

文章编号:1673-9469(2024)02-0105-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.014

基于 RSEI 的长时序区域生态安全格局构建 ——以太行山区河北段为例

张贝贝¹, 张晓楠², 张启斌¹, 李悦¹, 宋宏利^{1*}

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 以太行山区河北段为研究对象, 计算遥感生态指数 (Remote Sensing Ecological Index, RSEI), 进而识别生态源地, 选取土地利用类型、归一化植被指数、高程、坡度等多源空间数据进行综合阻力评价, 采用电路理论模型提取生态廊道和生态夹点, 构建“源地-廊道-节点”的长时序区域生态安全格局。结果表明: (1) 研究区 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年、2021 年的 RSEI 均值分别为 0.507、0.538、0.554、0.493、0.541, 20 年间 RSEI 呈现“上升-下降-上升”的变化趋势; (2) 研究区源地总面积逐期增加, 初期至末期面积增加 5 705 km², 面积占比由 2.66% 增加至 18.56%, 源地斑块 RSEI 均值由 0.774 上升为 0.834; (3) 研究区主要生态廊道呈现南北纵向分布, 研究末期识别生态源地 16 个, 生态廊道 21 条, 生态夹点 5 个。

关键词: 生态安全格局; 遥感生态指数 (RSEI); 电路理论; 太行山区

中图分类号: P901

文献标识码: A

Construction of Long Term Regional Ecological Security Pattern Based on RSEI-taking the Hebei Section of the Taihang Mountains as an Example

ZHANG Beibei¹, ZHANG Xiaonan², ZHANG Qibin¹, LI Yue¹, SONG Hongli^{1*}

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. School of Mining and Surveying Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: Taking the Hebei section of the Taihang Mountains as the research object, the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) is calculated to identify the ecological source area. Multiple spatial data sources such as the land use type, normalized vegetation index, elevation, and slope are selected for comprehensive resistance evaluation. The circuit theory model is used to extract ecological corridors and pinch points, and a long-term regional ecological security pattern of “source area corridor node” is constructed. The results show that: (1) The average RSEI of the study area in 2002, 2007, 2012, 2017, and 2021 are 0.507, 0.538, 0.554, 0.493, and 0.541, respectively, and the RSEI shows a trend of “rising-falling-rising” over the past 20 years; (2) The total area of the source area in the research area increases gradually, with an increase of 5705 km² from the initial stage to the final stage. The proportion of area increases from 2.66% to 18.56%, and the average RSEI of the source patches increases from 0.774 to 0.834; (3) The main ecological corridors in the research area are distributed vertically from north to south. At the end of the study, 16 ecological source areas, 21 ecological corridors, and 5 ecological pinch points are identified.

Key words: ecological security pattern; remote sensing ecological index (RSEI); circuit theory;

收稿日期: 2023-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32001130); 河北省自然科学基金资助项目 (D2019402067)

作者简介: 张贝贝 (1995-), 男, 山西兴县人, 硕士, 研究方向为 3S 技术集成与应用。

* 通信作者: 宋宏利 (1980-), 男, 河北抚宁人, 博士, 教授, 研究方向为 3S 技术集成与应用。

Taihang mountain

生态安全格局是当前中国“建设生态文明”的重要战略之一,对维持生态系统稳定性、保障区域生态安全、预防自然灾害、促进人与自然和谐发展具有重要意义。生态安全格局是研究空间演化与生态过程相关性的有效方法^[1],通过格局构建,可以识别影响区域生态安全的关键要素,进而依据格局与过程的反馈作用,实施全方位、全地区、全过程的生态保护^[2-3],持续强化有利生态过程,充分发挥生态系统服务功能。

当前基于“源地识别-阻力面构建-廊道提取”框架是生态安全格局相关研究的基本范式^[4-5],其中源地识别方面,有学者直接选取自然保护区、森林、湿地等生态系统结构较为稳定的区域作为生态源地^[6-7],也有学者通过形态学空间格局分析^[8],生态系统服务供需评价^[9],生态敏感性评价^[10]以及遥感生态指数(Remote Sensing Ecology Index, RSEI)^[11]的方法提取生态源地。阻力面构建方面,大多数研究通过多个阻力因子加权叠加生成综合生态阻力面,部分研究基于土地利用数据进行阻力赋值或在其基础上进行修正^[12]。廊道提取方面,主要采用最小累积阻力模型和电路理论模型,其中电路理论模型依据电荷的随机游走模拟景观中物种的生态过程^[13],减少了廊道冗余^[14],一定程度上解决了最小费用路径方法不能明确廊道具体范围和关键区域的局限性^[15-17]。

太行山区是京津冀的天然生态屏障,承担着重要的生态服务功能^[18]。其中太行山区河北段是河北省防护林建设、农林牧综合发展的重要基地^[19],通过长时序生态安全格局构建可以探究格局动态变化以及局部生态环境的空间差异性,对生态环境改善和生态安全维护具有重要意义。基于此,本文依据 RSEI 识别生态源地,结合电路理论提取生态廊道和生态节点,构建 5 个时期“源地-廊道-节点”的区域生态安全格局,为太行山区的生态环境治理提供参考借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

太行山区河北段是指太行山脉以东,北起北拒马河,南至漳河,横向宽度约 70~120 km,纵向长度达 410 km,地理形状为南北带状分布。太行山区属暖温带大陆性季风气候,冬冷夏热,干旱少

雨,地貌类型以低山、丘陵为主,地势西高东低,落叶、阔叶林是其主要植被类型,境内分布的河流有拒马河、漕河、唐河、大沙河、滹沱河、蛟河、沙河、洛河、滏阳河、漳河等。

1.2 数据来源

本文基于 GEE 平台,选取 5 个研究年份植被生长茂盛期(6—9月)的 Ladsat5 和 Ladsat8 遥感影像数据,空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d,在 GEE 平台进行地表反射率校正,影像去云处理,水体掩膜,计算绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)、热度(LST)4 个分量指标,并进行归一化处理。研究采用土地利用数据来源于 Landsat 中国土地覆盖年度数据集(CLCD),总体准确率达 80%,空间分辨率为 30 m;NDVI 数据采用 GEE 平台计算得到的归一化植被绿度指数;DEM 数据来自地理空间数据云网站,空间分辨率为 30 m;坡度数据由 DEM 计算得到,本文统一投影坐标系为 WGS_1984_UTM Zone_49。

2 研究方法

2.1 遥感生态指数

遥感生态指数是区域生态环境质量评价的重要指标,具有数据易获取,权重设置无人参与,结果能够合理反映区域生态状况,以及可视化等优点^[20]。GEE 相比传统 ENVI 软件,能快速有效地实现大尺度、长时序的地理数据处理和信息挖掘^[21],本文在 GEE 平台上进行遥感影像去云处理、消除异常值、改善色差、归一化处理,耦合绿度、湿度、热度、干度进行主成分分析,采用第一主成分 PC1 构建遥感生态指数(RSEI)。RSEI 表达式为

$$RSEI = f(NDVI, WET, LST, NDBSI)$$

RSEI 各分量指标计算公式如表 1, ρ_{nir} 和 ρ_{red} 分别表示 Landsat 影像的近红外波段和红波段的反射率, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_7 分别表示蓝波段,绿波段,红波段,近红外波段,短波红外 1 波段,短波红外 2 波段的反射率。 L_6 为 ETM+热红外 6 波段的像元, DN 为像元灰度值, gain 和 bias 为热红外波段的增益和偏置值, K_1 和 K_2 为发射前预设常量, λ 为热红外波段中心波长, ρ 为常量, ε 为地表比辐射率。

表 1 RSEI 各分量指标计算公式

Tab. 1 Calculation formula for various components of RSEI indicators

指标	计算公式
NDVI	$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red})$
WET	$L5_{wet} = 0.0315 \times B_1 + 0.2021 \times B_2 + 0.3012 \times B_3 + 0.1594 \times B_4 - 0.6806 \times B_5 - 0.6109 \times B_6$ $L8_{wet} = 0.1511 \times B_1 + 0.1973 \times B_2 + 0.3283 \times B_3 + 0.3407 \times B_4 - 0.7117 \times B_5 - 0.4559 \times B_6$
NDBSI	$NDBSI = (IBI + SI) / 2$ $SI = \{ [(\rho_{swirl} + \rho_{red}) - (\rho_{swirl} + \rho_{blue})] / [(\rho_{swirl} + \rho_{red}) + (\rho_{nir} + \rho_{blue})] \}$
IBI	$IBI = 2 \times \rho_{swirl} / (\rho_{swirl} + \rho_{nir}) - (\rho_{nir} / (\rho_{nir} + \rho_{red}) + (\rho_{green} / (\rho_{green} + \rho_{swirl})))$ $/ 2 \times \rho_{swirl} / (\rho_{swirl} + \rho_{nir}) + (\rho_{nir} / (\rho_{nir} + \rho_{red}) + (\rho_{green} / (\rho_{green} + \rho_{swirl})))$
LST	$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) * \ln(\epsilon)]$ $L_6 = gain \times DN + bias$ $T = K_2 / \ln(k_1 / L_6 + 1)$

2.2 源地识别方法

本文参考相关文献^[22-23]将 RSEI 结果大于 0.7 的区域作为备选生态源地,在 ArcGIS 软件中进行重分类、属性提取、栅格转面等操作,得到备选源地斑块,考虑到斑块面积过小难以支撑区域和周围的能量循环^[17],将斑块面积大于等于 50 km² 作为提取生态源地的选入阈值。

2.3 层次分析法

层次分析法(AHP)包含建立层次结构模型、构造成对比较阵、计算权向量并做一致性检验和层次总排序四个步骤^[24],本文借助 yaahp 软件通过对各生态阻力因子进行两两比较,构建重要性矩阵,计算最大特征根和一致性比例,对比通过一致性检验,最终得到各阻力因子权重数值。

2.4 生态阻力面指标体系

生态阻力面反映了物种空间运动的难易趋势^[25]。本文选取 4 个阻力因子构建综合生态阻力

面,参考相关文献^[17,26-27]将阻力值设定为 0~1 000,阻力值越大,生态环境越差,物种迁移越困难。利用 arcgis 重分类工具将各生态阻力因子按表 2 进行分级赋值,得到单因子阻力面,最后在 arcgis 软件栅格计算器里加权叠加生成综合生态阻力面。

2.5 电路理论模型

电路理论将物种个体或基因流视为电子,用电阻面替代景观阻力面,将生境质量较好的地块视作节点替代生态源地。在 Circuitscape 软件识别生态廊道过程中,生境质量越高的区域,越有利于物种迁移^[28];电流密度越高的区域,生态通道的阻力越小^[29]。Linkage Mapper 工具可以识别景观中的生态廊道与关键节点,从而分析区域范围内物种栖息地的连通性^[30],本文使用 Linkage Pathways Tool 工具识别源间生态廊道;使用 Pinchpoint Mapper 工具“all to one”模式进行迭代运算,计算生态廊道电流密度,进而提取生态夹点。

表 2 生态阻力因子指标分类体系

Tab. 2 Classification system of ecological resistance factor indicators

指标	权重	分类	阻力值	指标	权重	分类	阻力值
土地类型	0.567	林地	1	NDVI	0.237	0~0.2	100
		灌木	10			0.2~0.4	80
		草地	20			0.4~0.6	50
		耕地	50			0.6~0.8	20
		水体	200			0.8~1.0	0
		裸地	600			—	—
		不透水面	1 000			—	—
高程/m	0.124	<300	1	坡度/(°)	0.072	<8	1
		300~600	20			8~15	20
		600~1 200	50			15~25	50
		1 200~1 500	80			25~35	80
		>1 500	100			>35	100

3 结果与分析

3.1 遥感生态指数

RSEI 分量指标归一化主成分分析结果如表 3,其中 NDVI 和 WET 第一主成分特征向量为正, NDBSI 和 LST 为负,且各时期 PC1 贡献率均大于 77%。RSEI 及各指标分量数值如表 4,其中 2012 年 RSEI 数值最大,此时期区域生态环境最优。从 RSEI 数值变化来看,2002—2012 年 RSEI 持续升高,数值增加 0.047,年增加率为 0.9%,生态环境持续改善;2012—2017 年 RSEI 下降 0.061,年下降率为 2.2%,该时期生态环境遭到严重破坏;2017—2021 年 RSEI 增加 0.048,生境质量有所回升但不及 2012 年。如图 1,从长时序空间格局变

化来看,研究区前三个时期的生态环境质量持续改善,RSEI 等级从西侧向东逐渐升高,2012 年 RSEI 空间格局达到最优;2017 年研究区东南侧 RSEI 等级大面积下降,局部生态环境恶化;2021 年研究区北端和中西部区域 RSEI 等级升高,区域整体 RSEI 较 2017 年有所提高。

3.2 生态安全格局构建

3.2.1 生态源地

源地识别结果如图 2 和表 5 所示,研究初期识别 9 个生态源地,涿鹿县和蔚县分布有 6 个,其余 3 个分布在阜平县、灵寿县和平山县,源地总面积 955 km²,面积占比为 2.66%,最大源地斑块面积为 455 km²。2007 年南部的临城县、内丘县以及武安市、沙河市、信都区较上一期有源地斑块新增,源

表 3 2002—2021 年 RSEI 各分量指标特征向量及各个主成分贡献率

Tab. 3 Feature vectors and contribution rates of each principal component of RSEI indicators from 2002 to 2021

年份	主成分	绿度 NDVI	湿度 WET	干度 NDBSI	热度 LST	贡献率/%
2002	PC1	0.614 8	0.406 4	-0.616 6	-0.276 9	80.89
2007	PC1	0.702 3	0.331 4	-0.483 2	-0.404 3	77.56
2012	PC1	0.749 7	0.379 7	-0.522 7	-0.143 1	85.01
2017	PC1	0.545 4	0.484 9	-0.528 1	-0.434 1	88.39
2021	PC1	0.571 8	0.486 4	-0.556 4	-0.356 2	82.29

表 4 2002—2021 年 RSEI 和各分量指标数值

Tab. 4 RSEI and various component indicator values from 2002 to 2021

年份	遥感生态指数 RSEI	绿度 NDVI	湿度 WET	热度 LST	干度 NDBSI
2002	0.507	0.682	0.491	0.553	0.538
2007	0.538	0.643	0.536	0.611	0.596
2012	0.554	0.463	0.629	0.807	0.660
2017	0.493	0.534	0.544	0.521	0.543
2021	0.541	0.579	0.567	0.420	0.498

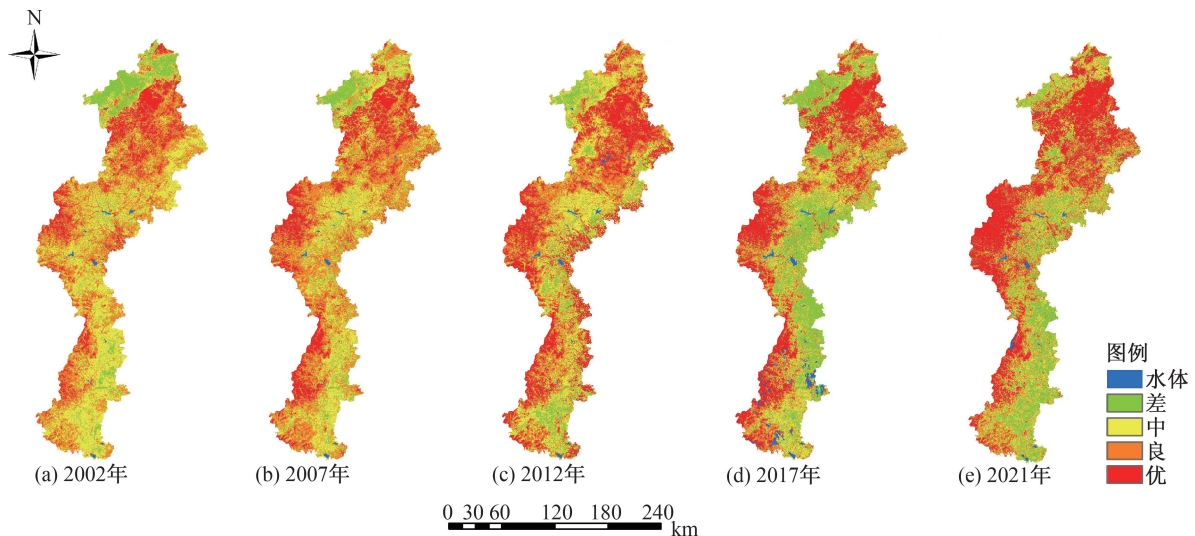


图 1 RSEI 等级空间分布图

Fig. 1 RSEI level spatial distribution map

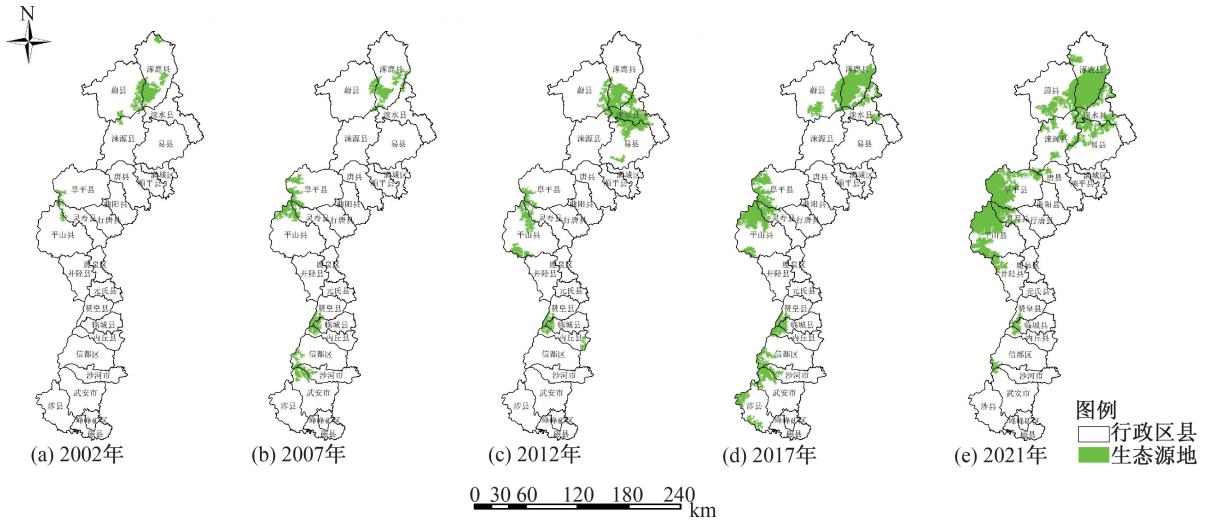


图 2 生态源地空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of ecological source areas

表 5 2002—2021 年研究区生态源地识别结果

Tab. 5 Identification results of ecological source areas in the study area from 2002 to 2021

年份	源地斑块个数	最大源地面积/km ²	最小源地面积/km ²	源地总面积/km ²	源地面积占比/%
2002	9	455	51	955	2.66
2007	12	341	58	1 719	4.79
2012	10	1 676	53	2 668	7.44
2017	14	1 335	58	4 322	12.05
2021	16	2 254	53	6 660	18.56

地总面积为 1 719 km²,最大源地斑块面积为 341 km²;2012 年研究区有跨越涿鹿县、蔚县、涞水县的大面积源地斑块,且易县、平山县新增源地斑块,源地总面积为 2 668 km²,最大源地面积 1 676 km²;2017 年源地总面积较上一期显著增加,研究区西南侧出现较多源地斑块,源地整体空间分布达到最优;2021 年涉县境内的 3 个源地斑块消失,涞源县出现 4 个新增源地斑块,该时期源地斑块共计 16 个,源地总面积 6 660 km²,最大源地斑块面积 2 254 km²。从长时序变化来看,研究区 20 年间源地总面积增加 5 705 km²,面积占比由初期的 2.66% 上升为 18.56%,源地空间布局显著提升。

如表 6,研究时期内随着源地斑块的增加或减少,源地 RSEI 总值升高或降低,斑块个数与 RSEI

总值表现为正相关。此外,5 个时期内研究区的源地斑块 RSEI 均值由 0.774 升高至 0.834,年增加率为 0.3%,数值变化较为明显。总体上,研究时段内区域总体 RSEI 有升有降,但源地斑块的总面积不断扩大,源地斑块内的 RSEI 均值平稳升高,持续保持较高水平。

3.2.2 综合生态阻力面

本文采用层次分析法计算土地利用数据、归一化植被指数 (NDVI)、高程、坡度的阻力权重分别为 0.567、0.237、0.124、0.072,指标一致性比例为 0.025 7 > 0.1,通过一致性检验结果。如图 3,本文将综合阻力值划分为 1、20、50、80、100,其中综合阻力值为 1 的区域划分为生态缓冲区。从长时序变化来看,生态缓冲区面积大小与综合阻力面阻力均值呈现负相关,研究区东南侧的综合生态阻力值相对较高,西北侧的综合阻力面变化显著。具体数值如表 7,研究区综合阻力均值呈现“先升高后下降”的变化趋势,其中 2002 年综合阻力均值最小,缓冲区面积占比为 30.35%;2012 年综合阻力均值最大,缓冲区面积占比为 16.2%;2017 年和 2021 年综合阻力均值逐渐下降,生态缓冲区面积较 2012 年分别增加 4 494 km² 和 5 495 km²。

表 6 研究区源地斑块 RSEI 统计值

Tab. 6 RSEI statistical values of source patches in the research area

年份	源地斑块个数	源地 RSEI 总值	源地 RSEI 均值
2002	9	6.970	0.774
2007	12	9.406	0.784
2012	10	7.949	0.795
2017	14	11.605	0.829
2021	16	13.346	0.834

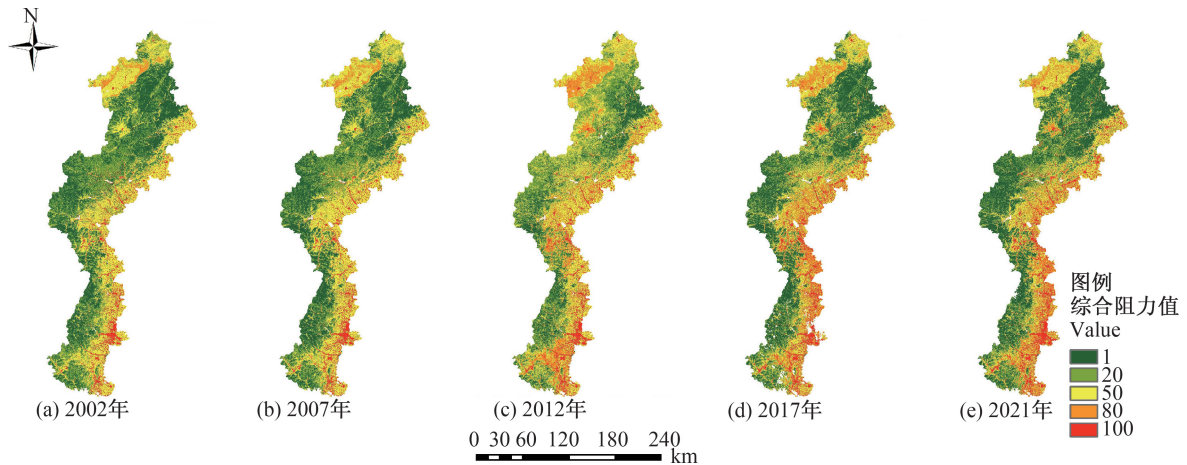


图3 综合阻力面空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of comprehensive resistance surface

表7 2002—2021年研究区综合生态阻力面均值

Tab. 7 Average value of integrated ecological resistance surface from 2002 to 2021 in the study area

年份	阻力平均值	标准差	缓冲区面积/km ²	缓冲区面积占比/%
2002	32.48	29.46	10 888	30.35
2007	34.11	30.20	10 705	29.84
2012	43.75	30.53	5 814	16.20
2017	39.78	33.73	10 308	28.73
2021	38.38	34.10	11 309	31.52

3.2.3 生态廊道

各时期生态廊道识别结果如表8所示,其中2002年、2012年的廊道条数均为11条,2007年为16条,2017、2021年廊道条数相差1条,分别为20条、21条,整个研究时期里最长廊道为180.48 km,最短廊道为69.77 km。从廊道数目和廊道总长度变化来看,2002—2007年,廊道数目增加5条,廊道总长度增加56.01 km;2007—2012年,廊道数目减少5条,廊道总长度减少76.32 km;2012—2017年,廊道数目增加9条,廊道总长度增加482.98 km;2017—2021年,廊道数目增加1条,廊道总长度减少677.47 km;总体上,研究区2017年的廊道数目和廊道总长度综合最优。

表8 2002—2021年研究区生态廊道识别结果

Tab. 8 Results of ecological corridor identification in the study area from 2002 to 2021

年份	廊道条数	廊道总长度/km	最长廊道/km
2002	11	527.98	178.72
2007	16	583.99	163.51
2012	11	507.67	156.92
2017	20	990.65	180.48
2021	21	313.18	69.77

3.2.4 生态夹点

各时期电流密度图像如图4所示,源地周边电流密度等级较高,生态夹点分布较多。在arcgis软件中统计各时期电流密度均值分别为0.018、0.021、0.025、0.026、0.032,均值逐年增加,末期较初期的电流密度均值增加0.014 A,年增加率达到3.8%。从长时间序列变化来看,电流密度均值与源地面积逐期扩大的趋势相符,本文识别各时期生态夹点个数分别为11、9、26、14、5个。

3.3 长时序生态安全格局时空变化分析

长时序生态安全格局构建结果如图5所示,其中2002年的生态安全格局包含有9个生态源地,11条生态廊道,11个生态夹点,但其“源地-廊道-夹点”只分布在研究区上部区域,格局辐射范围十分有限,区域整体生态安全格局较差。2007年较初期源地个数和廊道条数均有所增加,生态廊道向南延伸,格局得到增强。2012年,南段3个源地斑块消失,北端源地面积明显扩大,内丘县出现一个源地斑块,局部空间格局发生变化,且主要以北端格局的增强和南端格局的减弱为主要特征。2017年生态廊道和生态节点较广泛地分布在研究区西侧,形成了较大面积的辐射格局,区域整

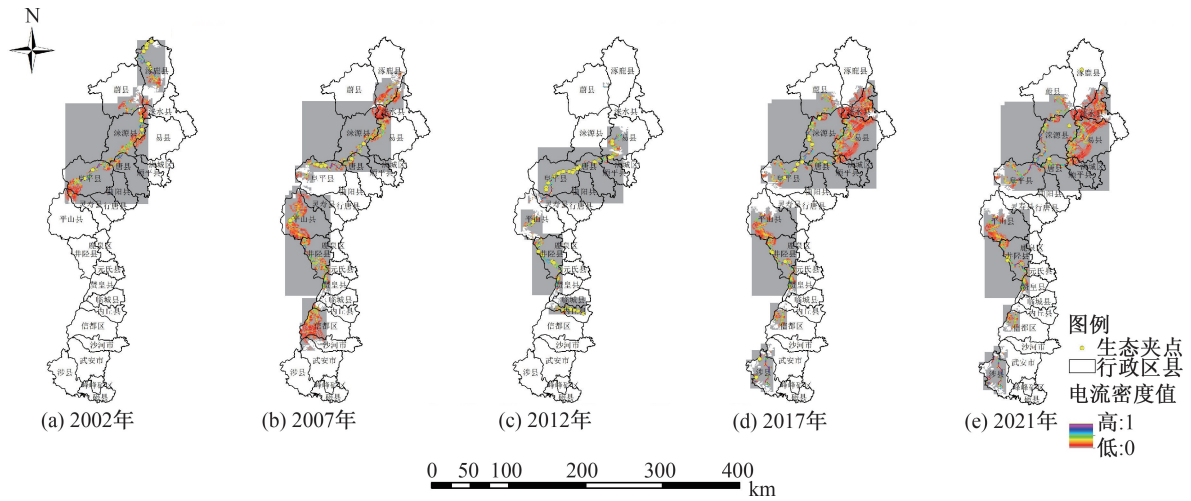


图 4 电流密度栅格空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of current density grid

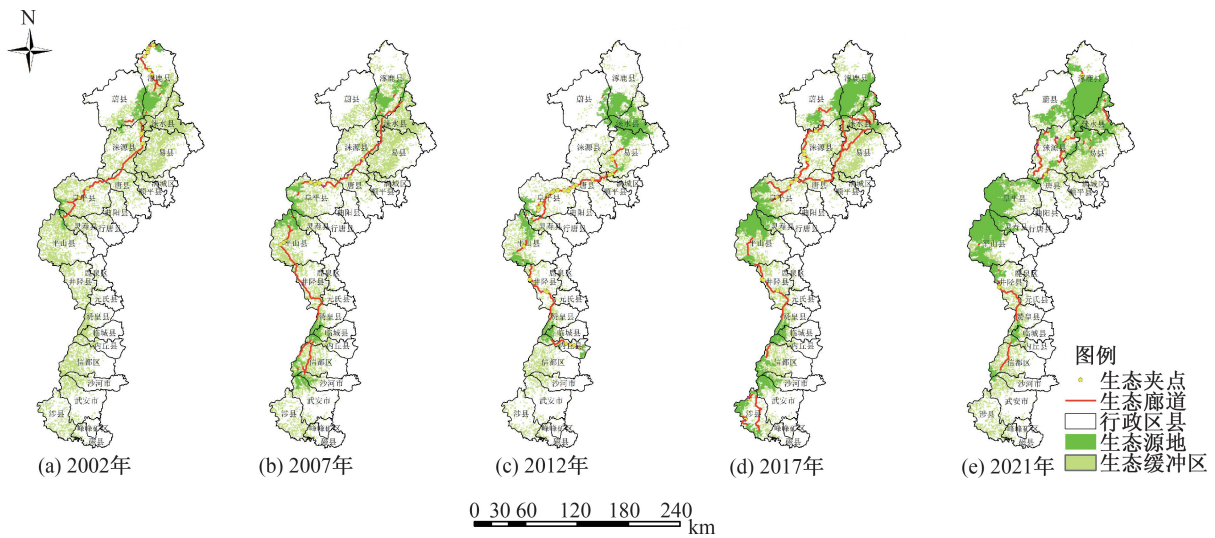


图 5 生态安全格局构建结果

Fig. 5 Results of ecological security pattern construction

体格局较 2012 年显著增强。2021 年北端和中西部地区出现部分源地斑块新增以及既有源地斑块的融合,源地总面积继续增加,北端生态安全得到加强;但相较 2017 年,南端区域的生态源地消失,向南延伸的生态廊道断裂,不利于研究区的整体生态安全。

4 结论

1) 研究期前 10 年 RSEI 指数持续上升,生态环境改观明显。2012—2017 年 RSEI 指数由 0.554 下降为 0.493,且低于初期 RSEI 值,这期间区域生态环境恶化,生态基底回退严重。2017—2021 年, RSEI 数值回升,2021 年 RSEI 为 0.541,生态环境有所恢复但不及 2012 年(0.554),可见生态环境

一旦遭到破坏,相同的时间内无法得到恢复,生态环境改善需要不间断的长期维护。

2) 从长时序生态安全格局来看,各时期大面积生态源地主要分布在研究区北端,中西部,西南部 3 个区域,东部区域研究期间没有或极少有源地新增,此外,源地和缓冲区的土地类型多是林地、灌木或草地。研究时段内生态廊道由北向南延长,廊道电流密度均值逐期升高,2012 年识别生态夹点数量最多,为 26 个,研究区各时期“源地-廊道-节点”的生态安全格局具有显著的空间差异性。

3) RSEI 后 10 年呈现“降低-升高”的变化趋势,区域生态环境经历破坏到恢复的过程,但源地斑块 RSEI 均值持续升高并保持较高水平。整个研究时期,源地斑块保持一定面积的同时生境质量逐期升高,生态源地服务功能不断增强。

参考文献:

- [1] 巩雅博. 基于供需平衡和电路理论的区域生态安全格局研究[D]. 湖南: 南华大学, 2022.
- [2] 梁珍宝. 鄱阳湖生态经济区土地利用与生态安全格局时空变化研究[D]. 江西: 江西农业大学, 2021.
- [3] 潘竟虎, 王云. 基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J]. 生态学报, 2021, 41(07): 2582-2595.
- [4] 童潇, 林蔚, 李晖. 基于流域生态安全格局构建的广州北部生态屏障区关键区域识别与修复策略[J]. 园林, 2023, 40(03): 84-92.
- [5] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 等. 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[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6486-6494.
- [6] 汉瑞英, 赵志平, 肖能文. 生物多样性保护优先区生态网络构建与优化——以太行山片区为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(02): 61-67.
- [7] 古璠, 黄义雄, 陈传明等. 福建省自然保护区生态网络的构建与优化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(03): 1013-1020.
- [8] 李志英, 李媛媛, 李文星, 等. 基于形态学空间格局分析与最小累积阻力模型的昆明市生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(01): 69-79.
- [9] 杜文武, 任超群, 张志杰, 等. 基于生态系统服务供需的重庆市主城区生态安全格局构建[J]. 园林, 2022, 39(03): 30-38.
- [10] 文惠, 邓西鹏, 李颖, 等. 整合生态空间的县域生态安全格局识别与构建——以武夷山市为例[J]. 生态学杂志, 2023, 42(05): 1197-1204.
- [11] 吕大伟, 蔡海生, 张学玲, 等. 基于遥感生态指数的弋阳县生态安全格局构建及优化[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(03): 545-556.
- [12] 吕彦莹, 王晓婷, 于新洋, 等. 山东省自然生态空间系统化识别与差异化管控研究[J]. 生态学报, 2022, 42(07): 3010-3019.
- [13] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4363-4372.
- [14] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [15] 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(05): 67-73.
- [16] 李久林, 徐建刚, 储金龙. 基于 Circuit 理论的城市生态安全格局研究——以安庆市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(08): 1812-1824.
- [17] 宁琦, 朱梓铭, 覃盟琳, 等. 基于 MSPA 和电路理论的南宁市国土空间生态网络优化研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(02): 306-318.
- [18] 王雪燕, 赵丽, 苏孟维. 供需关系下保定太行山区生态系统服务时空演化研究[J]. 林业与生态科学, 2024, 39(01): 57-65.
- [19] 李辉, 石乐, 张岩峰. 河北省太行山区绿色农业发展问题与路径优化研究[J]. 智慧农业导刊, 2024, 4(01): 56-59.
- [20] 徐涵秋, 邓文慧. MRSEI 指数的合理性分析及其与 RSEI 指数的区别[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(01): 1-7.
- [21] 吴雨昕, 曹诗怡, 尹婷靖, 等. 基于遥感生态指数的岳阳市生态环境质量监测与评价[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2023, 36(01): 56-61.
- [22] 黄苍平, 尹小玲, 黄光庆, 等. 厦门市同安区生态安全格局构建[J]. 热带地理, 2018, 38(06): 874-883.
- [23] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(05): 889-897.
- [24] 何佳萍, 陈羽宁, 刘佳儒, 等. 基于 AHP 的成都市实施限塑令影响因素分析[N]. 山西科技报, 2022-02-28(B07).
- [25] 彭建, 贾靖雷, 胡熠娜, 等. 基于地表湿润指数的农牧交错带地区生态安全格局构建——以内蒙古自治区杭锦旗为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(06): 1990-1998.
- [26] 白雨霞. 西安市土地利用变化与生态安全格局研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [27] 翟香. 基于生态安全格局的贵州省国土空间生态修复关键区域识别[D]. 贵州: 贵州师范大学, 2022.
- [28] 李涛, 巩雅博, 戈健宅, 等. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建——以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(07): 2555-2564.
- [29] 周浪, 李明慧, 周启刚, 等. 基于电路理论的特大山地区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(02): 319-325+334.
- [30] 李瑶, 李久林, 储金龙. 基于电路理论的金寨县生态安全格局构建[J]. 生态科学, 2022, 41(02): 227-236.

(责任编辑 王利君)