

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202303001



地质灾害敏感性下的伊犁河谷 生态安全格局构建

余芳瑞^{1,2}, 王宏卫^{1,2}, 钱田田^{1,2}, 谢玲^{1,2}, 魏一鸣^{1,2}

(1. 新疆大学 地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
2. 新疆大学 新疆绿洲生态自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 利用 Conefor 2.6 软件计算有林地与灌林地的景观连通性,选取生态源地,以坡度、地层岩性、土壤类型、归一化植被指数、年平均降雨量、年平均融雪量、距道路距离、距采矿用地距离 8 个地质灾害敏感因子评价地质灾害敏感性.利用评价结果对阻力面进行修正,基于电路理论,提取生态廊道、识别生态夹点、生态障碍点,构建生态安全格局,提出生态保护和地质灾害防治策略.结果表明:伊犁河谷地质灾害敏感性高值区主要集中在道路及河流附近,其中,西南部谷盆地地质灾害敏感性最高;37 个生态源地主要集中在山区;75 条最优生态廊道和 53 处生态夹点多分布于建设用地周围,主要用地类型为草地;9 个生态障碍点大多位于最优廊道上,部分紧邻生态夹点.

关键词: 生态安全格局; 地质灾害敏感性; 电路理论; 伊犁河谷

中图分类号: X 826; F 205

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)04-0510-08

Construction of Ecological Security Pattern in Yili River Valley Under Geological Hazard Sensitivity

YU Fanrui^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, QIAN Tiantian^{1,2},
XIE Ling^{1,2}, WEI Yiming^{1,2}

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Xinjiang Oasis Ecological Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: The connectivity between forested and irrigated landscapes is calculated using Conefor 2.6 software, and the ecological source areas are selected. The sensitivity of geological hazards is evaluated from 8 geological hazard sensitive factors, including slope, stratigraphic lithology, soil types, normalized vegetation indexes, average annual rainfall amount, average annual snowmelt amount, distance from road and distance from mining land. The resistance surface is modified using the evaluation results. The circuit theory is used to extract ecological corridors, identify ecological pinch points and ecological obstacles, construct ecological security patterns, and ecological protection and geological disaster prevention strategies are put forward. The results show that, the high sensitivity areas to geological hazards in Yili River Valley are mainly located near roads and rivers, and the southwest valley basin has the highest geological hazard sensitivity. 37 ecological source areas are mainly concentrated in mountainous areas, 75 optimal ecological corridors and 53 ecological pinch points

收稿日期: 2023-03-01

通信作者: 王宏卫(1967-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事乡村地理学的研究. E-mail: wanghw_777@xju.edu.cn.

基金项目: 第三次新疆综合科学考察资助项目(2021xjkk0902)

mostly distributed around construction land where the main land type is grassland, and 9 ecological obstacles are mostly located on the optimal corridors, some of which are close to ecological pinch points.

Keywords: ecological security pattern; geological hazard sensitivity; circuit theory; Yili River Valley

频发的自然灾害对生态安全构成巨大威胁,对生态环境产生负面影响^[1-2],国土空间的生态保护与生态修复迫在眉睫^[3-4]. 生态保护区域与生态修复区域的科学识别是国土空间生态的重点与难点^[5],生态保护与生态修复措施是未来亟需解决的问题.

生态安全格局主要用于识别生物保护区域和生态恢复区域^[6],已经形成了“源地识别、阻力面构建、廊道提取”的基本研究范式^[7]. 文献[8-9]直接以林地、草地、水域或者国家森林公园^[10]、自然保护区^[11-12]等作为生态源地,文献[13-14]选取生态系统重要性和敏感性较高的地方作为生态源地. 文献[15-18]研究生态源地景观整体性和连通性,以及生态源地面积阈值,从而更加科学合理地确定生态源地. 对于阻力面的构建,最初的研究大多通过坡度、高程、植被覆盖、距道路距离等因素组成的千层饼式的方法^[16,19]或直接利用土地利用类型赋值^[20]的方法确定阻力面. 文献[5,21-23]利用夜间灯光指数、生态风险指数等对阻力面进行修正. 对于地质灾害多发区阻力面的修正,文献[7,24-25]利用地质灾害敏感性评价对阻力面进行修正. 目前,对于地质灾害评价因素大多只考虑到坡度、降水、植被覆盖等,而对于常年有积雪堆积的地区,需要考虑积雪融水引发地质灾害. 基于此,本文对地质灾害敏感性下的伊犁河谷生态安全格局构建进行研究.

1 研究概况与数据来源

1.1 研究区概况

伊犁河谷位于新疆天山山脉西段伊犁河流域上游,地理位置位于 80°09'~84°56'E,42°14'~44°50' N 之间,伊犁河谷东面、南面、北面三面环山,呈向西开口的喇叭形状. 源于大西洋温湿气流从西面给伊犁河谷带来相对丰富的降水(形成半干旱、半湿润的中温带大陆性气候),是新疆最湿润地区,也是新疆生物多样性最高区域. 伊犁河谷不仅是中亚山地残遗物种、众多珍稀濒危物种、特有物种的重要栖息地,也是中亚山地生物“物种基因库”,被列入全国陆地生物多样性保护优先区域^[21]. 然而,由于人类活动影响,河谷内黄土广布,夏季降水偏多,区域内易造成降水-融雪型洪水,洪水引发滑坡、泥石流灾害,地质灾害多发.《新疆地质灾害防治十四五计划》将伊犁谷地设置为重点防治区.

研究区示意图,如图 1 所示.

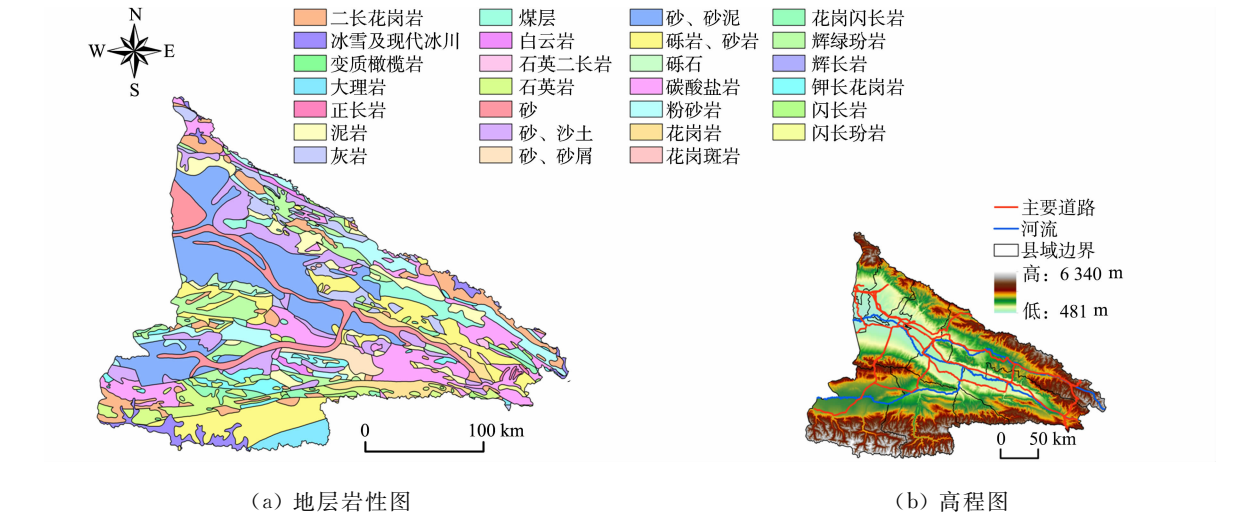


图 1 研究区示意图
Fig. 1 Sketch diagram of research area

1.2 数据来源

数字高程模型(DEM)数据与归一化植被指数(I_{NDV})数据来自地理空间数据云([https:// www.](https://www.)

gscloud.cn/);坡度数据由 DEM 数据提取;行政边界数据、河流数据、道路数据、壤类型数据、地质岩性数据、土地利用数据(2020 年)均来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>);降水量数据来自国家地球系统科学数据中心地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>);雪深数据来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdac.ac.cn/>)中国雪深长时间序列数据集(1979—2020 年);采矿用地数据来自于全国第 2 次土地调查数据;生态功能区划数据来源于中国生态系统评估与生态安全格局数据库(<http://www.ecosystem.csdb.cn/>).

2 研究方法

2.1 伊犁河谷地质灾害敏感性评价

地质灾害可能会通过改变地形地貌进一步影响研究区固有生态廊道,从而一定程度上影响物种之间的交流和生态廊道的连通性^[7].伊犁河谷地质灾害的发生主要与降雨、植被覆盖、坡度、地质岩性、土壤类型、融雪量、人类工程活动有关^[26-31],将地质灾害敏感性分为 5 个等级^[32-33].地质灾害敏感性评价指标体系,如表 1 所示.表 1 中: θ 为坡度; l_R 为伊犁河谷距道路的距离; l_K 为伊犁河谷距采矿用地的距离; $d_{a,r}$ 为年平均降雨量(2015—2020 年平均降水数据^[34]); $d_{a,s}$ 为年平均融雪量(研究区融雪期为 2~7 月,2016—2020 年平均雪量数据).

表 1 地质灾害敏感性评价指标体系
Tab. 1 Evaluation index system of geological hazard sensitivity

评价指标	地质灾害敏感性等级					权重
	1	2	3	4	5	
$\theta/(^{\circ})$	<5	5~15	15~25	25~35	>35	0.118 0
地层岩性	辉长岩、辉绿玢岩、石英岩、大理岩、闪长玢岩、石英二长岩	二长花岗岩、钾长花岗岩、闪长岩、花岗岩、花岗闪长岩、钙质、花岗斑岩、碳酸盐岩、白云岩、变质橄榄岩、正长岩	砾石、变质碳酸岩、煤层	灰岩、泥岩、粉砂岩、砾岩、砂岩、卵石夹砂、冰雪及现代冰川	黄土、砂屑、砂、沙土、岩屑、砂泥、漂砾	0.167 9
土壤类型	灌淤土、沼泽土、冰川和雪被	高山草甸土、内陆盐土、灰色草甸土	亚高山草甸土	灰钙土、棕钙土	黑钙土、栗钙土、灰褐土	0.112 1
I_{NDV}	>0.75	0.55~0.75	0.35~0.55	0.25~0.35	<0.25	0.047 0
l_R/m	>3 000	2 000~3 000	1 000~2 000	500~1 000	<500	0.222 2
l_K/m	>2 000	1 500~2 000	1 000~1 500	500~1 000	<500	0.111 1
$d_{a,r}/mm$	203~250	250~300	300~350	350~400	>400	0.094 5
$d_{a,s}/mm$	8~15	15~18	18~21	21~25	25~30	0.127 2

2.2 生态源地的识别

生态源地是生态安全格局的核心,生态功能良好,生物资源丰富^[26].伊犁河谷林草肥美,整体生态较好,主要有马鹿、棕熊、石貂等国家二级保护动物.因此,采取优中选优的原则,选取林地与灌木林作为源地备选.又由于林地与灌木林斑块较为破碎,采用聚合分析,在 500,1 000,1 500,2 000 m 中选取聚合效果最好的 1 000 m 作为聚合距离,将聚合后斑块确定为初选源地.考虑到景观结构的空間连接程度会影响生物迁徙过程^[7],基于 Conefor 2.6 软件,将各斑块的景观连接性的可能连通性指数(I_{PC})和整体连通性指数(I_{IC})的均值大于 0.05 且面积大于 10 km² 的生态斑块划分为生态源地^[16].对照最终所选生态源地与伊犁河谷生态保护红线,发现 98.6% 以上源地均位于生态保护红线以内.

2.3 生态阻力面的构建

阻力面能够反映物种迁移与能量流动的困难程度^[27],科学构建生态阻力因子对生物多样性保护具有重要意义^[15].不同的自然环境和社会经济条件会对物种的迁移产生不同程度的影响,结合文献[7, 15]和研究区的实际情况,采用土地覆被类型、距道路距离、距河流距离和高程等 4 类因子构建基本生态

阻力面,将阻力分为 5 个等级^[28],利用层次分析法得到不同类别的因子权. 基本阻力等级,如表 2 所示. 表 2 中: l_H 为距河流的距离; h 为高程.

表 2 基本阻力等级
Tab. 2 Basic resistance levels

指标	阻力等级					权重
	1	2	3	4	5	
土地覆被类型	林地	草地	水域	耕地	建设用地未利用地	0.56
l_R/m	>5 000	3 000~5 000	1 500~3 000	500~1 500	<500	0.06
l_H/m	500	1 000	2 000	3 000	>3 000	0.12
h/m	481~800	800~1 500	1 500~2 500	2 500~3 500	3 500~6 340	0.26

2.4 基于地质灾害敏感性评价的阻力面修正

基于地质灾害敏感性评价结果对构建的生态阻力面进行修正,修正公式为

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_m} \times R_o.$$

上式中: R_i 为基于地质灾害修正的栅格 i 的生态阻力系数; NL_i 为第 i 个栅格的地质灾害综合敏感度; NL_m 为第 m 个栅格的地质灾害综合敏感度; R_o 为基本阻力面类型的生态阻力系数.

2.5 生态廊道的提取

电路理论的连接度模型不仅能够较好地对物种随机游走的特性进行模拟,还能依据电流大小判断廊道的重要性^[35]. Linkage Mapper 可利用生态源地及阻力面,识别和绘制核心区域之间的最小成本路径(最优生态廊道),同时,补充廊道的冗余(潜在生态廊道)作为最小成本路径^[36]. 利用 Linkage Mapper 工具箱的 Build Network and Map Linkages 工具识别最优生态廊道,以及潜在生态廊道. 运用 Centrality Mapper 模块计算最优廊道的中心度指标,以量化其连通性.

2.6 生态夹点与生态障碍点的识别

生态夹点维持景观连通性的关键点,是指在廊道中电流密度较大的区域,使用 Linkage Mapper 工具箱中的 Pinchpoint Mapper 模块识别生态廊道中的存在的生态夹点. 生态障碍点指生物在游走过程中受阻较大的区域,通过 Linkage Mapper 工具箱中的 Barrier Mapper 模块进行识别.

3 研究结果与分析

3.1 地质灾害敏感性评价结果

地质灾害敏感性评价结果,如图 2 所示. 由图 2 可知:地质灾害敏感性高值区主要集中在研究区道路与河流附近,高山区地质灾害敏感性较低,平原、盆地河谷地区地质灾害敏感性较高,说明人类活动对地质灾害敏感性的影响较大;西南部的谷盆地地质灾害敏感性最高,原因主要是其融雪量大且地层岩性主要为砂泥、漂砾等,地质结构不稳定;西南部的昭苏盆地是伊犁河谷主要的放牧区,草场破坏,水土流失严重,生态脆弱,地质灾害敏感性较高.

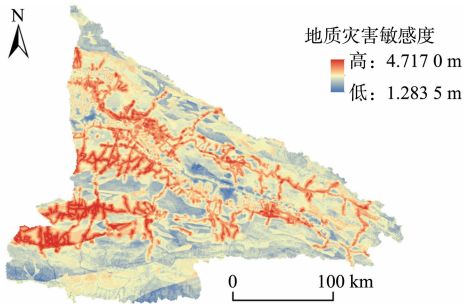


图 2 地质灾害敏感性评价结果
Fig. 2 Evaluation results of geological hazard sensitivity

3.2 生态安全格局的构建

3.2.1 生态源地的确定 通过聚合分析与 Conefor 2.6 软件,计算出各斑块 I_{PC} 与 I_{IC} ,得到生态源地共 37 个. 其中,生态源地的面积最大为 1 672.87 km²,生态源地的面积最小为 10.15 km²,生态源地总面积为 5 113.57 km²,其占研究区总面积的 9.2%. 生态源地主要分布在山区,在伊犁河谷北部、中部、南部山区形成“三横”分布格局,南部生态源地 I_{PC} 与 I_{IC} 的均值大于 1,面积最大,共有 4 175.05 km²,说明南部生态源地对景观的连通性贡献更大.

3.2.2 阻力面构建 修正前、后阻力面,如图 3 所示. 由图 3 可知:伊犁河谷的基本阻力高值区主要集

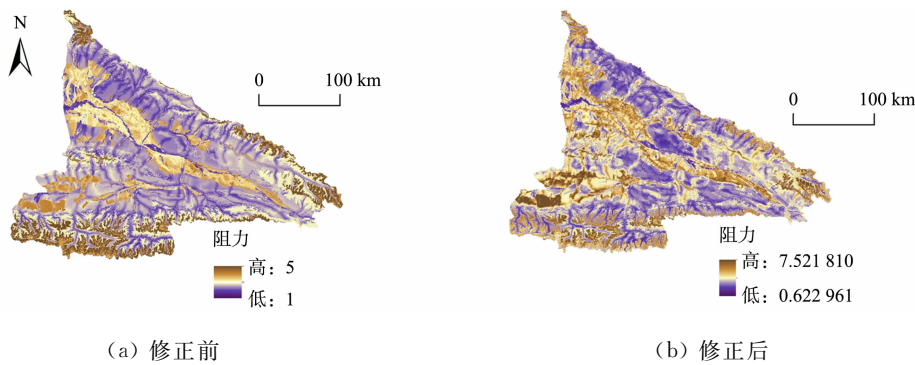


图 3 修正前、后阻力面

Fig. 3 Resistance surface before and after correction

中在北部、东部与南部山区,以及谷地的平原地区,大致由东北向西南形成“高-低-高-低-高”相间分布的格局;经过地质灾害敏感性评价修正后的阻力面与修正前阻力面基本一致,但高值区不再集中于南北部高山区,而是主要集中在河谷地区,西南部谷盆地阻力值达到最高。

3.2.3 生态廊道提取结果 生态廊道提取结果,如图 4 所示。由图 4 可知:Linkage Mapper 工具模拟出了具有一定宽度的潜在廊道,并提取出了 75 条最小成本路径,共 1 478.40 km,最短为 0.042 km,最长为 124.78 km,平均长度为 19.71 km,其中,北部、中部、南部各部生态源地之间的廊道短而密集,原因是各部内部山区林草广布,且距离较近,各源地间的阻力较小;研究区南部、中部、北生态部源地之间的廊道长且稀疏,尤其是研究区西北部仅有一根最长的廊道,原因是西北部谷盆地主要为建设用地,人口密集,道路广布阻断了生态廊道。此外,通过最优廊道中心度计算结果,选取前 20%中心度值的廊道作为关键生态廊道,共计 15 条,大多分布于北部与南部范围内部的生态源地之间,这些廊道大多避开了地质灾害敏感性的高值区,因而这些廊道虽然短小,却对景观的连通性贡献最大,是生态源地有效连通的关键廊道。

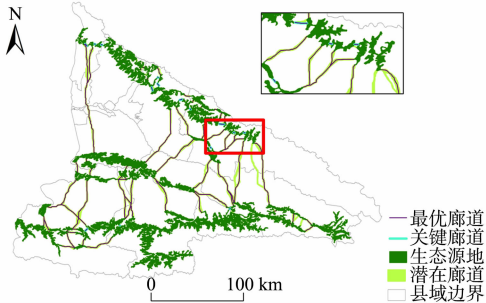


图 4 生态廊道提取结果

Fig. 4 Extraction results of ecological corridors

3.2.4 生态夹点与生态障碍点的判定 基于 Pinchpoint Mapper 计算结果,将电流密度按照自然断点法分为 5 级,选取最高等级作为生态夹点。同时,为保证生态系统的连续性和完整性,剔除掉破碎细小的冗余生态夹点,共识别 53 处生态夹点。生态夹点呈细条带状,均位于最优生态廊道上,总面积为 10.85 km²。生态夹点和生态障碍点,如图 5 所示。

由图 5 可知如下 2 点结论。

1) 尼勒克县生态夹点数量最多,共计 14 个,面积为 2.37 km²,占比最大;生态夹点的用地类型主要为草地,说明草地对维护景观连通性起着关键作用;大多生态夹点周围用地为建设用地,说明生态夹点不仅要承担维护景观连通性,还要面临人类活动的压迫和威胁。

2) 生态障碍点识别结果分为 5 段,共 89 个生态障碍点,总面积为 235.85 km²,其中,面积小于 1.00 km² 的生态障碍点有 42 个,占比 47.19%,这类生态障碍点的修复难度相对较小,修复之后将有助于提升景观连通性;最大的生态障碍点在研究区西北部,位于最长的生态廊道之上,呈南北走向,面积为 30.50 km²,原因是紧邻建设用地,人类活动对其干扰较大,修复难度较大;生态障碍点大多位于最优生态廊道上,对景观连通性影响较大,有部分生态障碍点紧挨生态夹点或直接与生态夹点重叠,此类生态障碍点对景观连通性影响重大,需要优先进行修复。

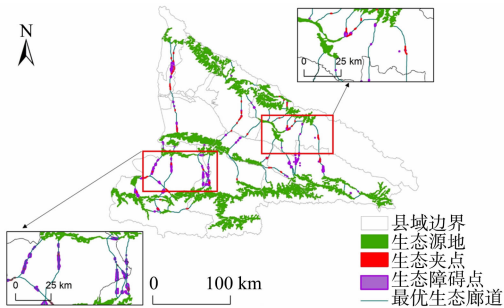


图 5 生态夹点和生态障碍点

Fig. 5 Ecological pinch points and ecological obstacles

3.3 生态保护与地质灾害防治分区及措施

以研究区生态区为骨架,将研究区划分为生态保护重点区、生态修复与地质灾害防治关键区、生态保护与地质灾害防治重点区。生态保护与地质灾害防治分区,如图 6 所示。

生态保护重点区主要是以山地为主,土地利用类型主要为林地和草地,是生态源地的集中地,包含有大片连片的生态源地与众多关键生态廊道,且地质灾害敏感性低,少有生态障碍点分布,为生物的迁移搭建了可靠的桥梁。因此,对于该区的发展应以生态保护为主,适当开发为辅。

生态修复与地质灾害防治关键区以耕地为主,是伊犁河谷建设用地集中区,人类活动强烈。该区是伊犁河谷主要河流的流经地,道路的分布也与河流分布紧密相连,二者相伴而行。因此,伊犁河谷地区也是地质灾害敏感性较高地区,生态夹点与生态障碍点也与河流的分布紧密相关。地质灾害不仅会对人类生活造成威胁,对生物的生存亦然,因此,对于该区的发展应以生态修复与地质灾害防治并重。

生态保护与地质灾害防治重点区土地利用类型主要为草地,是伊犁河谷主要畜牧区,零星分布有耕地,是生态障碍点分布最密集的区域,也是地质灾害敏感性的高值区。脆弱的生态环境、长期的放牧,该区的生态环境不容乐观。因此,对于该区的发展应以地质灾害的防治与生态保护并重。生态保护与地质灾害措施,如表 3 所示。

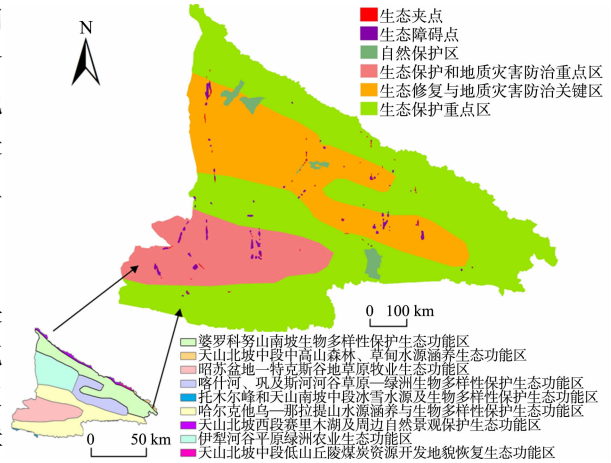


图 6 生态保护与地质灾害防治分区

Fig. 6 Ecological protection and geologicaldisaster prevention zones

表 3 生态保护与地质灾害措施

Tab. 3 Strategies of ecological protection and geological disaster prevention

生态保护与地质 灾害防治分区	防治模式	生态保护措施	地质灾害防治措施
生态保护重点区	以生态保护为主, 适当开发为辅	1) 以自然保护区或广茂林草地进行生态示范区建设,并适当发展生态旅游 2) 实施林地、草原保护奖惩机制,对破坏严重区域采取补栽、封育等措施 3) 加强森林防火,避免对该区生物栖息造成威胁	—
生态修复与地质 灾害防治关键区	以生态修复与地 质灾害防治并重	1) 加大生态经济林与城市绿地绿化(绿色屋顶、绿心公园) 2) 修筑动物通过廊道,设置动物通过路牌,边坡地带修筑生物通过沟渠,提高爬行动物通过率 3) 构建道路两旁生态缓冲带,增强路面的透水性,同时科学合理选择道路旁植物种类 4) 对河流污染进行分段治理,保证水生生物与陆地生物生存与迁徙过程中的饮水安全	1) 在道路修筑前做好地质勘探,避免引起山体垮塌,对于道路边坡裸露进行加固,恢复植被,避免灾害发生; 2) 对河谷地区裸露坡面提前进行加固,完善沟渠,疏通坡面排水等措施.
生态保护与地质 灾害防治重点区	地质灾害的防治 与生态保护并重	实施自然恢复兼人工修复工程,实施空间管控,划区休牧,阶段性禁牧和季节性轮牧,辅助草场恢复再生	1) 气候预测与地质灾害的监测,汛期设立警戒标识,做好防护措施,如拉铁丝网 2) 对北部山区沟谷两侧及陡峻的斜坡、重点在建工程区域、重要交通干线、风景名胜區以及其它山区已建设项目、水库大坝库区等重点防范.

4 结论

1) 地质灾害敏感性高值区主要集中在研究区道路与河流附近,西南部谷盆地地质灾害敏感性最高,说明人类活动对地质灾害敏感性的影响较大,西南部昭苏盆地地质灾害敏感高值集中区,除了其自然本底原因,还与人类长期放牧导致的生态脆弱有关.

2) 伊犁河谷地区共识别出生态源地 37 个,主要集中在山区,在伊犁河谷北中南山区呈“三横”连片分布,最优生态廊道 75 条,北部生态源地之间廊道短而密集,南部、北部、中部生态源地之间廊道长而稀疏,共选出 15 条关键生态廊道,主要分布在南部、北部、中部 3 处生态源地内部范围之内. 共识别生态夹点 53 处,多分布于建设用地周围,主要用地类型为草地,生态障碍点 89 个,大多位于最优廊道上,部分紧邻生态夹点.

3) 结合研究区生态安全格局构建结果、地质灾害敏感性评价结果、土地利用类型,以及自然生态本底,以研究区生态区划为骨架,将研究区划分为生态保护重点区、生态修复与地质灾害防治关键区、生态保护与地质灾害防治重点区,并提出生态保护为主,适当开发为辅、生态修复与地质灾害防治并重、地质灾害防治与生态保护并重等发展方向,以及具体措施.

参考文献:

[1] 徐嵩,王鹤,孔维东. 防灾视角下基于 MCR 模型的山地生态安全格局优化研究:以京津冀山区为例[J]. 灾害学, 2021,36(2):118-123. DOI:10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.020.

[2] 叶鑫,邹长新,刘国华,等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. 生态学报,2018,38(10):3382-3392. DOI:10.5846/stxb201701110083.

[3] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京市生态安全格局及城市增长预景[J]. 生态学报,2009,29(3):1189-1204. DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2009.03.015.

[4] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究,2017,36(3):407-419. DOI:10.11821/dlyj201703001.

[5] 柳建玲,李胜鹏,范胜龙,等. 基于生态安全格局的厦漳泉地区国土空间生态保护修复区与预警点识别[J]. 生态学报,2021,41(20):8124-8134. DOI:10.5846/stxb202012013074.

[6] 陈影,哈凯,贺文龙,等. 冀西北间山盆地景观格局变化及优化研究:以河北省怀来县为例[J]. 自然资源学报, 2016,31(4):556-569. DOI:10.11849/zrzyxb.20150361.

[7] 薛强,路路,牛韧,等. 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[J]. 生态学报,2021, 41(22):9050-9063. DOI:10.5846/stxb202104231076.

[8] 赵础昊,徐芳芳. 基于生态安全格局的公园城市建设分析[J]. 生态经济,2022,38(3):220-227.

[9] 李潇然,李阳兵,王永艳,等. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区:以奉节县为例[J]. 生态学志,2015, 34(7):1959-1967. DOI:10.13292/j.1000-4890.20150615.003.

[10] 于婧,汤昇,陈艳红,等. 山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建:以张家界市为例[J]. 生态学报,2022,42(4):1290-1299. DOI:10.5846/stxb202012313341.

[11] 袁少雄,宫清华,陈军,等. 广东省自然保护区生态网络评价及其生态修复建议[J]. 热带地理,2021,41(2):431-440. DOI:10.13284/j.cnki.rddl.003317.

[12] 古璠,黄义雄,陈传明,等. 福建省自然保护区生态网络的构建与优化[J]. 应用生态学报,2017,28(3):1013-1020. DOI:10.13287/j.1001-9332.201703.022.

[13] 王正伟,王宏卫,杨胜天,等. 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 [J]. 生态学报,2022,42(1):91-104. DOI:10.5846/stxb202011192979.

[14] 李红波,黄悦,高艳丽. 武汉城市圈生态网络时空演变及管控分析[J]. 生态学报,2021,41(22):9008-9019. DOI: 10.5846/stxb202103200737.

[15] 王雪然,万荣荣,潘佩佩. 流域生态安全格局构建与调控:基于空间形态学-最小累积阻力模型[J]. 生态学报, 2022,42(5):1968-1980. DOI:10.5846/stxb202103020571.

[16] 方莹,王静,黄隆杨,等. 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[J]. 自然资源学报,2020,35(1):190-203. DOI:10.31497/zrzyxb.20200116.

[17] 姜虹,张子墨,徐子涵,等. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建[J]. 生态学报,2022,42(5):1981-

1992. DOI:10. 5846/stxb202103220753.

[18] 姚采云,安睿,窦超,等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的三峡库区林地生态网络构建与评价研究[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(9):1953-1962. DOI:10. 11870 /cjlyzyyhj202209008.

[19] 吕彦莹,王晓婷,于新洋,等. 山东省自然生态空间系统化识别与差异化管控研究[J]. 生态学报,2022,42(7):3010-3019. DOI:10. 5846/stxb202101070063.

[20] 陆禹,余济云,陈彩虹,等. 基于粒度反推法的景观生态安全格局优化:以海口市秀英区为例[J]. 生态学报,2015,35(19):6384-6393. DOI:10. 5846/stxb201402170274.

[21] 刘志有,曲秀武,魏冉,等. 生态文明视角下的伊犁河谷绿洲土地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报,2022,42(1):137-143. DOI:10. 13961/j. cnki. stbctb. 2022. 01. 019.

[22] 李青圃,张正栋,万露文,等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. 地理学报,2019,74(7):1420-1437. DOI:10. 11821/dlxb201907011.

[23] 于婧,汤昇,陈艳红,等. 山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建:以张家界市为例[J]. 生态学报,2022,42(4):1290-1299. DOI:10. 5846/stxb202012313341.

[24] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案[J]. 生态学报,2013,33(5):1524-1534. DOI:10. 5846/stxb201205160733.

[25] 彭建,郭小楠,胡熠娜,等. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建:以云南省玉溪市为例[J]. 应用生态学报,2017,28(2):627-635. DOI:10. 13287/j. 1001-9332. 201702. 013.

[26] 赵诚诚,潘竞虎. 基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化[J]. 生态学报,2022,42(17):6973-6984. DOI:10. 5846/stxb202104020855.

[27] 毛诚瑞,代力民,齐麟,等. 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[J]. 生态学报,2020,40(18):6486-6494. DOI:10. 5846/stxb201909191954.

[28] 樊影,王宏卫,杨胜天,等. 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[J]. 生态学报,2021,41(19):7614-7626. DOI:10. 5846/stxb202011202987.

[29] 刘扬扬,魏学利,陈宝成,等. 新疆伊犁地区的地质条件及地质灾害影响因素分析[J]. 世界有色金属,2020(2):163-165. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-5065. 2020. 02. 096.

[30] 毛伟,如黑艳·木合买尔,贺强. 新疆伊犁谷地滑坡地质灾害形成机制及防治措施[J]. 西部资源,2018(3):131-132,134. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-562X. 2018. 03. 065.

[31] 曹小红,孟和尚彦军,等. 伊犁谷地黄土滑坡发育分布规律及成因[J]. 新疆地质,2020,38(3):405-411. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-8845. 2020. 03. 020.

[32] 屠水云,张钟远,付弘流,等. 基于 CF 与 CF-LR 模型的地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):96-104. DOI:10. 16031/j. cnki. issn. 1003-8035. 2022. 02-12.

[33] 林金煌,张岸,邓超,等. 闽三角城市群地质灾害敏感性评价[J]. 地球信息科学学报,2018,20(9):1286-1297. DOI:10. 12082/dqxxkx. 2018. 180099.

[34] 吴金海,谢良甫,乔伟. 基于融雪及地貌特征的伊犁地区地质灾害发育规律研究[J]. 水力发电,2022,48(7):34-38. DOI:10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2022. 07. 007.

[35] 曹秀凤,刘兆顺,李淑杰,等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以吉林省松原市为例[J]. 中国环境学,2022,42(6):2779-2787. DOI:10. 19674/j. cnki. issn1000-6923. 20220211. 004.

[36] 宋利利,秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报,2016,27(10):3344-3352. DOI:10. 13287/j. 1001-9332. 201610. 035.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:刘源岗)