

基于 InVEST-MCR 模型的克里雅河流域 生态安全格局构建

阿斯耶·奥布力塔力普^{1,2}, 居麦尼亚孜·赛迪艾合麦提^{1,2},
满苏尔·沙比提^{1,2}, 陈红^{1,2}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830017;
2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: [目的] 构建克里雅河流域的生态安全格局, 为当地的生态安全格局优化、生态修复和生态保护体系的建立提供科学依据。[方法] 以克里雅河流域作为研究对象, 运用 InVEST 模型, 对水源涵养、土壤保持、生境质量和碳储量等生态功能服务重要性进行量化评估; 构建生态敏感性评价体系, 评估研究区生态敏感性, 以此确定生态源地的位置。借助最小累积阻力模型(MCR)构建生态阻力面, 并借助 ArcGIS 软件识别生态廊道, 最终构建研究区生态安全格局。[结果] 克里雅河流域生态源地总 2 块, 总面积为 4 610.47 hm², 位于研究区中、南部林地、草地聚集分布的区域; 生态廊道在促进物种活动, 保持水土以及提升生物多样性等方面发挥着重要作用。生态廊道共 3 条, 其长度分别为 582.75, 113.43 和 65.11 km。[结论] 对于克里雅河流域生态环境而言, 防沙治沙, 以林养林极为重要。应合理支配水资源, 选择适合防沙治沙的植物进行种植, 建设沙漠绿洲并创造经济价值, 为研究区生态修复提供经济支撑。

关键词: InVEST-MCR 模型; 生态服务功能; 生态敏感性; 生态安全格局

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)04-0198-13

中图分类号: X321

文献参数: 阿斯耶·奥布力塔力普, 居麦尼亚孜·赛迪艾合麦提, 满苏尔·沙比提, 等. 基于 InVEST-MCR 模型的克里雅河流域生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 198-210. Asiye Aobulitalipu, Jumainiyazi Saidiahemaiti, Mansuer Shabiti, et al. Construction of ecological security pattern of Keriya River basin based on InVEST-MCR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 198-210. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.018; CSTR:32312.14.stbctb.2025.04.018.

Construction of ecological security pattern of Keriya River basin based on InVEST-MCR model

Asiye Aobulitalipu^{1,2}, Jumainiyazi Saidiahemaiti^{1,2}, Mansuer Shabiti^{1,2}, Chen Hong^{1,2}

(1. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830017, China;
2. Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Regions of Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830017, China)

Abstract: [Objective] The ecological security pattern (ESP) of the Keriya River basin was constructed to provide a scientific basis for optimizing ecological security, restoring ecosystems, and establishing ecological protection systems in the region. [Methods] Taking the Keriya River basin as a study area, the InVEST model was employed to quantitatively evaluate the importance of key ecosystem services, including water conservation, soil retention, habitat quality, and carbon storage. An ecological sensitivity evaluation system was developed to assess regional ecological sensitivity and identify ecological sources. A minimum cumulative resistance model was used to construct an ecological resistance surface, and ArcGIS software was applied to delineate ecological corridors, ultimately forming the ESP of the basin. [Results] The Keriya River basin contains two ecological sources, with a

收稿日期: 2025-03-06

修回日期: 2025-04-22

采用日期: 2025-04-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于水盐失衡及格局—过程—修复的塔里木盆地边缘绿洲可持续扩展研究”(32160319); 新疆师范大学青年拔尖人才项目“基于水盐运移的于田绿洲可持续扩展模拟研究”(XJNUQB2023-10)

第一作者: 阿斯耶·奥布力塔力普(1995—), 女(维吾尔族), 新疆维吾尔自治区英吉沙县人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区绿洲环境演变。Email: Asiyea1003@163.com。

通信作者: 居麦尼亚孜·赛迪艾合麦提(1985—), 男(维吾尔族), 新疆维吾尔自治区洛浦县人, 副教授, 主要从事绿洲生态安全及土壤盐渍化的模拟模型研究。Email: jumeniyaz@xjnu.edu.cn。

total area of 4 610.47 hm², located in the forested and grassland regions in the central and southern parts of the basin. Three ecological corridors, with lengths of 582.75, 113.43, and 65.11 km, were identified. These corridors are crucial for facilitating species movement, conserving soil and water, and enhancing biodiversity. [Conclusion] Desertification control and sustainable forest management are paramount for the ecological environment of the Keriya River basin. Rational water resource allocation, the selection of vegetation suited for sand fixation, and development of economically valuable desert oases are essential to support ecological restoration and provide financial sustainability for the region.

Keywords: InVEST-MCR model; ecological function; ecological sensitivity; ecological security pattern

生态安全作为社会经济可持续发展的基础,其本质在于提升生态系统稳定性,旨在促进人类活动与生态环境之间的和谐共生,确保二者能够长期共存且相互促进。生态安全格局系指在景观水平上,由生态关键区域、特定地理方向以及其间的空间连接共同构成的一种潜在生态空间组织形式^[1]。构建生态安全格局对于指导区域性的生态保护策略具有至关重要的作用。

随着土地利用类型的快速转变,加之人类活动对环境的干扰强度的增加,各类生态环境问题越来越突出^[2]。因此,近几年来关于区域生态安全相关的研究引起诸多研究者的注意,其中生态安全格局的构建相关研究成为热点^[3]。构建生态安全格局时,以生态环境质量优越的生态系统为核心保护对象,旨在通过生态要素的识别与针对性保护措施,深入剖析并解决内部生态问题,进而提出科学合理的生态优化策略。这一过程对于确保区域生态系统的稳定性和生物多样性具有至关重要的意义,是维护生态安全的基础性工作^[4]。

目前,关于生态安全格局构建的研究逐步从单一的定性分析转变为多元化的定量分析,诸多相关研究中,主要以生态源地识别、生态阻力面构建、生态廊道的识别作为研究内容,最后构建区域生态安全格局,在此过程中运用多种生态因素识别与分析模型,较成熟的模型有MCR模型^[5]、电路理论^[6]、综合评价法^[7]、灰色关联分析(GRA)模型^[8]、MSPA模型等。其中,广为应用的最小累积阻力模型(MCR)模型因其能有效表征生态斑块、生态过程以及生态安全格局间的相互作用,而成为分析生态关联性、评估景观格局动态变化及构建生态阻力面的关键工具,在相关领域的研究中展现出显著的适用性与价值^[9]。此外,诸多研究者重点关注生态安全格局的构建原则、生态因素的选择、生态安全格局评价指标体系的创设、优化对策等,综合探究其中的规律及其研究方法。部分研究者将马尔可夫模型^[10]、CLUE-S模型^[11]、FLUS模型^[12]、PLUS模型等^[13]结合到生态

安全格局研究中,探索生态安全格局构建新方法^[14]。现有研究在时间尺度上集中于某一年的静态研究,而在空间尺度上,选择大尺度的流域或者生态安全等级较高的平原绿洲构建生态安全格局,对此进行优化,关于生态环境极其脆弱、气候干旱、空间尺度较小,但其生态功能以及所在位置对周边环境来说起关键作用的小尺度区域环境开展的研究较少。例如,田志强等^[15]人以辽宁省葫芦岛市为研究对象,基于FLUS模型预测葫芦岛市2030年不同情景下的土地利用结构与布局,并结合土地利用预测数据,耦合使用MSPA和MCR模型,构建葫芦岛市生态安全网络,提出相应的生态建设思路;丘思程等^[16]以漓江流域为研究对象,针对典型喀斯特地区自然环境特征,通过生态系统服务和生态敏感性评价选取生态源地,应用水土流失敏感性和石漠化敏感性叠加结果修正阻力面,利用MCR和重力模型识别生态廊道,构建漓江流域生态安全格局;孙梓渊^[17]以DEM、土地利用类型、植被覆度等数据作为基础构建生态安全格局,并构建了生态韧性评价框架,最后通过集成Fragstats与ConeforSensinode软件进行了全面评估,以此来深入探讨生态韧性在不同空间尺度上的表现及其影响因素。InVEST模型,即综合生态系统服务与权衡评估工具,旨在量化并模拟特定土地利用变化情景下生态系统服务的质量与价值变化,从而为政策制定者提供科学参考,以助其在考虑人类活动带来的效益与环境影响之间做出明智决策^[18]。

因此,本文以克里雅河流域为研究区,在参考前人研究的基础上,使用InVEST模型和MCR模型^[19],进行2023年生态服务功能重要性评估和生态敏感性评估,以此确定克里雅河流域核心源地与生态阻力面,判别潜在生态廊道,从而构建流域生态安全格局,对于保障流域的生态安全,保护生态环境系统,防止土地荒漠化等生态环境问题具有指导意义;同时,对于优化土地资源利用结构,提高土地资源利用效率,促进流域社会可持续发展具有重要的现实参考意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

克里雅河流域位于新疆维吾尔自治区塔里木盆地南端,昆仑山北坡与和田地区的东部交会处,具体范围涵盖了和田地区的于田县,其地理坐标为 $36^{\circ}30' - 37^{\circ}05'N, 81^{\circ}09' - 82^{\circ}03'E$ (如图 1 所示)。地形为南高北低,呈斜坡形,南部为高山,中部山前冲洪积扇及冲洪积平原,北部以沙漠为主。高山带海拔高度达 4 000 以上,是研究区河流的主要发源地^[20]。研究区属于温带大陆性沙漠气候,年平均气温 $11.6^{\circ}C$,年平均降水量 44.7 mm ,潜在蒸发量 $2\,498\text{ mm}$ 。总面积约 $3.95 \times 10^4\text{ km}^2$,全长 740 km ,年平均径流量 $7.22 \times 10^8\text{ m}^3$,仅次于和田河^[21]。流域地形地貌独特,土壤类型多样,主要包括砂质土、壤土和黄土等,这些土壤具有良好的排水性和肥力,适合多种农作物的生长。流域植被资源丰富,总覆盖率超过 30% 。主要植被类型包括草原、荒漠草原和森林植被等^[22]。

1.2 数据来源

本研究采用的数据包括 2023 年土地利用数据、

NDVI 数据、降水数据、DEM 数据、潜在蒸散发量数据、土壤数据、道路等数据和夜间灯光指数数据等。数据统一处理为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的栅格数据,数据来源见表 1。

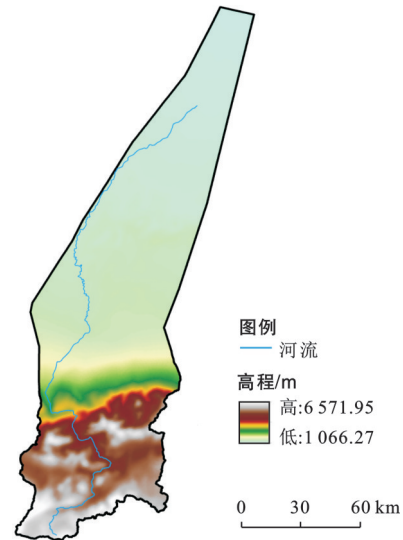


图 1 克里雅河流域地形

Fig. 1 Topography of Kriya River basin

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据类型	数据名称	数据精度/m	数据来源
土地利用数据	土地利用	30	中国科学院资源与环境数据中心
	植被覆盖度	30	中国科学院资源与环境数据中心
自然 环境 数据	DEM 高程	12.5	地理空间数据云
	年平均潜在蒸散发量	800	国家地球科学数据中心
	土壤侵蚀数据	800	世界和谐土壤数据库
	道路数据	800	中国科学院资源与环境数据中心
	水系数据	800	Open street map
	夜间灯光指数	500	中国科学院资源与环境数据中心
	坡度	800	国家地球科学数据中心
	坡向	800	国家地球科学数据中心
	年平均降水量	800	国家地球科学数据中心
	年平均气温	500	中国科学院资源与环境数据中心

1.3 研究方法

1.3.1 生态源地识别

(1) 生态服务功能重要性评价。

通过定量评估生态服务的供给能力,识别出生态系统服务供给的重要区域,可以作为研究区生态源地选取的方法^[23]。本研究考虑到克里雅河流域土地利用特征和生态环境状况,选择水源涵养、土壤保持、生境质量和碳固等 4 个方面来评估克里雅河流域生态服务功能的重要性。

水源涵养能力利用 ArcGIS 和水量平衡方程来估算,水量平衡法基于系统整体性原理,考虑水分输入与输出来核算生态系统持水量,需要降水量、蒸散发量和地表径流量 3 个参数即可估算,简单易操作,能够较为准确地计算水源涵养量,已得到广泛应用^[24]。计算公式如下:

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (1)$$

式中:TQ 为水源涵养量(m^3); P_i 为降水量(mm); R_i

为地表径流量(mm); ET_i 为蒸散发(mm); A_i 为*i*类生态系统的面积(m^2); n 为研究区生态系统类型总数。地表径流量(R_i)为降水量(P_i)与地表径流系数的乘积,地表径流系数主要通过查阅文献资料^[25]获得。

土壤保持、生境质量和碳储量服务功能分别使用InVEST模型中的沉积物输送率模块、InVEST模型中的生境质量模块和碳储量模块获取,并借助ArcGIG软件进行重分类。

(2) 生态安全敏感性评价。

①指标体系构建。自然环境、生物物种、人类活动作为主导生态系统环境的因素,因此应选取具有代表性的自然因素与人为因素作为生态敏感性的评价因子。本研究根据研究区自然地理条件、景观生态现状并结合相关研究成果,参考生态保护红线划定指南、全国生态功能区划以及相关参考文献等,选取2023年土地利用、植被覆盖度、道路的距离、水系的距离、高程、坡度、坡向、降水量和年均气温等9项指标并分低敏感区、较低敏感区、中敏感区、高度敏感区和极度敏感区等5个等级进行敏感性评价^[26]。

②指标权重确定。各评价指标对生态敏感性的影响程度存在差异,为此需要赋予指标相应权重,指

标权重直接决定评价结果的科学性、合理性,权重确定选用层次分析法。

完整而稳定的生态系统服务功能对维持区域生态安全具有重要作用,通常将生态系统服务功能具有同等重要性和生态敏感性评价叠加分析。因此本研究将3种生态系统服务功能进行等权叠加分析,采用自然断点法对生态系统服务功能分级,选取生态系统服务功能和生态敏感性较高的区域作为生态源地。

1.3.2 生态阻力面与生态廊道的构建

阻力面能够反映某区域生物迁移过程中遇到的阻碍,结合克里雅河流域生态环境现状,从景观生态、地形坡度和距离等方面选取土地覆盖类型、植被覆盖度、土壤侵蚀、高程、坡度、距离道路距离、距水系距离和夜间灯光共8个指标作为阻力因子构建综合生态阻力面。采用熵权法赋予各阻力因子指标阻力值,以便全面测算克里雅河流域生态阻力值,并根据阻力因子的重要程度,合理确定权重(表2),再使用ArcGIS空间分析方法进行多因子加权叠加,得到综合阻力面。结合夜间灯光数据与地形位指数构建综合修正指标,用于修正克里雅河流域综合阻力面。夜间灯光数据可以持续反映城市化、经济状况和人口密度等人为因素的空间分布特点。

表2 克里雅河流域生态敏感性评价指标等级及其权重

Table 2 Classes of ecological sensitivity evaluation indicators and their weights in Keriya River basin

权重	因子	低敏感区	较低敏感区	中敏感区	较高敏感区	高敏感区
0.138	土地利用	建设用地	未利用地	耕地	林地、草地	水域
0.189	植被覆盖度	0	(0~0.05)	[0.05~0.20)	[0.20~0.40)	≥ 0.40
0.052	道路的距离/m	>20 000	(10 000~20 000]	(5 000~10 000]	(1 000~5 000]	$\leq 1 000$
0.101	水系的距离/m	>10 000	(5 000~10 000]	(3 000~5 000]	(800~3 000]	≤ 800
0.115	高程/m	<1 500	[1 500~2 500)	[2 500~4 000)	[4 000~5 000)	$\geq 5 000$
0.104	坡度/(°)	<5	[5~15)	[15~25)	[25~35)	≥ 35
0.051	坡向	平地、正南	东南、西南	正东、正西	东北、西北	正北
0.129	降水量/mm	<35	[35~50)	[50~65)	[65~80)	≥ 80
0.121	年均气温/°C	>13	(8~13]	(0~8]	(-5~0]	≤ -5

MCR模型是经典的生态安全格局的构建模型,用于计算物种在不同生源地移动需要克服的阻力,生态系统功能越强,阻力越小^[27]。计算公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (2)$$

式中:MCR为最小累积阻力值; D_{ij} 为从景观单元*j*到*i*的空间距离; R_i 为景观单元*i*对生态过程的阻力系

数; f 为MCR与生态过程的正相关关系。

依据先前的研究成果并考量克里雅河流域特有的自然地理特征,本文选择了2023年包括土地覆盖类型、植被覆盖率、土壤侵蚀等8个关键指标(表3),构建了全面的生态阻力面模型。运用熵权法为各个阻力因子指标分配相应的权重,旨在全面评估克里雅河流域的生态阻力,并依据各因子的重要性进行

合理的权重设定,具体如表 3 所示。随后,通过引入 ArcGIS 的空间分析工具,执行多因子加权叠加操作,生成综合阻力面,以直观呈现流域整体的生态压力分布特征。

表 3 生态阻力面等级划分及权重

Table 3 Classification and weighting of ecological resistance surfaces

生态阻力因子	阻力等级					权重
	1	2	3	4	5	
土地利用类型	林地	草地	建设用地	水域	耕地和未利用地	0.077
植被覆盖度/%	(45~65]	(35~45]	(25~35]	(15~25]	(0~15]	0.057
土壤侵蚀模数/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	(0~10)	(10~20]	(20~30]	(30~40]	(40~50]	0.171
高程/m	(6 000~7 000]	(4 500~6 000]	(3 000~4 500]	(1 500~3 000]	(999~1 500]	0.109
坡度/(°)	(50~70]	(30~50]	(20~30]	(10~20]	(0~10]	0.120
距道路距离/m	(180,270]	(120,180]	(70,120]	(30,70]	(0~30]	0.074
距水系距离/m	(0~15]	(15~30]	(35~45]	(45~55]	(55~65]	0.075
夜间灯光	(0~10]	(10~20]	(20~35]	(35~45]	(45~52]	0.318

生态廊道是信息传递、物种迁徙和能量流动的载体,具有隔离保护的生态作用。本文采用 Linkage Pathway 工具提取源地间最小累积阻力路径确定为生态廊道。用 Centrality Mapper 工具计算累积电流,将廊道分为关键生态廊道与重要生态廊道。

2 结果与分析

2.1 生态服务功能重要性评价及生态源地识别

根据克里雅河流域生态系统服务功能重要性评价体系,计算出 2023 年水源涵养、土壤保持、生境质量和碳固持等功能,并使用自然断点法将其划分为一般重要、较重要、重要、高度重要和极重要 5 个等级,单一生态系统服务功能如图 2 所示。从生态服务功能空间分布可知,克里雅河流域水源涵养在南部

中高山区较高,由于研究区气候属于干旱沙漠气候,降水量少,蒸发量大,水源涵养服务功能低。

表 4 为单一生态服务功能所占面积及其在总区域内所占比例。结合研究区生态服务功能空间分布,可知研究区水源涵养和土壤保持功能低,生境质量和碳储量较高,4 种生态服务功能重要保护区域所占面积从高到低分别为 9 616.57, 8 897.78, 2 033.25, 259.67 km²,分别占总面积的 24.62%, 22.78%, 5.21% 和 0.66%;水源涵养功能和土壤保持功能表现出南部高、北部低的趋势,北部绿洲面积少,草地、林地、水域所占面积少,是生态服务功能偏低的原因;研究区生境质量所占面积最高,生境质量和碳储量面积主要分布于克里雅河流域耕地、草地、林地和水域所分布区域,是研究区主要生态服务功能类型。

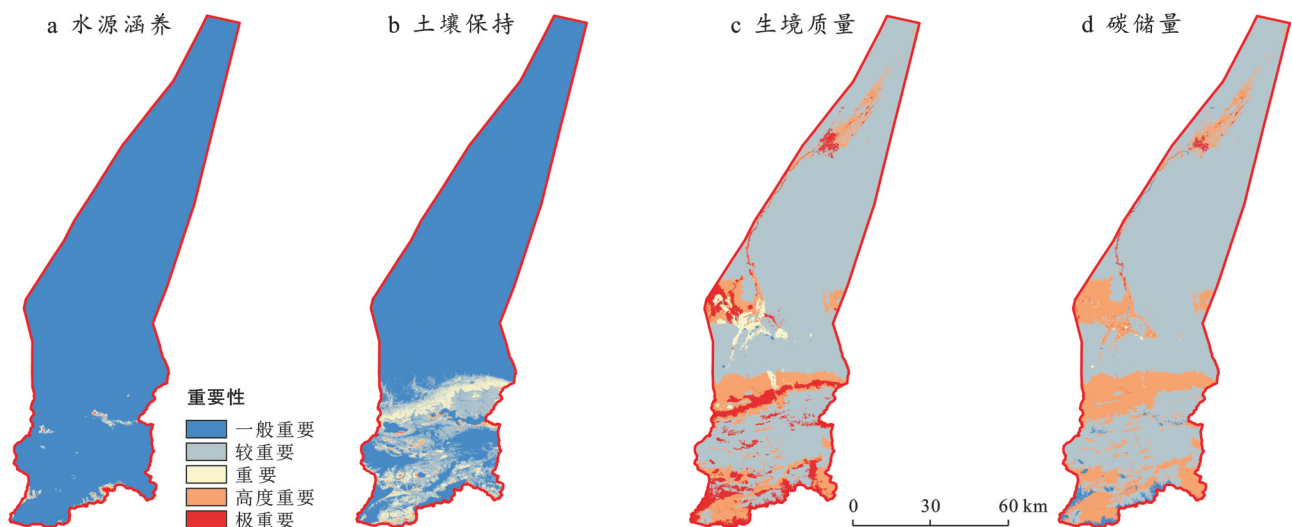


图 2 克里雅河流域生态服务功能重要性空间分布

Fig.2 Spatial distribution of importance of ecological services in Keriya River basin

表 4 克里雅河流域生态服务功能重要性
Table 4 Importance of ecological service functions in Keriya River basin

生态服务类型	等级	面积/km ²	重要区域面积/km ²	比例/%
水源涵养	一般重要	38 531.54	259.67	0.66%
	较重要	240.30		
	重要	158.44		
	高度重要	74.00		
	极度重要	27.23		
土壤保持	一般重要	32 109.40	2 033.25	5.21%
	较重要	4 915.32		
	重要	1 701.68		
	高度重要	296.68		
	极度重要	34.89		
生境质量	一般重要	41.15	9 616.57	24.62%
	较重要	29 404.43		
	重要	725.74		
	高度重要	5 646.87		
	极度重要	3 243.96		
碳储量	一般重要	791.11	8 897.78	22.78%
	较重要	29 373.26		
	重要	40.77		
	高度重要	8 647.08		
	极度重要	209.93		

根据生态服务功能重要性程度能够识别出克里雅河流域生态源地(图 3),共 2 个生态源点,总面积 4 610.47 hm²,最大面积 4 109.99 hm²,最小面积 500.48 hm²。研究区生态源点是克里雅河流域水源涵养区、生物多样性富集区或生态系统稳定区,位于克里雅河上游山地水源区与下游绿洲核心带。这 2 个源点作为生态网络的起点,对维持区域生态安全格局至关重要,能够明确生态保护核心,指导优先保护区域的划定,并为生态廊道规划提供空间依据,确保源点间的生态连通性,包括沿河植被带或防风固沙走廊,有效支撑生态修复工程布局,针对源点间的高阻力区实施精准治理。通过保护源点、优化廊道,可协调生态保护与发展的矛盾,为研究区生态安全体系构建、水资源可持续管理及生物多样性保护提供科学框架。

2.2 生态敏感性评价

对生态敏感性进行分级并分析各个级别所占比例以及空间分布情况,其中生态极敏感区域是明确需要着重保护与修复的区域,是分析生态环境资源承载力和开发国土空间适宜性评价的重要依据。生态敏感性评价为分析和预测区域出现生态系统

失衡问题和生态环境问题提供前提和基础,是生态环境影响分析和生态系统建设调控的必要内容和环节。

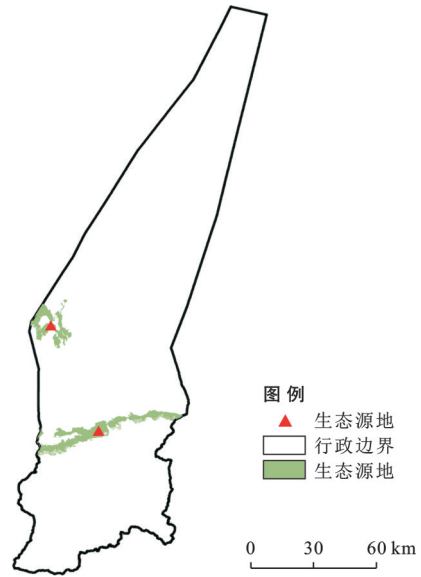


图 3 克里雅河流域生态源地

Fig.3 Ecological headwaters of Keriya River basin

各敏感性评价因子利用 ArcGIS 软件按照表 5 生态敏感性评价指标体系的评价指标分类区间重分类为 5 个等级,分别为低敏感、较低敏感、中度敏感、高度敏感和极度敏感,研究区 2023 年各评价因子面积和占比如表 5 所示。

生态环境问题通常是自然因素和人类活动综合作用的产物,因此对克里雅河流域生态环境敏感性进行评价时,不仅需要单一影响因子进行分析,同时也要综合考虑所有因子系统分析,从而获得克里雅河流域生态敏感性的整体分布特征。本文从自然环境、景观生态和人类活动 3 个方面分析生态敏感性的影响因素。

研究区土地利用敏感区域分布于克里雅河周边和以于田县为中心的平原绿洲区以及研究区南部的中、高山区域,草地、林地和水域为研究区敏感区域。低敏感区域面积为 43.34 km²,较敏感区域面积为 29 246.96 km²,占总面积的 74.93%,中度敏感、高度敏感和极度敏感区域面积共 9 742.44 km²,占总面积的 24.96%;植被覆盖度为 0 的低敏感区,其面积为 455.22 km²,植被覆盖度为 0~0.05,属于较低敏感区域,所占面积为 1 735.35 km²,中度敏感区域所占面积最大,为 43 024.71 km²,植被覆盖度在 0.05~0.20 之间,高度敏感和极度敏感区域面积为 8 245.70 km²,占总面积的 15.42%。研究区最高海拔为 6 964 m,最低为 1 030 m,中、高海拔区域分布于研究区南部,从南

往北海拔越来越低,高程敏感、高度敏感和极度敏感区域面积共 1 217.88 km²,占总面积的 31.18%;坡度在 0°~80°之间,且高程和坡度的一般敏感区域分布较为广泛,由此可知本研究区的海拔落差较大,但地

势较为平缓。高程与坡度的敏感和极敏感区域的总面积占比较小,主要分布在昆仑山北坡,极度敏感区域坡向正北,高度敏感区域坡向为东阿比和西北方向(图 4)。

表 5 克里雅河流域敏感性评价因子分级结果

Table 5 Grading results of sensitivity evaluation factors in Kriya River basin

评价因子	低敏感		较低敏感		中度敏感		高度敏感		极度敏感	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
土地利用	43.34	0.11	29 246.96	74.93	676.37	1.73	8 211.66	21.04	854.41	2.19
NDVI	455.22	0.85	1 735.35	3.25	43 024.71	80.48	5 567.25	10.41	2 678.45	5.01
道路的距离	31 966.70	81.89	3 259.16	8.35	1 828.14	4.68	1 565.15	4.01	418.74	1.07
水系的距离	23 300.45	59.69	6 697.35	17.16	3 119.79	7.99	3 813.21	9.77	2 107.08	5.40
高程	22 317.47	57.17	4 548.54	11.65	2 281.91	5.85	4 728.35	12.11	5 161.62	13.22
坡度	22 827.69	58.48	8 803.00	22.55	2 978.59	7.63	2 514.09	6.44	1 914.52	4.90
坡向	3 865.37	9.90	8 857.08	22.69	10 259.94	26.28	10 992.17	28.16	5 063.32	12.97
平均降水量	15 926.80	40.82	17 718.23	45.41	3 594.53	9.21	1 004.67	2.58	771.83	1.98
年均气温	23 618.77	60.54	3 768.91	9.66	1 742.59	4.47	3 600.67	9.23	6 285.11	16.11

克里雅河流域道路集中分布在于田县县城及附近,低敏感区域所占面积为 31 966.70 km²,在总面积中所占比例为 81.89%,离道路越近,敏感度越高,高度敏感和极度敏感区域总面积为 1 983.89 km²,所占比例小;距河流距离的一般敏感和中等敏感分布较为集中,主要分布在克里雅河流域附近,且由北向南敏感、高度敏感和极度敏感区域分布越来越密集,这是由于本研究区的降雨是由北向增加的。由于水源对人类生存的重要性,阈值的主观设定上更严格,距河流最近的极敏感等级比重是最小的,距河流最远的一般敏感等级比重反而最大。

此外,研究区气温和降水对研究区生态环境影响显著,直接影响物种分布、生态系统功能和稳定

性,对生态保护和气候变化应对具有重要意义。研究区降水量低敏感区域所占面积为 15 926.80 km²,在总面积中所占比例为 40.82%,较低敏感区域所占面积最大,为 17 718.23 km²,所占比例为 45.41%,中敏感、高度敏感和极度敏感区域总面积为 5 371.03 km²,占比共 13.77%,研究区降水少,气温高,属于干旱气候,敏感区域所占面积小于 50%;克里雅河流域平均气温在 -21.6~14.8℃之间,气温越高,蒸发量越高,越干旱。年均气温低敏感区域面积占比大于 60%,为 23 618.77 km²,其次为极度敏感区域,面积为 6 285.11 km²,所占比例为 16.11%。

克里雅河流域生态敏感性评价等级的面积和占比统计结果如表 6 所示,空间分布情况如图 5 所示。

表 6 克里雅河流域生态敏感性评价等级面积与占比统计

Table 6 Statistics on area and percentage of ecological sensitivity evaluation classes in Keriya River basin

低敏感		较低敏感		中度敏感		高度敏感		极度敏感	
面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
16 769.71	43.06	7 853.09	20.16	5 700.09	14.64	5 579.33	14.33	3 043.09	7.81

根据克里雅河流域生态环境敏感性结果分析可知,克里雅河流域生态敏感性低敏感区域、较低敏感区域、中敏感区域、高度敏感区域和极度敏感区域面积依次呈减少趋势,低敏感区域面积为 16 769.71 km²,与其他分级区域所占面积相比,所占比例最高,为 43.06%;较低敏感区域面积为 7 853.09 km²,占总面积的 20.16%,主要分布在克里雅河流域周边区域;研究区生态敏感性中等敏感区域面积为 5 700.09 km²,所

占比例为 14.64%,高度敏感和极度敏感区域面积分别为 5 579.33 km²,3 043.09 km²,所占比例分别为 14.33%和 7.81%。研究区中等敏感、高度敏感和极度敏感区域所占比例共 36.78%,小于低敏感和较低敏感区域所占的面积,主要分布在研究区南部中高山区域,主要土地利用类型以草地、林地和水域为主。生态低敏感区域主要分布于研究区北部,所占比例较大,接近于 50%,说明研究区生态环境依旧很

脆弱,受恶劣的自然环境和人类活干扰影响较大,需要采取合理的生态修复措施,防沙治沙,植树造林等

互殴措施着重执行,逐渐恢复克里雅河流域脆弱的生态环境,提升生态环境安全性。

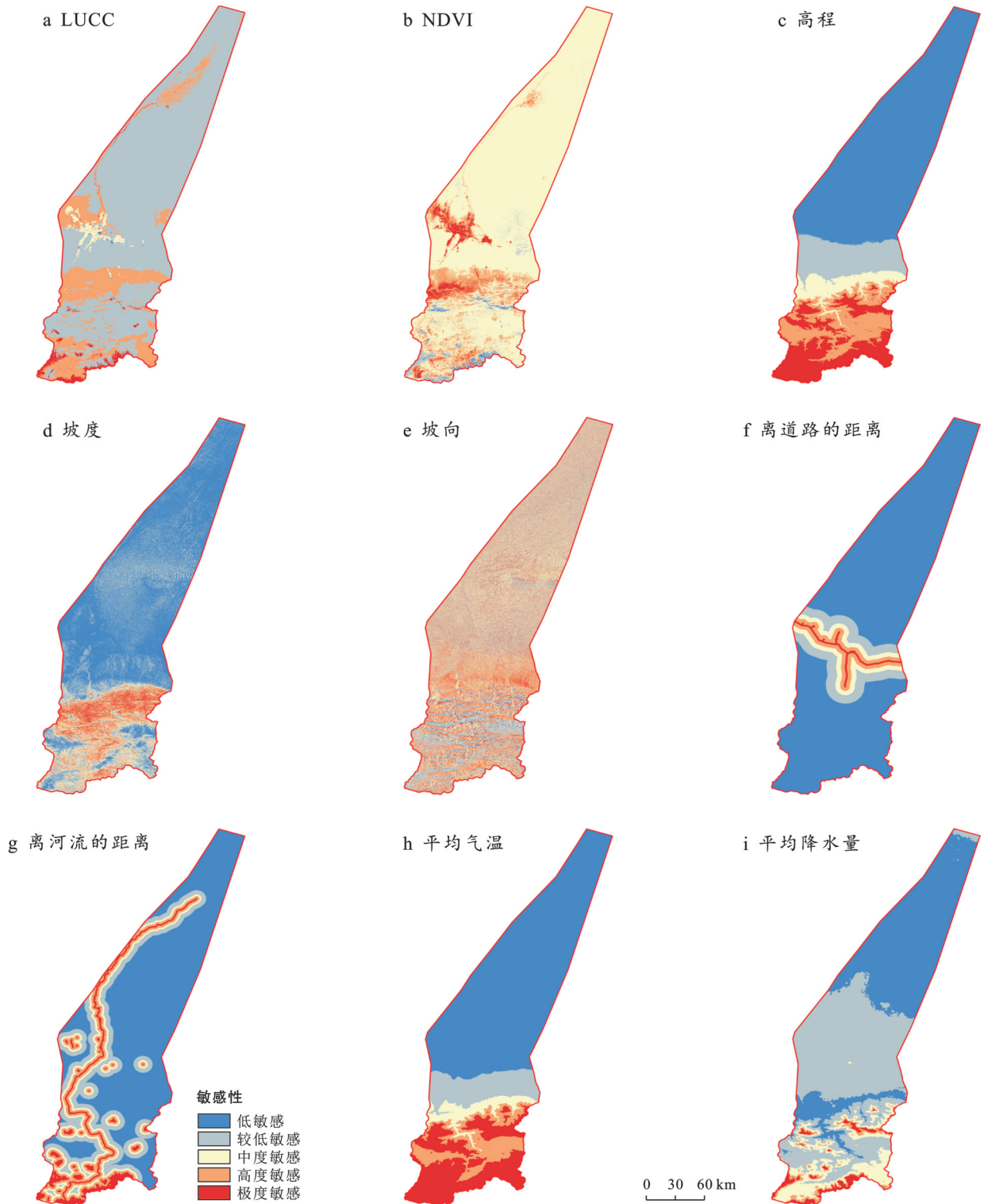


图 4 克里雅河流域生态敏感性因子空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological sensitivity factors in Kriya River basin

2.3 生态阻力面与生态廊道的构建

基于表 3 中生态阻力面各指标的权重要素,对研究区域内的生态阻力值进行了综合分析评估。单因子阻力面分析结果和综合阻力面结果如图 6—7 所

示。由于林地、草地与水域等特定的土地利用形式因其较低的阻力值而被识别为对研究区域生态服务功能贡献显著的地理单元。与此相对,阻力值较高的区域主要聚集在受人类活动强烈影响的土地类型

中,如耕地与建设用地,这些区域由于高强度的人类干预而展现出较高的生态系统服务阻力;此外,未利用地生态服务价值偏低,克里雅河流域未利用地面积占总面积的 $2.94 \times 10^6 \text{ hm}^2$,在多数区域内,生态系统呈现出较高的生态阻力特征,这主要归因于沙漠环境的固有属性。在克里雅河流域的中部地区,植被归一化指数阻力值达到最高水平,而南部地区的该值则相对较低。土壤侵蚀阻力值呈现出普遍偏低的特点,其中北部地区的数值低于南部。随着海拔的递增,数字高程阻力值呈现出逐渐升高的趋势,由此导致了克里雅河流域南部的数字高程阻力值显著高于中部和北部区域。此外,坡度阻力值亦揭示出南部地区高于北部的分布特征。研究区南部海拔高,地形地貌类型属于中高山区域,坡度比北部平原绿洲大,导致研究区南部坡度阻力值大于北部;由于研究区离克里雅河距离近,河流周边阻力值小,随着距离的增加,生态阻力值增加,东北部最高。

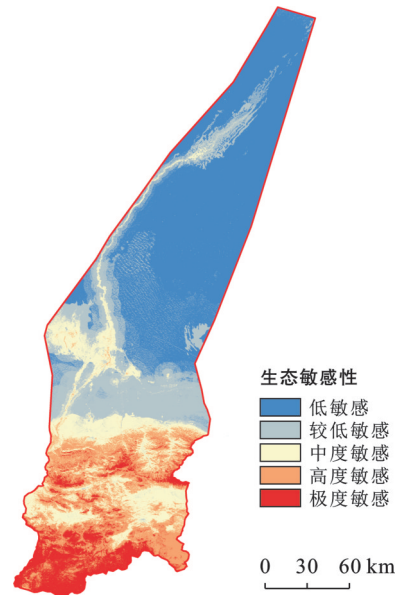


图5 克里雅河流域综合生态敏感性评价空间分布
Fig.5 Spatial distribution of integrated ecological sensitivity evaluation in Kriya River basin

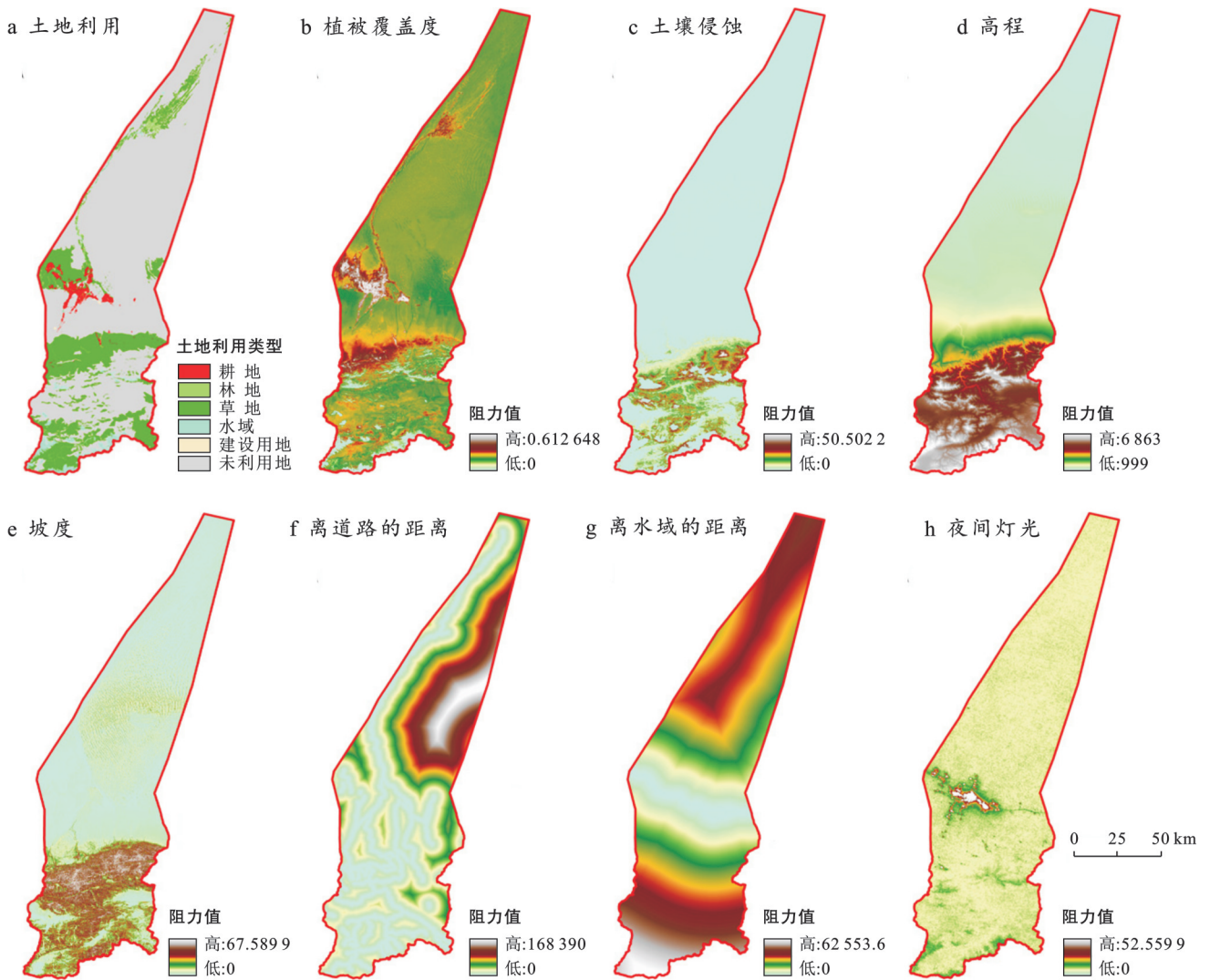


图6 克里雅河流域单因子生态阻力面
Fig.6 Single-factor ecological resistance surface in Kriya River basin

综合分析克里雅河流域生态综合阻力面空间分布图(图7)及其所占面积统计结果(表7)可知,研究区从北到南呈减少趋势,北部以未利用地作为主要土地利用类型的区域阻力值高,相应地,北部区域水源涵养、土壤保持等功能偏低,植被覆盖度低,草地、林地面积小,生态环境脆弱。生态阻力值极低区域位于南部中、高山区域,其面积为2 711.43 km²,

依次生态阻力值较低区域面积为3 304.42 km²,生态阻力值一般低区域所占面积高于较低区域,为3 757.49 km²,生态阻力值极低、较低、一般低区域所占比例共占研究区总面积的25.05%,约占研究区总面积的四分之一,此结果表明研究区生态环境极其脆弱,亟需采取相应的生态修复及提升生态安全性的措施。

表7 克里雅河流域生态阻力面等级及其所占面积

Table 7 Classes of ecological resistance surfaces and area they occupy in Kriya River basin

项目	极低区域		较低区域		一般低区域		较高区域		极高区域	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
数值	2 711.43	6.95	3 304.42	8.47	3 757.49	9.63	8 915.83	22.86	2 0316.25	52.09



图7 克里雅河流域生态综合阻力面
Fig.7 Ecologically integrated resistance surfaces in Kriya River basin

总面积为4 610.47 hm²,最终成果受该区域政策保护,并引导和保障生态环境可持续发展,对维护克里雅河流域湿地系统、河流水系的自然形态、绿道体系具有重要意义。

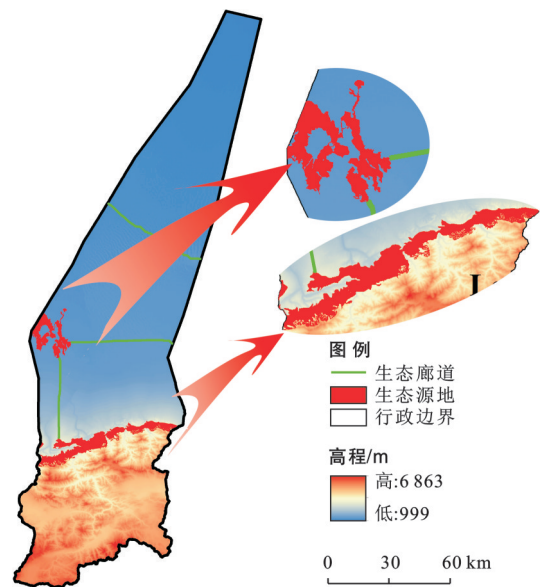


图8 克里雅河流域生态安全格局
Fig.8 Patterns of ecological security in Keriya River basin

2.4 生态安全格局的构建及优化

通过MCR模型识别出研究区生态廊道共3条,廊道长度分别为582.75, 113.43, 65.11 km,平均为253.76 km(图8)。研究区生态廊道数量少,长度相对较短,从北部到南部位于“湿地-平原绿洲-高山区”区域,使克里雅河流域较分散的生态单元连接起来,实现空间上的物种的扩散、迁移和交换,是构建研究区生态安全格局的重要组成部分,具有连接破碎生态环境、促进物种活动和迁移、水土保持和提高生物多样性等功能。克里雅河流域生态重点区域主要位于北部的达里雅布依乡周边的湿地公园和于田县周边的平原绿洲以及南部的中高山区域草地和林地等3部分,构成研究区生态源地。区域尺度的生态安全格局由该区域识别的生态源地和生态廊道所构成,

克里雅河流域生态环境存在的问题主要包括土壤盐渍化严重、风沙危害、水土流失等,科学治理研究区存在的生态问题,确保研究区生态系统的健康与稳定性;为了优化生态安全格局,推动经济发展与环境保护的平衡,在经济活动中注重环境保护,在保护中不懈怠经济发展。克里雅河流域由于生态环境脆弱,需要很多资金来维持区域生态环境的稳定性,因此,在保护中注重经济发展是克里雅河流域重点研究内容。在经济策略中,强调环境可持续性的理念日益凸显,注重构建生态廊道,提升生态环境质量的同时,旨在实现经济活动与环境保护的和谐共生,确保发展进程中的资源利用效率与生态系统

的健康稳定,从而避免因过度开发而导致的长期经济与环境风险。在探讨克里雅河流域生态保护与发展的平衡问题时,重点关注如何在确保区域生态环境稳定性的前提下,合理引导经济,以实现可持续发展目标。

3 讨论

近年来,克里雅河流域土地利用/覆被变化显著改变了区域生态系统的服务功能和敏感性,对流域可持续发展构成严峻挑战^[28]。研究表明,草地、林地和水域作为核心生态用地类型,其空间格局的动态演变直接影响流域生态服务价值(ESV)的时空分异特征。然而,在人口增长和经济发展的驱动下,耕地和建设用地的扩张导致生态用地不断萎缩,景观破碎化程度加剧。加之,克里雅河流域生态环境脆弱,自然灾害频繁,导致生态源地面积减少,生态廊道长度缩短、连通性降低。这一趋势不仅削弱了生态系统的服务供给能力,还加剧了生态保护与社会发展之间的矛盾,亟需通过科学调控实现二者的协同优化。

3.1 生态安全格局与生态服务功能、生态敏感性的耦合关系

本研究基于InVEST模型评估了生态服务功能重要性(水源涵养、土壤保持、生境质量和碳储量)及生态敏感性,并结合MCR模型构建了克里雅河流域生态安全格局(ESP)^[29]。研究发现,生态服务功能与生态源地的空间分布高度一致,高服务功能区域(如林地、高覆盖草地)往往对应生态敏感性较高的区域,表明这些生态系统具有较强的稳定性与抗干扰能力。沙漠边缘、坡度较高的较低生态敏感性的区域常与生态阻力高值区重合,反映了人类活动(如耕地扩张、城镇建设)对生态系统的胁迫效应。为此,在生态安全格局的构建及优化研究中,需要综合考虑服务功能与敏感性,在水源涵养能力较弱的区域(如流域下游),应优先修复生态廊道以增强景观连通性,而在生态敏感性较高的沙漠—绿洲过渡带,需重点实施防风固沙措施以降低生态阻力。

3.2 生态安全格局构建的科学性与优化策略

本研究采用“生态源地识别—阻力面修正—廊道提取—格局优化”的框架,并结合地形、植被覆盖及夜间灯光数据修正阻力面,提高了生态廊道识别的准确性。结果表明,林地和草地对克里雅河流域生态服务功能的贡献最大,生态服务功能重要区域和高度、极度敏感区域均位于林地、草地和水域分布区域,其水源涵养和碳储存功能尤为突出,应作为核心生态源地予以严格保护。耕地扩张和未利用地沙

化显著增加了生态阻力,尤其在流域北部沙漠边缘,生态阻力值较自然生态系统高40%~60%,导致生态廊道断裂化。另外,根据研究区ESP评估结果,以生态源地和生态廊道为重点修复对象,提出3个优化措施:①核心源地保护,划定高生态服务价值区为优先保护区;②关键廊道修复,沿河流和绿洲—荒漠交错带构建生态廊道网络;③阻力热点治理,在人类活动密集区实施生态修复工程,如退耕还林、防风固沙等,逐渐改善生态环境。

3.3 研究不足与未来展望

本研究中,尽管识别核心生态源地和潜在生态廊道,构建了较为系统的生态安全格局,但仍存在不足。首先,生态服务功能评估体系有待完善,未来应纳入气候调节(如降水再分配)、灾害防控(如沙尘暴阻滞)及文化服务(如生态旅游)等指标,以更全面识别生态源地^[30];其次,生态安全格局的动态响应机制尚未量化,建议结合多情景模拟分析ESP的长期演变趋势。后续研究应聚焦生态修复成效评估,例如,监测廊道连通性对物种迁移的影响,或评估防风林带对降低沙尘暴频率的效果,以优化生态管理策略。

4 结论

(1) 克里雅河流域生态服务功能和生态敏感性呈现出南部大于北部,其较高的区域多为林地和草地,建设用地和未利用地生态服务功能和生态敏感性偏低,由于流动沙漠面积较大,导致研究区水源涵养和土壤保持功能较低。

(2) 生态源地识别结果显示,研究区有2块生态源地,总面积为4 610.47 hm²,最大斑块面积为4 109.99 hm²,最小斑块面积为500.48 hm²,位于研究区中、南部林地、草地聚集分布的区域;生态廊道共3条,廊道长度分别为582.75, 113.43和65.11 km,平均为253.76 km,数量少,长度短,位于于田县达里雅布依乡湿地公园附近、于田县平原绿洲和南部中高山区域。

(3) 目前,对于克里雅河流域生态环境而言,防沙治沙、以林养林极为重要,合理支配水资源,选择适合防沙治沙的植物进行种植,建设沙漠绿洲并创造经济价值,为研究区生态修复提供经济支撑。

参考文献(References)

- [1] Cao Cui, Luo Yutian, Xu Liping, et al. Construction of ecological security pattern based on InVEST-conefor-MCRM: A case study of Xinjiang, China [J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111647.
- [2] 陈荷生. 克里雅河流域生态环境变化与水资源合理利用

- [J]. 中国沙漠, 1990, 10(3): 1-12.
- Chen Hesheng. Ecological environment changes and rational utilization of water resources in the Keriya River basin [J]. *Journal of Desert Research*, 1990, 10(3): 1-12.
- [3] 葛耀鹏. 基于生态系统服务的大别山地区生态安全评价与空间格局构建[D]. 河南 开封: 河南大学, 2024.
- Ge Yaopeng. Ecological security assessment and spatial pattern construction in Dabie Mountains based on ecosystem services [D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2024.
- [4] 石淞. 国土空间生态保护修复视角下东北森林带生态安全格局构建与关键区域识别[D]. 黑龙江 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- Shi Song. Construction of ecological security patterns and identification of key areas in the Northeast China forest belt from the perspective of territorial spatial ecological protection and restoration [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2024.
- [5] 蒋毓琪, 杨怡康, 田文博, 等. 黄河流域碳生态安全水平空间格局与动态演进[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(5): 419-425.
- Jiang Yuqi, Yang Yikang, Tian Wenbo, et al. Spatial pattern and dynamic evolution of carbon ecological security level in Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(5): 419-425.
- [6] 管人金, 陈优良, 黄孝斌, 等. 基于PLUS-InVEST模型的赣南地区土地利用多情景模拟及生态系统服务响应[J/OL] (2025-02-07). *环境科学*, 2025: 1-23. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202411012>.
- Guan Renjin, Chen Youliang, Huang Xiaobin, et al. Multi-scenario simulation of land use and response of ecosystem services in Gannan based on PLUS-InVEST model [J/OL] (2025-02-07). *Environmental Science*, 2025: 1-23. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202411012>.
- [7] Kan Heng, Ding Guanqiao, Guo Jie, et al. Identification of key areas for ecological restoration of territorial space based on ecological security pattern analysis: A case study of the Taihu Lake city cluster [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(8): 2217-2227.
- [8] Lei Yu, Li Xiangquan, Ling Hongbo. Model for calculating suitable scales of oases in a continental river basin located in an extremely arid region, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 571-580.
- [9] Li Jiatong, Liu Yang, Gani A A, et al. Identification of ecological security patterns for the Qiandongnan ecotourism area in southwest China using InVEST and circuit theory [J]. *Forests*, 2023, 14(7): 1316.
- [10] Cong Zhongxiao, Yang Shuo, Zhu Baokun, et al. Identification of key ecological restoration areas based on ecological security patterns and territorial spatial ecological restoration zoning: A case study of the middle and lower reaches of the Yellow River in China [J]. *Journal for Nature Conservation*, 2025, 84: 126793.
- [11] 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.
- [12] Zhou Luhong, Wang Panting, Bai Yuxia. Optimization of the ecological security pattern in Xi'an City based on a minimum cumulative resistance model [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(6): 1127-1137.
- [13] 陈刚, 吴孟泉, 王强, 等. 基于MSPA和电路理论的生态安全格局构建研究: 以烟台市福山区为例[J]. *鲁东大学学报(自然科学版)*, 2025, 41(2): 145-155.
- Chen Gang, Wu Mengquan, Wang Qiang, et al. Construction of ecological security pattern based on MSPA and circuit theory: A case study of Fushan District, Yantai city [J]. *Journal of Ludong University (Natural Science Edition)*, 2025, 41(2): 145-155.
- [14] 田志强, 刘硕, 顾鹏程, 等. 基于MSPA-MCR-FLUS模型的葫芦岛市生态安全格局构建[J/OL] (2024-09-04). *农业资源与环境学报*, <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=NHFZ20240902001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- Tian Zhiqiang, Liu Shuo, Gu Pengcheng, et al. Construction of Huludao's ecological security pattern based on MSPA-MCR-FLUS model [J/OL] (2024-09-04). *Journal of Agricultural Resources and Environment*, <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=NHFZ20240902001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [15] 丘思程, 胡金龙, 杨淮深. 基于生态系统服务和生态敏感性评价的漓江流域生态安全格局构建[J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(6): 153-162.
- Qiu Sicheng, Hu Jinlong, Yang Huaishen. Construction of ecological security pattern in the Lijiang River basin based on the assessment of ecosystem services and ecological sensitivity [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(6): 153-162.
- [16] 孙梓渊, 王赛鸽, 陈彬. 基于生态系统服务的生态安全格局构建与生态韧性评估: 以长株潭城市群为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4650-4661.
- Sun Ziyuan, Wang Saige, Chen Bin. Construction of ecological security pattern and assessment of ecological resilience based on ecosystem services: A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4650-4661.

- [17] 田锐,郑嘉鑫,宋东阳,等.基于生态系统服务价值与生态安全格局的国土空间生态修复区域识别:以天津市蓟州区为例[J].兰州大学学报(自然科学版),2024,60(4):456-465.
Tian Rui, Zheng Jiaxin, Song Dongyang, et al. Identification of ecological restoration of territorial space based on ecosystem service value and ecological security pattern: A case study of Jizhou District, Tianjin City [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2024,60(4):456-465.
- [18] Qin Menglin, Liu Yuting, Tan Qianxi, et al. Territorial ecological restoration with a high-carbon storage focus in the Beibu Gulf urban agglomeration of China: Insights from carbon metabolism spatial security patterns [J]. Chinese Geographical Science, 2025,35(1):73-91.
- [19] 娜迪热·艾克拜尔,居麦尼亚孜·赛迪艾合麦提,满苏尔·沙比提.克里雅河流域地表径流与景观格局相关性分析[J/OL](2025-05-21).水生态学杂志,https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1785.x.20240517.1946.001.html.
Nadira Akbar, Jumeniyaz Seydehmet, Mansur Shabiti. Correlation analysis of surface runoff and landscape pattern in Keriya River basin [J/OL] (2025-05-21). Journal of Hydroecology, https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1785.x.20240517.1946.001.html.
- [20] 王友年.克里雅河流域平原区土地利用类型时空演化规律及驱动因素分析[J].水利规划与设计,2024(5):84-89.
Wang Younian. Spatial-temporal evolution law and driving factor analysis of land use types in the plain area of the Keriya River basin [J]. Water Resources Planning and Design, 2024(5):84-89.
- [21] 李进宝,何学敏,黄鹏程,等.克里雅河流域水系结构及连通性特征[J/OL](2024-09-10).中国水土保持科学(中英文),https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1449.s.20240909.1758.006.html.
Li Jinbao, He Xuemin, Huang Pengcheng, et al. Characterization of water system structure and connectivity in the Kriya River basin [J/OL] (2024-09-10). Science of Soil and Water Conservation, https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1449.s.20240909.1758.006.html.
- [22] 张亚楠.基于生态保护重要性的彭州市生态安全空间格局构建及管控策略[D].四川雅安:四川农业大学,2023.
Zhang Yanan. Construction and control strategy of ecological security spatial pattern in Pengzhou City based on the importance of ecological protection [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2023.
- [23] 杨骥鸿.基于生态系统服务供需的城市生态安全格局构建与管控:以临沂市为例[D].山东济南:山东建筑大学,2023.
Yang Qihong. Construction and control of urban ecological security pattern based on supply and demand of ecosystem services [D]. Jinan, Shandong: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [24] 潘竞虎,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[J].生态学杂志,2016,35(3):791-799.
Pan Jinghu, Liu Xiao. Landscape ecological risk assessment and landscape security pattern optimization in Shule River basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(3):791-799.
- [25] 李振亚,魏伟,周亮,等.基于空间距离指数的中国西北干旱内陆河流域生态敏感性时空演变特征:以石羊河流域为例[J].生态学报,2019,39(20):7463-7475.
Li Zhenya, Wei Wei, Zhou Liang, et al. Temporal and spatial evolution of ecological sensitivity in arid inland river basins of northwest China based on spatial distance index: A case study of Shiyang River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20):7463-7475.
- [26] Wang Wei, Wang Haofei, Qian Xiaojin. Pattern evolution and spatial structure of ecological and construction security network of the Yangtze River economic belt in China [J]. Environment, Development and Sustainability, 2024:1-21.
- [27] Xue Fei, Yang Yunrui, Hu Yi'na. Integrating supply and benefits of ecosystem services into ecological security pattern: A spatial flow perspective [J]. Ecological Indicators, 2024,166:112455.
- [28] 栾春风,郭欣然.生态安全格局视角下的土地利用冲突识别研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(5):156-164.
Luan Chunfeng, Guo Xinran. Research on land use conflict identification from the perspective of ecological security pattern [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023,47(5):156-164.
- [29] 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.
- [30] 林港特,吴耀炜,袁海威,等.中国东部超大城市群生态安全格局的构建与优化策略[J/OL](2025-02-07).环境科学,https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkk.202410273.
Lin Gangte, Wu Yaowei, Yuan Haiwei, et al. Construction and optimization strategy of ecological security pattern of megalopolis in eastern China [J/OL] (2025-02-07). Environmental Science, https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkk.202410273.