

基于生态评价与电路理论的生态安全格局 构建及关键区域识别

——以安徽省为例

汪沁¹, 於冉^{1,2}, 储昭君¹, 吴雨桐¹, 魏靖阳¹

(1.安徽农业大学 经济管理学院, 安徽 合肥 230036; 2.安徽农业大学 国土资源研究所, 安徽 合肥 230036)

摘要: [目的] 构建安徽省生态安全格局, 识别生态修复关键区域, 以期筑牢城市发展的生态基底, 为该省国土空间生态修复提供科学依据。[方法] 运用 InVEST 模型及 MCR 模型从生态系统供给侧与内部响应侧展开评价识别生态源地, 利用夜间灯光数据修正阻力面, 基于电路理论构建安徽省生态安全格局, 识别生态夹点与生态障碍点, 根据空间分异与地类特征提出差异化修复保育措施。[结果] ①安徽省共计 53 块生态源地斑块, 面积合计 $4.22 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占安徽省总面积的 30.50%, 其中南部源地集中成片生态价值高, 北部较为分散生态价值低。②生态安全格局构建生态廊道共有 95 条, 基于景观连通性分析, 筛选出 68 条关键廊道, 26 条重要廊道及 1 条一般廊道。③共识别生态夹点 119 处, 面积达 412.45 km^2 , 生态障碍点 46 处, 面积达 423.20 km^2 。④生态夹点及零星障碍点以自然保育为主, 大型生态障碍点人工修复及自然恢复两措并举。[结论] 借助生态评价以及电路理论开展构建的生态安全格局更符合物种运动的真实规律, 可有效识别生态修复关键区域及其分布特征。

关键词: 生态评价; 电路理论; 生态安全格局; 生态夹点; 生态障碍点; 安徽省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)06-0209-08

中图分类号: X826

文献参数: 汪沁, 於冉, 储昭君, 等. 基于生态评价与电路理论的生态安全格局构建及关键区域识别[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 209-216. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.026; Wang Qin, Yu Ran, Chu Zhaojun, et al. Construction of ecological security pattern and identification of key regions based on ecological assessment and circuit theory [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 209-216.

Construction of Ecological Security Pattern and Identification of Key Regions Based on Ecological Assessment and Circuit Theory

—A Case Study in Anhui Province

Wang Qin¹, Yu Ran^{1,2}, Chu Zhaojun¹, Wu Yutong¹, Wei Jingyang¹

(1. School of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui

230036, China; 2. Institute of Land and Resources, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: [Objective] The ecological security pattern of Anhui Province was constructed and the key areas of ecological restoration were identified in order to build an ecological basis for urban development, and to provide a scientific basis for the territorial ecological restoration of Anhui Province. [Methods] The InVEST model and the MCR model were used to evaluate and identify ecological source areas from the supply side and the internal response side of the ecosystem. The resistance surface was modified by nighttime light data. The ecological security pattern for Anhui Province was constructed based on the circuit theory. The ecological pinch points and ecological barrier points were identified, and differentiated restoration and maintenance

收稿日期: 2023-02-22

修回日期: 2023-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向多重不确定性的森林生态系统服务价值评估模型构建与优化研究”(71873003); 安徽省教育厅人文社科重点研究项目(SK2019A0130); 安徽省自然科学基金项目(1908085QG310); 安徽省高等学校人文社会科学研究项目(YJS20210255)

第一作者: 汪沁(1999—), 女(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 研究方向为国土空间规划、土地生态。Email: wangqin0907@stu.ahau.edu.cn.

通信作者: 於冉(1984—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事国土空间规划、土地利用碳排放方面的研究。Email: yuran@ahau.edu.cn.

measures were proposed according to spatial differentiation and terrain characteristics. [Results] ① There were 53 ecological source areas in Anhui Province, with a total area of $4.22 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for 30.5% of the total area of Anhui Province. The southern source areas were concentrated and had high ecological value, while the northern source areas was scattered and had low ecological value. ② Ninety-five ecological corridors were constructed. Based on landscape connectivity analysis, 68 key corridors, 26 important corridors, and one general corridor were selected. ③ There were 119 ecological pinch points with an area of 412.45 km^2 , and 46 ecological barrier points with an area of 423.20 km^2 . ④ Ecological pinch points and scattered ecological barrier points were maintained by nature, and artificial restoration and natural restoration of large ecological obstacles were implemented simultaneously. [Conclusion] The ecological security pattern constructed with the help of ecological assessment and circuit theory was more in line with the actual process of species movement, and can effectively identify the key areas of ecological restoration and their distribution characteristics.

Keywords: ecological assessment; circuit theory; ecological security pattern; ecological pinch point; ecological barrier point; Anhui Province

目前,环境治理已成为全球性问题,极端气候、水资源制约等现象将严重冲击中国经济、粮食、生命安全,保障生态安全已成为中国履行人类可持续发展的自觉担当。因此,系统构建生态安全格局,因地制宜地开展国土空间生态修复及保护,对实现人与自然和谐共生具有重要意义。以往对于生态安全的研究多从局部问题出发,如废弃矿山^[1]、水土流失^[2]、盐碱化^[3]荒漠化^[4]、水体富营养化治理等^[5],生态修复工程的深入研究对解决特定生态问题已取得重大成效。但国土空间生态修复应统筹全局,系统实现空间格局优化及生态单元结构调整,理应对生态安全格局展开整体考量,现有生态安全格局的研究起源于景观生态学,已形成“筛选生态源地—构建综合阻力面—提取生态廊道”的基本研究范式^[6-9],其中生态源地多通过形态空间格局分析^[10-13]、生态评价^[14]或自然保护区等^[15]进行筛选;阻力面一般通过坡度、植被覆盖等多因素综合加权^[16-17]或土地利用类型赋值构建^[18];生态廊道多通过最小累积阻力模型^[19]、电路理论^[20-21]、重力模型^[22]及蚁群算法^[23]展开研究。而在此类研究中,识别生态节点已逐步成为研究热点,现有研究将廊道间交点^[24]、转折点^[25]、与重要交通道路交点^[26]、阻力值骤变点^[27]或各类景观系统交点^[28]作为生态节点,而 McRae^[29]借助电路理论,通过电子随机游走性模拟一定宽度阈值的物质能量流动路径即生态廊道,依据电流强度精准识别生态节点,从而弥补了其他模型难以直观反馈生态修复关键区域以及源地数量过多难以识别生态廊道的缺陷,为精准识别国土空间生态修复关键区域提供了参考。本文以安徽省为例,基于供给侧生态系统服务功能重要性及内部响应侧生态敏感性评价结果筛选生态源地,结合

MCR 模型及电路理论构建生态安全格局,研判生态夹点与障碍点,提出差异化保育及修复措施,以期为国土空间生态保护及修复工作提供科学依据,为城市绿色发展筑牢生态本底。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

安徽省国土面积积达 $1.40 \times 10^5 \text{ km}^2$,位于中国东南部,长江三角洲腹地($114^{\circ}54' - 119^{\circ}37'E, 29^{\circ}41' - 34^{\circ}38'N$),内拥长江、淮河、新安江三大水系,地势呈现西南高,东北低的空间特征,地形划分为皖北平原、淮河平原、江淮丘陵、沿江平原、皖西大别山及皖南山区,南北风格迥异,淮河以北属暖温带半湿润季风气候,以南属亚热带湿润季风气候,平均气温在 $14 \sim 17^{\circ}\text{C}$,年均降水量在 $773 \sim 1\ 670 \text{ mm}$ 。安徽省自然资源本底优越,林地、草地、湿地、水域面积共占全省总面积的 42.1%,森林覆盖率超过 30%,隶属中国“四屏四带”生态安全格局长江重点生态带,该省已建成国家级自然保护区 8 个,省级自然保护区 32 个,作为长江重点生态区,承担着维护长江中下游生态带及筑牢长三角生态屏障的重任,具有涵养水源、维护生物多样性、保持水土、固碳释氧等多重功能,其卓越的生态系统服务价值,在推进生态文明建设的过程中具有重要作用。

1.2 数据来源

本文所用数据:土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>);遥感影像及 DEM 数据均来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);降雨数据来源于中国气象科学数据共享服务平台(<https://data.cma.cn/>);

土壤数据来自寒区旱区科学数据中心的 1:100 万世界土壤数据库 (HWSD) 中国土壤数据集; 地质灾害数据通过《安徽省地质灾害防护“十四五”规划》(下文简称《地质灾害防治规划》) 地理配准获取; 植被覆盖度通过 Landsat 8 OLI 遥感影像数据波段计算获取; 潜在蒸散量数据来源于美国地址勘查局 (USGS) 的 MOD16A2 数据; 夜间灯光数据由 Earth Observation Group 提供的 VIIRS Nighttime Light (mines.edu) 数据集; 植被净初级生产力 (NPP) 来源于 500 M 栅格 MODIS MOD17A3 数据。各项数据均借助 ArcGIS 重采样技术统一至 1 km 分辨率, 并最终落到 WGS1984 坐标系。

2 研究方法

2.1 生态系统综合服务功能重要性评价

生态系统综合服务功能重要性评价体现生态环境对外供给的服务功能。本文基于已有研究成果^[6-18]与《安徽省地质灾害防治“十四五”规划(2021—2025年)》, 结合安徽省自然资源禀赋特点, 开展以水源涵养, 生物多样性维护, 水土保持及固碳释氧 4 类生态系统服务功能重要性评价。其中, 水源涵养及生物多样性维护功能分别采用 InVEST 模型中 Annual Water Yield 与 Habitat Quality 模块进行计算; 水土保持功能依据自然资源部 2019 年 4 月颁布的《国土空间规划双评价技术指南》以及修正后的 RUSLE 方程^[30]计算; 区域生态系统固碳释氧能力则以 NPP 数据表征^[31]; 具体计算公式为:

$$Y_{xy} = \left(1 - \frac{AET_{xy}}{W_x}\right) \times W_x \quad (1)$$

式中: Y_{xy} 为地类 y 在栅格 x 上的年产水量 (mm); W_x 为栅格单元年降雨量; AET_{xy} 为地类 y 在栅格 x 上的年实际蒸散量。

$$Q_{xy} = H_y \left[1 - \frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z + k_z}\right] \quad (2)$$

式中: Q_{xy} 为生境类型 y 中 x 栅格的生境质量指数; H_y 为生境类型 y 的生境适宜度; D_{xy} 为生境类型 y 中 x 栅格的生境威胁度; k 为半饱和常数, 取最高生境退化相对水平的 1/2; z 为归一化常数量。

$$A = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中: 参考《国土空间规划双评价技术指南》及前人研究成果计算各项因子^[30]; A 为水土保持量 ($t/hm^2 \cdot a$); R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可侵蚀因子; L 表示坡长因子; S 表示坡度因子; C 为植被与管理因子; P 为水土保持措施因子。

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (4)$$

式中: $NPP(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的植被净初级生产力; $APAR(x, t)$ 表示 x 像元在 t 月吸收的光合有效辐射; $\epsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的光能利用率。

将各项服务功能评价结果进行等权叠加, 最终运用自然断点法将安徽省生态系统综合服务功能重要性划分为一般重要、较重要、中度重要、高度重要及极重要 5 级。

$$S = \sum_{n=1}^m I_n \cdot J_n \quad (5)$$

式中: S 为生态系统综合服务功能重要性; m 为服务功能项数; n 为服务功能编号; I_n 为第 n 项服务功能重要性量化值; J_n 为第 n 项服务功能权重值。

2.2 生态敏感性评价

生态敏感性是系统内部对人类活动干扰和自然环境变化的响应程度, 能够表征生态问题发生的可能性及程度。本文参考《安徽省地质灾害防治“十四五”规划(2021—2025年)》《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》以及相关文献^[8-9]并结合研究区自然条件, 选取坡度、高程、植被覆盖度、土地覆盖、距河湖距离、土壤质地及地质灾害区 7 项指标, 运用 AHP 法确定权重^[6-9]构建评价指标体系(表 1), 借助 ArcGIS 平台加权求和进行生态敏感性评价, 最终以自然断点法识别生态不敏感、轻度、中度、高度、极敏感区域。

2.3 综合阻力面构建

植被覆盖越多、地形起伏越平缓则生境质量越优越, 阻力越小; 人类活动越频繁, 生境风险及物种迁徙的阻力越大, 单一用地类型可能无法体现人为干扰及社会经济条件形成的生态阻力差异。因此本文参考相关研究^[32-34], 选取夜间灯光修正后的土地利用类型、植被覆盖度、地形起伏度作为阻力因子, 借助 AHP 法确定权重^[32-34]构建综合阻力面指标体系, 运用 MCR 模型构建综合阻力面(如表 2 所示)。

$$R_j = \frac{L_i}{L_j} \times R \quad (6)$$

式中: R_j 为夜间灯光修正后土地利用类型 j 阻力值; L_i 为栅格单元 i 夜间灯光指数; L_j 为土地利用类型 j 对应的夜间灯光平均值; R 为夜间灯光修正前土地利用类型 j 阻力值。

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (7)$$

式中: MCR 即最小累积阻力; f_{\min} 为最小累积阻力与生态活动正相关函数; D_{ij} 为源地 j 与景观栅格 i 的距离; R_i 为景观栅格 i 在扩张过程中的阻力系数。

表 1 生态敏感性评价指标体系

Table 1 Ecological sensitivity evaluation index system

生态因子	生态敏感性分值					权重
	100	80	60	40	20	
坡度/(°)	>35	25~35	15~25	8~15	<8	0.083 2
高程/m	>900	600~900	300~600	100~300	<100	0.044 1
植被覆盖度	>0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2	0.226 2
土地覆盖	水域	林地	草地	耕地	建设用地、未利用地	0.178 8
距河湖距离/m	<100	100~200	200~500	500~1 000	>1 000	0.084 0
土壤质地	砂粉土/粉土	砂壤/粉粘土/壤黏土	面砂土/壤土	粗砂土/细砂土/黏土	石砾/沙	0.101 2
地质灾害风险等级	高	中	低	非易发区	—	0.282 4

表 2 综合阻力面指标体系

Table 2 Comprehensive resistance surface index system

指标	指标分级	阻力值	权重
土地利用类型(夜间灯光修正)	林地	1×地修正系数	0.55
	草地	10×草地修正系数	
	水田	20×水田修正系数	
	旱地	30×旱地修正系数	
	水体	50×水体修正系数	
	农村居民点	100×农村居民点修正系数	
	城镇及建设用地	500×城镇及建设用地修正系数	
植被覆盖度	0~0.22	100	0.25
	0.22~0.43	80	
	0.43~0.62	60	
	0.62~0.81	40	
	0.81~1	20	
地形起伏度(最佳邻域 17×17)	0~55	20	0.2
	55~118	40	
	118~188	60	
	188~269	80	
	269~568	100	

2.4 电路理论廊道、夹点及障碍点提取

生态廊道^[18]在物质能量循环、生态系统稳定性及多样性保育等方面具有关键意义。在景观生态学领域中,McRae 率先引入电路理论利用电子随机游走特性模拟物种在源地单元中物质能量流动路径,以此识别生态廊道并通过多路径分析构建更加真实的生态安全格局。

本文借助 ArcCatalog 10.2 平台中 Linkage Mapper 模块 Linkage Pathways Tool 工具模拟物质能量流动路径,计算成本加权距离(cost weight distance)、最小耗费路径(least cost path length)及 CWD/LCPL 比值,并剔除小于 1.5 km 的细碎廊道形成安徽省生态廊道。生态夹点^[18]是廊道网络中电流密度高值区域,即物质能量流动过程中必经区域,该区域

将是维持生态系统稳定性的关键点。本文运用 circuitscape 开源程序,借助 Linkage Mapper 中 Pinchpoint Mapper 工具,以“all to one”模式将生态源地连接地面,设置成本加权阈值为 10 000 m 模拟电子随机游走至所有源地,识别廊道网络中电流密度高值区域即物质能量流动过程中必经区域作为生态夹点。生态障碍点^[18]是物质能量在源地间流动过程中受到较大阻力的景观屏障,障碍点的修复将提升整个生态系统连通性。本文运用 Linkage Mapper 中 Barrier Mapper 工具,为保证移动窗口完整覆盖成本加权阈值下电流区域,设置 100 m 为步长,2 000 m 为最大搜索半径进行迭代运算,计算累计电流恢复高值区域作为生态障碍点,值越大则障碍点修复越有利于生态安全格局提质升级。

3 结果与分析

3.1 生态源地提取

安徽省生态系统综合服务功能重要性评价结果显示(图1),安徽省南部生态系统服务功能重要性明显高于北部地区,水域生态系统综合服务价值普遍较高。其中生态系统服务功能极重要区以覆盖耕地、林地、草地及水域为主,并集中分布于六安与安庆两市交界、池州东南部、宣城以南、黄山大部分地区及合肥巢湖周边各处,包含长江经济带各市沿江湿地保护区。高度重要区覆盖地类与极重要区相同,主要分布于长江流域、六安中北部、淮南中部、及滁州北部零星分散。中等重要区多分布于皖南各市交界地带与六安、滁州、淮南、蚌埠中部地区。较重要区面积最大,现状地类除生态、生产用地之外覆盖部分人造地表。一般重要区多覆盖平原农业区,同较重要区均质化分

布皖北各市、六安北部、淮南南部及滁州西部地区,耕地资源最为丰富。通过安徽省生态敏感性评价可以看出(图1),大别山及皖南山区生态系统服务价值高,但生态敏感程度最强,北部平原农耕强度大,由于煤矿集中开采及地下水超采也出现了较为严重生态敏感区域。其中:生态极敏感区分布特征与生态系统服务功能极重要及高度重要区相似,片状分布于安庆西北部、池州东南部、宣城南部、黄山与六安南部地区。高度敏感区带状串联安庆、池州、宣城、芜湖及铜陵市,于六安、马鞍山、滁州中部、淮南北部和淮北一亳州、宿州交界处块状分布,其中皖北地区主要分布于地面沉降与塌陷灾害易发区。中度敏感区面积最大,沿长江流域条状分布,于安徽中部串联六安、合肥及马鞍山三市,此外大面积覆盖滁州、淮南及皖北各市。轻度敏感区分散各市,其中阜阳、亳州市域面积比例最高。不敏感区域集聚于安徽中部地区,呈片状分布。

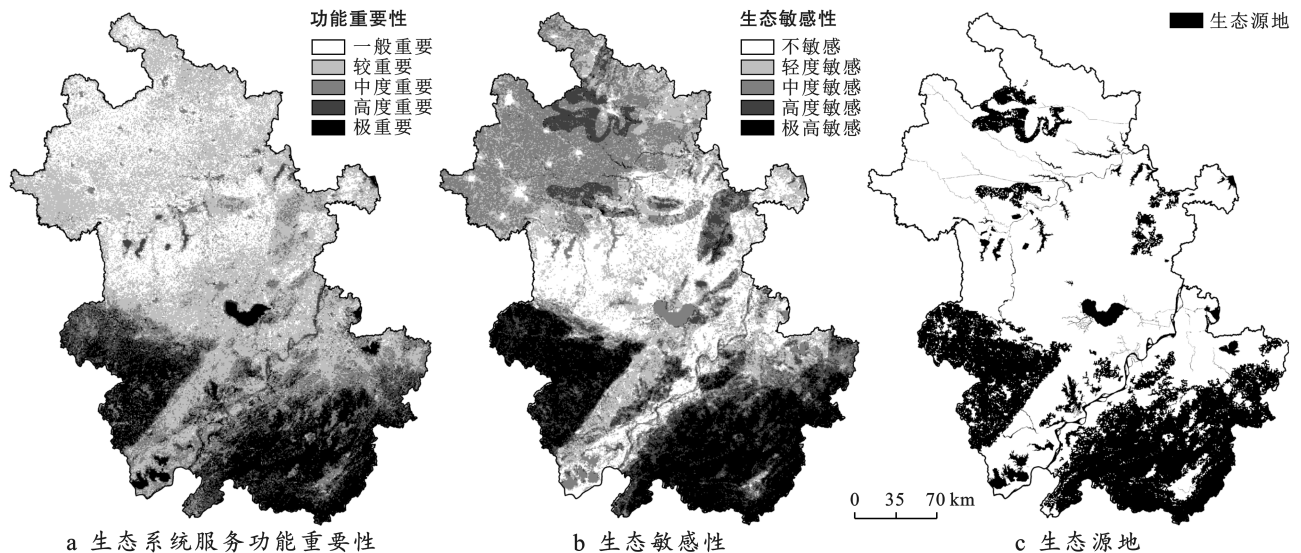


图1 安徽省生态评价及源地分布

Fig.1 Ecological assessment and distribution of ecological sources in Anhui Province

生态源地^[18]是对外提供生态系统服务功能、对内维护生态系统稳定性防止生境严重退化的特殊斑块。本文参考相关研究并综合生态系统服务功能重要性评价以及生态敏感性评价结果,消除细碎图斑对生态安全格局构建的影响,将提取生态系统服务功能极重要或生态极敏感面积大于 10 km^2 区域,生态系统服务功能高度重要或生态高敏感面积大于 100 km^2 区域初步定为生态源地^[33]。由于安徽省水资源丰沛,内拥长江流域、淮河流域、新安江流域及候鸟栖息地升金湖、焦岗湖天然湿地资源等,具有宝贵生态价值,因此选取面积大于 10 km^2 的水域,合并纳入生态源地范围(图1),最终确定源地图斑共计53块,合计

$4.22 \times 10^4\text{ km}^2$,面积比例30.50%,自南向北覆盖新安江预防保护区、皖南山区、安徽沿江湿地、大别山地区、巢湖城市绿心、滁西丘陵生物多样性保护与水土保持区、天长平原湿地保护与农业区、淮河湖泊湿地洪水调蓄与农业区、淮南—阜阳段及亳州—淮北—宿州段地面沉降、塌陷等地质灾害易发区等,构成“一心两屏四带多点”的空间格局,一心指合肥巢湖城市绿心,两屏指皖西大别山区及皖南山区,四带指长江、淮河、新安江、江淮运河。源地空间倾斜于皖南各市,多覆盖森林公园、地质公园及国家级沿江湿地保护区等;皖北地区生态源地分散且面积较小,多覆盖地质灾害较为严重的区域,生态系统服务功能差。综上所

述,皖南地区应着力提升生态系统稳定性,做好生态保育提质升级工作,皖北地区亟需开展生态节点保护及修复措施。

3.2 综合阻力面

基于人为干扰及自然资源因素构建的综合阻力面如图 2 所示。安徽省生态阻力值介于 9~2 182.2 之间,生态阻力面空间分异规律显著,与土地利用类型及社会经济条件显著相关。其中高阻力值集聚于各市、县建成区,交通要道及交汇区,多为人造地表的宜居宜产空间,安徽中部及北部地区阻力高值区域空间分布密度明显高于南部地区,合肥市阻力面高值集聚区的面积最大,可见生态综合阻力面与生态系统服务功能重要性空间分布特征存在一定负相关。此外沿江湿地保护区、皖南山区北部、大别山东部、巢湖湖泊及淮河流域周边也存在人类活动频繁的建成区,劳动要素流动性大,生态安全风险高,亟需筑牢生态安全屏障。

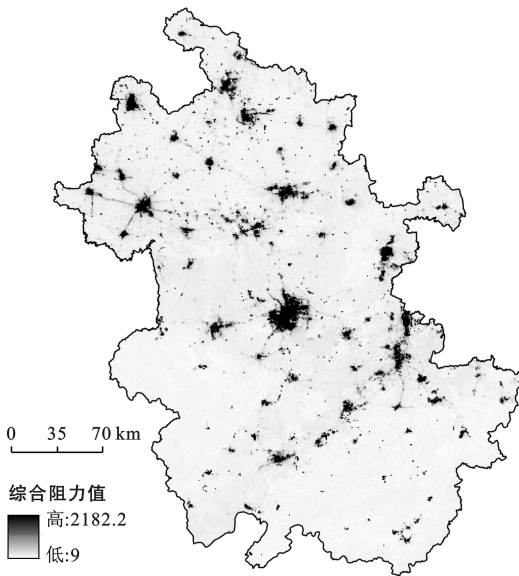


图 2 安徽省综合阻力面构成

Fig.2 Comprehensive resistance surface structure of Anhui Province

3.3 生态安全格局构建及节点识别

基于生态源地与阻力面结果,运用电路理论构建安徽省生态安全格局(如图 3 所示)。共计识别出 95 条生态廊道,集中分布于皖中及皖南地区。其中,由长江流域、淮河流域、巢湖流域及皖西大别山区往外发散的生态廊道数量最多,发挥着核心枢纽职能,而位于马鞍山东南角源地仅生成一块小于 1 km 细碎廊道,未来可着重探索生态安全跨区域协同联防,共推毗邻地区生态环境建设。通过 CWD/LCPL 比值对廊道连通性进行分析,并按自然断点法划分出 68 条关键廊道、26 条重要廊道及 1 条一般廊道。廊道长度

共计 1 755.64 km,平均长度 18.48 km,其中最长廊道隶属关键廊道长达 94.90 km,地处淮南—合肥—滁州段,该廊道景观连通性强,适宜物种长距离迁移,应加强廊道维护工作保证物质生态流的持续畅通;最短廊道隶属重要廊道仅 2 km,位于蚌埠及淮南市,进行地类比对发现分别为水域及林地源地被旱地或农村居民点隔断,未来有望通过退耕还林工程及建设用地整治联通破碎单元。由于连接源地间的成本加权距离极值仅 2 753.83 km,验证了本文提前设置的截止阈值合理性,生态夹点空间分布如图 3 所示。结果显示安徽省生态安全格局电流强度极值为 1,平均电流强度为 0.07,生态源地间连通性较不均衡,亟需在夹点保育的基础上开展障碍区域生态修复工作,全方位提升生态系统稳定性与多样性。安徽省生态夹点共 119 处,面积达 412.45 km²,主要分布于安徽中部关键廊道及重要廊道处。其中合肥市及滁州市的生态夹点较多,面积分别高达 126.42 和 86.13 km²,连接董铺水库至滁西丘陵生物多样性与水土保持区的生态廊道上共出现 8 个生态夹点,数量最多,于生态安全格局中处于关键地位。生态障碍点空间分布如图 3 所示。共识别出 46 处生态障碍点,面积共计 423.20 km²,面积最大达 63.22 km²,最小仅 1.03 km²。从空间上看,大型障碍点主要分布于合肥、淮北、蚌埠、淮南、马鞍山及芜湖各市,总面积分别为 127.50, 89.47, 58.16, 40.47, 35.18 和 26.87 km²;面积细碎的生态障碍点分散于淮北市、宿州市、淮南市、马鞍山市、合肥市、宣城市及铜陵各市;通过地类检索发现,生态廊道障碍点多位于市县建成区、高速等交通要道周围辐射地区,这主要是由于市县中心人类活动相对频繁,物质能量流动阻力较大难以通过。从廊道类型上看,生态障碍点基本分布于重要生态廊道附近,未来生态障碍点修复及改善工作将利于廊道提质升级,为完善生态安全格局提供空间指引。

3.4 生态关键区域修复策略

基于生态安全格局识别生态夹点与生态障碍点可知,电流强度空间分布不均衡且均值较低,源地间的流通性整体偏弱;累计电流恢复值高达 575,说明安徽省生态修复具有极大的提升空间。本文以生态廊道、生态夹点及生态障碍点共同组建关键区域,以尊重自然、顺应自然为主导原则提出保育及修复策略,以期安徽省国土空间生态修复工作提供指引。生态夹点主要分布于关键廊道及少数重要廊道,结合土地利用现状分析发现主要由耕地、林地、人造地表、草地及水域构成,生态禀赋优越,应以自然保育为主,以期稳步提升生态系统服务价值。不同地类可实行

不同维育措施,耕地可采用休闲轮作及就地培肥工作,草地实施植被保育,林地坚持完善林长制。如安徽中部及皖北地区应在保护优质天然林的基础上,通过生态农业林农混作,促进耕林草生态链发展。建设用地严格控制人流量,坚持用途管制禁止进一步扩建;水域严控污水排放并推进淮河、长江流域“最美岸线”植被防护带建设。以守住生态安全、粮食安全、用水安全为思路进行生态夹点维育工作,以期实现生态、生产、生活综合效益最大化。生态障碍点大多集聚于重要廊道周边区域,为避免人类干扰强度过大对生态系统造成二次破坏,零散障碍点以植被培育、降低人类活动,促进生态系统自我修复、自身演替为主。

大型障碍点采取人工修复结合自然维育的方式,市县建成区及城郊地区管控人类活动,推动低效用地整治,打造郊野公园、防护林及城市绿廊。生态及农业用地范围,皖北地面沉降塌陷区着重注意,采取沉降区改建平原水库、退耕还林还草工程进行植被恢复,因矿制宜防止新生大规模沉降。余下地区结合地质条件与承载力评价,可减少高耗水作物种植面积、开展林下种植、封山育林工程及沿江湿地、淮河流域滨水长廊建设;同时为避免源地割裂产生细碎廊道,加大毗邻地区协同治理力度,采取人为引入生态景观的措施,消除障碍合并源地,降低生态景观破碎度,提升生态系统完整性。

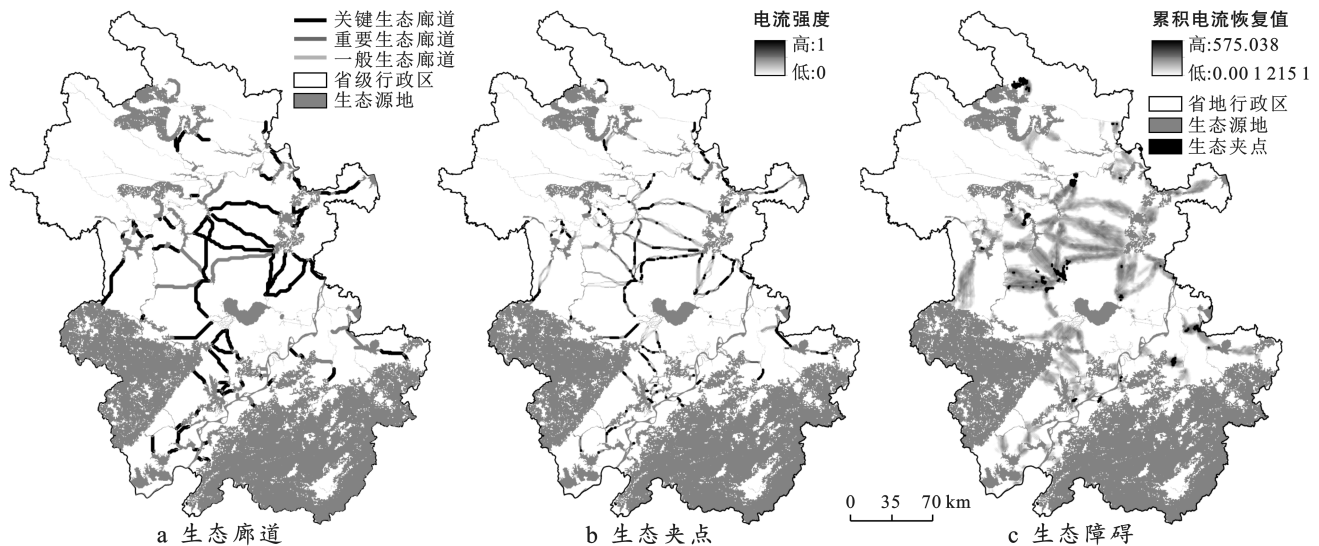


图3 生态安全格局及生态节点图

Fig.3 Ecological security pattern and ecological node diagram

4 讨论

在今后一段时间经济发展与城镇化进程仍然将会是社会发展的主旋律,而资源环境承载力一定程度上决定着城市发展的高度,平衡生态维育与城市发展尤为重要,因此基于生态安全格局系统开展关键区域维育及修复工作将为绿色发展打下坚实基础。本研究从生态系统供给侧与生态内部响应侧展开评价识别生态源地,弥补以往研究未考虑生态系统整体性的不足,并通过夜间灯光数据进行土地利用类型阻力面修正,规避了空间分异引起同一地类阻力值差异造成的数据误差。同时,相较于传统的最小累积阻力法,本文凭借电子游走路径与物种生态活动过程的随机性特点相契合的优势,运用电路理论模拟生态安全格局,不仅可以识别更符合物种运动真实情况且具有宽度属性的生态廊道,还可以依据电流强弱与电流累计恢复值区别廊道重要等级、识别生态夹点及生态障碍

点等,改善生态系统流动性并连通生态网络。通过生态安全格局构建及关键区域定位,将为区域间用地类型调整、国土空间生态修复及“三区三线”划定工作提供依据。电路理论能够直观反馈生态活动范围,但廊道宽度阈值直接或间接影响着生态网络空间分布。如何确定最佳成本距离仍有待商榷。同时生态系统活动过程具有延时性与连续性,应针对生态安全格局的时空演变过程加深分析。其次,构建生态安全格局的重要意义在于协调发展与保护,最终以实现国土空间格局的综合效益最大化。因此,基于生态安全格局约束下国土空间格局模拟的研究主题具有重要意义。今后,将在以上3个方面深入研究,以期缓解“三生”冲突,更好地服务于国土空间规划等相关工作。

5 结论

(1) 安徽省生态本底较好,生态源地共计53块,面积达 $4.22 \times 10^4 \text{ km}^2$,所占比例为30.50%,整体形

成“一心两屏四带多点”空间格局。南部地区源地集中连片,生态系统服务价值高,应着力提升生态系统稳定性,做好生态保育提质升级工作,而北部地区源地少且分散,多为地质灾害易发区,生态服务价值低,亟需开展生态关键区域的保护及修复工作。

(2) 安徽省生态廊道共识别 95 条,廊道总长 1 755.64 km,最长 94.90 km,最短仅 2 km;根据景观连通性分析,筛选出 68 条关键廊道,26 条重要廊道及 1 条一般廊道。主要以淮河流域,沿江经济带、环巢湖湿地群、大别山区及皖南山区为核心发散至各源地。

(3) 安徽省生态夹点共识别 119 处,面积达 412.45 km²,主要分布于安徽中部关键廊道及重要廊道;生态障碍点共识别 46 处,面积达 423.20 km²,大型障碍点主要分布于合肥、淮北、蚌埠、淮南、马鞍山及芜湖各市。

(4) 安徽省生态夹点及零星生态障碍点应以自然保育为主,大型生态障碍点应通过人工修复及自然恢复两措并举展开修复,基于南北差异及用地类型分别为安徽省国土空间生态修复提供多元化指引。

[参 考 文 献]

- [1] 李永庚,蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 95-100.
- [2] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5090-5100.
- [3] 于淑会,刘金铜,李志祥,等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1664-1672.
- [4] 王岳,刘学敏,哈斯额尔敦. 荒漠化治理“经济—生态—社会”效益耦合协调度时空分异及其驱动因素:以毛乌素沙地为例[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1224-1237.
- [5] 朱广伟,许海,朱梦圆,等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1510-1524.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 刘金花,杨朔,吕永强. 基于生态安全格局与生态脆弱性评价的生态修复关键区域识别与诊断:以汶上县为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3343-3352.
- [9] 方臣,匡华,贾琦琪,等. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的武汉市生态安全格局评价[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(5): 1446-1454.
- [10] 杨志广,蒋志云,郭程轩,等. 基于形态空间格局分析和

最小累积阻力模型的广州市生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3367-3376.

- [11] Ran Yuju, Lei Dongmei, Li Jie, et al. Identification of crucial areas of territorial ecological restoration based on ecological security pattern: a case study of the central Yunnan urban agglomeration, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109318.
- [12] Zhou Shaokun, Song Yuhong, Li Yijiao, et al. Construction of ecological security pattern for plateau lake based on MSPA-MCR model: a case study of Dianchi Lake area [J]. Sustainability, 2022, 14(21): 14532-14548.
- [13] 王越,赵雯琳,刘纯青. 基于 MSPA-Conefor-MCR 路径的生态网络优化及其构建:以彭泽县为例[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 504-518.
- [14] 吴英迪,蒙古军. 中国自然资源生态服务重要性评价与空间格局分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1): 17-33.
- [15] 翟香,兰安军,廖艳梅,等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域定量识别:以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 322-329.
- [16] 周锐,王新军,苏海龙,等. 基于生态安全格局的城市增长边界划定:以平顶山新区为例[J]. 城市规划学刊, 2014(4): 57-63.
- [17] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建:以江西省为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250-258.
- [18] 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.
- [19] 蒙古军,王雅,王晓东,等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [20] 倪庆琳,丁忠义,侯湖平,等. 基于电路理论的生态格局识别与保护研究:以宁武县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 67-73.
- [21] Wu Yingdi, Han Ziyang, Meng Jijun, et al. Circuit theory-based ecological security pattern could promote ecological protection in the Heihe River Basin of China [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 30(10): 27340-27356.
- [22] 徐伟振,黄思颖,耿建伟,等. 基于 MCR 和重力模型下的厦门市生态空间网络构建[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 264-272.
- [23] 王海鹰,秦奋,张新长,等. 基于蚁群优化算法的城市生态用地空间规划模型[J]. 地理科学, 2017, 37(3): 426-436.
- [24] 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[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136.

- 及合规性分析[J].中国水土保持科学,2019,17(5):136-145.
- [3] 李小军.水土流失的原因及对策[J].现代化农业,2021(11):25-26.
- [4] 谭杰峻,毕永清,周从斌.西藏地区生产建设项目扰动地表遥感监测方法与监管应用[J].中国水土保持,2019(2):63-66.
- [5] 毕永清,范建容,徐京华,等.基于纹理的高寒地区人为扰动地表信息提取[J].测绘与空间地理信息,2018,41(4):184-188.
- [6] 夏既胜,马梦莹,符钟壬.基于 GF-2 遥感影像的机械性破损面提取方法[J].国土资源遥感,2020,32(2):26-32.
- [7] 陈晓枫,洪倩,陈枫楠,等.基于高分影像的建设项目扰动面积自动提取[J].人民黄河,2021,43(9):120-124.
- [8] 史蕾.面向对象的高分辨率遥感影像特征选择与分类研究[D].湖北 武汉:武汉大学,2018.
- [9] Running S W. Global drought disturbance monitoring and impacts on net primary productivity at large scales [EB/OL].(2012-08-09)[2022-07-12]. <https://eco.confex.com/eco/2012/webprogram/Paper33402.html>.
- [10] Segarra J, Buchailot M L, Araus J L, et al. Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications[J]. Agronomy, 2020,10(5):641-653.
- [11] Li J, Roy D P. A global analysis of Sentinel-2 A, Sentinel-2 B and Landsat-8 data revisit intervals and implications for terrestrial monitoring [J]. Remote Sensing, 2017,9(9):902-907.
- [12] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报[EB/OL].(2021-09-30)[2022-07-12]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202109/t20210930_1545971.html.
- [13] Coluzzi R, Imbrenda V, Lanfredi M, et al. A first assessment of the Sentinel-2 Level 1-C cloud mask product to support informed surface analyses [J]. Remote Sensing of Environment, 2018,217:426-443.
- [14] 中华人民共和国水利部.生产建设项目水土保持监测与评价标准:GB/T51240-2018[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [15] 刘心云,郑江华.基于分形纹理特征的新疆罗布麻遥感分类[J].中山大学学报(自然科学版),2019,58(1):22-29.
- [16] 陈波,胡玉福,喻攀,等.基于纹理和地形辅助的山区土地利用信息提取研究[J].地理与地理信息科学,2017,33(1):1-8.
- [17] 汪小钦,邱鹏勋,李娅丽,等.基于时序 Landsat 遥感数据的新疆开孔河流域农作物类型识别[J].农业工程学报,2019,35(16):180-188.
- [18] Yang Xiucheng, Zhao Shanshan, Qin Xuebin, et al. Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening [J]. Remote Sensing, 2017,9(6):596-614.
- [19] Li Kangning, Chen Yunhao. A Genetic Algorithm-based urban cluster automatic threshold method by combining RS DNB, NDVI, and NDBI to monitor urbanization [J]. Remote Sensing, 2018, 10(2):277-297.
- [20] 杨栩,朱大明,杨润书,等.一种提取不透水面的可见光波段遥感指数[J].农业工程学报,2020,36(8):127-134.
- [21] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I H. Textural features for image classification [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1973(6):610-621.
- [22] Millard K, Richardson M. On the importance of training data sample selection in random forest image classification: a case study in peatland ecosystem mapping [J]. Remote Sensing, 2015,7(7):8489-8515.
- (上接第 216 页)
- [25] 陈小平,陈文波.鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J].应用生态学报,2016,27(5):1611-1618.
- [26] 古雄.基于生态网络构建的县域国土空间生态保护与修复策略研究[D].江西 南昌:江西财经大学,2022.
- [27] 王琦,付梦娣,魏来,等.基于源—汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以安徽省宁国市为例[J].环境科学学报,2016,36(12):4546-4554.
- [28] 陈影,哈凯,贺文龙,等.冀西北间山盆地景观格局变化及优化研究:以河北省怀来县为例[J].自然资源学报,2016,31(4):556-569.
- [29] Mcrae B H, Dickson B G, Keitt T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation [J]. Ecology, 2008,89(10):2712-2724.
- [30] 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[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.
- [31] 高吉喜,赵少华,侯鹏.中国生态环境遥感四十年[J].地球信息科学学报,2020,22(4):705-719.
- [32] 覃彬桂,林伊琳,赵俊三,等.基于 InVEST 模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J].中国环境科学,2023,43(2):809-820.
- [33] 张海铃,叶长盛,胡梦姝.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.
- [34] 付梦娣,罗建武,田瑜,等.基于最小累积阻力模型的自然保护区网络构建与优化:以秦岭地区为例[J].生态学杂志,2018,37(4):1135-1143.