

DOI: 10.5846/stxb202202060297

李志慧, 张玥, 彭璐, 吴锋. 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力评价及影响因素辨识. 生态学报, 2023, 43(2): 625-638.

Li Z H, Zhang Y, Peng L, Wu F. Assessment of socioeconomic-ecological composite system resilience and its influencing factors analysis in Nepal. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 625-638.

尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力评价及影响因素辨识

李志慧^{1,2,3}, 张 玥⁴, 彭 璐^{1,2,3}, 吴 锋^{1,2,3,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 北京市第八中学, 北京 100033

摘要:“一带一路”沿线部分国家处于生态环境脆弱、社会经济落后状态,开展社会经济-生态复合系统恢复力时空特征评估及关键要素识,对于实现“一带一路”倡议“走出去”战略和绿色丝路建设至关重要。基于社会发展、经济水平、基础设施建设、生态环境、自然灾害风险 5 个一级指标 24 个二级指标构建了社会经济-生态复合系统恢复力评价指标体系,利用主成分分析法和结构方程模型评价了 2000—2015 年尼泊尔县域尺度社会经济-生态复合系统恢复力并分析了其时空分异特征,厘清了影响社会经济-生态复合系统恢复力的关键因素及其影响机制。结果表明:①尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力在县域尺度上主要集中在中低和中等恢复力水平,而中高恢复力呈由南向北逐渐降低态势,南部地区以及位于中部发展区的首都加德满都河谷地区恢复力水平相对较高;②2000—2015 年尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力在不同阶段呈现波动变化状态,2005 年恢复力最优,2010 和 2015 年部分区域恢复力降低明显,系统恢复力区域间差异逐步增大;③社会发展、经济水平、基础设施、建设生态环境和自然灾害风险对系统恢复力提升的总效应分别为 0.99,0.07,0.11,0.89 和 -0.12;按照指标影响程度来看,尼泊尔提升恢复力的关键路径主要在于促进社会经济发展、改善生态环境、推动基础设施建设以及降低灾害风险。未来尼泊尔应依托“一带一路”建设平台加强与周边国家合作交流,提升社会保障与区域均衡发展,促进产业升级及积累资本,发展生态林业并加强灾害监测及决策支持系统建设,实现社会、经济和生态的协同与可持续发展。

关键词:“一带一路”倡议;社会经济-生态复合系统恢复力;主成分分析;结构方程模型;路径分析;尼泊尔

Assessment of socioeconomic-ecological composite system resilience and its influencing factors analysis in Nepal

LI Zhihui^{1,2,3}, ZHANG Yue⁴, PENG Lu^{1,2,3}, WU Feng^{1,2,3,*}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 No.8 Middle School of Beijing, Beijing 100033, China

Abstract: In the face of multiple crises and challenges brought by global change and intensified human activities, how to cope with various risks and maintain system resilience has become one of the important issues of regional sustainable development. The One Belt and One Road initiative is international economic cooperation initiative put forward by China, which aims to promote economic globalization and win-win international cooperation. While, some countries along the One

基金项目:中国科学院 A 类战略性先导科技专项项目(XDA20010302)

收稿日期:2022-02-06; 网络出版日期:2022-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wufeng@igsrr.ac.cn

Belt and One Road are in a fragile ecological environment and backward in social and economic development, such as Nepal whose socioeconomic-ecological composite system has potential low risk resistance characteristics. It is crucial to evaluate the spatiotemporal characteristics of the socioeconomic-ecological composite system resilience of typical countries and identify the key factors for the implementation of the “Go Global” strategy and the Green Silk Road construction. Taking Nepal as case study area, an index system for evaluating the resilience of the socioeconomic-ecological composite system was constructed based on five first-level indicators and 24 second-level indicators from the perspectives of social development, economic level, infrastructure construction, ecological environment, and the natural disaster risk. Then, based on principal component analysis and structural equation model, this paper evaluated the resilience of socioeconomic-ecological composite system at county-level in Nepal from 2000 to 2015, analyzed its temporal and spatial variation characteristics, and clarified the key factors influencing the resilience and its influencing mechanism. The results showed that at the county level, the resilience of the socioeconomic-ecological composite system in Nepal was mainly concentrated at the low and medium levels, while the resilience of the middle and high levels gradually decreased from south to north, and the resilience of the southern region and the Capital Kathmandu Valley in the central development zone was relatively high. In addition, from 2000 to 2015, the resilience of socioeconomic-ecological composite system in Nepal fluctuated and showed spatial differences at different stages. The resilience was the highest in 2005, and decreased significantly in some regions in 2010 and 2015, and the regional differences of the system resilience increased gradually. Moreover, the total effects of social development, economic level, infrastructure construction, ecological environment and natural disaster risk on resilience improvement were 0.99, 0.07, 0.11, 0.89 and -0.12, respectively. According to the effect degree of the factors, the key path to enhance Nepal's resilience mainly lay in promoting social and economic development, improving the ecological environment, promoting infrastructure construction and reducing disaster risk. In the future, Nepal should rely on the “One Belt and One Road Initiative” construction platform to strengthen cooperation and exchanges with neighboring countries, improve social security and the balanced regional development, promote industrial upgrading and capital accumulation, develop ecological forestry, strengthen disaster monitoring and decision support system construction, and realize social, economic and ecological coordination and sustainable development.

Key Words: One Belt and One Road initiative; socioeconomic-ecological composite system resilience; principal component analysis; structural equation model; path analysis; Nepal

“一带一路”倡议是我国提出的区域国际经济合作倡议,旨在推动经济全球化与国际合作共赢,共同实现2030年可持续发展目标^[1-3]。然而,“一带一路”建设给沿线各国带来利益的同时也面临着部分区域生态环境脆弱、自然灾害频发及社会环境动荡等问题带来的风险和挑战^[4-6]。尼泊尔是“一带一路”倡议的主要参与国,是我国对外投资的重要合作方。2018年,中国对尼泊尔投资超过3亿美元,是尼泊尔第一大外资来源国。目前中国已经是尼入境游客的第二大来源国,中国与尼泊尔在“一带一路”倡议方面的合作对未来中国-尼泊尔-印度经济走廊建设具有重要意义,双方合作协议的落实将为尼泊尔带来更多的经济利益。然而,受气象与地质灾害频发,农业和工业发展程度不足,经济发展相对落后的影响,尼泊尔社会经济-生态复合系统有着潜在的低抗风险特征^[7-8]。因此,系统评估和分析尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力演变特征及关键因素作用机制,对于维持区域社会经济-生态复合系统的平稳发展及预防“一带一路”建设中未知风险引致的影响和损失具有重要意义。

社会经济-生态复合系统在面对全球变化和人类活动的加剧带来的多重危机与挑战时,如何应对各种风险并保持系统韧性发展成为区域可持续发展的重要议题之一。社会经济-生态复合系统强调社会经济系统与生态系统的系统整合,是紧密联系人与自然交互的复杂系统,从复杂系统视角研究其对外界干扰的恢复力和适应力,是全球变化与可持续发展研究的重要议题^[9-10]。因此,恢复力逐渐被引入描述社会经济-生态复合

系统的状态^[11-12]。1973 年 Holling 首次将恢复力的概念引入生态系统的研究中,将其定义为“生态系统抵抗压力并能继续维持的能力量度”^[13]。此后,Holling 和 Gunderson 将恢复力正式引入社会经济-生态复合系统,并将该领域的恢复力定义为社会经济-生态复合系统经受干扰并可维持其功能和控制的能力,主要受环境变化、社会进步、经济增长或政治变革等因素的影响^[14]。21 世纪以来,社会经济-生态复合系统恢复力的概念逐步发展成熟,并被广泛用于生态及社会经济等各领域^[15-17]。国内外对于恢复力的研究主要分为两类,一类是对自然生态系统恢复力的研究,另一类是对社会经济-生态复合系统恢复力的研究。通过对社会经济-生态复合系统恢复力的定量测度研究,可以识别出社会经济-生态复合系统恢复建设的薄弱环节,促进我们理解人类生存环境如何调控以及如何更具有针对性地开展适应性管理^[18]。

社会经济-生态复合系统恢复力研究热点主要集中在社会经济-生态复合系统恢复力的动态演化、适应性管理以及不同类型的实证分析^[16,19]。社会经济-生态复合系统恢复力评估方法复杂多样,对于恢复力的定量测度主要有两种方法,第一种为针对研究对象构建恢复力评估系统模型,第二种为基于构建的恢复力评价指标体系,运用层次分析法、熵权法及因子分析法等为评价单元的恢复力开展综合评分^[17,20-21]。常用的恢复力评估系统模型有可计算一般均衡模型(CGE)、区域灾害恢复力模型(DROP)等^[20-21]。基于均衡论认知思维的恢复力评价方法主要通过选定一个核心变量并观察核心变量在危机或扰动前后的变化,以此表征区域在外部干扰下的恢复力水平。Rose 等在经济恢复力研究中引入 CGE 模型,探讨了洛杉矶市在环境灾害影响下电力系统中断对区域经济系统恢复力的影响^[22]。恢复力评价指标体系的构建通常根据研究区域(山区、海岸带等)、研究对象(如气象灾害、地质灾害等)不同而有差异。相关机构和学者开发了不同的恢复力评估指标体系,如联合国粮农组织提出了生计恢复力指数测算与分析(RIMA)框架,其中包括收入及粮食、服务、援助、资本 4 个可直接衡量的维度以及适应能力和稳定性 2 个较为复杂的维度^[23],该模型被广泛应用于微观尺度家庭或社区生计恢复力测度^[24-25]。此外,不同学者根据特定的研究区及问题从不同维度构建了恢复力评价指标体系,如针对南非受洪水影响的城市构建的包含 24 个与洪水及其相关的社会、生态、基础设施和经济方面的恢复力指标^[26],针对资源依赖型城市和地区构建的基于持续性(干扰强度、暴露度)、适应性(自身适应、外部帮助)和转型(转型压力、创新能力)建立的资源型城市经济系统恢复力评估体系^[27],针对农业系统从自然与社会因素两方面构建的恢复力评估指标体系^[28],及以“社会、经济、城市体系与服务、城市管理”为框架构建的适合中国国情的城市恢复力评价指标体系等^[29]。

总体来看,研究学者开展不同系统的恢复力研究所选择的评价指标不尽相同,但指标大多包含社会、经济、生态三个维度,以求从社会经济和自然环境两方面综合评价系统恢复力。因此,社会经济-生态复合系统的恢复力研究需综合考虑社会子系统、经济子系统以及自然子系统,从不同维度构建恢复力评价指标体系。基于构建的恢复力评价指标体系,确定评价指标权重的方法主要有专家打分法、TOPSIS 法、主成分分析等,其中主成分分析被广泛用于社会经济-生态复合系统评价指标权重测度^[25,30-31]。此外,在评价单元的选择上,社会经济-生态复合系统恢复力评价主要以国家和城市或是小尺度的社区和家庭为单位,较少开展县域尺度评价^[32-34]。县域是人口集中分布及人类经济活动及管理决策的关键行政单元,以县域为单元分析社会经济-生态复合系统的恢复力水平,能更有针对性地开展恢复力提升研究及策略实践。尼泊尔当前社会经济发展较为落后,经济有很大发展空间,县域是促进农业产业化及增强城乡之间产品交换等经济活动的关键地理单元。此外,县域社会经济的快速发展,尤其是工业发展,有利于吸纳农村农劳动力,同时减缓城市社会生活压力与乡村生态环境承载力。综上,以县域为评价单元以更加突出区域间社会经济及生态环境差异,构建科学合理的尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力评价指标体系,评估县域社会经济-生态复合系统的恢复力时空演变特征,并识别影响恢复力提升的主导因素,分析其恢复力形成与提升的机理,将为开展社会经济-生态复合系统的适应性管理提供理论依据并为促进尼泊尔社会经济-生态复合系统稳定发展提供科学支撑。

鉴于此,本文首先从社会发展、经济水平、基础设施建设、生态环境、自然灾害风险 5 个子系统构建了尼泊尔社会经济-生态复合系统县域尺度恢复力评价指标体系,运用主成分分析法开展尼泊尔 2000、2005、2010 和

2015 年四个时间断面上社会经济-生态复合系统恢复力综合评估并分析了其时空演变特征;其次,构建了结构方程模型,计算各子系统对尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力的影响贡献及路径,厘清影响其社会经济-生态复合系统恢复力提升的关键因素及作用机制;最后,基于上述分析提出提升尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力的有效策略。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

尼泊尔联邦民主共和国(简称尼泊尔, $26^{\circ} 22' - 30^{\circ} 27' \text{ N}$, $80^{\circ} 4' - 88^{\circ} 12' \text{ E}$),地处喜马拉雅山南麓,国土面积约为 14.72 万 km^2 (图 1)。尼泊尔人口约 2649.5 万,其中女性人口占比 51.5%。尼泊尔可分为 5 个发展区,共包括 774 个县。居民对自然资源高度依赖,农业是尼泊尔社会经济发展最重要的产业,提供了尼泊尔约 75% 的就业机会^[35]。尼泊尔地势北高南低,具有从高原到山地再到平原的典型过渡特征,由北向南分为高山区、河谷区和平原区三部分。东、西、北三面多高山,珠穆朗玛峰即位于尼泊尔北境线,境内多条大河也源于高山区。中部河谷区人口约占尼泊尔总人口的 43%,地形以小山为主。南部冲积平原是恒河平原向北的延伸地带,以种植水稻、玉米等粮食作物和甘蔗、烟草以及蔬菜和其他作物为主,平原区人口约占尼泊尔总人口的 50%,是人口最为密集的区域。尼泊尔是受气候变化影响最脆弱的国家之一,极易遭受地震、洪水、滑坡、火灾、干旱和极端天气等自然灾害影响^[36]。受气候多变、地形多样、雨季降水量大且持续时间长等自然因素影响,尼泊尔北部山区以及中部河谷地带是山洪、山体滑坡等地质灾害发生的重灾区,常常面临建筑破坏、交通中断、补给不足和人员伤亡等风险。除了自然因素外,人类活动的扩张和高度的自然资源依赖性,缺乏积极的立法和有效的反应机制与适应措施也是尼泊尔社会经济-生态复合系统脆弱的重要原因。

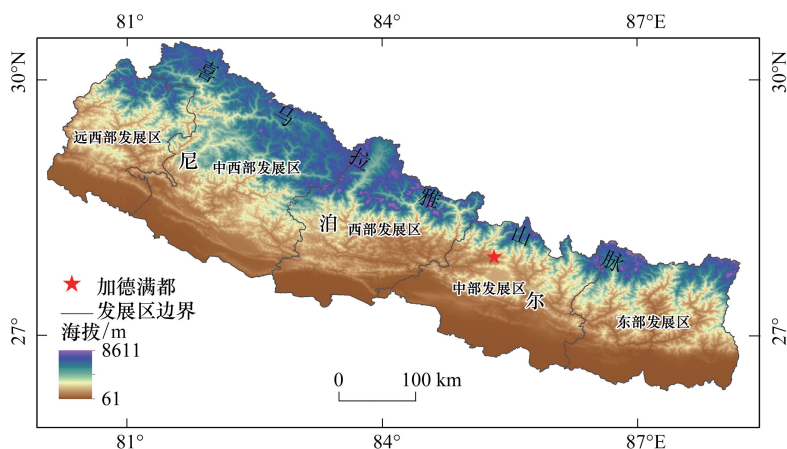


图 1 尼泊尔地理位置

Fig.1 Geographical location of Nepal

1.2 指标体系与数据来源

通过查阅相关文献并参考联合国开发计划署 (UNDP)、恢复力联盟 (Resilience Alliance)、世界银行 (World Bank)、国际发展研究中心 (IDRC) 等国际组织的恢复力评估指标体系,结合尼泊尔社会经济发展、生态环境、自然资源状况,考虑指标体系的科学性、可行性,以系统综合恢复力为系统层,以社会发展、经济水平、基础设施建设、生态环境、自然灾害风险要素为子系统层,本文构建了包含 24 项指标的尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力评估指标体系(表 1)。表 1 展示了每个指标的具体含义及其在评估系统中的正负方向。

研究所用数据可分为统计数据 and 空间栅格数据,其中社会经济指标主要来源于世界银行以及尼泊尔统计局发布的各类统计数据,生态环境及自然灾害风险相关指标主要来源于 MODIS 等全球遥感数据产品,数据名

称及来源见表 2,所有指标均收集了 2000、2005、2010 和 2015 年的时间序列数据。由于数据涉及不同空间尺度,为得到尼泊尔县级尺度各项数据的统计结果,研究对空间栅格数据进行了县域空间统计。此外,由于尼泊尔县域统计数据较难获取,因此研究基于世界银行的国别统计数据和尼泊尔统计年鉴中的市级统计数据进行了数据空间化。

表 1 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力评价指标体系

Table 1 Index system for resilience assessment of Nepal's socioeconomic-ecological composite system

系统层 System layer	一级指标 First level indicator	二级指标 Second level indicator	正负影响 Positive or negative effect	指标含义 Definition of indicator
系统综合恢复力 Comprehensive system resilience	社会发展	人口密度	-	衡量人口拥挤程度
		0—14 及 65 岁以上人口比例	-	衡量人口年龄结构
		女性人口比例	+	衡量人口性别结构
		城市人口比例	+	衡量社会福利水平
		失业率	-	衡量就业压力
		识字率	+	衡量教育普及程度
		建筑面积比例	+	衡量城市发展水平
	经济水平	人均粮食产量	+	衡量粮食安全
		人均 GDP	+	衡量经济发展
		粮食作物单产	+	衡量农业发展
		工业从业人数	+	衡量工业规模
		人均工业增加值	+	衡量工业发展
		国外游客人数	+	衡量旅游业发展
		医院每千人床位数	+	衡量医疗设施
	基础设施建设	夜间灯光指数	+	衡量电力设施发展
		道路密度	+	衡量道路交通建设
		NPP (Net primary production)	+	衡量植物净初级生产力
	生态环境	景观多样性指数	+	衡量区域受人类活动影响
		植被覆盖率	+	衡量植被覆盖面积
		森林覆盖率	+	衡量森林覆盖水平
		年降水量	-	衡量干旱风险
	自然灾害风险	雨季月平均降水量	-	衡量洪水风险
		坡度	-	衡量泥石流风险
		地形起伏度	-	衡量救援难易程度

空间化的方法采用多源数据融合法,即选择影响研究区社会经济数据分布的因子并赋予权重,融合多源数据达到社会经济数据网格化的目的。由于人口和 GDP 是最直接反应社会经济活动的两项因子,且人口和 GDP 空间分布数据可获取。其中人口数据来源于 HYDE3.2.1 人口网格化数据库 (History Database of the Global Environment), GDP 数据来源于 GDP 网格化全球数据集 (Gridded global datasets for Gross Domestic Product and Human Development Index over 1990—2015)。此外,考虑到这两项指标数据在其自身空间化过程中已考虑了包括土地利用、地形等其他因素对人口和 GDP 的影响,因此本研究不再增加土地利用数据等自然环境因子作为社会经济数据空间栅格化的参考因子。因此,研究选定人口和 GDP 为影响区域其他社会经济指标空间化的关键因子,并设定其权重分别为 0.5,从而将从世界银行获取的国别尺度和尼泊尔统计年鉴中获取的市级尺度的社会经济指标进行空间栅格化(表 2)。空间栅格化过程如下:

$$X_{ij} = 0.5 \times X_j \times (\text{Pop}_i/\text{POP} + \text{Gdp}_i/\text{GDP}) \quad (1)$$

式中, X_{ij} 表示第 j 变量在空间栅格 i 的值; X_j 表示第 j 变量在城市尺度或国别尺度的统计值; Pop_i/POP 表示空间栅格 i 上的人口数占尼泊尔国别或该栅格所属市的总人口的比例; Gdp_i/GDP 表示空间栅格 i 上的 GDP 占

尼泊尔国别或该栅格所属市的总 GDP 的比例。

表 2 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力评价数据来源

Table 2 Data sources for assessing the resilience of Nepal's socioeconomic-ecological composite system

变量名称 Variable name	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data source
* 0—14 及 65 岁以上人口比例 Percentage of population ages 0—14 and over 65 of total population、医院每千人床位数 Hospital beds per 1000 people、国外游客人数 Number of foreign tourists、城市人口比例 Proportion of urban population	国别	世界银行统计数据
* 女性人口比例 Proportion of female population、失业率 Unemployment rate、识字率 Literacy rate、人均粮食产量 Grain production per capita、粮食作物单产 Grain yield、工业从业人数 Industrial employment、人均工业增加值 Industrial added value per capita	市级	尼泊尔统计年鉴
人口密度 Population density	1km	人口网格化数据集 ^[37]
人均 GDP GDP per capita	5 arc min	GDP 网格化全球数据集 ^[38]
夜间灯光指数 Nighttime light index	1km	美国国家地球物理数据中心 NPP/VIIRS 遥感数据
道路密度 Road density	5 arc min	The Global Roads Inventory Project (GRIP4) 道路密度数据集
NPP	1km	MOD17A3 NPP 产品
建筑面积比例 Floor area ratio、景观多样性指数 Landscape diversity index、植被覆盖率 Vegetation coverage rate、森林覆盖率 Forest coverage rate	1km	MOD12Q1 土地覆盖类型产品
年降水量 Annual precipitation、雨季月平均降水量 Average monthly precipitation in rainy season	1km	CHIRPS2.0 降水数据
坡度 Slope、地形起伏度 Relief	1km	美国国家地理空间情报局 SRTM DEM 数据

* 开展数据空间化的指标

1.3 研究方法

1.3.1 主成分分析法

社会经济-生态复合系统恢复力评价指标数量较多且相关性较大,主成分分析法能够将原始指标重新组合成相互独立的几个综合变量,能够消除评价指标间的相关影响并尽可能多地反映原来指标的信息,客观地确定评价指标的权重。研究基于构建的尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力评价指标体系,采用主成分分析方法剔除冗余数据,提取主成分,然后进行恢复力评价,计算公式为:

$$R_i = \sum w_j y_{ij} \tag{2}$$

式中, R_i 表示评价单元 i 的恢复力; y_{ij} 表示此评价单元的主成分 j 的值; w_j 表示主成分 j 的权重。对评价指标进行主成分分析的结果见表 3。研究选取初始特征值大于 1 的前 6 个主成分(Principal component,简称 PC)作为计算指标,其累计贡献率为 77.33%。根据 6 个主成分的方差贡献率占累积贡献率的比值,加权平均计算得到社会经济-生态复合系统恢复力 R :

$$R = 0.33 \times PC1 + 0.23 \times PC2 + 0.17 \times PC3 + 0.15 \times PC4 + 0.07 \times PC5 + 0.05 \times PC6 \tag{3}$$

由于社会经济-生态复合系统恢复力评价指标间量纲不同,单位不统一,需对指标进行标准化处理。根据各指标对社会经济-生态复合系统的影响,研究将评价指标分为正向与负向指标。正向指标表示值越大社会经济-生态复合系统恢复力越高,负向指标表示值越小社会经济-生态复合系统恢复力越低。其中,负向指标包括人口密度、0—14 及 65 岁以上人口比例、失业率、年降水量、雨季月平均降水量、坡度与地形起伏度,其余指标均为正向指标。指标的标准化采用极差标准化,其公式为:

正向指标:

$$X'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}, \cdots, x_{nj}\}}{\max\{x_{ij}, \cdots, x_{nj}\} - \min\{x_{ij}, \cdots, x_{nj}\}} \tag{4}$$

负向指标:

$$X'_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}, \cdots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}, \cdots, x_{nj}\} - \min\{x_{ij}, \cdots, x_{nj}\}} \quad (5)$$

式中, X'_{ij} 表示第 i 个单元第 j 个指标的标准化值, x_{ij} 为各指标的实际值, $\min\{x_{ij}, \cdots, x_{nj}\}$ 为各指标的最小值, $\max\{x_{ij}, \cdots, x_{nj}\}$ 为各指标的最大值。

表 3 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力评价各主成分特征值、贡献率、累积贡献率

Table 3 Eigenvalues, contribution rates and cumulative contribution rates of indicators for assessing the resilience of Nepal's socioeconomic-ecological composite system

成分 Component number	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate	成分 Component number	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate
PC1	6.10	25.42	25.42	PC13	0.36	1.51	93.96
PC2	4.18	17.42	42.83	PC14	0.31	1.30	95.26
PC3	3.11	12.94	55.77	PC15	0.28	1.17	96.42
PC4	2.78	11.58	67.35	PC16	0.23	0.95	97.38
PC5	1.39	5.80	73.15	PC17	0.21	0.86	98.24
PC6	1.00	4.19	77.33	PC18	0.16	0.66	98.89
PC7	0.86	3.58	80.91	PC19	0.12	0.48	99.37
PC8	0.75	3.11	84.02	PC20	0.10	0.41	99.78
PC9	0.59	2.45	86.48	PC21	0.03	0.13	99.90
PC10	0.58	2.40	88.88	PC22	0.02	0.08	99.98
PC11	0.44	1.85	90.73	PC23	0.00	0.02	100.00
PC12	0.41	1.72	92.45	PC24	0.00	0.00	100.00

1.3.2 结构方程模型

结构方程模型(SEM)是结合因子分析和回归分析的多元统计方法,可同时估算观测变量之间和潜变量及潜变量之间的关系^[39—40]。本文基于 SEM 构建尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力的影响路径分析模型,根据路径分析结果探究尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力的关键影响因素及其内在影响机制,为提升恢复力提出管理策略。SEM 是一种应用广泛的数据统计分析工具,不仅能够同时模拟多个自变量与多个因变量之间的内在逻辑关系,并且可同时估计因子结构和因子间关系。SEM 中的变量依据是否可直接测量可分为观测变量和潜变量,潜变量不可直接被测量,需要由观测变量来间接反映。依据变量间的相关关系,变量可被分为外生变量和内生变量,外生变量在 SEM 中只起到解释作用,即只能影响其他变量,内生变量则既可以受到模型中外生变量影响也可以受到内生变量影响。本文的变量设置如表 4。SEM 构建过程包括五个部分,分别为模型设定、识别、估计、评价和修正。模型设定是以测量模型和结构模型两部分共同表示 SEM 中各变量间的关系。根据参考文献,结合构建的社会经济-生态复合系统恢复力指标体系,提出如下假设:H1:生态环境优化对社会经济-生态复合系统恢复力有显著正向影响;H2:社会发展对社会经济-生态复合系统恢复力有显著正向影响;H3:基础设施建设对社会经济-生态复合系统恢复力有显著正向影响;H4:生态环境优化对经济水平有显著正向影响;H5:生态环境优化对社会发展有显著正向影响;H6:经济水平对社会发展有显著正向影响;H7:自然灾害风险对经济水平有显著负向影响;H8:自然灾害风险对社会发展有显著负向影响;H9:自然灾害风险对基础设施建设有显著负向影响;H10:社会发展对基础设施建设有显著正向影响。由于样本容量较大,本文选择最大似然法进行模型参数估计及修正,以得到各变量间路径系数。

表 4 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力关键要素识别结构方程模型变量设置

Table 4 Variable settings for structural equation model for analyzing the key influencing factors of the resilience of Nepal's socioeconomic-ecological composite system

变量类型 Type of variable	潜变量 Latent variable	观测变量 Observable variable
内生变量 Endogenous variable	恢复力	恢复力评价结果
	社会	人口密度、0—14 及 65 岁以上人口比例、女性人口比例、城市人口比例、失业率、识字率、建筑面积比例、人均粮食产量
	经济	人均 GDP、粮食作物单产、工业从业人数、人均工业增加值、国外游客人数
	基础设施建设	医院每千人床位数、夜间灯光指数、道路密度
外生变量 Exogenous variable	生态环境	景观多样性指数、植被覆盖率、森林覆盖率、NPP
	自然灾害风险	年降水量、雨季月平均降水量、坡度、地形起伏度

2 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力时空特征

2.1 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力时空分布特征

尼泊尔 2000—2015 年社会经济-生态复合系统恢复力指数主要分布在 0.75—3.55 之间,各年份平均值在 1.14—1.22 之间。基于 2015 年社会经济-生态复合系统恢复力,采用自然断点法将各年尼泊尔县级社会经济-生态复合系统恢复力分为 5 级(低、中低、中、中高及高恢复力),各县社会经济-生态复合系统恢复力主要集中在中低和中等恢复力水平,其次是中高恢复力(图 2)。2000—2015 年尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力最大值呈现上升趋势,最小值变化较小但稍有降低。县域社会经济-生态复合系统恢复力标准差由 2000 年的 0.25 增长至 2015 年的 0.41,表明各县社会经济-生态复合系统恢复力距离全国平均值的差距增大,内部差异越来越大,这主要是尼泊尔地区发展不平衡,谷地与平原地区相对发达,山区发展较落后。从尼泊尔县级社会经济-生态复合系统恢复力频率分布图来看,2000 年社会经济-生态复合系统恢复力只有一个峰值处于中低恢复力区间,约有一半的县处于中低恢复力水平,恢复力水平高的县偏少。2005 和 2015 年在中等和中高恢复力界限处出现第二个峰值,2010 年则在中高恢复力水平出现第二个峰值,表明大多数县恢复力水平处于中低恢复力,其次是中高恢复力。整体来看,2000—2015 年尼泊尔恢复力呈现先上升后下降趋势,其中 2005 年尼

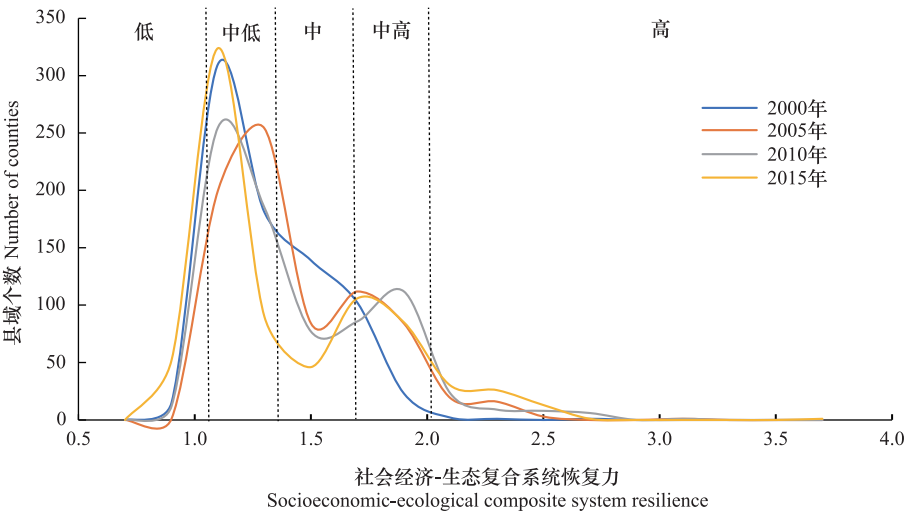


图 2 2000、2005、2010 和 2015 年尼泊尔县级社会经济-生态复合系统恢复力频率分布图

Fig.2 Frequency distribution of Nepal's county-level socioeconomic-ecological composite system resilience of years 2000, 2005, 2010 and 2015

各级恢复力划分标准为低恢复力(<1.07),中低恢复力(1.07—1.36),中恢复力(1.36—1.70),中高恢复力(1.70—2.04),高恢复力(> 2.04)

泊尔县域社会经济-生态复合系统恢复力水平平均最优,其次是 2010 年。近年来,在自然资源压力加大、气候变化的不利影响加剧等条件下,尼泊尔恢复力提升面临挑战。尼泊尔整体生态环境脆弱,在基础设施项目建设过程中,城市化、工业化、土地滥用等问题导致尼泊尔环境急剧恶化,并造成生态失衡、自然资源被严重破坏^[41]。同时受 2015 年地震、山体滑坡等自然灾害的影响,尼泊尔社会经济增长速度仅为 0.01%,域内自然灾害风险增加,社会经济发展遭受巨大损失,因此尼泊尔恢复力呈现先上升后下降的趋势。

从恢复力空间分布格局来看,尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力在空间上呈现出明显的南北差异,南部边境沿线地区处于中恢复力至高恢复力水平,中部地区除首都加德满都河谷区恢复力较高外,其他多数地区处于低恢复力水平,北部地区多数为中低恢复力水平(图 3)。2005 年与 2000 年相比,处于低恢复力的县域数量明显减少,尤其是中部发展区,且南部处于中高和高恢复力水平的县域明显增多。2010 年与 2005 年相比低恢复力地区稍有扩大,中恢复力水平地区在中部发展区向北扩大至加德满都河谷周围,高恢复力区域也稍有增加。2015 年大量县域由中低恢复力下降为低恢复力,使得尼泊尔境内大部分县域都处于低恢复力水平,且数量超过 2000、2010 和 2015 年。2015 年尼泊尔处于高恢复力、中高恢复力和中恢复力水平的区域与 2010 年相似,与 2000 年相比则有明显增加。

尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力县域尺度受其地缘因素、自然环境特征以及国家内部经济发展格局共同影响,因而形成了明显的南北差异。从地理位置上看,尼泊尔北部地区与中国西藏自治区以喜马拉雅山脉相隔,而南部与印度相邻区域则是在平原区,更适于贸易往来。此外,由于文化的同质性,尼泊尔与印度有着密切的外交关系,两国之间共有 6 个边境贸易口岸,每年尼泊尔从印度的进口额约占尼泊尔进口总额的一半。从地形特征看,尼泊尔北部广泛分布高山,由于地形崎岖、道路闭塞,多数以发展小农业为主,生产率低,少数地区能够凭借优美的自然风光发展旅游业。尼泊尔南部平原区则更适宜发展工业,城市化水平更高。尼泊尔南部边境沿线凭借与印度相邻的区位优势,较为平坦的地势,以及与加德满都城市群的道路联系,获得了较多的社会和经济资本,形成了相对较高水平的社会经济-生态复合系统恢复力水平。

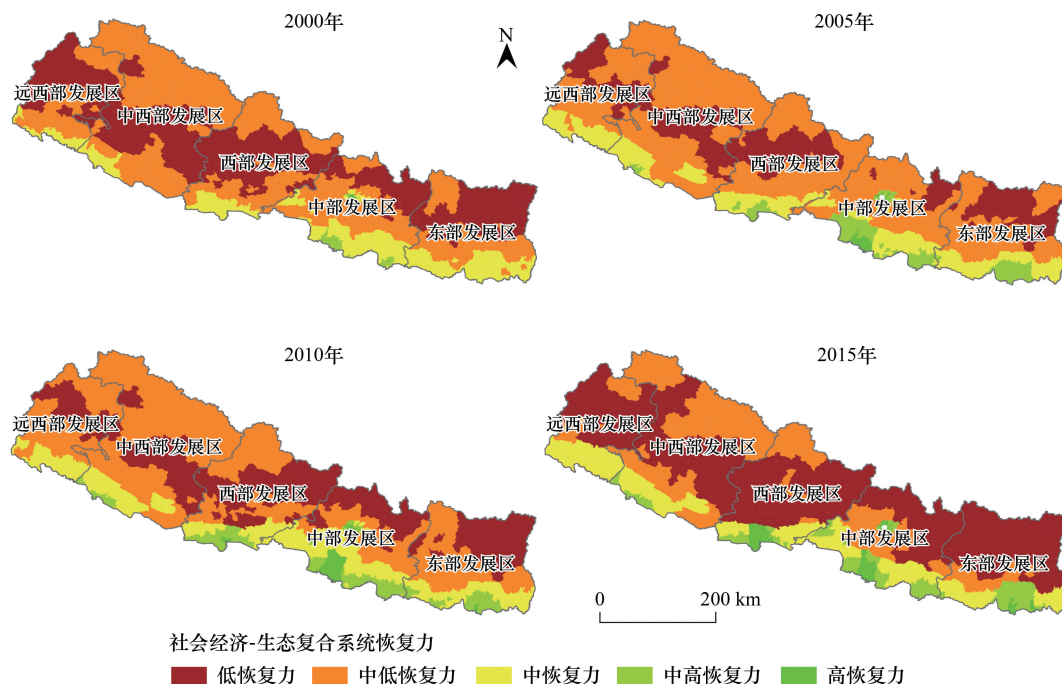


图 3 2000、2005、2010 和 2015 年尼泊尔社会经济-生态复合系统县域恢复力空间格局

Fig.3 Spatial patterns of Nepal's county-level socioeconomic-ecological composite system resilience of years 2000, 2005, 2010 and 2015

2.2 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力时空变化特征

尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力时空变化在不同阶段具有时空差异性(图4)。2000—2005年,尼泊尔大部分县社会经济-生态复合系统恢复力都有不同程度提升,南部地区提升最多,其次是中部和西部发展区。而2005—2010年各县恢复力降低较为明显,恢复力提升区域零散分布在南部地区。2005—2010年间,尼泊尔在国内政局不稳的影响下,国家发展计划缺失,经济发展缓慢,社会经济-生态复合系统恢复力在大部分地区表现为下降趋势。2008年,尼泊尔国会宣布废除君主立宪制,成立尼泊尔联邦民主共和国。但尼泊尔政局始终不能稳定,政府频繁更替,长期的政局动荡为人民带来的是社会不稳定,国民经济缺乏长期计划,社会发展停滞。随后,2010—2015年多数县恢复力也都出现了下降,但在西部发展区中部及南部的部分区域恢复力出现增长(图4)。尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力大面积降低原因来自于自然灾害和地缘政治对社会经济发展与生态环境保护的双重影响。2015年4月25日,尼泊尔发生里氏8.1级地震,造成死亡人数超8千人,导致经济损失约51亿美元,对国民经济、基础设施和人口生计产生巨大影响。2015年9月,印度以尼泊尔南部沿线反抗新宪法的游行活动影响边境安全为由加强两国边界检查,对尼泊尔开始经济封锁,造成尼泊尔能源和生活物资的紧缺。2015年尼泊尔从印度进口石油制品的进口额仅为上一年度的60%,约为2010年印度石油进口额的87%。2015年度GDP比2014年增长0.4%,而前五年GDP年平均增长率为4.3%。整体来看,2000—2015年尼泊尔各县社会经济-生态复合系统恢复力总体呈现南部地区提升而中部及北部地区下降趋势,提升较多的区域仍旧集聚在南部边境沿线地区,由南至北恢复力提升区域逐渐减少。结合图3分析结果发现,尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力的区域差异不断增加,并逐渐在空间分布上突显出来。

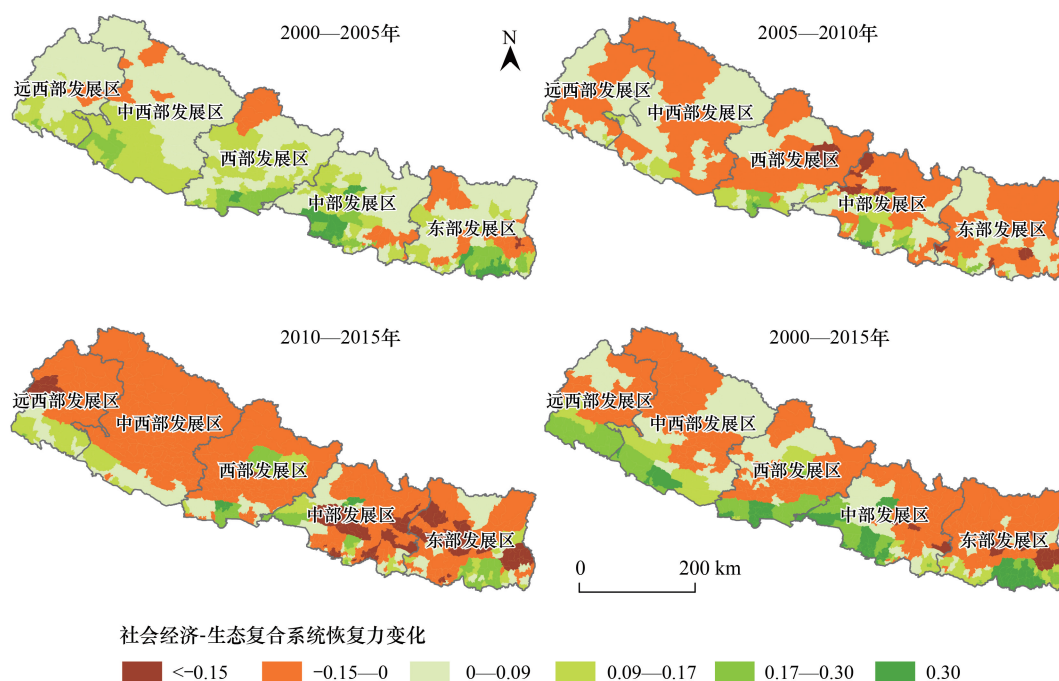


图4 2000—2005、2005—2010、2010—2015 和 2000—2015 年尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力的县域变化格局

Fig.4 Spatial patterns of Nepal's county-level socioeconomic-ecological composite system resilience changes during 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015 and 2000—2015

3 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力影响因素分析

结构方程模型结果验证了假设 H2—H10,而生态环境对社会经济-生态复合系统恢复力的影响相对较弱,仅为 0.05,拒绝了假设 H1,因此去除生态环境对恢复力的影响路径,得到最终模型以及路径系数(图5)。通

过各个潜变量之间的关系以及对结构方程模型的修正,构建了结构方程模型中各个潜变量之间的关系,得到社会发展、经济增长、基础设施、生态环境和自然灾害子系统对系统恢复力影响的直接、间接和总效应系数(表 5)。直接效应可由变量间的路径系数表示,直接效应代表某变量对结果变量的直接影响。间接效应指某一变量通过其他变量对结果变量产生的影响。每个内生或外生变量通常都会有多条路径影响结果变量,既包括直接路径也包括间接路径,因此总效应是直接和间接效应之和,表示某一变量对结果变量的总影响。

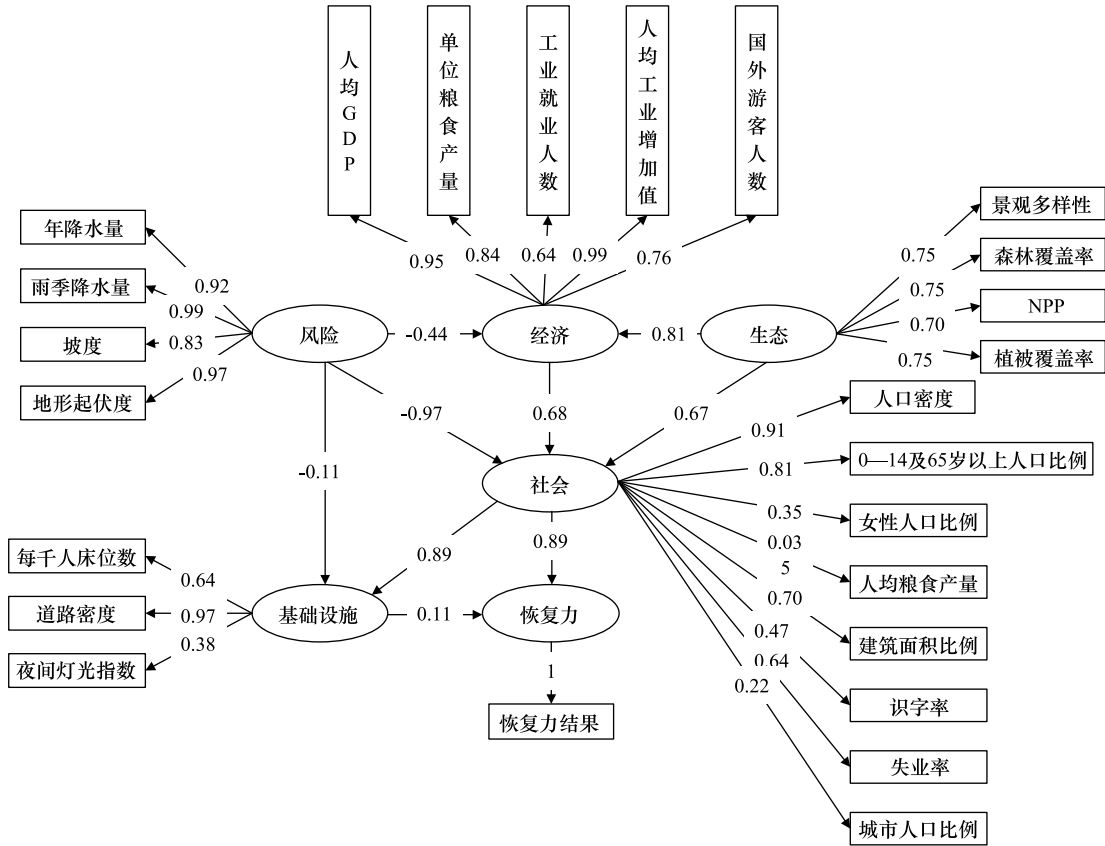


图 5 基于结构方程模型求解尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力关键要素的路径系数

Fig.5 Path coefficients of the key influencing factors of the resilience of Nepal's socioeconomic-ecological composite system solved based on structural equation model

路径系数参数估计值均在 0.001 水平上显著

表 5 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力关键要素识别的结构方程模型路径系数分析结果

Table 5 Results of path coefficient analysis of structural equation model for analyzing the key influencing factors of the resilience of Nepal's socioeconomic-ecological composite system

路径 Path	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect
社会发展→恢复力 Social development → Resilience	0.89	0.10	0.99
经济增长→恢复力 Economic growth → Resilience	0.00	0.07	0.07
基础设施→恢复力 Infrastructure construction → Resilience	0.11	0.00	0.11
生态环境→恢复力 Ecological environment → Resilience	0.00	0.89	0.89
自然灾害→恢复力 Natural disaster → Resilience	0.00	-0.12	-0.12

研究分别探究各子系统对尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力的影响,结果表明社会发展对恢复力的直接效应最明显(0.89),而生态环境对恢复力的间接效应最高(0.89),因此社会发展和生态环境对社会经济-生态复合系统恢复力提升有着直接和间接效应。此外,社会发展对恢复力的间接效应为 0.10,低于直接效应。

基础设施建设作为中间变量,对恢复力的直接影响效应为 0.11,各个前变量(自然灾害风险和社会发展)能够通过基础设施建设对恢复力产生影响。类似的,经济水平也作为中间变量,分别受到自然灾害风险和生态环境影响,进而影响社会发展,再间接影响恢复力,间接效应为 0.07。尼泊尔的自然灾害风险对当地社会经济-生态复合系统恢复力没有直接影响。生态环境因素主要通过影响尼泊尔当地的经济社会发展水平以及基础设施建设间接影响恢复力,但间接影响较低(0.12),对恢复力提升影响较小。综上,提升社会经济-生态复合系统恢复力的关键路径在于促进社会发展和改善生态环境。

4 结论与讨论

4.1 结论

尼泊尔是“一带一路”倡议重要参与国之一,开展其社会经济-生态复合系统恢复力时空特征评估及关键要素识别,可为绿色丝路建设提供重要科学参考。本文基于社会发展、经济水平、基础设施建设、生态环境和自然灾害风险 5 个子系统构建了尼泊尔社会经济-生态复合系统县级尺度上恢复力评价指标体系,运用主成分分析法对尼泊尔 2000、2005、2010 和 2015 年县级社会经济-生态复合系统恢复力水平开展了评估及时空演变分析,进而运用结构方程模型诊断了各子系统对社会经济-生态复合系统恢复力的影响系数及路径贡献,探究尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力提升策略。主要结论包括如下三方面:

(1) 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力县域尺度上主要集中在中低和中等恢复力水平,其次是中高恢复力,空间上存在明显的南北差异,由南向北逐渐降低,位于国家中部发展区的首都加德满都河谷地区县域社会经济-生态复合系统恢复力水平较高。2000—2015 年,尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力呈现波动变化,2005 年恢复力平均水平最优,2010 年由于尼泊尔政府更替频繁,国家政治不稳定与社会发展不确定,恢复力略有降低;2015 年地震造成的重大人员伤亡与经济损失,以及印度对尼泊尔的经济封锁也导致部分区域社会经济-生态复合系统恢复力降低。此外,尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力县域间差异逐渐增大,呈现出两级分化趋势,即多数县域恢复力水平由中级变为中低和中高水平,不利于区域均衡发展。

(2) 尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力变化的空间格局在不同阶段呈现出空间差异,2000—2005 年,尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力在大部分县都有不同程度提升,南部地区提升最多,其次是中部和西部发展区;2005—2010 年社会经济-生态复合系统恢复力降低较为明显,恢复力提升区域零散分布在南部地区;2005—2010 年间,尼泊尔在国内政局不稳的影响下,国家发展计划缺失,经济长期发展缓慢,社会经济-生态复合系统恢复力在大部分地区表现为下降趋势;2010—2015 年多社会经济-生态复合系统恢复力均出现了下降,但在西部发展区中部及南部的部分区域恢复力则出现增长;2000—2015 年社会经济-生态复合系统恢复力总体呈现南部地区提升而中部及北部地区下降趋势。

(3) 结构方程模型路径诊断结果表明,社会发展、经济水平、基础设施建设、生态环境和自然灾害风险对社会经济-生态复合系统恢复力提升的总效应分别为 0.99, 0.07, 0.11, 0.89 和 -0.12。社会发展对系统恢复力提升的直接效应最为明显,生态环境对系统恢复力的间接效应最高,提升恢复力的关键路径在于促进社会发展、改善生态环境、推动基础设施建设以及降低灾害风险。

4.2 讨论

开展区域社会经济-生态复合系统恢复力评价,探究社会发展、经济增长、基础设施建设、生态环境与自然灾害风险要素对社会经济-生态复合系统恢复力的路径影响机制,对提炼区域社会经济-生态复合系统恢复力提升管理优化策略具有重要科技支撑。基于上述恢复力综合评估及影响路径分析,在未来“一带一路”倡议下开展合作,尼泊尔可通过强化如下方面以提升社会经济-生态复合系统系统恢复力。

(1) 推动社会发展,提升经济增长水平,促进地区间发展收敛程度。社会发展水平的提高与经济增长对提升尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力具有正向作用。当前尼泊尔产业技术水平落后,农业发展主要为自给自足的小农模式,极易受到天气变化和自然灾害冲击,大部分县的恢复力还处于较低水平。尼泊尔作为

“一带一路”倡议南亚地区重要合作国家之一,该倡议深入推进给尼泊尔经济发展带来了机遇,可尝试推动产业升级以拓展农业经济产业链,依靠原始的自然风光和深厚的历史文化发展旅游业以及旅游相关产业,如零售业、酒店餐饮等特色产业,促进经济增长以及产业的转型发展。此外,薄弱的基础设施可能导致贫穷和区域发展不均衡进一步加剧,“一带一路”倡议相关的设施联通工程将有效推动尼泊尔基础设施建设水平的提升,尤其是提升道路、港口、铁路、输电线路等基础设施,以促进区域经济的发展,改变区域发展不平衡的现状。未来,尼泊尔可进一步加强与中国在“一带一路”倡议下的合作,积极推动县域社会经济均衡发展。

(2) 生态环境因素对尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力间接影响最大,改善生态环境是提升系统恢复力的基础。尼泊尔境内森林覆盖率超过 40%,是世界上林业管理较为先进的国家之一,社区林业是尼泊尔突出的林业管理制度。鉴于生态环境是通过经济和社会发展进而影响系统恢复力,因此可以基于尼泊尔林业发展现状,考虑发展林业经济来促进经济增长并改善区域生态环境,促进经济与生态可持续发展,以提升人类福祉。此外,尼泊尔是极易受到气候变化影响的国家,气候变化导致的洪水、山体滑坡、水土流失等极端事件,对生态环境与社会经济水平造成了破坏。因此,考虑到气候变化对生态环境的影响,尼泊尔可以通过出台适应气候变化的措施以提高复合系统的恢复力,如针对县域尺度,制定适应气候变化的措施,提高复合系统的恢复力。

(3) 降低自然灾害风险,提高风险抵御能力,是提升尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力的重要途径。尼泊尔的地理位置和自然本底导致其自然灾害风险较大,构建自然灾害监测预警系统,增加应对突发事件的能力,通过对自然灾害的预警以及灾后的及时响应,降低自然灾害风险与减少社会经济损失,提升复合系统的恢复力。针对尼泊尔的地震灾害,一是可以构建地震灾害预警系统实现灾害的预报,二是灾后的及时响应,通过地图制图辅助灾后重建,运用 GIS 技术描绘地震对人和建筑环境的影响,规划灾后物资运输路径,通过崎岖的地形和小山路,引导供应物资运送到偏远地区的受灾村庄,保证救援的时效性^[42]。因此,基于大数据、多尺度遥感、GIS 等技术融合,将地理信息与社会经济信息相结合,加强自然灾害监测预警系统建设,以可视化的方式支持灾害响应与灾害应急资源配置,可为提升尼泊尔社会经济-生态复合系统恢复力提供重要支撑。

(4) 本文在数据处理和评级指标体系构建中仍存在不足。社会经济-生态复合系统恢复力评价是一个复杂的系统,由于数据来源有限及获取难度较大,本文部分社会经济指标基于人口和 GDP 空间数据进行了降尺度处理。由于尼泊尔县域贫富差距较大,此种社会经济数据空间化方式可能使得部分指标被高估,因此数据精度需要进一步提升。此外,尼泊尔是一个宗教文化多元化的国家,宗教因素也是其社会经济发展落后的原因之一,今后研究拟引入宗教数量、宗教人口数等表征宗教文化的指标,以更加综合评估分析社会经济-生态复合系统恢复力及其影响因素。

参考文献 (References):

- [1] 赵亚博, 刘晓凤, 葛岳静. “一带一路”沿线国家油气资源分布格局及其与中国合作中的相互依赖关系. 地理研究, 2017, 36(12): 2305-2320.
- [2] 李心晴, 徐新良, 张鹏鹏, 张力小, Tolybayeva Diana. “一带一路”倡议背景下哈萨克斯坦地区综合脆弱性的空间分异特征分析. 中国环境管理, 2020, 12(3): 107-113.
- [3] 刘卫东. “一带一路”战略的科学内涵与科学问题. 地理科学进展, 2015, 34(5): 538-544.
- [4] 吴绍洪, 刘路路, 刘燕华, 高江波, 戴尔阜, 冯爱青. “一带一路”陆域地理格局与环境变化风险. 地理学报, 2018, 73(7): 1214-1225.
- [5] 刘海猛, 胡森林, 方恺, 何光强, 马海涛, 崔学刚. “一带一路”沿线国家政治-经济-社会风险综合评估及防控. 地理研究, 2019, 38(12): 2966-2984.
- [6] 徐新良, 李嘉豪, 申志成, 王世宽. “一带一路”沿线国家农田生态系统脆弱性及其对气候变化的响应. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 877-886.
- [7] 薛莲. “一带一路”倡议下中国在尼泊尔开展工程建设的风险评估. 西藏研究, 2018(2): 90-96.
- [8] Sapkota P, Keenan R J, Ojha H R. Co-evolving dynamics in the social-ecological system of community forestry—prospects for ecosystem-based adaptation in the Middle Hills of Nepal. Regional Environmental Change, 2019, 19(1): 179-192.
- [9] 余中元, 李波, 张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析. 生态学报, 2014, 34(7): 1870-1879.
- [10] 刘小茜, 裴韬, 舒华, 高锡章. 基于文献计量学的社会—生态系统恢复力研究进展. 地球科学进展, 2019, 34(7): 765-777.

- [11] Skerratt S. Enhancing the analysis of rural community resilience; evidence from community land ownership. *Journal of Rural Studies*, 2013, 31: 36-46.
- [12] Li T, Dong Y X, Liu Z H. A review of social-ecological system resilience: Mechanism, assessment and management. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 138113.
- [13] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [14] Price M F. Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. *Biological Conservation*, 2003, 114(2): 308-309.
- [15] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武, 李琰. 空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展. *地理学报*, 2020, 75(5): 891-903.
- [16] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 杨新军, 黄馨. 社会-生态系统恢复力研究进展——基于 CiteSpace 的文献计量分析. *生态学报*, 2019, 39(8): 3007-3017.
- [17] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 303-314.
- [18] Curtin C G, Parker J P. Foundations of resilience thinking. *Conservation Biology*, 2014, 28(4): 912-923.
- [19] 周晓芳. 社会-生态系统恢复力的测量方法综述. *生态学报*, 2017, 37(12): 4278-4288.
- [20] Cutter S L, Barnes L, Berry M, Burton C, Evans E, Tate E, Webb J. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 598-606.
- [21] Rose A. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards*, 2007, 7(4): 383-398.
- [22] Rose A, Oladosu G, Liao S Y. Business interruption impacts of a terrorist attack on the electric power system of Los Angeles; customer resilience to a total blackout. *Risk Analysis*, 2007, 27(3): 513-531.
- [23] Resilience Index Measurement and Analysis II-RIMA-II. Rome; FAO, 2016.
- [24] Sarker M N I, Wu M, Alam G M, Shouse R C. Livelihood resilience of riverine island dwellers in the face of natural disasters; empirical evidence from Bangladesh. *Land Use Policy*, 2020, 95: 104599.
- [25] Muricho D N, Otieno D J, Oluoch-Kosura W, Jirstrom M. Building pastoralists' resilience to shocks for sustainable disaster risk mitigation: lessons from West Pokot County, Kenya. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 34: 429-435.
- [26] Kotzee I, Reyers B. Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience; a composite index approach. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 45-53.
- [27] Tan J T, Zhang P Y, Lo K, Li J, Liu S W. Conceptualizing and measuring economic resilience of resource-based cities; case study of Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(3): 471-481.
- [28] 李晓, 周丁扬. 农业系统恢复力研究进展综述. *资源科学*, 2015, 37(9): 1747-1754.
- [29] 陈娜, 向辉, 叶强, 朱修涛. 基于层次分析法的弹性城市评价体系研究. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(7): 146-150.
- [30] Tesse G, Emanu B, Ketema M. Analysis of vulnerability and resilience to climate change induced shocks in North Shewa, Ethiopia. *Agricultural Sciences*, 2012, 3(6): 871-888.
- [31] Browne M, Ortmann G F, Hendriks S L. Household food security monitoring and evaluation using a resilience indicator: an application of categorical principal component analysis and simple sum of assets in five African countries. *Agrekon*, 2014, 53(2): 25-46.
- [32] Berkes F, Ross H. Community resilience: toward an integrated approach. *Society & Natural Resources*, 2013, 26(1): 5-20.
- [33] 田丛珊, 方一平. 地质灾害胁迫下的社会经济恢复力评估及其提升策略——以都江堰市为例. *自然灾害学报*, 2019, 28(6): 127-136.
- [34] Pan Q S, Zhai D. Develop a GIS based risk model to evaluate the economic resilience of Houston neighborhoods for the next oil bust//Chen X M, Pan Q S eds. *Building resilient cities in China: the nexus between planning and science*. Cham: Springer, 2015: 223-233.
- [35] Central Intelligence Agency (U.S.). *The World Factbook 2012-13*. Washington, D.C.: Central Intelligence Agency, 2013.
- [36] Eckstein D, Hutfils M, Wings M. Global Climate Risk Index 2019: Who suffers most from extreme weather events? Weather-related loss events in 2017 and 1998 to 2017. Berlin: Germanwatch, 2019.
- [37] Klein Goldewijk K, Beusen A, Doelman J, Stehfest E. Anthropogenic land use estimates for the Holocene-HYDE 3.2. *Earth System Science Data*, 2017, 9(2): 927-953.
- [38] Kumm M, Taka M, Guillaume J H A. Gridded global datasets for gross domestic product and human development index over 1990-2015. *Scientific Data*, 2018, 5: 180004.
- [39] 白江迪, 刘俊昌, 陈文汇. 基于结构方程模型分析森林生态安全的影响因素. *生态学报*, 2019, 39(8): 2842-2850.
- [40] 田晓敏, 郑建伟, 王冬至, 黄选瑞, 张志东. 基于结构方程模型分析森林草原带草本物种丰富度对景观因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(13): 4649-4656.
- [41] 熊灵, 谭秀杰. “一带一路”建设: 中国与周边地区的经贸合作研究. 北京: 社会科学文献出版社, 2017.
- [42] Soden R, Palen L. Infrastructure in the wild: what mapping in post-earthquake Nepal reveals about infrastructural emergence//CHI'16: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2016: 2796-2807.