

引用格式: Wang Changbo, Li Ainong, Zhang Xiaorong, *et al.* Comprehensive Assessment of Ecological Risk in Multi-scenarios of China-Pakistan Economic Corridor based on RS and GIS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 65-78. [王昌博, 李爱农, 张晓荣, 等. 基于遥感和GIS的中巴经济走廊多发展情景生态风险综合评价[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 65-78.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0065

基于遥感和GIS的中巴经济走廊多发展情景生态风险综合评价

王昌博^{1,2}, 李爱农¹, 张晓荣^{1,2}, 南希¹, 边金虎¹, Muhammad Kamran^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 数字山地与遥感应用中心, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中巴经济走廊沿线地区生态环境复杂、人地矛盾突出, 走廊建设在推动区域经济发展的同时, 也可能给区域生态环境安全带来潜在风险。借助遥感、地理信息和情景模拟方法, 从风险源危险性、生态环境脆弱性、受体损失度三方面构建风险评价模型, 结合惯性发展、投资优先和和谐发展三种情景下2030年土地利用情况, 对廊道2015~2030年生态风险的时空变化规律进行分析。结果表明: 中巴经济走廊高生态风险区主要分布在巴基斯坦北部山区向印度河平原的过渡区。未来情景的差异直接影响着生态风险。投资优先情景高风险区增幅最大, 相比于2015年, 2030年中度、高度和极高风险区面积占比分别增加了4.75%、4.84%和2.25%。惯性发展情景中度、高度和极高风险区面积占比分别增加了2.79%、2.52%和1.04%。和谐发展情景中, 中度和高度风险区呈现增加趋势, 极高风险区面积略微下降, 增幅分别为1.15%、2.19%和-0.16%。研究表明: 能兼顾经济发展和环境保护的和谐发展情景, 是未来廊道规划建设的优化选择, 合理规划土地利用, 提高土地用途管制力度, 提升土地资源使用效益, 可促进社会经济可持续发展。基于遥感和GIS技术的综合评价方法能够为经济廊道的生态风险评价提供技术支撑。

关键词: 遥感; 情景模拟; 生态风险; 中巴经济走廊

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)01-0065-14

1 引言

生态环境作为区域内人和生物的有机载体, 提供了物质和能量供给, 是生物生存和人类社会发展的基础^[1], 维护生态环境健康是区域可持续发展的核心。生态风险评价是定量预测各种风险源对生态系统带来潜在风险的概率以及评估该风险可接受程度的方法体系, 是生态环境风险管理与决策的定量依据^[2]。为合理利用自然资源, 促进经济健康、

可持续发展, 在区域开发中需充分考虑生态风险问题。

生态风险评价由化学污染风险评价、人类健康风险评价发展而来。兴起于20世纪70年代, 经历了由单因子、单风险评价向多因子多风险评价的转变过程^[3]。随着研究的不断深入, 包含复合风险受体和复杂生境条件的多风险源生态风险评价取得了一定的发展, 相应的生态风险评价模型也应运而生。最具代表性的是美国环保局(US Environmen-

收稿日期: 2019-12-16; 修订日期: 2020-12-28

基金项目: 中国科学院A类战略性先导专项子课题“一带一路重要经济廊道生态环境遥感监测与综合评估”(XDA19030303), 中国科学院成都山地所“一三五”重要方向性项目“南亚地缘合作关键资源环境变化过程与空间信息服务”(SDS-135-1708)。

作者简介: 王昌博(1993-), 男, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要从事生态环境遥感评估研究。E-mails: wangchangbo17@mails.ucas.edu.cn

通讯作者: 李爱农(1974-), 男, 安徽庐江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事山地定量遥感及其综合应用研究。E-mail: ainongli@imde.ac.cn

tal Protection Agency, USEPA) 制定的风险评价框架模型, 从问题形成—问题分析—风险表征出发, 制定了系统的评估流程^[4], 能够完整的反映生态风险评价中各要素之间的相互作用与影响机制, 目前被广泛应用于生态风险评价中。由于区域生态风险评价中, 风险源、压力因子和风险受体存在着显著的空间异质性, 具有空间分析能力的地理信息系统(GIS)和能大范围、实时和多尺度开展对地观测的遥感技术在风险评价中得到广泛应用^[5]。如周汝佳等^[6]从景观结构角度构建生态风险评价模型, 对盐城海岸带地区 2000~2010 年景观生态风险的时空分异特征进行定量评价。许学工等^[7]利用遥感数据得到生态指数, 用以量化生态风险源, 结合 RS 历史记录、调查数据和 GIS 技术, 对黄河三角洲进行生态风险综合评价及分区, 并提出区域生态风险管理对策。李洪义等^[8]利用 ETM 遥感数据提取反映生态环境的植被、土壤亮度、温度等指数评估了福建省生态环境质量。苏敬华等^[9]从区域经济开发角度出发, 采用 GIS 和情景模拟方法模拟了经济优先和效率优先两种情景下, 生态风险源中长期的变化过程, 评估了其生态风险。综合来看, 遥感数据作为重要的数据来源, 已被广泛地应用于生态环境评价当中。与此同时, 结合情景模拟技术的生态风险评价, 能够探究不同发展策略下生态风险的差异, 将为环境治理方案 and 经济发展策略提供科学支撑。

中巴经济走廊(China-Pakistan Economic Corridor, CPEC)是“一带一路”的旗舰项目, 是贯通“丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”的重要纽带^[10]。其建设势必会为中、巴两国的经济发展带来强大的推动作用^[11-12]。然而, 走廊沿线地区总体经济落后, 普遍面临着工业化和城市化带来的环境污染、生态退化等多种挑战^[13-14], 加之干旱、洪涝和泥石流等自然灾害的侵扰, 使得走廊生态环境较为脆弱。目前对巴基斯坦风险评价的研究多集中在单一风险源和单一风险过程评价。如 Saddique 等^[14]从分析土样中有害元素的含量与人体接触有害物的可能性出发, 分析了开伯尔—普什图省的生态风险空间分布格局。Mehmood 等^[15]从土壤中重金属含量入手, 探究污水灌溉对区域造成的潜在风险。Athar Haroom 等^[16]利用遥感数据监测巴基斯坦干旱状况。但在区域尺度上综合考虑环境、人类活动以及自然灾害等多因素的生态风险评价仍有待进一步研究。

鉴于此, 本文在 RS、GIS 和情景模拟技术的支撑下, 依据问题形成—风险分析与表征—风险管理与反馈等风险评价步骤, 从风险源危险性、生态系统脆弱性、风险受体损失度三个层面构建风险评价模型, 并结合 2030 年土地利用情景模拟结果, 对中巴经济走廊多种发展情景下的生态风险进行了综合评价, 分析了不同发展策略对生态环境造成的风险差异, 并为中巴经济走廊工程建设提出了相应对策建议。

2 研究区概况

中巴经济走廊北起中国喀什, 南至巴基斯坦瓜达尔港, 全长约 3 000 km, 是一条囊括公路、铁路、油气管道在内的贸易通道^[10]。本文将中巴经济走廊主要连接通道的 50 km 缓冲区作为研究区(图 1), 综合评估该区域多发展情景下的生态风险状况。研究区位于亚洲中南部, 地处 $61^{\circ}\sim 79.52^{\circ}\text{E}$ 、 $23.50^{\circ}\sim 40.16^{\circ}\text{N}$ 之间。内部地貌复杂多样, 包括塔里木盆地、北部山区、俾路支高原、印度河平原等大的地貌单元^[17]。受地形影响, 气温空间分布差异明显, 巴基斯坦北部山区由喜马拉雅山、喀喇昆仑山、兴都库什山等山脉汇聚形成, 海拔较高, 部分地区常年积雪, 年均温为 -2°C , 是研究区内最寒冷的区域, 而俾路支高原年均温为 22.9°C 。巴基斯坦气候干燥, 降水稀少, 其时空分布不均匀, 北部山区年累计降水量超过 2 000 mm, 而俾路支高原的干旱区年累计降水量不超过 125 mm。受季风影响, 降水主要集中在 7~9 月份^[18]。

3 数据与方法

3.1 数据源与预处理

3.1.1 数据源

根据中巴经济走廊地理状况和关键生态问题, 结合数据资料的可获得性, 生态风险评估所需数据来源如表 1 所示。

3.1.2 数据预处理

(1) 土地利用数据。土地利用: 基于 2015 年 Landsat-8 OLI 的生长季和非生长季影像, 在有限样本的基础上, 集成面向对象分类、多分类器集成分类和迭代分类思想, 发展了基于有限样本自动更新的土地覆被制图方法, 完成 2015 年土地利用分类^[19]。在 2009~2015 年土地利用遥感监测数据的基础上, 利用 SD 模型, 根据人口、社会经济以及自然条件等建立并验证区域宏观土地利用需求情景模

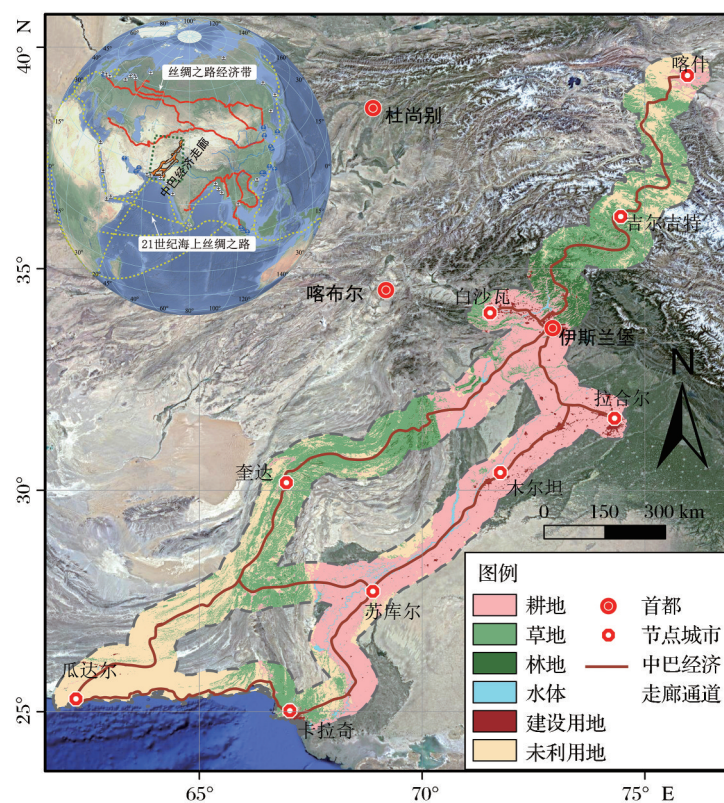


图1 研究区位置及和谐发展情景2030年土地利用模拟结果

Fig.1 The location of study area and Land-use simulation results of harmonious development scenario in 2030

表1 数据信息及来源

Table 1 List of data used in this study

类别	数据名称	时间	空间分辨率	数据来源
土地利用	土地利用	2015	30 m	成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心
	土地利用预测	2030	30 m	成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心
自然环境	归一化植被指数	2015	1 km	MOD13A2 产品 (https://search.earthdata.nasa.gov)
	地表温度	2015	1 km	MOD11A2 产品 (https://search.earthdata.nasa.gov)
	数字高程模型	2000	90 m	SRTM DEM 产品 (http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/)
	太阳大气顶层辐射	1970~2000 年平均	1 km	世界气象数据集 (http://www.worldclim.org/)
	土壤中沙粒含量	2012	0.05°	世界土壤数据库 (https://daac.ornl.gov/)
	土壤中粉粒含量	2012	0.05°	世界土壤数据库 (https://daac.ornl.gov/)
	土壤中黏粒含量	2012	0.05°	世界土壤数据库 (https://daac.ornl.gov/)
	土壤中有机碳含量	2012	0.05°	世界土壤数据库 (https://daac.ornl.gov/)
	土壤深度	2012	0.05°	世界土壤数据库 (https://daac.ornl.gov/)
气候	山地灾害易发性	2017	1 km	成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心
	气象预测	2030	0.25°	NASA 地球交换计划全球日降尺度产品 (https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/)
	气温	2015	矢量	美国国家气象数据中心 (https://www.data.gov/)
	降水	2015	矢量	美国国家气象数据中心 (https://www.data.gov/)
社会经济	人口密度	2015	1 km	成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心
	道路	2019	矢量	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/)
	自然保护区	2016	矢量	世界保护区数据库 (https://www.protectedplanet.net/)
	产业园区	2019	矢量	中巴经济走廊官网 (http://www.cpec.gov.pk/)
	油气、发电站	2019	矢量	中巴经济走廊官网 (http://www.cpec.gov.pk/)

拟模型,逐年预测2015~2030年土地利用需求量;利用FLUS(Future Land-Use Simulation)模型,考虑人类活动、自然环境等多种空间驱动因子与土地利用数据的历史分布,获取适宜的土地利用空间分布,生成2030年土地利用模拟数据。通过对比模拟的2015年土地利用数据与2015年实际土地利用数据,得到喀什地区模拟的土地利用数据总体精度为93%,Kappa系数为0.92;巴基斯坦的总体精度为98%,Kappa系数为0.97^[20]。结果表明,该数据能够有效地呈现研究区土地利用动态变化情况。

人类活动强度:不同类型的景观组分代表不同的人类活动及开发利用强度。根据土地利用数据将景观类型分为:建设用地、耕地、草地、林地、水体和未利用地,对不同的景观组分通过Delphi法进行人为影响强度赋值^[21]。人类活动强度计算方法如下:

$$HAI = \sum_{i=1}^n A_i P_i / T \quad (1)$$

其中:HAI为人类干扰指数, n 为单位面积中景观组分个数, A_i 为第 i 种景观组分的总面积, P 为人为影响强度赋值参数, T 为单位面积大小。本文空间分辨率 1 km ,因此人类活动强度在该尺度下计算。

(2)气候数据。结合站点数据,利用Anusplin专用气象数据空间插值软件,获得中巴经济走廊地区的年均温度、年均降水等空间插值曲面。2030年气象预测数据(包括月最低均温、月最高均温和月平均降水)采用中国国家气候中心气候系统模型(Beijing Climate Center Climate System Model(BCC_CSM1.1))获取,数据来源于美国宇航局提供的地球交换计划全球日降尺度(Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections, NEC-GDDP)数据集。

(3)自然环境数据。NDVI:通过S-G(Savitzky-Golay)滤波,消除了云和其他大气条件对时间序列归一化植被指数(NDVI)数据的影响^[22]。利用最大值合成法,合成年NDVI作为植被生长状况的指标。

干旱指数:利用NDVI产品和LST产品,结合NDVI-LST特征空间值,提取特征空间干湿边,计算干旱指数^[23]。

山地灾害易发性:山地灾害点数据来源于中科院成都山地灾害与环境研究所南亚地理资源环境数据库,并根据Google Earth高分影像完成更新,根据信息量模型和栅格叠加运算得到山地灾害易发

性栅格数据^[2]。

土壤侵蚀:结合土地利用状况、月降水量和土壤性质,根据通用土壤流失(RUSLE)模型计算得到。

高程和坡度:利用DEM数据提取坡度和高程信息,并重采样至 $1\ 000\text{ m}$ 。

(4)社会经济数据。人口密度:基于美国国防气象卫星搭载的可见光成像线性扫描系统(DMSP/OLS)和国家极轨卫星搭载的可见光近红外成像辐射仪(NPP/VIIRS)获取的夜间灯光影像,利用随机森林模型对中巴经济走廊人口数据进行空间化^[24]。

交通密度:交通道路数据来源于OpenStreet-Map网站,包含1~4级公路及铁路矢量数据。考虑各级道路对生态风险的影响程度不同,结合文献^[25],将铁路、1~4级公路分别赋予4、4、3、2、1的权重,利用ArcGIS核密度分析功能,计算移动窗口中的线密度。

距油气田距离和距发电站距离:发电站统计数据包含地理位置和装机容量,油气资源统计数据包含油气田的位置和面积属性。本文根据地理位置将统计数据在ArcGIS中转成点要素,再利用反距离权重模型完成空间化。

由于本研究中采用数据的来源、空间分辨率、时相均不相同,为方便进行空间运算,需要对各类数据进行进一步预处理,包括投影变换、空间分辨率变换、数据边界统一和数据标准化等。最终将数据分辨率均统一至 $1\ 000\text{ m}$,投影坐标统一为WGS_1984_UTM_zone_43N。

3.2 研究方法

生态风险事件的产生,多为外界胁迫和系统内部不稳定因素共同作用的结果。本文参照USEPA评估框架,结合土地利用情景模拟数据,从风险源、生境和受体,影响生态风险评价的三要素出发,评价中巴经济走廊多发展情景下的生态风险。评估流程如图2所示。

风险源胁迫直接作用于受体(生态系统),是风险产生的充分条件;而生态系统稳定与否主要表现在抗干扰能力上,生态系统抵御能力越弱,发生风险的概率也越大,因此生境是背景条件;与此同时,不同受体因风险造成的损失也不尽相同,受体是风险放大或缩小的必要条件。为反映生态系统要素之间的相互作用与影响机制,本文从风险源危险性、生态系统脆弱性、风险受体损失度3个层面,构

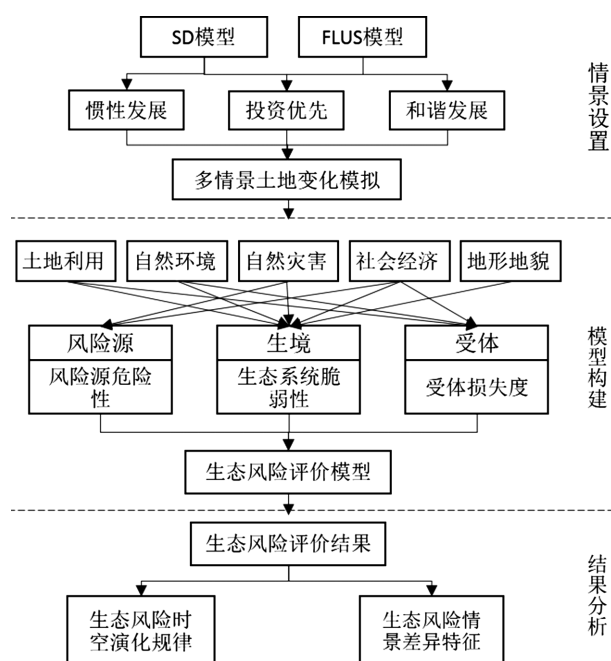


图2 生态风险综合评价流程

Fig.2 Flow chart of comprehensive assessment of ecological risk

建生态风险评估模型,具体公式如下^[26]:

$$ER = R_i \times V_i \times L_i \quad (2)$$

其中:ER为生态风险指数, R_i 、 V_i 、 L_i 分别是风险源危险性、生态系统脆弱性和风险受体损失度。

3.2.1 风险源—危险性(R_i)

风险源指可能对生态系统造成不利影响的胁迫来源。基于中巴经济走廊的生态特征,将风险源分为自然灾害风险源和人类活动风险源。中巴经济走廊面临的主要生态环境问题包括:①巴基斯坦北部山区,地势险峻,气候严寒,山地灾害频发^[27];②走廊受印度洋季风气候影响,降水集中分布,干湿两季分明,降水侵蚀力高,土壤侵蚀较为严重^[28];③中巴经济走廊内部广泛分布着干旱和荒漠地段,如北部我国喀什地区和巴基斯坦南部地区,干旱和荒漠化是研究区面临的又一环境问题^[29, 30]。这些风险源严重制约着中巴经济走廊的发展,因此选取干旱、山地灾害、土壤侵蚀作为自然灾害风险源的评价指标。与此同时,中巴经济走廊相关合作涉及公路、铁路、电力资源开发、矿产和油气资源开发等诸多领域,带动经济发展的同时,存在带来生态风险的可能,因此选取城镇扩张、距发电站距离、距油气田距离和道路密度4个指标作为人类活动风险源。

利用空间主成分分析模型评价研究区内总体的风险源危险性^[31],计算公式如下:

$$R = \sum_{j=1}^n f_j w_j \quad (3)$$

式中: R_i 是风险源危险性指数; n 是满足累计方差贡献率超过95%的主成分个数; f 是主成分, w 是方差贡献率。

3.2.2 生境—脆弱性(V_i)

生境是风险受体暴露于风险源的环境,易损性表示在风险源胁迫下生态系统表现出的易损程度,生态系统的稳定性和抵抗干扰的能力越弱,易损值越大。本文借助生态环境脆弱性来表示生态系统易损程度^[8]。环境脆弱性评价考虑地貌、地表状况、气象和人类活动四类指标,其中地貌因子包括高程、坡度。地形地貌是生态风险形成的重要自然驱动因素,高程变化带来的垂直地带效应显著的影响着气温、降水和植被的分布;坡度是诱发山地灾害、土壤侵蚀等的动因。地表因子包括NDVI和LUCC,NDVI反映植被生长状况,是监测区域或全球尺度植被长势及生态环境变化的绝佳指标;LUCC反映了生态系统的空间分布。气象因子包括年均温、年均降水,水热状况是生态系统的主要组成部分,影响着生态系统的演化方向。人类活动因子包括人口密度和人类活动强度,人是一切社会、经济等活动对生态环境产生扰动的主体,人口越多,对生态环境的干扰越大;人类活动强度是表征人类对陆地表层影响和作用程度的综合指标。同样利用空间主成分分析模型评价研究区内生态环境脆弱性(公式(3))。

3.2.3 风险受体—损失度(L_i)

风险受体损失度指的是在发生风险的情况下生态系统结构和功能受到损失的程度。应用生态系统服务理念表达风险受体损失度,不仅描述了生态系统内部机制,同时将人类福祉等外部因素纳入评价范围,可极大地提高风险评价的实用性^[32]。然而,传统的评价方法以简单的货币、物质等形式对区域生态系统服务功能价值进行表征,忽略了生态系统功能在时空尺度的非线性、动态性变化,不利于对生态系统的决策管理^[33]。有研究表明,巴基斯坦受水资源影响较为严重,人均水资源量小于500 m³,属于严重缺水地区^[34]。同时,受季风性气候影响,降水较为集中,加之土壤疏松,使得巴基斯坦全境约有76%的土地受到不同程度的侵蚀影响,其中水蚀作用是造成土壤侵蚀的主要原因,水蚀每年约造成4 700多万吨土壤损失^[35]。土壤储碳量格局分布能够反应土地利用变化对生态环境的影响。

为更好地反映中巴经济走廊生态系统结构和功能的空间差异,本文利用生态系统服务评估 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型,定量评估研究区水资源供给、固碳和土壤保持量,采用叠加分析方法,表征风险受体损失度。

(1)水资源供给。水资源供给采用 InVEST 模型中产水模块,根据水量平衡原理,同时考虑地形、气候和土地覆被状况,利用降水量和实际蒸散量之间的差值计算径流量^[36]。计算公式如下:

$$Y_{jx} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}) P_x \quad (4)$$

其中: Y_{jx} 为年产水量(mm); P_x 代表像元 x 处的年均降水量(mm); AET_{xj} 为土地覆被类型 j 在像元 x 处的年均蒸散发量(mm)。

(2)固碳。固碳量采用 InVEST 模型中的碳固模块计算得到,通过不同土地覆被类型地上生物量、地下生物量、土壤和死亡的有机质 4 部分计算得来。计算公式为:

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

式中: C 为碳储量(t); C_{above} 为地上碳储量; C_{below} 为地下碳储量; C_{dead} 为死亡物有机碳储量; C_{soil} 为土壤碳储量。

(3)土壤保持量。土壤保持基于 InVEST 模型中土壤保持模块得到,根据土壤属性、降水量、地形、土地利用类型等因子,以栅格为单元计算土壤保持量,基本原理如下:

$$SEDRET_i = RKLS_i - USLE_i + E_i \quad (6)$$

式中: $SEDRET_i$ 第 i 个栅格处的土壤保持量(t), $RKLS_i$ 为潜在土壤侵蚀量, $USLE_i$ 为实际侵蚀量, E_i 为泥沙持留量。

3.2.4 指标生态风险贡献度

在进行空间主成分分析时,可得到各指标的因子载荷,因子载荷反映了指标与主成分之间的相关性,因子载荷的绝对值越大,二者之间的相关性越强,因此,可以用因子载荷的绝对值来表示指标对生态风险的影响。选取累计方差贡献率超过 95% 的主成分的因子载荷和方差贡献率的乘积作为指标对生态风险影响程度的表征,计算公式为:

$$ID_m = \sum_{i=1}^n a_{im} w_i \quad (7)$$

其中: ID 为指标的影响程度; i 为累计方差贡献率大于 95% 的主成分数; m 为指标数; a 为因子载荷, w 为方差贡献率。

3.2.5 情景设置

根据研究区社会、经济数据资料与中巴经济走廊建设规划,通过合理假设未来走廊沿线的经济发展、人口增长、技术进步等状况,并参照区域未来气候变化情景,设置了三种情景模式:延续以往发展轨迹的惯性发展情景(Baseline Development Scenario, BD)、考虑中巴经济走廊建设带来快速社会经济发展的投资优先情景(Investment Priority Oriented Scenario, IPO)及兼顾经济发展和环境保护的和谐发展情景(Harmonious Development Scenario, HD)。因中巴经济走廊建设于 2015 年正式启动,因此将初始年份设置为 2015 年。联合国可持续发展目标(SDG)旨在从 2015~2030 年以综合方式解决社会、经济和环境发展问题,转向可持续发展道路,因此预测 2030 年发展情景,分析中巴经济走廊在不同发展策略下 2030 年生态风险的可能趋势。土地利用模拟数据来源于成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心,三种情景的详细设计可参照张晓荣等^[20]的研究。

(1)惯性发展情景。基于 2009~2015 年社会、经济数据(如人口、经济等)变化趋势,在不考虑新的经济、环境政策变动下,设置惯性发展情景。该情景中,区域未来土地利用需求延续过去的趋势。为情景设置较低的人口增长率、低 GDP 增长率、缓慢的技术进步以及较低的排放。GDP 增长率保持现有的 5%;技术进步保持每年增长 1.5%,参照政府间气候变化专门委员会(IPCC)排放情景特别报告中的低排放情景,降水以每年 0.089 mm 的趋势减少,气温以每年 0.024 °C 的趋势增加;人口增长率变化参照王学保等^[37]的研究:

$$r(x) = r(1 - x/x_{max}) \quad (8)$$

其中: $r(x)$ 是人口为 x 时的人口增长率, r 为固有人口增长, x 为当前人口数, x_{max} 为区域可容纳的最大人口数量。当人口达 x_{max} 时,人口不再增长,通过求解方程可得当年人口及其增长率。

(2)投资优先情景。投资优先情景考虑中巴经济走廊建设对沿线区域经济带来积极影响,注重经济的优先发展。据巴基斯坦官方预测,中巴经济走廊项目通过建设现代化交通网络、改善巴基斯坦能源供应等一系列举措,将在 2015~2030 年间为该国创造 230 万个就业岗位,为国内生产总值增加 2~2.5 个百分点。同时《中巴经济走廊长期计划(2017~2030)》指出,未来将加强与巴基斯坦农业项目的合作,

推动该国农业现代化进程。对于喀什而言,走廊建设将补充我国西部大开发计划,改善喀什地区连通性,提升喀什发展潜力。投资优先情景考虑基础设施的提升、能源短缺问题的改善以及投资环境的变化等为区域经济和人口增长带来的变化,也考虑到农业项目的合作等带来的区域生产力的提高。因此该情景下的人口增长、经济增长、技术进步、排放量都将高于惯性发展情景。GDP增长率由惯性发展情景的5%增长至10%;技术进步增长率为2%;根据IPCC排放情景特别报告中的高排放情景,气温和降水分别以每年0.051℃和0.173 mm的趋势增加;人口增长率为1.9%。

(3)和谐发展情景。根据中巴经济走廊建设规划,并结合当地政府在生态环境方面的政策(巴基斯坦的“森林恢复计划”和喀什地区“喀什地区国民经济

与社会发展第十三个五年计划”),及中、巴两国签署的环境保护合作协议,设置社会经济发展和环境保护和谐发展情景。该情景认为走廊建设对区域经济发展产生了积极的影响,政府对于生态环境保护的重视和投入也会对区域的人口、经济增长以及气候变化等产生影响。因此,为该情景设置中等的人口增长、中等的排放、高速的经济增长和技术进步。GDP增长率由惯性发展情景的5%增长至9%;技术进步增长率为2%;气温和降水分别以每年0.041℃和0.126 mm的趋势增加;人口增长率由投资优先情景的1.9%下降到1.7%。

4 结果与分析

4.1 中巴经济走廊生态风险空间分布

利用自然断点法将生态风险分为5级(图3)。

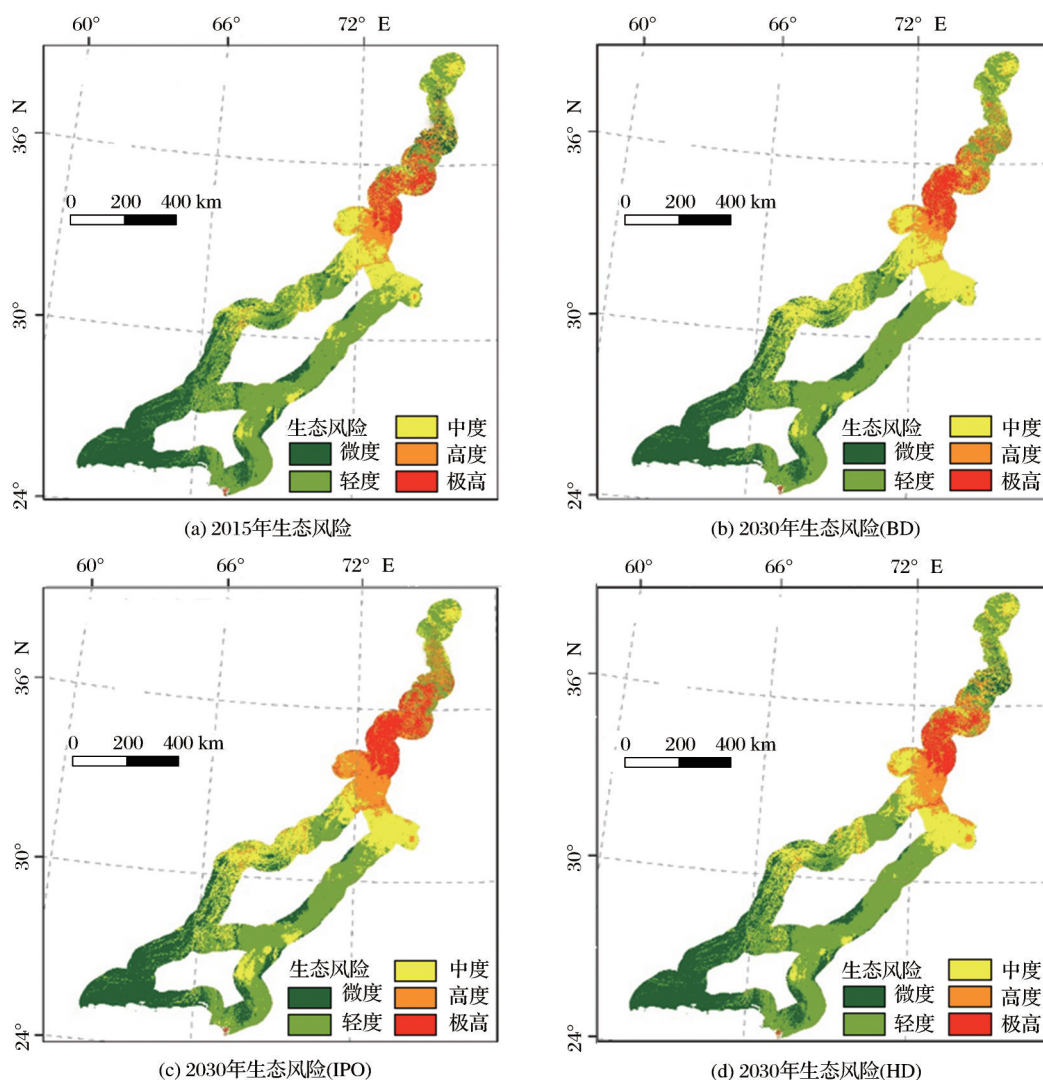


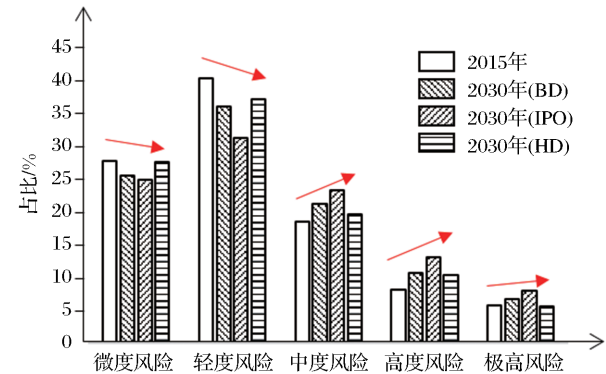
图3 研究区2015年及2030年生态风险空间分布

Fig.3 Ecological risk of 2015 and 2030 (three different scenarios) in the study area

结果表明,2015年和2030年(3种发展情景)的生态风险结果在空间分布上具有较高的一致性。以2015年结果为例,高风险区和极高风险区总面积为5.92万km²(表2),占研究区面积的18.84%,主要分布在巴基斯坦北部山区向印度和平原的过渡区。与此同时,伊斯兰堡、拉合尔、卡拉奇等几个人口较多的城市,由于人类活动对原始生态环境空间的占用与破坏,其生态风险要略高于周边地区。微度生态风险区面积为11.81万km²,占研究区总面积的27.61%,主要分布在俾路支高原和我国喀什地区。轻度生态风险区面积为17.18万km²,占研究区总面积的40.16%,主要分布在印度河平原地区。

4.2 2030年3种发展情景生态风险特征差异

相较于2015年,3种发展情境下2030年中巴经济走廊微度和轻度生态风险区面积呈现下降趋势,而中、高度生态风险区面积呈现增加趋势。和谐发展情景下,极高风险区面积呈现略微下降趋势,其余两种情景下极高生态风险区面积均呈现增加趋势(图4)。较高生态风险区面积增加幅度最大的发展情景是投资优先情景,增幅最小的发展情景是和谐发展情景,且变化较为明显的区域集中分布在北



(注:BD:惯性发展情景;IPO:投资优先情景;HD:和谐发展情景)
图4 2015年及2030年各发展情景的生态风险空间占比
Fig.4 The proportion of ecological risk in 2015 and 2030

部山区向印度河平原过渡区域(图3)。与2015年相比,2030年惯性发展情景下中度风险、高度风险和极高风险区面积占比分别增加了2.79%、2.52%和1.04%。投资优先情景下,中度风险、高度风险和极高风险在2015年的基础上呈现了明显的增加趋势,面积占比分别增加了4.75%、4.84%和2.25%。在和谐发展情景中,中度、高度风险相较于2015年均呈现轻微增长趋势,极高风险区呈现轻微下降趋势,增幅分别为1.15%、2.19%和-0.16%。

4.3 生态风险成因及2030年情景驱动分析

根据3.2.4节所述方法计算得出各指标的贡献度比重(图5)。结果表明,对中巴经济走廊生态风险影响较大的因子包括山地灾害、干旱、年降水、NDVI、LUCC和人类活动强度。前4个因子反映了自然环境的影响,后两个因子则主要反映了人类活动的影响。因此,中巴经济走廊生态风险是外界胁迫和系统内部不稳定因素共同作用的结果。中巴经济走廊生态风险较高的区域分布在北部山区向印度河平原过渡区。受季风性气候影响,该区域降水集中于7~9月份^[28],加之山高坡陡,地质构造不稳定,孕育了极敏感的受灾环境,山地灾害频发^[27],

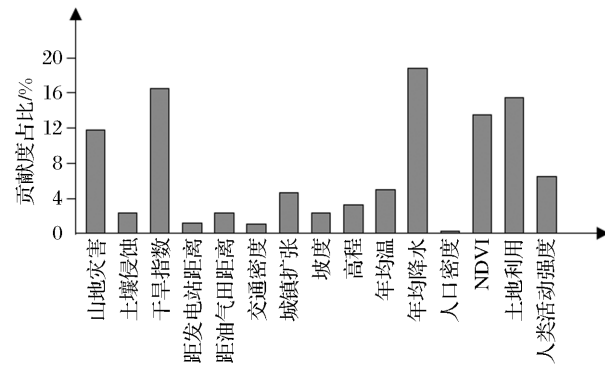


图5 指标贡献度占比
Fig.5 Spatial distribution of ecological risk influencing factors

生态风险等级	平均风险值				面积(万 km ²)			
	2015	2030(BD)	2030(IPO)	2030(HD)	2015	2030(BD)	2030(IPO)	2030(HD)
微度风险区	0.37	0.32	0.32	0.37	11.81	10.91	10.59	11.77
轻度风险区	1.78	1.66	1.65	1.71	17.18	15.37	13.32	15.86
中度风险区	2.56	2.58	2.59	2.61	7.87	9.06	9.90	8.36
高度风险区	3.73	3.74	3.73	3.69	3.48	4.56	5.56	4.23
极高风险区	5.57	6.15	6.18	6.05	2.44	2.88	3.40	2.36
总计	1.75	1.79	1.81	1.78	42.78			

注:BD:惯性发展情景;IPO:投资优先情景;HD:和谐发展情景

使得风险源危险性较高(图6(a)中I区)。该区域虽然是山地灾害高发区,但由于充沛的降水,使得其生态环境状况较好,是巴基斯坦的主要森林区,生物多样性丰富^[38],因此生态脆弱性较低(图6(b)中I区)。较高的植被覆盖,加之良好的气候条件使得该地区固碳、土壤保持和产水能力均较高,一旦遭受风险胁迫,造成的生态损失较为严重(图6(c)中I区),较高的风险源危险性和受体损失度是造

成高风险的主要原因。俾路支高原地区所面临的生态风险相对较低(图6中II区)。俾路支高原地处荒漠区,植被稀少,气候干燥,水分胁迫较为严重^[39],年平均降雨量低于200~250 mm,干旱是该地区主要的胁迫因素,恶劣的自然条件是造成生态脆弱的主要原因(图6(b)中II区)。由于其匮乏的自然资源状况,在遭受风险胁迫时造成的损失较小(图6(c)中II区),使得该地区生态风险较小。

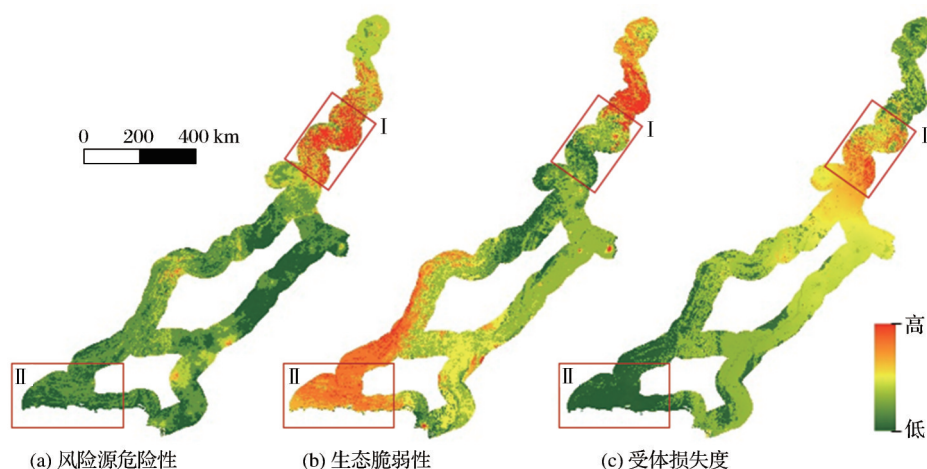


图6 生态风险影响因素空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecological risk influencing factors

不同发展情景下生态风险区面积变化的差异也较大。由图3和图4可以看出,中、高、极高生态风险区面积增加幅度最大的是投资优先情景,增加最为缓慢的是和谐发展情景,惯性发展情景介于两者之间。投资优先情景下,只考虑中巴经济走廊建设为当地基础设施的提升、能源短缺问题的改善、社会经济的发展带来的推动作用,并未将环境保护纳入情景内,因此该发展情景中社会经济发展最快,相反,其生态环境状况最差。相较于2015年,该发展情景下2030年的耕地和建设用地增幅较大,林地面积大幅减小,因此带来的环境问题也较为严重,使得高风险区面积持续扩张。惯性发展情景基于2009~2015年社会、经济数据变化趋势,未考虑新的经济、环境政策变动。由于城镇化进程以及人口和经济的不断增长,该情景下耕地和建设用地面积增加,但增幅小于投资优先情景,林地面积持续减小,城镇的持续扩张为生态环境带来了一定的压力。和谐发展情景兼顾经济发展和环境保护,耕地、建设用地增加,林地增加较为明显。该发展情景下,2030年中巴经济走廊中度和高度生态风险区面积略微增长,而极高风险区面积呈现下降趋势。因此,

兼顾经济发展和环境保护的和谐发展情景,能较好地协调经济发展与环境保护之间的关系,在推动经济发展的同时,为区域生态带来的潜在风险较小。

5 讨论

本文采用情景模拟法设计了中巴经济走廊2030年3种土地利用情景,借助遥感数据,从风险源危险性、生态系统脆弱性、风险受体损失度三个层面构建风险评价模型,描述系统内部各要素之间的相互联系、影响和制约关系。以生态系统服务定量表征生态风险受体损失度,可将人类福祉等外部因素纳入评价范围,使得风险结果清晰明确。情景模拟方法的引入,能够探究不同发展策略下生态风险的差异,可为环境治理方案 and 经济发展策略提供科学支撑。

对不同情景生态风险的研究表明,不考虑生态环境保护的“冒进”发展对生态环境造成的影响最为严重,在投资优先情景中约有3.05万km²微度、轻度风险区转变为高度、极高风险区。政策制定的失误会导致生态系统服务功能下降,如苏敬华等^[9]研究了经济优先情景下我国中原经济区生态风险中

长期变化,该情景重点发展能源、石油、钢铁等产业,为满足建设用地扩张的需求,大量侵占林地、草地,使得研究区2030年农产品提供功能持续下降、局部区域水土流失加重、洪水调蓄功能下降、生物多样性丧失严重。经济建设和生态保护和谐发展情景中,相较于2015年,2030年生态风险中度和高度风险区略微上升,由于该情景考虑巴基斯坦的“森林恢复计划”,使得森林面积大幅度增加,其极高风险呈现轻微下降的趋势。合理的土地利用规划能更好地支撑可持续发展,在其他学者的研究中也得到了佐证,如包蕊等^[40]通过合理规划甲积峪小流域未来土地利用方式,优化乔木林地、经济林和果园的分布,使得规划情景下的服务价值增加461.48万元,比基准年增加了9.23%。因此,在未来中巴经济走廊区域经济开发活动中,应借鉴我国区域经济发展中付出环境代价的经验教训,合理规划土地利用,提高土地用途管制力度,提升土地资源使用效益,确保经济发展和生态保护和谐发展。能兼顾经济发展和环境保护的和谐发展情景,是未来规划建设的优化选择。

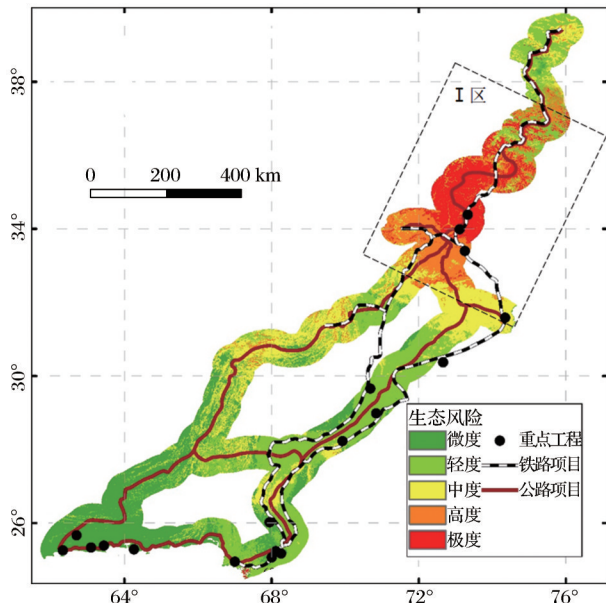


图7 中巴经济走廊生态风险分区及重点工程分布

Fig.7 Ecological risk zone and key projects of the China-Pakistan Economic Corridor

当某一情景下,某一区域表现出高度、极高的生态风险,表明该区域存在发生潜在风险的可能。因此,本文将3种发展情景生态风险等级叠加,取最高风险等级,形成新的综合风险图层。并根据中巴经济走廊实际情况和生态风险空间分布,将研究区

分为重点风险管理区和普通风险管理区。其中重点风险管理区包括巴基斯坦北部山区、北部山区向印度河平原过渡区和伊斯兰堡—拉合尔沿线的城市聚集区(图7中I区),其余地区为普通风险管理区。中巴经济走廊建设应着重关注巴基斯坦北部山区生态保护,北部山区由库什山脉、喜马拉雅山脉和喀喇昆仑山脉组成,世界七大冰川中有3个位于该地区,冰川存储量为2 738 km³^[41,42],但由于人类活动和全球变暖的影响,大部分冰川正在以每年0.66±0.09 m的速度快速变薄^[43]。加之险峻的地形、常年低温和单一的生态系统,使得该地区一旦遭受破坏,进行生态修复的难度较大,丁思洋^[17]在中巴经济走廊生态现状的研究中从不同的角度也得到了相似的结论。同时,喀喇昆仑公路通过该区域,作为连通中国和巴基斯坦的交通要道,加强该区域的环境治理工作对经济建设和环境保护都具有重要意义。伊斯兰堡—拉合尔一线的生态风险也较高,土地利用模拟数据显示,相比于2015年,巴基斯坦2030年耕地和建设用地的面积均呈现较为明显的增加趋势,而伊斯兰堡—拉合尔一线是巴基斯坦农业和人口的主要集中区,社会经济发展对生态环境的扰动是城市区风险增加的主要原因。缺乏考虑生态问题的“冒进式”增长,将对生态空间造成挤压,加剧生境破碎化程度,降低资源环境品质^[44]。因此在巴基斯坦北部山区,应控制人类的过度开发,保护森林资源,加强已有保护区的保护力度,在巴基斯坦北部山区适当增设保护区,降低生态系统脆弱性,提高抗风险能力。同时,应该注意城市及周边地区的环境问题,控制人口增长,合理、有序的规划国土空间开发活动。

交通工程建设中高填深挖直接改变地表形态、破坏植被,大量的采石、破土也会破坏自然坡面的原始稳定性,极易造成水土流失、生物链破坏等问题^[45]。产业园区虽具有促进产业聚集发展、推动污染集中治理的优点,但若缺乏宏观统筹,会对周边资源环境承载力构成压力,对区域环境安全带来潜在风险^[46]。由图7可见,中巴经济走廊投资项目大多位于生态风险较低的区域,但仍有部分工程处于生态风险较高的区域,如喀喇昆仑公路、拉合尔和伊斯兰堡附近的产业园区等。同时,产业园区大多分布在人口集中的城市周边,一旦产生污染,带来的危险较大。所以应优化园区宏观布局,加强产业园区污染排放监测,规范工业废水、垃圾等的处理。

同时加强对公路沿线生态的治理和监测,道路施工中应尽量减少对生态敏感区和自然保护区的影响,做到挖填平衡,做好水土保持工作。

本研究通过综合评估,探讨了中巴经济走廊生态风险宏观格局及2030年可能趋势,但依然存在以下4点不足:①由于生态环境系统动力学的多样性、复杂性和非线性,在数据可获得性上,很难建立包含全部影响因素的评价指标体系。随着对中巴经济走廊生态环境认识和遥感监测的不断推进,将构建更为完善的指标体系;②理论上,不同风险源胁迫下的受体损失度存在空间异质性,但目前对复杂生态系统、多风险源背景下的生态系统损失程度的差异仍较难判别,今后的研究应重点关注风险源与生态系统的相互作用关系,进一步探讨损失度差异;③本文是对中巴经济走廊生态风险的预测,其中土地利用模拟数据是模型重要的输入数据,数据的精度直接影响着评价结果,由于土地利用动态变化的复杂性,在构建区域土地需求系统动力学(SD)模型时,考虑了人口、社会、经济、气候、土地利用以及历史分布等因素,还有一些因素尚未涉及,如经济建设造成的生态破坏等。使得生态风险评价结果尚存在不确定性,未来研究应该进一步探究驱动因素与土地利用变化的作用关系;④未来可以采用分辨率更高的数据,更细致地评价区域发展在微观尺度上的生态风险(如产业园区、保护区等)。

6 结 论

中巴经济走廊作为“一带一路”的旗舰项目,对沿线地区经济发展具有积极的带动作用。然而,走廊沿线普遍面临着工业化和城市化带来的环境污染、生态退化等多种挑战,生态风险评价对该地区的可持续发展具有重要的参考价值。本文利用遥感技术获取主要的评价指标,考虑复合生态系统要素之间的相互作用关系与影响机制,从风险源危险性、生态系统脆弱性、风险受体损失度3个层面构建风险评价模型,探讨了中巴经济走廊生态风险宏观格局及2030年可能趋势。得到主要结论如下:

(1)中巴经济走廊生态风险以低风险为主,高风险主要分布在巴基斯坦北部山区向印度河平原过渡区,中度风险分布在伊斯兰堡—拉合尔一线的城市区。

(2)脆弱的生态环境和频发的自然灾害是造成北部山区生态风险的主要原因;而伊斯兰堡—拉合

尔一线是巴基斯坦农业和人口的主要集中区,社会经济发展对生态环境的扰动是风险增加的主要原因。

(3)发展情景的差异直接影响着生态风险,其中投资优先情景高风险区增幅最大;惯性发展情景高风险区增幅次之;和谐发展情景高风险区增幅最小。研究表明,兼顾经济发展和环境保护的和谐发展情景,能较好地协调经济发展与生态环境之间的关系。

参考文献(References):

- [1] Walther G R, Post E, Convey P, *et al.* Ecological Responses to Recent Climate Change[J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395. doi:10.1038/416389a.
- [2] Peng Jie. The Comprehensive Evaluation of Ecological Vulnerability in China-Pakistan Ecological Corridor. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment[D]. Chinese Academy of Sciences, 2017.[彭洁. 中巴经济走廊生态脆弱性遥感综合评估[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2017.]
- [3] Ouyang Xiao, Zhu Xiang, He Qingyun. Incorporating Ecosystem Services with Ecosystem Health for Ecological Risk Assessment: Case Study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5478-5489.[欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价—以长株潭城市群为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5478-5489.]
- [4] Suter G W. Ecological Risk Assessment in the United States Environmental Protection Agency: A Historical Overview[J]. *Integrated Environmental Assessment & Management*, 2010, 4(3): 285-289. doi:10.1897/IEAM_2007-062.1.
- [5] Pettorelli N, Safi K, Turner W. Satellite Remote Sensing, Biodiversity Research and Conservation of the Future[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 369(1643): 190. doi:10.1098/rstb.2013.0190.
- [6] Zhou Rujia, Zhang Yongzhan, He Chunhua. Ecological Risk Assessment based on Land Use Changes in the Coastal Area in Yancheng City[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(6): 1017-1028.[周汝佳, 张永战, 何华春. 基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价[J]. *地理研究*, 2016, 35(6): 1017-1028.]
- [7] Xu Xuegong, Lin Huiping, Fu Zaiyi, *et al.* Region Ecological Risk Assessment of Wetland in the Huanghe River Delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2001, 37(1): 113-122.[许学工, 林辉平, 付在毅, 等. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(1): 113-122.]
- [8] Li Hongyi, Shi Zhou, Guo Yadong, *et al.* Evaluation of Ecological Environment Quality in Fujian Province based on Re-

- remote Sensing and GIS Techniques[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(1): 49-54.[李洪义, 史舟, 郭亚东, 等. 基于遥感与GIS技术的福建省生态环境质量评价[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(1): 49-54.]
- [9] Su Jinghua, Wang Min, Yan Zhongchun, *et al.* Medium and Long-Term Ecological Risk Assessment of Regional Development: A Case Study of Central Plains Economic Region [J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37(6): 12-16.[苏敬华, 王敏, 王卿, 等. 区域开发中长期生态风险评价—以中原经济区为例[J]. 环境影响评价, 2015, 37(6): 12-16.]
- [10] Yin Xiang, Hu Xu. Challenges and Countermeasures of Infrastructure Projects of CPEC[J]. South Asian Studies Quarterly, 2019, 3(3): 32-41.[尹响, 胡旭. 中巴经济走廊基础设施建设互联互通项目建设成效、挑战与对策[J]. 2019, 3(3): 32-41.]
- [11] Liu Weidong. Scientific Understanding of the Belt and Road Initiative of China and Related Research Themes[J]. Progress in Geography, 2015, 34(5): 538-544.[刘卫东. “一带一路”战略的科学内涵与科学问题[J]. 地理科学进展, 2015, 34(5): 538-544.]
- [12] Guo H D. Steps to the Digital Silk Road[J]. Nature, 2018, 554(7690): 25-27. doi:10.1038/d41586-018-01303-y.
- [13] Feng Suyun, Zhang Kaixuan, Lu Linlin. Remote Sensing Analysis of Environmental Changes in Mega Cities along the Maritime Silk Road[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(5): 602-612.[冯素云, 张凯选, 鹿琳琳. “海上丝绸之路”超大城市环境变化遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(5): 602-612.]
- [14] Saddique U, Muhammad S, Tariq M, *et al.* Potentially Toxic Elements in Soil of the Khyber Pakhtunkhwa Province and Tribal Areas, Pakistan: Evaluation for Human and Ecological Risk Assessment [J]. Environ Geochem Health, 2018, 40(5): 2177-2190. doi:10.1007/s10653-018-0091-2.
- [15] Mehmood A, Mirza M A, Choudhary M A, *et al.* Spatial Distribution of Heavy Metals in Crops in a Wastewater Irrigated zone and Health Risk Assessment[J]. Environmental Research, 2019, 168: 382-388. doi:10.1016/j.envres.2018.09.020.
- [16] Haroom M A, Zhang J H, Yao F M. Drought Monitoring and Performance Evaluation of MODIS-based Drought Severity Index (DSI) over Pakistan [J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 1349-1366. doi:10.1007/s11069-016-2490-y.
- [17] Ding Siyang, Zhu Wenquan, Jiang Yuan, *et al.* Ecological Status in the China-Pakistan Economic Corridor: Assessments by RS and GIS [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(3): 358-365.[丁思洋, 朱文泉, 江源, 等. 基于RS与GIS的中巴经济走廊生态现状评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 358-365.]
- [18] Hussain M S, Lee S. The Regional and the Seasonal Variability of Extreme Precipitation Trends in Pakistan[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 49(4): 421-441. doi:10.1007/s13143-013-0039-5.
- [19] Lei G, Li A, Bian J, *et al.* OIC-MCE: A Practical Land Cover Mapping Approach for Limited Samples based on Multiple Classifier Ensemble and Iterative Classification [J]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 987. doi:10.3390/rs12060987.
- [20] Zhang Xiaorong, Li Ainong, Nan Xi, *et al.* Multi-scenario Simulation of Land Use Change in China-Pakistan Economic Corridor Through Coupling FLUS Model with SD Model[J]. Journal of Geographic Information Science, 2020, 22(12): 2393-2409.[张晓荣, 李爱农, 南希, 等. 基于FLUS模型和SD模型耦合的中巴经济走廊土地利用变化多情景模拟[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(12): 2393-2409.]
- [21] Chen Fu, Ge Xiaoping, Chen Gang, *et al.* Spatial Different Analysis of Landscape Change and Human Impact in Urban Fringe [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(3): 210-216.[陈浮, 葛小平, 陈刚, 等. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 210-216.]
- [22] Bian Jinhu, Li Ainong, Song Mengqiang, *et al.* Reconstruction of NDVI Time-series Datasets of MODIS based on Savitzky-golay Filter [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(4): 725-741.[边金虎, 李爱农, 宋孟强, 等. MODIS植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构[J]. 遥感学报, 2010, 14(4): 725-741.]
- [23] Gao Hua, Zhang Jiahua, Xia Xueqi. Drought Monitoring by Remote Sensing over India and Pakistan based on Temperature Vegetation Dryness Index [J]. Remote Sensing Information, 2016, 31(4): 62-68.[高华, 张佳华, 夏学齐. 基于温度植被干旱指数的印度和巴基斯坦干旱监测[J]. 遥感信息, 2016, 31(4): 62-68.]
- [24] Liang Li. Spatialization of Population Density based on Night Time Light Images and the Correlation Analysis between PM2.5 and People Density [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2019.[梁丽. 基于夜间遥感影像的人口密度空间化及其与PM2.5浓度的相关性分析[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2019.]
- [25] Bi Kaiyi, Niu Zheng, Huang Ni, *et al.* Effects of Road Network on Landscape Ecological Risk: A Case Study of China and Indochina Peninsula Economic Corridor [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(3): 347-353.[毕恺艺, 牛铮, 黄妮, 等. 道路网络对景观生态风险的影响—以“中国-中南半岛经济走廊”为例[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(3): 347-353.]
- [26] Wang Huifang, Rao Enming, Xiao Yan, *et al.* Ecological Risk Assessment in Southwest China based on Multiple Risk Sources [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8992-9000.[王慧芳, 饶恩明, 肖彦, 等. 基于多风险源胁迫的西南地区生态风险评价[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8992-9000.]
- [27] Ali S, Biermanns P, Haider R, *et al.* Landslide Susceptibility Mapping by Using a Geographic Information System (GIS) Along the China-Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19(5): 999-1022. doi:10.5194/nhess-19-

- 999-2019.
- [28] Peng Jie, Li Ainong, Lei Guangbin, *et al.* Estimation and Spatial Downscaling of Rainfall Erosivity Using TRMM Precipitation Data in Pakistan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 10-15.[彭洁, 李爱农, 雷光斌, 等. 基于 TRMM 数据的巴基斯坦降雨侵蚀力估算及空间降尺度模拟[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 10-15.]
- [29] Ullah S, You Q, Ullah W, *et al.* Observed Changes in Precipitation in China-Pakistan Economic Corridor during 1980 - 2016 [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 210: 1-14. doi: 10.1016/j.atmosres.2018.04.007.
- [30] Kamal A, Shamsuddin S, Nadeem N. Impacts of Climate Variability and Change on Seasonal Drought Characteristics of Pakistan [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 214: 364-374. doi:10.1016/j.atmosres.2018.08.020.
- [31] Li A N, Wang A S, Liang S L, *et al.* Eco-environmental Vulnerability Evaluation in Mountainous Region Using Remote Sensing and GIS—A Case Study in the Upper Reaches of Minjiang River, China[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 192(1): 175-187. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.07.005.
- [32] Kang Peng, Chen Weiping, Wang Mei'e, *et al.* 2016. Advances in Ecosystem Service based Ecological Risk Assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(5): 1192-1203.[康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1192-1203.]
- [33] Turner R K, Adger W N, Brouwer R. Ecosystem Services Value, Research Needs, and Policy Relevance: A Commentary [J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 61-65. doi: 10.1016/S0921-8009(98)00018-4.
- [34] Deng Wei, Zhao Wei, Liu Bingtao, *et al.* Water Security and the Countermeasures in South Asia based on the “Belt and Road” Initiative[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 687-701.[邓伟, 赵伟, 刘斌涛, 等. 基于“一带一路”的南亚水安全与对策[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 687-701.]
- [35] Zhang Kangsheng. Natural Environment and Problems in Pakistan[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*. 1997, 6: 66-72.[张康生. 巴基斯坦的自然环境及存在问题[J]. *环境科学进展*, 1997, 6: 66-72.]
- [36] Su C, Fu B. Evolution of Ecosystem Services in the Chinese Loess Plateau Under Climatic and Land Use Changes [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 119-128. doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.12.014.
- [37] Wang Xuebao, Cai Ghuolan. Parameter Evaluation of Logistic Model and Population Prediction [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2009, 27(6): 75-78.[王学保, 蔡果兰. Logistic 模型的参数估计及人口预测 [J]. *食品科学技术学报*, 2009, 27(6): 75-78.]
- [38] Siddiqui P J A, Farooq S, Shafique S, *et al.* Conservation and Management of Biodiversity in Pakistan through the Establishment of Marine Protected Areas [J]. *Ocean and Coastal Management*, 51(5): 377-382. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2008.01.006.
- [39] Ahmed K, Shahid S, Chuang E S, *et al.* Climate Change Uncertainties in Seasonal Drought Severity Area Frequency Curves: Case of Arid Region of Pakistan [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 473-485. doi: 10.1016/j.jhydrol. 2019. 01.019.
- [40] Bao Rui, Liu Feng, Zhang Jianping, *et al.* Multi-objective Linear Programming based Trade off and Optimization of the Ecosystem Services in Jiajiyu Small Watershed in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 812-828.[包蕊, 刘峰, 张建平, 等. 基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 812-828.]
- [41] Seong Y B, Owen L A, Bishop M P, *et al.* Quaternary Glacial History of the Central Karakoram [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(25-28): 3384-3405. doi:10.1016/j.quascirev.2007.09.015.
- [42] Baig S U, Khan H, Din A. Spatio-temporal Analysis of Glacial Ice Area Distribution of Hunza River Basin, Karakoram Region of Pakistan [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(10): 1491-1501. doi:10.1002/hyp.11508.
- [43] Kaab A, Berthier E, Nuth C, *et al.* Contrasting Patterns of Early Twenty-first-century Glacier Mass Change in the Himalayas [J]. *Nature*, 2012, 488(7412): 495-498. doi:10.1038/nature11324.
- [44] Zhao Danyang. Eco-environment Effect of Urban Expansion in Songhua River Basin [D]. Jilin: Northeast Institute of Geography and Agroecology Chinese Academy of Sciences, 2017.[赵丹阳. 松花江流域城镇空间扩展的生态环境效应[D]. 吉林: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2017.]
- [45] Zhao Erjie. Study and Application on Fuzzy Comprehensive Evaluation base on AHP in the Ecology Environmental Assessment of Railway [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2007.[赵二杰. 基于 AHP 的模糊数学在铁路建设生态环境评价中的研究与应用[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.]
- [46] Huang Lihua, Jiang Yun, Chen Fan, *et al.* Resource and Environmental Issues and Countermeasures for the Development of Yangtze River Delta Industrial Parks [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2018, 40(4): 31-33.[黄丽华, 姜昀, 陈帆, 等. 长三角园区发展亟待解决的资源环境问题与对策[J]. *环境影响评价*, 2018, 40(4): 31-33.]

Comprehensive Assessment of Ecological Risk in Multi-scenarios of China-Pakistan Economic Corridor based on RS and GIS

Wang Changbo^{1,2}, Li Ainong¹, Zhang Xiaorong^{1,2}, Nan Xi¹, Bian Jinhu¹,
Kamran Muhammad^{1,2}

(1. *Research Center for Digital Mountain and Remote Sensing Application, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The eco-environment along the China-Pakistan Economic Corridor (CPEC) is complex, and the contradictions between the population growth and land resources is prominent. Although the construction of the CPEC has promoted regional economic development, it has inevitably affected the regional ecological environment. Based on remote sensing, geographic information and scenario simulation methods, a risk assessment model from three aspects including risk source danger, ecological environment vulnerability and receiver loss degree, was constructed. Moreover, combining the land use simulation of 2030 under Baseline Development (BD) scenario, Investment Priority Oriented (IPO) scenario, and the Harmonious Development (HD) scenario, the temporal and spatial variation of ecological risk in the CPEC from 2015 to 2030 were also analyzed. The results showed that the area with higher ecological risk is mainly distributed in the transition zone from North Highlands to the Indus Plain. Our results also indicated that the setting of the scenario directly affects ecological risk. Among them, the high-risk area in IPO scenario had the largest increase. Compared with 2015, the proportion of medium, high and extremely high-risk areas increased by 4.75%, 4.84% and 2.25%, respectively in 2030. In the BD scenario, the proportion of medium, high and extremely high-risk areas increased by 2.79%, 2.56% and 1.04%, respectively. Meanwhile, moderate and high-risk areas of HD scenario showed an increasing trend, and the extremely high-risk areas decreased slightly, with increases of 1.15%, 2.19% and -0.16%, respectively. This study suggested that considering economic development and environmental protection at the same time is the optimal choice for future planning and construction. The comprehensive evaluation method based on remote sensing and GIS technology can provide technical support for ecological risk evaluation of economic corridors.

Key words: Remote Sensing; Scenario simulation; Ecological risk; China-Pakistan Economic Corridor