

山西吕梁山区城镇边坡风险分级与优化

王佳运¹, 毕俊攀¹, 杨旭东², 李彦娥¹, 马红娜¹, 罗金³

WANG Jiayun¹, BI Junbo¹, YANG Xudong², LI Yan'e¹, MA Hongna¹, LUO Jin³

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. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

3. 长安大学, 陕西 西安 710054

1. Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

3. Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要: 因地质环境容量有限, 吕梁山区城镇化建设的快速发展导致边坡地质灾害隐患日益突出, 严重阻碍了吕梁山区城镇化建设的持续发展。解决城镇边坡安全的首要问题是城镇边坡风险分级, 即确定边坡的风险, 在此基础上采取相应的边坡地质灾害风险防控措施。以吕梁山区吉县城区为例, 在风险分级系统评分指标优化、风险调查与评分的基础上, 基于数理统计学理论, 依据统计趋势线的自然拐点法对边坡的危险性与危害性分级标准进行了改进与厘定, 并划分为高、中、低、很低4个等级, 建立了吉县城区边坡风险分级表。依据吉县城区边坡风险分级表, 结合边坡的危险性与危害性级别, 判定吉县城区高风险边坡22处, 中风险84处, 低风险21处, 风险很低8处。吉县城镇边坡风险分级方法与技术的探索研究, 可为吕梁山区城镇边坡地质灾害风险分级与防控、土地利用规划及城镇化建设发展提供技术支撑。

关键词: 吕梁山区; 城镇边坡地质灾害; 风险分级; 山西

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)12-2004-09

Wang J Y, Bi J B, Yang X D, Li Y E, Ma H N, Luo J. Risk classification and optimization of town side slope in Lüliang Mountain. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 2004-2012

Abstract: The rapid development of urbanization in Lüliang Mountain brings about serious problems of latent geohazards with limit geological environmental capacity, which seriously hinders the sustainable development of urbanization in Lüliang Mountain. The risk classification is the first question to be solved with respect to safety of town side slopes, and then the risk prevention and control of geohazards of slopes could be carried out. Taking the urban area of Jixian County in Lüliang Mountain as a study case and based on the optimization of evaluation factors of risk classification system, risk investigation and grading of slopes in the urban area of Jixian County, the authors improved and determined grade standards of slope hazard and consequence with natural inflection point method mathematical statistics theory, and distinguished four grades, i.e., high level, middle level, low level and very low level. According to the grade standards, the risk classification standard of slopes in the urban area of Jixian County was set up, and then the risk level of slopes was judged, which included 22 high risk slopes, 84 middle risk slopes, 21 low risk slopes and 8 very low risk slopes. The method of risk classification of slopes in the urban area of Jixian County can provide risk prevention and control of geohazards of town side slopes, land-use planning and urbanization development in Lüliang Mountain with technical support.

Key words: Lüliang Mountain; geohazards of town side slope; risk classification; Shanxi Province

山区城镇地质环境容量有限, 随着山区城镇化建设的加快与建设规模的持续扩张, “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^[1], 不仅威胁城

收稿日期: 2020-06-08; 修订日期: 2020-10-19

资助项目: 中国地质调查局项目《新疆兵团师市规划建设区资源环境综合地质调查》(编号: DD20201119) 和《吕梁山区城镇地质灾害调查》(编号: DD20160276)

作者简介: 王佳运(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 从事地质灾害风险调查与研究工作。E-mail: wjy311_2000@sohu.com

镇居民的生命财产安全,同时,严重阻碍城镇化建设与发展。针对吕梁山区城镇边坡安全问题,首先要解决的是边坡风险分级问题,继而基于边坡的风险级别,采取相应的风险防控措施。因此,山区城镇边坡风险分级问题成为吕梁山区城镇化过程中亟待开展的一项研究工作。边坡风险分级是基于城镇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。边坡分级系统的概念最早由 Pierson 等^[2]提出,将地质条件、危岩体规模、灾害历史、降雨等因素作为评价因子,开展公路边坡落石风险评估。在此基础上,一些学者^[3-5]开展了公路边坡岩崩识别与分级系统研究,基于公路、铁路特点,建立并改进了边坡分级系统;2005年加拿大温哥华召开的“国际滑坡风险管理会议”提出了在土地利用方面地质灾害风险管理的理论框架^[6]。依据地质灾害风险理念,Mölk 等^[7]针对土地利用的边坡开展了岩崩风险分级研究。相对于公路、铁路等线状工程开展的边坡分级研究,基于城镇的边坡风险分级研究则较少。香港曾分别于20世纪70年代末、90年代中期开展了定性的土质边坡分级研究与定量的边坡风险分级研究^[8]。在以上边坡风险分级研究的基础上,随着山区城镇化建设发展的需要,以城镇斜坡或边坡为单元的边坡风险分级研究成果不断涌现。唐亚明等^[9]开展了城镇边坡风险分级研究,建立了基于层次分析法的半定量黄土边坡风险分级系统;易靖松等^[10]基于城镇斜坡单元,开展了城镇边坡地质灾害风险分级评价。本文以吕梁山区吉县城区为研究区,开展吕梁山区城镇边坡地质灾害风险分级研究。结合研究区地质灾害风险调查与孕灾条件分析,优化吉县城区边坡风险分级系统评分指标;基于数理统计学方法,依据统计趋势线的自然拐点法,对边坡的危险性与危害性分级标准进行改进与厘定,建立城镇边坡风险分级表,并确定吉县城区边坡的风险。在此基础上,探索吕梁山区城镇边坡地质灾害风险分级方法与技术,为吕梁山区城镇边坡地质灾害风险分级与防控、土地利用规划及城镇化建设发展提供技术支撑。

1 研究区概况

吉县位于山西吕梁山区的南部黄土地区(图1),隶属于山西省临汾市。吉县县城属于黄土梁塬型河谷地貌,受地形条件的制约,城区地质环境容量

有限,随着城镇化发展的需要,城区范围不断向清水河两侧的黄土支沟拓展,切坡、开挖等工程活动引发了大量的地质灾害及隐患,尤其是黄土崩塌灾害及隐患尤为突出(图2)。吉县城区共发育地质灾害37处,其中,黄土崩塌33处,黄土滑坡4处,直接威胁人民群众的生命财产安全。

吉县城区属暖温带大陆性气候,四季分明,年平均气温10℃,极端最低气温零下21.3℃,每年一般于11月开始封冻,解冻始于次年3月上旬,最大冻土深度0.82 m,昼夜温差变化与冻融循环作用导致斜坡土体强度不断降低,是区内春季解冻期黄土崩塌、滑塌灾害频发的主要诱发因素。城区年降水量为560~580 mm,降雨时间集中,主要集中于每年的6—9月,秋季以连阴雨为主,集中降雨与长历时降雨的特征是区内汛期崩塌、滑坡灾害高发的主要因素。

吉县城区位于清水河河谷区,整体地形平缓,但城区南北两侧与黄土梁塬、黄土斜坡相接,受人类开挖、切坡修路、建房等工程活动影响,形成大量高陡边坡崩塌隐患。吉县主城区位于河谷阶地之上,全新统冲洪积层在研究区广泛分布,城区南北两侧为黄土斜坡,表部为上更新统黄土披覆,斜坡主体为中更新统黄土,沿清水河河谷及公路两侧零星出露中生界三叠系中统延长组(T_2y)与二马营组(T_2e)及下统和尚沟组(T_1h)与刘家沟组(T_1l),新生界新近系上新统(N_1b)等(图3)。

2 城区边坡风险分级系统设计

城区边坡风险分级系统包括边坡危险性分级与危害性分级,评分指标亦分为危险性评分指标与危害性评分指标。评分指标是根据研究区边坡地质灾害及隐患的特征、类型与孕灾条件、承灾体类型等因素确定的评价指标因子,不同研究区应根据地质灾害类型、发育特征、孕灾条件、承灾体等,制定的符合实际城镇边坡的风险评价指标因子。

2.1 评分指标的选取

在前人研究^[9-10]的基础上,考虑山区城镇尺度地貌单元、地质构造、降雨条件等具有共性地质背景的条件下,结合吉县城区地质灾害的类型、特征,以及主控诱发因素、承灾体类型、特征等,认为吉县城区边坡危险性评分指标包括边坡的几何特征、灾害潜在破坏类型与强度、灾害发育的主控诱发因素

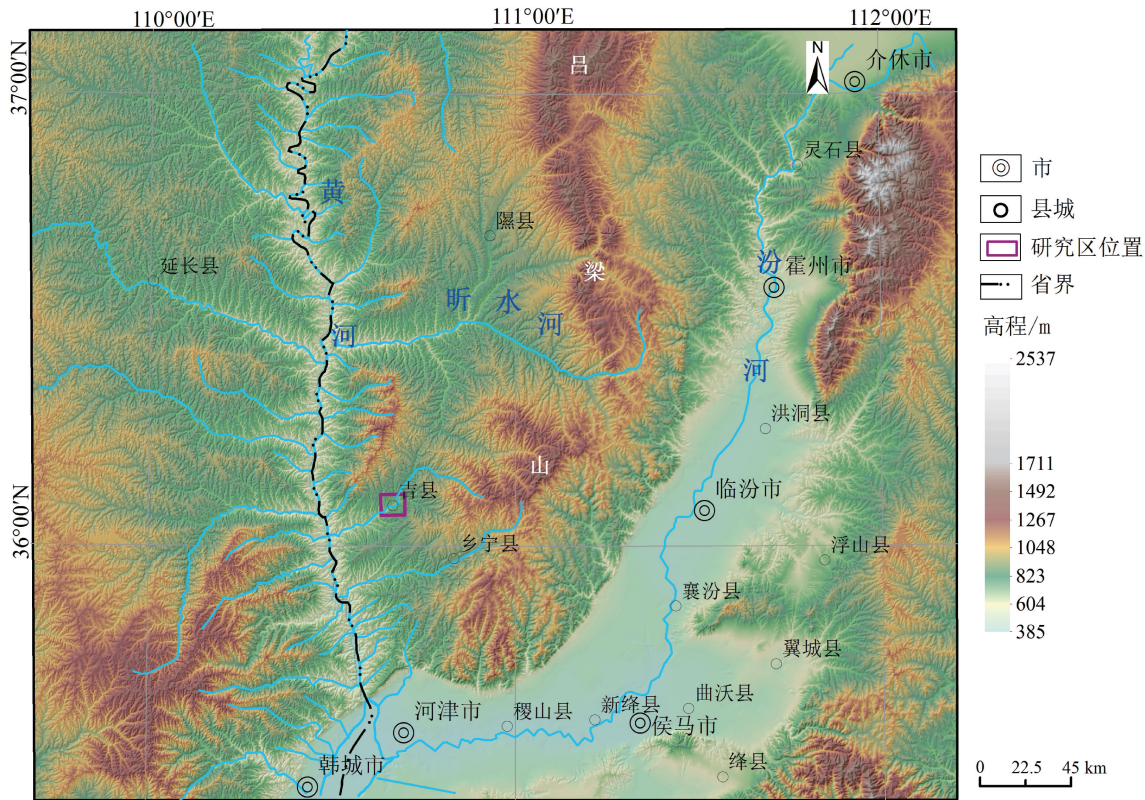


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic location of the study area



图2 吉县城区公路边坡滑塌(a)和土窑边坡崩塌(b)

Fig. 2 Collapses of highway slope(a) and cave-dwelling slope(b) in urban area of Jixian

等,具体包括边坡的地形条件、边坡结构类型、岩土体特性、地表水与地下水、人类工程活动、历史灾害、变形迹象、潜在地质灾害的类型及强度等9项、21个指标;危害性评分指标包括受城镇边坡地质灾害及隐患威胁的承灾体类型、数量、财产的价值、承灾体的易损性等,具体包括6项、15个指标。

2.2 评分指标权重的确定

评分指标权重可以反映评价指标的相对重要程度及对评分结果的贡献程度。评分指标权重的计算方法有熵权法^[11]、模糊数学法^[12-13]、层次分析法^[14-15]等。层次分析法因兼具定性经验判断与定量计算的优势^[16],计算结果更加客观、准确,在地质

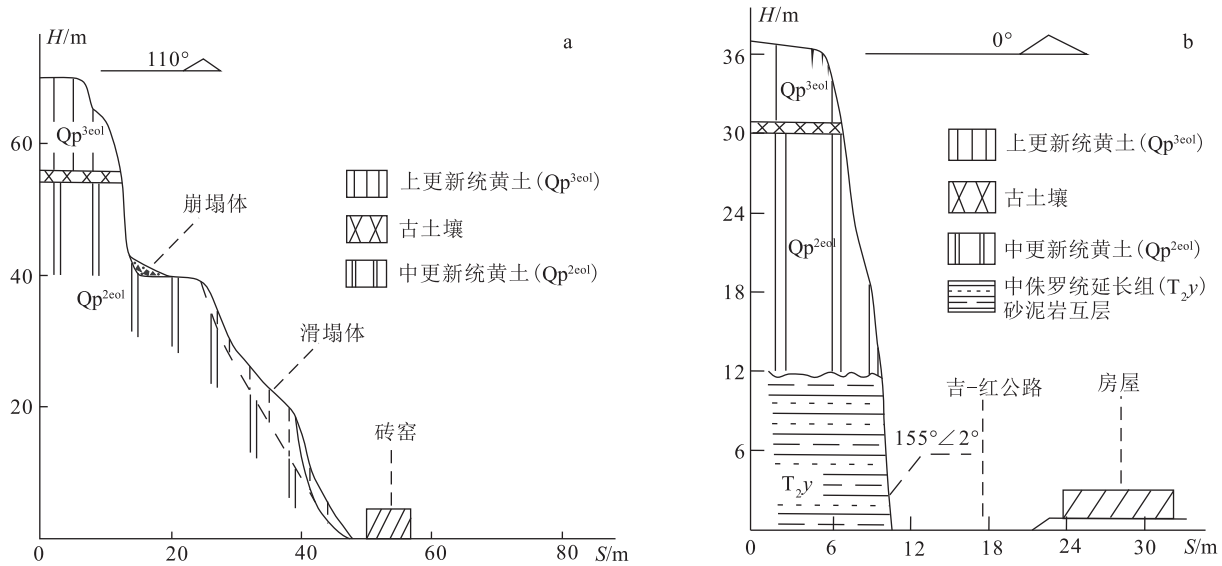


图3 黄土斜坡(a)和黄土-基岩斜坡(b)剖面

Fig. 3 Profile of the loess slope(a) and loess-bedrock slope(b)

灾害评价中应用广泛。前人^[14, 17]通过建立层次分析模型、构造判断矩阵、合成权重计算、一致性检验等步骤得到危险性与健康性评分指标的权重。因前人对获取评分指标权重的方法、步骤有详细的阐述,本文不再对指标合成权重的获取过程与一致性检验进行详细阐述。利用该方法、步骤,可得到吉县城区边坡通过一致性检验的危险性指标合成权重, $W_{Hi} = (0.03, 0.06, 0.02; 0.01, 0.03; 0.02, 0.07; 0.03, 0.08; 0.06; 0.02, 0.04; 0.06, 0.03, 0.02; 0.06, 0.13; 0.03, 0.05, 0.10, 0.05)$ (表 1)。同理,可得到吉县城区边坡危害性评分指标合成权重, $W_{Ci} = (0.128, 0.256; 0.074, 0.074; 0.025, 0.012, 0.005, 0.002; 0.039, 0.008, 0.023, 0.013; 0.03; 0.206, 0.103)$ 。

2.3 评分标准

在充分考虑地质灾害发育特征、孕灾背景条件、潜在灾害类型与强度等因素的基础上,结合前人评分标准的划分方法^[9],依据评价指标对地质

表 1 危险性指标合成权重

Table 1 Integrated weights of hazards factors

[illegible]

灾害危险性的贡献程度,吉县城区边坡危险性评分标准划分为 5 档,即 1 分、3 分、5 分、7 分及 10 分(满分 10 分)5 档分值(表 2)。单个指标的评分分值乘以其对应的权重,可得到该项指标的评分,各指标评分累加可得到边坡单元的危险性评分。危害性评分标准则是基于承灾体的类型与数量、承灾体的易损程度等评价指标对危害性的贡献程度,也划分为 5 个档次,即 1 分、3 分、5 分、7 分及 10 分(满分 10 分)5 档分值(表 3)。危害性的单项评价指标分值乘以其对应的权重,可得到该项指标的评分,并累加得到边坡单元的危害性评分。该风险评价方法相比常用的 $R=H*V$ 评价方法,评价指标更全面、客观,基于研究区边坡的危险性与危害性分级标准建立了风险分级表,进而确定研究区边坡的风险,评价结果更贴近实际情况,也更具合理性。

3 城镇边坡风险分级

3.1 边坡风险调查

边坡风险调查首先是对城镇边坡单元进行划分,依据划分的边坡单元,采用边坡风险分级表进行风险调查与评分。边坡单元的划分基于 DEM 数据,利用 ArcGIS 水文学方法实现边坡单元的自动划分,并在此基础上,依据城区边坡的自然形态,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、坡向等因素对自动划分的单元进行人工修正,最终得到斜坡单元面数据集。吉县城区边坡单元总面积约 5.9 km²,划分为 135 个边坡单元(图 4),平均边坡单元面积 4.37×10⁴m²。在此基础上,依据设计的吉县城区边坡风险分级调查表格逐坡逐段开展城区边坡风险调查,填表人依据边坡的

表 2 吉县城区边坡风险分级危险性评分
Table 2 Grading table for hazards of risk classification system of town slope in Jixian

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≤h<20	20≤h<30	30≤h<50	≥50
	坡度/°	0.06	<25	25≤α<30	30≤α<45	45≤α<60	≥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≤10 m ³	10<V≤100 m ³	100<V≤1000 m ³	1000<V≤10000 m ³	V>10000 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 3 吉县城区边坡风险分级危害性评分系统

Table 3 Grading table for consequence of risk classification system of town slope in Jixian

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	≤1 人/min	2~5 人/min	6~10 人/min	10~15 人/min	>15 人/min
	乘客流量	0.074	≤1 辆/min	2~5 辆/min	6~10 辆/min	10~15 辆/min	>15 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			≤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

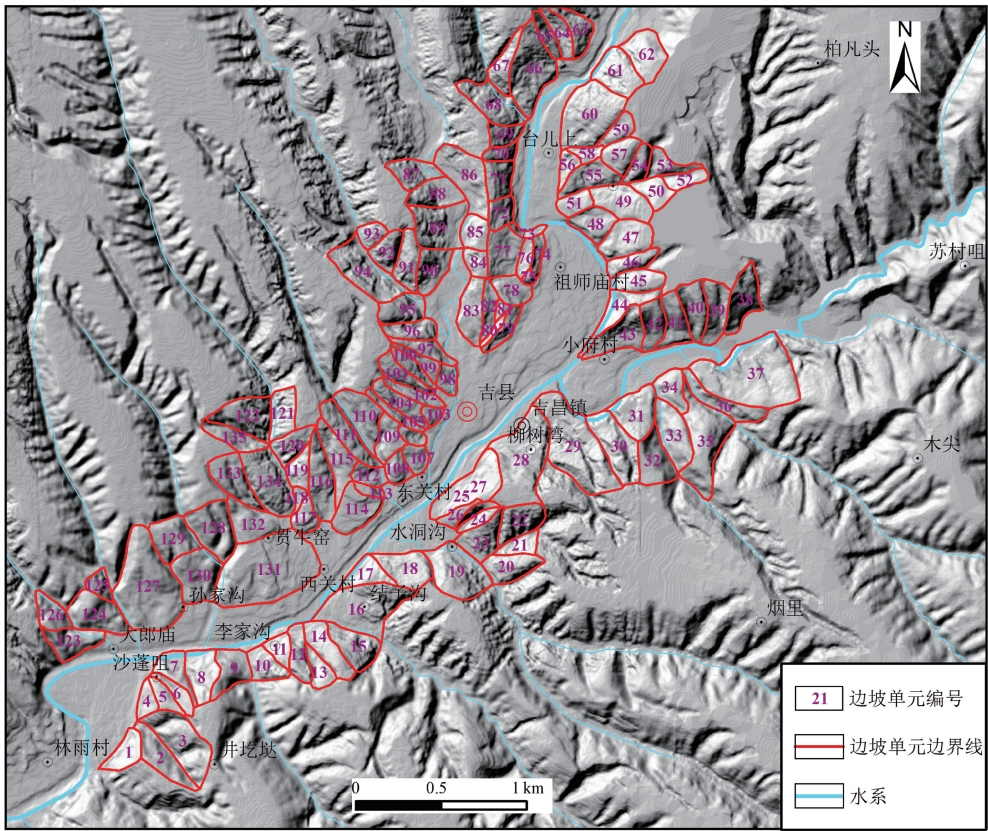


图 4 吉县城区边坡单元划分

Fig. 4 Unit partition of slopes in urban area of Jixian

危险性与危害性调查要素指标逐一进行调查、分析与判断,并给出各项指标的评分,得到边坡单元的危险性与危害性评分结果。

3.2 城区边坡风险分级与优化

城区边坡风险分级是在危险性与危害性分级的基础上,建立城镇边坡风险分级表,并据该表判定边坡的风险级别。关于边坡危险性与危害性分级标准,有学者^[9]按照边坡单元数的百分比作为划分标准,也有学者^[10]依据边坡单元评分的自然间断法进行级别标准的划分,划分标准均具有较强的主观性,难以客观地反映边坡的危险性、危害性及风险级别。

在以上研究的基础上,本文对边坡的危险性与危害性分级标准进行了改进、优化。基于数理统计学理论^[18],分别进行城区边坡单元危险性与危害性评分排序,依据统计趋势线的自然拐点对应的得分作为划分危险性与危害性级别的标准,并对拐点对应的边坡单元危险性与危害性进行核查,确保分级标准符合城镇边坡的实际情况,并将危险性与危害性分别划分为高、中、低、很低 4 个等级。根据危险性与危害性评分分布的趋势线自然拐点(图 5、图 6),结合对边坡的危险性与危害性实地核查,确定危险性评分在 6.04 及以上的地质灾害隐患为高危险,评分在 4.49~6.04 之间的为中危险,评分在 3.38~4.49 之间为低危险,评分低于 3.38 的为危险性很低;确定危害性评分为 2.284 及以上的为高危害性,在 1.109~2.284 之间的为中危害性,在 0.954~1.109 之间的为低危害,0.954 以下的为危害性很低。依据边坡的危险性与危害性评分标准,判定吉县城区高危险边坡 16 处,中危险边坡 78 处,低危险边坡 38 处,很低危险边坡 3 处(图 7);吉县城区高危害边坡 17 处,中危害边坡 82 处,低危害边坡 27 处,很低危害边坡 9 处(图 8)。

依据边坡的危险性与危害性分级标准,建立吉县城区边坡风险分级表(表 4)。依据该表,判定吉县城区边坡的风险,即高风险边坡 22 处,中风险 84 处,低风险 21 处,风险很低 8 处(图 9)。同时,依据

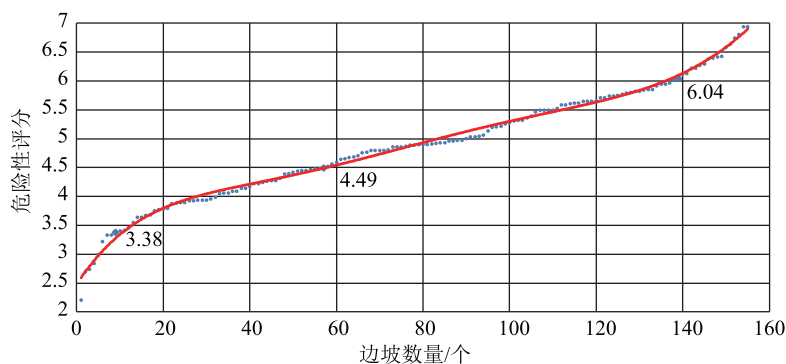


图 5 吉县城区及新区边坡危险性评分趋势图

Fig. 5 Tendency chart of geohazards hazard scores of slopes in urban area and new urban area of Jixian

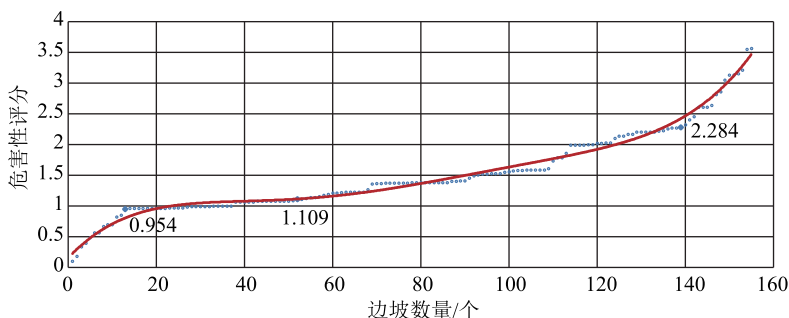


图 6 吉县城区及新区边坡危害性评分趋势图

Fig. 6 Tendency chart of geohazards consequence scores of slopes in urban area and new urban area of Jixian

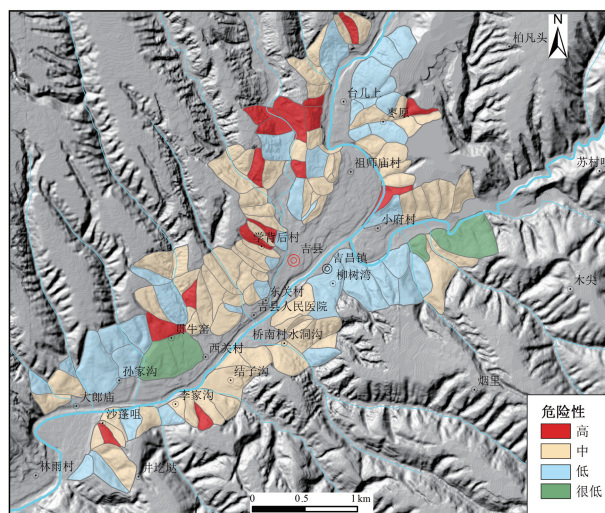


图 7 吉县城区边坡危险性分布图

Fig. 7 Distribution of slope hazard in urban area of Jixian

城区边坡风险分级结果,对城区边坡的风险进行了核。经核,采用该城镇边坡风险分级系统进行

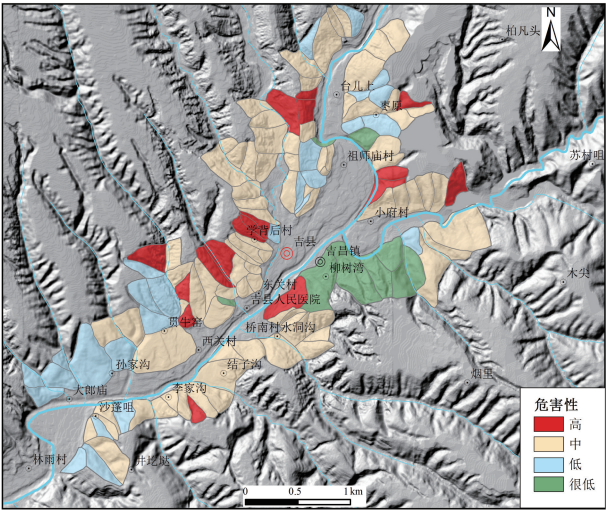


图 8 吉县城区边坡危害性分布图

Fig. 8 Distribution of slope consequence in urban area of Jixian

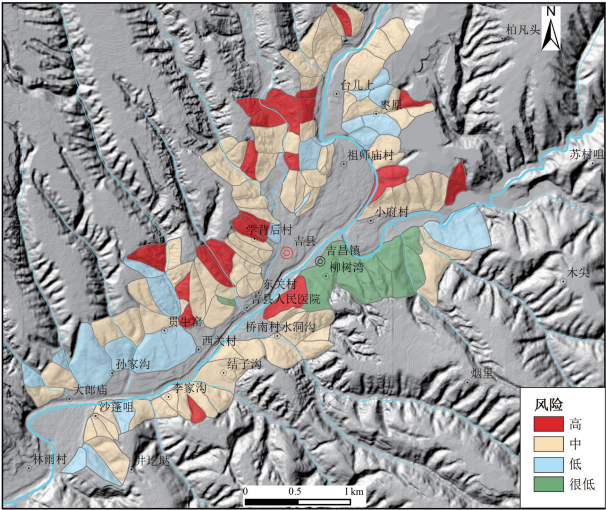


图 9 吉县城区边坡风险分布图

Fig. 9 Distribution of slope risk in urban area of Jixian

城区边坡风险评价的结果基本符合吉县城区边坡的实际情况。

4 结 论

(1) 基于数理统计学理论, 依据统计趋势线的自然拐点法对城镇边坡的危险性与危害性分级标准进行了改进与厘定, 并将危险性与危害性分别划分为高、中、低、很低 4 个等级。

(2) 依据边坡危险性与危害性分级标准, 吉县城区高危险边坡 16 处, 中危险边坡 78 处, 低危险边坡 38 处, 很低危险边坡 3 处; 吉县城区高危害边坡

表 4 吉县城区边坡风险分级

Table 4 Risk classification for slopes in urban area of Jixian County

危害性	危险性			
	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)

17 处, 中危害边坡 82 处, 低危害边坡 27 处, 很低危害边坡 9 处。

(3) 根据边坡的危险性与危害性分级标准, 建立了边坡风险分级表, 判定吉县城区高风险边坡 22 处, 中风险边坡 84 处, 低风险 21 处, 风险很低 8 处。高风险边坡建议采取搬迁避让, 辅以工程治理措施; 中风险边坡以工程治理措施为主, 加强绿化与排水, 有必要可采取避让搬迁; 低风险边坡与风险很低边坡建议定期巡查, 规范工程活动, 加强地质灾害知识教育与宣传。

致谢: 西安科技大学叶万军教授对论文提出了宝贵的修改意见与建议, 在此表示衷心感谢。

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, Vickie 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 [J]. Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources, 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[M]. Edmonton, Alberta, Canada, 2003: 277-283.

[5] Vandewater C J, Dunne W M. Classifying and assessing the geologic contribution to rock fall hazard. Environmental & Engineering Geo-science, 2005, 11(2): 141-154.

[6] Fell R, Corominas J, Bonnard C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 85-98.

- [7] Mölk M, Poisel R, Weibold J, et al. Rock fall rating systems: is there a comprehensive method for hazard zoning in populated areas? *Interpraevent 2008 -Conference Proceedings*, 2008, 2: 207-218.
- [8] Wong H N. Landslide risk assessment for individual facilities [C]// Hunger O, Fell R, Couture R, et al. *Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, London: Taylor and Francis, 2005: 237-296.
- [9] 唐亚明, 薛强, 李清, 等. 黄土滑塌灾害风险分级系统研究[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(3): 378-386.
- [10] 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.
- [11] 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(增刊): 129-132.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 唐亚明, 程秀娟, 薛强, 等. 基于层次分析法的黄土滑塌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.
- [15] 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.
- [16] 张征. *环境评价学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [17] 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.
- [18] 汪荣鑫. *数理统计* [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [19] 李瑞敏, 殷志强, 李小磊, 等. 资源环境承载协调理论与评价方法[J]. *地质通报*, 2020, 39(1): 80-87.
- [20] 曾毅, 项广鑫, 蒋星祥, 等. 基于国土空间自然适宜性的三类空间划分方法[J]. *地质通报*, 2020, 39(1): 138-145.