

城市化影响下云南省昆明市 生态安全格局时空演变

刘丽^{1,2}, 李加顺^{1,2}

(1. 云南省水利水电科学研究院, 云南昆明 650228;

2. 云南省水土流失防治与绿色发展重点实验室, 云南昆明 650228)

摘要: [目的] 对城市化影响下的城市生态安全格局时空演变开展研究, 分析人类活动对生态连通性的影响, 进而提出改善生态网络的策略, 为城市生态保护与可持续空间治理提供理论支持与决策参考。[方法] 以昆明市为例, 采用遥感生态指数(RSEI)评估区域生境质量, 并结合机器学习模型XGBoost和SHAP解释性分析工具, 明确影响RSEI空间格局的主要驱动因素。基于这些驱动因素, 构建生态阻力面, 并利用形态学空间格局分析(MSPA)、景观连通性指数(LCI)和电路理论, 构建“点-线-面”结合的生态安全格局。[结果] 2000—2023年昆明市的生态安全格局发生了显著变化。尽管生态源面积增加了1258.50 km², 生态源的总面积扩展, 但生态廊道的数量减少了23条, 总长度减少了201.58 km。此外, 生态夹点数量减少了14个, 而生态障碍点则增加了4个, 这些变化严重影响了生态网络的连通性和物种的自由迁徙能力。滇池周边区域受城市扩展和人类活动影响尤为显著, 成为生态阻力值最高的区域, 面临较大的连通性破坏风险。[结论] 为应对城市化带来的挑战, 昆明市应加强对生态源的保护, 修复关键生态廊道, 减少人类活动对生态网络的干扰, 并在滇池周边实施更为严格的生态保护措施, 缓解城市化对生态系统的负面影响。

关键词: 生态网络连通性; 遥感生态指数(RSEI); 生态安全格局; 昆明市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0360-12

中图分类号: X171.1

文献参数: 刘丽, 李加顺. 城市化影响下云南省昆明市生态安全格局时空演变[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 360-371. Liu Li, Li Jiashun. Spatiotemporal evolution of ecological security pattern under influence of urbanization in Kunming City, Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 360-371. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.040; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.040.

Spatiotemporal evolution of ecological security pattern under influence of urbanization in Kunming City, Yunnan Province

Liu Li^{1,2}, Li Jiashun^{1,2}

(1. Yunnan Water Science Research Institute, Kunming, Yunnan 650228, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Soil Erosion Prevention and Green Development, Kunming, Yunnan 650228, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution of urban ecological security patterns under the influence of urbanization was researched, the impacts of human activities on ecological connectivity were analyzed, and corresponding strategies to optimize the ecological network were proposed to provides theoretical support and decision-making references for urban ecological protection and sustainable spatial governance. [Methods] Taking Kunming City as a case study, the remote sensing ecological index (RSEI) was employed to assess regional habitat quality. By integrating the XGBoost machine learning model with SHAP interpretability analysis tools, the main driving factors influencing the spatial pattern of RSEI were identified. Based on these driving factors, an ecological resistance surface was constructed. Subsequently, through the application of morphological spatial pattern analysis (MSPA), landscape connectivity index (LCI), and circuit theory, a comprehensive ‘point-line-plane’ ecological security pattern was established. [Results] From 2000 to 2023, Kunming’s ecological security

收稿日期: 2025-03-13

修回日期: 2025-07-05

采用日期: 2025-07-09

资助项目: 云南省科技人才与平台计划项目“高原立体气候条件作物需水云南省野外科学观测站”(202105AM07009)

第一作者: 刘丽(1982—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 本科, 高级工程师, 主要从事区域生态安全和水土保持研究。Email: ll202499@163.com。

通信作者: 李加顺(1983—), 男(汉族), 云南省曲靖市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域生态安全和水土保持研究。Email: ljs202424@163.com。

pattern underwent significant changes. Although the area of ecological sources increased by 1 258.50 km², representing an expansion of the total ecological source area, the number of ecological corridors decreased by 23, with a total length reduced by 201.58 km. Furthermore, the number of ecological pinch points decreased by 14, while ecological barrier points increased by 4. These alterations seriously affected the connectivity of the ecological network and the free migration capacity of species. Due to urban expansion and intensified human activities, the Dianchi Lake periphery emerged as the most severely impacted zone, exhibiting the highest ecological resistance values and facing a high risk of connectivity degradation. [Conclusion] To counter urbanization challenges, Kunming should strengthen ecological source protection, rehabilitate key ecological corridors, reduce human interference with the ecological network, and implement stricter ecological protection measures in the Dianchi Lake periphery to mitigate the negative impacts of urbanization on the ecosystem.

Keywords: ecological network connectivity; remote sensing ecological index (RSEI); ecological security pattern; Kunming City

全球城市化进程在过去的几十年里加速推进,成为当今世界面临的主要发展趋势之一。根据联合国的报告,到2050年全球70%以上的人口将生活在城市地区,这一变化将对全球生态系统产生深远影响^[1-3]。城市化的过程中,大量自然生态系统被转化为城市建筑、交通设施和农业用地,从而引发生物栖息地的破碎化和退化。生态破碎化是指原本连贯的生态系统被人为活动切割成不连续的碎片,导致生态功能丧失和物种栖息地减少^[4]。城市扩张不仅导致生物多样性的丧失,还加剧了生态服务功能如水源保护、气候调节和土壤保持等的退化。随着城市化进程的加速,生态环境面临的压力日益增加,全球范围内的生物多样性急剧下降,生态系统的稳定性和韧性显著减弱^[5]。因此,城市化被视为生态系统变化的重要驱动力,影响着全球生态网络的结构和功能。

在城市化过程中,生态安全格局的变化尤为关键。如何通过有效的生态网络和保护措施,确保物种的生存和生态系统的稳定性,是城市化过程中需要重点关注的问题^[6]。生态网络的连通性、生态源的保护、生态廊道的衰退以及生态障碍点的形成,都是城市扩张对生态安全格局产生深远影响的表现^[7]。城市化进程加剧了自然栖息地的丧失和分隔,导致了生态廊道的消失,使得物种无法在不同的栖息地之间自由迁徙,基因交流和物种繁殖受到阻碍。此外,城市化还带来了生态障碍点的增加,如道路、建筑和其他基础设施,它们有效地阻隔了物种的迁徙路径,降低了生态网络的连通性^[8-10]。因此,城市化不仅是生态系统退化的源头,也是生态安全格局发生变化的推动力。加强生态网络的保护和连通性恢复,对于提升生态系统的韧性和恢复力至关重要。

近年来,生态网络连通性和生态安全格局的研究在全球范围内不断深化。国外学者主要基于景观

生态学、电路理论和最小累积阻力模型,从宏观尺度构建生态网络^[11-12]。其中电路理论在保护斑块之间的物种迁徙路径识别方面得到广泛应用,并通过插件如 Linkage Mapper, Circuitscape 广泛推广用于区域生态网络优化^[13]。此外,欧盟在自然网络建设中强调生态走廊与生态补偿机制的结合,形成了多尺度、多层级的生态安全体系。在国内,生态安全格局研究多以“源-阻-廊”理论为核心,构建生态源地、生态阻力面和生态廊道^[14]。通过分析土地利用变化、生物栖息地破碎化和生态廊道退化等因素,揭示生态网络连通性在生物多样性保护中的重要影响。例如,通过构建生态阻力面和生态廊道模型,研究者们能够识别出关键的生态通道和生境斑块,从而提出针对性保护措施,以增强生态系统的稳定性和恢复力^[15-16]。然而,现有研究在快速城市化地区的生态连通性演变研究中仍存在明显不足。多数研究集中于自然保护区或国家公园,对城市边缘区与城郊复合带的生态网络关注较少。因此,本文基于2000—2023年动态数据,对昆明市生态安全格局进行动态演化建模,并综合运用形态学空间格局分析(MSPA)、电路理论与景观连通性指数(LCI)等方法,从“点-线-面”多维尺度刻画生态网络的时空变化过程。本研究不仅补充了城市快速扩张背景下生态连通性研究的区域样本,也在方法层面提供了面向城市生态系统动态变化的量化技术路径。鉴于上述背景,本研究以昆明市为研究对象,综合遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)、机器学习模型(XGBoost)与SHAP解释性分析工具,系统评估城市化背景下生态环境质量的时空演变特征识别影响RSEI空间格局的关键驱动因子,并构建生态阻力面;最后,借助形态学空间格局分析、景观连通性指数和电路理论,识别生态源地、生态廊道及生态节点,进而构建昆明市的生态安全格局。上述分析不

仅有助于深入理解快速城市化进程对生态网络连通性的影响机制,也为类似城市的生态保护与可持续空间治理提供理论支持与决策参考。

1 研究区概况

昆明市地处中国西南部,是云南省省会,地处东经 102°10′—103°40′,北纬 24°23′—26°22′,总面积 21,473 km²。地形复杂,南北狭长,海拔 690~4 313 m,地貌类型包括山地、丘陵、盆地和平原,属典型高原城市。昆明市具有亚热带季风气候,年均气温 15~18 °C,降雨量 700~1 100 mm,植被类型丰富,包括森林、草地、灌丛和农田,是中国西南地区重要的生态保护区与生物多样性热点区域,栖息着多种珍稀濒危物种。然而,随着城市化的快速推进,特别是滇池周边地区城市扩张的加剧,昆明市的生态网络连通

性正面临严重威胁。水质污染、土地利用变迁和基础设施建设导致生态源地破碎、生态廊道受阻,生态系统的完整性持续下降。这些特征使昆明成为快速城市化背景下生态连通性研究的重要样本区。研究其生态安全格局的时空演变,可以为理解快速城市化地区的生态网络连通性问题提供典型案例,并为其他类似区域的生态环境保护提供借鉴。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本研究基于谷歌云平台筛选了 2000—2023 年 5—9 月生长季遥感影像,用于计算构建 RSEI 的各项指标,空间分辨率为 30 m。为分析 RSEI 空间异质性的驱动力,选取了表 1 中所列的 11 种驱动因子。通过 ArcGIS 10.2 将所有数据分辨率统一为 30 m。

表 1 分析数据来源

Table 1 Sources of analyzed data

项目	影响因子	缩写	分辨率	来源
自然因子	土地利用类型	LUC	30 m	https://www.resdc.cn
	高程	ELE	30 m	https://www.gscloud.cn
	坡度	SLOP	30 m	https://www.gscloud.cn
	温度	TEM	1 km	https://www.resdc.cn
	降雨	PRE	1 km	https://www.resdc.cn
	归一化差异植被指数	NDVI	30 m	https://www.resdc.cn
	蒸散发	EVA	1 km	https://www.resdc.cn
人类活动因子	国内生产总值	GDP	1 km	https://www.resdc.cn
	人口密度	POP	1 km	https://www.resdc.cn
	夜间灯光	NLI	500 m	https://www.resdc.cn
	人类足迹	HFI	500 km	https://www.resdc.cn

注:遥感影像分辨率为 30 m,来源:https://earthengine.google.com。

2.2 研究方法

2.2.1 RSEI 的构建

基于 GEE 遥感处理云平台,以中分辨率遥感影像(Landsat)为数据源,计算绿度、湿度、干度以及热度指数,在各项指标标准化后,并利用主成分分析构建 RSEI^[17-18]。具体计算步骤为:

(1) 绿度采用归一化差异植被指数(NDVI)来表征,计算公式为

$$NDVI = (\rho_{nir1} - \rho_{red}) / (\rho_{nir1} + \rho_{red}) \quad (1)$$

式中:NDVI 是用于衡量植被覆盖程度的重要指标,值介于 -1~1,值越大表示植被覆盖越好,绿度越高; ρ_{nir1} , ρ_{red} 分别为红外波段 1 和红色波段的反射率,

$$IBI = \frac{2\rho_{mir1}/(\rho_{mir1} + \rho_{nir1}) - [\rho_{nir1}/(\rho_{nir1} + \rho_{red}) + \rho_{green}/(\rho_{green} + \rho_{mir1})]}{2\rho_{mir1}/(\rho_{mir1} + \rho_{nir1}) + [\rho_{nir1}/(\rho_{nir1} + \rho_{red}) + \rho_{green}/(\rho_{green} + \rho_{mir1})]} \quad (4)$$

无量纲(反射率为比例值,取值范围为 0~1)。

(2) 湿度(WET)计算公式为

$$WET = 0.2408\rho_{blue} + 0.3132\rho_{green} + 0.1147\rho_{red} + 0.2489\rho_{nir1} - 0.3122\rho_{nir2} - 0.6416\rho_{nir1} - 0.5087\rho_{mir2} \quad (2)$$

式中:WET 为湿度指数,无量纲; ρ_{blue} , ρ_{green} , ρ_{nir2} , ρ_{mir1} , ρ_{mir2} 分别表示蓝色波段、绿光波段、近红外波段 2,中红外波段 1 和中红外波段 2 的反射率,无量纲(取值范围 0~1)。

(3) 干度(NDBSI)计算公式为

$$SI = \frac{(\rho_{mir} + \rho_{red}) - (\rho_{nir1} + \rho_{blue})}{(\rho_{mir} + \rho_{red}) + (\rho_{nir1} + \rho_{blue})} \quad (3)$$

$$NDBSI = (IBI + SI) / 2 \quad (5)$$

式中:NDBSI为干度指数(无量纲); SI, IBI分别表示土壤指数和建筑指数,通过波段组合计算得到的比值指数(无量纲)。

(4) 热度(LST)计算公式为:

$$LST = 0.02DN - 273.15 \quad (6)$$

式中:LST为地表温度(°C); DN为表面温度的灰度值,遥感图像中热红外波段的数字量化值(无量纲)。

(5) 对计算的各项指标进行标准化,然后利用主成分分析构建RSEI。

$$RSEI = f(NDVI, WET, LST, NDBSI) \quad (7)$$

2.2.2 冷热点分析

冷热点分析是一种基于空间统计的聚集性检测方法,用于识别研究区域中具有显著空间集聚特征的高值(热点)和低值(冷点)区域。本文采用局部莫兰指数,揭示区域单元与其邻域之间的空间关联性。该方法能够判断一个像元在空间上是否与相似的高值或低值聚集,进而识别RSEI的热点或冷点分布。分析过程使用GeoDa软件实现,主要包括:①构建空间权重矩阵,定义每个栅格单元的邻域关系;②计算每个单元的局部空间自相关指数,并生成对应的*p*值;③依据显著性水平(通常设置为0.01, 0.05, 0.1)筛选空间聚集型显著单元^[19]。

2.2.3 XGBoost模型

XGBoost模型基于梯度提升决策树,具有较高的性能和处理大规模数据的能力。通过表1中的特征和RSEI进行训练,用于分析RSEI空间异质性的驱动力。

主要过程为:①参数调优。通过网格搜索和交叉验证的方法,对参数进行调优,以获得最佳的模型性能。②损失函数选择。对于分类任务,采用对数损失函数;对于回归任务,采用平方误差损失函数。③训练过程。使用训练集数据进行模型训练,利用提前停止技术防止过拟合。④评估指标。使用决定

系数(*R*²)评估模型在测试集上的性能^[20]。通过Python 3.11.9完成模型训练。

为了揭示模型对不同特征的依赖关系,本研究采用SHAP(shapley additive explanations)对模型进行解释。它通过为每个特征分配一个贡献值,揭示其对模型输出的影响。①SHAP值计算。通过使用训练好的XGBoost模型,计算SHAP值表示每个特征对模型预测结果的边际贡献。②特征重要性分析。根据SHAP值,确定特征的重要性排名。③可视化。通过SHAP值的散点图,展示各特征交互作用^[21]。通过Python 3.11.9完成SHAP值计算和可视化。

2.2.4 生态安全格局的构建

(1) 阻力面构建。阻力面是描述物种在迁徙过程中受到生态环境影响程度的关键工具,是构建生态廊道和识别生态节点的重要基础^[22]。本文依据XGBoost模型与SHAP值分析结果,选取5个对生态质量影响显著的变量作为主要阻力因子,分别为降雨量、土地利用类型、人类足迹指数、高程和坡度。为对这些因子进行标准化处理并构建分级赋值体系,研究采用自然断点分类法将每个因子的取值划分为5个等级。该方法通过最小化类内方差、最大化类间差异,有效提取空间数据中的自然分类阈值,适用于生态环境类连续变量的空间分层表达。变量划分为“极低、较低、中等、较高和极高”5个等级,并依次赋值为1, 3, 5, 7和9,旨在清晰表达生态阻力梯度,反映物种在不同环境条件下的迁徙通达性差异。在确定阻力因子的相对重要性方面,本文基于AHP(analytic hierarchy process)方法构建判断矩阵,确定2000, 2010和2023年3个阶段的因子权重,以反映不同阶段生态影响因子的变化趋势。最终,利用ArcGIS的Raster Calculator工具对5个标准化阻力因子进行加权叠加,得到研究区在各时期的综合生态阻力面(表2)。

表 2 昆明市各时期阻力因子赋值和权重

Table 2 Resistance factor values and weights in different periods of Kunming City

阻力因子	阻力值					权重		
	1	3	5	7	9	2000年	2010年	2023年
降雨/mm	<780	780~830	830~880	880~950	≥950	0.25	0.22	0.22
土地利用类型	林地	水域、草地	耕地	未利用地	建设用地	0.33	0.35	0.34
人类足迹	<10	10~18	18~25	25~36	≥36	0.15	0.14	0.13
高程/m	<1 700	1 700~2 000	2 000~2 400	2 400~2 900	≥2 900	0.20	0.20	0.21
坡度/(°)	<5	5~15	15~25	25~35	≥35	0.07	0.09	0.10

(2) 生态源的识别。在生态安全格局构建中,生态源地的识别是关键步骤,其连通性和稳定性直接影响物种迁徙路径、基因流动效率以及生态服务功能的实现。本文基于冷热点分析结果,将具有高显著性聚类特征的区域视为前景像元,其余区域作为背景像元,引入 Guidos 3.0 软件进行形态学空间格局分析(MSPA),识别生态核心区斑块,并统计其面积与数量特征。鉴于昆明地形起伏较大、土地利用破碎,为避免因小型斑块造成生态源识别误差,本文采用分级试验法,分别在斑块最小面积阈值为 10, 15, 20 和 25 km² 的条件下提取生态源,系统比较各方案下的斑块数量与面积分布情况。结果显示,20 km² 是使斑块数量与面积达到较优平衡的临界点,既有效保留了空间连贯性较强、生态功能突出的核心区,又排除了噪声性、孤立性小斑块。因此,最终将核心区面积大于 20 km² 的斑块作为候选生态源进行进一步筛选与网络构建^[23]。

景观连通性指数(landscape connectivity index, LCI)是景观连通性的直接指标,多适用于斑块重要性识别。LCI>1 表示景观斑块之间的连通性较好,有助于物种的迁徙和基因交流,借此进一步筛选生态源地 LCI>1 的空间作为生态源地^[24]。计算公式为:

$$CI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_i a_j \frac{P_{ij}^*}{A_L^2} \quad (8)$$

$$LCI = 100 \times \frac{(CI - CI_{\text{remove}})}{CI} \quad (9)$$

式中:LCI 为景观连通度指数(无量纲);CI 为可能连通性指数(无量纲); m 为景观节点总数(单位:个); a_i, a_j 分别为节点 i 和 j 的属性(km²); A_L 为最大景观属性(km²); P_{ij}^* 为斑块 i 和 j 之间所有路径的最大乘积概率(无量纲)。

(3) 生态廊道提取。为识别生态源地之间的最优迁徙路径,本文采用最小成本路径法进行生态廊道提取。该方法以已构建的生态阻力面为基础,将生态源地视为起点与终点,通过栅格累积成本计算,识别穿越阻力最小的连接路径,模拟物种在实际生态环境中趋利避害的迁徙行为。本研究在 ArcGIS 软件中使用 Linkage Mapper 工具进行建模。该工具以阻力栅格作为生态成本输入,综合评估路径的空间通达性与生态合理性,从而生成高潜力廊道网络。在模型参数设置中,考虑到昆明市生态源地空间分布的广泛性与山区复杂地形带来的实际迁徙阻隔,本文分别在 100, 150, 200 和 250 km 等 4 个最大成本加权距离阈值条件下进行对比试验。分析各阈值下

的廊道数量、连通完整度与平均长度后发现,200 km 阈值能有效覆盖主要生态源地,避免生成冗长且脱离实际的非现实性路径,是最符合本研究区生态格局的合理阈值。最终提取的生态廊道不仅在空间上实现生态源之间的有效连接,也能较为真实地反映不同斑块间潜在的物种迁徙通道,为后续生态节点识别与安全格局构建提供基础支撑^[25]。

(4) 生态节点的提取。生态夹点和障碍点识别分别利用 Linkage Mapper 工具包中的 Pinchpoint Mapper 和 Barrier Mapper 模块。Pinchpoint Mapper 模块将电路理论与最小成本路径结合,分析源地间电流流动,识别电流密度高值区,作为生态夹点。Barrier Mapper 同样基于该理论框架识别影响物种迁徙的潜在障碍区,选择电流密度的最大值区作为生态障碍点,从而精确标识出在特定范围内影响生态流动的重要障碍^[26]。

3 结果与分析

3.1 RSEI 时空变化

3.1.1 RSEI 空间分布格局

昆明市的 RSEI 高值区多分布在中部和西部,而低值区多集中在滇池周边,以及石林和东川地区(图 1)。2000 年研究区内大部分区域的 RSEI 值集中在 II 级和 III 级,表明生态环境质量相对较低;而在部分局部区域,尤其是水体和部分植被覆盖较高的区域,存在 IV 级和 V 级较高的 RSEI 值(图 1a)。在 2010 年的 RSEI 分布与 2000 年相比略有改善,但整体趋势没有发生显著变化;RSEI 值依旧主要集中在 II 级和 III 级,少量区域显示出 IV 级和 V 级的高值分布(图 1b)。这可能表明在这一阶段,生态环境有一定程度的恢复,但幅度不大。然而,在 2023 年的 RSEI 显示明显的改善趋势,IV 级和 V 级的高值区域有所扩大,特别是在靠近河流和植被集中的地区;同时,低 RSEI 值的 I 级和 II 级区域相较于之前的时间节点有所减少(图 1c),说明生态环境状况在此期间有了显著的提升。

3.1.2 RSEI 冷热点分布

2000 年研究区内的冷热点区域较为分散。高显著性水平的冷点(99% 和 95%)主要集中在研究区的北部和部分东南部区域,而高显著性水平的热点(95% 和 99%)则主要位于南部和中部区域(图 2a)。在 2010 年的冷热点分布显示出一些显著变化。相比 2000 年,热点区域有了明显的扩展,尤其是在研究区的中部和南部地带,这表明这些区域的生态状况有所改善。而冷点区域在这一阶段则相对稳定,分布变化不大,但仍集中在研究区的北部和局部东南部

区域(图 2b)。在 2023 年的冷热点分布进一步表明生态环境的动态变化趋势。热点区域相比 2010 年有所扩张,尤其是在中部和南部的部分区域,热点区域更加集中连片,表明这些区域的生态环境质量有所改善。同时,冷点区域在北部继续保持稳定,但在东南

部有扩展趋势(图 2c)。总体而言,从 2000—2023 年研究区内冷热点区域的扩展和收缩趋势,反映了该区域生态环境的时空动态变化。整体来看,尽管在局部区域生态环境有所恶化,但总体趋势在近年来表现出改善的迹象。

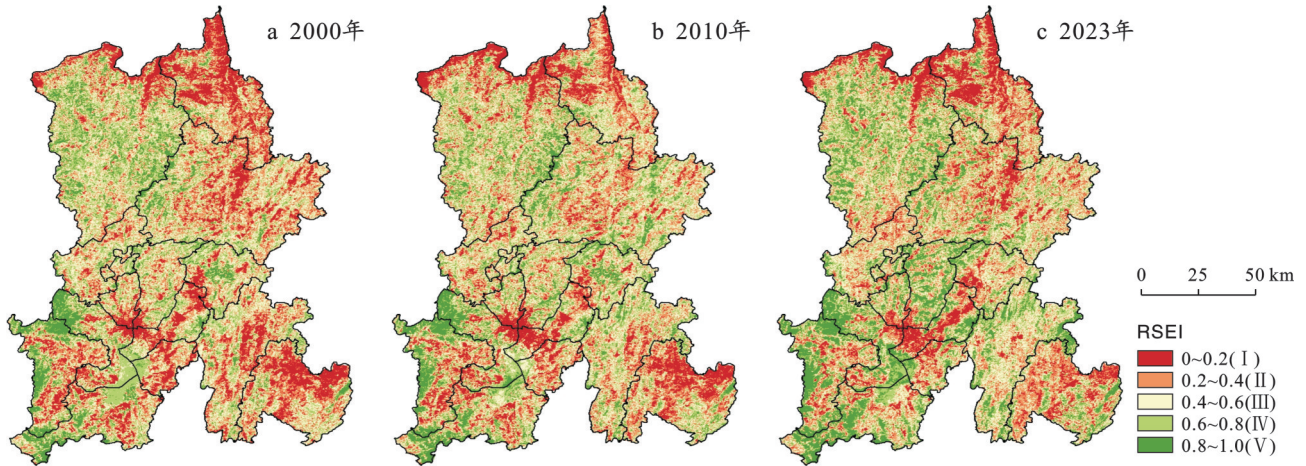


图 1 昆明市不同时期 RSEI 空间分布

Fig.1 Spatial distribution of RSEI in different periods of Kunming City

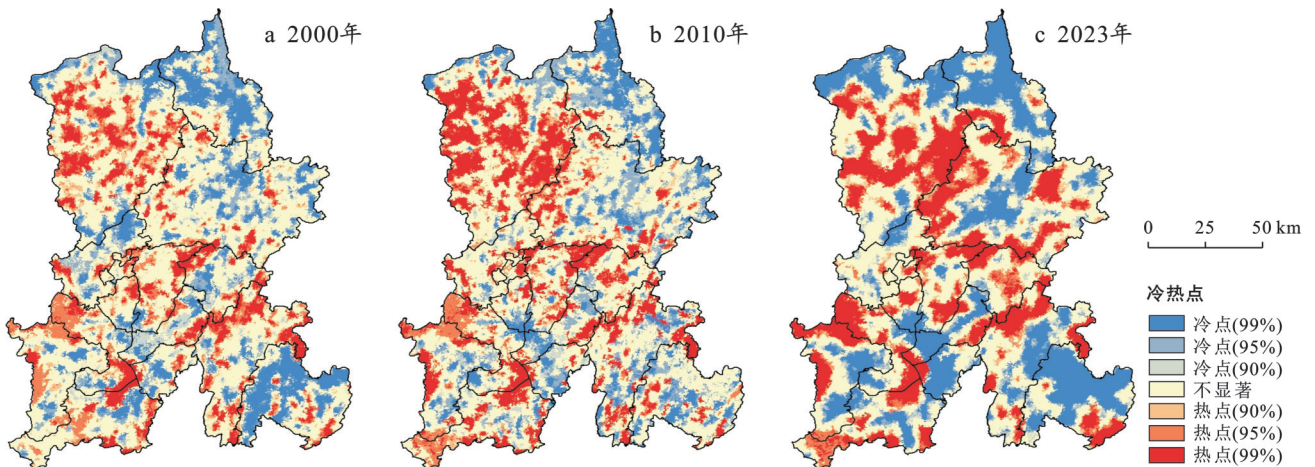


图 2 昆明市不同时期 RSEI 冷热点空间分布

Fig.2 Spatial distribution of RSEI cold-hot spots in different periods of Kunming City

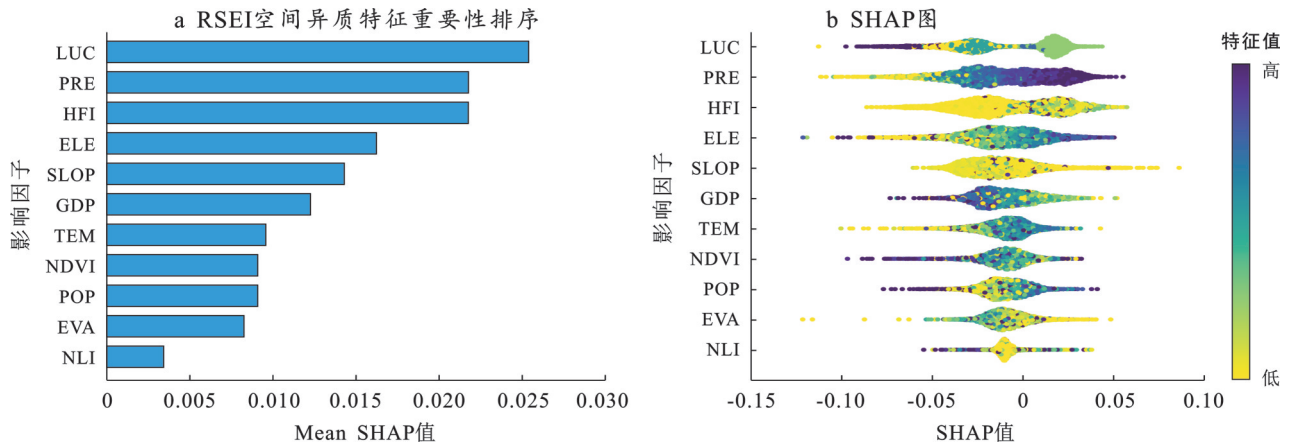
3.2 基于 RSEI 空间格局主导因素构建生态阻力面

3.2.1 RSEI 空间格局主导因素识别

基于 SHAP 的特征重要性分析结果显示(图 3), LUC 是影响 RSEI 的最重要因素,其次是 PRE 和 HFI。其他重要因素包括 SLOP 和 ELE, 这些因素的平均 SHAP 值相对较高,表明它们对生态环境质量有显著影响。而 NLI 和 EVA 等因素的平均 SHAP 值较低,对 RSEI 的影响相对较小,表明 LUC, PRE 和 HFI 是影响生态环境质量的关键因素,其次是 SLOP 和 ELE。研究结果可为制定生态保护和策略提供科学依据,同时也强调了自然因素与人类活动在塑造生态环境格局中的重要性。

3.2.2 生态阻力面的构建

由图 4 可知,2000 年低生态阻力区主要分布在北部,而高阻力值区域主要集中在南部,特别是滇池周边一带,表明该地区由于城市化和人类活动较为集中,生态系统受到了较大的干扰。2010 年高阻力值区域在滇池周边明显扩展,且强度有所增加。这一变化反映了在这段时间内,滇池周边地区的城市化进程加快,人类活动强度增强,对生态系统造成更大的压力。到 2023 年,滇池周边的高阻力区域进一步扩大,并且密集度增加。这种趋势表明,随着经济发展和城市扩张,该区域的生态系统面临着更为严峻的干扰和挑战。



注:图中影响因子缩写字母含义见表1。

图3 RSEI空间异质特征重要性排序和SHAP图

Fig.3 Importance ranking of RSEI spatial heterogeneity characteristics and SHAP

3.3 生态安全格局的构建要素

3.3.1 生态源

研究区2000年生态源斑块为35个,总面积为5 933.00 km²,生态源主要集中在北部和滇池周边地区,生态源斑块较多,但规模较小,呈现出较为零散的分布格局(图5a)。2010年生态源斑块减少至29个,但总面积增加到6 857.77 km²,虽然斑块数量有所减少,但生态源逐渐融合成了更大斑块,连通性得到增强(图5b)。2023年生态源斑块数量进一步减少至26个,总面积增加至7 191.50 km²,生态源进一步扩大,形成了更大规模的核心区域,同时分散的小型斑块逐渐减少(图5c)。表明在滇池周边和其他关键区域生态系统连通性的进一步增强。虽然生态源斑块的数量从2000—2023年逐渐减少,但其面积却在稳步增加。这表明,随着时间的推移,原本较小且分散的生态源斑块逐渐融合,形成了更大规模的核心区域,尤其是在滇池周边一带,表明区域内的生态保护和恢复措施正在发挥作用,提升了生态系统的连通性和整体稳定性。

3.3.2 生态廊道

2000年生态廊道为77条,总长度为706.48 km(图6a),生态廊道较为丰富,覆盖了较大范围,连接了多个生态源区域。2010年生态廊道数量减少至70条,总长度缩短到681.38 km(图6b),部分生态廊道由于人类活动的干扰而遭到破坏,其连通性有所降低。2023年生态廊道数量进一步减少至54条,总长度明显缩短至504.90 km,生态廊道的数量和长度进一步减少,特别是在城市化进程较快的区域(图6c)。这一变化导致了生态源之间的连接能力大幅降低,可能对物种迁移和生态系统的稳定性带来不利影响。

3.3.3 生态夹点和障碍点

生态夹点在2000,2010和2023年分别为38,26和24个,这些生态夹点多分布在昆明北部和东南部,而且数量在逐年减少,表明生态网络的连通性逐步下降(图7a)。障碍点在2000,2010和2023年分别为31,34和35个,这些障碍点多集中在滇池周边区域,而且随着时间推移,生态障碍点的数量逐渐增加,生态网络连通性受阻情况在加剧(图7b)。这表明区域内的生态连通性正在不断削弱,尤其是在滇池周边等城市化进程迅速发展的区域。生态夹点的减少和障碍点的增加共同反映了人类活动对生态网络的持续干扰,使得原有的生态通道逐步被阻断。

4 讨论

本研究通过结合RSEI, XGBoost机器学习模型及电路理论,全面分析了昆明市在快速城市化背景下生态安全格局的时空变化。通过系统地评估生态源地、生态廊道以及生态节点的变化,研究为学术界提供了更加全面、精细的认识,尤其在城市边缘区和滇池周边地区的生态保护方面具有重要的理论意义。研究表明城市化导致了生态廊道的退化,物种栖息地被人为切割和破碎,造成生态功能的丧失^[27-28]。本文在这一基础上进一步验证了城市化对昆明市生态廊道的消极影响,尤其是在滇池周边,随着城市扩展,生态廊道数量大幅减少,进一步削弱了生态网络的连通性。虽然昆明市的生态源地面积在过去的20年中虽然有所扩展,但生态源地之间的连接性未得到有效恢复,导致物种迁徙和基因流动受限^[29]。这一发现表明了城市化进程中,尽管生态源地面积得到了扩展,但缺乏有效的生态廊道连接,这一问题对生态网络的整体稳定性构成了威胁。

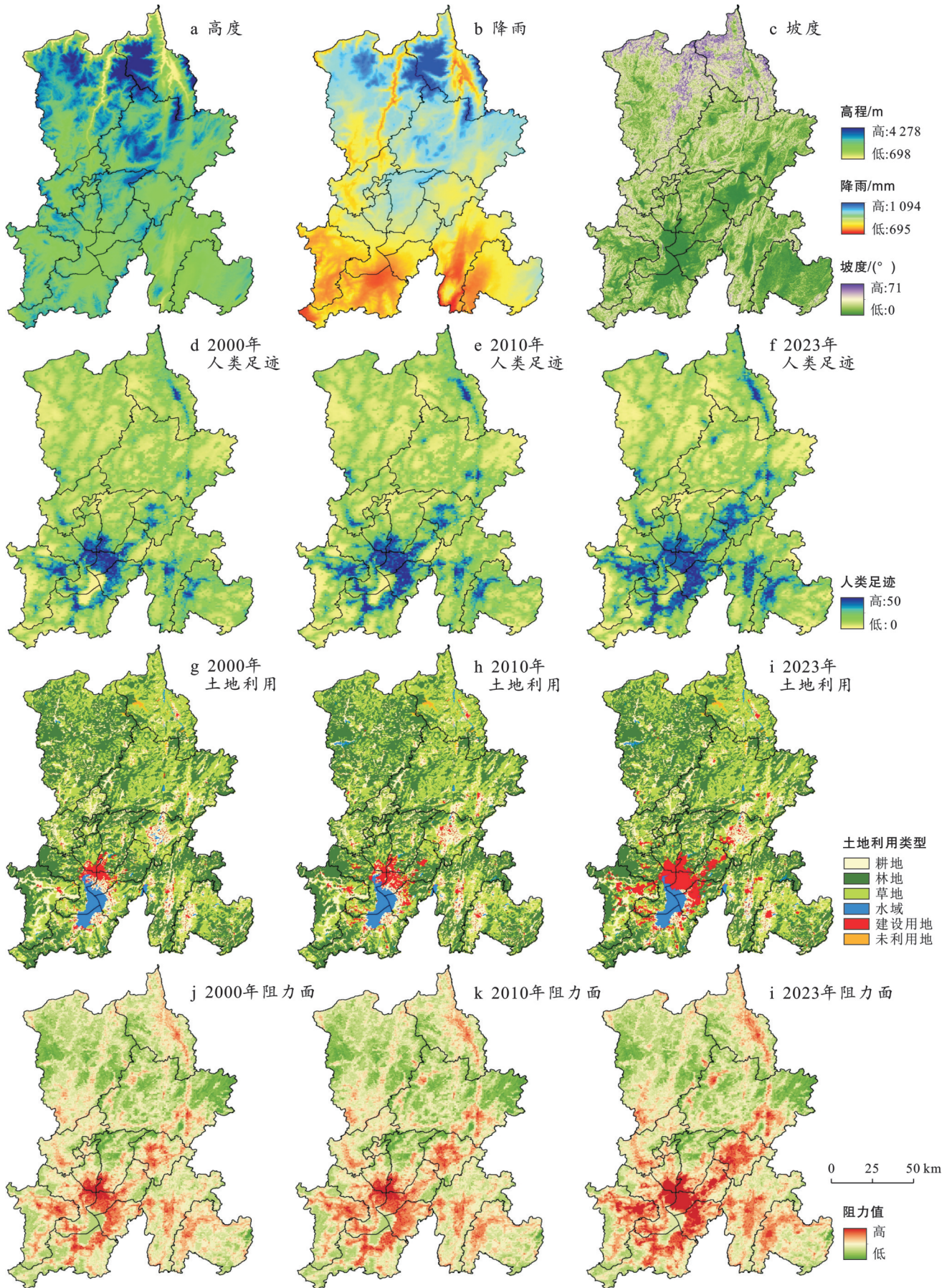


图 4 昆明市阻力因子和生态阻力面空间分布

Fig.4 Spatial distribution of resistance factors and ecological resistance surface in Kunming City

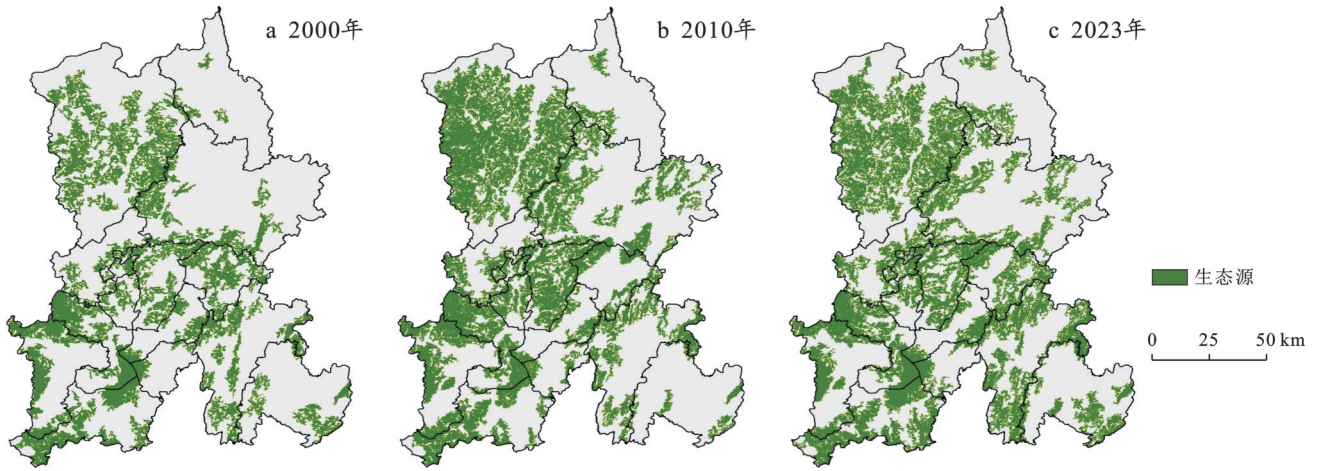


图 5 不同时期昆明市生态源空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ecological sources in different periods of Kunming City

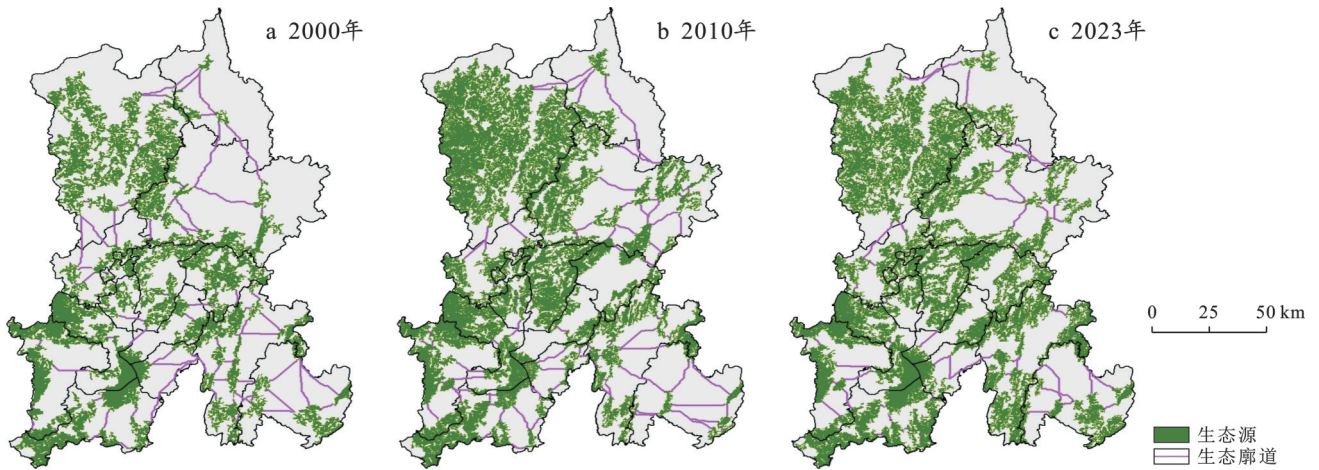


图 6 不同时期昆明市生态廊道空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecological corridors in different periods of Kunming City

此外,电路理论的应用揭示了滇池周边区域的生态阻力面逐年增大,表明该区域的生态系统正面临着越来越大的城市化压力,而人类活动,尤其是基础设施建设、交通网扩展等,是造成这一生态退化的主要原因^[30-31]。

研究进一步的分析表明,昆明市生态网络连通性下降的原因不仅仅是生态源地面积的变化,还包括土地利用变化、基础设施建设及其他人类活动的影响。尽管昆明市的一些区域通过实施生态保护措施,增强了生态源地的面积和生态功能,但生态廊道的退化仍然是导致生态连通性下降的核心问题。通过 XGBoost 模型和 SHAP 值分析,本研究明确了影响生态安全格局的主要驱动因素,其中土地利用类型、降水量和高程等自然因子对生态环境质量的提升起到了积极作用,而人类活动(例如夜间灯光、人口密度等)则显著影响了生态系统的健康。特别是在人类活动强烈的区域,生态网络的连通性进一步

下降,物种栖息地的连通性遭到切割,生物多样性面临威胁。

研究结果进一步验证了城市化进程中基础设施建设和土地利用变化是导致生态连通性丧失的主要原因,特别在城市扩展速度较快的地区,生态廊道的消失和物种栖息地的破碎化对生态系统的稳定性造成了深远影响^[32-33]。

尽管本研究在理论框架和方法上做出了创新性贡献,但也存在一些局限性。首先,遥感数据的时空分辨率对于细节分析的精准性有所限制,尤其是在城市快速扩展的边缘区域,生态变化的微观差异可能未能完全捕捉。因此,未来研究可以考虑采用更高分辨率的遥感影像数据,并结合长期地面实地调查,以进一步提高研究的准确性。其次,XGBoost 模型虽然能够有效识别影响昆明市生态安全格局的关键驱动因素,但由于该模型依赖现有的数据集,可能无法完全反映生态环境变化的复杂性。未来的研究

可以引入更多的特征变量,尤其是考虑气候变化和社会经济因素等,进一步完善模型的预测能力。此外,尽管电路理论在物种迁徙路径的识别中具有一定的解释力,但在复杂的城市生态系统中应用时,如何优化模型的参数,提升对生态阻力面构建的准确

性,仍是未来研究需要解决的关键问题。最后,本研究主要集中于昆明市的特定区域,未来的研究可以将这一方法扩展至更多城市,尤其是快速城市化带来的生态挑战更为严峻的城市区域,进一步验证和完善生态安全格局的理论模型。

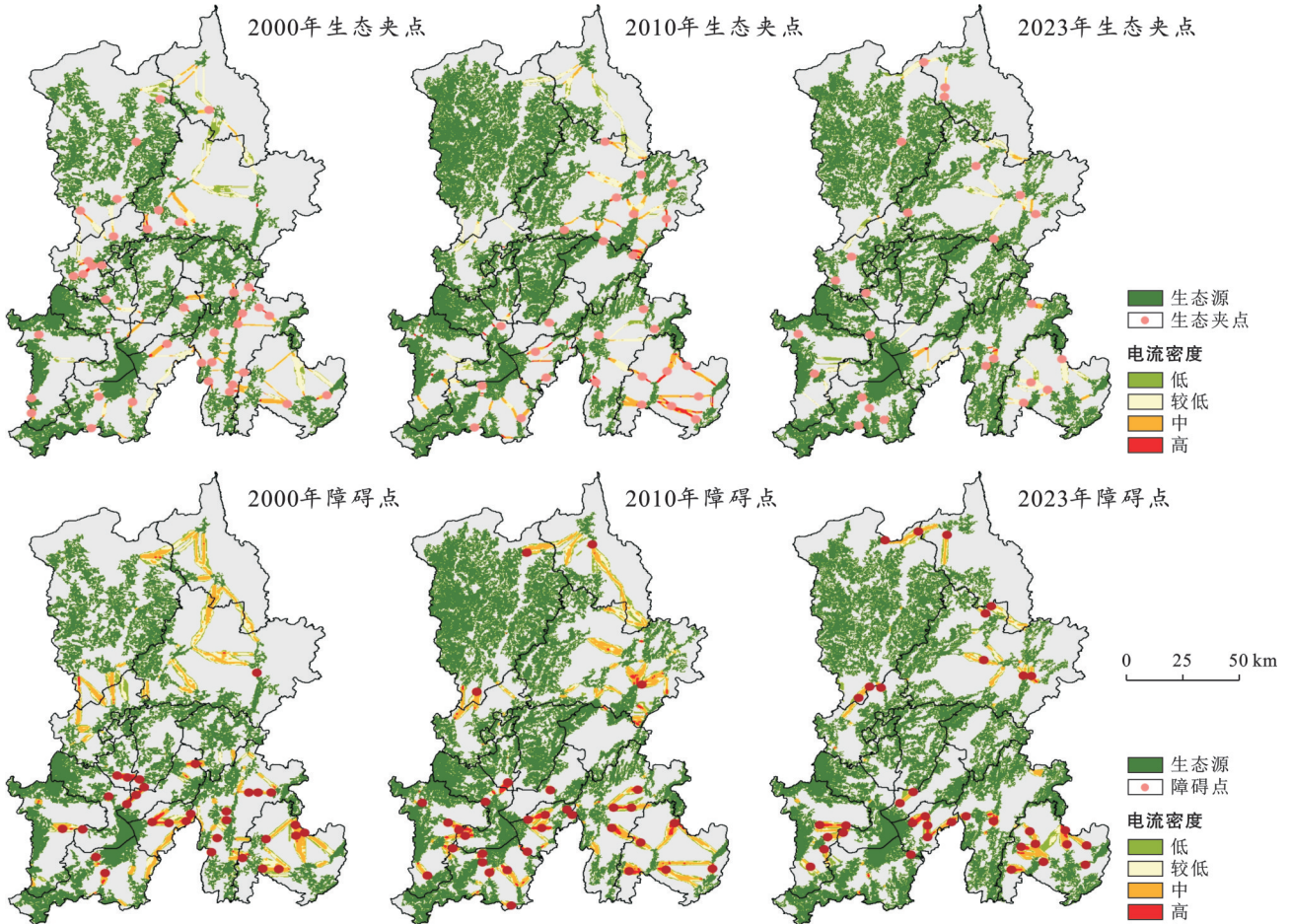


图7 不同时期昆明市生态夹点和生态障碍点空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecological pinch points and barrier points in different periods of Kunming City

5 结论

(1) 2000—2023年昆明市的生态安全格局发生了显著变化。尽管生态源的总面积扩展了1 258.50 km²,生态源地的扩展一定程度上增强了生态网络的总体覆盖,但生态网络的连通性遭遇了严峻挑战。特别是生态廊道数量减少了23条,总长度减少了171.51 km,这表明物种迁徙通道的连通性显著下降。此外,生态夹点的数量减少了13个,而生态障碍点增加了4个,这些变化表明物种在生态网络中的自由迁徙能力受到了严重限制。滇池周边区域受城市扩展和人类活动的影响,成为生态阻力值最高的区域,面临较大的连通性破坏风险。

(2) 为应对这些挑战,昆明市须加强生态源地的

保护和生态廊道的恢复,特别是在滇池周边等关键区域。通过减少人类活动对生态网络的干扰,恢复生态廊道,优化生态安全格局,昆明市能够增强生态网络的连通性,提高物种的迁徙能力,保护区域生物多样性。此外,实施更为严格的生态保护措施在生态阻力值高的区域,能有效缓解城市化对生态系统的负面影响,增强生态系统的适应能力与韧性。

参考文献 (References)

- [1] Lv Yunshuo, Yang Jiaqi, Xu Jun, et al. High-dimensional urban dynamic patterns perception under the perspective of human activity semantics and spatiotemporal coupling [J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 121: 106192.
- [2] Luo Juan, Dang Rui, Lan Pucheng, et al. Urban-rural

- disparities in low-carbon policy intensity and residents' willingness to pay in environmental sustainability [J]. *Cities*, 2025,159:105795.
- [3] Guo Yujie, Wang Chengcong, Hong Shengyang, et al. Dynamic evolution of PM_{2.5} removal by urban forests during rapid urbanization: From forest landscape pattern dominance to impervious surfaces [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025,493:144930.
- [4] 赵美凤, 闫妃娇, 杨振, 等. 2000—2020年中国就近城镇化区域差异分解与趋同格局[J]. *地理科学进展*, 2024, 43(12):2395-2412.
- Zhao Meifeng, Yan Qijiao, Yang Zhen, et al. Regional difference decomposition and convergence pattern of nearby urbanization in China from 2000 to 2020 [J]. *Progress in Geography*, 2024, 43(12):2395-2412.
- [5] 王绍邦, 李志英, 龙晔, 等. 滇中高原湖区乡村聚落空间演化及驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2):387-395.
- Wang Shaobang, Li Zhiying, Long Ye, et al. Spatial evolution and driving factors of rural settlements in the plateau lake area in central Yunnan [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2):387-395.
- [6] Hu Siwei, Wang Yongsheng. Spatial pattern of rural authenticity and its relation to urbanization: Insights from Henan Province, China [J]. *Habitat International*, 2025, 156:103291.
- [7] Li Jiamin, Liang Li'e, Chao Yan, et al. Construction of the ecological security pattern of Mu Us sandy land on the basis of the "source-resistance-corridor" theory [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 171:113162.
- [8] Liu Xin, Han Yu, Li Yonghong, et al. Construction of ecological network in Daihai basin based on ecological security pattern and ecological service accessibility [J]. *Ecological Frontiers*, 2024, 44(6):1224-1231.
- [9] Jiao Zhenzhi, Wu Zhuo, Luo Yifan, et al. A framework for analyzing the effects of modifiable areal unit problem on ecological security pattern [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 458:142549.
- [10] Yang Jie, Xie Baopeng, Wang Taibing, et al. Identification and optimization strategy of ecological security pattern in Maiji District of Gansu, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 157:111309.
- [11] Tang Hui, Peng Jian, Jiang Hong, et al. Spatial analysis enables priority selection in conservation practices for landscapes that need ecological security [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345:118888.
- [12] 刘世梁, 朱家菡, 许经纬, 等. 城市化对区域生态足迹的影响及其耦合关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(24):8888-8900.
- Liu Shiliang, Zhu Jiali, Xu Jingwei, et al. Effect of urbanization on the ecological footprint and their interactive coupling relationship [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24):8888-8900.
- [13] Gou Chaodong, Feng Churan, Tan Shucheng, et al. Evaluating the impact of built environment on shared electric bicycle connectivity in Kunming's public transport system [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15:5156.
- [14] 金燕, 晏红明, 何雨琴, 等. 昆明城市降雨特性变化及城市热岛效应的可能影响[J]. *地理科学*, 2024, 44(11):2039-2050.
- Jin Yan, Yan Hongming, He Yuqin, et al. Change of urban precipitation characteristics and the possible influence of urban heat island effect in Kunming [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(11):2039-2050.
- [15] 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(1):69-79.
- Li Zhiying, Li Yuanyuan, Li Wenxing, et al. Study on the construction of ecological security pattern in Kunming based on MSPA and MCR model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(1):69-79.
- [16] 刘阳, 李志英, 龙晔, 等. 基于生态适宜性的昆明城市空间增长边界研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7):1555-1565.
- Liu Yang, Li Zhiying, Long Ye, et al. Research of urban growth boundary of Kunming based on ecological suitability [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(7):1555-1565.
- [17] 权文婷, 周辉, 王卫东, 等. 2000—2023年关中平原城市群生态环境质量动态特征[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1):336-346.
- Quan Wenting, Zhou Hui, Wang Weidong, et al. Characteristics of ecological environment quality dynamic of the urban agglomeration in Guanzhong Plain from 2000 to 2023 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):336-346.
- [18] 赵月, 孟丹, 丁凤, 等. 基于GEE云平台的2000—2022年雄安新区生态质量动态评价[J]. *地球物理学进展*, 2023, 38(5):2023-2036.
- Zhao Yue, Meng Dan, Ding Feng, et al. Dynamic assessment of ecological quality in Xiongan New Area from 2000 to 2022 based on GEE platform [J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(5):2023-2036.
- [19] 王洪彦, 郑文璐, 盖兆雪. 基于InVEST模型的黑土区碳储量时空分异特征[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(7):473-481.
- Wang Hongyan, Zheng Wenlu, Gai Zhaoxue. Spatio-temporal differentiation of carbon storage in black soil region based on InVEST model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(7):473-481.
- [20] 赵华生, 黄小燕. 基于XGBoost的温度订正预报方法研

- 究[J].热带气象学报,2024,40(5):767-775.
- Zhao Huasheng, Huang Xiaoyan. An XGBoost-based method for temperature forecasting correction [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2024,40(5):767-775.
- [21] 许江波,侯鑫敏,吴雄,等.基于MIC-XGBoost-LSTM模型的边坡位移预测研究[J].中国公路学报,2024,37(10):38-48.
- Xu Jiangbo, Hou Xinmin, Wu Xiong, et al. Slope displacement prediction using MIC-XGBoost-LSTM model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024,37(10):38-48.
- [22] 陈月娇,李祥,王月健,等.尺度整合视角下伊犁河谷地区生态安全格局构建:以昭苏县为例[J].生态学报,2023,43(19):8181-8192.
- Chen Yuejiao, Li Xiang, Wang Yuejian, et al. Construction of ecological security pattern in Ili River valley from the perspective of scale integration: A case study of Zhaosu County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(19):8181-8192.
- [23] 陈相标,丁文荣.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以滇中五大高原湖泊流域为例[J].环境工程技术学报,2023,13(6):2248-2260.
- Chen Xiangbiao, Ding Wenrong. Identification of key areas for ecological restoration of territorial space based on ecological security pattern: A case of five plateau lake basins in central Yunnan [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(6):2248-2260.
- [24] 张考,黄春华,王志远,等.基于DTTD-MCR-PLUS模型的三生空间格局优化:以长沙市为例[J].生态学报,2022,42(24):9957-9970.
- Zhang Kao, Huang Chunhua, Wang Zhiyuan, et al. Optimization of "production-living-ecological" spaces based on DTTD-MCR-PLUS model: Taking Changsha City as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(24):9957-9970.
- [25] Jiang Hong, Peng Jian, Liu Menglin, et al. Integrating patch stability and network connectivity to optimize ecological security pattern [J]. Landscape Ecology, 2024,39(3):54.
- [26] Zhang Bingbing, Cao Jianrong, Chen Dengshuai, et al. Construction of watershed ecological security patterns with integrated of spatial variability: A case study of the Yellow River basin, China [J]. Ecological Indicators, 2024,159:111663.
- [27] 刘金花,郑永兴,李威,等.基于生态退化风险的国土空间生态修复区域优先序划定:以黄河流域山东段为例[J].中国环境科学,2025,45(3):1587-1600.
- Liu Jinhua, Zheng Yongxing, Li Wei, et al. Regional prioritization of territorial spatial ecological restoration based on ecological degradation risk: A case study of the Shandong Section of the Yellow River basin [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1587-1600.
- [28] 李瑞发,崔旺来.长三角城市群生态安全的时空演变及影响因素[J].水土保持研究,2025,32(2):377-386.
- Li Ruifa, Cui Wanglai. Temporal-spatial evolution and influencing factors of ecological security in the city cluster of Yangtze River Delta [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(2):377-386.
- [29] 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.
- Qin Bingui, Lin Yilin, Zhao Junsan, et al. Identification of key areas for the ecological restoration of territorial space in Kunming based on the InVEST model and circuit theory [J]. China Environmental Science, 2023,43(2):809-820.
- [30] Yang Jixin, Deng Wei, Zhang Guanghong, et al. Linking endangered species protection to construct and optimize ecological security patterns in the National Ecological Civilization Construction Demonstration Zone: A case study of Yichang, China [J]. Ecological Indicators, 2024,158:111579.
- [31] Chen Shuaiqi, Li Ling, Li Xingming, et al. Identification and optimization strategy for the ecological security pattern in Henan Province based on matching the supply and demand of ecosystem services [J]. Land, 2023,12(7):1307.
- [32] 李志英,裴玉力,陈涛,等.基于生态足迹改进模型的云南省生态安全研究[J].生态经济,2022,38(12):191-197.
- Li Zhiying, Pei Yuli, Chen Tao, et al. Study on ecological security of Yunnan Province based on improved ecological footprint model [J]. Ecological Economy, 2022,38(12):191-197.
- [33] 刘浦东,黄丽,刘建涛,等.多源数据协同的城市建成区变迁及景观生态安全格局演变分析:以辽宁省为例[J].生态学杂志,2025,44(1):250-259.
- Liu Pudong, Huang Li, Liu Jiantao, et al. Analyzing changes of urban built-up area and landscape ecological security pattern based on multi-source data: A case study of Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,44(1):250-259.