江汉平原粮产核心区,应依托有利地形,发挥集中连片的规模优势,同时建立农业生态补偿机制,鼓励休耕轮作、有机肥等节地行为;③“多连通”包含两层结构:城市圈外围大型碳汇核心区通过碳汇连通轴连接其他小型碳汇功能区,而后通过跨类连通轴接入“一环”。碳汇连通轴应设置廊道缓冲带,执行大规模造林工程,增加斑块间物种扩散和迁移概率,提高生态系统的抗干扰能力;跨类连通轴相对较长、容易断裂,串联廊道途径的山体、湖泊、湿地等众多生态要素十分必要。

5 结论

陆域生态安全格局构建是保障区域生态安全的重要举措。本文以武汉城市圈为例,依据“重要性-敏感性-连通性”指标框架,融入 SOM 模型依据生态系统服务组合划分生态功能区→识别具有多级“连通性”的多类型“高重要-低敏感”生态源地;而后应用 MCR 模型识别源地间最小成本路径,结合两端源地属性对廊道分类;据此构建了“一环、三翼、多联通”的多特征生态安全格局。该格局有机融入了生态功能区划理念,有助于城市圈“因地制宜”采取相应的保护与修复策略。后续研究可综合网络模型评价廊道、节点的重要性,或延长研究时段讨论生态安全格局的时空变化特征。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 杨凯, 曹银贵, 冯喆, 耿冰瑾, 冯漪, 王舒菲. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 555-565.
- [3] 易浪, 孙颖, 尹少华, 魏晓. 生态安全格局构建:概念、框架与展望. 生态环境学报, 2022, 31(4): 845-856.
- [4] Ma L B, Bo J, Li X Y, Fang F, Cheng W J. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: the middle and lower reaches of Shule River Basin as an example. The Science of the Total Environment, 2019, 674: 424-438.
- [5] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. Landscape and Urban Planning, 1996, 36(1): 1-17.
- [6] 韦家怡, 李钺, 吴志峰, 张莉, 吉冬青, 程炯. 粤港澳大湾区生态安全格局及重要生态廊道识别. 生态环境学报, 2022, 31(4): 652-662.
- [7] 闫玉玉, 孙彦伟, 刘敏. 基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3369-3378.
- [8] 黄烈佳, 杨鹏. 基于机器学习的武汉城市圈土地生态安全格局识别与优化策略. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 862-869.
- [9] 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.
- [10] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [11] Jin X X, Wei L Y, Wang Y, Lu Y Q. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem service functions and ecological sensitivity assessment: a case study in Fengxian County of Jiangsu Province, China. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(1): 563-590.
- [12] 马雨欣, 杨琅, 李泞吕, 熊在秋, 吴学灿, 段禾祥, 张惠芳, 张志明. 基于生态系统服务重要性和生态系统脆弱性的临沧市生态安全格局构建. 云南大学学报: 自然科学版, 2022, 44(5): 1090-1100.
- [13] 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.
- [14] Guo R, Wu T, Liu M R, Huang M S, Stendardo L, Zhang Y T. The construction and optimization of ecological security pattern in the Harbin-Changchun urban agglomeration, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(7): 1190.
- [15] 屠越, 刘敏, 高婵婵, 孙彦伟, 蔡超琳, 苏玲. 大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断. 生态学报, 2022, 42(17): 7056-7067.
- [16] Zhang Y Z, Jiang Z Y, Li Y Y, Yang Z G, Wang X H, Li X B. Construction and optimization of an urban ecological security pattern based on habitat quality assessment and the minimum cumulative resistance model in Shenzhen city, China. Forests, 2021, 12(7): 847.
- [17] 冯碧鸥, 岳文泽, 夏皓轩. 生态安全格局视角下的生态保护红线评估——以浙江省为例. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2466-2474.
- [18] Chen J, Wang S S, Zou Y T. Construction of an ecological security pattern based on ecosystem sensitivity and the importance of ecological services;

- a case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108688.
- [19] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *The Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [20] 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.
- [21] 杨沁瑜, 张尧, 刘家福. 基于蚁群模型的吉林西部土地利用安全格局情景模拟研究. *长春师范大学学报*, 2020, 39(2): 97-103.
- [22] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [23] 许明杰, 牛瑞卿, 杨柯, 段四壮. 一种土地生态敏感性评估的加权聚类方法. *测绘科学*, 2021, 46(10): 118-129, 144.
- [24] 赵哲, 吕楠, 姜翠梅. 基于 SOM 神经网络的秦岭北麓保护区域村庄分类与发展策略. *桂林理工大学学报*, 2022: 1-8.
- [25] 蔡博峰, 穆彬, 方皓, 崔艳. 基于自组织神经网络的生态敏感性分区——以北京市房山区为例. *中国环境科学*, 2008, 28(4): 375-379.
- [26] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 江叶枫, 赖夏华. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究. *生态学报*, 2020, 40(3): 1065-1076.
- [27] 王姣姣. 基于生态功能重要性与敏感性评价的生态功能分区研究——以榆中县为例[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [28] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1172-1189.
- [29] 王凯平, 冯悦, 邱陈澜, 王欣言, 马嘉, 张云路. 环京津城市群生态系统服务的时空演变与驱动因素. *生态学报*, 2022, 42(19): 7871-7883.
- [30] 赵育恒, 曾晨. 武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素. *生态学报*, 2019, 39(4): 1426-1440.
- [31] 周星宇, 郑段雅. 武汉城市圈生态安全格局评价研究. *城市规划*, 2018, 42(12): 132-140.
- [32] 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.
- [33] 张紫怡, 刘艳芳, 张扬, 刘耀林, 陆砚池, 任其然. 生态系统服务协同权衡对影响因子的空间响应——以福建省生态功能区为例. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2022, 47(1): 111-125.
- [34] 伊璇, 周丰, 王心宇, 杨永辉, 郭怀成. 基于 SOM 的流域分类和无资料区径流模拟. *地理科学进展*, 2014, 33(8): 1109-1116.
- [35] 崔宁, 于恩逸, 李爽, 唐明方, 吴钢. 基于生态系统敏感性与生态功能重要性的高原湖泊分区保护研究——以达里湖流域为例. *生态学报*, 2021, 41(3): 949-958.
- [36] 顾思浩. 基于生态系统服务簇的煤炭资源型城市国土空间功能分区优化研究——以古交市为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.