

DOI: 10.20103/j.stxb.202210273050

马晓琳, 郭莎莎, 徐扬, 魏子谦, 高子婷, 于力, 侯建丽. 生态脆弱区生态安全格局构建研究. 生态学报, 2023, 43(22): 9500-9513.

Ma X L, Guo S S, Xu Y, Wei Z Q, Gao Z T, Yu L, Hou J L. Research on ecological security pattern construction in vulnerable ecological region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9500-9513.

生态脆弱区生态安全格局构建研究

马晓琳^{1,2}, 郭莎莎^{1,2,*}, 徐扬^{1,2}, 魏子谦^{1,2}, 高子婷^{1,2}, 于力^{1,2}, 侯建丽^{1,2}

1 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013

2 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013

摘要: 构建生态脆弱区生态安全格局对维护区域生态安全至关重要。传统的生态安全格局构建多以静态生态指示因子为基础指标, 对重要物种的迁徙过程考虑较少, 容易忽略生态服务和物种丰富度较低、但对物种迁徙具有重要意义的区域, 造成栖息地功能性丧失。因此, 以日喀则市为例, 基于生境适宜性评价进行生态源地识别, 从地形、土地利用等方面构建生态阻力评价指标体系, 应用最小累积阻力模型(MCR)识别生态廊道, 并将生态廊道与阻力脊线的交点作为生态节点, 进而结合生态服务空间特征构建生态安全格局。结果表明: (1) 生态源地以草地、未利用地、水域和林地为主, 面积 8.3 万 km², 主要集中在日喀则南部沟谷地区、中部雅江河谷地区和北部高山地区; (2) 生态廊道累积长达 5135 km, 主要沿河流或者山体呈网状分布; (3) 生态节点主要分布在南部边境地区, 用地类型以未利用地为主, 是未来需要加强保护的关键区域; (4) 建议构建“两屏—流域”的生态安全格局, 保障全市生态安全。该区域总面积 5.17 万 km², 约占市域总面积的 29%, 能够支持 12 种物种栖息及迁徙, 并分别保护了全域 72.0% 的水源涵养极重要区、69.9% 的土壤保持极重要区、57.5% 的防风固沙极重要区和 99.6% 的碳固定极重要区。生态廊道和生态系统服务相结合构建区域生态安全格局可为脆弱区生态系统和物种保护提供决策工具。

关键词: 生境适宜性评价; 生态安全格局; MaxEnt 模型; MCR 模型; 日喀则市

Research on ecological security pattern construction in vulnerable ecological region

MA Xiaolin^{1,2}, GUO Shasha^{1,2,*}, XU Yang^{1,2}, WEI Ziqian^{1,2}, GAO Ziting^{1,2}, YU Li^{1,2}, HOU Jianli^{1,2}

1 National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China

2 China Academy of Building Research, Beijing 100013, China

Abstract: The construction of ecological security pattern in vulnerable ecological region is essential to maintain regional ecological security. The traditional methods of constructing ecological security patterns mostly take static ecological indicators as the basic indexes and give less consideration to the migration processes of major species, which easily ignore areas with low ecological services and species abundance but important for species migration, resulting in functional loss of habitats. Therefore, taking Shigatse as an example, this paper identified ecological sources based on the evaluation of habitat suitability and constructed an index system for ecological resistance evaluation in terms of topography and land use. We used the minimum cumulative resistance model (MCR) to identify ecological corridors, took the intersection of ecological corridors and resistance ridges as ecological nodes, and then constructed an ecological security pattern by combining the spatial characteristics of ecological services. Results indicate that: (1) the ecological source of Shigatse covered an area of 82588 km², accounting for about 46% of its entire territory. It was mainly distributed in the southern gorge area, the central valley area of Yarlung Tsangpo River and the northern alpine area, with grassland, water, woodland

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802805)

收稿日期: 2022-10-27; 采用日期: 2023-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoshasha@cabr-jygh.com

and unused land as the main land types. (2) The cumulative length of ecological corridors was 5,135 km, which were distributed in a network, linking the city's important habitats closely, and were similar to the ecologically spatial distribution in the city. The corridors were mainly distributed along rivers and mountains. During the construction of corridors, attention should be paid to the greening of both sides of the water and the ecological protection of the mountains. (3) Ecological nodes are key points with weak ecological functions, and their protection should be strengthened to improve their connectivity. In this study, a total of 67 ecological nodes were identified, which were mainly distributed in the southern border area, mainly the unused land. (4) We proposed to build an ecological security pattern of "two screens, one watershed" to ensure the ecological security of Shigatse. Among them, "two screens" referred to the middle of the Himalayas ecological barrier area (MHEB) and the Gangdise-Nyainqentanglha Mountains ecological barrier area (GNEB), and "one watershed" referred to the middle and upper reaches of the Yarlung Tsangpo River (MUYT). The MHEB should give full play to the role of the overall ecological barrier, and focus on promoting the protection of wild animals and plants and the construction of protected areas. The GNEB should strengthen the conservation of water resources of the ecosystem and the protection of biodiversity functions. The MUYT should focus on the integrated management of land subject to erosion and desertification. With an area of 51,730 km², accounting for about 29% of the total Shigatse area, this area could support the habitat and migration of 12 species and protect 72.0% of the critical area for water conservation, 69.9% of the critical area for soil conservation, 57.5% of the critical area for wind and sand control, and 99.6% of the critical area for carbon fixation. The use of ecological corridors and ecosystem services to construct regional ecological security patterns can provide decision-making tools for ecosystem and species conservation in vulnerable areas.

Key Words: habitat suitability evaluation; ecological security pattern; MaxEnt model; minimum cumulative resistance model; Shigatse

生态安全作为国家安全体系的重要组成部分,对保持其他安全具有基础性意义^[1-2]。随着我国城镇化和国民经济的快速发展,土地沙化、盐渍化、石漠化、水土流失、森林草地湿地碳汇降低、生物多样性丧失等问题逐步显现,严重影响了区域生态安全。青藏高原被誉为“世界屋脊”“亚洲水塔”,是我国重要的生态安全屏障区、全球生物多样性热点地区,也是全球重要的“气候调节器”,对维护我国生态安全具有特殊重要地位。我国近年来对青藏高原生态系统保护高度重视,明确提出做好青藏高原生态环境保护工作,要坚持生态保护第一,坚持山水林田湖草沙冰系统治理,严守生态安全红线,加强青藏高原生物多样性保护,坚决扛起扛好巩固青藏高原生态安全屏障的重大政治责任,确保生态环境良好,确保国家生态安全,为推动新时代西藏高质量发展提供生态环境基础支撑和关键保障。特别是青藏高原生态系统脆弱,受水热条件限制,遭到破坏后恢复能力较弱,以系统整体保护和治理的思路构建生态安全格局将是提升生态保护效果,缓解脆弱生态系统退化的重要手段。

生态安全格局是综合性的生态保护与修复空间决策,包括生态红线、自然保护地、生态修复区、生态脆弱区等生态保护空间。目前,学者们主要从土地利用优化^[3]、生态系统服务功能提升^[4]和社会公平^[5]等视角,采用生态重要性评价^[6]、景观格局指数^[7]、综合指标体系^[8]等方法,对城市^[9-10]、城市群^[11-13]、省域^[14]、流域^[15]、采矿区^[16-17]等不同空间尺度的生态安全格局进行了研究。在构建生态安全格局过程中,需要选择生态指示因子用于识别生态保护价值的空间格局,例如生态系统服务功能^[18]、植被结构^[19-20]、生物多样性^[21]等都有广泛应用。但完全以指示因子的高低判定生态安全格局的空间分布容易出现以下问题,第一,生态服务功能具有供给和接收的区域差异特征,选择生态服务的高值区构建生态安全格局易于忽略供给源头区的生态价值。第二,大量旗舰物种具有迁徙特性,重要的廊道区域是联接栖息地斑块的重点,而这些区域并不一定具有优质的生态本底条件,如果仅以栖息地质量为指示因子,易于造成栖息地隔离,难以保证区域生态安全。在生态安全格局理论产生之初就强调水平生态过程的重要性^[22],即需要通过廊道等结构维护景观中自然斑

块的联系^[23],这一理论是对麦克哈格仅依赖垂直生态过程的“千层饼”模式的补充。此后,学者们越来越多地认识到了生物廊道的重要性,并逐渐丰富了廊道构建理论、方法和模型^[22-25]。早期的廊道识别多采用野外观测法,但该方法数据量大,耗时长^[24]。随着地理信息技术的发展,图论^[25]、阻力模型^[26]、电路理论^[27]等理论被广泛应用于廊道识别研究,使得“源地-廊道-节点”相结合的方式^[28]成为廊道识别的主流范式,有效促进了大尺度廊道识别的研究进展。因此,在识别生态服务功能的基础上,采用“源地-廊道-节点”模式识别生物廊道重要区,对完善生态安全格局的构建至关重要。

日喀则作为青藏高原的核心地域,独特的自然环境孕育了众多特有和珍稀的动植物物种,保护生物资源对维护生态安全格局意义重大,更适用于从生物多样性视角进行生态安全格局的构建。因此,本文选取日喀则市为研究对象,基于生境适宜性评价进行生态源地识别,从地形、土地利用等方面构建生态源地阻力评价指标体系,应用最小累积阻力模型识别生态廊道,并将生态廊道与阻力脊线的交点作为生态节点,进而结合生态服务的空间特征构建日喀则市生态安全格局,以期完善生态脆弱区生态安全格局的构建提供借鉴。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

日喀则市位于我国西藏西南部,对外与尼泊尔、印度、不丹三国接壤,国境线长 1753 km;西衔阿里地区、北靠那曲市、东邻拉萨市与山南市,距西藏首府拉萨 277 km(图 1)。全市地处喜马拉雅山中段和冈底斯-念青唐古拉山中段之间,其间分布有藏南高原和雅鲁藏布江流域,整体呈现西高东低、南北高中间低的地势特征。地貌大致可分为喜马拉雅山区、雅鲁藏布江中游河谷区、南羌塘山原湖盆区、藏南山原湖盆宽谷区等 4 个区。海拔介于 1662—8848.86 m 之间,平均海拔达到 4000 m 以上。气候类型从西向东由高原亚寒带过渡到温带,总体呈现西部严寒干燥、东部温暖湿润的特点。用地类型以草地、陆地水域、林地和湿地等生态用地为主,约占国土空间总面积的 89%。复杂多样的地貌、气候孕育了丰富而又独特的生物多样性,野生动植物资源丰富,是我国生物多样性最为典型的区域之一。



图 1 日喀则市区位图

Fig.1 Location map of Shigatse

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 物种选择与位置信息获取

根据《西藏自治区地图集》中显示的西藏自治区国家一级野生动物分布情况,选取分布于日喀则市的长尾叶猴(*Semnopithecus entellus*)、雪豹(*Uncia uncia* 或 *Panthera uncia*)、豹(*Panthera pardus*)、虎(*Panthera tigris*)、藏羚羊(*Pantholops hodgsonii*)、西藏野驴(*Equus kiang*)、喜马拉雅塔尔羊(*Hemitragus jemlahicus*)、黑颈鹤(*Grus nigricollis*)、金雕(*Aquila chrysaetos*)、红胸角雉(*Tragopan satyra*)、胡兀鹫(*Gypaetus barbatus*)、白尾梢虹雉(*Lophophorus sclateri*)等 12 种国家一级野生动物作为研究对象。通过全球生物多样性信息网络(GBIF, www.gbif.org/)获取所需物种在青藏高原附近的位置数据 5254 个(图 2)。为避免模型过拟合,应用缓冲区分析法对物种位置数据进行校对和筛选,排除空间关联性较大的分布点^[29]。由于所选环境变量的空间分辨率为 30 arc-seconds(约 1 km²),因此以 0.5 km 为缓冲半径构建缓冲区,当 2 个分布点之间的距离小于 1 km 时,仅保留其中 1 个分布点,最终获得分布点 3915 个(图 2)。

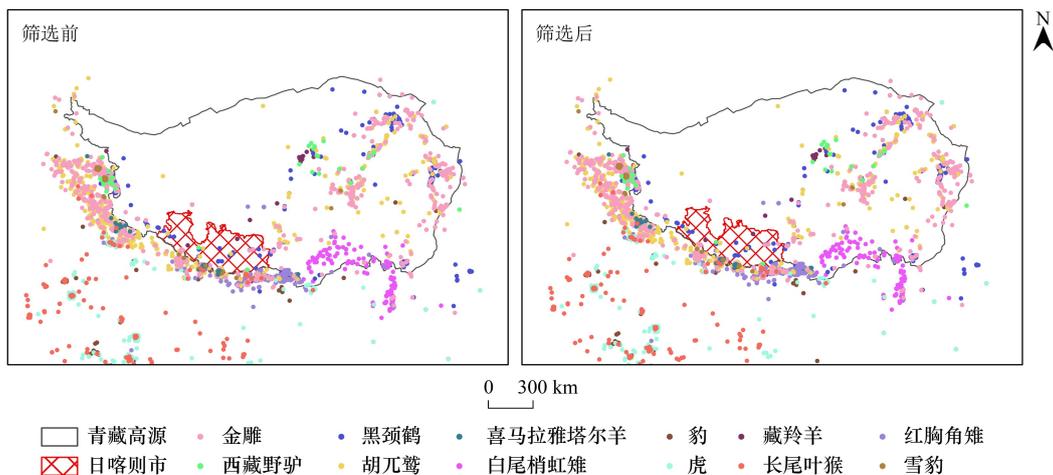


图 2 青藏高原附近物种分布样本点

Fig.2 Species sample sites near the Qinghai-Tibet Plateau

1.2.2 环境变量数据来源与筛选

选取气候、地形、土地利用三方面的环境因子进行物种生境适宜性分析。气候因子来源于 WorldClim 气候数据库(www.worldclim.org/),数据是以全球气象站点数据为基础,通过薄板样条函数插值而成的全球气候数据集,空间分辨率为 30 arc-seconds。地形因子中,海拔数据同样来源于 WorldClim,由 SRTM 高程数据生产而得,空间分辨率为 30 arc-seconds;坡度和坡向数据则是根据海拔变量应用 ArcGIS 软件的三维分析功能计算而得。土地利用/覆被数据来源于欧空局(ESA)提供的全球土地覆盖数据集(maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/),时间尺度为 2019 年,空间分辨率为 300 m。为确保不同来源的数据在空间上能够匹配,需将上述环境数据进行标准化处理,统一其坐标系、分辨率和空间位置。

由于模型预测精度对环境变量之间的强相关性很敏感,因此需要对环境变量进行相关性分析,排除相关性较强且对日喀则国家一级野生动物栖息地选择贡献率较高的环境变量。最终选取 Bio1—Bio4、Bio12—Bio15、Bio18—Bio19 等 10 个气候因子,海拔高度、坡度、坡向等 3 个地形因子以及土地利用/覆被这 1 个土地利用因子,共计 14 个因子,作为分析日喀则国家一级野生动物栖息地分布概率的评价指标(表 1)。

1.2.3 其他数据来源

生态系统服务数据来源于科学数据银行提供的 2010 年中国生态系统服务空间数据集^[30](www.sciencedb.cn/dataSet/handle/458),选取其土壤保持、水源涵养、防风固沙、碳固定 4 种生态系统服务功能,空间分辨率为 250 m。

表 1 日喀则国家一级野生动物生境适宜性分布评价指标体系

Table 1 The index system of the habitat suitability evaluation of the national first-class wild animals in Shigatse

一级类 Class I	二级类 Class II	指标含义 Indicator meaning
气候因子 Climate factors	Bio1 年平均温度	反映平均温度及其变异幅度
	Bio2 平均日较差	反映温差特点
	Bio3 等温性	反映温差特点
	Bio4 温度季节性变化标准差	反映平均温度及其变异幅度
	Bio12 年降水量	反映降雨量及季节性分布
	Bio13 最湿月降水量	反映极端水分条件
	Bio14 最干月降水量	反映极端水分条件
	Bio15 降水量变异系数	反映降雨量及季节性分布
	Bio18 最暖季度降水量	反映水热是否同步
地形因子 Terrain factors	Bio19 最冷季度降水量	反映水热是否同步
	海拔高度	反映海拔差异
	坡度	反映地形特征
土地利用因子 Land use factor	坡向	反映地形特征
	土地利用/覆被数据	反映植被覆盖和人类活动的影响

生态阻力面数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn/),空间分辨率均为 1 km。其中,土地利用数据由中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)裁剪而得;高程数据由中国海拔高度(DEM)空间分布数据裁剪而得;坡度数据由高程数据计算而得。

1.3 研究方法

1.3.1 生态服务关键区识别

从生态系统服务功能角度出发,以生态系统服务功能累计价值的 50%、75%、90%为阈值,对土壤保持、防风固沙、水源涵养、碳固定 4 种生态系统服务功能数据进行重要性分级,即将栅格值降序排列后,功能价值累计百分比达到 50%的区域归类为极重要区域,累计百分比为 50%—75%的区域归类为重要区域,累计百分比为 75%—90%的区域归类为中等重要区域,累计百分比在 90%以上的区域归类为一般区域。其中,生态系统服务功能极重要区域的生态价值最高,是生态安全格局中需要重点关注的关键区域。

1.3.2 生物多样性关键区识别

采用生境适宜性评价法识别生物多样性关键区。近年来,3S 技术成为评价物种栖息地适宜性的主流技术,其中,以生态位为原理的最大熵(MaxEnt)模型的应用最为广泛。早在 2008 年,MaxEnt 模型就被建议可应用于物种地理分布预测^[31—32]。与其他模型相比,该模型具有预测效果更好、准确性更高的优势,且更适用于样本量较少情况下的预测^[29],在野生动物生境适宜性研究中应用广泛^[32—34]。因此,本研究选取 MaxEnt 模型对长尾叶猴等 12 种野生动物的分布区进行模拟。模型运行时随机抽取 75%的物种分布点作为训练数据集,剩余 25%的物种分布点作为测试数据集。为保证模型预测的稳定性,对模型进行 10 次交叉验证。采用受试者工作特征曲线(ROC)及曲线下的面积(AUC)对模型进行精度评价。作为模型评价的指标之一,AUC 值因不受阈值影响,具有较高的可靠性。当测试数据集和验证数据集的 AUC 值高于 0.8 时,表明该模型预测效果良好。

1.3.3 生态安全空间格局识别

生态源地是指具有较高生态价值和较强生态功能的地块,对维持生态系统稳定性意义重大^[35]。综合考虑研究区生态安全的重要性,生态服务包括防风固沙、水源涵养、土壤保持、碳固定,选取集中连片的极重要区域作为生态源地。生物多样性维护以雪豹、藏羚羊、藏野驴、黑颈鹤、金雕等 5 种具有迁徙习性的动物为指示因子,在物种生境适宜性评价的基础上,分别选取青藏高原及其周边地区集中成片的、面积最大的 100 个物种生境适宜区作为生态源地的补充。

生态阻力面是构建生态安全格局的基础要素,描述了生物在生态源地之间迁徙的难易程度,反映出生物对生态过程的水平抗性^[4]。土地覆被类型、地形地貌特征对生态过程物质流动起到关键作用。参照已有研究成果^[12],结合研究区特殊的地理条件,从地形和土地覆被两方面构建生物迁徙阻力面,最终选取土地利用类型、高程和坡度等 3 个阻力因子指标。将各评价指标按生态安全水平等级由高到低划分为 5 级,各生态评价阻力因子赋予相应权重。在阻力值选取上,目前尚未形成统一的标准,多以选取具有较大差异的数列为主,例如,李航鹤等人^[20]对土地利用、高程等分别赋予了 1、2、3、4 的阻力值;李政等人^[35]以 1、3、5、7、9 为阻力值;赵伟等人^[12]以 5、15、50、75、100 为阻力值;肖扬等人^[4]以 0、30、50、100、300、500 为阻力值。因此,本研究在此基础上选取 5、10、30、45、60 的数列,并结合各类生物生境选择偏好对各阻力因子进行分级赋值(表 2)。

表 2 日喀则市生态源地阻力评价指标体系

Table 2 The index system of ecological source resistance evaluation in Shigatse

阻力因子 Resistance factors		阻力值 Resistance values			权重 Weights
		雪豹(食肉动物) Snow leopard (carnivore)	藏羚羊、西藏野驴 (有蹄类动物) Tibetan antelope, Tibetan wild ass (ungulates)	黑颈鹤、金雕(候鸟) Black-necked crane, golden eagle (migratory bird)	
土地利用类型 Land use types	森林、水体	30	30	5	0.5
	灌丛、草地、湿地	5	5	10	
	耕地、园地	45	45	30	
	荒漠、冰川及永久积雪	10	10	45	
高程 Elevations/m	不透水层	60	60	60	0.3
	< 4302	60	5	5	
	4302—4775	45	10	10	
	4775—5145	30	30	30	
	5145—5547	10	45	45	
坡度 Slopes/(°)	>5547	5	60	60	0.2
	< 2°	60	5	5	
	2°—6°	45	10	10	
	6°—15°	30	30	30	
	15°—25°	10	45	45	
	> 25°	5	60	60	

生态廊道是生态源地间相互联系、进行物质和能量流动的最佳路径^[36],是增强生态系统连通性的关键生态组分,对维护区域生态系统功能完整性意义重大^[37]。以 ArcGIS 为空间分析软件平台,利用生态源地确定生态质心,以综合阻力面为权重,采用最小累积阻力模型(MCR)分别生成 5 种生物的迁徙廊道,即各生物的生态质心之间的最小成本路径,将不同生物迁徙路径进行叠加,剔除重复路径,并用研究区范围进行裁剪,最终得到研究区范围内潜在的生态廊道。

生态节点是生态功能最为薄弱的区域,在区域生态安全格局中处于战略地位,加强生态节点保护有助于提高生态系统的连通性。以生态廊道与生态阻力“脊线”的交点为生态节点,采用 ArcGIS 水文分析、邻域分析和重分类等功能识别生态阻力面的“脊线”,并通过相交工具提取交点,即为生态节点。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务空间特征

结果显示,全市保持土壤总重量 172 亿 t/a,其中土壤保持极重要区域保持土壤 86 亿 t/a,面积 2.6 万 km²,占全市总面积的 14.2%,空间分布较为广泛;固沙总重量 11 亿 t/a,其中防风固沙极重要区域固定沙粒

6 亿 t/a, 面积 1.6 万 km², 占全市总面积的 8.8%, 主要分布在全市西部、中部和南部地区; 保持水资源体积 994 亿 m³/a, 其中水源涵养极重要区域保持水资源 497 亿 m³/a, 面积 1.2 万 km², 占全市总面积的 6.6%, 以南部地区的分布最为集中; 固碳总重量 341 万 t/a, 其中碳固定极重要区域固定碳 170 万 t/a, 面积 595 km², 占全市总面积的 0.33%, 集中分布在南部沟谷地区(图 3)。

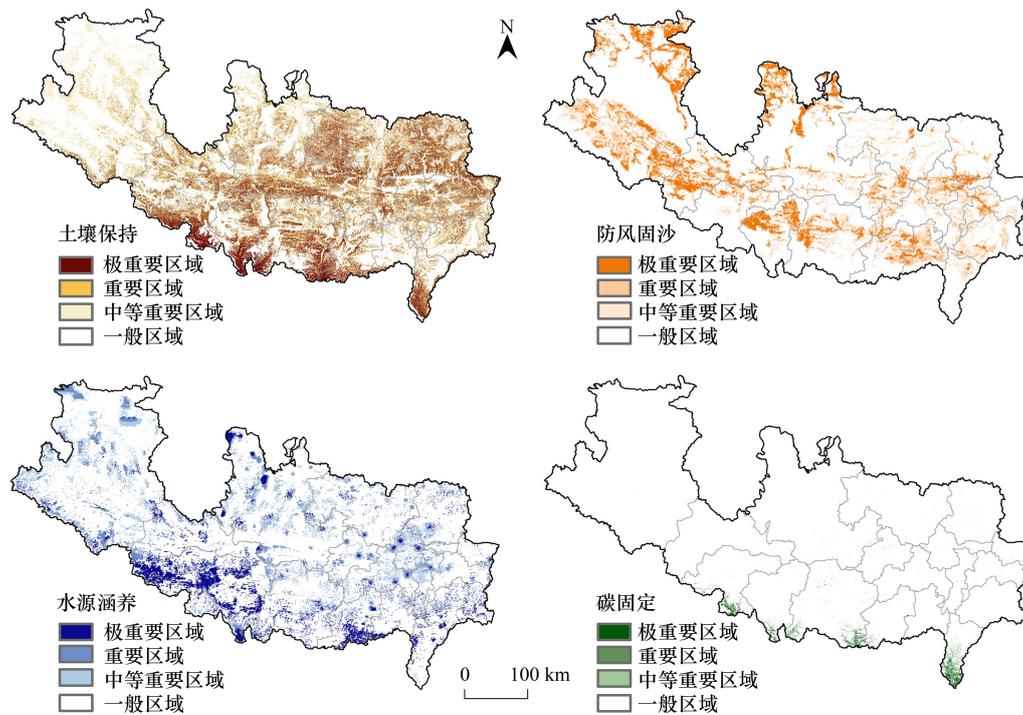


图 3 日喀则市生态系统服务功能重要性空间分布图

Fig.3 The distribution of importance of ecosystem services in Shigatse

2.2 物种生境适宜性分布特征

2.2.1 模型预测结果检验

经 ROC 验证, 12 个模型的训练集 AUC 和测试集 AUC 均在 0.8 以上(表 3), 说明所建模型的预测精度良好。

表 3 模型精度检验结果

Table 3 Test results of model accuracy

物种名称 Species name	长尾叶猴 Langur	雪豹 Snow leopard	豹 Leopard	虎 Tiger	藏羚羊 Tibetan antelope	西藏野驴 Tibetan wild ass
测试集 AUC Test AUC	0.964	0.997	0.933	0.961	0.841	0.924
训练集 AUC Train AUC	0.904	0.989	0.932	0.971	0.983	0.981
物种名称 Species name	喜马拉雅塔尔羊 Himalayan tahr	黑颈鹤 Black-necked crane	金雕 golden eagle	胡兀鹫 lammergeier	红胸角雉 Red-breasted hornbill	白尾梢虹雉 White-tailed pheasant
测试集 AUC Test AUC	0.988	0.945	0.920	0.901	0.969	0.971
训练集 AUC Train AUC	0.992	0.948	0.913	0.906	0.969	0.979

AUG: 受试者工作特征曲线(ROC)下方的面积 Area under curve

2.2.2 物种生境适宜性分布

(1) 单一物种生境适宜性分布

结合已有文献记录,将 MaxEnt 运算结果划分为非适生区、低适生区、中适生区和高适生区 4 个适生等级,设定阈值分别为 0.1、0.3 和 0.6,即适生指数高于 0.6 的区域为高适生区,0.3—0.6 之间的为中适生区,0.1—0.3 之间的为低适生区,低于 0.1 的为非适生区,最终得到日喀则国家一级野生保护动物的生境适宜性分布图(图 4)。其中,长尾叶猴的适生区以低适生区为主,且零星分布于日喀则中部、北部和西部区县;雪豹的适生区主要分布在萨嘎、吉隆、聂拉木、定日、定结、岗巴和亚东县南部以及仲巴县全域的大部分地区,高适生区主要分布于萨嘎、吉隆、聂拉木、定日和定结等县的南部边境地区;豹的适生区较少,且以低适生区为主,主要分布于聂拉木、定日、定结和亚东等县;虎的适生区非常小,仅零星分布于南部边境地区;藏羚羊的适生区范围较大,高适生区主要分布于仲巴县以及谢通门—拉孜—萨迦—岗巴—亚东一线;西藏野驴的适生区以低适生区为主,主要分布在仲巴县北部;喜马拉雅塔尔羊的适生区主要分布于日喀则的西部和南部地区,高适生区集中分布于吉隆、聂拉木、定日等县的南部;黑颈鹤的适生区面积相对较大,高适生区主要分布于雅江河谷地区,仲巴县南部、北部地区,定日县中部,以及亚东县南部;金雕的适生区面积较大,主要分布在日喀则西部、南部和

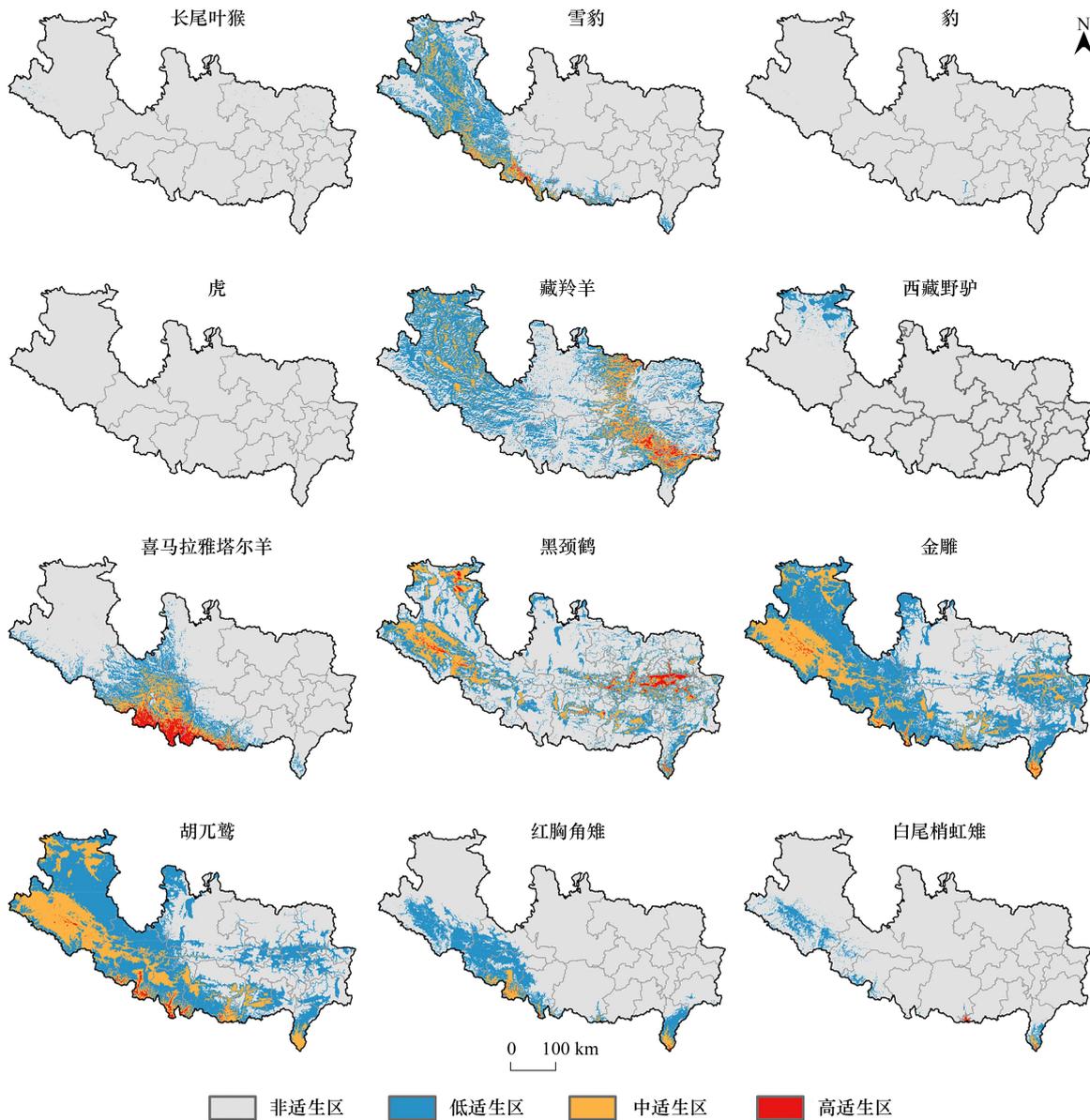


图 4 日喀则市单一物种生境适宜性评价结果
Fig.4 Habitat suitability distribution of each species in Shigatse

东部地区,高适生区集中分布于五条沟地区以及仲巴县南部;胡兀鹫的适生区分布与金雕较为相似,但高适生区面积更大,且更为集中;红胸角雉的适生区主要分布于日喀则南部的边境县,高适生区主要分布于吉隆、聂拉木、亚东等县的南部;白尾梢虹雉的适生区主要分布于日喀则南部边境地区,高适生区集中分布于定结县和亚东县南部。

总体而言,藏羚羊、喜马拉雅塔尔羊、雪豹、黑颈鹤、胡兀鹫、金雕等野生动物的适生区分布较广,而研究选取的其他国家一级野生动物的适生区面积相对较小。

(2) 物种生境适宜性综合分布

综合 12 个物种生境适宜性评价结果,按照等权重原则确定日喀则国家一级野生动物生境综合适宜性(图 5)。结果表明,日喀则市物种生境适宜性较高的地区多分布在日喀则南部的边境县,其次为雅江河谷地区。这些地区可成为生物多样性保护的优先区域,未来应分类施策、重点保护。其中,在边境 9 县,重点建立自然保护区间生物廊道和跨国界保护区;在雅江河谷地区,加强沼泽湿地及珍稀候鸟迁徙地繁殖地自然保护区建设。

2.3 重要物种迁徙源地-廊道-节点特征

2.3.1 迁徙源地识别

位于日喀则市内的物种迁徙源地面积 72534 km²,占全市国土面积的 40%左右(图 6)。其中,适宜黑颈鹤分布的源地面积 20827 km²,适宜金雕分布的源地面积 34343 km²,适宜藏羚羊分布的源地面积 26527 km²,适宜西藏野驴分布的源地面积 45 km²,适宜雪豹分布的源地面积 16343 km²,分别占适生区总面积的 28.71%、47.35%、36.57%、0.06%和 22.53%。在市域范围内,物种迁徙源地主要集中在仲巴县、拉孜县、桑珠孜区、萨迦县、亚东县大部分区域,定结县、岗巴县北部,萨嘎县、吉隆县、聂拉木县、康马县、白朗县、南木林县南部,谢通门县、江孜县西部,定日县中部和南部,以及昂仁县、仁布县的局部地区。总体上看,物种迁徙源地在日喀则西部和南部比较集中,仅仲巴县一县的源地面积就达到全市源地总面积的四成以上(43.98%),吉隆县、谢通门县、萨嘎县和萨迦县的物种迁徙源地占比在 5%—7%之间,其他县区源地面积占比不足 5%。用地类型以草地、未利用地、水域和林地为主,分别占源地总面积的 44.65%、32.97%、10.66%和 10.19%。

2.3.2 生态阻力面构建

日喀则生态阻力面结果如图 7 所示。候鸟的生态阻力面以中阻力为主,占全市面积的 45.69%,在全市分散分布于低阻力外围;其次为低阻力面,占全市的 34.84%,主要分布在中部雅江河谷地区和南部林区,高阻力面面积最小,占全市的 19.48%,主要分布在市域北部以及市域南部的边境地带。有蹄类动物的生态阻力面以中、低阻力为主,分别占全市面积的 55.09%和 44.64%;高阻力面面积仅占全市面积的 0.26%,主要分布在萨嘎县、岗巴县和定结县境内。雪豹的生态阻力面以低阻力为主,占全市面积的 88.98%,其次为中阻力,占全市的 10.62%,主要分布在雅江河谷、南部沟谷和北部河流湖泊地带;最后为高阻力,仅占全市面积的 0.40%,主要分布在一江两河流域和萨嘎县北部地区。

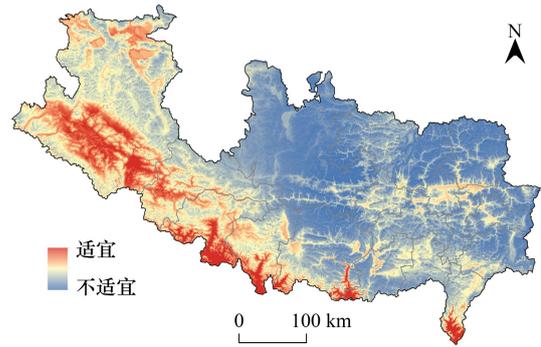


图 5 日喀则市国家一级野生动物生境适宜性综合评价结果
Fig.5 The comprehensive evaluation results of the national first-class wildlife habitat suitability in Shigatse

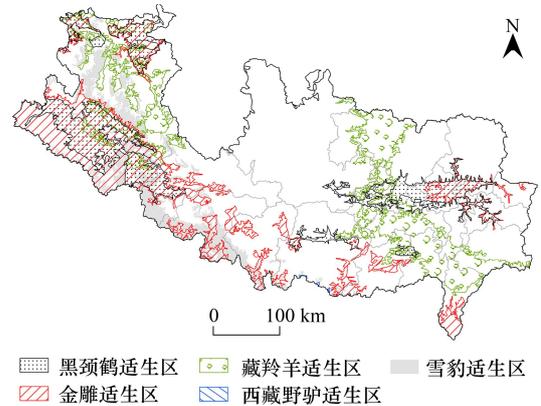


图 6 日喀则市重要物种迁徙源地分布格局
Fig.6 Distribution pattern of main species sources in Shigatse

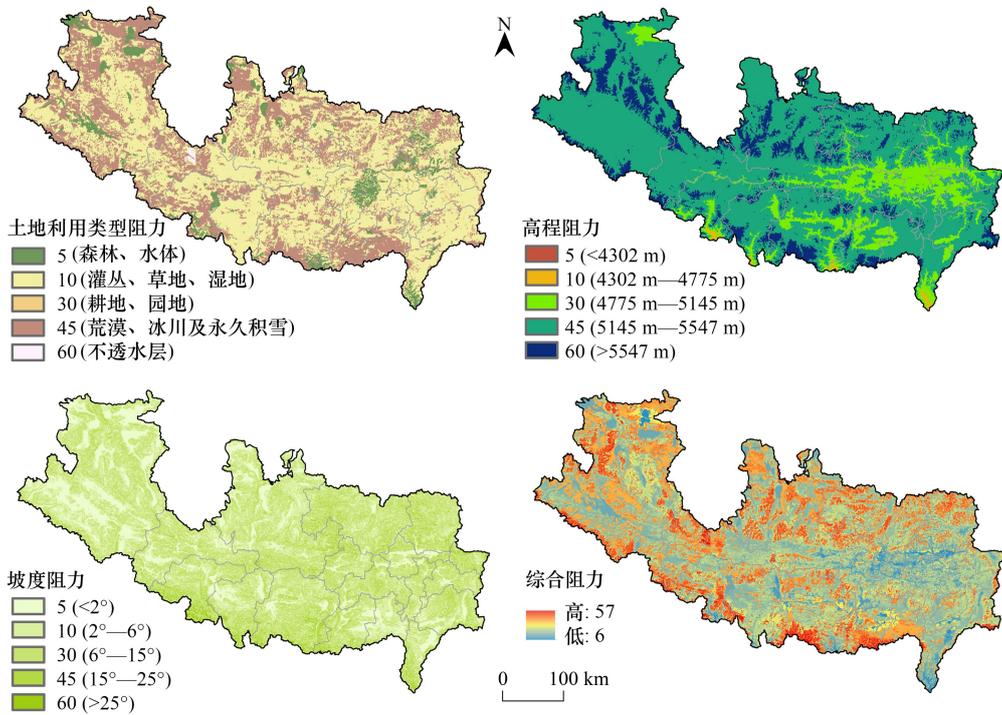


图7 日喀则市重要物种迁徙阻力值分布图(以候鸟为例)

Fig.7 The distribution of migration resistance of main species in Shigatse (taking migratory birds as an example)

2.3.3 生态廊道提取

日喀则市生态廊道累积长达 5135 km(图 8)。其中,适宜黑颈鹤迁徙的廊道长 852 km,适宜金雕迁徙的廊道长 1015 km,适宜藏羚羊迁徙的廊道长 1331 km,适宜西藏野驴迁徙的廊道长 427 km,适宜雪豹迁徙的廊道长 1589 km,分别占综合廊道的 16.59%、19.77%、25.93%、8.32%和 30.94%。从空间格局来看,全市生态廊道呈网状分布,将全市重要生境紧密联系起来,这与市内生态本底空间分布特征较为相似。生态廊道主要是沿河流或者山体分布,因此在构建这类廊道时,需要注重对水体两岸的绿化,通过水土保持、流域治理等生态修复手段增强廊道连通功能的稳定性,同时还要注重山体生态保护,禁止违法矿山开采,遏制对物种栖息地

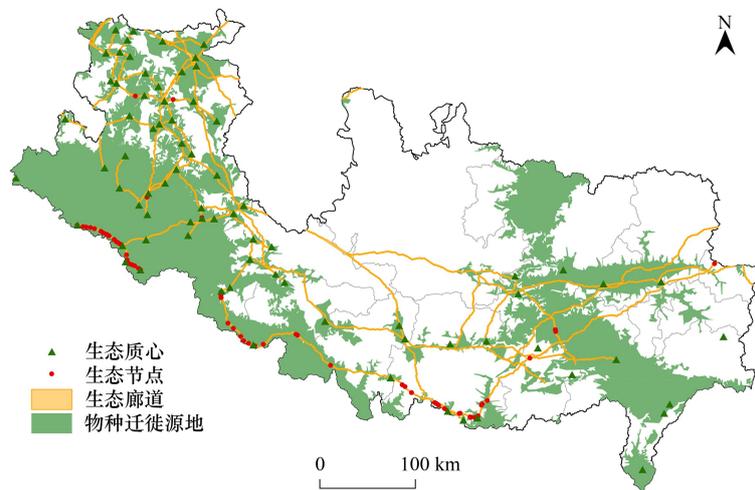


图8 日喀则市重要物种迁徙“源地-廊道-节点”生态安全网络

Fig.8 The “source-corridor-node” ecological security grid of major species migration in Shigatse

的进一步侵蚀。

2.3.4 生态节点识别

根据廊道和生态阻力脊线的分布情况,共得到 67 个生态节点(图 8)。用地类型以未利用地为主,约占生态节点总数的一半(49.25%),其次为水域、草地和林地,分别占生态节点总数的 19.40%、17.91%和 13.43%,尚未有节点分布在建设用地上。从空间布局上看,生态节点分布较为广泛,其中南部的生态廊道上节点分布较为集中。

2.4 生态安全格局判别

选取集中连片的生态系统服务极重要区域、物种高适生区域作为生态源地,最终识别生态源地面积 82588 km²,约占全市国土面积的 46%左右,主要分布在南部沟谷地区、中部雅江河谷地区和北部高山地区,涉及仲巴县、拉孜县、桑珠孜区、萨迦县、岗巴县、亚东县的大部分区域以及其他县的部分地区,用地类型以草地、未利用地、水域和林地为主(图 9)。生态源地外生态廊道面积为 1722 km²,仅占原生态源地面积的 2%,但加强这些廊道的保护能有效提升西部和中部源地之间、以及北部和东部源地向外连通的便利性,保证多种物种正常迁徙,对生态系统连通性的增强具有重要意义。生态节点处于生态廊道的薄弱区,是容易造成生态廊道连通性降低的战略节点,需要加强保护。

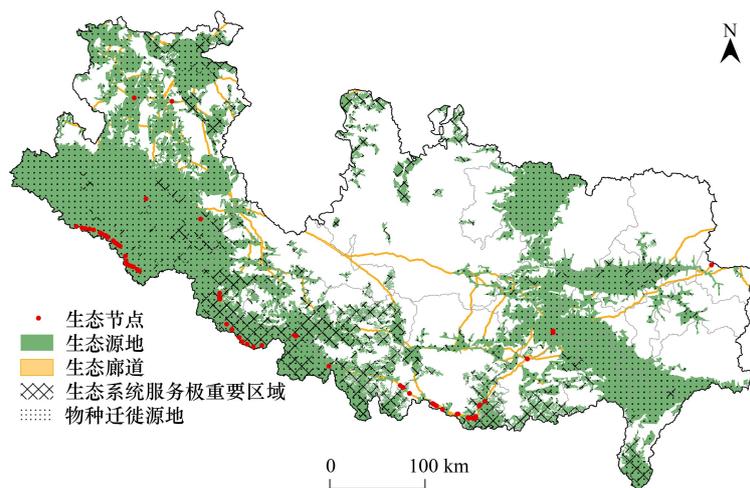


图 9 日喀则市国土空间生态安全格局

Fig.9 The ecological security pattern of Shigatse

基于自治区主体功能区划、生态安全屏障规划等已有规划中对日喀则市的生态保护要求,并结合现有山水脉络,对上述市域生态网络格局进行修正,最终构建“两屏、一流域”的生态安全格局(图 10)。“两屏”包括南部的喜马拉雅山中段生态屏障区和北部的冈底斯—念青唐古拉山生态屏障区。喜马拉雅山中段生态屏障区应充分发挥整体生态屏障作用,重点推进野生动植物保护及保护区建设,提高管护能力、科研与监测水平,保护生物多样性;实施天然草地保护、游牧民定居、传统能源替代、水土流失治理和防沙治沙,提高地表植被覆盖度;加快珠穆朗玛峰国家级自然保护区建设国家公园的进程。冈底斯—念青唐古拉山生态屏障区加强生态系统水源涵养和生物多样性功能的保护,以草地生态建设为核心,加强水土流失与荒漠化治理、农田和林地建设,恢复草地生态系统;提升扎日南木措湿地、仁搭格架地热间歇喷泉群等自然保护区的治理与保护水平;引导高海拔区域、生态脆弱区域人口有序转移,妥善发展生态牧业,实施轮牧制。“一流域”指雅鲁藏布江中上游流域。以全流域为单元,加强整体保护并开展生态修复。重点开展水土流失治理和沙化土地综合整治,通过退耕还湿、退耕还草、补播改良等措施,维护和提升湿地、草原生态功能。强化河流对河谷农牧区水资源的持续补给能力。

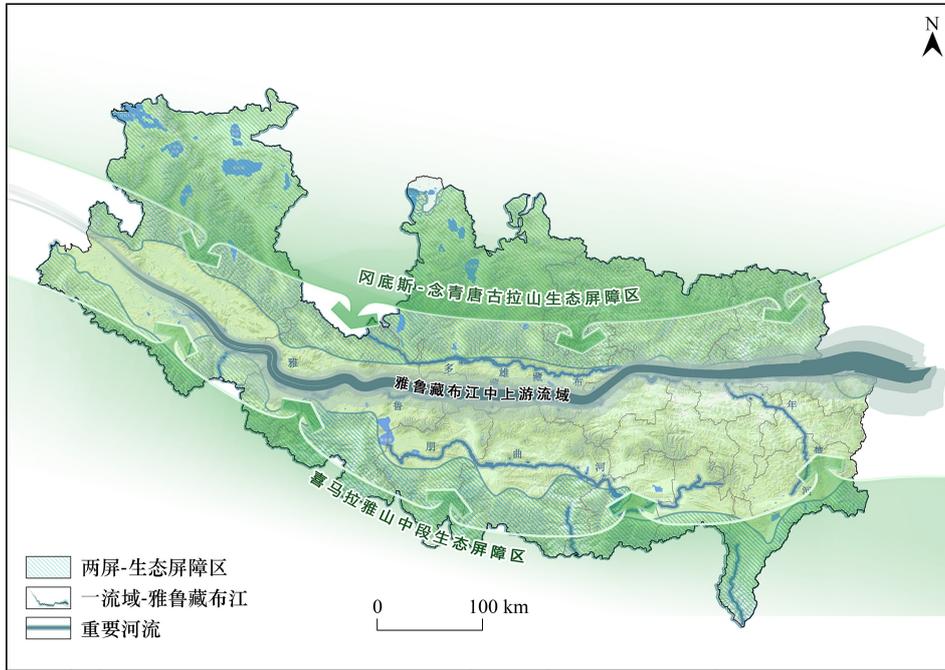


图 10 日喀则市国土空间生态安全格局(修正后)

Fig.10 A modified version of the ecological security pattern in Shigatse

3 讨论与结论

3.1 讨论

生态安全包括生态系统自身的安全,也包括为社会经济安全提供保障的能力,其中生态系统自身的安全又包括生态系统和物种的安全,而物种保护的选地不仅需要考虑物种丰富度,还需要识别物种迁徙廊道并予以保护,以此提高珍稀物种种群的可持续性。因此,选取物种最适宜生存的区域作为迁徙源地,并根据物种迁徙习性构建不同的生态阻力面,分别提取迁徙廊道,一定程度上增强了研究结果的针对性和实效性,拓展了直接选取水域、林地作为生态源地的构建方法。与现有格局相比,新的生态安全格局既尊重了日喀则的山水格局,又加强了对日喀则北部冈底斯—念青唐古拉山脉的保护,基本涵盖了多数生态源地、廊道和战略节点,预计将对生物多样性和生态服务维护起到正向推动作用。相较于生态保护红线体系和自然保护地体系,该格局进一步加强了对水源涵养、土壤保持、防风固沙和碳固定等 4 类生态服务功能的保护(表 4)。但在生态廊道构建过程中,仅选取了具有迁徙习性的国家一级野生保护动物潜在栖息地作为迁徙源地,难以覆盖全市所有生物类型,更全面普适的方法还有待进一步研究深化。

表 4 生态保护红线和自然保护地生态系统功能保护情况

Table 4 Protection of ecosystem functions by ecological conservation redline and nature reserves

生态系统服务功能极重要区 Extremely important area of ecosystem service function	水源涵养极重要区 Extremely important area for water conservation		土壤保持极重要区 Extremely important area for soil conservation		防风固沙极重要区 Extremely important area for wind and sand control		碳固定极重要区 Extremely important area for carbon fixation	
	面积 Area/km ²	比重 Ratio/%	面积 Area/km ²	比重 Ratio/%	面积 Area/km ²	比重 Ratio/%	面积 Area/km ²	比重 Ratio/%
	生态保护红线 Ecological conservation redline	7359.0	62.5	10479.3	41.0	4168.5	26.5	439.9
自然保护地 Natural reserve	6846.3	58.1	9169.4	35.9	3242.0	20.6	289.5	48.7

3.2 结论

本文从生物潜在栖息地和迁徙廊道出发,结合定量研究和定性判别两种方法,探索脆弱区生态安全格局构建的新框架。通过与生态服务功能相结合的案例研究发现,日喀则市生态源地面积 82588 km²,占全市国土面积的 46%左右,主要分布在南部沟谷地区、中部雅江河谷地区和北部高山地区,涉及仲巴县、拉孜县、桑珠孜区、萨迦县、岗巴县、亚东县的大部分区域以及其他县的部分地区,用地类型以草地、未利用地、水域和林地为主。全市生态廊道累积长达 5135 km,呈网状分布,将全市重要生境紧密联系起来,与市内生态本底空间分布特征较为相似。廊道主要沿河流和山体分布,在廊道构建过程中应注重对水体两岸的绿化和对山体的生态保护。生态节点是生态功能薄弱的关键点,要加强保护,提高其连通性。本文共识别生态节点 67 个,分布较为广泛,其中南部的生态廊道上节点分布较为集中,用地类型以未利用地为主。建议构建“两屏、一流域”的生态安全格局,以推进日喀则市生态空间保护,维护生态系统功能。其中,“两屏”指南部的喜马拉雅山中段生态屏障区、北部的冈底斯—念青唐古拉山生态屏障区,“一流域”指雅鲁藏布江中上游流域。通过生态安全格局的构建,日喀则市生态保护用地共计 51730 km²,占全市面积的 29%左右,将使黑颈鹤、金雕、藏羚羊等 12 种物种栖息地及廊道得到总体保护,并使约 72.0%的水源涵养极重要区、69.9%的土壤保持极重要区、57.5%的防风固沙极重要区和 99.6% 的碳固定极重要区得到保护,对区域生态安全将发挥重要作用。

致谢:感谢西藏自治区自然资源厅、日喀则市自然资源局的支持。

参考文献(References):

- [1] 李志刚, 刘晓春. 中国的生态安全问题. 生态经济, 2002, 18(8): 10-13.
- [2] 姜迎春. 如何从根本上管住生态问题的中国答案. 人民论坛, 2021(12): 28-31.
- [3] 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.
- [4] 肖杨, 周旭, 蒋啸, 张继, 李洪广. 基于生态系统服务功能评价的贵阳市生态安全格局维护研究. 生态科学, 2020, 39(4): 244-251.
- [5] Cui X F, Deng W, Yang J X, Huang W, de Vries W T. Construction and optimization of ecological security patterns based on social equity perspective: a case study in Wuhan, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108714.
- [6] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨旸, 彭建. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例. 生态学报, 2017, 37(24): 8241-8253.
- [7] 杨彦昆, 王勇, 程先, 李维杰, 高敏, 王家录, 傅俐, 张瑞. 基于连通度指数的生态安全格局构建——以三峡库区重庆段为例. 生态学报, 2020, 40(15): 5124-5136.
- [8] 王振波, 梁龙武, 方创琳, 庄汝龙. 京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(12): 4132-4144.
- [9] 孙枫, 章锦河, 王培家, 魏国恩, 储光, 曹禹. 城市生态安全格局构建与评价研究: 以苏州市区为例. 地理研究, 2021, 40(9): 2476-2493.
- [10] Wang C X, Yu C Y, Chen T Q, Feng Z, Hu Y C, Wu K N. Can the establishment of ecological security patterns improve ecological protection? An example of Nanchang, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140051.
- [11] Chen J, Wang S S, Zou Y T. Construction of an ecological security pattern based on ecosystem sensitivity and the importance of ecological services: a case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108688.
- [12] 赵伟, 邹欣怡, 蒲海霞. 成渝地区双城经济圈生态安全格局构建. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2423-2433.
- [13] Dai L, Liu Y B, Luo X Y. Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 141868.
- [14] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 沈润平, 徐德琳. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250-258.
- [15] 赵筱青, 谭琨, 易琦, 李思楠, 苗培培, 普军伟. 典型高原湖泊流域生态安全格局构建——以杞麓湖流域为例. 中国环境科学, 2019, 39(2): 768-777.
- [16] Li S C, Zhao Y L, Xiao W, Yue W Z, Wu T. Optimizing ecological security pattern in the coal resource-based city: A case study in Shuozhou City, China. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108026.
- [17] Xu W X, Wang J M, Zhang M, Li S J. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale

- opencast coal mine area. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125523.
- [18] 姜虹, 张子墨, 徐子涵, 丹宇卓, 叶玉瑶, 李家志, 彭建. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建. *生态学报*, 2022, 42(5): 1981-1992.
- [19] Vergnes A, Kerbiriou C, Clergeau P. Ecological corridors also operate in an urban matrix: a test case with garden shrews. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(3): 511-525.
- [20] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 谭敏, 渠俊峰. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1036-1045.
- [21] 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. *生态学报*, 2022, 42(5): 1968-1980.
- [22] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15.
- [23] 俞孔坚, 叶正, 李迪华, 段铁武. 论城市景观生态过程与格局的连续性——以中山市为例. *城市规划*, 1998, 22(4): 14-17.
- [24] 单楠, 周可新, 潘扬, 唐夫凯. 生物多样性保护廊道构建方法研究进展. *生态学报*, 2019, 39(2): 411-420.
- [25] 蔡青, 曾光明, 石林, 梁婕, 黄璐, 韦安磊. 基于栅格数据和图论算法的生态廊道识别. *地理研究*, 2012, 31(8): 1523-1534.
- [26] 张玥, 许端阳, 李霞, 张晓宇, 王小博, 王绍强. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别. *生态学报*, 2020, 40(6): 1933-1943.
- [27] Gao M W, Hu Y C, Bai Y P. Construction of ecological security pattern in national land space from the perspective of the community of life in mountain, water, forest, field, lake and grass: a case study in Guangxi Hechi, China. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108867.
- [28] 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.
- [29] 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. *生态学报*, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [30] 张路, 肖焱, 郑华, 徐卫华, 逯非, 江凌, 饶恩明, 肖洋, 吴炳方, 曾源, 欧阳志云. 2010 年中国生态系统服务空间数据集. *中国科学数据*, 2018, 3(4): 11-23.
- [31] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [32] 吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 杨宇博, 金洪阳, 邹红菲. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例. *生态学报*, 2016, 36(12): 3758-3764.
- [33] 刘振生, 高惠, 滕丽微, 苏云, 王晓勤, 孔芳毅. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价. *生态学报*, 2013, 33(22): 7243-7249.
- [34] Ruan T, Han H, Wei W, Qiu L, Hong M S, Tang J F, Zhou H, Zhang Z J. Habitat suitability evaluation for giant panda in Liziping National Nature Reserve, Sichuan Province. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 30: e01780.
- [35] 李政, 丁忆, 王亚林, 陈静, 吴凤敏. 基于最小累积阻力模型的山地石漠化地区生态安全格局构建: 以重庆市南川区为例. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1046-1054.
- [36] Jin X X, Wei L Y, Wang Y, Lu Y Q. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem service functions and ecological sensitivity assessment: a case study in Fengxian County of Jiangsu Province, China. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(1): 563-590.
- [37] 韩世豪, 梅艳国, 叶持跃, 张珂, 尹秀秀. 基于最小累积阻力模型的福建省南平市延平区生态安全格局构建. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 192-198, 205.