

王佳运, 石小亚, 罗金, 等. 黄土高原山区城镇边坡地质灾害风险分级系统——以吉县吉昌镇为例[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 122–127. [WANG Jiayun, SHI Xiaoya, LUO Jin, et al. Risk Classification System of Slope Geo-hazards of Mountainous Town in Loess Plateau: Taking Jichang Town of Jixian County for Example[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 122–127. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.023.]

# 黄土高原山区城镇边坡地质灾害风险分级系统<sup>\*</sup>

## ——以吉县吉昌镇为例

王佳运<sup>1</sup>, 石小亚<sup>1</sup>, 罗金<sup>2</sup>, 冯卫<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 随着山区城镇建设规模的扩张, 城镇边坡风险评价与分级成为亟需开展的一项研究工作, 同时, 对于山区城镇土地利用规划、地质灾害防治决策等具有重要现实指导意义。该文以吉县吉昌镇为例, 在前人研究的基础上, 开展黄土高原城镇边坡地质灾害风险分级系统研究, 通过完善、优化城镇边坡危险性评价指标, 采用数理统计学方法重新厘定城镇边坡危险性与危害性的评分分级标准, 进而依据建立的城镇边坡地质灾害风险分级矩阵表确定边坡的风险级别, 探索建立黄土高原山区城镇边坡地质灾害风险分级系统, 为山区城镇土地利用规划、建设以及地质灾害风险防控提供技术支撑。

**关键词:** 山区城镇; 城镇地质灾害; 分级系统; 风险级别; 分级标准

**中图分类号:** P694; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)01-0122-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.023

随着山区城镇化建设的加快, 特别是山区城镇建设规模的扩张, 由于受到发展空间狭小、城镇建设用地紧缺的限制, “向山发展、向沟发展”成为山区城镇化发展的必然趋势, 削山造地、开挖坡脚势必诱发大量地质灾害<sup>[1]</sup>, 继而阻碍山区城镇化建设与发展。因此, 山区城镇边坡风险评价与分级成为亟需开展的一项研究工作, 同时, 对于山区城镇土地利用规划、地质灾害防治决策等具有重要现实指导意义。边坡风险分级是基于自然边坡单元的危险性与危害性多个评价指标的综合性风险评价, 不同于基于GIS分析的区域性地质灾害风险评价, 亦区别于基于稳定性与失稳概率随机分析的单体地质灾害的风险评价。边坡分级系统的概念最早由PIERSON等人<sup>[2]</sup>于1990年提出, 通过地形等地质条件、危岩体规模、灾害历史以及降雨等气象条件作为评价因子, 开展公路边坡落石风险评估。在此基础上, STOVER等<sup>[3]</sup>建立了公路边坡岩崩识别与分级系统; HUNGR等<sup>[4]</sup>、VANDEWATER等<sup>[5]</sup>基于公路、铁路特点改进了边坡分级系统; MICHAEL Molk等<sup>[6]</sup>基于土地利用规划的边坡地段开展了岩崩风险评分分级研究。相对于以上基于公路、铁路等线状工程开展的边坡分级系统较为成熟的研究, 基于城镇的边坡分级系统研究则相对较少。香港于1979年采用

权重打分方法建立了定性的土质边坡分级系统; 又于20世纪90年代中期, 建立了定量的边坡风险分级系统<sup>[7]</sup>。唐亚明等<sup>[8]</sup>在国外线状工程的岩质边坡分级系统与香港土质边坡分级系统的基础上, 以延安市某个黄土沟壑区为对象, 建立了基于层次分析法的半定量的黄土边坡风险分级系统。以上研究使得边坡分级系统向山区城镇边坡风险分级系统迈进了重要一步, 但是作为山区城镇边坡地质灾害风险分级系统, 其评价指标需要进一步完善、优化, 危险性与危害性的分级标准需要进一步厘定。本文以山西吉县城区为例, 开展黄土高原城镇边坡地质灾害风险分级系统研究, 完善、优化危险性评价指标, 厘定边坡危险性、危害性评分分级标准, 探索建立黄土高原山区城镇边坡地质灾害风险分级系统, 为山区城镇土地利用规划、建设以及地质灾害风险防控提供技术支撑。

## 1 风险分级系统设计

### 1.1 评分指标的确定

边坡风险分级是在边坡的危险性分级、危害性分级的基础上进行的, 因此, 边坡风险分级系

\* 收稿日期: 2020-05-18 修回日期: 2020-07-10

基金项目: 中国地质调查局项目“南疆兵团师市规划建设区资源环境综合地质调查”(DD20201119); 中国地质调查局项目“吕梁山区城镇地质灾害调查”(DD20160276)

第一作者简介: 王佳运(1978-), 男, 蒙古族, 河南镇平人, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查与风险评价研究。

E-mail: wjy311\_2000@sohu.com

统的评分指标体系分为两部分, 即危险性评分指标与危害性评分指标。在借鉴前人研究<sup>[8-9]</sup>的基础上, 在山区城镇地貌单元、地质构造、降雨条件等具有共性的地质背景条件下, 危险性评分指标重点考虑黄土高原山区城镇边坡的个体特征、灾害的主要破坏类型及主控影响因素等, 具体涉及边坡地形特征、斜坡结构类型、土体特性、岩体特性、地表水、地下水、人类工程活动、失稳证据以及潜在地质灾害的类型及强度等 9 项 21 个指标。边坡的危害性评分指标则主要考虑山区城镇受地质灾害威胁的承灾体的价值以及其易损性, 具体涉及固定人员、交通人员、建筑、线路设施、其他以及易损性等 6 项 15 个指标。需要说明的是, 评分指标依据不同山区城镇的地质灾害类型、特征、发育地质条件、承灾体类型等, 应选择不同的评分指标组合, 使得山区城镇边坡风险分级系统的评价结果更符合实际。

## 1.2 评分指标权重的确定

评价指标的权重直接影响评分结果的准确性与合理性。有关权重的确定方法有定性的方法, 也有定量的方法。在地质灾害评价中指标权重确定的方法有熵权法<sup>[10]</sup>、模糊数学法<sup>[11-12]</sup>、层次分析法<sup>[13-15]</sup>等。层次分析法是基于数学方法将评价对象按照主次或支配关系建立递阶层次结构, 并依据对上一层次评价对象的重要性进行评价因子的比较, 并据此进行权重的计算, 具有定性的经验判断结合定量计算综合考虑的优点<sup>[13,16]</sup>。因此, 层次分析法在地质灾害评价中具有广泛的应用。

### 1.2.1 层次分析模型的建立

危险性层次分析模型根据其评价指标及其结构关系, 分为 3 个层次(图 1), 即, 危险性(H)为第一层次, 第二层次包括边坡地形特征、斜坡结构类型、土体特性、基岩特性等 9 项, 指标设为  $H_i^2 (i=1, 2, \dots, 9)$ , 相对于第一层危险性的权重设为  $W^2 H_i$ ; 第三层次包括坡高、坡度、坡型、岩性组合等 21 个指标, 设为  $H_i^3 (i=1, 2, \dots, 21)$ , 其相对于第二层的权重设为  $W^3 H_i$ 。

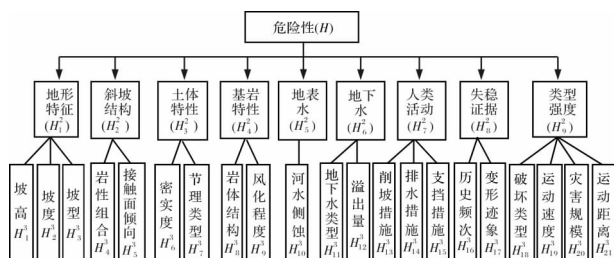


图 1 城镇边坡危险性层次分析模型图

危害性层次分析模型同样分为 3 个层次(图 2), 危害性(C)为第一层次, 权重为 1.0; 第二层次包括固定人员、交通人员、建筑设施、线路设施、其他承灾体、以及易损性等 6 项, 指标设为  $C_i^2 (i=1, 2, \dots, 6)$ , 权重设为  $W^2 C_i (i=1, 2, \dots, 6)$ ; 第三层次包括住宅人员、办公室生产人员、乘客流量、行人流量等 15 个指标, 设为  $C_i^3 (i=1, 2, \dots, 15)$ 。

$=1, 2, \dots, 15)$ , 权重设为  $W^3 C_i (i=1, 2, \dots, 15)$ 。

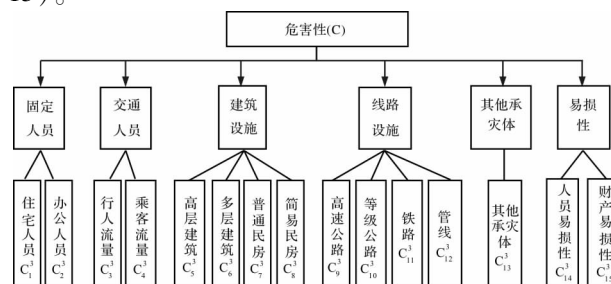


图 2 危害性层次分析模型图

### 1.2.2 评价指标权重的计算

依据危险性层次分析模型, 首先对第二层指标进行两两比较, 基于其对危险性的相对重要性, 构造判断矩阵  $P^2$ , 求解特征向量并归一化, 得到地形特征、斜坡结构、土体特性等的权重  $W^2 H_i (0.103, 0.045, 0.097, 0.113, 0.060, 0.060, 0.103, 0.193, 0.226)$ , 如表 1 所示。在此基础上, 对第三层指标相对于第二层指标进行两两对比并构造判断矩阵。地形特征下设 3 个指标, 构造判断矩阵  $P_1^3$  如表 2 所示, 求解特征向量并归一化, 得到坡高、坡度、坡型的权重  $W^3 H_{1-3} (0.273, 0.545, 0.182)$ 。基于该方法, 可得到第三层指标基于第二层地形特征、斜坡结构等各项指标的权重  $W^3 H_i (0.273, 0.545, 0.182; 0.333, 0.667; 0.250, 0.750; 0.250, 0.750; 1.0; 0.333, 0.667; 0.545, 0.273, 0.182; 0.333, 0.667; 0.112, 0.222, 0.444, 0.222)$ 。

表 1 判断矩阵  $P^2 (H \rightarrow H_{1-9}^2)$  与评价指标权重

H	H <sub>1</sub> <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> <sup>2</sup>	H <sub>3</sub> <sup>2</sup>	H <sub>4</sub> <sup>2</sup>	H <sub>5</sub> <sup>2</sup>	H <sub>6</sub> <sup>2</sup>	H <sub>7</sub> <sup>2</sup>	H <sub>8</sub> <sup>2</sup>	H <sub>9</sub> <sup>2</sup>	W <sup>2</sup> H <sub>i</sub>
H <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	2	1	1	2	2	1	1/2	1/2	0.103
H <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/4	1/4	0.045
H <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	2	1	1/2	2	2	1	1/2	1/2	0.097
H <sub>4</sub> <sup>2</sup>	1	2	2	1	2	2	1	1/2	1/2	0.113
H <sub>5</sub> <sup>2</sup>	1/2	2	1	1/2	1	1	1/2	1/4	1/4	0.060
H <sub>6</sub> <sup>2</sup>	1/2	2	1	1/2	1	1	1/2	1/4	1/4	0.060
H <sub>7</sub> <sup>2</sup>	1	2	1	1	2	2	1	1/2	1/2	0.103
H <sub>8</sub> <sup>2</sup>	2	4	2	2	4	4	2	1	1/2	0.193
H <sub>9</sub> <sup>2</sup>	2	4	2	2	4	4	2	2	1	0.226

表 2 判断矩阵  $P_1^3 (H_1^2 \rightarrow H_{1-3}^3)$  与评价指标权重

H	H <sub>1</sub> <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> <sup>3</sup>	H <sub>3</sub> <sup>3</sup>	W <sup>3</sup> H <sub>i</sub>
H <sub>1</sub> <sup>3</sup>	1	1/2	3/2	0.273
H <sub>2</sub> <sup>3</sup>	2	1	3	0.545
H <sub>3</sub> <sup>3</sup>	2/3	1/3	1	0.182

指标权重的合理性需要通过判断矩阵  $P_i$  进行一致性检验<sup>[13]</sup>, 一致性指标计算公式<sup>[16]</sup>为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式中:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(PW)_i}{W_i} \quad (2)$$

一致性检验判定公式为:



表 4 城镇边坡风险分级危险性评分表

指标类别	评价指标	权重	评分标准				
			1 分	3 分	5 分	7 分	10 分
边坡地形特征	坡高/m	0.03	<10	$10 \leq h < 20$	$20 \leq h < 30$	$30 \leq h < 50$	$\geq 50$
	坡度/(°)	0.06	<25	$25 \leq \alpha < 30$	$30 \leq \alpha < 45$	$45 \leq \alpha < 60$	$\geq 60$
	坡型	0.02	凹-阶型	阶梯型	凹型	直线型	凸型
边坡结构类型	岩性组合	0.01	基岩型	黄土+基岩型	黄土型	黄土+冲洪积层型	黄土+红粘土型
	接触面倾向	0.03	反向坡	横向坡	斜倾坡	顺向坡-大于坡角	顺向坡-缓于坡角
土体特征	密实度	0.02	粘土	粉质粘土	粉土	素填土	碎石土
	节理类型	0.07	无节理	垂直节理	构造节理	风化节理	卸荷节理
基岩特征	岩体结构类型	0.03	完整结构	断续结构	板裂结构、块裂结构	碎裂结构	散体结构
	风化程度	0.08	未风化	微风化	弱风化	强风化	全风化
地表水	河水侧蚀	0.06	无影响	微弱	弱	较强烈	强烈
地下水	地下水类型	0.02	无地下水	基岩裂隙水	黄土孔隙上层滞水	黄土+基岩裂隙孔隙水	黄土孔隙水
	溢出量	0.04	无溢出	流量微弱	流量小	流量较大	流量大
人类工程活动	削坡措施	0.06	完全合理	合理	基本合理	合理性差	不合理
	排水措施	0.03	完全专业	专业	基本专业	简易	无排水
	支挡措施	0.02	完全专业	专业	基本专业	简易	无支挡
失稳证据	历史发生频次	0.06	无	很少发生	有发生	较经常	经常发生
	现今变形迹象	0.13	无	不明显	较明显	明显	出现破坏
潜在灾害类型与强度	破坏类型	0.03	剥落	坠石或塌土	倾倒崩塌	滑塌	滑动
	运动速度	0.05	很慢	慢速	中速	快速	极快
	灾害规模	0.10	$V \leq 10 \text{ m}^3$	$10 < V \leq 100 \text{ m}^3$	$100 < V \leq 10^3 \text{ m}^3$	$10^3 \text{ m}^3 < V \leq 10^4 \text{ m}^3$	$V > 10^4 \text{ m}^3$
	运动距离	0.05	无影响	延伸角外	延伸角内	塌落角与延伸角相邻区	塌落角内

表 5 城镇边坡风险分级危害性评分表

指标类别	评价指标	权重	评分标准				
			1 分	3 分	5 分	7 分	10 分
固定人员	住宅人员	0.128	1~5 人	6~10 人	11~50 人	51~100 人	>100 人
	办公生产人员	0.256	1~10 人	50~11 人	51~100 人	101~200 人	大于 200 人
交通人员	行人流量	0.074	$\leq 1 \text{ 人/min}$	$2 \sim 5 \text{ 人/min}$	$6 \sim 10 \text{ 人/min}$	$10 \sim 15 \text{ 人/min}$	$> 15 \text{ 人/min}$
	乘客流量	0.074	$\leq 1 \text{ 辆/min}$	$2 \sim 5 \text{ 辆/min}$	$6 \sim 10 \text{ 辆/min}$	$10 \sim 15 \text{ 辆/min}$	$> 15 \text{ 辆/min}$
建筑设施	高层	0.025	1~2 栋	3~5 栋	6~8 栋	9~10 栋	>10 栋
	多层	0.012	1~2 栋	3~5 栋	6~8 栋	9~10 栋	>10 栋
	普通民房、砖窑	0.005	1~2 户	3~5 户	6~10 户	11~20 户	>20 户
	简易民房、土窑	0.002	1~2 户	3~5 户	6~10 户	11~20 户	>20 户
线路设施	高速公路	0.039	0~10 m	11~20 m	21~50 m	51~100 m	>100 m
	等级公路	0.008	0~10 m	11~20 m	21~50 m	51~100 m	>100 m
	铁路	0.023	0~10 m	11~20 m	21~50 m	51~100 m	>100 m
	管线	0.013	0~10 m	11~20 m	21~50 m	51~100 m	>100 m
其他承灾体(万元)		0.030	$\leq 50$	50~100	100~300	300~500	>500
易损性	人员	0.206	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
	财产	0.103	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

表 6 城镇边坡风险矩阵分级表

危害性 (Consequence)	危险性(Hazard)			
	高危险	中危险	低危险	很低危险
高危害	高风险(H级)	高风险(H级)	中风险(M级)	低风险(L级)
中危害	高风险(H级)	中风险(M级)	中风险(M级)	低风险(L级)
低危害	中风险(M级)	中风险(M级)	低风险(L级)	很低风险(HL级)
很低危害	低风险(L级)	低风险(L级)	很低风险(HL级)	很低风险(HL级)

表 7 吉县吉昌镇边坡风险矩阵分级表

危害性 (Consequence)	危险性(Hazard)			
	高危险 ( $6.04 \leq H \leq 10$ )	中危险 ( $4.49 \leq H < 6.04$ )	低危险 ( $3.38 \leq H < 4.49$ )	很低危险 ( $H < 3.38$ )
高危害 ( $2.284 \leq C \leq 10$ )	高风险(H级)	高风险(H级)	中风险(M级)	低风险(L级)
中危害 ( $1.109 \leq C < 2.284$ )	高风险(H级)	中风险(M级)	中风险(M级)	低风险(L级)
低危害 ( $0.954 \leq C < 1.109$ )	中风险(M级)	中风险(M级)	低风险(L级)	很低风险(HL级)
很低危害 ( $C < 0.954$ )	低风险(L级)	低风险(L级)	很低风险(HL级)	很低风险(HL级)

### 2.3 边坡单元风险级别的确定

边坡单元的风险级别确定应依据边坡单元的危险性级别与危害性级别建立风险矩阵表,从而判定边坡单元的风险级别,因此,首先应建立边坡单元的危险性级别与危害性级别判定标准。唐亚明等人<sup>[8]</sup>以单元数分别占到 25%、50%、75%、100% 的得分点作为边坡单元危险性、危害性级别的划分标准;易靖松等人<sup>[9]</sup>则是依据边坡单元得分的自然间断法划分危险性、危害性分级标准,以上方法在为边坡单元危险性、危害性的划分标准提供了依据,但划分依据并不充分或具有随意性。本文则采用数理统计学方法对边坡单元的危险性与危害性评分分别按照增序进行统计排序,依据统计趋势线的自然拐点所对应的得分作为划分危险性、危害性级别的标准,划分为高、中、低、很低等 4 个等级,并建立城镇边坡单元风险分级矩阵(表 6)。

## 3 风险分级系统应用实例

城镇边坡风险分级系统的建立不仅为山区城镇边坡地质灾害风险评价提供了技术支撑,同时,为山区城镇地质灾害风险防控以及土地利用规划提供了技术依据。结合国家公益性基础性地质调查项目,在山西省吉县吉昌镇(县城城区)开展了城镇边坡地质灾害风险调查与评价研究工作,对城镇边坡地质灾害风险分级系统进行了应用。

### 3.1 研究区概况

研究区位于晋西黄土高原南部的吉县中部地区,属于黄土残塬边河谷地貌,清水河呈北东南西向穿越城区,受沟壑纵横发育影响,地形比较破碎。斜坡上部地层主体为第四系更新世黄土,除全新统地层在河谷区分布较广以外,其他基岩地层以及新近系地层仅在清水河以及支沟有零星出露,吉县城区边坡结构类型主要分为黄土型斜坡与黄土+基岩型斜坡两种类型。由于城区人口密集,人类工程活动比较强烈,尤其以沟内切坡、开挖建房以及斜坡坡脚沿河谷一线切坡修路等活

动为甚,城区边坡地质灾害比较发育。

### 3.2 研究区边坡风险评价

边坡单元的划分依据水文学方法并基于 DEM 实现自动划分,在此基础上,依据斜坡的自然形态,即,坡顶以斜坡顶部的山脊线或坡折线为界、以冲沟或山梁作为斜坡单元的两侧天然分界线,结合斜坡的结构类型、坡向等因素对计算机自动划分的单元进行修正、合并,将城区划分为相对独立、合理、完整的边坡单元。吉县城区面积约 18.3 km<sup>2</sup>,基于 1:1 万 DEM 数据,将城区边坡划分为 155 个边坡单元。

根据划分的边坡单元,对城区边坡逐一进行地质灾害风险调查,并采用城镇边坡地质灾害风险分级表进行打分,分别得到边坡单元的危险性评分与危害性评分,进行统计、按照增序进行排序。根据危险性评分分布的趋势线自然拐点,结合实地对调查的隐患边坡的危险性与危害性核查,确定危险性、危害性的分级标准与级别,并建立边坡风险矩阵分级表(表 7)。依据吉县城区边坡风险矩阵分级表,得到吉县城区边坡的风险:高风险边坡 25 处,中风险边坡 90 处,低风险 30 处,风险很低 10 处(图 3)。经过地质灾害风险核查,风险评价结果符合吉县城区边坡地质灾害的实际情况。

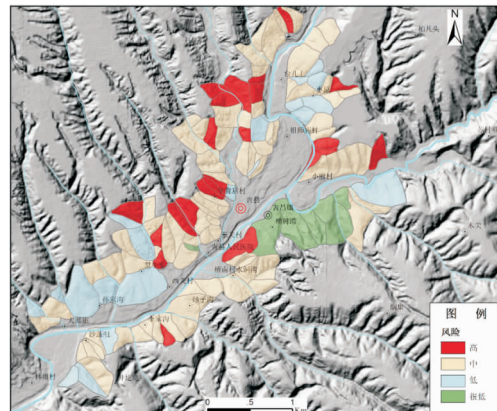


图 3 吉昌镇边坡风险分布图

## 4 结论

(1) 城镇边坡地质灾害风险分级系统包括危险性与危害性两个部分, 危险性指标包括边坡地形特征(坡高、坡度、坡型)、斜坡结构类型(岩性组合、接触面倾向)、潜在灾害类型及强度(破坏类型、运动速度、灾害规模、运动距离)等 9 项 21 个指标; 危害性指标包括固定人员(住宅人员、办公生产人员)、交通人员(行人流量、乘客流量)、易损性(人员、财产)等 6 项 15 个指标。

(2) 根据层次分析法合成权重计算结果, 危险性 9 项 21 个指标的权重  $W_{Hi}^3 = (0.273, 0.545, 0.182; 0.333, 0.667; 0.250, 0.750; 0.250, 0.750; 1.0; 0.333, 0.667; 0.545, 0.273, 0.182; 0.333, 0.667; 0.112, 0.222, 0.444, 0.222)$ ; 危害性 6 项 15 个指标权重为  $W_{Ci}^3 = (0.128, 0.256; 0.074, 0.074; 0.025, 0.012, 0.005, 0.002; 0.039, 0.008, 0.023, 0.013; 0.03; 0.206, 0.103)$ 。

(3) 采用数理统计学方法并依据统计趋势线的自然拐点所对应的得分作为边坡危险性与危害性划分级别的标准是合理的, 同时, 依据建立的城镇边坡风险矩阵分级表得到的吉昌镇边坡风险评价结果与实际情况是相符合的, 说明建立的城镇边坡地质灾害风险分级系统是合理的、可行的。

致谢: 感谢李彦娥、马红娜、冯凡等在吉县城镇斜坡地质灾害调查与风险评价野外工作中对于本文的贡献。

## 参考文献:

[1] 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.
- [2] PIERSON L A, VICKLE R V. Rock-fall hazard rating system participants' manual [J]. U. S. Department of Transportation, Publication No. FHWA SA-93-057, 1993, 11: 1-99.
- [3] STOVER B K. HIGHWAY Rock-Fall. Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources[J]. Special Publication, 1992, 37: 27-27.
- [4] HUNGR O, FLETCHER L, JAKOB M, et al. A system of Rock Fall and Rock Slide Hazard Rating for A Railway-Geo-Hazard 2003 Edmonton[M]. Alberta, Canada, 2003: 277-283.
- [5] VANDEWATER C J, DUNNE W M. Classifying and assessing the geologic contribution to rock fall hazard[J]. Environmental & Engineering Geo-science, 2005, 11(2): 141-154.
- [6] MICHAEL Mölk, RAINER POISEL, JULIA Weilhold, et al. Rock fall rating systems: is there a comprehensive method for hazard zoning in populated areas? [J]. Interpraevent 2008-Conference Proceedings, 2008, 2: 207-218.
- [7] WONG H N. Landslide risk assessment for individual facilities [C]//In Hunger O, Fell R, Couture R, Eberhardt E. (eds.) Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, London: Taylor and Francis, 2005: 237-296.
- [8] 唐亚明, 薛强, 李清, 等. 黄土滑坡灾害风险分级系统研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 378-386.
- [9] 易靖松, 张勇, 石胜伟, 等. 基于斜坡单元的山区城镇地质灾害风险快速评价研究——以江口镇为例[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(8): 78-72.
- [10] 王佳运, 何红前. 基于熵权法滑坡稳定性模糊综合评判[J]. 工程地质学报, 2007, 15(S1): 129-132.
- [11] 王秀英, 聂高众, 王松. 利用模糊数学方法建立汶川地震滑坡灾害评判标准[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 403-410.
- [12] 吴云, 张锐, 乐琪浪, 等. 基于模糊数学和 Geo-Studio 的滑坡稳定性综合评价[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(23): 168-173.
- [13] 唐亚明, 程秀娟, 薛强, 等. 基于层次分析法的黄土滑坡风险评价指标权重分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(4): 40-46.
- [14] 邱曼, 魏云杰. 基于层次分析法的叶城二牧场地质灾害危险性评价[J]. 防灾减灾学报, 2019, 35(3): 9-14.
- [15] 张征. 环境评价学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [16] 许树柏. 实用决策方法——层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [17] 吴博, 赵法锁, 吴韶艳. 基于组合赋权-功效系数法的黄土边坡稳定性评价[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 34-38.

# Risk Classification System of Slope Geo-hazards of Mountainous Town in Loess Plateau: Taking Jichang Town of Jixian County for Example

WANG Jiayun<sup>1</sup>, SHI Xiaoya<sup>1</sup>, LUO Jin<sup>2</sup> and FENG Wei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, China; 2. Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** With expansion of mountainous urbanization construction, study on risk assessment and classification of town slopes has to be carried on, which has important guiding significance for land-use planning, prevention and control of geo-hazards in mountainous towns. Based on the previous studies, study on risk classification system of town slopes geo-hazards in loess plateau has been carried out. In this article, the assessment factors of slope hazard has been improved and optimized, and the classification standard of the hazard and consequence of town slope geo-hazards has been determined afresh, and then risk level of town slopes has been obtained according to the established risk classification matrix of town slopes geo-hazards. eventually, risk classification system of slopes geo-hazards of mountainous towns in loess plateau has been set up, which provides land-use planning and construction, risk prevention and control of geo-hazards in mountainous towns.

**Key words:** mountainous town; geo-hazard in town; classification system; risk level; classification standard