

DOI: 10.5846/stxb202111133187

周璟,王宏卫,谈波,马晨,王晓琴,代芯妍.开都河流域生态安全格局构建与生态修复分区识别.生态学报,2022,42(24):10127-10137.

Zhou J, Wang H W, Tan B, Ma C, Wang X Q, Dai X Y. Construction of ecological security pattern and identification of ecological rehabilitation zones in Kaidu River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10127-10137.

开都河流域生态安全格局构建与生态修复分区识别

周 璟^{1,2}, 王宏卫^{1,2,*}, 谈 波^{1,2}, 马 晨^{1,2}, 王晓琴^{1,2}, 代芯妍^{1,2}

1 新疆大学地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830017

2 新疆绿洲生态自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830017

摘要:生态文明建设背景下的国土空间生态修复已上升为国家战略,开展典型区域生态保护与修复研究具有重要意义。以开都河流域为研究区,并向流域外扩展 20% 的缓冲区,采用 InVEST 模型和 MSPA 分析方法识别生态源地,以人类居住合成指数修正电阻面,运用电路理论的方法提取生态廊道、“夹点”、障碍点区域,识别开都河流域生态安全格局,在此基础上结合生态功能区划,构建区域生态保护与修复格局。结果表明:(1)流域共识别生态源地 15468.94km²,廊道 498.87km 及 31 处“夹点”、9 处障碍点和 24 处生态断裂点,形成源地、廊道网络体系及区域生态保护与修复关键点串联的开都河流域生态安全格局;(2)以生态安全格局、生态基底等为基础并参考生态功能区划,识别开都河流域“一轴、两核、一网络、多片区”的生态保护与修复格局,并提出相应保护与修复措施,为区域国土空间生态修复规划编制及生态保护与修复的实践提供相应参考。

关键词:电路理论;人类居住合成指数;生态安全格局;生态保护修复分区;开都河流域

Construction of ecological security pattern and identification of ecological rehabilitation zones in Kaidu River Basin

ZHOU Jing^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2,*}, TAN Bo^{1,2}, MA Chen^{1,2}, WANG Xiaoqin^{1,2}, DAI Xinyan^{1,2}

1 College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

2 Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

Abstract: In the current construction of ecological civilization in China, ecological restoration of territorial space has become a national strategy. Thus, it is of great significance to carry out research on ecological protection and restoration in typical regions. In this study, Kaidu River Basin (KRB) was selected as the research sample, and the ecological security pattern of this region was constructed based on a buffer zone expanded by 20% in the study area. The InVEST model and the MSPA analysis method were introduced to identify the ecological sources. Moreover, the construction of the resistance surface and the human settlement index (HSI) were selected to adjust the basic resistance surface set by the land use type. Furthermore, the Circuitscape model based on circuit theory was used to extract ecological corridors, pinch points, and barrier points, so as to identify the ecological security pattern of the KRB. Subsequently, the ecological protection and restoration pattern for this region was constructed based on the combing of the ecological security pattern and ecological function zoning of the study area. According to the results, an ecological source area of 15468.94 km² and an ecological corridor of 498.87 km were identified in the KRB. Based on this, an ecological security pattern consisting of ecological sources, corridor network systems, and key points of regional ecological protection and restoration has been formed. Moreover, a total of 31 ecological pinch-points were identified that needed to be protected, and 9 ecological barriers and 24 ecological breakpoints were in an urgently dangerous condition. Based on the ecological security pattern, ecological base,

基金项目:国家自然科学基金项目(41861037)

收稿日期:2021-11-13; 网络出版日期:2022-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanghw_777@163.com

and ecological function zoning, the ecological protection and restoration pattern of “one axis, two cores, one network, and multiple areas” in the KRB was identified, which required corresponding protection and restoration measure. This research provides a useful reference for the preparation of territorial and spatial ecological restoration planning and the practice of regional ecological protection and restoration.

Key Words: circuit theory; human settlement index; ecological security pattern; ecological protection and restoration areas; Kaidu River Basin

国土空间生态修复是新时期我国深入推进生态文明建设的重大举措和提升国家治理体系治理能力现代化的重大议题^[1],生态修复分区则是科学编制国土空间生态修复规划并有效进行生态修复的重要前提^[2]。基于此,我国学者开展了大量生态修复的相关研究,对形成科学合理的分区划定方案,提高生态修复工作的针对性与靶向性具有重要意义^[3-4],并主要形成 4 类研究体系:一是依据区域主导功能确定修复分区与工程模式^[2,5],二是建立综合指标体系识别区域生态问题,并进行生态修复分区^[6-7],三是从区域生态系统服务供需角度开展生态修复分区划定^[3,8],四是运用生态安全格局研究范式进行生态修复分区研究^[9-10]。其中,构建生态安全格局具有保障区域生态系统整体健康并完善空间配置方案的基础作用^[10-11],有利于维持景观格局的整体性和生态系统功能的完整性^[9,12],是当前生态修复领域的主流技术模式^[13-14]。

目前生态安全格局构建的相关研究多采用“源地识别-阻力面构建-生态廊道提取”的研究范式,亦有学者将“夹点”、断裂点等考虑在内^[15-16]。研究方法多运用斑块重力模型、蚁群模型、最小累积耗费模型和电路理论等,其中蚁群模型和斑块重力模型不能有效识别生态廊道^[17],最小累积耗费模型忽视生物的随机游走性,难以直接体现廊道中的关键点^[18];而电路理论能通过源地间电流强度反映生态斑块和廊道的相对重要性,同时可以运用电子在电路中随机游走的特性,预测物种运动规律并识别可能的移动路径,该方法在一定程度上更符合生物体的行为特征,已在研究中广泛应用^[19-21]。但现有研究多囿于行政边界^[9-10,18],而生态安全问题的产生和发展并不完全受行政边界制约,特定行政区生态安全格局构建需要考虑更大自然地域空间范围内相关因素的影响^[11]。

开都河流域位于新疆塔里木盆地北缘,流域内含我国最大的内陆淡水吞吐湖和重要的自然保护区,其生态状况对下游水域及人类生产生活都具有重要影响,保持并维护该流域生态安全至关重要。本研究以此为研究区,参考相应景观生态学理论和电路理论,在对研究区增加 20%缓冲区的基础上,提取生态廊道、夹点等生态安全格局构成要素,并参考研究区生态功能区划,划分该流域生态保护与修复分区,以期在当地生态修复工程实施和国土空间管治提供参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

开都河(82°28'—88°20'E,41°23'—43°31'N)地处新疆巴音郭楞蒙古自治州境内(图 1),发源于中天山,流经大、小尤鲁都斯盆地,最终注入中国最大的内陆淡水湖泊博斯腾湖,与孔雀河组成塔里木河下游源流,年径流量 33.4 亿 m³;流域内行政区域包括和静县、焉耆回族自治县、和硕县和博湖县^[22],气候类型为温带大陆性气候,具有南北疆过渡性气候特征,土壤质地多为砂质壤土,土壤类型以潮土为主,流域内还有盘羊、北山羊、猓狍、鹅喉羚等珍稀动物及 2200 余种野生植物^[23];作为巴州境内最大的一条内陆河,开都河孕育了流域内的 44.11 万人口,被誉为巴州的“母亲河”。

1.2 数据来源与预处理

2018 年土地利用数据、中国年度 1km 植被指数(NDVI)空间分布数据集和国家级自然保护区边界数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);夜间灯光数据来源于科罗拉多矿业大学数

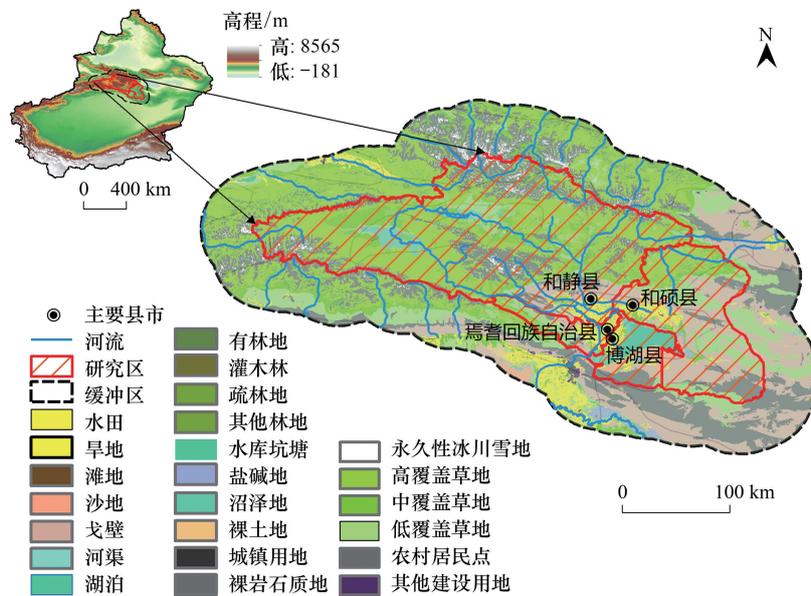


图1 研究区概况

Fig.1 Research area

据下载网址 (<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>);生态功能区划数据为中国科学院生态环境研究中心的中国生态功能区划方案研究成果,来源于中国生态系统评估与生态安全数据库 (<http://www.ecosystem.csdb.cn/>)。

本文对研究区增加 20% 的缓冲区,将土地利用类型划分 7 个一级地类(耕地、草地、水域、林地、建设用地、裸地及其他用地)和沼泽地、灌木林等 23 个二级地类,数据的空间坐标统一为 GCS_WGS_1984 坐标系和 UTM 投影。

2 研究方法

2.1 生态安全格局构建与生态修复区域识别

2.1.1 生态源地识别

生态源地是对周边区域具有重要辐射功能的生境斑块,应具有较高的生境质量。InVEST 模型的生境质量模块能对区域生境质量进行定量评估,以斑块功能属性指导源地识别^[11,24];形态学空间格局分析(MSPA)强调结构连接,能从像元层面识别具有连通重要性的七大景观类型,且受空间尺度影响小,两种方法的分析机制具有互补性^[25-26]。本研究以 InVEST 模型生境质量模块结合 MSPA 分析方法识别生态源地。参考模型使用手册^[27]、研究区实际情况及相关文献^[12]设置参数,模型计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (1)$$

式中: Q_{xj} 为 j 地类中栅格 x 的生境质量指数; H_j 为 j 地类的生境适宜度; D_{xj} 为 j 地类中栅格 x 的生境退化度; k 为半饱和常数,取 0.5; z 为模型默认参数。

选取生境质量指数大于 0.8 的高生境质量区域作为源地备选区^[28],并作为 MSPA 分析的前景,为区分次优斑块中相同覆盖度草地植被的不同生长状况,将 NDVI 高、较高值区域也纳入前景中识别七类景观要素,并以 50km^2 为阈值^[29]在核心区提取本文生态源地。

2.1.2 电阻面构建

电路理论中不同景观类型根据是否促进物种迁移扩散被赋予相对较低或较高的电阻^[30]。电阻面即生态

学中的阻力面,土地利用类型是阻力面构建的基础阻力因素^[18,31]。参考相关研究^[32-33],本文基础电阻面赋值如下:林地 1,高、中、低覆盖度草地分别赋值 3、10、20,水域为 3,耕地为 30,沼泽地为 25,裸地及除沼泽地外的其他用地为 70,建设用地赋值 100。本文引入人类居住合成指数(HSI)^[34-35]对基础电阻面修正,公式如下:

$$R_i = \frac{HSI_i}{HSI_a} \times R \quad (2)$$

$$HSI = \frac{(1-NDVI) + NTL'}{(1-NTL') + NDVI + NDVI \times NTL'} \quad (3)$$

式中: R_i 为修正后栅格*i*的电阻值, HSI_i 为栅格*i*的人类居住合成指数值; HSI_a 为栅格*i*对应景观类型*a*的平均人类居住合成指数值, R 为栅格*i*对应景观类型的基础电阻值;NDVI是归一化植被指数,NTL'是归一化后的夜间灯光数据。

2.1.3 生态廊道提取

生态廊道是物种、信息和能量流动的沟通桥梁,承担物种迁移、生存繁衍等基础功能及防风滤污、保护隔离等生态修复功能^[36-37]。本文利用 Circuitscape 插件中的 Linkage Mapper 模块构建生态廊道,选取含河流外缘 1000 m 缓冲区范围的主要河流作为本文河流生态廊道^[38]。运用 Centrality Mapper 模块进行中心度识别以量化路径重要性^[20],将累积电流值前 30%的廊道和河流生态廊道作为关键生态廊道,其余廊道划分为重要生态廊道。

2.1.4 生态“夹点”及障碍点识别

生态“夹点”是表征生境连通性的景观关键点,其退化或损失可能会切断源地间的连通性,应优先进行保护^[15,39]。本文利用 Pinchpoint Mapper 模块识别生态“夹点”。

障碍点是阻碍物种在斑块间移动的区域^[18],可根据对障碍点清除后的电流恢复值来识别;该区域的消除或生态恢复对源地间的连通性具有增加作用^[40]。本研究利用 Barrier Mapper 模块识别障碍点区域。

2.2 生态修复分区

生态修复分区是在生态区划基础上进行的,其出发点和落脚点都是“主导生态功能”^[2,41],参考相关研究,本文将涵盖研究区功能基础分区的生态功能区划作为基础背景^[2],结合生态安全格局构建及生态基底提取修复重点区域,并将主导生态功能作为分区修复的重要目标^[5,41],最终形成不同修复单元得到本文分区结果。

3 结果与分析

3.1 基础生态安全格局构建

3.1.1 生态源地识别

由图 2 可知,开都河流域生境质量存在明显的空间分异,总体呈西北高、东南低,湖泊、山区高,盆地、平原低的分布特征;高值区主要分布于博斯腾湖区和研究区西北部和静县山区,低值区呈半环状或条带状分布于博斯腾湖周边,原因是受地形、气候等自然条件影响,西北部的天山南麓区域分布有连接成片的大面积草地且受人类活动干扰较少,生境质量相对较高;而博湖东部大面积戈壁、裸岩石质地交错分布,西北部焉耆盆地聚落密集,受人类活动影响明显,使该区域生境质量处于相对较低水平。根据 MSPA 分析结果(表 1),研究区内核心区面积为 17106km²,占总面积的 31.84%,在 7 种景观类型中占比 95.97%;共选出 12 处生态源地(表 2、图 2),面积 15468.94km²,以大面积不规则斑块为主,最大斑块面积 9683.54km²,含巴音布鲁克国家级自然保护区和巩乃斯国家森林公园,占生态源地总面积的 62.6%,高覆盖度草地是源地主要用地类型,面积达 70.63%。

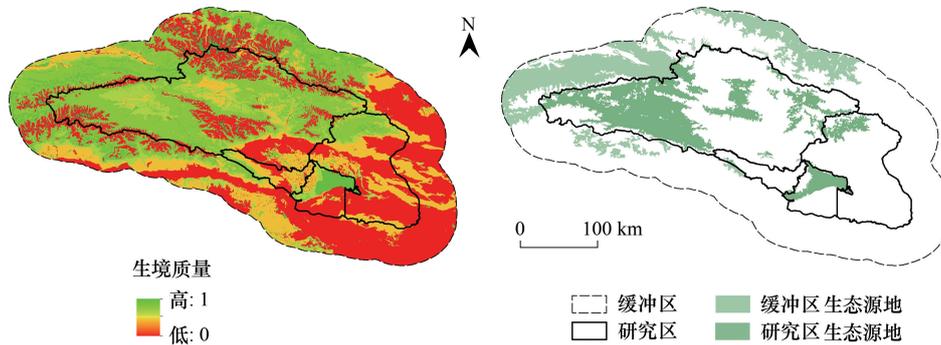


图 2 生境质量及生态源地空间分布

Fig.2 The distribution of habitat quality and ecological source areas

表 1 形态学空间格局(MSPA)分析景观分类统计

Table 1 Landscape classification statistics of morphological spatial pattern analysis (MSPA) analyzes

景观类型 Landscape types	面积/km ² Area	占前景要素比例/% Proportion of foreground objects	占总面积比例/% Proportion of total area
核心区 Core	17106.000	95.968	31.839
孤岛 Islet	0.886	0.005	0.002
孔隙 Perforation	91.527	0.513	0.170
边缘区 Edge	613.496	3.442	1.142
环道区 Loop	1.514	0.008	0.003
桥接区 Bridge	6.337	0.036	0.012
支线 Branch	4.950	0.028	0.009

表 2 生态要素分类统计

Table 2 Classification and statistics of ecological elements

范围 Range	生态要素 Ecological elements	源地 Ecological sources	生态廊道 Ecological corridors	夹点 Pinch-points	障碍点 Ecological barriers
缓冲区 Buffer area	面积/km ²	31181.193	-	112.920	325.800
	数量	22	38	50	12
研究区 Research area	长度/km	-	686.846	-	-
	面积/km ²	15468.935	-	91.290	240.319
	数量	12	24	31	9
	长度/km	-	498.872	-	-

3.1.2 电阻面构建

根据地类赋值结果,研究区基本阻力值西北低、东南高,有以东北-西南走向为界限呈两级分异的趋势(图 3)。其中西北部高、低阻力值相间分布,形态与新疆“三山夹两盆”地形类似,东南部较高阻力区环博斯腾湖分布并有较低阻力区对其进行带状分割。经人类居住合成指数修正后,研究区最高综合阻力值达 2060.43,相应阻力分布特征与修正前大致相当,但修正结果对地类内部阻力值变化的刻画更加精细,能为本文构建区域生态安全格局并进行生态修复分区提供重要支撑。

3.1.3 生态廊道提取

研究区内共含 24 条生态廊道(图 4),长度介于 0.77—72.41km 之间,共 498.87km(表 2),以研究区北部及中部区域较为密集,博斯腾湖以东区域无廊道分布,原因是东部区域戈壁、荒漠连片,既无适宜生物栖息生存或中转的源地分布,也不适宜生态廊道在此延伸;同时该区域平均廊道长度 20.36km,低于平均长度的短距离廊道占比达 62.5%,多分布于靠近研究区外围的西南部及北部边界区域,原因是研究区西部、北部天山山脉

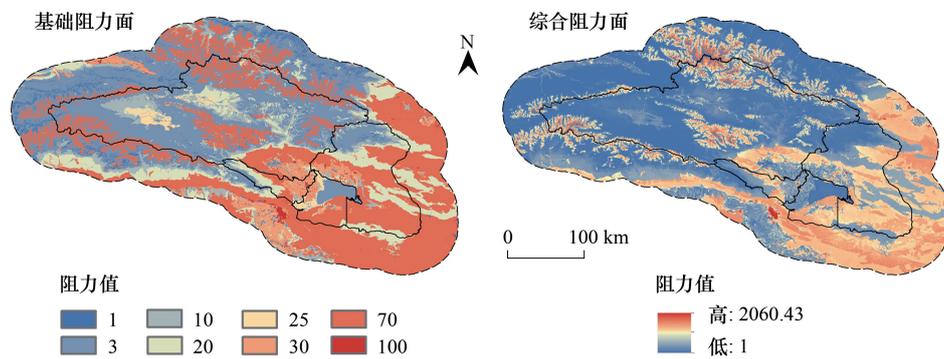


图3 生态阻力值空间分异

Fig.3 Spatial differentiation of ecological resistance value

的森林草地连片分布,形成生境质量与植被长势较好的源地,且源地间阻力较小、距离较近,连通性强。此外,根据中心度识别结果,研究区累积电流值为 6.56—87.79,选出 7 条关键生态廊道的最小累积电流值为 30.36,能直接联通中心度排名前 3 的大面积源地,并与研究区内重要河段有路径重合,结合主要河流廊道分布情况,本文共选出 15 条关键生态廊道;同时本文河流廊道与其他重要生态廊道也有路径相交及相接情况,共同形成廊道网络,为沟通生态源地提供多种可能。

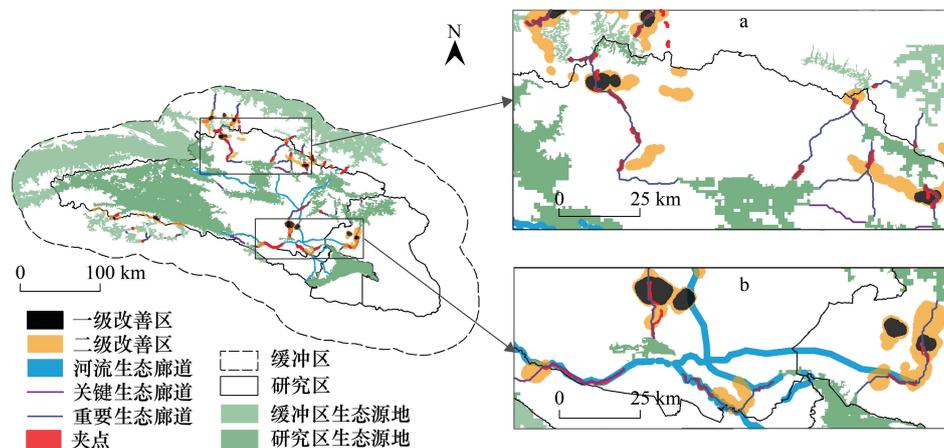


图4 生态安全格局

Fig.4 Ecological security pattern

a—b 为生态安全格局局部细节图代号;显示典型区域各生态安全格局构成要素分布情况

3.2 生态修复区域识别

3.2.1 生态“夹点”及障碍点识别

将电流强度分为 3 级,识别 31 处“夹点”区域(图 4、图 5),面积 91.29km²,以条带状分布为主;其中最大“夹点”为东西走向,位于和静县南端,面积 17.08km²,该区域可通过河流廊道直接沟通西部最大源地斑块与博斯腾湖湖区,且与一条高中心度生态廊道重合,是沟通源地斑块的重要区域,具有极高的生态价值,因而形成“夹点”;另有 8 个“夹点”位于河流关键廊道上,其余分布在源地与廊道交点处及研究区边界处,原因是河流廊道本身就有较强的生态流动性,形成“夹点”的可能性高,而源地间廊道连接时,交界处为物质能量流动的关键区域,也易形成“夹点”;此外和静县西北部廊道存在多个“夹点”区域,在保护生态网络完整性及生态修复过程中需予以重视,纳入全局考虑。

将障碍点识别结果 3 段分级,一级改善区作为障碍点区域,改善得分 30.14—83.55。共识别障碍点 9 处

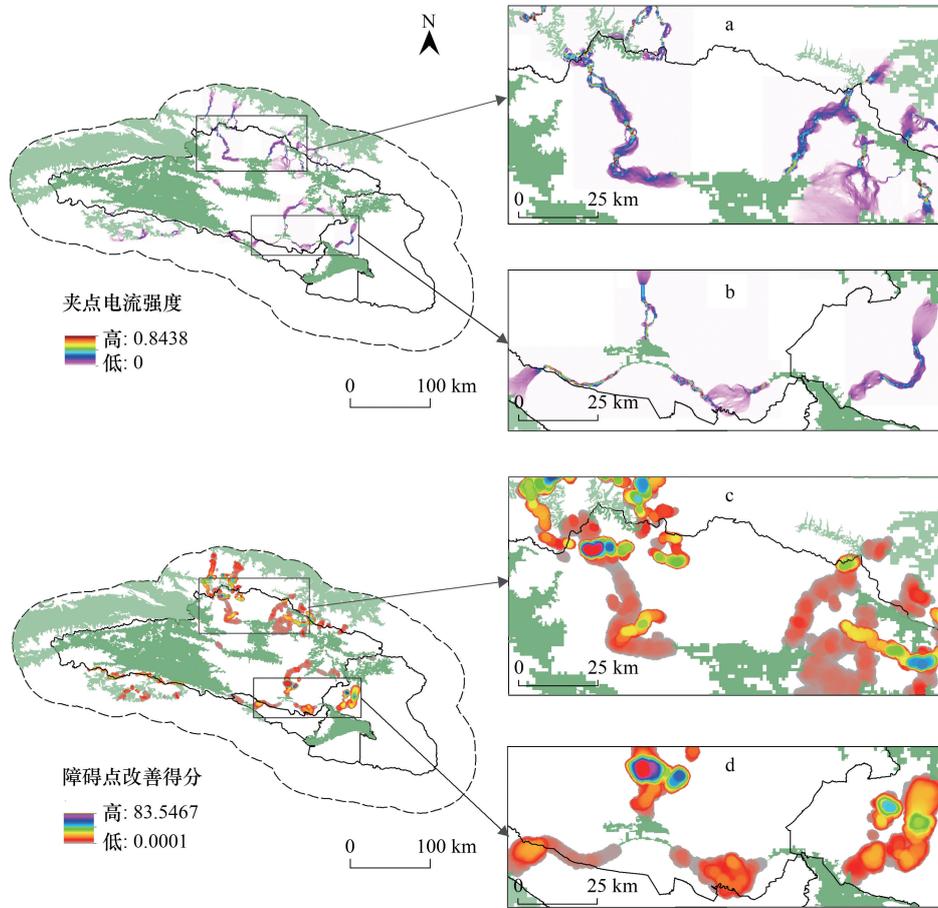


图5 “夹点”生态电流强度及障碍点改善得分

Fig.5 Pinch points ecological current intensity and barrier points improvement score

a—b为“夹点”电流强度局部细节图代号:电流值越高,越易形成“夹点”;c—d为障碍点改善得分局部细节图代号:得分越高,越易形成障碍点

(图4,图5),面积240.32km²,其中191.32 km²的障碍点位于生态廊道上,对区域景观连通性具有重要影响,原因是障碍点区域主要为裸岩石质地及戈壁,林地、草地等生态用地仅占14.14%,生态廊道在此延伸受阻或很难稳定维持廊道生态基底的稳定性,故形成本文障碍点区域;同时本文障碍点为大面积斑块,消除难度大,源地间连通性在现有基础上提升的可能性较低。而涵盖障碍点的二级改善区有6处,相关生态用地占比32.69%,可尝试对该区域生态用地加以保护,在一定程度上提升源地间联通的可能性,为廊道延伸提供便利。

3.2.2 生态断裂点识别

大型交通线路及设施是区域间人类活动联系的纽带,也是经济网络的重要组成部分;但从生态角度出发,交通线路布局会影响区域景观完整性,具有使景观破碎化加剧的可能,在一定程度上影响或阻碍生物流动及迁徙。本文识别高速公路、铁路、国道与廊道相交的24处区域作为生态断裂点(图6),以南疆铁路与廊道产生交汇的断裂点最多,达12处,与国道产生断裂点7处,高速公路断裂点5处,主要集中于和静县东南部及焉耆回族自治县东北部,多沿开都河水系分布;其中焉耆境内高速公路G3012和南疆铁路与开都河有多处相交,同时南疆铁路与216国道、218国道在和静县境内与开都河南北走向段距离较近且汇集延伸,呈路网与天然河流廊道并行态势,形成重要的带状保护修复区。

3.3 生态修复分区及优化

3.3.1 生态修复分区

以涵盖研究区功能基础分区的生态功能区划为基础背景,综合考虑研究区生态基底、自然保护区位置及各生态安全格局构成要素分布(图3、图4),提出本文“一轴、两核、一网络、多片区”的开都河流域生态保护与修复格局(图7)。

“一轴”为开都河流域生态保护与修复发展轴。从生态安全格局角度看,该轴以北含影响景观连通性的全部障碍点区域,因修复可行性低侧重生态保护,加之该区域含国家级自然保护区和70.97%的“夹点”区域,使该片区生态保护至关重要;从生态基底和生态功能区划角度看,该轴以北侧重水源涵养与生物多样性保护功能,在生态保护上具有共性,故划分为北部山地保护修复区,面积达37136.72km²。该轴以南70%的“夹点”在河流廊道上,且河流经焉耆盆地注入博斯腾湖,区域水生生态治理和保护具有重要意义;同时本文62.5%的断裂点分布与此,为避免影响廊道完整性和区域连通性,亟需进行断裂点修复;此外该区域分属不同生态功能区,各功能区具有特性,生态问题各有侧重,划分为南部盆地平原修复区,面积16590.16km²。

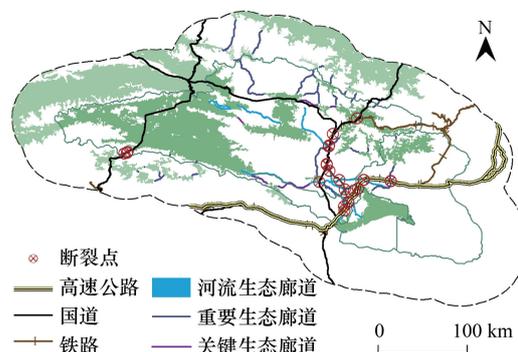


图6 生态断裂点分布

Fig.6 Distribution of ecological breakpoints

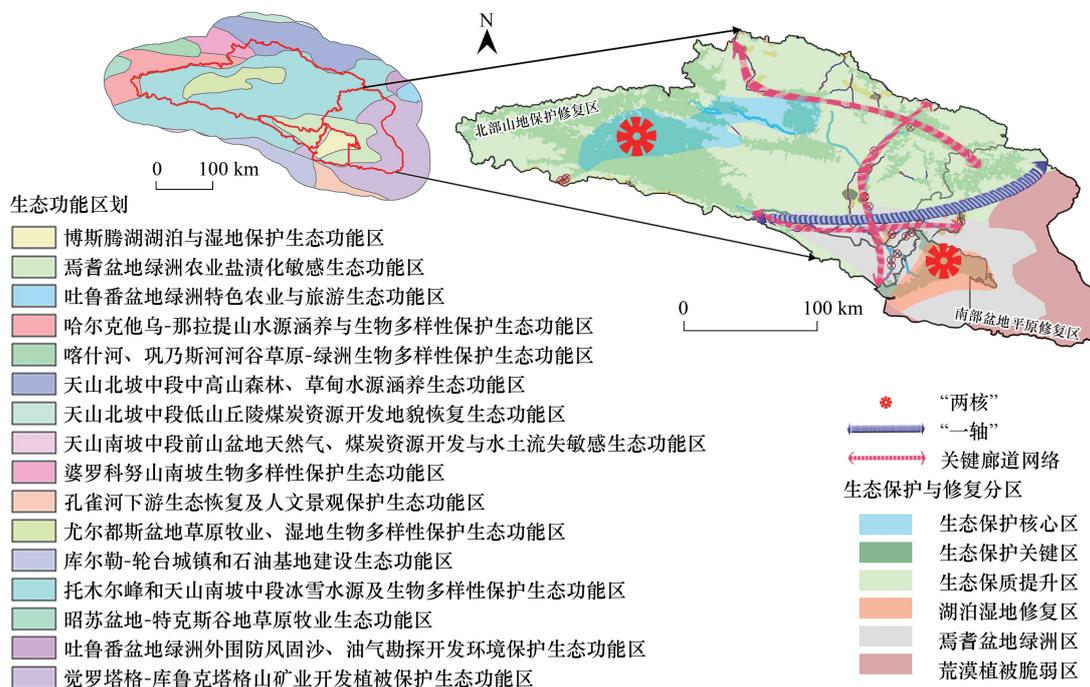


图7 开都河流域生态保护与修复格局

Fig.7 The pattern of ecological protection and restoration in the Kaidu River Basin

“两核”为两个生态保护与修复核心。北部巴音布鲁克是全国第一个天鹅自然保护区,含野生动物145种,植物704余种^[42],划分为北部生态保护与修复的核心。南部博斯腾湖是重要的鸟类繁殖地及新疆最大的渔业生产基地,也是孔雀河的唯一源头,划分为南部生态保护与修复的核心。

“一网络”为“两横一纵”的关键廊道网络。其中,北部廊道网络由“夹点”最多且长度最长的单一生态廊道与三条高中心度关键廊道横向串联组成,南部廊道网络由东西向河流廊道、最大“夹点”区域和两条高中心

度关键廊道构成,纵横廊道在研究区中部相交并将各源地斑块串联,形成重要的区域关键廊道网络。

“多片区”为6个生态保护与修复分区。巴音布鲁克作为和静县重要牧区含乌兰恩格等重要牧场,参考生态功能区划方案及自然保护区范围,将尤尔都斯盆地草原牧业、湿地生物多样性保护生态功能区界定为本文生态保护核心区,维护湿地生态的同时注重周边畜牧业开发及管理;核心区外的源地区域生境质量及NDVI相对较高且综合阻力相对较小,划分为本文生态保护关键区,其余轴北区域是源地间流通的缓冲过渡区域,各生态安全格局构成要素穿梭于此,划定为生态保质提升区。南部盆地平原修复区参考生态功能区划、现有博斯腾湖国家湿地公园建设及各生态安全格局构成要素的分布,划分为湖泊湿地修复区、焉耆盆地绿洲区和荒漠植被脆弱区。

3.3.2 生态保护与修复策略

北部山地保护修复区:对该区域的生态保护核心区,要注重湿地生物多样性保护及草原畜牧业开发和管理,针对区域典型的草原退化、病虫害问题开展定期筛查及生态承载力测算,另要开展牧民转场迁徙廊道研究,并对相应廊道进行针对性保护。对生态保护关键区,要以维护山区水源涵养和生物多样性保护功能为指引,与缓冲区范围内的自然保护区、森林公园等合作,共同开展保障草原生态功能的实践活动。对生态保质提升区要考虑各要素生态本底涉及的非生态用地对区域生态保护的限制性,针对“夹点”、障碍点等区域开展实地考察,并以实际情况指引相应区域缓冲区划定、封育、人工培植等措施实施。

南部盆地平原修复区:对该区域的湖泊湿地修复区,要巩固已有生态修复基础,注重湖泊水源涵养的主导生态功能,可针对性开展湖滨缓冲带划定及水生态修复相关研究,以保护湖区生态环境。对焉耆盆地绿洲区要保护基本农田、防治盐渍化及注重生态断裂点修复,具体要评估现有通道的有效性和断裂点修复的可行性,另可参考国道216动物天桥架设经验,在可能的情况下分离生态廊道与交通线路。对无源地、廊道分布的荒漠植被脆弱区,要跟进优良植物种质资源在该区域的生长状况,并尝试改良盐碱环境,以增加多种植被生长的可能性;同时要严格矿山管理,积极进行植被恢复,避免当地生态状况恶化。

4 讨论

本文不同于以往直接以行政边界为界限进行生态安全格局构建的研究,而是对研究区增加20%的缓冲区进行各生态安全格局构成要素的识别,具有以下三方面优势:一是能全面提取各生态安全格局构成要素,使局部地域研究具有了全局性考量,研究结果更具可靠性;二是增加缓冲区范围能达到降低研究区边缘阻力值估计偏高的效果^[43];三是避免人工边界对电子游走产生障碍,能在一定程度上消除软件自身的误差^[19,21]。其中Koen等指出缓冲区能移除节点附近电流估计较高造成的偏差,且 $\geq 20\%$ 的缓冲宽度足以用于研究不同比例和形状的栖息地区域^[44]。根据本文研究结果,以缓冲区边界为界提取源地时(图8),斑块1和斑块2为一个整体,同属西部最大源地斑块,且以 50km^2 为阈值筛选源地时,源地包含斑块3和斑块4;而以研究区行政

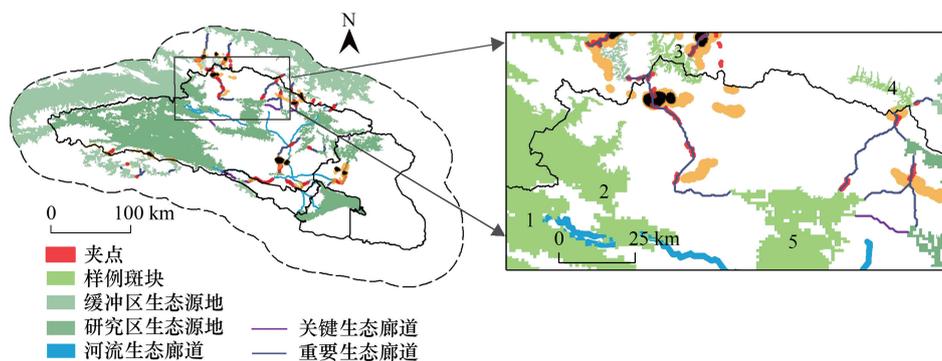


图8 样例源地斑块示例

Fig.8 Example of ecological source plaque

边界进行源地提取,会使斑块 1、斑块 2 人为割裂,斑块 3、4 因面积较小被剔除,相应的会造成其他生态安全格局构成要素遗失或不当识别,如连接斑块 3 和斑块 5 的研究区最长生态廊道及相应“夹点”、障碍点区域未识别。但本文未能详细探讨具体的边界效应及缓冲区对电阻估计过高的消除作用,是本文后续深入研究的方向。

同时以往研究主要运用 TDVI/NDVI 数据、不透水面数据^[45]、夜间灯光数据^[16,25]及引入隐形阻力面^[10,15](坡度、地形起伏度、植被覆盖度等)等方法,对基础阻力值进行修正,也有研究采用土地覆被类型、容积率和建筑密度进行阻力值设定^[21],但阻力值高低是自然基底和人为影响共同作用的结果,在进行阻力值修正时,应将二者同时考虑;因此本文结合 NDVI 与夜间灯光数据,引入人类居住合成指数(HSI)进行阻力值修正,既反映人类活动强度的影响,也考虑隐形阻力面的作用,为今后生态安全格局构建的相关研究提供新思路。

5 结论

本研究以开都河流域 4 个县市为研究区,综合运用 InVEST 模型、MSPA 分析及电路理论相关方法,构建开都河流域生态安全格局,并结合生态功能区划等,划分流域生态保护与修复格局,提出相应保护与修复策略,主要结论如下:

(1)开都河流域生境质量总体呈西北高、东南低,湖泊、山区高,盆地、平原低的分布特征;生态源地共 15468.94km²,源地斑块呈大面积不规则特征,以高覆盖度草地分布为主;生态廊道共 498.87km,但短途廊道居多,以研究区北部及中部区域较为密集,共选出 15 条关键生态廊道。

(2)本文共识别出 31 处“夹点”,9 处障碍点及 24 处生态断裂点区域,“夹点”多具有分布在河流廊道处、源地与廊道交点处及研究区边界处的特征;障碍点具有单个面积较大、生态用地占比较少,消除难度大的特征;以铁路产生的生态断裂点最多,整体以沿水系分布为主要特征。

(3)本文提出开都河流域“一轴、两核、一网络、多片区”的生态保护与修复格局。根据各分区主导生态功能及各生态安全格局构成要素分布差异,北部山地保护修复区侧重保护辅以修复;南部盆地平原修复区在保护基础上侧重生物措施与工程措施结合,尤其重视断裂点生态修复。最终针对 6 个生态保护与修复分区,提出相应保护与修复策略。

参考文献(References):

- [1] 彭建,董建权,刘焱序.“系统思维、整体视角、综合治理,助力高质量发展”——“国土空间生态修复”专辑发刊词.自然资源学报,2020,35(1):1-2.
- [2] 蔡海生,陈艺,查东平,曾珩,邵晖,洪士林.基于主导功能的国土空间生态修复分区的原理与方法.农业工程学报,2020,36(15):261-270.
- [3] 岳文泽,侯丽,夏皓轩,韦静娴,卢有朋.基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略.应用生态学报,2021,33(1):149-158.
- [4] 易行,白彩全,梁龙武,赵子聪,宋伟轩,张妍.国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展.自然资源学报,2020,35(1):37-52.
- [5] 蔡海生,查东平,张学玲,陈艺,曾珩,邵晖,洪士林.基于主导生态功能的江西省国土空间生态修复分区研究.地学前缘,2021,28(4):55-69.
- [6] 丹宇卓,彭建,张子墨,徐子涵,毛祺,董建权.基于“退化压力-供给状态-修复潜力”框架的国土空间生态修复分区——以珠江三角洲为例.生态学报,2020,40(23):8451-8460.
- [7] 宋伟,韩贇,刘琳.山水林田湖草生态问题系统诊断与保护修复综合分区研究——以陕西省为例.生态学报,2019,39(23):8975-8989.
- [8] 谢余初,张素欣,林冰,赵银军,胡宝清.基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区.自然资源学报,2020,35(1):217-229.
- [9] 付凤杰,刘珍环,刘海.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例.生态学报,2021,41(9):3406-3414.
- [10] 张美丽,李智,张益琛,郑建乐,林常威,王树涛.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以河北省阜平县为例.水土保持研究,2021,28(3):299-307.
- [11] 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.
- [12] 樊影,王宏卫,杨胜天,刘勤,衡嘉尧,高一薄.基于生境质量和生态安全格局的阿勒泰地区生态保护关键区域识别.生态学报,2021,41(19):7614-7626.

- [13] 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.
- [14] 马世发, 劳春华, 江海燕. 基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟——以粤港澳大湾区为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3441-3448.
- [15] 方莹, 王静, 黄隆杨, 翟天林. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203.
- [16] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 孔繁花. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1986-2001.
- [17] 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.
- [18] 潘竞虎, 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. 生态学报, 2021, 41(7): 2582-2595.
- [19] 刘佳. 基于电路理论的南京市主城区绿色基础设施格局优化研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [20] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [21] 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.
- [22] 高玥, 刘新平, 原伟鹏. 干旱区内陆河流域未利用地开发生态风险评价及预测——以开都河流域为例. 中国农业资源与区划, 2020, 41(3): 203-211.
- [23] 吐尔逊·艾山, 赛迪古丽·哈西木, 吐热尼古丽·阿木提. 新疆开都河流域下游绿洲景观格局分析. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2017, 36(1): 13-19.
- [24] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 张嘉晖. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析. 生态学报, 2020, 40(9): 2895-2906.
- [25] 张豆, 渠丽萍, 张桀漓. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例. 生态学报, 2019, 39(20): 7525-7537.
- [26] 陈泓宇, 李雄. 基于 MSPA-InVEST 模型的北京中心城区绿色空间生境网络优化. 风景园林, 2021, 28(2): 16-21.
- [27] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T. InVEST 3.7.0.post22+ug.h3b687e57fad0 User's Guide. 2018. https://naturalcapitalproject.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj9321/f/invest_version_en_espanol_oct_2019.pdf
- [28] 郑群明, 申明智, 钟林生. 普达措国家公园生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(3): 874-885.
- [29] 李青圃, 张正栋, 万露文, 杨传训, 张杰, 叶晨, 陈裕婵. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [30] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 王炎, 周旺明, 周莉, 于大炮, 赵福强. 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. 生态学报, 2020, 40(18): 6486-6494.
- [31] 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 吴旗韬, 刘凯. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用. 地理学报, 2014, 69(4): 485-496.
- [32] 田雅楠, 张梦晗, 许荡飞, 张圣微. 基于“源-汇”理论的生态型市域景观生态安全格局构建. 生态学报, 2019, 39(7): 2311-2321.
- [33] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复. 生态学报, 2019, 39(23): 8725-8732.
- [34] 刘权毅, 詹庆明, 李建松, 杨晨, 刘稳. 珞珈一号夜间灯光影像在建设用地图像提取中的应用——以武汉市为例. 武汉大学学报: 信息科学版, 2021, 46(1): 30-39.
- [35] Lu D S, Tian H Q, Zhou G M, Ge H L. Regional mapping of human settlements in Southeastern China with multisensor remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3668-3679.
- [36] 周浪, 李明慧, 周启刚, 孟浩斌, 彭春花, 刘翔位. 基于电路理论的特大山地城市生态安全格局构建——以重庆市都市区为例. 水土保持研究, 2021, 28(2): 319-325, 334-334.
- [37] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 李艺博, 李金融. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216.
- [38] 袁少雄, 宫清华, 陈军, 王均, 黄光庆, 刘峰. 广东省自然保护区生态网络评价及其生态修复建议. 热带地理, 2021, 41(2): 431-440.
- [39] 黄隆杨, 刘胜华, 方莹, 邹磊. 基于“质量-风险-需求”框架的武汉市生态安全格局构建. 应用生态学报, 2019, 30(2): 615-626.
- [40] McRae B H, Hall S A, Beier P, Theobald D M. Where to restore ecological connectivity? detecting barriers and quantifying restoration benefits. PLoS One, 2012, 7(12): e52604.
- [41] 田美荣, 高吉喜, 宋国宝, 邹长新, 郑好. 基于主导生态功能与生态退化程度的生态修复分区研究. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 7-14.
- [42] 时卉, 杨兆萍, 韩芳, 石天戈, 王昭国. 干旱区高山湿地生态风险时空变化——以巴音布鲁克自然遗产地为例. 干旱区研究, 2015, 32(3): 614-621.
- [43] Koen E L, Garroway C J, Wilson P J, Bowman J. The effect of map boundary on estimates of landscape resistance to animal movement. PLoS One, 2010, 5(7): e11785.
- [44] Koen E L, Bowman J, Sadowski C, Walpole A A. Landscape connectivity for wildlife: development and validation of multispecies linkage maps. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(7): 626-633.
- [45] 王回茵, 李汉廷, 谢苗苗, 许萌, 李少玲, 白中科. 资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建. 自然资源学报, 2020, 35(1): 162-173.