

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.13

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害 风险区划方法探讨 ——以吉林省为例

张以晨^{1,2}, 郎秋玲², 陈亚南³, 张继权^{1,4}, 田书文²

(1. 长春工程学院吉林应急管理学院, 吉林 长春 130021; 2. 长春工程学院勘察与
测绘工程学院, 吉林 长春 130021; 3. 长春工程学院水利与环境工程学院,
吉林 长春 130021; 4. 东北师范大学环境学院, 吉林 长春 130117)

摘要: 地质灾害风险区划是地质灾害风险管理与防治的有效手段之一, 对于科学防治地质灾害具有重要意义。基于自然灾害风险理论, 从致灾因子危险性、承灾体暴露性和脆弱性以及防灾减灾能力(恢复力)等入手, 选取评价指标, 构建省级地质灾害风险评价模型, 对全省地质灾害进行风险区划。该模型在吉林省地质灾害风险区划中应用表明, 评价结果合理, 与野外调查情况吻合, 可以为规划和地质灾害防治等工作提供依据。

关键词: 自然灾害风险; 地质灾害; 风险评价; 吉林省

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0104-07

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

ZHANG Yichen^{1,2}, LANG Qiuling², CHEN Yanan³, ZHANG Jiquan^{1,4}, TIAN Shuwen²

(1. Changchun Institute of Technology, School of Jilin Emergency Management, Changchun, Jilin 130021, China;
2. Changchun Institute of Technology, School of Survey and Surveying Engineering, Changchun, Jilin 130021, China;
3. Changchun Institute of Technology, School of Water and Environmental Engineering, Changchun, Jilin 130021;
4. Northeast Normal University, School of Environment, Changchun, Jilin 130117, China)

Abstract: Geological disaster risk zoning is one of the effective methods of geological disaster risk management and prevention, and is of great significance for scientific prediction of geological disasters. Based on the natural disaster risk theory, starting with the hazards of disaster, the exposure and vulnerability of disaster-bearing bodies, and the ability to prevent and mitigate disasters (resilience), indicators were selected and a geological disaster risk evaluation model was constructed. The model was applied in disaster risk zoning of Jilin Province. The application of the model showed that the evaluation results were reasonable and consistent with the field survey, which can provide a basis for planning and geological disaster prevention.

Keywords: natural disaster risk; geological disaster; risk assessment; Jilin Province

地质灾害风险评价是国内外学者研究的重要热点问题。2019 年 11 月习近平总书记在中央政治局第十

九次集体学习时强调,要健全风险防范化解机制,坚持从源头上防范化解自然灾害风险。地质灾害风险评价

收稿日期: 2020-07-03; 修订日期: 2020-09-07

基金项目: 吉林省重点科技攻关(20170204035SF)

第一作者: 张以晨(1982-),男,山东单县人,博士后,教授,主要从事自然灾害防治、应急管理理论与方法等研究。E-mail:82708694@qq.com

通讯作者: 张继权(1965-),男,吉林九台人,博士后,教授,主要从事综合自然灾害风险理论与方法等研究。E-mail:zhangjq022@nenu.edu.cn

是地质灾害防治、汛期地质灾害预报预警以及国土空间规划编制的重要依据,对于提升风险早期识别能力,逐步实现灾害治理向风险治理转变具有重要意义。近年来,各省相继开展了 1:5 万地质灾害调查与区划综合研究工作,地质灾害风险评价是该项工作的重要内容,评价结论的合理与否,将直接关系到决策的合理性。本研究基于自然灾害风险理论,从致灾因子的危险性、承灾体的暴露性和脆弱性以及防灾减灾能力选取评价指标,构建地质灾害风险评价模型,对吉林省地质灾害进行风险区划。

1 自然灾害风险形成评价

自然灾害风险是指在未来若干年内可能达到的灾害程度及其发生的可能性^[1]。联合国在 20 世纪 90 年代公布了自然灾害风险的评估方法,并在 1999 年 7 月提出以“减轻灾害和危险”为主题的《国际减灾战略》(ISDR)倡议^[2-3]。目前,国际上公认的自然灾害风险形成理论是区域自然灾害风险,是由危险性、暴露性和脆弱性三个因素作用而形成^[4-6]。张继权等^[7-8]认为,区域自然灾害风险还与当地防灾减灾能力密切相关,防灾减灾能力也是制约和影响自然灾害风险的一个重要因素。因此自然灾害风险形成理论可以用式(1)进行表述(图 1)。

自然灾害风险度 = 危险性 × 暴露性 × 脆弱性 × 防灾减灾能力 (1)

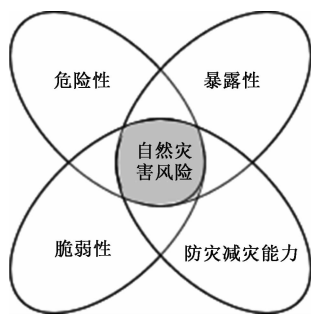


图 1 自然灾害风险形成理论示意图

Fig.1 Schematic diagram of natural disaster risk formation theory

灾害风险综合防范事关人民生命安全,事关经济社会和生态环境的可持续发展,开展自然灾害风险评价对防灾减灾和环境保护具有重要意义。

地质灾害风险评价是自然灾害风险研究的内容之一^[9],是对区域内发生不同强度的地质灾害的可能性以及对其造成损失进行定性和定量的分析过程^[10]。在地质灾害风险评价中,危险性是指地质灾害发生的空间概率、诱发因素的时间概率以及规模(强度)的函

数。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、人类生存生活条件以及生态环境等。脆弱性是指某一区域的承灾体由于潜在地质灾害危险因子而造成的伤害或损失程度。防灾减灾能力也称为恢复力,是人类社会为保障承灾体免受或者少受地质灾害威胁,所拥有的基础条件和专项防御地质灾害的能力,防灾减灾能力越强,可能遭受的损失越少,地质灾害风险越小^[11]。传统的风险评估的方法主要包括定性、定量和二者结合三大类,如层析分析法、信息量法、神经网络模型、模糊综合评判法、灰色聚类法、遗传算法和熵组合权重法等^[12]。进行地质灾害风险评价可以为风险管理奠定基础,是减轻和避免灾害的最简单有效的控制措施^[13]。

2 地质灾害风险评价模型构建

2.1 评价指标体系的构建

评价方法从灾害的机理出发,根据研究区的特定条件,借鉴已有的研究成果以及经验选取适当的指标,构建适合于研究区的综合评价指标体系,建立数学模型,从而判定区域的风险大小。

2.1.1 评价指标的选取

目前常用的指标选取的方法有频度统计法、专家调研法、理论分析法和公众参与法等。地质经验法作为最基本、最常用的指标因子筛选方法,是其他方法的基础。基于自然灾害风险形成理论,根据已有的经验,可以从危险性(H)、暴露性(E)、脆弱性(V)和防灾减灾能力(R)四个因子层选取评价指标,地质灾害风险评价指标体系如图 2 所示。

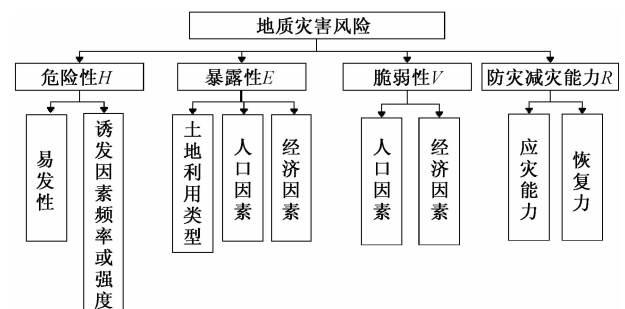


图 2 地质灾害风险评价指标体系图

Fig.2 Geological disaster risk assessment index system diagram

2.1.2 评价指标权重

指标权重的赋值对评价结果的准确性具有重要影响,不同的赋权方法会得到不同的权重值。目前常用的指标赋权的方法主要分为三类。第一类是主观赋权法,如层次分析法和德尔菲法等;第二类是客观赋权

法,如信息量法、熵值法、模糊综合评价法、证据权重法和灰色关联分析法等;第三类是主观-客观综合赋权法,如熵组合权重法等^[11-14]。

2.2 评价模型

2.2.1 地质灾害易发性评价模型

地质灾害易发性评价是对灾害发生的可能性进行预测,是地质灾害危险性评价的基础,早期主要为定性分析,随着科技的发展,评价方法逐步由定性分析转为定量分析^[15]。Logistic 回归模型具有计算方法简单有效、物理意义明确的特点,所以本文应用 Logistic 回归模型构建地质灾害易发性评价模型。应用 Logistic 回归模型来开展地质灾害易发性评价其实质就是寻找最优的拟合函数来量化描述地质灾害的发生和一组独立的参数如坡度、坡向、地质构造、地层岩性、水系等之间的关系^[15-16]。

如果某一事件或现象,其发生的可能性或概率设为 P ,取值范围为 $(0,1)$ 。当 P 的取值越接近于 0 或者 1 时, P 值的变化就很难捕捉,因此需要对 P 值进行变换。一般取 $P/(1-P)$ 的自然对数,即用 $\ln[P/(1-P)]$ 对 P 的变化进行量度,此时 $\text{Logit}P$ 变化范围就为 $(-\infty, +\infty)$ 。则有:

$$\text{Logit}P = 1/(1 + e^{-z}) \quad (2)$$

式中, $z = \alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n$,则:

$$P = 1/(1 + e^{-(\alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}) \quad (3)$$

式中: P ——事件的效用函数,表达为自变量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的线性组合;

β_n ——变量的估计参数,模型中 β_n 为逻辑回归系数;

α ——常数^[16-18]。

2.2.2 地质灾害危险性评价模型

地质灾害危险性是地质灾害风险评价的关键内容,它是在易发性评价的基础上增加地质灾害发生的时间概率或强度分析。因此,地质灾害危险性是地质灾害发生的空间概率、诱发因素的时间概率或规模、强度的函数^[18]。地质灾害危险性评价的主要内容包括:地质灾害发生的空间概率问题,即地质灾害易发性;地质灾害诱发因素发生的频率、概率或强度、规模问题。根据上述定义建立危险性评价模型。

$$H = S \times (D \times wd + T \times we + HA \times wh)$$

式中: H ——地质灾害危险性;

S ——地质灾害易发性;

D ——降雨指标;

T ——地震强度指标;

HA ——人类工程活动强度指标;

wd, we 和 wh ——分别为其权重系数。

2.2.3 地质灾害承灾体暴露性和脆弱性以及防灾减灾能力(恢复力)评价模型

地质灾害承灾体暴露性评价是对暴露于地质灾害下的价值进行评价;脆弱性评价是对暴露于地质灾害下的承灾体价值损失程度进行评价。防灾减灾能力是用于防治和减轻地质灾害的各种措施和对策,与地质灾害风险呈反相关^[19]。根据评价指标体系,采用综合加权评价法作为地质灾害暴露性和脆弱性以及防灾减灾能力评价模型。综合加权评价法在数理统计的基础上形成,主要是用一定的统计方法依照原始数据构造一个综合性指标。吉林省地质灾害承灾体暴露性和脆弱性以及防灾减灾能力(恢复力)评价模型见式(5)。

$$P = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (5)$$

式中: P ——评价对象所得的总分;

n ——评价指标个数;

W_i ——第 i 项指标的权重系数;

X_i ——第 i 项指标的量化值。

其中, $0 \leq X_i \leq 1, W_i \geq 0$ 。

2.2.4 地质灾害风险评价

利用自然灾害风险形成原理,综合考虑构成地质灾害风险四因子,以及选取的指标体系,利用综合加权评价法,建立如式(6)地质灾害风险指数模型。

$$GDR = (H) \times (E) \times (V) \times (1 - R) \quad (6)$$

式中: GDR ——地质灾害风险指数,其值越大代表地质灾害风险越大;

H, E, V, R ——分别表示地质灾害危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力因子指数。

3 研究实例-吉林省县(市)地质灾害风险评价与区划

3.1 研究区概况

吉林省地处中国东北地区中部。北邻黑龙江省,西与内蒙古自治区相连,西南接辽宁省,东部与俄罗斯接壤,东南隔图们江、鸭绿江与朝鲜相望。面积 187 400 km²,约占全国国土面积的 2%。全省年平均气温 2~6℃。地表水由河流、泡塘和湖泊、水库构成,具有一定规模的河流 2 093 条,河网密度 0.19 km/km²,河流分属松花江、辽河、图们江、鸭绿江、绥芬河五大水系。年降水量范围约为 300~1 000 mm,降水强度分布的总趋势是夏季大于其它季节。东南部大于西北部,连续或高强度、超高强度降水常导致崩塌、滑

坡、泥石流等地质灾害的发生。

3.2 评价指标的选取

基于自然灾害风险理论,根据已有的研究成果,使用地质经验法,从危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力四个因子层选取评价指标(表 1),并使用分位数法对分类指标进行量化与分级。

3.3 评价指标权重

用证据权重法计算危险性指标权重,研究区面积为 T ,灾害面积表示为 S 。则 $\bar{S}$ 为不存在灾害的面积, $T = S + \bar{S}$

$$W^+ = \ln \left[P \left\{ \frac{N_i}{S} \right\} / P \left\{ \frac{N_i}{T} \right\} \right] \quad (7)$$

$$W^- = \ln \left[P \left\{ \frac{\bar{N}_i}{\bar{S}} \right\} / P \left\{ \frac{\bar{N}_i}{T} \right\} \right] \quad (8)$$

$$W^{total} = W_i^+ + \left[\sum_{j=1}^n w_j^- \right] - w_i^- \quad (9)$$

$$C = W_i^+ + W_i^- \quad (10)$$

式中: $P \left\{ \frac{N_i}{S} \right\}$ 、 $P \left\{ \frac{\bar{N}_i}{\bar{S}} \right\}$ ——分别为在灾害区内存在与不存在条件因子 N_i 的概率;

$P \left\{ \frac{N_i}{T} \right\}$ 、 $P \left\{ \frac{\bar{N}_i}{T} \right\}$ ——分别为非灾害区内存在与不存在条件因子 N_i 的概率;

存在条件因子 N_i 的概率;

W_i^+ 、 W_i^- ——分别为 i -th 条件因子存在与不存在的权重;

$\sum_{j=1}^n w_j^-$ ——表示所有条件因子不存在的权重的集;

W^{total} ——表示在多个条件因子中 N_i 的总权重;

C ——表示条件因子与滑坡灾害的相关性。

使用熵值法计算暴露性、脆弱性和防灾减灾能力的指标权重值,设有 m 个对象, n 个评价指标,各个指标属性值为 b_{ij} ,对数据进行规范化处理,规范化的决策矩阵 $B = \{ b_{ij} \}_{m \times n}$ 令:

$$k_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^m b_{ij}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

则信息熵为:

$$h_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^m k_{ij} \ln k_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

第 j 项指标的权重为:

$$q_j = \frac{1 - h_j}{\sum_{j=1}^n (1 - h_j)}, j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

证据权重法与熵值法的权重计算结果见表 1 和表 2。

表 1 地质灾害危险性评价指标

Table 1 Geological disaster risk assessment indicators

因子层	子因子层	一级因素	次级因素	表征指标	权重系数			
地质灾害危险性评价指标	易发性指标	地形地貌	坡度	坡度因子	0.117			
			高程	高程因子	0.062			
			高度	地形起伏度因子	0.094			
			坡向	坡向因子	0.021			
			斜坡长度	坡长坡度因子	0.087			
			坡形	曲率	0.011			
			河网密度	地形湿度因子	0.087			
			地貌类型	地貌复杂度因子	0.101			
			植被覆盖	NDVI	-0.053			
				薄层状软弱花岗岩风化壳	0.002			
		块状-厚层状较坚硬火山碎屑岩组	0.004					
		块状坚硬花岗岩岩组	0.003					
		块状坚硬玄武岩岩组	0.004					
		块状坚硬以混合岩片麻岩为主岩组	0.006					
		块状较坚硬玄武岩岩组	0.002					
	地质环境	岩土体	岩土体类型	卵砾黄土类土	0.006			
				卵砾类土	0.007			
				砂类黄土类土	0.008			
				砂类土	0.009			
				黏性黄土类土	0.009			
				水文地质	地下水分布	0.079		
				断层	断层距离	0.101		
				地质灾害隐患点	灾害点密度	0.095		
				诱发因素指标	自然因素	降雨量	降雨等值线	0.081
					人为因素	人类活动	人类工程活动强度	0.057

表 2 地质灾害暴露性、脆弱性和防灾
减灾能力评价指标

Table 2 Evaluation indicators of geological disaster
exposure, vulnerability and disaster prevention
and mitigation capabilities

因子层	一级因素	次级因素	表征指标	权重系数
地质灾害 暴露性评 价指标	土地利用类型	农田	农田面积	0.041
		建筑	城镇建筑面积	0.012
			乡镇建筑面积	0.027
	道路		道路面积	0.007
	人口因素	人口分布	人口密度	0.055
地质灾害 脆弱性评 价指标	经济因素	人员财产分布	人员财产密度	0.039
		建筑物	建筑物类型	0.059
	经济因素	农田	耕地类型	0.016
		交通道路	道路类型	0.034
	人口因素	人口分布	人口密度	0.044
地质灾害 防灾减灾 能力评价 指标	应灾能力		地质灾害监测站	0.031 2
			地质灾害防护工程	0.017 4
			教育投入	0.008 1
			在校生人数	0.002 7
	恢复力		地质灾害防治 GDP 占比	0.016 6
			地方财政收入	0.009 2
			地质灾害防治相关人员	0.012 1
			灾后救援相关人员	0.021 9

3.4 评价结果

通过构建的地质灾害评价模型,计算吉林省全省范围内地质灾害易发性、危险性、暴露性、脆弱性、防灾减灾能力和综合评价结果(图 3 ~ 图 6)。

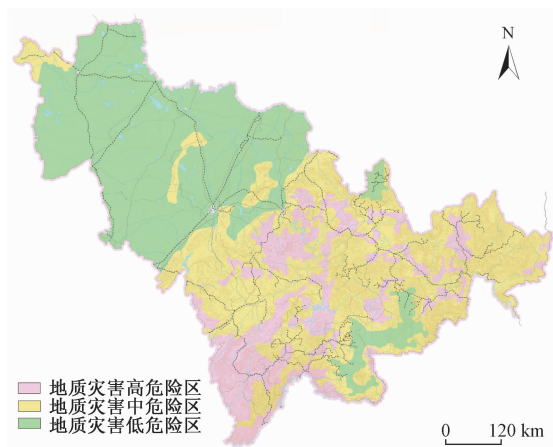


图 3 吉林省地质灾害危险性分区图
Fig.3 Geological hazard risk subarea map
of Jilin Province

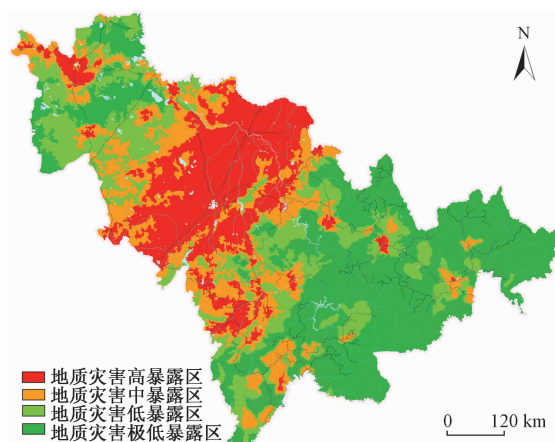


图 4 吉林省地质灾害承灾体暴露性分区图
Fig.4 Geological hazard bearing body exposure
Subarea map of Jilin Province

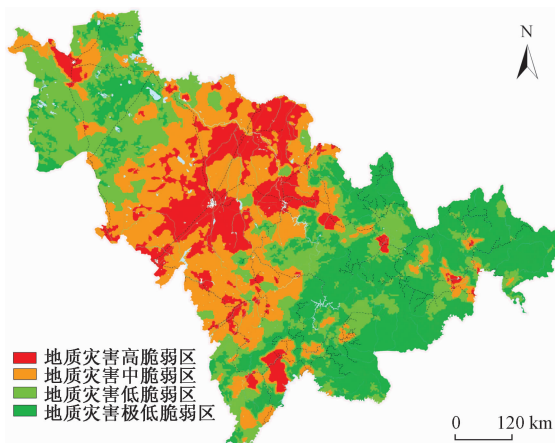


图 5 吉林省地质灾害承灾体脆弱性分区图
Fig.5 Vulnerability zoning map of geological
hazard bearing body in Jilin Province

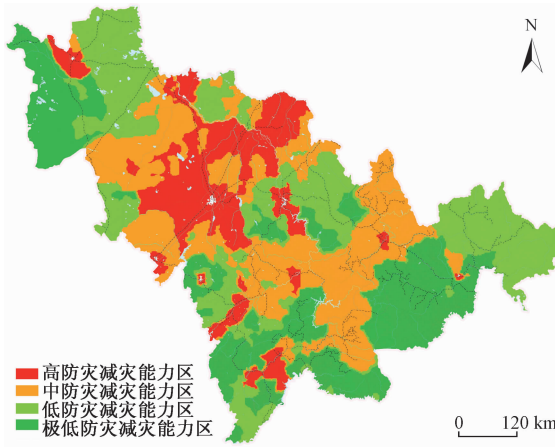


图 6 吉林省地质灾害防灾减灾能力分区图
Fig.6 Zoning map of the ability of disaster prevention and
mitigation capabilities geological disasters in Jilin Province

根据最优分割法确定阈值,得到吉林省地质灾害风险评价结果。遵循“区内相同,区际相异”原则,将风险评价结果连接成区呈现在图上,形成吉林省地质灾害风险分区图(图7)。野外调查发现,处于高风险的集安、通化县、临江等地地质灾害发育。划分结果与野外调查情况一致,划分结果科学合理。

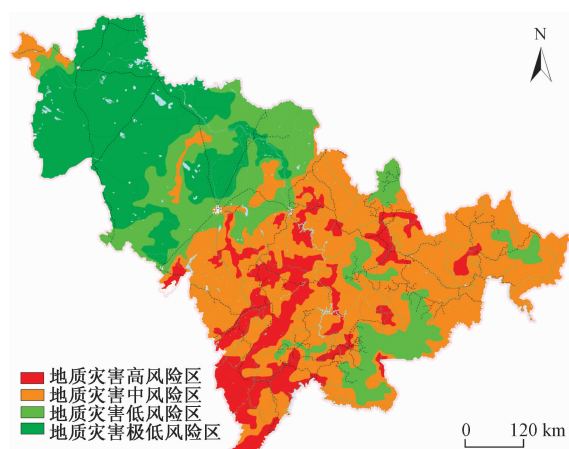


图7 吉林省地质灾害风险分区图

Fig.7 Geological disaster risk zoning map of Jilin Province

4 结论与展望

(1) 本文基于自然灾害风险形成理论,从致灾因子、孕灾环境和承灾体入手,考虑危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力,构建了地质灾害风险评价模型。将该模型用于吉林省地质灾害风险区划,评价结果是合理可行的,为省级地质灾害风险评价提供一个更为有效的途径。

(2) 该模型的应用具有一定的理论和现实意义,能够有效指导开展省级地质灾害风险管理。在此基础上,可以构建动态的地质灾害风险评价模型,结合气象资料,开展省级地质灾害风险预警。

参考文献:

- [1] 胡蓓蓓,姜衍祥,周俊,等. 天津市区及近郊区地面沉降灾害风险评估与区划[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(4): 28-34. [HU B B, JIANG Y X, ZHOU J, et al. Assessment and zonation of land subsidence disaster risk in urban and suburb of Tianjin[J]. China Population Resources and Environment, 2008, 18(4): 28-34. (in Chinese)]
- [2] 徐继维,张茂省,范文. 地质灾害风险评估综述[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 130-134. [XU J W, ZHANG M S, FAN W. An overview of geological

disaster risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 130-134. (in Chinese)]

- [3] 唐亚明,张茂省,李政国,等. 国内外地质灾害风险管理对比及评述[J]. 西北地质, 2015, 48(2): 238-246. [TANG Y M, ZHANG M S, LI Z G, et al. Review and comparison on inland and overseas geo-hazards risk management[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 238-246. (in Chinese)]
- [4] 魏良帅,陈国辉,王正平,等. 普光气田地面集输气管线地质灾害风险评价[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(8): 98-101. [WEI L S, CHEN G H, WANG Z P, et al. Geological disasters risk assessment of ground gathering and transportation gas pipeline in puguang gas field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(8): 98-101. (in Chinese)]
- [5] WARD P J, BLAUHUT V, BLOEMENDAAL N, et al. Review article: Natural hazard risk assessments at the global scale[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20(4): 1069-1096.
- [6] AROSIO M, MARTINA M L V, FIGUEIREDO R. The whole is greater than the sum of its parts: a holistic graph-based assessment approach for natural hazard risk of complex systems[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20(2): 521-547.
- [7] 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, 15(1): 29-37. [ZHANG J Q, OKADA N, TATANO H. Integrated natural disaster risk management: comprehensive and integrated model and Chinese strategy choice[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(1): 29-37. (in Chinese)]
- [8] 张继权,刘兴朋,严登华. 综合灾害风险管理导论[M]. 北京:北京大学出版社, 2012. [ZHANG J Q, LIU X P, YAN D H. Introduction of integrated disaster risk management [M]. Beijing: Peking University Press, 2012. (in Chinese)]
- [9] 徐兴华,唐小明,游省易,等. 东南沿海山区小流域突发地质灾害动态风险评价与应急预警[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 78-85. [XU X H, TANG X M, YOU S Y, et al. Dynamic risk assessment and emergency warning for sudden geological disasters in small watershed of southeastern coastal mountainous area[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4):

- 78-85. (in Chinese)]
- [10] 李泽威, 杨登银, 王明华, 等. 基于 GIS 的恩施市龙凤镇地质灾害风险评价[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(1): 113-118. [LI Z W, YANG D Y, WANG M H, et al. Risk assessment of geological hazards based on GIS in the Longfeng town of the Enshi City [J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(1): 113-118. (in Chinese)]
- [11] 张以晨. 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. [ZHANG Y C. Research on risk assessment, early warning and management countermeasures of rainfall-induced geological disasters: Taking the mountainous areas in southeast Jilin Province as an example[M]. Beijing: Science Press 2017. (in Chinese)]
- [12] 郎秋玲, 张以晨, 张继权, 等. 基于组合赋权理论的泥石流孕灾因子分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 68-72. [LANG Q L, ZHANG Y C, ZHANG J Q, et al. Analysis of debris flow hazard factors based on combination weighting theory [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 68-72. (in Chinese)]
- [13] 张茂省, 薛强, 贾俊, 等. 山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 125-135. [ZHANG M S, XUE Q, JIA J, et al. Methods and practices for the investigation and risk assessment of geo-hazards in mountainous towns[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 125-135. (in Chinese)]
- [14] 王世金, 汪宙峰. 冰湖溃决灾害综合风险评估与管控——以中国喜马拉雅山区为例[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2017. [WANG S J, WANG Z F. Comprehensive risk assessment and management of glacial lake outburst disasters: Taking the Himalayas in China as an example[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2017. (in Chinese)]
- [15] 鲁霞, 兰安军, 母浩江, 等. 基于信息量模型的盘州市地质灾害易发性评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5544-5551. [LU X, LAN A J, MU H J, et al. Geological hazard risk assessment based on information quantity model in Panzhou City [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5544-5551. (in Chinese)]
- [16] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347. [FAN Z Y, GOU X F, QIN M Y, et al. Information and Logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 340-347. (in Chinese)]
- [17] 王昌明, 黄健, 李桥, 等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的山西吕梁市地质灾害易发性评价研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 132-138. [WANG C M, HUANG J, LI Q, et al. Evaluation of geological hazard vulnerability in Lyuliang City in Shanxi Province based on coupling of information content model and Logistic regression model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(3): 132-138. (in Chinese)]
- [18] 覃乙根, 杨根兰, 江兴元, 等. 基于确定性系数模型与逻辑回归模型耦合的地质灾害易发性评价——以贵州省开阳县为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(1): 96-103. [QIN Y G, YANG G L, JIANG X Y, et al. Geohazard susceptibility assessment based on integrated certainty factor model and logistic regression model for Kaiyang, China [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(1): 96-103. (in Chinese)]
- [19] 陈其针, 仲平, 张贤, 等. 构建中国自然灾害防灾减灾新体系[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 1-4. [CHEN Q Z, ZHONG P, ZHANG X, et al. Establishment of an innovative system of natural disaster prevention and mitigation in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 1-4. (in Chinese)]