

王高峰, 叶振南, 李刚, 等. 白龙江流域舟曲县城区地质灾害危险性评价[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 128-133. [ WANG Gaofeng, YE Zhennan, LI Gang, et al. Geological hazard risk assessment of zhouqu county in Bailong River Basin[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 128-133. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.024. ]

# 白龙江流域舟曲县城区地质灾害危险性评价\*

王高峰, 叶振南, 李刚, 田运涛, 邓兵, 郭宁, 陈宗良

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051)

**摘要:** 地质灾害危险性评价对城镇国土空间规划与防灾减灾管理具有重要的意义, 目前地质灾害危险性评价方法较多, 但主要集中在对区域或单体地质灾害的危险性评价研究, 对城镇尺度地质灾害危险性评价较少。该文以地质灾害高发的舟曲县城区为研究对象, 以网格划分为评价单元, 以 1:10 000 地质灾害详细调查数据为基础。根据斜坡岩土体物理力学性质及侵蚀特征, 利用无限边坡模型计算不同栅格单元的稳定性, 并结合斜坡破坏概率及构建的斜坡滑动距离评价了城区斜坡危险性, 在此基础上采用 FLO-2D 模型进行了泥石流灾害危险性评价, 最后在 arcgis 平台下综合城区斜坡和泥石流危险性评价结果, 完成了舟曲县城区 50 年一遇降雨条件下地质灾害危险性评价及区划。评价结果表明: 舟曲县城区地质灾害高危险区面积 6.43 km<sup>2</sup>, 共发育灾害点 32 处, 威胁承灾体面积 640.29 万 m<sup>2</sup>; 中危险区面积 5.15 km<sup>2</sup>, 共发育灾害点 7 处, 威胁承灾体面积 509.73 万 m<sup>2</sup>; 低危险区及以下面积 15.80 km<sup>2</sup>, 共发育灾害点 3 处, 威胁承灾体面积 1 527.82 万 m<sup>2</sup>。该评价方法在一定程度上完善了城镇尺度的地质灾害危险性评价过程, 并为舟曲县城区地质灾害防治提供参考。

**关键词:** 地质灾害; 危险性; FLO-2D; 白龙江流域; 舟曲县城

**中图分类号:** X43; X915.5; P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)03-0128-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.024

从 1980 年开始, 国内有关学者对白龙江流域的地质灾害进行了大量的调查、监测、试验和理论研究, 取得了丰硕的成果, 但以往工作多集中在国道 212 沿线或整个白龙江干流或中游某一典型区段<sup>[1-4]</sup>, 关于城镇尺度的地质灾害危险性评价研究甚少。在区域方面, 一些专家采用无限边坡稳定性模型、经验权重方法等, 基于 GIS 和 RS 等空间信息技术, 采用定性定量相结合的方式, 构建了舟曲县地质灾害危险性评价模型<sup>[5-8]</sup>。针对单体地质灾害评价, 舒和平等<sup>[9]</sup>从泥石流流动力学角度, 通过物理模拟试验构建了三眼峪泥石流堆积面积、厚度及形态特征, 并对危险度进行了划分; 于国强等<sup>[10]</sup>从侵蚀机理方面, 采用 FLAC3D 对三眼峪小流域危险性进行分析; 唐亚明等<sup>[11]</sup>对三眼峪泥石流发生前后和工程治理前后评价因子的变化, 对比分析了其风险性; 宿星等<sup>[12]</sup>对龙江新村滑坡稳定性进行了分析; 蒋树等<sup>[13]</sup>对锁儿头滑坡活动特征进行了剖析。上述成果主要集中于对区域或单体的研究, 城镇尺度的地质灾害危险性评价

研究程度仍然较低, 缺乏对未来地质灾害的破坏能力及危害范围的准确预测, 在评价过程中未将不同类型地质灾害危险性评价进行区分, 导致评价结果存在一定的误差。尤其针对地质灾害多发、群发的白龙江流域重要城镇区地质灾害危险性评价研究更为匮乏。

鉴于此, 本文以具有典型性和区域特色的甘肃省舟曲县城区为典型研究案例。借鉴国内外地质灾害危险性评价技术方法和理念, 首先根据斜坡岩土体物理力学性质及侵蚀特征利用无限边坡模型计算不同栅格单元的稳定性及斜坡破坏概率。结合构建的适合舟曲县城区滑坡最大滑动距离预测表达式来预测未来斜坡危害范围, 进而评价城区斜坡危险性。最后在 Arcgis 平台下综合城区斜坡危险性和采用 FLO-2D 流体模型获取的泥石流危险性评价结果, 完成了舟曲县城区 50 年一遇降雨条件下地质灾害危险性评价及区划。评价结果可为该城镇乃至陇南山区城镇地质灾害的国土空间规划和防灾减灾提供参考和技术依据。

\* 收稿日期: 2019-02-13 修回日期: 2019-04-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160281、DD20190646、12120115053701)

第一作者简介: 王高峰(1984-), 男, 河南淮阳人, 工程师, 硕士, 主要从事地质灾害调查与 GIS 评价研究。

E-mail: wgf\_cges303@163.com

通讯作者: 田运涛(1984-), 男, 河北蠡县人, 工程师, 硕士, 主要从事地质灾害调查研究。E-mail: tytao@163.com

## 1 研究区概况

本文主要选取舟曲县城区斜坡地带和泥石流出口堆积扇台地或泥石流流通区居民区集中区域作为研究对象, 面积约 27.4 km<sup>2</sup>。区内为中高山峡谷地貌, 沟谷切割强烈, 地形破碎, 海拔高程 1 310 m~2 680 m, 斜坡坡度范围 20°~50°。地层岩性以中泥盆统古道岭组千枚岩、炭质板岩及石炭统厚层灰岩为主, 北侧三眼峪和罗家峪沟口处发育二叠系中薄层到厚层块状灰岩, 全新世冲积层主要分布在峡谷地带。受坪定-化马断裂和多次次级断层及地震影响, 裂隙发育, 岩体破碎。石炭统和二叠系灰岩区, 形成多处崩塌堆积体和危岩体, 而中泥盆统千枚岩和炭质板岩区, 风化强烈, 坡面冲刷严重, 是滑坡及水土流失集中发育区。受特殊的地形地貌、易崩易滑的岩性组合和复杂的地质构造等孕灾地质条件影响, 研究区滑坡、泥石流等地质灾害频发, 已严重阻碍了舟曲县城区国民经济的发展建设。

近年来随着人类工程活动日益强烈, 极端条件日趋明显, 导致区内原本极为脆弱的生态环境条件进一步恶化, 泥石流松散固体物质剧增, 斜坡的岩土体结构破坏加剧, 城镇居住环境面临的风险逐渐增强。更严重的是舟曲县城区本身处于一江三沟挟持位置, 城区和城郊 10 余个自然村座落在三眼峪沟、罗家峪沟古泥石流堆积扇上, 由于土地资源过度紧张, 城镇建设严重挤占泥石流泄洪通道。近 200 年间, 三眼峪曾爆发 11 次较大规模泥石流灾害, 特别是 2010 年“8.8”舟曲特大山洪泥石流灾害, 整个县城几乎被毁。据 2017 年调查统计研究区 27.4 km<sup>2</sup> 范围内自西向东发育咀疙瘩、锁儿头、南桥、龙江新村及黄土坡等 34 处滑坡及隐患点, 多为中大型深层滑坡, 有寨子村沟、三眼峪沟、罗家峪沟及河南大沟等 8 条灾害性泥石流及隐患点, 地质灾害密度达 1.53 个/km<sup>2</sup>,

研究区主要地质灾害见表 1 及图 1。因此, 选择舟曲县城区作为白龙江流域山区重要城镇地质灾害危险性评价的研究具有代表性和典型性。

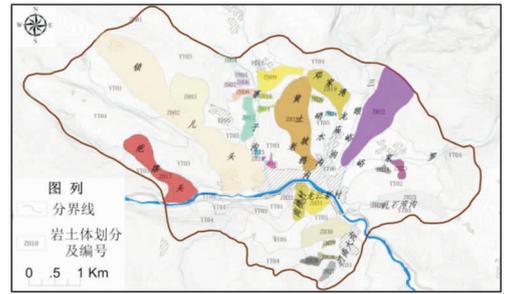


图 1 研究区不同物理力学参数分布图

## 2 城镇地质灾害危险性评价体系

研究区所需的主要数据源于: ①对城镇地质灾害开展现场调查获取的基本特征资料; ②1:1 万地形图数据、DEM 和 1:20 万地质图; ③1:1 万土地利用类型数据; ④岩土体类型分区和岩组单元的物理力学参数数据; ⑤2016 年 5 月 3 日获取的精度为 0.5 m Pléiades 星遥感数据; ⑥研究区历史地质灾害降雨及变形监测数据和陇南山地 406 处气象观测数据点资料。

地质灾害危险性评价是在分析地质灾害形成条件和引发因素的基础上, 开展地质灾害发生的时间概率、破坏力(强度)及其扩展和影响范围, 其内容包括地质灾害易发性评价和可能影响范围评价, 核心是确定地质灾害体不同工况下的作用范围和失稳概率<sup>[14-18]</sup>。研究区地质灾害类型以滑坡、泥石流灾害及其滑坡隐患点为主, 故主要针对城区斜坡和泥石流进行 50 年一遇(2%)降雨工况危险性综合评价, 最后将危险性等级划分为高、中、低、极低四个级别。

表 1 舟曲县城区主要地质灾害一览表

灾害类型	名称	流域面积/km <sup>2</sup>	主沟坡降/%	泥沙补给段长度比/%	松散物储量/万 m <sup>3</sup>	泥石流容重/(g/cm <sup>3</sup> )	体积浓度 C <sub>v</sub>	威胁人口/人
泥石流	三眼峪沟	25.75	241.4	50	5163	1.90	0.54	9867
	罗家峪沟	16.6	239	60	3414.38	1.90	0.55	4024
	寨子沟	17.27	377	45	18550.84	2.28	0.78	9722
	河南大沟	5.55	333	75	327.83	1.66	0.40	1506
	硝水沟	1.9	94	60	70.87	1.58	0.35	10559
	龙庙沟	2.4	138	75	362.12	1.84	0.51	69
	乱石湾沟	1.4	472	40	35.67	1.51	0.31	55
	老鸦沟	3.8	130	35	106.98	1.53	0.32	2771
灾害类型	名称	长度/m	宽度/m	厚/m	体积/万 m <sup>3</sup>	稳定性	主要地层岩性	威胁人口/人
滑坡	锁儿头滑坡	4560	430	45	8824	不稳定	千枚岩	1478
	疙瘩头滑坡	1300	400	15	780	不稳定	千枚岩	145
	南桥滑坡	500	300	15	225	不稳定	灰岩、千枚岩	210
	龙江新村滑坡	600	180	10	108	不稳定	千枚岩、炭质板岩	1150
	黄土坡滑坡	1700	470	15	1198	基本稳定	黄土、千枚岩	532
	邓家湾滑坡	920	350	35	1127	不稳定	黄土、千枚岩、灰岩	15

## 2.1 城镇斜坡危险性评价

### 2.1.1 斜坡稳定性评价

降雨沿斜坡冲沟产生地表汇流、弱化岩土体特性致使土体厚度发生变化。考虑雨水侵蚀坡表、浸润坡体和岩土体力学性质对斜坡在不同降雨频率下的响应,进行定量计算分析,可达到城区滑坡灾害稳定性评价的目的。优化的无限边坡模型与 Arcgis 空间分析功能为上述斜坡稳定性评价提供了有效方法<sup>[19]</sup>。研究区滑坡多为堆积层滑坡和上覆黄土或残坡积碎石层,下伏强风化基岩的层状结构特征,可满足无限边坡模型的假设,城镇区范围一般较小,所需的岩土体物理力学参数易于获取,满足模型计算需求。

本文基于优化的无限边坡模型计算方法,在 Arcgis 软件平台下将研究区划分为若干个 10m × 10m 的栅格小单元体,对每一个栅格单位进行稳定性计算。

$$F_s = \frac{c'}{\gamma t \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \alpha} \quad (1)$$

式中:  $c'$  为有效内聚力(kPa);  $\phi'$  为有效内摩擦角( $^\circ$ );  $\gamma$  为岩土体重度( $t/m^3$ );  $t$  为潜在滑体厚度(m);  $\alpha$  为斜坡坡面倾角( $^\circ$ );  $m$  为潜在滑体中饱和状态(无量纲);  $\gamma_w$  为水的重度( $t/m^3$ )。通过把计算参数赋予研究区内的评价栅格单元中,采用无限边坡分析模型,来确定每个斜坡栅格单元的  $F_s$  值。在 Arcgis 的 Spatial Analyst 环境下进行栅格叠加运算,结果按  $F_s < 1.0$  为斜坡稳定差,为高度危险区,  $F_s > 1.0$  表明斜坡趋于稳定,危险性随着  $F_s$  值越大,斜坡越稳定,危险性越低。

实地调查发现研究区松散堆积层厚度大,结构松散,水土流失严重,故斜坡稳定性评价还要考虑其土壤侵蚀能力大小。以往研究认为水土流失程度是人类活动、坡体破坏及岩石风化侵蚀等多因素综合体现的结果,可用土壤侵蚀程度表示( $F_A$ )。本文分析了不同降雨侵蚀能力下土壤可侵蚀程度,以定量反映研究区斜坡危险性的空间分布特征,主要包括不同土地利用类型( $k_1$ )及不同岩土体的可侵蚀难易程度( $k_2$ )、坡长坡度因子(LS)和作物覆盖与管理因子及水土保持因子(CP)。各因子取值可借鉴前人研究成果<sup>[20]</sup>结合研究区实际情况进行赋值得到各因子栅格图层,依据各因子贡献率大小进行权重赋值  $w_i$  (其中  $w_{k_1} = 0.418$ ;  $w_{k_2} = 0.271$ ;  $w_{LS} = 0.172$ ;  $w_{CP} = 0.139$ ),按公式(2)得到研究区斜坡土壤侵蚀程度栅格区划图。

$$F_A = \sum_{i=1}^n C_i W_i \quad (2)$$

式中:  $F_A$  为土壤侵蚀程度系数;  $W_i$  为评价因子权重;  $C_i$  为评价因子分级赋值栅格图层。

综合以上分析城镇区斜坡稳定性识别包括了地质体边界形态特征、岩土体成分结构及初始状态情况、降雨激发条件和水土流失程度外界环境因素等 5 大要素。这些因素的既能准确识别已有灾害形成机制亦能分析预测未来斜坡变形发展情况,故城镇区斜坡综合稳定性评价模型可简化为:

$$F = 0.7F_s + 0.3F_A \quad (3)$$

### 2.1.2 斜坡时间概率评价

以往研究<sup>[21]</sup>认为由于滑坡破坏模式的复杂性和降雨阈值的多样性及研究区地质灾害发生的时间记录统计样本较少,计算十分困难。近年来舟曲县城区针对特大型地质灾害调查、监测预警等工作程度逐渐提高,但大多数滑坡还存在无时间序列记录。再者由于研究区分布有黄土滑坡、堆积层滑坡及基岩滑坡其受控的致灾因素存在差异性,采用降雨触发因素临界值获得时间概率可信度不高。因此,本文对这一要素不予考虑。

### 2.1.3 斜坡破坏概率评价

在斜坡稳定性计算过程中,划分的栅格地质体单元受不同降雨入渗条件影响,其破坏概率结果将会发生变化,在整个研究区内表现出一定的空间差异性。故根据斜坡稳定性所选择的参数变量,利用蒙特卡洛法选取合适的概率分布,将产生  $K$  组符合参数变量概率分布的随机数,代入无限边坡模型计算模型得到  $K$  个稳定性结果。当  $K$  足够多时,根据大数定律得此时的频率近似于概率,若此  $K$  个稳定性结果中有  $M$  个小于或等于 1,根据式(4)可获得研究区不同栅格地质体单元破坏概率。研究认为<sup>[22]</sup>当斜坡失稳破坏概率  $p_f > 90\%$  时,斜坡危险等级为必然破坏;  $90\% \geq p_f > 60\%$  时斜坡为高危险;  $60\% \geq p_f > 30\%$  时斜坡为中等危险;  $30\% \geq p_f > 5\%$  时斜坡为低危险;  $p_f \leq 5\%$  时斜坡处于稳定状态。

$$p_f = p(F_s \leq 1) = \frac{M}{K} \quad (4)$$

### 2.1.4 斜坡滑动距离评价

在地质灾害危险性评价研究中对地质灾害运动距离和潜在危害范围预测是十分必要的。有关滑坡运动距离的研究,许多学者利用几何学方法,通过样本数据采用 matlab 编程建立了滑动距离与滑体相关高差、滑动体的体积及滑体前缘坡角的线性回归方程式,并在相应地区取得了较好的效果。虽然以往对滑坡影响范围预测计算模型研究存在一定的局限性,但评价结果却具有一定的区域代表性。

本文结合 2017 年度陇南白龙江流域地质灾害调查资料,重点对流域内 46 处不同规模的滑坡体进行了滑动距离确定,在此基础上,建立滑坡滑动距离( $L$ )与滑源区高差( $\Delta H$ )和滑源区平均坡度( $\theta$ )的关系式。

$$L = 1.6962\Delta H^{0.9136}, 28^\circ < \theta \leq 33^\circ \quad (5)$$

$$\frac{\Delta H}{L} = 1.005 \pm 1.705 \tan \theta, \theta > 33^\circ \text{ 或 } \theta \leq 28^\circ \quad (6)$$

式中:  $L$  为预测滑坡最大滑动距离(m);  $\Delta H$  为滑坡源区前后缘海拔高程之差(m);  $\theta$  滑坡源区平均坡度( $^\circ$ ); 式(5)相关系数  $R^2 = 0.86$ ; 式(6)相关系数  $R^2 = 0.72$ 。

基于上述关系式,针对舟曲县城区滑坡进行滑坡源区实地调查并结合遥感解译圈定,在 Arcgis 平台下利用 DEM 数据能快速计算最大滑动距离。根据计算得到的最大滑动距离,借鉴唐亚明<sup>[21]</sup>研究成果将受险对象距离按不同延伸角  $\alpha$  划定危险

区范围即  $\alpha \geq 25^\circ$  为高危险区、 $\alpha \in [15^\circ \sim 25^\circ)$  为中等危险区、 $\alpha < 15^\circ$  为较低危险区。

## 2.2 城镇泥石流危险性评价

研究区泥石流灾害多呈现降雨控制型特点, 且几乎所有泥石流沟都进行了大量工程防治措施。因此, 本文基于 FLO-2D 模型<sup>[23]</sup> 对研究区未来泥石流灾情进行模拟, 主要考虑不同降雨频率和工程治理措施等两个因素。结合泥石流动力特征和传统雨洪模型分析, 并以每个栅格单元内泥石流强度值( $\nu^2 d$ )的空间分布作为泥石流危险性的表现形式, 定量获取泥石流危险性。

未来泥石流灾害发生的重现周期主要受控于泥石流的临界降雨量, 同时不同降雨雨强对泥石流的堆积范围及冲出量也将产生影响, 本文主要开展 50 年一遇降雨频率下泥石流数值模拟研究。将各泥石流沟最终泥石流流量(表 2)和参数(表 3)

输入 FLO-2D 模型, 在整个过程未有人为干预, 计算结果较为可靠真实。依此方法对研究区内每条泥石流沟进行模拟, 将模拟得到泥石流强度指数在 Arcgis 平台进行叠加, 最终得到舟曲县城区泥石流危险性分区结果图, 即城镇泥石流危险性。

用精度系数  $I_a$  验证三眼峪泥石流沟在 100 年一遇降雨条件(即 8.8 舟曲特大山洪泥石流灾害降雨条件)模拟计算结果的准确性。 $I_a$  的区间位于 0~1, 当  $I_a$  越接近 1 时, 表明该模拟结果越准确, 通过模拟结果可得三眼峪泥石流模拟面积  $A_m$  为 0.523km<sup>2</sup>, 泥石流实际堆积面积  $A_r$  为 0.46km<sup>2</sup>, 实际与模拟的重叠面积  $A_o$  为 0.382km<sup>2</sup>。根据公式(8)可得模拟精度系数  $I_a$  为 78.1%, 满足模拟精度要求。

$$I_a = \sqrt{(A_o/A_r) \times (A_o/A_m)} \times 100\% \quad (7)$$

表 2 泥石流基本特征参数

名称	泥石流容重/(g/cm <sup>3</sup> )	体积浓度 $C_v$	膨胀系数 BF	2% 泥石流流量/(m <sup>3</sup> /s)	模拟泥石流流量/(m <sup>3</sup> /s)
三眼峪沟	1.90	0.54	2.20	77.99	171.36
罗家峪沟	1.90	0.55	2.21	41.17	91.11
寨子沟	2.28	0.78	4.51	62.90	283.68
河南大沟	1.66	0.40	1.67	26.74	44.57
硝水沟	1.58	0.35	1.54	16.87	25.97
龙庙沟	1.84	0.51	2.04	13.84	28.21
乱石湾沟	1.51	0.31	1.45	15.12	21.95
老鸦沟	1.53	0.32	1.47	54.00	79.57

表 3 FLO-2D 数值模拟参数

模拟参数项	数值	依据
计算网格/m	10 × 10	DEM 数据
模拟时间/h	1 ~ 2	访问数据
体积浓度 $C_v$	0.31 ~ 0.78	参考文献[24]计算
泥沙比重 $\gamma_m$ /(t/m <sup>3</sup> )	2.65	现场所得
曼宁粗糙系数 $n$ (公路、排导槽)	0.05	FLO-2D 手册建议值
曼宁粗糙系数 $n$ (居民区)	0.3	FLO-2D 手册建议值
层流阻力系数 $K$	3000	FLO-2D 手册建议值
$\alpha_1$	0.811	FLO-2D 手册建议值结合文献[25]
$\alpha_2$	0.00462	
$\beta_1$	13.72	
$\beta_2$	11.24	

表 4 地质灾害危险性评价结果

项目	危险性单元	高危险区	中危险区	低危险区	极低危险区	合计
危险性评价	栅格单元数量/个	64 308	51 499	62 107	95 923	273 837
	区域面积/km <sup>2</sup>	6.43	5.15	6.21	9.59	27.38
	面积所占比例/%	23.48	18.81	22.68	35.03	100
	包含的地质灾害点数/处	32	7	2	1	42
	地质灾害百分数/%	76.19	16.67	4.76	2.38	100
	频率比	3.24	0.89	0.21	0.07	4.41
	灾点密度/(处/km <sup>2</sup> )	4.98	1.36	0.32	0.10	1.53
	建筑物面积/万 m <sup>2</sup>	43.26	35.3	50.56	67.5	196.62
	公路设施面积/万 m <sup>2</sup>	15.65	7.5	5.71	5.41	34.27
	其他用地面积/万 m <sup>2</sup>	581.38	466.93	551.43	847.21	2 446.95

### 3 城镇地质灾害危险性评价结果与检验

综合城镇斜坡和泥石流危险性评价结果,开展城镇区地质灾害危险性区划,可采用地质灾害危险性综合指数法:

$$H_i = H_{si} \cdot H_{fi} \quad (8)$$

式中:  $H_i$  为评价栅格单元的危险性指数;  $H_{si}$  为评价栅格单元的斜坡危险性指数;  $H_{fi}$  为评价栅格单元的泥石流危险性指数, 栅格单元危险性指数归一化指数计算公式如下:

$$H_{危i} = H_i / H_{max} \quad (9)$$

将归一化的危险性指数按4级划分: 当  $0 < H_{危i} \leq 0.25$  时, 表示极低危险区; 当  $0.25 < H_{危i} \leq 0.45$  时, 表示低危险区; 当  $0.45 < H_{危i} \leq 0.75$  时, 表示中等危险区; 当  $0.75 < H_{危i} \leq 1.0$  时, 表示高度危险区。最终形成舟曲县城区地质灾害危险性区划图(图2)。

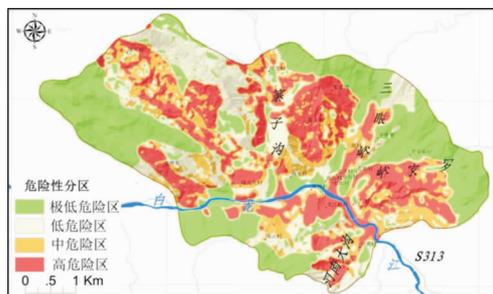


图2 研究区50年一遇降雨频率下地质灾害危险性分区评价

据图2和表4, 可得舟曲县城区地质灾害高危险区面积约  $6.43 \text{ km}^2$ , 占总面积的  $23.48\%$ , 共发育灾害点32处, 灾点密度  $4.98 \text{ 处}/\text{km}^2$ 。该区主要分布在舟曲集镇区白龙江北岸的三眼峪沟、罗家峪沟、河南村沟、寨子沟出口堆积台地上, 锁儿头村、垭头村、镇垭村、坝里村及黄土坡斜坡上。威胁房屋等建筑物面积约  $43.26 \text{ 万 m}^2$ 、公路设施面积  $15.65 \text{ 万 m}^2$ 、其他用地面积  $581.38 \text{ 万 m}^2$ 。

地质灾害中危险区面积约  $5.15 \text{ km}^2$ , 占总面积的  $18.81\%$ , 共发育灾害点7处, 灾点密度  $1.36 \text{ 处}/\text{km}^2$ 。该区主要分布在高危险区周边, 典型位置为舟曲集镇区白龙江北岸居民区, 锁儿头滑坡中上部、圪塔头滑坡左侧、南山村及乱石湾沟流域内。威胁房屋等建筑物面积约  $35.3 \text{ 万 m}^2$ 、公路设施面积  $7.5 \text{ 万 m}^2$ 、其他用地面积  $466.93 \text{ 万 m}^2$ 。

地质灾害低危险及以下区面积约  $15.80 \text{ km}^2$ , 占总面积的  $57.71\%$ , 共发育灾害点3处, 灾点密度  $0.052 \text{ 处}/\text{km}^2$ 。该区主要分布在南山、北山高山斜坡植被较好且人员居住极少的地带和旱坪梁老滑坡堆积平台上。其中威胁房屋等建筑物面积约  $118.06 \text{ 万 m}^2$ 、公路设施面积  $11.12 \text{ 万 m}^2$ 、其他用地面积  $1398.64 \text{ 万 m}^2$ 。

据刘希林等<sup>[26]</sup>研究认为, 地质灾害危险性评

价结果的合理性应满足以下条件即①灾害点落在越高等级易发区的百分比越大越合理; ②越低等级易发区面积百分比越大越合理; ③灾害点在各等级易发区的百分比与各等级易发区面积占总面积百分比的比值即频率比应该随易发区等级的增高而增大。从表4可以看出, 本文计算结果基本满足上述条件。

### 4 结论

本文以白龙江流域舟曲县城区为例, 通过利用无限边坡模型、FLO-2D软件和Arcgis软件, 开展了城镇尺度的地质灾害危险性评价研究, 主要得到如下结论。

(1) 白龙江流域地层岩性多样、地质构造复杂, 受特殊的区域自然条件的影响, 该区降雨强度大, 特别是近年来极端降水集中, 出现频率上升。再加上地震、人类活动等因素的影响, 使该区地质环境条件发生强烈改变, 由此引发的滑坡、山洪泥石流等灾害的发育与分布比较广泛, 将会对白龙江流域城镇和村落等造成严重威胁, 阻碍城镇化进程。因此开展城镇尺度地质灾害危险性评价方法研究对防灾减灾具有很强的现实意义。

(2) 由于地质灾害自身的一些不确定性因素和致灾机理的复杂性导致对其危险性评价具有较大的难度, 加之城镇区灾种多、破坏强, 使得城镇地质灾害危险性评价内容较多。同时山区城镇化建设对地质灾害调查评价工作提出更精细化的要求, 难以采用传统的评价方法开展有效评价。应用优化的无限边坡模型、FLO-2D软件和Arcgis软件相结合的城镇地质灾害危险性评价技术方法, 并建立了适合研究区滑坡最大滑动距离预测表达式, 在很大程度上提高危险性评价的效率和精度, 能为城镇国土空间规划和防灾减灾提供更科学的依据。

(3) 以栅格作为基本评价单元, 在基于斜坡和泥石流危险性评价的基础上, 完成了城镇尺度的舟曲县城区地质灾害危险性区划。将危险性等级分为4级: 舟曲县城区地质灾害高危险区面积  $6.43 \text{ km}^2$ , 共发育灾害点32处, 威胁承灾体面积  $640.29 \text{ 万 m}^2$ ; 中危险区面积  $5.15 \text{ km}^2$ , 共发育灾害点7处, 威胁承灾体面积  $509.73 \text{ 万 m}^2$ ; 低危险区及以下面积  $15.80 \text{ km}^2$ , 共发育灾害点3处, 威胁承灾体面积  $1527.82 \text{ 万 m}^2$ 。

### 参考文献:

- [1] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版, 1982: 156-181.
- [2] 任非凡, 谌文武, 韩文峰. G212线陇南段泥石流发育成因及其时空分布特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 3237-3243.
- [3] 陈循谦. 白龙江中游的泥石流灾害[J]. 灾害学, 1987(4):

- 36-42.
- [4] 黄江成, 欧国强, 柳金峰. 白龙江干流泥石流分布特征及危险度评价[J]. 人民长江, 2011, 33(6): 105-107.
- [5] 魏兴丽, 何建勋, 于国强. 不同降雨特征条件下舟曲县地质灾害危险性区划[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 224-229.
- [6] 许晓霞, 张福平, 王有林, 等. 基于GIS和RS的舟曲县地质灾害易发性评价[J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(6): 26-31.
- [7] 陈玉. 基于经验权重方法的舟曲县泥石流易发性评估[J]. 防灾科技学院学报, 2013, 15(4): 54-59.
- [8] 舒和平, 刘东飞, 顾春杰, 等. 中下尺度区域泥石流灾害风险评价[J]. 山地学报, 2014, 32(6): 754-760.
- [9] 舒和平, 韩拓, 齐识, 等. 甘肃省南部泥石流运动规律的分析与研究[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 119-124.
- [10] 于国强, 张茂省, 王根龙, 等. 基于FLAC3D的三眼峪小流域危险性分析[J]. 西北地质, 2011, 44(3): 87-94.
- [11] 唐亚明, 李军, 李瑞冬, 等. 舟曲三眼峪泥石流风险评价[J]. 西北地质, 2011, 44(3): 81-86.
- [12] 宿星, 吴玮江, 叶伟林, 等. 甘肃舟曲县龙江新村滑坡特征及稳定性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 7-14.
- [13] 蒋树, 文宝萍, 黎志恒, 等. 甘肃舟曲锁儿头滑坡活动特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 69-74.
- [14] 牛全福, 冯尊斌, 张映雪, 等. 基于GIS的兰州地区滑坡灾害孕灾环境敏感性评价[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 29-35.
- [15] 姬怡微, 李成, 高帅, 等. 陕西省韩城市地质灾害风险评估[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 194-200.
- [16] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 995-1005.
- [17] 王高峰, 高幼龙, 王洪德, 等. 基于图幅调查的六盘山镇滑坡易发性研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(36): 22-29.
- [18] 王高峰, 杨强, 田运涛, 等. 泥石流易发性评价模型的构建—以白龙江流域石门乡羊汤河段为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 761-770.
- [19] 辛鹏, 吴树仁, 石菊松, 等. 基于降雨响应的黄土丘陵区滑坡危险性预测研究[J]. 地球学报, 2012, 33(3): 349-359.
- [20] 黄诗峰, 钟邵南, 徐美. 基于GIS的流域土壤侵蚀量估算指标模型方法—以嘉陵江上游西汉水流域为例[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 105-107.
- [21] 唐亚明. 陕北黄土滑坡风险评价及监测预警技术方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 94-124.
- [22] 陈语, 李天斌, 曾鹏. 致灾因素耦合作用下堆积体斜坡失稳概率研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(4): 60-66.
- [23] 黄勋, 唐川. 基于数值模拟的泥石流灾害定量风险评价[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1047-1055.
- [24] 余斌. 不同容重的泥石流淤积厚度计算方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(2): 207-221.
- [25] Brien J S. FLO-2D Reference Manual[R]. 2009.
- [26] 刘希林, 庙成, 田春山. 区域滑坡和泥石流灾害两种危险性评价方法的比较分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 71-78.

## Geological Hazard Risk Assessment of Zhouqu County in Bailong River Basin

WANG Gaofeng, YE Zhenan, LI Gang, TIAN Yuntao, CHEN Zongliang, GUO Ning and DENG Bing

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geology Survey, Baoding 071051, China)

**Abstract:** Geological hazard risk assessment is of great significance to urban land spatial planning and disaster prevention and mitigation management. At present, there are many methods for assessing the risk of geological hazards, but they mainly focus on regional or individual geological hazards, and less on urban-scale geological hazards. In this paper, Zhouqu County, a city with high incidence of geological hazards, is taken as the research object. The grid is divided into evaluation units and the detailed survey data of 1: 10000 geological hazards are taken as the basis. According to the physical and mechanical properties and erosion characteristics of slope rock and soil, the stability of different grid elements is calculated by infinite slope model, and the risk of urban slope is evaluated by combining the failure probability of slope and the sliding distance of slope constructed. On this basis, the risk of debris flow disaster is evaluated by using FLO-2D model. Finally, the risk of urban slope and debris flow is synthesized under ArcGIS platform. According to the results of sex evaluation, the risk assessment and regionalization of geological hazards in Zhouqu County under the condition of once-in-50-year rainfall have been completed. The evaluation result shows that the high risk area of geological disaster in Zhouqu county is 6. 43km<sup>2</sup> with 32 disaster sites and 640. 29 × 104m<sup>2</sup> of the threatened area. The middle dangerous area is 5. 15km<sup>2</sup> with 7 disaster spots, and the area of disaster-bearing body is 509. 73 × 1104m<sup>2</sup>. The low-risk area is 15. 80 km<sup>2</sup> with 3 disaster spots, and the area of disaster-bearing body is 1527. 82 × 104m<sup>2</sup>. The evaluation method in the study improves the process of risk assessment of geological hazards at the urban scale and provides a reference for the prevention and control of geological hazards in Zhouqu county.

**Key words:** geological hazard; risk assessment; FLO-2D; Bailong River Basin; Zhouqu county