

DOI: 10.20103/j.stxb.202304160774

李久林, 胡大卫, 谢敏, 张龔, 滕璐, 储金龙, 尹海伟. 社会-生态视角下乡村聚落系统脆弱性评价——以蒙洼行蓄洪区为例. 生态学报, 2023, 43(22): 9164-9176.

Li J L, Hu D W, Xie M, Zhang Y, Teng L, Chu J L, Yin H W. Vulnerability assessment of rural settlement systems from a socio-ecological perspective: the case of Mengwa floodplain. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9164-9176.

社会-生态视角下乡村聚落系统脆弱性评价 ——以蒙洼行蓄洪区为例

李久林^{1,2,*}, 胡大卫^{1,2}, 谢敏^{1,2}, 张龔^{1,2}, 滕璐^{1,2}, 储金龙^{1,2}, 尹海伟^{2,3}

1 安徽建筑大学建筑与规划学院, 合肥 230022

2 安徽省城镇化建设协同创新中心, 合肥 230022

3 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

摘要: 从社会生态视角对乡村聚落系统的脆弱性进行评估, 有助于厘清影响乡村聚落发展的因素, 建立起应对风险扰动的分析框架, 引导乡村可持续发展。以蒙洼行蓄洪区为例, 综合运用 VSD (Vulnerability Scoping Diagram, VSD) 框架、显式空间脆弱性模型 (Spatially Explicit Resilience-Vulnerability, SERV) 模型及贝叶斯网络模型测度区域脆弱性并探究影响脆弱性的主要因素。结果表明: (1) 蒙洼地区乡村聚落系统暴露度呈现“两边低、中间高、局部突出”的空间格局特征, 镇区周边的乡村聚落敏感性较为突出, 同时镇区所在行政村表现出良好的适应力, 而乡村聚落系统总体脆弱性较高且高低值差异较大, 空间格局呈不均衡分布态势, 且结构性差异特征显著。(2) 采用定性定量相结合的方法将脆弱区划分为中低脆弱区、敏感—适应型高脆弱区和敏感型高脆弱区三种类型, 基于贝叶斯网络分析高脆弱区的影响因素。蒙洼地区乡村聚落以高脆弱区类型居多, 其中敏感—适应型高脆弱区主要位于蒙洼地区北部和中部, 灾害防控因子对乡村聚落振兴概率的作用最为显著, 其建设开发活动受自然环境条件限制较多, 因而不宜展开乡村聚落布局, 应划为生态保护空间, 开展渐进式移民搬迁; 而敏感型高脆弱区主要位于蒙洼地区南部河谷地带, 建设发展基础相对良好, 地形地貌因子对乡村振兴概率的影响最大, 为避免该地区乡村衰退的态势加剧, 应严格控制人口数量、经济规模和生产方式, 尽可能平衡发展与保护之间的矛盾。

关键词: 乡村聚落; 行蓄洪区; 脆弱性; 社会-生态系统; 贝叶斯网络

Vulnerability assessment of rural settlement systems from a socio-ecological perspective: the case of Mengwa floodplain

LI Jiulin^{1,2,*}, HU Dawei^{1,2}, XIE Min^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}, TENG Lu^{1,2}, CHU Jinlong^{1,2}, YIN Haiwei^{2,3}

1 School of Architecture and Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China

2 Anhui Collaborative Innovation Center for Urbanization Construction, Hefei 230022, China

3 School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Assessing the vulnerability of rural settlement systems from a socio-ecological perspective is helpful to clarify the factors that affect the development of rural settlements, and establish an analytical framework to cope with risk perturbations, and guide the sustainable development of rural communities. Taking the Mengwa flood storage area as an example, this study comprehensively utilized the Vulnerability Scoring Diagram (VSD) framework, the Spatially Explicit Resilience-Vulnerability (SERV) model, and the Bayesian network model to measure regional vulnerability and explore the

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52178043); 安徽省教育厅人文社科重点项目 (SK2021A0344); 安徽省高校优秀青年项目 (2022AH030030)

收稿日期: 2023-04-16; 网络出版日期: 2023-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljliu90@163.com

main factors affecting vulnerability. The results showed that (1) The exposure of rural settlement systems in the Mengwa region exhibited a spatial pattern of "low on both sides, high in the middle, and locally prominent". The sensitivity of rural settlements around the town was relatively prominent, and the administrative villages where the town is located had shown good adaptability. However, the overall vulnerability of the rural settlement system was high and the difference between high and low values was large, the spatial pattern showed an uneven distribution trend, and the structural differences were significant. (2) This study used a combination of qualitative and quantitative methods to categorize the vulnerable zones into three types: low and medium vulnerability zones, sensitive-adaptive high vulnerability zones and sensitive high vulnerability zones, and analyzed the influencing factors of high vulnerability zones based on the Bayesian network. The rural settlements in the Mongwa region are predominantly of the highly vulnerable zone type, the sensitive-adaptive high vulnerability zone was mainly located in the northern and central part of the Mengwa area, where the disaster prevention and control factor had the most significant effect on the probability of rural settlement revitalization, and its construction and development activities were more restricted by the natural environmental conditions, it was not suitable to start the layout of rural settlements, and it should be classified as an ecological protection space for gradual migration and relocation. On the other hand, the sensitive and highly fragile zone was mainly located in the southern valley of Mengwa area, with relatively good construction and development foundation and the greatest influence of topographic and geomorphological factors on the probability of rural revitalization. In order to avoid the aggravation of the decline of the countryside in this area, the number of population, the economic scale and the mode of production should be strictly controlled so as to balance the contradiction between development and protection as far as possible.

Key Words: rural settlements; floodplain; vulnerability; social-ecological systems; Bayesian networks

随着全球气候恶化、生态环境破坏以及人类建设活动加剧,流域水循环过程及要素发生剧烈变化,产汇流机制改变,洪涝灾害问题日益严重^[1]。为减轻洪涝灾害损失,国家在流域低洼地建设行蓄洪区以调整洪水的时空分布^[2]。流域行蓄洪区不仅是滞蓄洪水的重要场所,还是区内群众的生活家园,担负着防洪和保障居民生存发展的双重功能^[3]。但由于行蓄洪启用频繁,流域行蓄洪区乡村聚落居民生产生活极不稳定,人与自然、生产与洪水矛盾加剧,显现出日益增长的脆弱性^[4]。为妥善解决人、水、地之间的突出矛盾,自建国初期国家就结合工程设施建设,持续开展了行蓄洪区乡村居民的迁建工作,但受多方面因素的影响,并未达到预期的效果^[5]。究其原因在于行蓄洪区乡村聚落是一个各要素相互作用、具有复杂联系以及动态适应的系统,但诸多迁建项目在进行规划时只注重基础设施和资金投入等技术层面的问题,并未充分考虑生态复杂性、迁建安置的社会保障、地区长远可持续发展等因素,导致了人与自然、社会之间的关系失衡,对社会-生态系统不断形成压力,极大损害了人民福祉和生态健康。因此,从社会-生态视角展开行蓄洪区乡村聚落系统研究,有助于突破以往认知的局限,通过整合系统内部各个子系统要素,建立起指导应对风险扰动的有效分析框架。

脆弱性是指系统暴露于风险扰动或压力之下可能遭受的损害程度^[6],早期被应用于自然灾害(如洪水、干旱等)的研究^[7],以及对生态系统(如森林、海岸等)的评估^[8-9]。随着自然生态和社会经济研究的融合,脆弱性问题的研究也扩展到了“人地关系”地域系统等方面。以 Holling 为首的韧性联盟(Resilience Alliance)最早将适应性循环理论引入至社会-生态系统的脆弱性研究^[10]。随之一系列的相关研究相继开展。脆弱性分析框架是脆弱性研究体系中的重要组成部分,常见的分析框架有压力-状态-响应框架^[11]、暴露-敏感-适应脆弱性评估框架^[12]、驱动力-压力-状态-影响-响应模型^[13]、交互式脆弱性评估框架^[14]和 SERV 模型^[15]等。此外,脆弱性的定量测度也是脆弱性研究的核心内容,当前主要采用函数模型评价法^[16]、综合指数法^[17]、灰色关联分析法^[18]、BP 神经网络法^[19]等。总体来说,当前学界有关脆弱性的研究已经取得了丰硕的成果,但仍存在以下不足:①从研究对象来看,多数聚焦于城镇聚落,对于乡村聚落尤其是特殊生态功能区乡村聚落的脆弱性问题关注较少;②从研究方法来看,目前较多采用指标体系的数理分析方法对系统脆弱性进行评估,对区

域脆弱性复杂的形成机制研究不充分,导致部分评价指标体系的构建不够合理;③从研究内容来看,目前对社会-生态系统脆弱性的影响因素、驱动机制等方面的研究尚不够深入。

鉴于中国人多地少的客观国情和安土重迁的传统观念,行蓄洪区乡村聚落必然会存在很长一段时间,如何降低该类乡村聚落系统脆弱性,成为学界和相关工作部门急需解决的一个难题。因此,本文以单个行政村为研究单元,在探究行蓄洪区乡村聚落社会-生态系统脆弱性内涵的基础上,选择淮河流域第一座行蓄洪区—阜南县蒙洼地区展开实证研究。蒙洼地区受频繁行蓄洪影响,在城镇化进程中,存在自然灾害和人类活动的叠加扰动,形成了地理形态和经济发展的“双洼地”。因此,从社会-生态视角开展该区域的脆弱性评估,揭示其空间分异特征与成因机理,划分乡村聚落脆弱类型,并深入剖析影响脆弱性的关键驱动因子,可为增强行蓄洪区乡村聚落自身抵抗力,引导系统可持续发展从而实现乡村振兴提供理论参考与实践示范。

1 相关概念与分析框架

1.1 内涵界定

乡村聚落系统是一个复杂概念。人地聚居学认为其是一种社会现象,由“空间”、“实体”以及生活在其中的人类行为组成,是承载乡村地域人类聚居生活、生产活动、生态与文化遗产的基本空间单元和重要场所^[20]。人地关系地域系统理论则将乡村聚落系统解释为在特定农村人地关系下,人、社会关系与自然人文环境相互影响所形成的具有特定结构和形态的地域系统^[21]。本文综合多学科概念,将乡村聚落系统定义为由人类活动主导的,构成要素多元、机制复杂、系统开放的复合人地耦合系统。从社会-生态视角出发,乡村聚落系统可被分解为生态、社会、经济等子系统^[22-23]。其中,生态系统是经济和社会子系统的物质基础和发展空间;社会系统通过人类活动影响生态系统,通过管理政策、社会制度和组织的改变影响经济系统;经济系统则通过农业产业发展改变生态系统的物种和空间多样性,同时经济系统生产的产品直接服务于社会系统。三个子系统之间相互渗透、共同作用,维持着乡村聚落系统的稳态发展,但当任一系统受到内外部扰动,原有平衡状态就会被打破,表现出脆弱性特征。

目前学界对于脆弱性的概念界定尚缺乏统一的观点。综合近年来具有代表性的脆弱性概念^[24-26],本文将乡村地域系统脆弱性定义为在面临各种自然和人为风险、压力和冲击时,囿于系统内部结构不稳定性 and 应对干扰能力的差异,而使系统遭受破坏性的负面影响或重大风险的状态。这种脆弱性是由多个因素相互作用而导致的,包括自然环境因素、社会经济因素、制度因素等。在乡村地域系统中,自然灾害、生态环境恶化、城镇化引起的人口外流、社会变革及转型等因素相互交织,从而导致了其脆弱性不断增加。

1.2 影响要素构成

尽管学者们对脆弱性概念有不同的理解,但普遍认为可将脆弱性视为是暴露度、敏感性和适应力三种要素综合作用的结果^[27-28]。其中,暴露度表征系统经历的外在环境、压力或风险干扰胁迫的程度;敏感性反映了系统在自然本底条件、资源供给变化以及内部结构调整等状况下遭受扰动影响而发生改变的容易程度;适应力体现了系统在面对风险胁迫时内在自调节适应能力,以及外部干预下(适应性管理)的自我恢复潜能。一般而言,脆弱性与暴露度、敏感性呈正比,而与适应力呈反比,因此可以将乡村聚落系统脆弱性视为由这三种要素构成的函数关系表达。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区概况

蒙洼地区位于安徽省阜南县境内,淮河流域中上游结合部,是淮河干流运用最为频繁的行蓄洪区之一,共辖王家坝镇、老观乡、曹集镇、郟台乡 4 个乡镇,36 个行政村(图 1)。自 1953 年建立至今,蒙洼地区共计蓄滞洪水 16 次,造成了数以万计的生命财产损失。限制性的发展条件和频繁的行蓄洪水,使得蒙洼地区居民生产生活的突出问题,乡村聚落系统脆弱性特征显著,亟需寻求一条能够持续适应、即时转变和创新能力的稳态发

展道路。

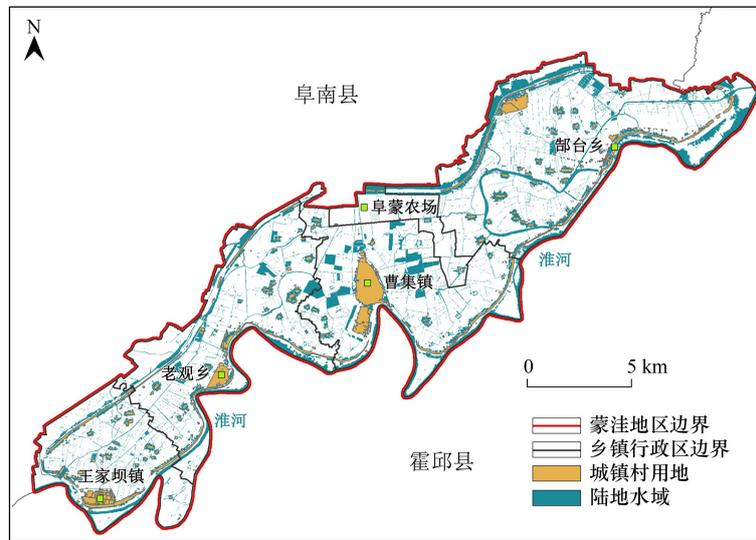


图1 蒙洼地区区位图

Fig.1 Location map of Mengwa area

2.2 数据来源与数据处理

本文采用多源数据进行脆弱性评估研究。其中,行政区划数据主要来自于标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>);土地利用数据来自于阜南市土地利用总体规划数据库;净初级生产力数据来源于美国宇航局(<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/>);高程数据和遥感数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);社会经济数据来源于《2021年阜阳市统计年鉴》、各乡镇总体规划、阜南县村庄布点规划以及其他规划文本;幼儿园、卫生室个数等设施建设现状主要来源于地方专项规划和实地调研;人口数据来源于阜南县公安局;企业数据主要来源于企查查(<https://www.qcc.com/>);中共党员人数、村庄荣誉称号等数据来源于阜南县政府网站等。以 ArcGIS、Netica 作为技术平台处理数据,并通过 ENVI、SPSSAU 等辅助工具实现数据的分析与解释。

3 研究思路与方法

3.1 评价指标体系构建

相关研究表明 VSD 框架具有良好的兼容性,能够整合行蓄洪区多重风险扰动因素,反映乡村聚落系统脆弱性的形成机理,以及组成要素间相互影响的内在联系^[29]。因此本文借鉴 VSD 的评估框架,将脆弱性划分为暴露度、敏感度和适应力三个层次,综合蒙洼行蓄洪区的区位特征和相关研究^[13,22,27-28],首先确立 7 个评估层、17 个指标层和 19 个指标内容,构成行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性评价指标体系。

其中,暴露度风险主要依托于行蓄洪区的主导功能定位,乡村聚落系统面临自然灾害风险和人类活动强度的叠加扰动,选取洪涝风险、水土流失、环境污染和土地利用变化 4 个指标层,分别表征洪水淹没损失、次生灾害风险、耕地的可持续利用问题和人水争地的突出矛盾,是行蓄洪区的风险扰动因子;

敏感性是指行蓄洪区乡村聚落系统的自身抗风险能力,与地区自然本底条件和社会管理结构密切相关,并会因系统遭受扰动而发生动态改变,选取地形地貌、湿地面积、植被覆盖、水资源、耕地资源等 7 个方面进行表征;

适应力指的是行蓄洪区乡村聚落遭受风险扰动后的主动反馈机制,是系统调整、应对不利扰动并从中恢复的自主能力,行蓄洪区乡村聚落的适应能力主要取决于各行政村的政府管理能力和居民设施保障,因此选

取灾害防控、交通通达性、教育水平、医疗卫生、服务供给、居住条件 6 个驱动因子进行表征。

为了探究造成行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性的驱动因素,需要在脆弱性评价指标体系的基础上,增加行蓄洪区乡村聚落系统发展的目标变量。考虑蒙洼乡村的实际情况和未来发展需求,以及综合性的目标蓝图,将行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性评估的目标变量设定为“实现乡村振兴”。乡村振兴的目标要求是指,行蓄洪区乡村聚落系统在不同的发展阶段,与外界发展主导因素发生相互影响作用时,能保持其自身功能、要素构成及制度运作均衡的理想状态^[30]。因此,将解释变量的指标层继续划分为乡村振兴的生态宜居、乡风文明等 5 个维度,分别采用农业合作社数量、净初级生产力、村庄荣誉称号数、中共党员人数占比和村庄产业丰富度 5 项具体的指标内容进行解释。最终,结合暴露度—敏感性—适应力三者驱动关系,以及行蓄洪区乡村聚落的振兴目标,得到了完整的行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性驱动因子与目标任务(表 1)。

表 1 行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性驱动因子和目标任务

Table 1 Vulnerability drivers and target tasks for rural settlement systems in floodplains

维度层 Dimensional layer	评估层 Evaluation layer	指标层 Indicator layer	指标内容(单位) Indicator content (unit)	综合权重 Combined weights	属性 Attribute	
暴露度+ Exposure+	自然灾害风险	洪涝风险	洪水淹没面积占比/%	0.0857	+	
		水土流失	河流功率指数(-)	0.0748	+	
敏感性+ Sensitivity+	人类活动强度	环境污染	化肥施用量/耕地面积(-)	0.0510	+	
		土地利用变化	土地利用变化率/%	0.0517	+	
		自然本底	地形地貌	平均高程/m	0.0556	-
				地形位指数(-)	0.0653	-
	资源供给	植被覆盖	平均 NDVI(-)	0.0499	-	
		湿地面积	湿地用地占比/%	0.0377	-	
		耕地资源	户均耕地面积/(hm ² /户)	0.0389	-	
适应力- Resilience-	人口组成	水资源	河流水系面积占比/%	0.0297	-	
		土地资源	建设用地规模/hm ²	0.0461	-	
	政府管理能力	人口规模	行政村常住人口/人	0.0466	-	
	灾害防控	主干道密度/%	0.0380	+		
		堤防长度/m	0.0426	+		
		交通通达	距离主干道距离/m	0.0712	-	
		居民生活保障	教育水平	幼儿园个数/个	0.0370	+
医疗卫生		卫生室个数/个	0.0650	+		
目标层- Target layer-	乡村振兴	服务供给	距离镇中心距离/m	0.0653	-	
		居住条件	户均宅基地面积/(m ² /人)	0.0479	+	
		产业兴旺	农业合作社数量/个	0.1880	+	
		生态宜居	净初级生产力(-)	0.1953	+	
		乡风文明	村庄荣誉称号数/个	0.2161	+	
		治理有效	中共党员人数占比/%	0.2222	+	
	生活富裕	村庄产业丰富度(-)	0.1784	+		

“维度层”中,“+”表示该维度与系统脆弱性呈正相关,“-”表示该维度与系统脆弱性呈负相关;“指标内容(单位)”中,“-”表示无单位;“属性”中,“+”表示该指标与所在维度层呈正相关,“-”表示该指标与所在维度层呈负相关

3.2 测度方法

3.2.1 数据预处理

将指标值的样本集设定为 $(x_{ij})_{m \times n}$, 其 x_{ij} 表示样本 i 的第 j 个指标值, m/n 分别为样本的个数和指标的数目, $i = (1, 2, \dots, m)$, $j = (1, 2, \dots, n)$ 。采用极差法对数据进行归一化处理。

对于正指标:

$$x'_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \tag{1}$$

对于负指标:

$$x'_{ij} = (x_{\max} - x_{ij}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

式中, x_{\max} 和 x_{\min} 为指标 j 的最大值和最小值, x'_{ij} 为标准化值。

3.2.2 主客观组合赋权

利用 CRITIC 客观赋权法 (Criteria Importance though Intercriteria Correlation, CRITIC) 与 AHP 主客观赋权法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 进行组合赋权, 尽量减少客观赋权法缺乏各个指标的实际影响程度的了解, 以及主观赋权法又过于主观所带来的偏差。CRITIC 法是一种以指标对比强度和冲突程度来反映指标的信息量和独立性的客观赋权方法^[31]。其中, 对比强度用标准差来表示, 冲突程度用相关性来表示, 但由于标准差反映的是不同指标间的绝对差异, 容易受到计量单位的影响, 因此研究使用变异系数取代标准差来进行客观赋值的优化。具体计算方法如式(3)和式(4)所示:

指标 j 所包含信息量 M_j 为:

$$M_j = c_j \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (3)$$

式中, c_j 为指标 j 的变异系数, $c_j = \sigma_j / \bar{x}_j$, 其中 $\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}$, $\sigma_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$; r_{ij} 是指标 i 、指标 j 的

相关系数, $r_{ij} = \sum_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}$ 。

M_j 越大表示指标 j 所包含的信息越大, 其权重也越大。对 M_j 进行归一化处理, 得到指标 j 的客观权重:

$$\omega_{1j} = M_j / \sum_{j=1}^n M_j \quad (4)$$

在客观赋权的基础上, 结合 AHP 主客观赋权法确定权重^[32], 进而确定出每个元素对总目标的权重系数 ω_{2j} 。最终由客观权重 ω_{1j} 和主观权重 ω_{2j} 取平均数, 得出组合权重 ω_j 。

3.2.3 脆弱性测度模型

借鉴 Frazier 等提出的 SERV 模型^[33], 测度行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性程度。该模型改善了以往仅注重系统敏感性, 而忽视暴露度、敏感性和适应力综合影响的问题, 将社会、经济、生态等影响因素一并纳入进行评估分析, 提升了脆弱性评估的精度与适用性^[34], 计算公式为:

$$V = E + S - A \quad (5)$$

式中, V 代表脆弱性; E 代表暴露度; S 代表敏感性; A 代表适应力。

3.2.4 主导因素法

为提高分区的科学性以及主要影响因素识别的准确性, 引入主导因素法划分行蓄洪区乡村聚落脆弱性类型, 消除定量分析方法中极值的影响^[35-36]。主导因素法能够根据影响脆弱性的因子种类和作用差异, 判断导致乡村聚落脆弱性发生变化的主导因素, 并以此为标志划分区域界线, 得出不同的脆弱区类型, 具体公式为:

$$\begin{aligned} ME_i &= E_i - ME_e \\ MS_i &= S_i - MS_e \\ MA_i &= A_i - MA_e \end{aligned} \quad (6)$$

式中, E_i 、 S_i 、 A_i 分别表示乡村聚落 i 的暴露度、敏感性、适应力的数值; ME_e 、 MS_e 、 MA_e 分别表示乡村聚落 i 暴露度、敏感性、适应能力的中位数。具体判断方法如下: 若 $ME_i > 0$, 则暴露度是其脆弱性的主导要素, 若 $ME_i \leq 0$, 则暴露度其脆弱性的辅助要素; 若 $MS_i > 0$, 则敏感性是其脆弱性的主导要素, 若 $MS_i \leq 0$, 则敏感性其脆弱性的辅助要素; 若 $MA_i < 0$, 则适应力是其脆弱性的主导要素, 若 $MA_i \geq 0$, 则适应力是其脆弱性的辅助要素。

3.2.5 贝叶斯网络模型

贝叶斯网络 (Bayesian Network, BN) 是一种概率论和图论为基础的不确定性知识表示与推理的模型, 通过

依靠贝叶斯方程式判断解释变量的影响^[37]。贝叶斯网络模型中所选择的节点必须充分反映研究对象之间的内在逻辑关系。结合行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性驱动因子,将暴露度作为输入层节点变量,即乡村聚落脆弱性分析问题的起始因素;将敏感性和适应力作为中间层节点变量对脆弱性形成机制进行描述,以表达网络输入和输出的映射关系;将目标任务即乡村振兴作为输出层的节点变量,也是可观察变量或假设变量,以此构建贝叶斯网络模型结构^[38](图 2)。同时,利用几何断点法对各变量进行离散化处理,分为低、中、高三个等级,并将处理后的样本点数据代入 Netica 软件,采用 EN 算法进行网络参数学习,最终得到经过训练后的贝叶斯网络模型^[39]。

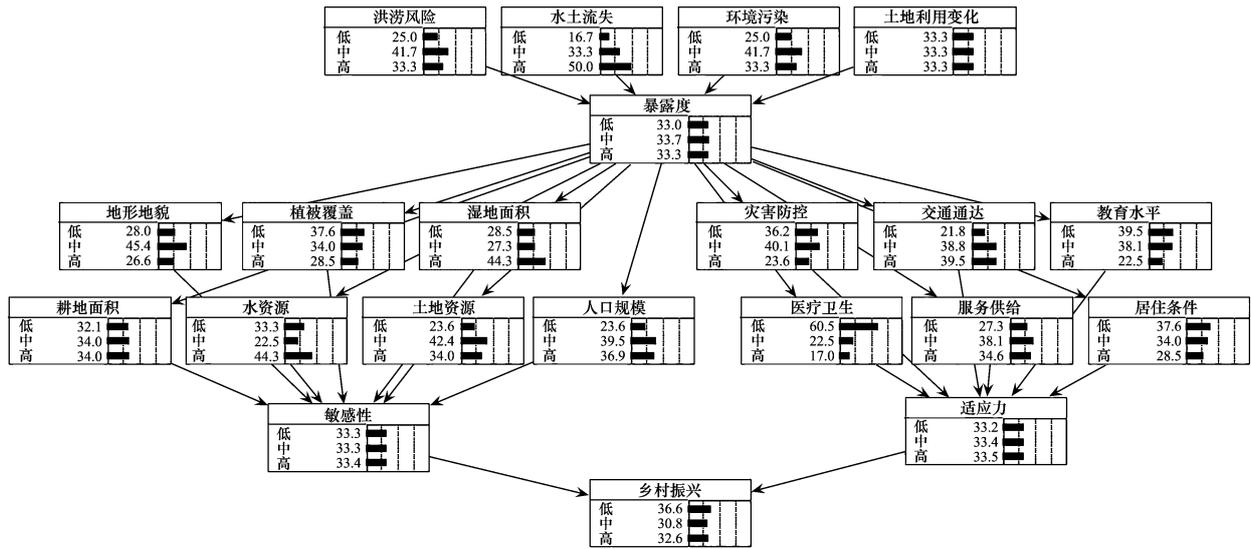


图 2 贝叶斯网络模型结构

Fig.2 Bayesian network model structure

在贝叶斯网络模型中,敏感性分析和诊断性分析能有效地测量各个影响因素之间的相互关系^[40]。其中,敏感性分析通过改变输入变量的状态,观察目标变量条件概率的变化程度,评价输入变量对目标变量的影响力大小,这种变化程度用方差缩减值(Variance Reduction, VR)进行表示^[41],计算过程见式(9)。为了便于分析和对比,结果用方差缩减的百分比呈现,数值越大表示输入变量对目标变量的影响就越大。诊断性分析是指对目标变量设置一种特定条件,本文假定基于区域整体的未来发展情景,通过观察影响因素概率值的变化幅度来评定其影响大小,数值越大表明该影响因素对目标变量的作用效果就越大。

$$R = V(ES) - V(ES | I) = \sum_s p(s) \times (s - E[ES])^2 - \sum_s p(s | I) \times (s - E[ES | I])^2 \quad (9)$$

式中, $V(ES)$ 是变量的方差; $V(ES | I)$ 是已知变量的方差; s 表示输出变量的状态。将现状情景作为已知变量,计算获得各准则层与指标层方差,即为敏感度分析结果。

4 结果与分析

4.1 乡村聚落脆弱性空间分异

利用综合评价指数方法,依次计算出蒙洼地区乡村聚落系统暴露度、敏感性和适应力,根据 SERV 模型综合得出脆弱性,并结合 ArcGIS 进行空间可视化表达,使用自然断点法将各自得分大小分为低值区、较低值区、中值区、较高值区和高值区 5 个等级(图 3)。

从暴露度来看,蒙洼地区乡村聚落呈现“两边低、中间高、局部突出”的空间格局特征。究其原因,中部区域的乡村聚落如镜湖村、程郢村、东郢村、陡河村等,现状土地利用开发程度高,这些区域高强度的建设开发活动会进一步加重洪水灾害威胁,导致乡村聚落暴露度较高;而局部区域的乡村聚落如河口村、安台村等,地势

相对低洼,在面临行蓄洪水启用时受洪水淹没的面积更大,淹没情况也更加严重。从敏感性来看,蒙洼地区主要表现为镇区周边乡村聚落的敏感性较为突出,说明镇区的人口集聚程度高、公共服务和基础设施集中,周边乡村虽能受到镇区辐射带动,但受虹吸效应影响与资源依赖共同作用,未来极易在城镇化作用下并入镇区,因此导致乡村资源保有量、人口规模、土地建设等的敏感性程度更高。从适应力来看,蒙洼地区乡村聚落呈现出镇区所在村的高水平发展,说明镇区是行蓄洪区乡村聚落系统发展的核心载体,人为的开发建设活动在一定程度上阻碍了行蓄洪区作为生态功能区保护优先的前提,但作为乡村人居环境系统,相应的服务设施配套、经济产业发展、安全设施建设等均有助于行蓄洪区居民的安居乐业,并与乡村振兴的战略目标相契合。

从脆弱性来看,现状蒙洼地区 36 个乡村聚落的脆弱性平均值为 0.1783,其中老观村最低为 0.0528,河口村最高为 0.3000,总体脆弱性较高且高低值差异较大。在空间格局上,脆弱性在蒙洼地区呈现等级分布不均衡的态势,现状中部地区以高、较高脆弱性的乡村聚落为主,北部以中、低脆弱性的乡村聚落为主,南部地区低脆弱性的空间单元较少,说明行蓄洪区乡村聚落脆弱性结构性差异显著,需要进一步探析社会-生态视角下行蓄洪区乡村系统脆弱性的复杂特征,分区域层面进行研究以及探讨各自导致脆弱性的主要因素,才能更为清楚的显示要素集聚作用的脆弱性驱动机制,进而找到乡村聚落系统可持续发展的有效途径。

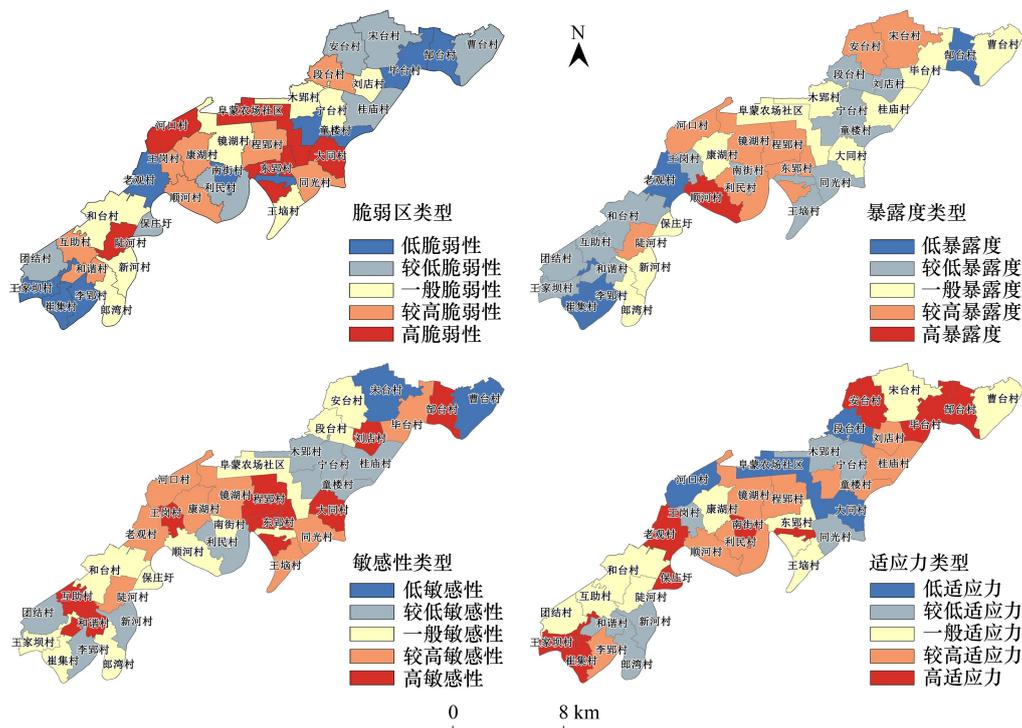


图3 蒙洼地区乡村聚落脆弱性、暴露度、敏感性、适应力空间分布

Fig.3 Spatial distribution of vulnerability, exposure, sensitivity, and resilience of rural settlements in the Monwa region

4.2 乡村聚落脆弱区类型划分

根据暴露度、敏感性、适应力以及脆弱性的测算结果,结合各村脆弱性主导因素类别及数量,将研究区脆弱性类型划分为中低型脆弱度、敏感—适应型高脆弱度、敏感型高脆弱区 3 类(图 4)。由图可知,蒙洼地区乡村聚落以高脆弱区类型居多,占比约 83.3%,说明区域整体发展水平普遍较低,脆弱性问题突出,高脆弱区乡村聚落表现为受到自然生态、经济发展、设施供给、人口规模等多因素制约,其中敏感性导致乡村聚落脆弱的影响范围较广,其次为适应力。具体来说,敏感—适应型高脆弱区主要位于蒙洼北部和中部区域,该区地势相对低洼,建设开发和经济发展受自然环境限制较多,经济发展以传统农业生产方式为主,又因社会基础设施和保障事业的投入不足,产业经济结构转型困难,居民生产生活仍处于较低水平发展状态。敏感型高脆弱区大

多位于蒙洼地区南部河谷地带,此类区域土地资源储备相对丰富,地势平坦且具备村镇建设的基本条件,因此表现为人口和建设均相对集中。但也正因如此,行蓄洪区作为特殊生态功能区的生态服务能力下降,再加上行蓄洪区耕地资源稀缺、农业保障不佳、适应性农业发展进度迟缓等原因,导致敏感性成为脆弱性主导因素。中低脆弱区占比较小,在空间上分散分布在蒙洼南北两侧及中部地区。这些区域拥有相对完善的基础和公共服务设施,交通通达,医疗和教育水平高于周边地区,同时良好的自然本底使区域不易受自然灾害的影响,因而适应力占据了主导地位。

4.3 脆弱区主要影响因素分析

4.3.1 贝叶斯网络精度检验

根据蒙洼地区乡村聚落脆弱区划分结果,提取适应—敏感型高脆弱区和敏感型高脆弱区乡村聚落的驱动因子数据,并将数据分别输入网络,计算出模拟预测的乡村振兴等级,利用误差矩阵评估模型的精度,计算出的等级误差矩阵如表 2 所示,精度分别为 77.78% 和 64.71%,表明该贝叶斯网络模型预测结果具有良好的识别性,对脆弱性主要影响因素的识别分析具有较强的可靠性。

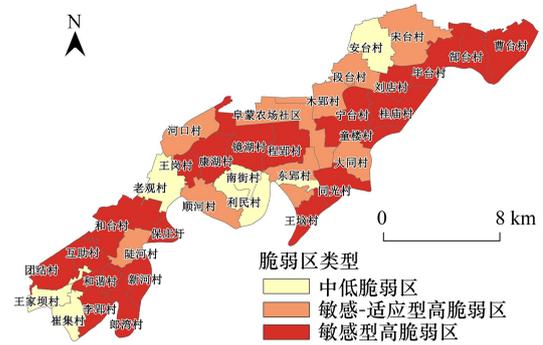


图 4 蒙洼地区乡村聚落脆弱区划分

Fig.4 Vulnerable zones of rural settlements in the Mengwa region

表 2 乡村振兴等级预测误差矩阵

Table 2 Prediction error matrix of rural revitalization level

敏感-适应型高脆弱区 Sensitive-Adaptive high vulnerability zone			敏感型高脆弱区 Sensitive and highly vulnerable zone				
实际乡村振兴等级 Actual rural revitalization	预测乡村振兴等级 Predicted rural revitalization rating			实际乡村振兴等级 Actual rural revitalization 等级	预测乡村振兴等级 Predicted rural revitalization rating		
	低	中	高		低	中	高
低	4	0	0	低	8	0	0
中	0	1	1	中	5	0	0
高	0	1	2	高	1	0	3
总体精度 Overall accuracy	77.78%			总体精度 Overall accuracy	64.71%		

4.3.2 网络敏感性分析结果

利用贝叶斯网络正向推理功能,分别探究造成敏感—适应型高脆弱区和敏感型高脆弱区各自脆弱性的主要原因。以目标变量“乡村振兴”为分析变量,利用 Netica 软件对其他变量进行敏感度分析,以体现各自变量对目标变量的影响力大小,结果见表 3 所示。对于敏感适应型高脆弱区而言,灾害防控对乡村振兴概率的作用最为显著,其方差缩减百分比高达 11.4599%,其次为地形地貌、植被覆盖、人口规模、交通通达、服务供给和居住条件,方差缩减百分比均为 6.6944%,而土地资源和医疗卫生对乡村振兴概率的作用不足,说明低水平的灾害防控能力是诱发敏感—适应型高脆弱区脆弱性的先导因素,反映了在行蓄洪启用后居民的财产生命安全问题决定该片区乡村振兴实现与否的关键所在。对于敏感性高脆弱区而言,地形地貌因子对乡村振兴概率的作用最大,其方差缩减百分比为 4.0941%,其次为医疗卫生、植被覆盖、灾害防控等对乡村振兴概率具有一定影响,而教育水平对乡村振兴的概率作用甚微,说明在敏感型高脆弱区,行蓄洪区的自然环境本底条件是制约其乡村聚落振兴发展的主要因素,基础设施和安全设施的建设等也对乡村振兴造成重要影响。

相比较而言,导致行蓄洪区乡村聚落不同类型高脆弱区的主导因素相似性较高,例如地形地貌、植被覆盖、灾害防控等,说明受到行蓄洪区的主导功能限制,人类活动与区域调蓄洪水之间存在固有的矛盾。此外,表格反映出敏感—适应型高脆弱区乡村聚落的建设开发条件较敏感型高脆弱区差,表现在敏感—适应型高脆

弱区乡村聚落导致脆弱性的重要影响因素额外包含了湿地面积、耕地资源、水资源等,因此该区人居环境的不适宜性突出,应当作为未来行蓄洪区拆迁撤并村庄的首选,逐步引导居民外迁安置。除此之外,在敏感—适应型高脆弱区影响作用不足的土地资源在敏感型高脆弱区表现为主要影响因素,综合地形地貌因子对敏感型高脆弱区的重要影响,以及乡村聚落实际发展情况得出,该区由于生活生产条件的相对优势开发活动集中、聚落布局紧凑、人口密度较高,但高强度、密集型的建设也同样加剧了区域生态环境的压力,因此需要严格控制新增建设和人口规模,提高防洪安全设施建设水平,加强适宜性农业建设,促进社会经济发展和人与自然和谐。

表 3 敏感性分析结果一览表

Table 3 List of sensitivity analysis results

敏感-适应型高脆弱区 Sensitive-Adaptive high vulnerability zone		敏感型高脆弱区 Sensitive and highly vulnerable zone	
解释变量 Explanatory variables	方差缩减百分比 Percentage of variance reduction/%	解释变量 Explanatory variables	方差缩减百分比 Percentage of variance reduction/%
地形地貌 Terrain	6.6944	地形地貌 Terrain	4.0941
植被覆盖 Vegetation coverage	6.6944	植被覆盖 Vegetation coverage	2.6576
湿地面积 Wetland area	2.9123	湿地面积 Wetland area	0.3232
耕地资源 Cultivated Land Resources	2.9123	耕地资源 Cultivated Land Resources	0.3232
水资源 Water resources	2.9123	水资源 Water resources	0.3232
土地资源 Land resources	0.0000	土地资源 Land resources	0.3232
人口规模 Population size	6.6944	人口规模 Population size	0.3232
灾害防控 Disaster prevention and control	11.4599	灾害防控 Disaster prevention and control	2.3344
交通通达 Transportation access	6.6944	交通通达 Transportation access	1.1851
教育水平 Education level	0.7943	教育水平 Education level	0.0000
医疗卫生 Health care	0.0000	医疗卫生 Health care	3.8247
服务供给 Service provision	6.6944	服务供给 Service provision	2.3344
居住条件 Living conditions	6.6944	居住条件 Living conditions	2.3344

4.3.3 网络诊断性分析结果

选取敏感型分析中对高脆弱区乡村聚落影响力较大的驱动因子,利用贝叶斯网络的反向推理功能,进行贝叶斯网络模型的诊断性分析,获取影响因子与目标变量之间的定量因果关系。将目标层乡村振兴的概率值设定为“低”100%,即假设蒙洼地区所有的乡村聚落都面临乡村振兴的困境,在行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性程度最高的情景下,观察各影响因素变化率值情况,结果见表 4 所示。在敏感—适应型高脆弱区内,乡村聚落系统敏感性指标层中的人口规模“高”状态减少 0.1%,适应力指标层中的灾害防控“低”状态增加 0.2%,而服务供给“高”状态减少 0.1%,说明防洪安全设施建设投入不足对该分区乡村振兴造成了最大阻碍。参考现实发展情况,敏感—适应型高脆弱区乡村普遍存在人口规模小、服务供给稀缺、聚落破碎度高等突出问题,研究进一步认为该区不适宜乡村聚落布局,应在未来规划为生态保护空间,并加强行蓄洪区湿地化建设,以提升整个地区防灾应灾的能力,削减洪水灾害造成的破坏性后果。在敏感型高脆弱区内,敏感型指标层中的地形地貌、植被覆盖“高”状态减少 0.1%,适应力指标层中的灾害防控和居住条件“低”状态减少 0.1%,说明建设发展和生态保护的冲突是限制敏感型高脆弱区乡村聚落发展振兴的主要因素,虽然该区较敏感—适应高脆弱区而言,能够承担一定生产生活功能,但整体生态环境承载力仍然不佳,为避免乡村聚落衰退态势加剧,需要加强该区的乡村建设管理,提升防洪标准,完善居民生活服务设施,并严格控制区域人口数量增长,不断优化经济结构和生产方式,尽可能的去寻找地区保护与发展之间的平衡。

表 4 诊断性分析结果一览表/%

Table 4 List of diagnostic analysis results

敏感-适应型高脆弱区 Sensitive-Adaptive high vulnerability zone			敏感型高脆弱区 Sensitive and highly vulnerable zone		
变量名称 Variable name	变量状态 Variable state	概率变化 Probability change/%	变量名称 Variable name	变量状态 Variable state	概率变化 Probability change/%
地形地貌 Terrain	低	-0.1	地形地貌 Terrain	低	0.0
	中	0.0		中	+0.1
	高	0.0		高	-0.1
植被覆盖 Vegetation coverage	低	0.0	植被覆盖 Vegetation coverage	低	0.0
	中	-0.1		中	0.0
	高	0.0		高	-0.1
人口规模 Population size	低	0.0	人口规模 Population size	低	-0.1
	中	-0.1		中	0.0
	高	+0.1		高	0.0
灾害防控 Disaster prevention and control	低	+0.2	灾害防控 Disaster prevention and control	低	0.0
	中	-0.1		中	0.0
	高	0.0		高	0.0
服务供给 Service provision	低	0.0	服务供给 Service provision	低	0.0
	中	+0.1		中	0.0
	高	-0.1		高	0.0
居住条件 Living conditions	低	0.0	居住条件 Living conditions	低	-0.1
	中	-0.1		中	0.0
	高	0.0		高	0.0

“+”表示概率增加，“-”表示概率减少

5 结论与讨论

5.1 主要结论

通过对乡村聚落系统脆弱性概念内涵、要素构成的分析,研究从社会-生态系统角度解构了行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性驱动因子和目标任务,可将其自然生态和社会经济系统进行交互影响和耦合联系,最终形成有效应对风险干扰的分析框架和评价体系。研究结论如下:

(1)实证结果表明:蒙洼地区乡村聚落暴露度呈现“两边低、中间高、局部突出”的空间格局特征,与现状土地利用开发程度存在紧密关联,开发建设强度越大,暴露度相对越高;敏感性表现为镇区周边的乡村聚落突出,表明镇区周边的乡村聚落未来极易在城镇化作用下融入镇区;适应力表现为镇区所在行政村的高水平发展态势,说明镇区单元是行蓄洪乡村聚落系统发展的核心载体;脆弱性表现为区域空间布局的不均衡性,说明行蓄洪区乡村聚落系统脆弱性的结构性差异突出,导致其脆弱的原因也复杂多样。

(2)将蒙洼乡村聚落脆弱区划分为中低脆弱区、敏感—适应型高脆弱区和敏感型高脆弱区 3 种类型。提取高脆弱区的数据样本基于贝叶斯网络模型揭示影响脆弱性的主要因素。结果表明,蒙洼地区乡村聚落以高脆弱区类型居多,其中敏感—适应型高脆弱区主要位于蒙洼地区中部和北部,灾害防控对乡村聚落振兴概率的作用最为显著,建设开发受自然环境条件的制约突出,研究认为该区不适宜乡村聚落布局,应划为生态保护空间,推进渐进式移民搬迁;敏感型高脆弱区主要位于蒙洼地区南部河谷地带,乡村聚落建设发展基础相对良好,地形地貌对乡村振兴概率的作用最为显著,说明其面临着建设发展与生态保护的突出矛盾,为避免乡村衰退的态势加剧,需强化该区的建设和管理,严格控制人口数量、经济规模和生产方式,不断提升防洪安全标准与居民生活质量。

5.2 讨论与展望

我国是农业大国,实施乡村振兴是我国走向富强的关键环节。乡村聚落系统作为乡村的重要组成部分,保持健康可持续发展状态能够带来社会稳定、经济增长、生态改善等多重综合效益,是促进乡村振兴战略成功实施的重要保障,但如果仅依靠外力的帮扶,却不明晰乡村聚落发展的内在驱动机制,难以实现真正的乡村振兴。乡村聚落系统是一个复杂的人地关系地域系统,良好的自然本底是其稳定发展的基础条件,人类通过社会交往、经济发展、政策管理等行为与自然环境相互作用从而促进或抑制乡村聚落的发展,而脆弱性理论可从多个角度对系统发展的状态进行评价,因此本研究基于乡村振兴的总体目标,将乡村聚落拆解为社会、经济、生态三大系统,引入脆弱性理念借鉴 VSD 框架构建了暴露度-敏感性-适应力的综合指标评价体系,利用贝叶斯网络模型对导致脆弱性主要影响因素的识别,探究了蒙洼地区的乡村聚落脆弱性空间分异特征,揭示了现状高脆弱区类型,并提出导致各自的脆弱主要原因以及对未来发展的部分思考,既为行蓄洪区乡村聚落系统运行状态的量化研究提供了新的研究范式,也为行蓄洪区未来分区发展、区域统筹协调提供了新的思路,避免了仅从单一评价结果得出结论,实现了脆弱性影响机制研究切入的多元化。

然而,行蓄洪区乡村聚落是一个复杂巨系统,造成其脆弱性的影响因素众多,影响机制也很复杂,由于资料的获取以及社会文化、政策制度等人文因素定量化的限制,使得研究不能真实、全面、准确地描述地区的脆弱性状况,还需要进一步探讨其影响因素之间的关系,通过长时间的田野调查,选取更贴合地域特征的评价指标和驱动因子,构建起更加科学合理的评价体系。此外,贝叶斯网络仍然存在着一些不确定性,如网络结构、节点参数的不确定等,本文结合乡村聚落系统社会-生态系统的脆弱性驱动因子和目标变量,构建了贝叶斯网络模型结构,但还有其他驱动因子,如行蓄洪启用风险、洪水灾害损失、居民生活满意度、外出打工率等未考虑其中,以上因子均对行蓄洪区乡村振兴产生重要影响,应在今后的研究中将其纳入,进而在增强影响因素识别准确性的同时,不断完善行蓄洪区乡村聚落脆弱性分析的理论框架。

参考文献(References):

- [1] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展.水利学报,2019,50(1):53-61.
- [2] 虞邦义,袁先江,蒋尚明,孙小冉.江淮系统治水的实践与探索——安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院建院70周年成就回顾.水利学报,2022,53(5):515-529.
- [3] 董春卫,印凡成,包君,王晓瑞.基于多层次熵权模型的行蓄洪区启用风险评价.中国农村水利水电,2016(3):139-143,148.
- [4] 王群,银马华,杨兴柱,姚兆钊.大别山贫困区旅游地社会-生态系统脆弱性时空演变与影响机理.地理学报,2019,74(8):1663-1679.
- [5] 张震.安徽省淮河流域行蓄洪区建设实践与探讨.中国防汛抗旱,2022,32(4):15-19.
- [6] Wu X Y, Zhu C L, Yu J B, Zhai L, Zhang H X, Yang K J, Hou X L. Ecological vulnerability in the red soil erosion area of Changting under continuous ecological restoration: spatiotemporal dynamic evolution and prediction. *Forests*, 2022, 13(12): 2136.
- [7] Fang W, Huang Q, Huang G, Ming B, Quan Q, Li P, Guo Y, Zheng X D, Feng G, Peng J. Assessment of dynamic drought-induced ecosystem risk: integrating time-varying hazard frequency, exposure and vulnerability. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118176.
- [8] Luo Q Y, Bao Y, Wang Z T, Chen X T, Wei W F, Fang Z Y. Vulnerability assessment of urban remnant mountain ecosystems based on ecological sensitivity and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110314.
- [9] Yoshikawa T, Koide D, Yokomizo H, Kim J Y, Kadoya T. Assessing ecosystem vulnerability under severe uncertainty of global climate change. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 5932.
- [10] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [11] 范玲,王会肖,刘昌明,隋官航.基于压力-状态-响应模型的新疆水资源脆弱性评价.南水北调与水利科技(中英文),2022,20(6):1052-1064.
- [12] 赵春黎,严岩,陆咏晴,丁丁,宋扬,吴钢.基于暴露度-恢复力-敏感度的城市适应气候变化能力评估与特征分析.生态学报,2018,38(9):3238-3247.
- [13] Yu T T, Leng H, Yuan Q, Jiang C Y. Vulnerability evaluation of villages based on social-ecological indicators and strategies for improvement: case study of villages in the northeast China plain. *Journal of Urban Planning and Development*, 2022, 148(1): 1-15.
- [14] Acosta-Michlik L A, Kavi Kumar K S, Klein R J T, Campe S. Application of fuzzy models to assess susceptibility to droughts from a socio-economic perspective. *Regional Environmental Change*, 2008, 8(4): 151-160.

- [15] 陈佳, 杨新军, 尹莎, 吴孔森. 基于 VSD 框架的半干旱地区社会-生态系统脆弱性演化与模拟. 地理学报, 2016, 71(7): 1172-1188.
- [16] 方创琳, 王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征. 地理学报, 2015, 70(2): 234-247.
- [17] 孙凌云, 孜比布拉·司马义, 王颖红, 盛永财, 斯琴. 基于变异系数-综合指数法的乌鲁木齐城市脆弱性评价. 安全与环境工程, 2017, 24(6): 14-19.
- [18] 杨庆媛, 毕国华, 陈展图, 曾黎, 杨人豪. 喀斯特生态脆弱区休耕地的空间配置研究——以贵州省晴隆县为例. 地理学报, 2018, 73(11): 2250-2266.
- [19] 陈晓红, 吴广斌, 万鲁河. 基于 BP 的城市化与生态环境耦合脆弱性与协调性动态模拟研究——以黑龙江省东部煤电化基地为例. 地理科学, 2014, 34(11): 1337-1343.
- [20] 陶岸君, 赵鹏风, 杨文杰. 中国乡村聚落地形态的地域分异特征研究. 地理研究, 2023, 42(5): 1267-1284.
- [21] 曲衍波. 论乡村聚落转型. 地理科学, 2020, 40(4): 572-580.
- [22] He Y, Zhou C C, Ahmed T. Vulnerability assessment of rural social-ecological system to climate change: a case study of Yunnan Province, China. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2021, 13(2): 162-180.
- [23] 陈萍, 陈晓玲. 全球环境变化下人-环境耦合系统的脆弱性研究综述. 地理科学进展, 2010, 29(4): 454-462.
- [24] 吴孔森, 刘倩, 张戢, 杨新军. 干旱环境胁迫下民勤绿洲农户生计脆弱性与适应模式. 经济地理, 2019, 39(12): 157-167.
- [25] 黄晓军, 黄馨, 崔彩兰, 杨新军. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1512-1525.
- [26] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 岳启发, 陈星宇, 石小倩. 滇东南喀斯特区域生态脆弱性的时空演变及其影响因素. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2180-2190.
- [27] 杨忍, 潘瑜鑫. 中国县域乡村脆弱性空间特征与形成机制及对策. 地理学报, 2021, 76(6): 1438-1454.
- [28] 李振民, 石磊, 张冲昊. 社会——生态视角下县域乡村地域系统脆弱性评价与差异化应对策略. 经济地理, 2022, 42(5): 175-184.
- [29] 黄建毅, 刘毅, 马丽, 李鹤, 苏飞. 国外脆弱性理论模型与评估框架研究评述. 地域研究与开发, 2012, 31(5): 1-5, 15.
- [30] 李玉恒, 阎佳玉, 刘彦随. 基于乡村弹性的乡村振兴理论认知与路径研究. 地理学报, 2019, 74(10): 2001-2010.
- [31] 汪顺生, 黄天元, 陈豪, 刘明洋, 薛红利. 基于 CRITIC 赋权的模糊综合评判模型在水质评价中的应用. 水电能源科学, 2018, 36(6): 48-51.
- [32] 黄硕磊, 何奕忻, 杨早, 鞠佩君, 阳小成, 王凯伦, 冯毅, 陈槐, 吴宁. 成都市龙泉山城市森林公园生态系统服务价值评估体系的构建——基于层次分析法. 应用与环境生物学报, 2022, 28(6): 1635-1645.
- [33] Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J. A framework for the development of the SERV model: a Spatially Explicit Resilience-Vulnerability model. *Applied Geography*, 2014, 51: 158-172.
- [34] 任国平, 刘黎明, 李洪庆, 季翔, 赵旭. 都市水源区区域社会-生态系统脆弱性空间分异的地理影响模式——以上海市青浦区为例. 地理科学, 2021, 41(8): 1469-1478.
- [35] 金儒成, 梅再美, 蔡广鹏, 周国富. 主导因素法对利用聚类分析进行土地利用分区的校正研究——以贵州省仁怀市和罗甸县为例. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 8115-8118, 8171.
- [36] 王成, 何焱洲. 重庆市乡村生产空间系统脆弱性时空分异与差异化调控. 地理学报, 2020, 75(8): 1680-1698.
- [37] 傅婕, 曹若馨, 曾维华, 卓越, 王立婷. 基于贝叶斯网络的流域水环境承载力超载风险评价——以北运河流域为例. 环境科学学报, 2023, 43(3): 516-528.
- [38] 郑涛, 陈爽, 张童, 徐丽婷, 马丽雅. 基于贝叶斯网络的生态用地流失机制研究. 自然资源学报, 2020, 35(12): 2980-2994.
- [39] 刘晓明, 李盼池, 刘显德, 肖红. 贝叶斯网络参数学习中的连续变量离散化方法研究. 计算机与数字工程, 2018, 46(5): 992-996.
- [40] 陈静, 蒋正凯, 付敬奇. 基于 Netica 的自学习贝叶斯网络的构建. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11): 1687-1693.
- [41] 张悦, 邓伟, 张少尧. 土地利用转型与农业生产结构调整的网络关联性研究——以四川省为例. 农业现代化研究, 2022, 43(3): 379-389.