

DOI: 10.20103/j.stxb.202210233013

韩王亚, 夏双双, 周维, 申宇, 苏旭坤, 刘国华. 基于生态廊道识别的拉萨河流域生态安全格局构建. 生态学报, 2023, 43(21): 8948-8957.

Han W Y, Xia S S, Zhou W, Shen Y, Su X K, Liu G H. Constructing ecological security pattern based on ecological corridor identification in Lhasa River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8948-8957.

基于生态廊道识别的拉萨河流域生态安全格局构建

韩王亚^{1,2}, 夏双双³, 周维², 申宇^{2,4}, 苏旭坤^{2,4}, 刘国华^{2,4,*}

1 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 南京信息工程大学长望学院, 南京 210044

4 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 构建生态安全格局对于保障区域生态安全、优化国土生态空间具有重要意义。以拉萨河流域为研究区, 基于“生态源地-阻力面-生态廊道”的区域生态安全格局构建范式, 评估流域水土保持、水源涵养、固碳、生境质量四项生态系统服务, 基于生态系统服务重要性分级识别生态源地; 选择土地覆被类型、归一化植被指数、地形起伏度、坡度、距道路距离、距水体距离作为主要阻力因子, 利用熵权法形成综合阻力面; 利用 Linkage Mapper 工具基于最小成本路径理论识别生态廊道并判定生态节点, 构建流域生态安全格局。结果表明: 提取生态源地 20 个, 总面积 2531.42 km², 占研究区总面积的 7.77%; 生态廊道 36 条, 总长度 916.87 km, 与拉萨河干流平行呈“二”字型分布; 生态节点 13 个, 集中分布在裸地、裸岩、低覆盖度草地等地类, 构建以生态源地-生态廊道-生态节点组成的“面-线-点”结构生态网络。研究结果为拉萨河流域生态安全和生态经济协调提供数据支持, 为区域生态保护与可持续发展提供科学参考。

关键词: 生态廊道; 生态安全格局; 生态系统服务; 拉萨河流域

Constructing ecological security pattern based on ecological corridor identification in Lhasa River Basin

HAN Wangya^{1,2}, XIA Shuangshuang³, ZHOU Wei², SHEN Yu^{2,4}, SU Xukun^{2,4}, LIU Guohua^{2,4,*}

1 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Construction of ecological security pattern is of great significance for ensuring ecological security at regional scale. It takes an important role on optimizing ecological national land space. Taking Lhasa River Basin as the research area, the ecological security pattern paradigm was constructed based on the ecological source-resistance surface-ecological corridor at the region scale. Soil conservation, water conservation, carbon sequestration, and habitat quality were evaluated as key ecosystem services of the Lhasa River Basin. Ecological sources were identified by the importance grades of ecosystem services. Land cover types, normalized difference vegetation index, relief, slope, distance to roads, distance to water were selected as the main resistance factors. The comprehensive resistance surface was generated by calculating the weight of resistance factors using the entropy weight method. Ecological corridors were identified by using Linkage Mapper tool based

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0402)

收稿日期: 2022-10-23; 网络出版日期: 2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ghliu@cees.ac.cn

on the least cost path theory. Ecological nodes were extracted on the basis of ecological corridors. The ecological security pattern of the Lhasa River Basin was constructed at the watershed scale. The results showed that 20 ecological sources were extracted, with a total area of 2531.42 km². Ecological sources accounted for 7.77% of the total area of the study area. 36 ecological corridors were extracted, with a total length of 916.87 km. The distribution pattern of ecological corridors was parallel to the main stream of the Lhasa River in shape of “two” in Chinese. 13 ecological nodes were extracted, concentrated in bare land, bare rock and low coverage grassland in the Lhasa River Basin. Finally, a plane-line-point structure ecological network was formed, which composed of ecological sources, ecological corridors, and ecological nodes. The results provide data support for the coordination of ecological security and ecological economy in the Lhasa River Basin, and provide scientific reference for regionally ecological protection and sustainable development.

Key Words: ecological corridor; ecological security pattern; ecosystem services; Lhasa River Basin

随着社会经济的发展和人类活动的加剧,生态退化、自然资源短缺、生物多样性降低等生态问题日益严峻,生态安全面临威胁^[1]。生态安全狭义的概念是从生态系统自身特性出发,反映生态系统的健康状况及稳定性;而广义的概念基于人类生存与发展的角度,关注生态系统保障人类生活健康、社会经济不受威胁的能力^[2-3]。国家生态安全是生态文明建设的重要环节^[3],生态安全格局是由生态斑块及与其有效连接的生态廊道所构成的^[4],生态安全格局的构建及优化对于保障区域生态安全具有重要意义。

国内外关于生态安全格局的相关研究集中在土地利用优化^[5]、景观安全格局优化^[6]、生态网络构建^[7]等方面,从理论概念的辨析向格局的定量化研究发展,利用生态源地和阻力面提取生态廊道,形成“生态源地-阻力面-生态廊道”的区域生态安全格局构建范式^[4]。生态廊道作为连接生态斑块的线状或带状景观要素,促进斑块间物质与能量交换,是物种迁徙、扩散等生态过程的重要通道^[8],具有保障区域生态安全、维持生物多样性等服务功能。在景观尺度和区域尺度上提取生态廊道的方法包括最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)^[9-10]、水文分析^[11-12]、电路理论模型^[13-14]等。MCR模型通过ArcGIS的cost path工具计算源地间所有可能路径的最小成本路径(Least-cost path, LCP),筛选最小累积成本路径作为生态廊道的参照依据,操作过程需要反复运算,存在冗余廊道^[15]。水文分析方法通过提取累积成本距离的山谷线识别生态廊道,由低阻力道辐射形成的集水“盆地”有助于提取生态节点^[12]。电路理论模型基于物理学的电流分析生态流中的阻力变化,识别生态网络中的障碍点^[13-14]。部分学者运用Linkage Mapper工具识别生态廊道^[15-16],在MCR模型原理的基础上自动剔除重复路径,获取具有宽度信息的生态廊道;利用Linkage Mapper工具判定生态节点时,能够考虑生态障碍点的空间信息,而不仅仅是基于生态廊道的交点,Linkage Mapper工具在生态廊道和生态节点判定方面的优势,为生态网络的高效构建提供了技术支持。

生态源地识别和阻力面构建的准确性影响生态廊道的提取。已有生态源地的识别方法包括保护区界定法^[17]、形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)^[7]、生态系统服务功能综合评价^[18],其中通过生态系统服务的综合量化评价选取生态适宜性较高的生态斑块,提高了生态源地识别的准确性。阻力面大多基于土地利用类型直接赋予不同的阻力系数,土地利用类型被视为自然过程和人类活动的综合反映,能够代表物种在源地之间移动时可能遇到的阻抗水平^[19-21],有些研究在此基础上结合地形坡度(地形起伏度、坡度、坡向等)^[15,20]、社会经济(夜间灯光数据等)^[22-23]、人类活动等数据构建综合阻力面^[24]。各个阻力因子层权重的确定包括主观赋权法和客观赋权法^[15],前者基于专家知识和经验确定权重,包括直接赋值法^[25]、层次分析法^[26]等,具有较强的主观性和随机性;后者根据阻力因子的统计特征确定各阻力因子层的权重,包括主成分分析法^[7]、熵权法^[15]等,基于原始数据的自身规律确定各层权重,对于提高综合阻力面的精度具有重要作用。

拉萨河流域地处青藏高原腹地,是青藏高原的重点生态脆弱区(属西藏“一江两河”亚区)^[27],是西藏重要的农牧区和粮食主产区,也是西藏人口最密集、人类活动扰动最大的区域。近年来拉萨河流域城镇化进程

发展迅速,流域面临草地退化、水土流失等生态问题,生态系统服务功能降低,流域生态安全及可持续发展受到影响。拉萨河流域生态问题的相关研究,多集中在生态系统质量变化,生态系统服务及生态风险评价^[28—29],对于生态安全格局及生态网络优化的研究较少。本研究关注拉萨河流域土壤保持、水源涵养、固碳、生境质量四项生态系统服务,并结合自然保护区斑块明确生态源地,确定综合阻力面,基于最小成本路径理论识别生态廊道,构建流域生态安全格局,以期对拉萨河流域生态保护与可持续发展提供科学参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

拉萨河发源于念青唐古拉山中段南麓,是雅鲁藏布江中游的一级支流,流经嘉黎县、林周县、墨竹工卡县、达孜县、拉萨市城关区等西藏自治区的 10 个区县。拉萨河流域(90°05′—93°20′E,29°20′—31°15′N)位于青藏高原中南部,流域面积为 32600 km²(图 1)。流域总体地势呈北部高南部低,海拔落差大(3568—7074 m),平均海拔约 4500 m。研究区属于高原温带半干旱季风气候区,年均气温为-7.1—9.2℃,多年平均降水量为 340—700 mm,多集中在 6—9 月。土壤类型以草毡土、草甸土及黑毡土为主。流域植被类型多样,呈明显垂直地带性分布,以高寒草甸和高寒草原为主^[28]。拉萨河流域是西藏自治区经济最发达、人口最密集的区域,城镇化进程发展迅速,流域面临草地退化、水土流失等生态问题。

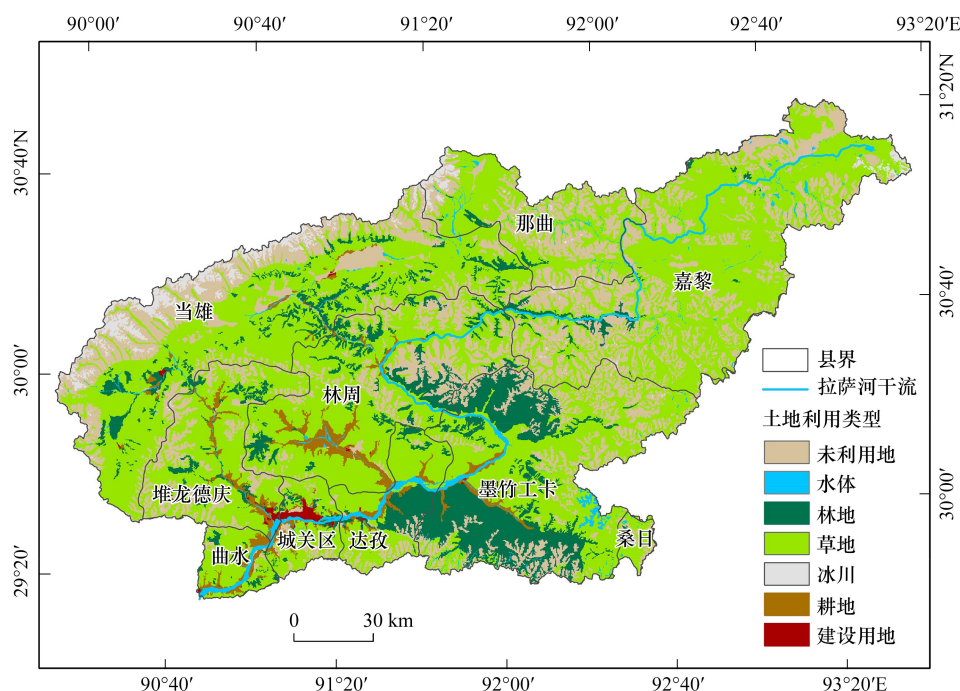


图 1 拉萨河流域区位图

Fig.1 Location of Lhasa river basin

1.2 数据来源与预处理

土地覆被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)2018 年 30 m 土地利用数据,根据拉萨河流域矢量裁剪获取 2018 年研究区土地利用数据,将用地重分类为耕地、林地、草地、冰川、水体、建设用地、未利用地 7 类;DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>) ASTER GDEM 30 m 数据;土壤数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集;降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);归一化植被指数(NDVI)数据(250 m)来源于美国地质调查局(USGS)陆地过程分布式数据档案中心(<https://lpdaac.usgs.gov>)

MOD13Q1 产品;植被净初级生产力(NPP)数据(500 m)来源于 USGS(<https://lpdaac.usgs.gov>)的 MOD17A3H 产品;蒸散数据(500 m)来源于 USGS(<https://lpdaac.usgs.gov>)的 MOD16A2 产品。本研究数据投影统一为 WGS_1984_Albers 坐标系,经研究区边界矢量数据裁剪后,统一重采样为 250 m×250 m 的空间栅格数据。

2 研究方法

2.1 生态系统服务评估

根据拉萨河流域的生态环境特征,结合前人研究^[28-29],采用 InVEST 模型 3.9.0 评估拉萨河流域水土保持、水源涵养、固碳、生境质量 4 项生态系统服务。其中,水土保持通过 InVEST 模型 Sediment Delivery Ratio (SDR)模块,水源涵养、固碳、生境质量分别由 InVEST 模型中的 Water Yield 模块、Carbon 模块、Habitat Quality 模块计算得到。

(1) 水土保持

由于拉萨河流域土壤侵蚀类型以水蚀为主^[30],利用修订的通用水土流失方程(RUSLE)计算:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中, A 为水土保持量 ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子 ($\text{MJ} \cdot \text{mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$),采用 Arnoldus 提出的年降水量计算^[30]; K 为土壤可蚀性因子 ($\text{t hm}^2 \text{ h MJ}^{-1} \text{ hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$),基于土壤有机碳含量和土壤粒径组成利用 EPIC 模型计算得到^[31]; LS 为坡长坡度因子(无量纲); C 为植被覆盖与作物管理因子(无量纲)^[29]; P 为水土保持措施因子(无量纲)^[29]。

(2) 水源涵养

基于 Budyko 水热耦合平衡假设^[32]和年均降水量数据计算研究区产水量,从而评估流域水源涵养能力,计算公式如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (2)$$

式中, $Y(x)$ 为栅格 x 的产水量 (mm); $\text{AET}(x)$ 为栅格 x 的年实际蒸散量 (mm); $P(x)$ 为栅格 x 的年降水量 (mm)。

$$\frac{\text{AET}(x)}{P(x)} = 1 + \frac{\text{PET}(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{\text{PET}(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \quad (3)$$

式中, $\text{PET}(x)$ 为栅格 x 的潜在蒸散量 (mm); ω 为代表自然气候-土壤性质的非物理经验参数。

$$\omega(x) = Z \frac{\text{AWC}(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (4)$$

式中, $\text{AWC}(x)$ 为土壤有效含水量 (mm),由土壤质地和土壤有效深度决定; Z 为季节常数,参考 InVEST 模型用户指南及相关文献^[29,33]。

(3) 固碳

总碳储量包括地上生物量、地下生物量、土壤含碳量和死亡有机碳量,基于 InVEST 模型计算每个栅格单元的总碳量:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (5)$$

式中, C_{tot} 为总碳量 (t/hm^2); C_{above} 为地上生物含碳量 (t/hm^2); C_{below} 为地下生物含碳量 (t/hm^2); C_{soil} 为土壤含碳量 (t/hm^2); C_{dead} 为死亡有机碳量 (t/hm^2)。生物量乘以碳含量系数获得碳含量^[29,34]。地上生物量基于各生态系统类型的 NPP 计算得到^[35]。利用根茎比计算地下与地上生物量的比例系数,进而获得地下生物量^[29,36]。土壤碳密度和死亡有机碳密度均参照文献中的参数^[34]。

(4) 生境质量生境质量基于 InVEST 模型 Habitat Quality 模块,考虑栖息地本身质量、受威胁程度以及每个栖息地生态胁迫因子的相对敏感性。模块参数根据 InVEST 模型用户指南及相关研究^[35,37]。生境类型包

括林地、草地、耕地、建设用地、水体、冰川、其它,生态胁迫因子包括农田、城市、铁路、国道、省道。

2.2 生态源地识别

生态源地是促进生态过程、维持生态系统完整性以及提供生态系统服务的关键生态斑块^[37]。生态系统服务重要性的量化,能够为识别区域关键生态源地提供依据。采用自然断点法将 4 项生态系统服务分为 5 级并赋值 1—5(数值越大代表重要性等级越高),分别代表一般重要、较重要、中等重要、高度重要、极重要^[23]。对分级后的各项生态系统服务进行等权叠加,获得生态系统服务重要性的空间分布,提取极重要分级区域并结合自然保护区数据进行对照检验,筛选面积大于 30 km²的斑块作为生态源地。

2.3 阻力面的构建

生态阻力为生物物种在不同生态源地间迁移扩散需要克服的阻力。根据前人研究成果^[15]及拉萨河流域现状^[28—30],选取土地覆被类型、归一化植被指数、地形起伏度、坡度、距道路(铁路、国道、省道)距离、距水体距离 6 种阻力因子。不同阻力因子的分布范围不同,参照不同要素阻力系数设定的相关研究^[15,26],利用 ArcGIS 对各阻力因子图层进行分级与标准化处理,统一阻力值范围介于 1—5 之间(图 2)。由于熵权法通过指标参数的差异程度衡量指标的重要性,能够避免主观赋权的随机性^[22],本文采用熵权法计算各阻力因子的权重(表 1),各阻力因子图层按其权重叠加获得最终阻力面。

表 1 阻力因子赋值及熵权

Table 1 Resistance factor assignment and entropy weight

阻力因子 Resistance factors	分级标准 Classification criteria	阻力值 The value of resistance factors	权重 Weight	阻力因子 Resistance factors	分级标准 Classification criteria	阻力值 The value of resistance factors	权重 Weight
土地覆被类型 Land use types	林地	1	0.06	坡度	>25°	1	0.13
	湿地、水体	2		Slope	20°—25°	2	
	灌木林、疏林地、草地	3			15°—20°	3	
	耕地	4			6.5°—15°	4	
	冰川、裸地、建筑用地	5			<6.5°	5	
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	0.380—1.000	1	0.34	距道路距离	>2000 m	1	0.13
	0.300—0.380	2		Distance to roads	1500—2000 m	2	
	0.200—0.300	3			1000—1500 m	3	
	0.100—0.200	4			500—1000 m	4	
	−0.280—0.100	5			<500 m	5	
地形起伏度 Relief	>350 m	1	0.11	距水体距离	<500 m	1	0.23
	260—350 m	2		Distance to water	500—1000 m	2	
	180—260 m	3			1000—1500 m	3	
	90—180 m	4			1500—2000 m	4	
	<90 m	5			>2000 m	5	

2.4 生态廊道提取

利用 Linkage Mapper 工具箱的 Linkage Pathways-Build Network and Map Linkages 工具,基于最小成本路径方法计算物种在不同生态源地间迁移扩散所需克服阻力面的累计阻力值,成本加权距离阈值设置为 200 km,最终得到的最小成本路径为生态廊道。

2.5 生态节点识别

利用 Linkage Mapper 工具箱的 Barrier Mapper 工具,设置 250—1000 m 的半径范围,250 m 的半径步长,基于“Maximum”模式进行迭代运算,计算改进得分,改进得分越高表示需要更好地提高连通性,选取改进得分的高值区作为高障碍节点区域;计算相对于最小成本距离(Least-cost distance, LCD)改进得分的百分比,当累计阻力值越小时其对应的改进得分百分比越大,表明修复该区域有利于改善区域的连通性,改进得分百分比的

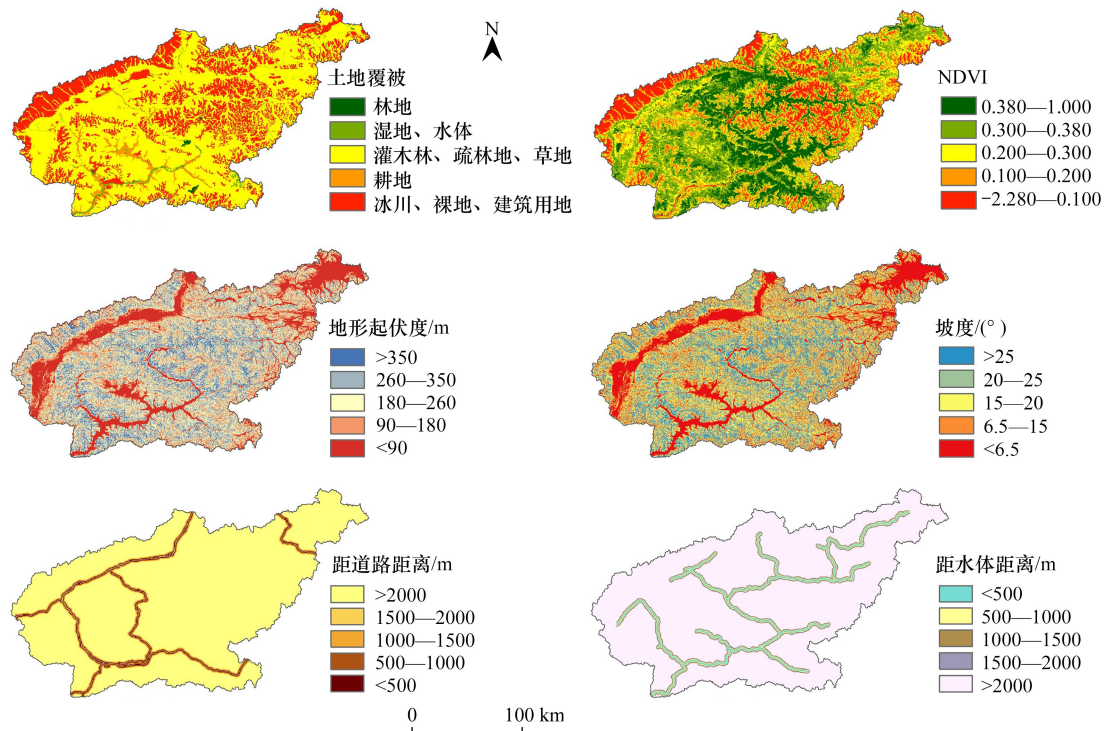


图 2 拉萨河流域阻力因子图层

Fig.2 Resistance factor layers in Lhasa river basin

高值区作为低障碍节点区域。筛选最优半径下的改进得分图层和改进得分百分比图层,采用自然断点法完成图层等级划分,识别图层高值区即障碍节点区域,利用 ArcGIS 要素转换工具“Feature To Point”提取生态节点。

3 结果与分析

3.1 生态源地的确定

研究区生态系统服务呈现明显的空间异质性(图 3)。土壤保持重要性总体空间分布较为均匀,中等重要区和高度重要区分布在中下游河谷两侧。水源涵养重要性由西向东增加,极重要区集中分布在拉萨河流域上游,位于嘉黎县的麦地卡湿地国家级自然保护区是重要的水源涵养区。固碳高度重要区和极重要区分别占研究区总面积的 20%、17%,集中在拉萨河上游的源头地区、西北部念青唐古拉山南平原地区,植被类型以湿地和草甸为主。生境质量极重要区集中在中下游河流两岸,墨竹工卡县整体生境质量较高,包括该县南部地区及其与林周县交界处。

对拉萨河流域生态系统服务栅格图层分权叠加,得到生态系统服务重要性空间分布,基于自然断点法将生态系统服务重要性划分为 1—5 级(1:一般重要区,2:较重要区,3:中等重要区,4:高度重要区,5:极重要区)(图 4)。极重要区占研究区总面积的 16.92%,主要分布在嘉黎县东北部麦地卡湿地、嘉黎县东部、当雄县念青唐古拉山南部、堆龙德庆县南部、林周县南部、林周县与嘉黎县交界处。高度重要区占研究区总面积的 39.54%,在研究区分布广泛。中等重要区占全区面积的 15.79%,集中分布在流域中下游。提取生态系统服务极重要区,筛选斑块面积大于 30 km²的区域,利用研究区自然保护区空间分布数据进行验证,识别共计 20 个生态源地(图 4)。生态源地总面积 2531.42 km²,占研究区总面积的 7.77%,主要分布在流域上游嘉黎县,中游林周县与嘉黎县交界处,下游堆龙德庆县、林周县和达孜县南部,与湿地湖泊等分布重叠度较高。

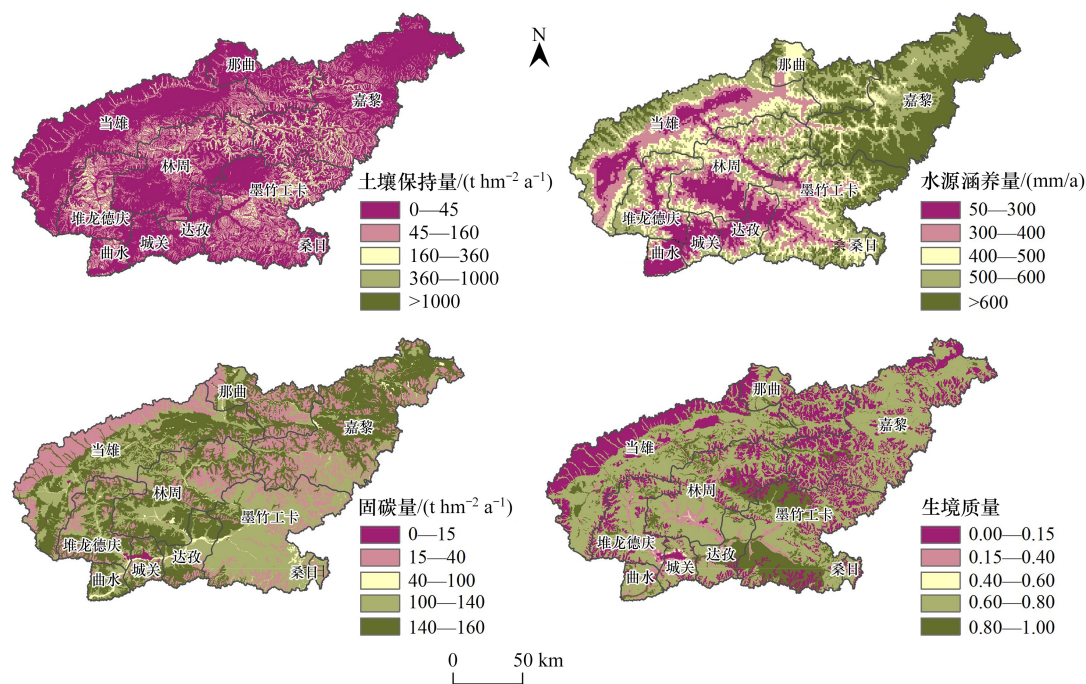


图3 生态系统服务空间分布
Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services

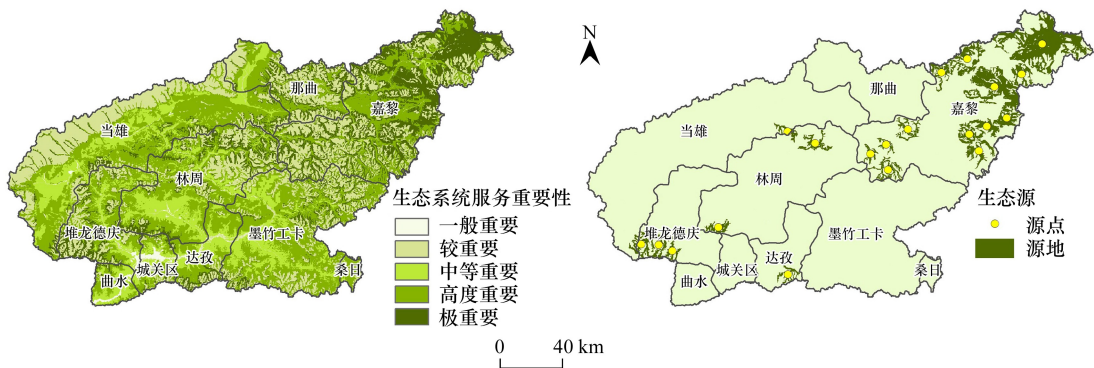


图4 生态源地空间分布
Fig.4 Spatial distribution of ecological sources

3.2 阻力面构建

植被覆盖度越高、地形越复杂、距道路越远、距水体越近就越有利于生态源地的交流扩展。将土地覆被类型、归一化植被指数、地形起伏度、坡度、距道路距离、距水体距离 6 种阻力因子按权重叠加,得到生态源地累积综合阻力面(图 5)。阻力值较高的区域集中分布在拉萨河中游、当雄县南部以及城关区,中游地区包括嘉黎县南部、那曲县南部、墨竹工卡县北部以及林周县东北部,多为高海拔寒冻土区,植被覆盖度低;当雄县南部以冰川雪被为主,城关区多为城镇用地。阻力值较低的区域集中在拉萨河上中游的河谷地区。

3.3 生态廊道识别

基于识别的生态源地和构建的综合阻力面,采用最小成本路径方法共计提取 36 条生态廊道,总长 916.87 km,集中分布在拉萨河干流四周,呈现与拉萨河流向相平行的两条平行走向(图 6)。其中一条走向贯穿流域上中下游,由东北向南延伸,东北部自嘉黎县麦地卡湿地,至南部达孜县巴嘎雪湿地;另一条走向由流

域中游至下游,由中部向西南延伸,廊道连接了林周县北部与林周县、堆龙德庆县南部,其中林周县北部为林周热振自然保护区,南部靠近拉鲁湿地。生态廊道作为物种在不同栖息地之间迁徙的桥梁,其宽度取决于受保护的物种类型及廊道主要功能,研究区的重点保护动物和鸟类的散布距离介于 15—1200 m 之间^[38],基于已有研究^[33]和阈值运算,生态廊道宽度设置为 1000 m。

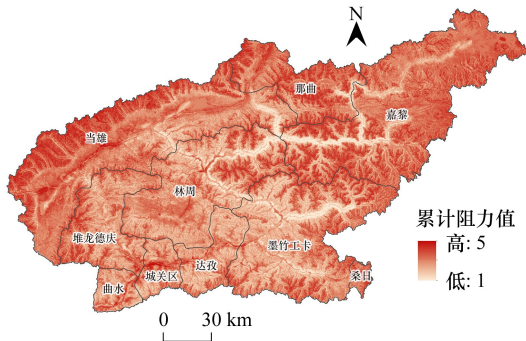


图 5 综合阻力面

Fig.5 Comprehensive resistance surface

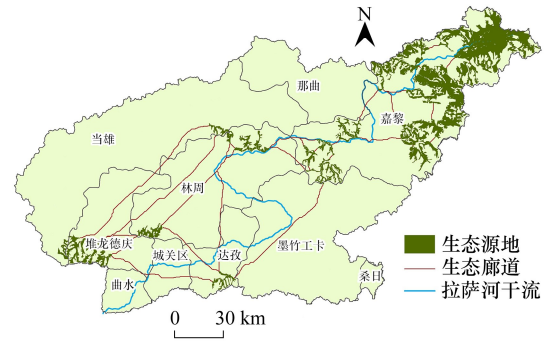


图 6 生态廊道空间格局

Fig.6 Spatial pattern of ecological corridors

3.4 生态安全格局

基于 Linkage Mapper 工具箱的 Barrier Mapper 分析生态廊道间的障碍点,获得半径分别为 250 m、500 m、750 m、1000 m 的改进得分以及相对于 LCD 改进得分百分比图层,最终选择 500 m 半径的障碍点图层(图 7)。图 7 改进得分图层,改进得分较高的区域即为高障碍节点,最高电流密度为 2.915;图 7 为相对于 LCD 改进得分百分比图层,高值区为低障碍节点,位于源地间隔距离较近的区域,但最高值为 0.062。低障碍节点分布较少,且电流密度较低,因此本研究的生态节点来自于改进得分图层获取的高障碍节点。基于自然断点法将电流密度分为五级,分别为 0—0.45, 0.45—0.88, 0.88—1.30, 1.30—1.84, >1.84, 大于 1.84 的等级为生态障碍点区域,共识别生态节点 13 个,主要分布在嘉黎县、达孜县、堆龙德庆县,其中裸地 7 个,占生态节点的 53.85%,中低覆盖度草地 3 个,占 23.08%,耕地 2 个,占 15.38%,疏林地 1 个,占 7.69%,均为生态功能较为薄弱的区域。将识别出的生态源地、生态廊道和生态节点相叠加,得到由生态网络形成的拉萨河流域生态安全格局(图 8)。

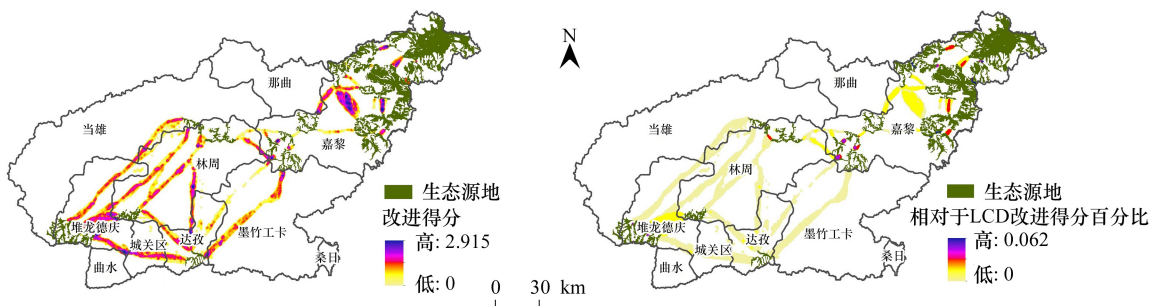


图 7 基于 Barrier Mapper 的生态障碍点分析

Fig.7 Ecological obstacles analysis based on Barrier Mapper

图中 LCD 表示最小成本距离 (Least-cost distance, LCD)

4 讨论与结论

4.1 讨论

在生态安全格局构建的过程中,组成生态网络的生态源地、生态廊道、生态节点的准确界定是研究的重

点,其中生态廊道的识别又是承接生态源地与生态节点的关键步骤。本研究通过评估拉萨河流域主要生态系统服务功能的重要性,结合研究区自然保护地的空间验证,开展生态源地的识别。阻力面的构建考虑了地形背景因素和可达性等人因因素,阻力因子没有进行简单的等权叠加而是基于熵权法计算权重,定性与定量的结合提高了综合阻力面的科学性和准确性。基于最小累积阻力模型,计算生态源地通过综合阻力面的最小成本距离,提取生态廊道。基于电路理论对比分析高障碍点和低障碍点,识别生态节点。Linkage Mapper 工具箱实现最小累积阻力模型和电路理论的整合,自动剔除重复廊道,实现不同廊道宽度下的高效迭代运算,基于电流密度定量筛选生态障碍点,高效提取生态廊道和生态节点。本研究构建的生态网络贯穿拉萨河流域的上中下游,与已有研究^[28]划分的拉萨河环境功能区相对应,包括流域上游以湿地、冰川保护为主的自然过程主导区,流域中游关注土地沙化的生态修复区,流域下游以河谷沙化治理为主的人类活动影响区,验证了本研究生态安全格局构建的合理性。

研究筛选了 20 个斑块作为生态源地,涵盖了拉萨河流域内巴嘎雪湿地雅鲁藏布江中游河谷黑颈鹤国家级自然保护区、拉鲁湿地国家级自然保护区、麦地卡湿地国家级自然保护区、拉萨市林周热振市级自然保护区、墨竹工卡墨竹朗杰村沙棘林市级自然保护区、曲水县才纳乡市级自然保护区等,植被类型多为湿地和草甸,生态系统服务重要性的等级较高。生态廊道是连通生态源地物质流、能量流和物种流的条带状区域,本研究提取的生态廊道与拉萨河干流平行呈“二”字型分布,结构上连通拉萨河上中下游的主要自然保护区,体现了拉萨河对于研究区的重要生态战略作用,流域生态质量的提升应关注以拉萨河为中心向外辐射的区域。生态节点为生态流中的重要节点,分析生态节点的土地覆被类型组成有利于生态规划进一步的调整优化^[15],拉萨河流域生态节点多集中分布在裸地、裸岩、低覆盖度草地等植被状况较差的区域,应在生态节点附近尽量减少人类活动干扰,促进植被的自然恢复。此外,不同物种对于栖息地及迁徙廊道的要求不同,阻力面的设置应有所区分,但由于不同物种迁徙习惯等生活习性数据获取的难度较大,有待进一步开展有针对性的生态廊道构建。

4.2 结论

本研究基于生态源地和综合阻力面利用最小成本路径方法提取生态廊道,形成以生态源地-生态廊道-生态节点组成的“线-面-点”结构生态网络,构建拉萨河流域生态安全格局。选择土地覆被类型、归一化植被指数、地形起伏度、坡度、距道路距离、距水体距离作为主要阻力因子,其中归一化植被指数、距水体距离对综合阻力面的影响较大。识别生态源地 20 个,生态源地总面积 2531.42 km²,占研究区总面积的 7.77%;生态廊道总长度 916.87 km,与拉萨河干流平行呈“二”字型分布;识别生态节点 13 个。研究结果有助于研究区生态网络的优化,为拉萨河流域生态保护与区域生态经济协调发展提供数据支持和科学参考,对国土空间规划具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 应凌霄,孔令桥,肖懿,欧阳志云. 生态安全及其评价方法研究进展. 生态学报, 2022, 42(5): 1679-1692.
- [2] 刘国华. 西南生态安全格局形成机制及演变机理. 生态学报, 2016, 36(22): 7088-7091.
- [3] 张琨,林乃峰,徐德琳,于丹丹,邹长新. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1057-1063.
- [4] 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.
- [5] 蒙古军,朱利凯,杨倩,毛熙彦. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. 生态学报, 2012, 32(21): 6755-6766.

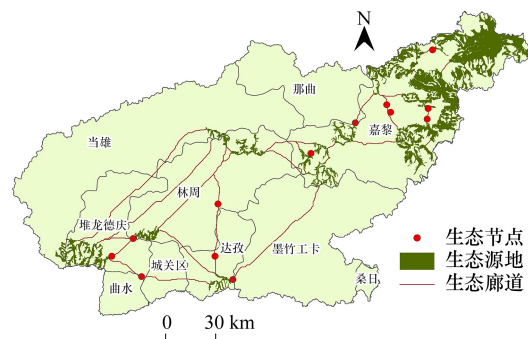


图 8 拉萨河流域生态安全格局

Fig.8 Ecological security patterns of Lhasa river basin

- [6] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1120-1127.
- [7] 范春苗, 王志泰, 汤娜, 邓国平. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建. 生态学报, 2022, 42(16): 6620-6632.
- [8] Peng J, Zhao H J, Liu Y X. Urban ecological corridors construction: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 23-30.
- [9] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 唐权, 郭春玲. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(1): 290-301.
- [10] 于梦林, 刘平辉, 朱传民. 基于 MCR 模型的宁波市生态安全网络构建. 水土保持通报, 2022, 42(1): 217-224.
- [11] 王原, 何成, 刘荣国, 吴洪斌, 陈骁强. 宁夏沙坡头国家自然保护区鸟类景观生态安全格局构建. 生态学报, 2017, 37(16): 5531-5541.
- [12] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.
- [13] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 李沐寒. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4363-4372.
- [14] 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. 生态科学, 2022, 41(2): 227-236.
- [15] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 徐凯恒, 朱满乐, 刘路云. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究. 生态学报, 2022, 42(7): 2995-3009.
- [16] Cao Y, Yang R, Carver S. Linking wilderness mapping and connectivity modelling: a methodological framework for wildland network planning. *Biological Conservation*, 2020, 251: 108679.
- [17] Closset-Kopp D, Wasof S, Decocq G. Using process-based indicator species to evaluate ecological corridors in fragmented landscapes. *Biological Conservation*, 2016, 201: 152-159.
- [18] Sun Y X, Liu S L, Dong Y H, An Y, Shi F N, Dong S K, Liu G H. Spatio-temporal evolution scenarios and the coupling analysis of ecosystem services with land use change in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 681: 211-225.
- [19] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [20] 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.
- [21] Xiao S C, Wu W J, Guo J, Ou M H, Puepke S G, Ou W X, Tao Y. An evaluation framework for designing ecological security patterns and prioritizing ecological corridors: application in Jiangsu Province, China. *Landscape Ecology*, 2020, 35(11): 2517-2534.
- [22] 王晓玉, 陈甜倩, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于地类边界分析的江苏省生态安全格局构建. 生态学报, 2020, 40(10): 3375-3384.
- [23] 薛强, 路路, 牛韧, 张晓婧, 杜文强. 基于地质灾害敏感性的生态安全格局关键区识别与修复——以济南市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 9050-9063.
- [24] Keeley A T H, Beier P, Gagnon J W. Estimating landscape resistance from habitat suitability: effects of data source and nonlinearities. *Landscape Ecology*, 2016, 31(9): 2151-2162.
- [25] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [26] 王正伟, 王宏卫, 杨胜天, 刘勤, 高一薄, 衡嘉尧, 张惠婷. 基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例. 生态学报, 2022, 42(1): 91-104.
- [27] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 韩兴国, 陈亚宁, 王克林, 周华坤, 冯晓明, 李宗善. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向. 生态学报, 2019, 39(20): 7333-7343.
- [28] 安宝晟, 姚檀栋, 郭燕红, 王伟财, 李久乐, 李新, 王忠彦. 拉萨河流域典型区域保护、修复、治理技术示范体系. 科学通报, 2021, 66(22): 2775-2784.
- [29] 卢慧婷, 黄琼中, 朱捷缘, 郑天晨, 严岩, 吴钢. 拉萨河流域生态系统类型和质量变化及其对生态系统服务的影响. 生态学报, 2018, 38(24): 8911-8918.
- [30] 方广玲, 香宝, 赵卫, 谢强, 刁兆岩, 迟文峰. 基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究. 水土保持学报, 2015, 29(3): 6-12.
- [31] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [32] 王帅兵, 李常斌, 杨林山, 杨文瑾. Budyko 方程和单作物系数法在区域蒸散发估算中的耦合及应用. 中国沙漠, 2015, 35(3): 683-689.
- [33] Huang L, He C L, Wang B. Study on the spatial changes concerning ecosystem services value in Lhasa River Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(5): 7827-7843.
- [34] 赵忠贺, 徐增让, 成升魁, 鲁春霞, 刘高焕. 西藏生态系统碳蓄积动态的土地利用/覆被变化归因分析. 自然资源学报, 2016, 31(5): 755-766.
- [35] 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. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [36] 王建林, 常天军, 李鹏, 成海宏, 方华丽. 西藏草地生态系统植被碳储量及其空间分布格局. 生态学报, 2009, 29(2): 931-938.
- [37] Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl A L, Rogers L, Bierbower W, Denu D, Douglass J, 2016. InVEST + VERSION + User's Guide. The Natural Capital Project. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- [38] 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.