



Risk Assessment of Extreme Precipitation-Geological Hazard Chains in the Yunnan-Guizhou Plateau

Guangzhi Rong^{1,2*}, Jiquan Zhang^{1,2*}

¹ School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

² Institute of Natural Disaster Research, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

*Corresponding author. Email: zhangjq022@nenu.edu.cn

ABSTRACT

In this study, based on the four elements of natural disaster risk formation theory, indicators were selected from four aspects of extreme precipitation-geological hazard chain, exposure and vulnerability of disaster-bearing bodies, and disaster prevention and mitigation capacity, and a risk assessment index system and assessment model were constructed based on different extreme precipitation recurrence period scenarios. The risk assessment study of extreme precipitation-geological hazard chain was carried out in Shuicheng, Zhongshan and Weining counties in Guizhou Province, and Huize and Xuanwei cities in Yunnan Province. The results show that the high susceptibility areas are mainly concentrated in Shuicheng County, Zhongshan District, northern Xuanwei City and northern Huize County with high terrain, multiple faults and loose rock texture. The spatial distribution of hazard is similar to that of susceptibility, and with the increase of the return period of extreme precipitation, the areas with high-hazard classes increase. The overall exposure and vulnerability level of the study area is low, and the high disaster prevention and mitigation capacity is mainly concentrated in the highways, national highways and urban areas of cities and counties. Most of the areas in the study area are very low and low risk, and the high-risk areas are mainly concentrated in the central and southern parts of Xuanwei City, the northeastern part of Shuicheng County, and Zhongshan District. As the extreme precipitation is higher, the corresponding risk is also higher. The results of this study can provide a scientific basis for local emergency departments to set the corresponding warning levels and their emergency plans and response measures by establishing the risk levels of geological hazards under different rainfall conditions. The implementation of various regional disaster prevention and mitigation efforts will be strengthened to protect the lives and properties of residents.

Keywords: Risk Assessment; Geological Hazard; Extreme Precipitation; Yunnan-Guizhou Plateau.

云贵高原极端降水-地质灾害链风险评估

荣广智^{1,2}, 张继权^{1,2*}

¹ 东北师范大学环境学院, 长春 130024, 中国

² 东北师范大学自然灾害研究所, 长春 130024, 中国

* 通讯作者. 电子邮箱: zhangjq022@nenu.edu.cn

摘要

本研究根据自然灾害风险形成四要素学说, 从极端降水-地质灾害链的危险性, 承灾体的暴露性和脆弱性, 以及防灾减灾能力四个方面选取指标, 基于设定的不同极端降水重现期情景, 构建了风险评估指标体系和评估模型, 选取贵州省的水城县、钟山区、威宁县, 云南省的会泽县和宣威市作为研究区, 开展极端降水-地质灾害链风险评估研究。结果表明: 高易发性区域主要集中在地势较高, 并且有多处断层, 山体岩石质地较为松散的水城县、钟山区以及宣威市北部和会泽县北部。危险性的空间分布与易发性类似, 且随着极端降水重现期的增加, 高危险性等级的区域增加。研究区暴露性和脆弱性水平整体较低, 高防灾减灾能力主要集中在高速公路、国道以及县市的城区。研究区内大部分地区为极低和低风险, 高风险区域主要集中在宣威市的中部和南部、水城县的东北部以及钟山区。随着极端降水量越大, 相应的风险也就越高。本研究结果可为当地的应急部门通过确立不同雨情下的地质灾害风险等级, 从而设定相应预警等级及其应急预案和应对措施提供科学依据。加强区域防灾减灾各项工作的实施, 保障居民的生命财产安全。

关键字: 风险评估, 地质灾害, 极端降水, 云贵高原。

© The Author(s) 2023

S. Qiao et al. (Eds.): RAC 2022, AEBMR 248, pp. 18–25, 2023.

https://doi.org/10.2991/978-94-6463-194-4_4

1. 引言

作为最为频发的自然灾害之一,地质灾害经常造成巨大的人员伤亡和经济损失,严重影响社会发展和土地利用^[1]。如何有效地对地质灾害风险进行评估一直是相关专家学者的研究重点和难点^[2]。据中国自然资源部统计,2021年,中国共发生地质灾害4772起,造成80人死亡、11人失踪,直接经济损失32亿元。其中,因降雨引发的地质灾害有4403起,约占全部地质灾害数量的92%。根据自然灾害风险形成四要素学说,地质灾害风险是地质灾害危险性、承灾体的暴露性、脆弱性和防灾减灾能力共同影响和共同决定的^[3,4]。地质灾害风险评估是以地质灾害为基础,综合自然、社会、经济等因素的灾害潜在损失的综合分析与评判,从风险四因子角度出发,其结果区域减灾规划和预案的制定及其决策提供具有可操作性的技术支撑^[5]。降水是地质灾害链的关键诱发因素之一,尤其是短时瞬发的极端降水^[6]。极端降水-地质灾害链风险评估则是在地质灾害风险评估的基础上,以极端降水指标作为致灾因子分析,针对不同极端降水情景重构危险性,进而评估不同降水重现期情景下的地质灾害风险^[7]。本文结合多源数据分析,分别从极端降水-地质灾害链风险评估的四个因子角度选取指标,以极端降水-地质灾害链频发的云贵高原的为例,选取贵州省水城县、钟山区、威宁县,云南省的会泽县和宣威市作为研究区,开展极端降水-地质灾害链风险评估研究。

2. 资料与方法

2.1. 研究区概况及数据来源

研究区包括贵州省水城县、钟山区、威宁县,云南省的会泽县和宣威市,总面积约 $2.23 \times 10^4 \text{ km}^2$,常住人口约75.49万人。县域内海拔高度范围为630 m至3954 m(图1)。该地区属于亚热带季风气候,降水丰富且频繁,并往往以极端降水的形式发生。研究区还属于喀斯特地貌,地表水容易渗漏,土体水分含量大。研究区所处的云贵高原是我国地质灾害的集中高发区,且多是以极端降水为主要诱发因素。地质灾害种类多、分布广、影响大,严重制约着研究区的国民经济发展,威胁着人民群众生命财产安全^[8]。2019年7月23日发生的水城县鸡场镇发生的特大型山体滑坡摧毁了21所房屋,造成53人死亡,直接导致了极大的人口伤亡和经济损失^[9]。因此,在研究区开展极端降水-地质灾害链的风险评估工作尤为重要。

历史地质灾害点位数据来自中国地质调查局记录数据;基础地理信息数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心,包括行政边界、岩性、水文地质等数据;高程数据来自地理空间数据云;土地覆盖数据来自Finer resolution observation and monitoring-global land cover数据集,社会、人口、经

济等数据则来自2019年全国县域统计年鉴(乡镇卷)以及各省和各市统计年鉴和统计公报。

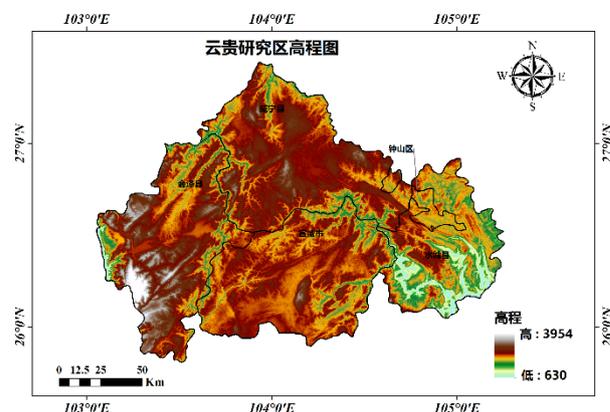


图1 研究区高程图

2.2. 研究方法

2.2.1. 风险评估指标体系

本文根据自然灾害风险形成四要素学说,从极端降水-地质灾害链的危险性、承灾体的暴露性、脆弱性,以及防灾减灾能力四个因子出发,结合历史灾害的发生条件,以及研究区的自然环境和社会经济实际情况,采用专家调研法选取指标,构建了云贵高原极端降水-地质灾害链的风险评估指标体系(表1)。其中,危险性指数采用易发性指数和诱发因子指标计算,暴露性、脆弱性,以及防灾减灾能力各指标的权重采用熵权法和层次分析法计算。

2.2.2. 危险性评估

危险性评估主要包括两方面:灾害发生的空间概率和时间概率。空间概率即为什么地方容易发生,即易发性;时间概率即致灾因子的频率或强度。针对极端降水-地质灾害链,通过计算地质灾害的易发性与不同重现期下的极端降水量的乘积评估危险性。

(1) 易发性评估

结合研究区实际情况与极端降水-地质灾害链的特点,从地形地貌和地质环境两大方面分析,最终选取了高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、土地覆盖类型、岩性、地质年代、距断层距离、距道路距离、距河流距离、河流功率指数、沉积物迁移指数、地形起伏度和地形湿度指数共15个指标评估易发性。本文采用随机森林模型作为极端降水-地质灾害链的易发性评估技术模型。

随机森林模型本质上就是将多个决策“树”合并在一起形成“森林”,每棵树的建立依赖于独立抽取的样本^[10]。单棵树的分类能力可能很小,但在随机产生大量的决策树后,一个测试样本可以通过

表 1 云贵高原极端降水-地质灾害链风险评估指标体系

	一级因素	次级因素	表征指标	权重系数	
云贵高原极端降水-地质灾害链风险评估指标体系	危险性	地形地貌	高程		
			坡度		
			坡向		
			平面曲率		
			剖面曲率		
			土地覆盖类型		
		易发性	地质环境	岩性	
				地质年代	
				距断层距离	
				距道路距离	
	暴露性	生态环境因素	距河流距离		
			河流功率指数		
			沉积物迁移指数		
			地形起伏度		
			地形湿度指数		
诱发因子	极端降水	极端降水量			
人口因素	人口数量	总人口数	0.3578		
社会经济因素	人员财产分布	国民生产总值	0.3117		
脆弱性	生态环境因素	农田	农田面积	0.0849	
		建筑用地	建筑用地面积	0.1658	
		林地	林地面积	0.0388	
		草地	草地面积	0.0410	
	经济因素	土地利用	土地利用类型	0.0363	
		交通道路	道路类型	0.0640	
		农业	粮食产量	0.1303	
防灾能力	畜牧业	畜牧业产量	0.0651		
		工业	规模以上工业企业数量	0.2647	
	人口因素	人口分布	人口密度	0.4396	
	防灾减灾能力	教育水平	在校学生数	0.0276	
经济投入			一般公共预算支出	0.0873	
应灾能力		相关专业人员	医疗卫生人员	0.2202	
		应灾准备	医院、卫生院床位数量	0.1504	
			社会福利单位数量	0.0740	
交通便利性	社会福利单位床位数量	0.0826			
		道路影响范围	0.3580		

每一棵树的分类结果经统计后选择最可能的分类。大致过程如下：1) 从样本集中有放回随机采样选出 n 个样本；2) 从所有特征中随机选择 k 个特征，对选出的样本利用这些特征建立决策树；3) 重复以上 2 步 m 次，即生成 m 棵决策树，形成随机森林；4) 对于新数据，经过每棵树决策，最后投票确认分到哪一类。由于每棵树都随机地选择部分样本及特征，一定程度避免过拟合，且具有很好的抗噪能力。

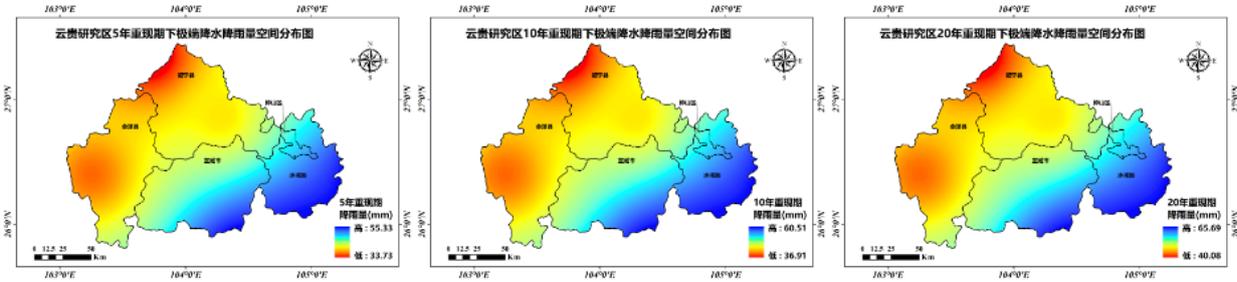


图2 不同降水重现期下的极端降水量空间分布图

(3) 危险性的评估

极端降水-地质灾害链危险性的评估模型为：

$$H = S \times D \quad (1)$$

式中， H 为极端降水-地质灾害链危险性， S 为易发性， D 为不同重现期下的降雨指标。

2.2.3. 暴露性评估

承灾体暴露性是指可能受到地质灾害威胁的经济、社会和自然环境系统，具体包括农业、人类和生态环境等。本文从人口因素、社会经济因素和生态环境因素三个角度构建了暴露性评估指标体系，采用综合加权评估模型作为极端降水-地质灾害链暴露性评估模型：

$$E = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (2)$$

E 为承灾体暴露性量化值， X_i 为暴露性指标的归一化量化值， W_i 为权重系数， n 为指标个数。其中， $0 \leq X_i \leq 1$ ， $W_i \geq 0$ 。

2.2.4. 脆弱性评估

承灾体脆弱性是指某一给定区域的承灾体由于潜在自然灾害危险因子而造成的伤害或损失程度，其综合反映了自然灾害的损失（脆弱）程度。从人口因素和经济因素两方面确定了脆弱性评估指标体系，采用综合加权评估模型构建承灾体脆弱性评估模型：

$$V = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (3)$$

V 为承灾体脆弱性量化值， X_i 为脆弱性指标的归一化量化值， W_i 为权重系数， n 为指标个数。其中， $0 \leq X_i \leq 1$ ， $W_i \geq 0$ 。

(2) 诱发因子指标

针对极端降水-地质灾害链的诱发条件，本课题收集 1981–2018 年的日降水数据，通过计算耿贝尔极值分布曲线，分别得到 5 年一遇、10 年一遇和 20 年一遇的重现期下的极端降水的降水量作为极端降水-地质灾害链的诱发因子指标。

2.2.5. 防灾减灾能力评估

防灾减灾能力是区域人类社会为保障承灾体免受或少受自然灾害威胁所拥有的基础条件和专项防御能力，是用于防治和减轻自然灾害的各种措施和对策。从防灾能力和应灾能力两方面分析，构建了防灾减灾能力的评估指标体系，采用综合加权评估模型构建防灾减灾能力的评估模型：

$$C = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (4)$$

C 为防灾减灾能力量化值， X_i 为防灾减灾能力指标的归一化量化值， W_i 为权重系数， n 为指标个数。其中， $0 \leq X_i \leq 1$ ， $W_i \geq 0$ 。

2.2.6. 综合风险评估

本研究利用自然灾害风险指数法和层次分析法，建立了极端降水-地质灾害链风险指数，用以表征灾害风险程度，具体计算公式如下：

$$PGRI = H^{Wh} \times E^{We} \times V^{Wv} \times (1 - C)^{Wc} \quad (5)$$

其中， $PGRI$ 是极端降水-地质灾害链风险指数，其值越大代表灾害风险越大； H ， E ， V ， C 的值分别表示极端降水-地质灾害链的危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力因子指数； Wh ， We ， Wv ， Wc 分别为各因子权重，采用层次分析法计算， Wh ， We ， Wv ， Wc 分别为 0.4179，0.1090，0.2245，0.2485。

3. 结果与讨论

3.1. 极端降水-地质灾害链危险性评估

将构建的技术模型计算结果进行空间展布, 采用自然断点法进行等级划分, 得到极端降水-地质灾害链易发性区划图 (图 3)。

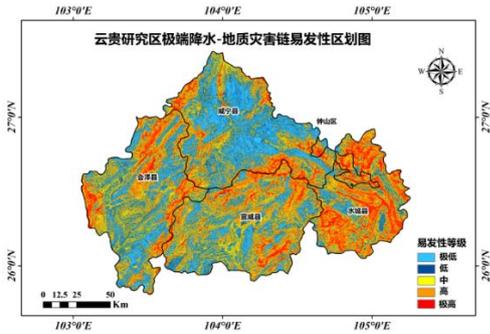


图 3 极端降水-地质灾害链易发性区划图

整体而言, 高易发性区域主要集中在断层附近, 多沿断裂带呈条带状分布, 岩性以粘土岩、砂岩和

玄武岩为主, 计算结果与实际地质灾害发生规律基本一致。按各县市分析, 高易发性区域主要集中在水城县、钟山区以及宣威市北部和会泽县北部, 低易发性区域主要为威宁县南部地区等。经调查分析发现, 威宁县南部地区主要以平缓地区为主, 所以地质灾害易发性较小。而作为高易发性的钟山区和宣威市地势较高, 并且有多出断层, 山体岩石质地较为松散, 故引发有、较高易发性。

基于危险性计算公式计算, 采用自然断点法进行等级划分, 绘制了不同降水重现期情景下的极端降水-地质灾害链危险性区划图, 如图 4 所示。

虽然不同极端降水重现期下的危险性空间分布相似, 但实际的危险值差别存在明显差异。研究区内极高危险性区域主要分布于水城县和宣威市南部, 而危险性较小地区主要分布于研究区的北部和西南部。随着极端降水重现期的增加, 高危险性和极高危险性区域面积加大。重现期越长, 可能产生的降水量就越大, 相应的危险性也就越高。

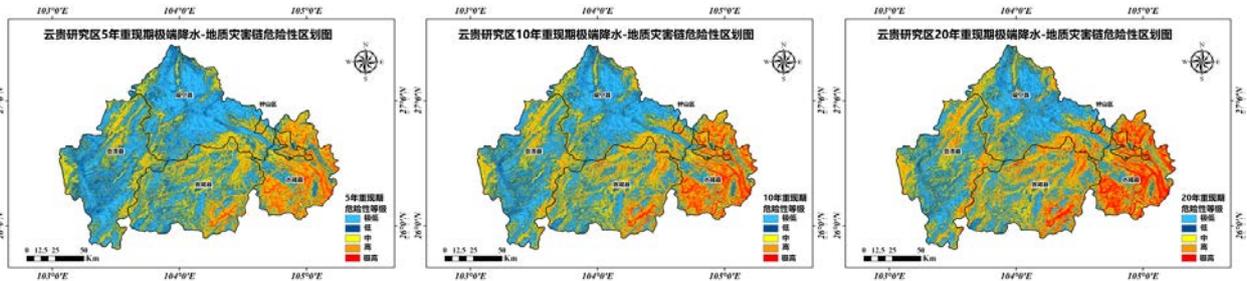


图 4 不同降水重现期情景下的极端降水-地质灾害链危险性区划图

3.2. 极端降水-地质灾害链暴露性评估

根据暴露性评估模型计算所得结果, 采用自然断点法进行等级划分, 得到极端降水-地质灾害链暴露性区划图 (图 5)。

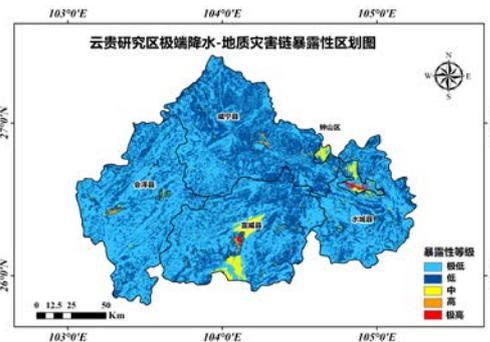


图 5 极端降水-地质灾害链暴露性区划图

研究区总体暴露性极高或高等级占比较少, 极低和低等级地区较多。其中钟山区相比于其他地区

该地区有较大的暴露度, 钟山区是六盘水市中心城区, 是人口较为密集地区, 尤其是钟山区的黄土坡街道、荷域街道、月照街道的人口和经济暴露度最高, 因此该地区暴露性较高。宣威市中心的双龙街道也存在极高暴露性, 主要是由于人口密集, 耕地和建筑用地也较为集中。研究区其他地区的暴露性较低, 绝大部分是山区林地, 人口稀少且经济水平较低。

3.3. 极端降水-地质灾害链脆弱性评估

根据脆弱性评估模型计算所得结果, 采用自然断点法进行等级划分, 得到极端降水-地质灾害链脆弱性区划图 (图 6)。

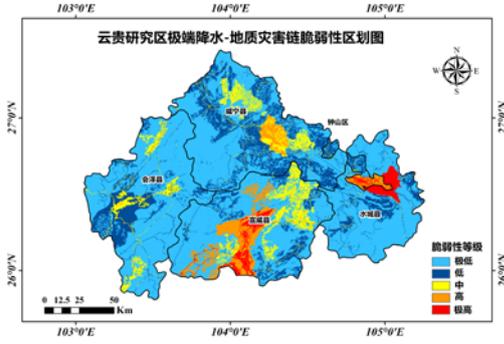


图6 极端降水-地质灾害链脆弱性区划图

研究区内大部分地区的脆弱性等级为极低，会泽县的中脆弱性地区主要分布在金钟街道和者海镇附近，而威宁县的中脆弱性地区主要分布在雪山镇和龙街镇的范围内。宣威市的中脆弱性地区主要分布在落水镇，乐丰乡和阿都乡的范围内。高脆弱性和极高脆弱性地区主要分布在宣威市的双龙街道和板桥街道以及钟山区的凤凰街道和上坡街道，这主要是由于这些地区的人口密度和工业企业数量较多，因此脆弱性较高，一旦发生了崩塌，滑坡等地质灾害，这些地区将遭受更为严重的损失。

3.4. 极端降水-地质灾害链防灾减灾能力评估

根据防灾减灾能力评估模型计算所得结果，采用自然断点法进行等级划分，得到极端降水-地质灾害链防灾减灾能力区划图，如图7所示。

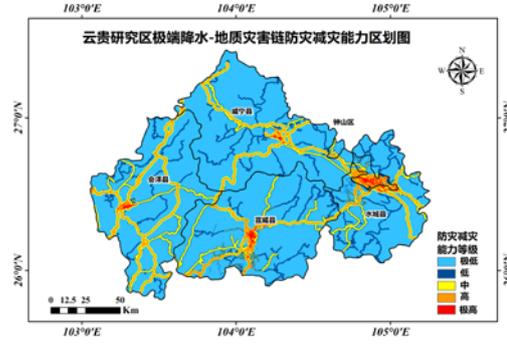


图7 极端降水-地质灾害链防灾减灾能力区划图

整体而言，研究区中极低防灾减灾能力面积占比最多。研究区域内极高和高防灾减灾能力区主要集中在研究区的高速公路、国道以及县市城区道路，中防灾减灾能力区主要是省道、乡道等次级公路，由于交通便利性较高，应灾能力较强。而非公路区域的防灾减灾能力都比较低。综合各县市分析，钟山区的防灾减灾能力最强，其次为水城县，而威宁县相对较差。

3.5. 极端降水-地质灾害链风险评估

根据风险评估模型计算所得结果，采用自然断点法进行等级划分，最终完成了云贵研究区不同降水重现期情景下的极端降水-地质灾害链风险区划图，如图8所示。

不同极端降水重现期下的风险性空间尺度分布相差不大，根据不同降水重现期情景下的极端降水-地质灾害链风险区划图所示，研究区内大部分地区为极低和低风险地区，中风险地区主要集中在会泽县西部及中部，宣威市中部以及水城县南部地区，而高风险和极高风险地区主要集中在宣威市的中部以及南部地区，水城县的东北部地区以及钟山区。在不同诱发因子尺度上，实际的风险值存在明显的差异。重现期越长，极端降水量越大，相应的风险也就越高。随着极端降水量的增加，云贵研究区内极低和低风险地区所占面积减少，中风险地区、高风险和极高风险地区所占面积增加。

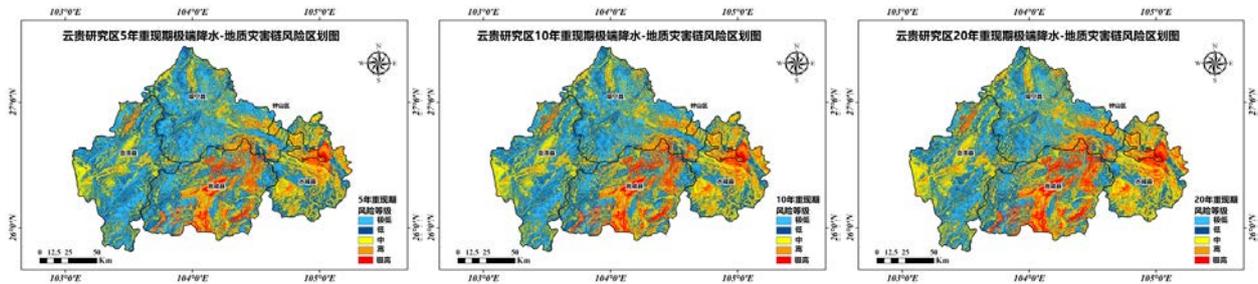


图8 不同降水重现期情景下的极端降水-地质灾害链风险区划图

4. 结论

本文根据自然灾害风险形成四要素学说,从极端降水-地质灾害链的危险性,承灾体的暴露性和脆弱性,以及防灾减灾能力四个方面选取指标,基于设定的不同极端降水重现期情景,构建了风险评估指标体系和评估模型,研制了风险评估技术体系,以极端降水-地质灾害链频发的云贵高原的为例,选取贵州省水城县、钟山区、威宁县,云南省的会泽县和宣威市作为研究区,开展极端降水-地质灾害链风险评估研究。结果表明:(1)高易发性区域主要集中在断层附近,计算结果与实际地质灾害发生规律基本一致。按各县市分析,高易发性区域主要集中在地势较高,并且有多处断层,山体岩石质地较为松散的水城县、钟山区以及宣威市北部和会泽县北部。(2)研究区内危险性的空间分布与易发性类似,极高危险性区域主要分布于水城县和宣威市南部,而危险性较小地区主要分布于研究区的北部和西南部。随着极端降水重现期的增加,高危险性等级的区域增加。(3)研究区承灾体的暴露性水平整体较低,钟山区有较大的暴露性,宣威市市区也存在极高暴露性,极低暴露性的绝大部分是山区林地,人口稀少且经济水平较低。(4)研究区承灾体的脆弱性水平也很低,高脆弱性和极高脆弱性地区主要分布在宣威市市区以及钟山区。(5)研究区的高速公路、国道以及县市城区道路防灾减灾能力较强,省道、乡道等公路次之,而非公路区域的防灾减灾能力整体较低。(6)不同极端降水重现期下的风险性空间尺度分布相差不大,研究区内大部分地区为极低和低风险地区,高风险区域主要集中在宣威市的中部和南部、水城县的东北部以及钟山区。随着极端降水量越大,相应的风险也就越高。本研究结果可为当地的应急部门通过确立不同雨情下的地质灾害风险等级,从而设定相应预警等级及其应急预案和应对措施提供科学依据。加强区域防灾减灾各项工作的实施,保障居民的生命财产安全。

致谢

本研究得到了国家重点研发计划项目(2018YFC1508804)的支持。

参考文献

- [1] Zhu A X, Miao Y M, Yang L, et al. Comparison of the presence-only method and presence-absence method in landslide susceptibility mapping[J]. CATENA. 2018, 171: 222-233.
- [2] Rong G Z, Li K W, Su Y L, et al. Comparison of Tree-Structured Parzen Estimator Optimization in Three Typical Neural Network Models for Landslide Susceptibility Assessment[J]. Remote Sensing. 2021, 13(22): 4694.

- [3] 张以晨, 张继权, 张峰. 极端降雨诱发地质灾害风险评价、预警及管理对策研究: 以吉林省东南部山区为例[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] 张继权, 冈田宪夫, 多多纳裕一. 综合自然灾害风险管理——全面整合的模式与中国的战略选择[J]. 自然灾害学报. 2006(01): 29-37.
- [5] 张继权, 荣广智, 李天涛, 等. 多致灾因子诱发地质灾害链综合风险评价技术[J]. 中国减灾. 2022(07): 23-26.
- [6] 史培军, 杨文涛. 山区孕灾环境下地震和极端天气气候对地质灾害的影响[J]. 气候变化研究进展. 2020, 16(04): 405-414.
- [7] 张继权, 郎秋玲, 荣广智. 多致灾因子诱发地质灾害链综合风险评价研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [8] 杨胜元, 张建江, 等. 贵州环境地质[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2008.
- [9] Rong G, Li K, Han L, et al. Hazard Mapping of the Rainfall-Landslides Disaster Chain Based on GeoDetector and Bayesian Network Models in Shuicheng County, China[J]. Water. 2020, 12(9): 2572.
- [10] Rong G, Alu S, Li K, et al. Rainfall Induced Landslide Susceptibility Mapping Based on Bayesian Optimized Random Forest and Gradient Boosting Decision Tree Models—A Case Study of Shuicheng County, China[J]. Water. 2020, 12(11): 3066.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

