

结合空间句法的流域生态网络构建 ——以滇池流域为例

金满库^{1,2}, 颜蔚², 邹辉², 葛小三¹, 王佳恒²

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454002; 2.中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 南京 210018)

摘要: [目的] 识别滇池生态廊道并识别生态节点及障碍点, 进而优化流域生态网络, 为滇池流域生态迁徙廊道维护和提升生态功能提供借鉴。[方法] 以滇池流域为例, 结合 MSPA 和电路理论识别研究区内的生态源地以及夹点、障碍区并构建生态网络, 同时引入空间句法量化道路网对电阻力面进行优化, 并与优化后电阻力面以及生态网络进行对比探究道路网对生态网络的影响。[结果] ① 研究区整体生态源地面积比例相对较高, 提取 17 处生态源地面积 101 248 hm² 占研究区总面积的 34.7%, 主要位于北部山地以及中部环滇池区; ② 优化后的电阻力面高阻力区由四周向主城区转移, 并且廊道由 35 条增加至 41 条, 总长度由 185.9 km 增加至 216.2 km, 网络闭合度、连接度、连通率分别提高 0.20, 0.35, 0.13; ③ 通过廊道宽度阈值分析将廊道宽度确定为 600 m, 并提取生态夹点 15 116 hm² 和生态障碍区 71 875 hm² 共同组成滇池流域生态安全网络。[结论] 滇池流域生态斑块形体破碎化明显, 其分布呈现出北部生态源地密集、南部稀疏的特点。高等级、流量大的道路对生态网络切割效应更为突出, 这一类夹点和障碍区在生态网络构建和修复中应该尤为重视。

关键词: 生态网络; 电路理论; 空间句法; MSPA; 滇池流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)01-0133-08

中图分类号: X826

文献参数: 金满库, 颜蔚, 邹辉, 等. 结合空间句法的流域生态网络构建[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 133-140. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220829.004; Jin Manku, Yan Wei, Zou Hui, et al. Construction of watershed ecological network based on spatial syntax [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 133-140.

Construction of Watershed Ecological Network Based on Spatial Syntax ——Taking Dianchi Lake Basin as a Case Study

Jin Manku^{1,2}, Yan Wei², Zou Hui², Ge Xiaosan¹, Wang Jiaheng²

(1. College of Surveying and Mapping Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454002, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210018, China)

Abstract: [Objective] The Dianchi Lake ecological corridor, the ecological nodes and obstacles were identified, and then the ecological network of the watershed was optimized in order to provide a reference for the maintenance and improvement of the ecological function of the ecological migration corridor in the Dianchi Lake basin. [Methods] The study was conducted for the Dianchi Lake basin. Morphological spatial pattern analysis was combined with circuit theory to identify the ecological sources, pinch points, and obstacle areas in the study area, and to construct an ecological network. At the same time, spatial syntax was introduced to quantify the road network in order to optimize the electrical resistance surface. The back resistance surface and the ecological network were compared to determine the impact of the road network on the ecological network. [Results] ① The overall ecological source area accounted for a relatively high proportion of the total study area. The 17 extracted ecological source areas had an area of 101 248 hm² and accounted for 34.7% of the total area of the study area, mainly located in the northern mountainous area and the central area around Dianchi Lake; ② The optimized high resistance area of the resistive force surface was transferred from the surrounding area to the main urban area, and the number of corridors increased from 35 to 41. The

收稿日期: 2022-04-24

修回日期: 2022-06-22

资助项目: 中国国土勘测规划院外协项目“长江经济带岸线资源动态变化监测与重点岸段管控政策研究”(20221811179)

第一作者: 金满库(1998—), 男(汉族), 河南省平顶山市人, 硕士生, 研究方向为遥感生态与空间规划。Email: 1653392864@qq.com。

通信作者: 邹辉(1989—), 男(汉族), 湖北省黄冈人, 博士, 助理研究员, 研究方向为流域空间规划与可持续发展。Email: hzhou@niglas.ac.cn。

total length increased from 185.9 km to 216.2 km. The degree of network closure, connection degree, and connection rate were increased by 0.20, 0.35, and 0.13, respectively; ③ The corridor width was determined to be 600 m through the threshold analysis of corridor width. 15 116 hm² of ecological pinch points and 71 875 hm² of ecological barrier areas were extracted from the Dianchi Lake Basin ecological safety network. [Conclusion] The fragmentation of ecological patches in the Dianchi Lake basin was obvious, and their distribution showed the characteristics of dense ecological foci in the north and sparse ecological foci in the south. The cutting effect of high-grade and high-traffic roads on the ecological network was very prominent, and these kinds of pinch points and obstacle areas should be given greater attention in the construction and restoration of ecological networks.

Keywords: ecological network; circuit theory; spatial syntax; MSPA (morphological spatial pattern analysis); Dianchi Lake basin

在城市快速扩展的背景下,城镇化与生态保护之间的矛盾不断加剧^[1]。通过构建生态安全网络以连接多个生态斑块,能够使各个斑块间能够进行正常的物种交流和能量交换,从而减少生态斑块的破碎和推进生物多样性的可持续发展^[2]。国内学者俞孔坚^[3]首先从保护生物多样性的角度提出特定位置的景观要素对于生态过程更加重要的相关理论,后经不断发展最终形成了“生态源地的选取—阻力面的设置—生态廊道的模拟—生态节点及障碍点的提取”的逻辑模式。生态源地是生物获取能量以及扩散的元点^[4-5],对整个生态过程具有决定性作用。基于图论的形态学空间格局分析法^[6](morphological spatial pattern analysis, MSPA)对土地利用栅格数据进行识别并分类,被广泛运用于生态源地的提取研究^[7-8]。生态廊道的构建方法主要包括最小累计阻力模型与电路理论,最小累计阻力模型通过计算源地间交流的最小耗费距离模拟生态廊道,但忽略了生态过程的流通性和随机性^[9]。针对这一问题,Mc Rae 将物理学中的电路理论^[10]融入景观生态学,将生态源地模拟电源,景观面模拟电阻面,通过观察电子流动情况来模拟野生动物的迁徙过程,更加契合实际情况,从而更加科学地构架生态安全网络。

道路网的逐步密集化,为社会经济带来发展的同时也使生态斑块逐渐地破裂、细碎化^[11],并阻碍了整个生态系统的能量流动,对道路影响下的生态安全格局有助于提高道路影响下生态斑块的连通性。现有道路对电阻力面研究中^[12],大多采用对道路不同缓冲距离来描述道路对动物迁徙过程的影响,但这种方法忽略了道路间的相关关系以及人为活动本身对生态过程的影响。空间句法以图论学为基础对轴线进行分析,从几何角度和相互关系分析道路可达性及重要性,一定程度上人类活动密集程度^[13]。目前空间句法主要运用于交通规划和城市设计,鲜少与生态过程相关研究结合。基于此本文使用空间句法计算其

集成度来表现道路的拓扑连接性与层次性,并对其进行阻力赋值,相比于缓冲区分析能够更有效的对道路整体特性进行分析。

滇池流域作为国家重点保护地之一^[14],是云南水禽越冬的重要栖息地,具有重要生态保护意义。因此,本文以滇池流域为研究区,采用 MSPA 及景观连通指数识别生态源地,采用空间句法模拟道路集成度及影响范围,通过对比考虑道路影响以及不考虑道路影响两种情境下电阻力面,对比研究道路对生态迁徙过程的影响,结合电路理论识别两种情景的生态廊道并识别生态节点及障碍点,进而优化滇池流域生态网络,以期为推进滇池流域生态建设提供参考和借鉴。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

滇池流域地处云南高原中部位于东经 102°30′—103°02′,北纬 24°28′—25°23′,海拔在 1 800 ~ 2 500 m 之间,整体呈南北宽、东西窄,流域总面积为 2 920 km²;属亚热带高原季风气候,全年干湿分明,气候适宜,野生动物种类丰富,是水禽迁徙的重要地区,其中滇池是云南最大的淡水湖泊,属长江流域金沙江支流,有“高原明珠”之称,是国家重点保护湖泊湿地^[15]。

1.2 数据来源

本文涉及数据主要包括 2020 年:土地利用数据、归一化植被指数(NDVI)、数字高程模型(DEM)、坡度数据以及道路数据(表 1)。土地利用数据来源于中国科学院资源与环境数据中心(<https://www.resdc.cn>)分别率为 30 m;NDVI 由 2020 年 5 月的 Landsat 8 影像数据解译得到,DEM 和坡度数据源于地理空间数据云(<https://www.gsccloud.cn>),道路数据来源于 Open Street Map 网站 2020 年道路数据(<https://www.openhistoricalmap.org>)。

表 1 主要数据来源及用途
Table 1 Main data source and purposes

数据名称	数据来源	数据用途
土地利用数据	中国科学院资源与环境数据中心	MSPA 分析、阻力面构建和廊道宽度的选定
NDVI 数据	Landsat 8 反演影像数据	
高程数据		阻力面的构建
坡度数据	地理空间数据云	
道路数据	Open Street Map 官网	道路集成度分析和阻力面构建

1.3 研究方法

1.3.1 基于 MSPA 和连通性指数的生态源地识别
MSPA 是基于数学与形态学原理对栅格影像像元重新分类从而客观地对生态源地进行识别的方法^[15-16]。以土地利用数据为基础,将林地、水域和草地 3 种类型设置为前景,其余设置为背景采用八邻域规则,边缘宽度设置为 1 识别出 7 种景观类型。根据生态学理论,生态斑块的面积与连通性对生态过程具有重要意义^[17],本文根据研究尺度,结合连通指数[PC,公式(1)]、斑块重要性指数[dPC,公式(2)]与核心区斑块面积提取生态源地。

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j P_{ij}}{A_L^2} \quad (1)$$

$$dPC = \frac{PC - PC_{remove}}{PC} \times 100\% \quad (2)$$

式中: a_i, a_j 为斑块 i, j 的面积; P_{ij} 为斑块 ij 之间扩散的最大概率; PC_{remove} 为移除某个斑块后的整体连通指数。

参照相关研究^[18],连通阈值设为 2 500 m,连通概率设为 0.5 运用 Conefor 2.6 进行计算,选取 $dPC > 1$,面积 $S > 1\ 000\ \text{hm}^2$ 的核心区斑块作为生态源地。

1.3.2 基于空间句法的电阻力面构建 空间句法是以图论学为基础从空间结构角度出发,认为空间关系决定空间功能而并非空间本身,一些研究^[19-20]指出道路的密集程度和空间布局与人为活动有着密切关联。本文通过空间句法对道路网进行集成度分析[公式(3)]来反映道路人流量聚集程度^[21],集成度高的道路更能吸引人流量,对生态环境有更深的影响。首先基于道路网数据对道路轴线图进行构建使用 sDNA 软件进行空间句法集成度分析,并对计算结果进行反距离权重插值法进行空间表达根据自然断点分级法分为 5 个等级,对高集成度区与较高集成度区赋予电阻力值。

$$RA_i = \frac{2 \left(\frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n-1} - 1 \right)}{n-2} \quad (3)$$

式中: RA_i 为集成度; n 为节点个数; d_i 为某个节点与其余节点的最小距离。

景观电阻面是生态廊道构建的基础,不同的景观因素对能量流动存在不同的阻碍程度,阻力值的相对大小代表着穿越生境斑块的难易程度。针对滇池流域海拔高差大以及植被覆盖区别明显等特点并结合以往研究^[22-23],确定选取土地利用类型、坡度、高程、NDVI 和人为干扰 5 个阻力因子,通过叠加阻力值构建综合电阻力面。并分为两种情景(表 2)对比并识别道路网对生态过程的影响。情景 1:只考虑土地利用类型、坡度、高程和 NDVI 构建阻力面;情景 2:加入集成度分析的道路网因子。

表 2 综合电阻力面阻力因子赋值
Table 2 Assignment of resistance factor of composite resistance force surface

阻力因子	分级指标	电阻值
土地利用类型	绿地(林地+草地)	1
	水田	10
	旱田	25
	水域($S < 100\ \text{hm}^2$)	10
	水域($S > 100\ \text{hm}^2$)	250
	农村用地	50
	城镇用地	300
坡度	其他建设用地	400
	$0^\circ \sim 20^\circ$	1
	$20^\circ \sim 60^\circ$	20
	$60^\circ \sim 150^\circ$	40
	$150^\circ \sim 250^\circ$	100
高程	$> 250^\circ$	160
	0~1 000 m	1
	1 000~1 900 m	15
	1 900~2 100 m	30
	2 100~2 300 m	75
NDVI	$> 2\ 300\ \text{m}$	120
	0~0.25	50
	0.25~0.5	30
人为干扰	0.5~0.75	10
	0.75~1	1
	较高集成度区	100
	高集成度区	200

1.3.3 基于电路理论的生态网络构建及分析指数

电路理论根据电子在电阻力面中随机移动的特性^[24],将生态源地视为电源,不同景观要素叠加为电阻力面,观察电子在阻力面中的移动情况来模拟生态廊道。本研究基于上述所提取的生态源地和综合景观电阻力面(两种情景),采用电路理论为生态源地输入 1 A 的电流通过构建各生态源地间最小成本路径模拟生态廊道。在此基础上,Linkage Mapper 中 Pinchpoint Mapper 工具与 Barrier Mapper 工具确定廊道“夹点”以及障碍区。电阻面中电流密度高的区域为“夹点”,表明该区域生态良好且阻力较低,遭受破坏会对整个生态研究区带来较大损失^[25]。生态障碍区是在电流密度较高,同时经受阻力较大区域,修复该区域以减小该区域阻力系数能够有效改善流域内的网络连接度^[26]。网络分析指数能够评价生态网络的连接性及完善度,常用的指标有网络闭合度(α)、网络连接度(β)和网络连通率(γ)〔公式(4)~(6)〕,其值越大网络越完善、连接性越好。

$$\alpha = \frac{L - V + 1}{2V - 5} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{L}{V} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{L}{3(V - 2)} \quad (6)$$

式中: L 为廊道数; V 为源地个数; α 为网络中出现的环路数,用于描述网络闭合度; β 为每个节点的平均链路数,用于描述网络复杂度; γ 为所有节点被连接的程度,用于描述网络连接度。

2 结果与分析

2.1 基于 MSPA 的生态源地提取

由 MSPA 分析结果(表 3)可以看出,前景面积共 135 820 hm^2 占滇池流域面积的 46.5%;核心区总面积为 124 209.3 hm^2 ,占前景面积的 91.45%是生态源地的主要来源;边缘区作为前景与背景之间的过渡区域,占比达到了 6.30%;孤岛、孔隙等其余景观类型共占 2.25%。总体来讲滇池流域中核心区面积较占比较高,具有良好的生态资源。

生态源地作为生态网络的能量来源于能量流动节点,需考虑其连通性与生态功能,结合研究尺度最终选取了 17 块面积大于 1 000 hm^2 , $\text{dPC} > 1$ 的生态斑块作为生态源地(图 1),共 101 248 hm^2 占研究区的 34.7%。源地主要分布在流域北部与中部滇池周围位于流域中部的 1 号源地面积为 33 420 hm^2 是源地中面积最大且 dPC 值最高的斑块,位于中部具有

良好的连接作用。生态源地主要分布在流域北侧和中部滇池区域,北部主要是位于盘龙区和五华区的 2,3,4,11,15 号生态源地,内部包括了黄石岩、营盘山、黑龙潭公园等重要生态保护地,平均斑块面积为 7 690.4 hm^2 ,平均斑块面积较大且斑块间距离较近、连通性较高;而位于南部晋宁区的 6,8,10,12,17 号源地,内部包括了红山、麻大山等生态保护地,平均斑块面积为 2 337.6 hm^2 ,相对于北部平均斑块面积较小,斑块形态也较为破碎。生态源地具有重要生态服务价值,在未来建设中应注意对生态源地的保护,避免大规模开发等人为活动的干扰。

表 3 滇池流域 MSPA 景观类型统计

Table 3 Statistics of MSPA landscape types

景观类型	面积/ hm^2	百分比/%
核心区	124 209.3	91.45
孤岛	6.9	0.01
孔隙	1 910.0	1.41
边缘区	8 557.3	6.30
桥接区	904.4	0.67
环岛	19.0	0.01
支线	213.1	0.16

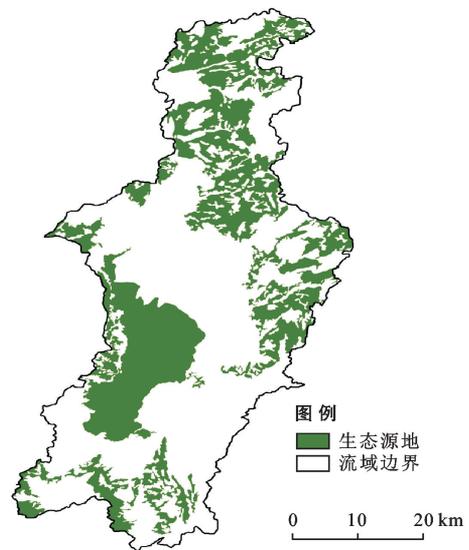


图 1 滇池流域生态源地分布

Fig.1 Distribution of ecological sources

2.2 基于电路理论的生态廊道构建

2.2.1 道路集成度分析 为了探究道路对生态的影响,本文基于 sDNA 软件对道路网进行集成度分析,采用反距离权重插值法获取道路网影响程度及范围(图 2)。高集成度区域表示道路可达性较高,人为活动频繁,主要位于道路密集的中心城镇区域;相反低集成度区域道路稀疏,人流量较少,对生态过程影响较低。由集成度影响分布图得出高集成度区主要位

于中心主城区,中心城区是道路网最完善区域,因此对生态影响最大;较高集成度区和中等集成度区呈中心环状分布于城区周围,大多为人口较密集的农村及城镇地区;较低集成度区和低集成度区主要分布在滇池流域南北侧人口稀少的核心区。

2.2.2 电阻力面对比分析 阻力面的设定反映了物种扩散的难易程度,本文针对研究区生态特征提出两种电阻力面设定情景(图 3)。两种情景低阻力区分布相似但高阻力区有所改变,情景 2 相比于情景 1 总体阻力值明显增高,最大阻值由 687.5 提高到 806.5,平均阻力值由 189.8 增加至 224.5。高阻力区由周边的工业建设区变为中心城市,且地区沿道路辐射分布,在滇池东北方向临近城市地区有明显阻力值变大情况。

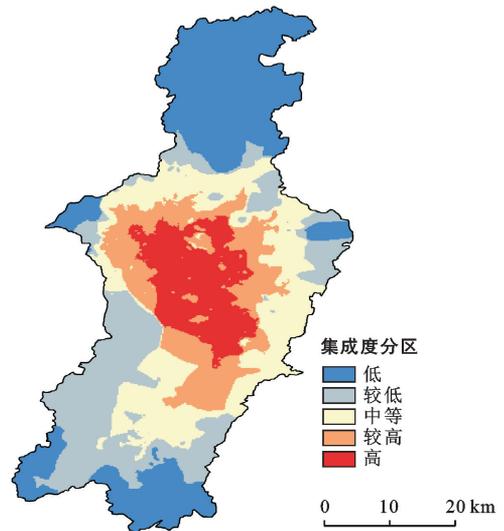


图 2 滇池流域道路网集成度影响分布
Fig.2 Distribution of integration impact

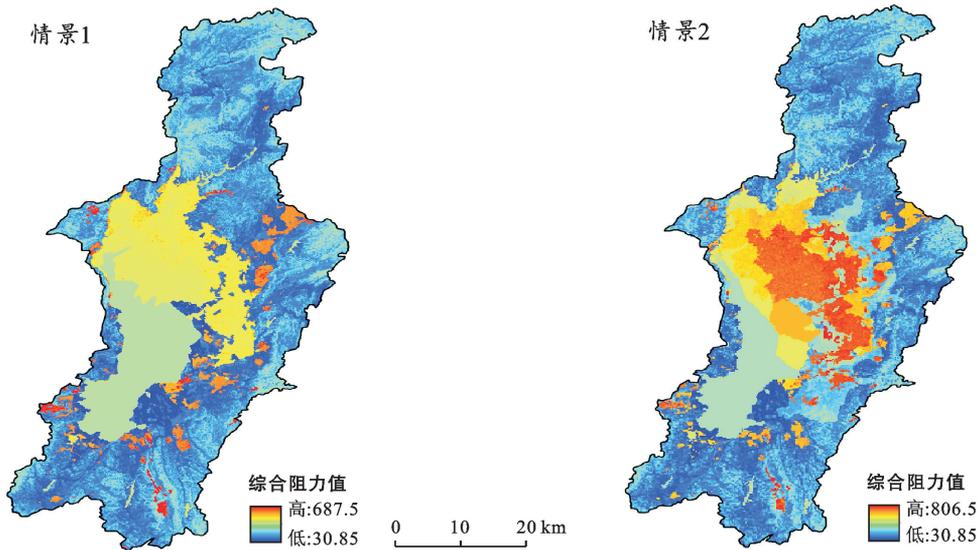


图 3 滇池流域生态廊道构建的两种情景累计阻力面
Fig.3 Cumulative resistance surface of two scenarios

2.2.3 生态廊道构建及分析 生态廊道通过连接不同的生态源地可增加整个区域的连通性,基于两种情景下的电阻力面通过电路理论分别生成了 35 条和 41 条最小成本路径,并采用自然断点法将路径长度分类(图 4),总长度分别为 185.9 km 和 216.2 km。与情景 1 相比,情景 2 增加 6 条廊道,共增长 30.3 km,表明道路网影响了能量流通,导致其运动路径发生改变。从连接方式来看,受影响较大地区位于距城区较近的官渡区与呈贡区交界处以及晋宁区北部源地间的相互连接,由于阻力的增加源地 6,7 之间的连接由原来的一条增加为两条并增强了与源地 1 之间的联系;源地 3,5,9,14 之间廊道数量增加,多处斑块连通性得到提升。对两种情景下构建的生态廊道进行生态网络分析指数对比分析(表 4),结果显示 α, β, γ 指数分别增加 0.20, 0.35, 0.13, 说明在集成度分析的基

础上对生态网络的连接具有积极作用。滇池流域长度大于 15 895 m 的生态廊道有两条,主要位于官渡区和晋宁县以连接相距较远的 6,7 号源地;而长度大于 4 479 m 且小于 15 895 m 的生态廊道主要以滇池作为核心枢纽呈发散状连接 1 号源地与 5,6,15,17 号源地,加强了整体源地间的连通性;其余廊道主要位于南北部相邻较近的生态源地之间,共同组成了滇池流域生态网络。

表 4 滇池流域生态廊道构建两种情境下生态连接指标对比
Table 4 Comparison of ecological connectivity indicators under two scenarios

分析指标	情景 1	情景 2
α	0.59	0.79
β	2.06	2.41
γ	0.78	0.91

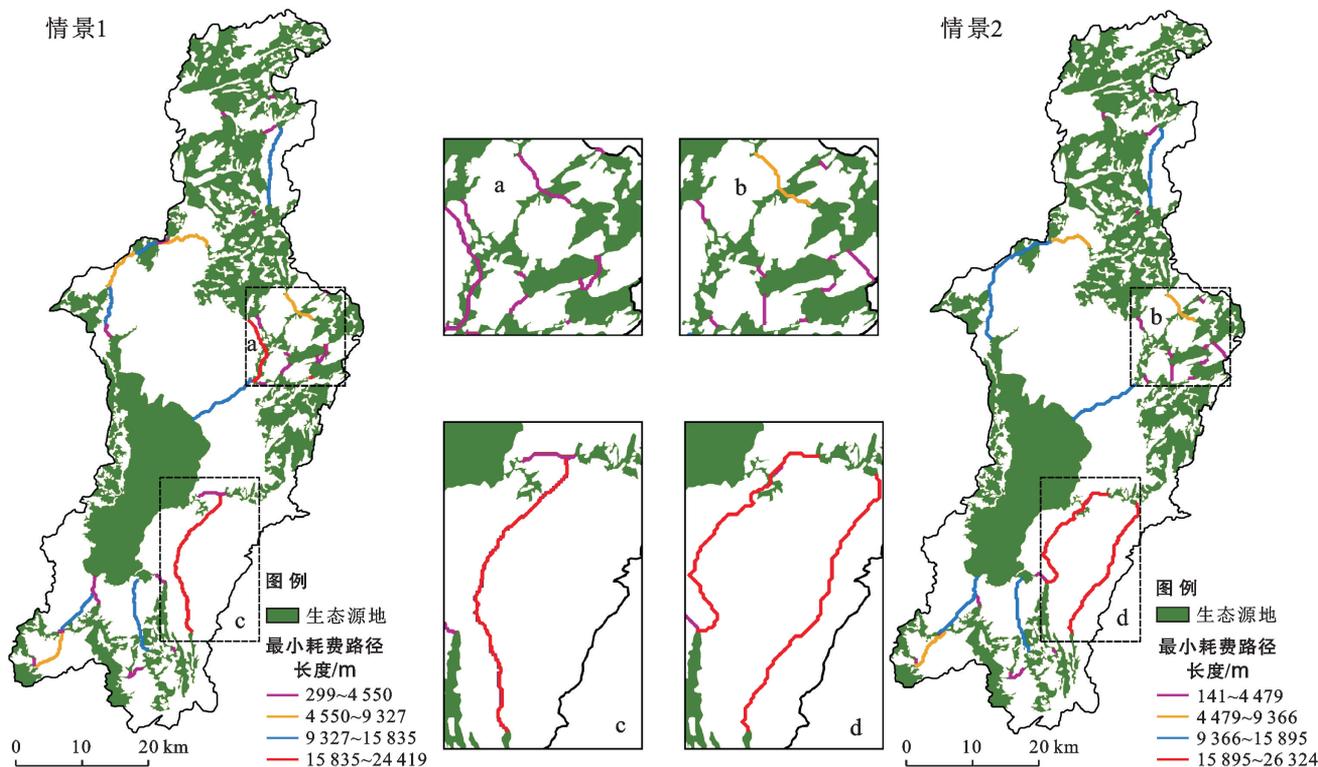


图 4 滇池流域生态廊道构建两种情景生态廊道构建结果

Fig.4 Construction results of ecological corridor in two scenarios

2.2.4 廊道宽度阈值设定 基于电路理论所模拟的生态廊道是无宽度的概念网络,但廊道本身结构会与其他景观所冲突。相关研究指出^[27],200~600 m 宽度的生态廊道能够维持生境内生物多样性,600~1 200 m 的宽度能够创造物种丰富的景观结构。本文以情景二模拟的生态廊道为基础,依据相关研究分别以 200,400,600,800,1 000 m 和 1 200 m 为试验,统计各宽度内水田、旱地、植被、水域和建设用地 5 种用地类型构成比例。从分析结果显示(表 5),用地类型比例随着廊道宽度的变化不断变化,其中植被比例从 600 m 往上占比都在 46% 以上,是所有用地类型中占比最高的一类,而超过 600 m 后建设用地比例不断增加,水域比例也开始减小,生态网络生境质量下降,表明 600 m 左右的廊道宽度更适宜于滇池流域内的生态网络建设。

表 5 不同廊道宽度内的用地类型比例
Table 5 Proportion of land types within different corridor widths %

宽度/m	水田	旱地	植被	水域	建设用地
200	30.4	8.2	29.2	18.6	13.6
400	26.7	8.8	28.5	19.8	16.1
600	24.1	9.1	46.4	5.3	15.0
800	22.4	9.5	46.5	2.6	19.1
1 000	20.9	9.6	46.8	2.7	20.0
1 200	19.6	9.4	47.3	2.9	20.9

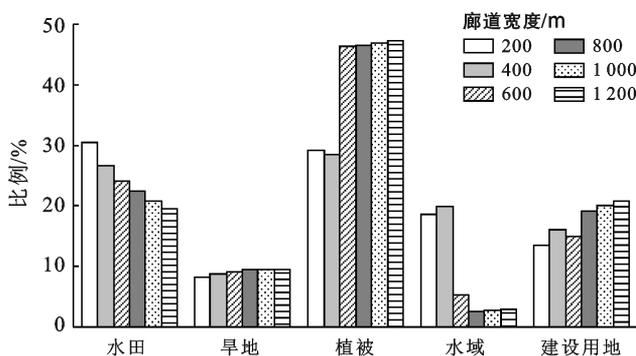


图 5 不同廊道宽度土地利用类型比例

Fig.5 Histogram of land use types with different corridor widths

2.3 生态安全格局构建

生态夹点是生态网络连接重要区域,根据电阻力面中电流流动状态构建生态网络点电流图,并采用自然断点法分为 5 个等级筛选出电流密度前 3 个等级地区作为生态夹点,一级夹点、二级夹点和三级夹点分别占 5.9%,20%和 74.1%。从夹点分布来看,一级夹点只存在于滇池、棋盘山国家森林公园、长虫山生态公园、打鹰山等重要生态源地之间,而二、三级夹点区大部分分布在北部农村居民区和南部城市建设区,说明滇池流域整体发展不均衡,从流经区域来看夹点区域面积共 15 771 hm²,占研究区面积的 5.4%,尽管夹点区面积较小,却是连接整个网络的关键区域,应

重点保护。以 400 m 为搜索半径进行障碍区分析结果可知研究区内阻碍区分布较广共 15 012 hm² 占研究区的 5.1%，其中障碍区改善分值在 80~430 之间，平均改善分值为 165.8。一、二、三级障碍区面积比例分别为 6.7%，18.9% 和 74.4%。一级障碍区 4 个位于滇池与打鹰山之间，其余障碍区同样主要存在不同生态源地间阻力较大的城镇区域，与部分夹点区域有所重合。根据阻力值与电流密度计算出滇池流域改善系数(改善系数介于 0~5 708 575 之间)，采用自然断点法将滇池流域改善系数分为 3 个等级，将前两个等级的区域作为改善区面积共 77 094.9 hm²。一级改善区面积 14 327.2 hm² 占研究区面积的 4.9%，主要分布于主城区，是滇池流域改善的主要区域；二级改善区面积 62 767.7 hm² 占研究区面积的 21.5%，主要环一级改善区边缘分布。改善区与生态源地、生态廊道、生态夹点、生态障碍区共同组成滇池流域生态安全格局(图 6)。

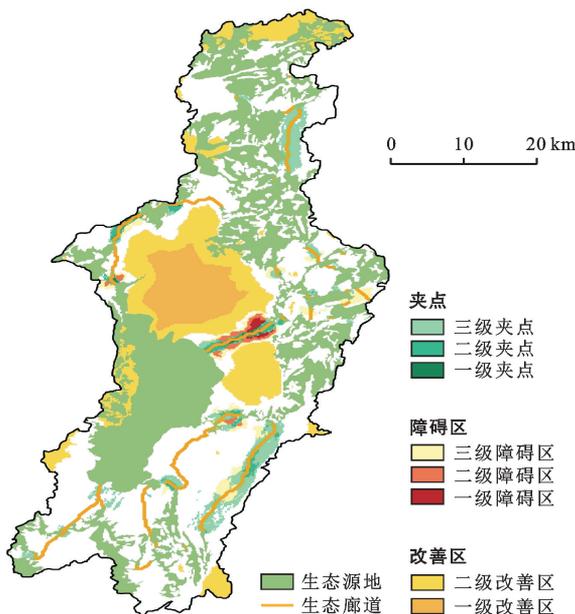


图 6 滇池流域生态安全格局

Fig.6 Ecological security pattern of Dianchi Lake basin

3 讨论与结论

道路网作为城镇化的主要驱动因子，是人类活动对生态过程干扰的具体表现，对道路影响下的生态安全网络构建和优化，能够有效缓解道路建设导致的生态连通性降低。本文结合空间句法与电路理论构建生态安全网络，通过对道路轴线的空间关系进行集成分析，优化电阻力方面，探究道路对生态网络的影响。

(1) 滇池流域生态斑块形体破碎化明显，研究提取了 17 块生态源地，其中包括滇池、二龙坝、柴河水

库、松茂水库、瑶冲水库、棋盘山国家森林公园等生态保护地。南北部生态源地平均斑块面积分别为 2 337.6 hm²，9 690.4 hm²，其分布呈现出北部生态源地密集、南部稀疏的特点。

(2) 两种情景低阻力区分布相似但高阻力区有所改变，加入道路阻力影响后情景 2 相比于情景 1 总体阻力值明显增高，最大阻值由 687.5 提高到 806.5，平均阻力值由 189.8 增加至 224.5，高阻值区向中心城市转移；人流量较大地区(高集成度区域)生态廊道路径变化明显，整体廊道数量与长度都有所增长；网络闭合度(α)、网络连接度(β)和网络连通率(γ)分别增加 0.20, 0.35, 0.13。

(3) 受道路网影响下的滇池流域生态网络格局由生态源地、生态廊道、生态夹点、生态障碍区和生态改善区组成。其中识别 17 块生态源地面积共 101 248 hm²；生态廊道 41 条，总长为 216.2 km 通过廊道宽度阈值分析，最优宽度确定为 600 m；夹点区、障碍区和改善区分别为 15 771 hm²，15 012 hm²，77 094.9 hm²。

本文采用能够有效表达道路拓扑连接性特征和通达性特征的空间句法探索道路网对生态过程影响关系，使得生态网络的连接中充分考虑道路本身的人工运动对生态系统的切割影响，提升了生态网络整体连通率和闭合度。相比已有相关研究侧重道路的缓冲影响范围而忽略了道路本身的空间构架，本研究充分考虑了道路流量、等级及空间关系对生态网络的影响。在滇池流域的案例研究中，既反映了案例区特有的生态网络特征，也体现了湖泊型流域生态网络的一般性规律。即流域汇水中心区(湖区)和流域外围分水岭(山区)两大重要生态空间之间的连通，生态廊道往往表现为两种类型，一类是由湖区向山区的放射型廊道，一类是串联山区的流域外围分散式环状型廊道；临湖坝区往往形成重要城镇，城镇与城镇之间的道路成为切割生态斑块、阻碍生态连通的重要阻力，而这些道路一般形成环湖的圈层体系，放射型生态廊道往往被环湖道路穿越形成夹点，特别是高等级、流量大的道路对生态网络切割效应更为突出，这一类夹点和障碍区是生态网络构建和修复中应该尤为重视的。虽然本文在方法思路上有一定探索，然而景观电阻力方面的构建过程中阻力值的设置普遍采用经验值，使得景观阻力值的设置具有一定的主观性，形成统一的景观阻力值体系是未来需要探讨的问题。此外，不同野生动物迁徙对廊道宽度要求不同，本文仅考虑了大多数生物迁徙的需要以及廊道沿途景观的影响，尚

未针对不同区域特定生物的需要识别廊道宽度,在后续研究中会进一步加强相关研究,完善不同生物迁徙需求的生态安全网络构建。

[参 考 文 献]

- [1] 吴敏,吴晓勤.基于“生态融城”理念的城市生态网络规划探索:兼论空间规划中生态功能的分割与再联系[J].城市规划,2018,42(7):9-17.
- [2] 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(8):1812-1824.
- [3] Yu Kongjian. Security patterns and surface model in landscape ecological planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1996,36(1):1-17.
- [4] 彭建,郭小楠,胡熠娜,等.基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建:以云南省玉溪市为例[J].应用生态学报,2017,28(2):627-635.
- [5] 杨凯,曹银贵,冯喆,等.基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展[J].生态与农村环境学报,2021,37(5):555-565.
- [6] Mann D, Agrawal G, Joshi P K. Spatio-temporal forest cover dynamics along road networks in the Central Himalaya [J]. Ecological Engineering, 2019,127:383-393.
- [7] 汪勇政,李久林,顾康康,等.基于形态学空间格局分析法的城市绿色基础设施网络格局优化:以合肥市为例[J].生态学报,2022,42(5):2022-2032.
- [8] 王雪然,万荣荣,潘佩佩.太湖流域生态安全格局构建与调控:基于空间形态学—最小累积阻力模型[J].生态学报,2022,42(5):1968-1980.
- [9] 杨超,戴菲,陈明,等.基于 MSPA 和电路理论的武汉市生态网络优化研究[C]//中国风景园林学会 2020 年会议论文集(下册).成都,2020:236-240.
- [10] 费凡,尹海伟,孔繁花,等.基于二维与三维信息的南京市主城区生态网络格局对比分析[J].生态学报,2020,40(16):5534-5545.
- [11] 杨晨雪.路网中心性与用地分布格局相关性研究[D].湖北武汉:武汉大学,2018.
- [12] 倪庆琳,丁正义,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.
- [13] 黄颀昊,杨新苗,岳锦涛.基于多尺度地理加权回归模型的城市道路骑行流量分析[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(7):1132-1141.
- [14] 涂文姬,杨启鸿,刘波,等.滇池越冬水鸟同步调查研究[J].林业调查规划,2017,42(6):52-57.
- [15] 如克亚·热合曼,阿里木江·卡斯木,哈力木拉提·阿布来提.基于 MSPA 和 MCR 模型的图木舒克市生态安全格局构建[J].环境科学与技术,2021,44(5):229-237.
- [16] 陈竹安,马彬彬,危小建,等.基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化[J].水土保持通报,2021,41(6):139-147.
- [17] Kim D, Shin W, Choi H, et al. Estimation of ecological connectivity in a city based on land cover and urban habitat maps [J]. Sustainability, 2020,12(22):9529.
- [18] 谢于松,王倩娜,罗言云.基于 MSPA 的市域尺度绿色基础设施评价指标体系构建及应用:以四川省主要城市为例[J].中国园林,2020,36(7):87-92.
- [19] Doyle P, Snell J. Random Walks and Electric Networks [C]//Carus Mathematical, 1984.
- [20] Karlson M, Mörtberg U, Balfors B. Road ecology in environmental impact assessment [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2014,48:10-19.
- [21] 陈瑶瑶,罗志军,齐松,等.基于生态敏感性与生态网络的南昌市生态安全格局构建[J].水土保持研究,2021,28(4):342-349.
- [22] 陈群,刘平辉,朱传民.基于 MCR 模型的江西省抚州市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2022,42(2):210-218.
- [23] 张亚丽,尹伟特,胡希军,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的资源节约型生态网络构建:以福建省东山岛为例[J].西北林学院学报,2021,36(5):254-261.
- [24] Guo Xinya, Zhang Xingqi, Du Shixun, et al. The impact of onshore wind power projects on ecological corridors and landscape connectivity in Shanxi, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,254:120075.
- [25] 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.
- [26] 汉瑞英,赵志平,肖能文,等.基于最小累积阻力差值模型的北京市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2022,42(3):95-102.
- [27] 朱强,俞孔坚,李迪华.景观规划中的生态廊道宽度[J].生态学报,2005,25(9):2406-2412.