

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.20

小流域地震地质灾害危险性评价

李佩佩, 沈军辉, 燕俊松, 陈 亮

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 本文以北川县杨家沟为小流域地震地质灾害危险性评价的典型实例, 根据地震地质灾害特征, 选取坡度、坡向、地层岩性、距断裂带距离、斜坡结构、高程和坡形 7 个评价因子, 在各评价因子对地震地质灾害影响程度分析基础上, 采用层次分析法确定评价因子的权重, 并在 GIS 平台下对各评价因子进行综合分析处理, 得到小流域地震地质灾害危险性评价图。研究表明, 杨家沟地震地质灾害最大影响因子为距断裂带距离, 其次为斜坡结构、坡度、地层岩性、高程、坡形及坡向; 地震地质灾害危险性评价预测表明, 杨家沟流域内高风险区面积 8.98 km², 占流域面积的 40.43%。对比杨家沟实际地震地质灾害分布情况, 占面积 70.74% 或占总数 66.38% 的地震地质灾害位于高风险区内, 表明危险性评价成果可信度较高。研究成果对小流域地震地质灾害危险性评价方法研究具有一定的意义。

关键词: 危险性; 地震地质灾害; 层次分析法; GIS

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0128-07

Risk assessment of seismic geological hazards in small watersheds

LI Peipei, SHEN Junhui, YAN Junsong, CHEN Liang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection
(Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: This paper takes Yangjia Gully, locating in Beichuan county of Sichuan province, as a typical case of seismic geological hazard risk assessment in small watershed, and selects 7 evaluation factors including slope, exposure, lithology, distance from the fault, slope structure, elevation and slope shape, by analyzing the characteristics of seismic geological hazards. Weights of these factors are also determined by using hierarchy analysis method according to their influential extents. Consequently, a seismic geological hazard assessment map of small watershed is obtained through a comprehensive analysis in GIS. The outcomes indicate that the most influential factor to the forming of seismic geological hazards in Yangjia Gully is the distance from the fault, and slope structure, slope, lithology, elevation, slope shape and exposure, in sequence, are relatively less influential. A prediction of seismic geological hazards is also conducted and demonstrates that the area of high risk in Yangjia Gully comes to 8.98 km², accounting for 40.43% of the watershed. Besides, comparing with the actual state, the area and quantity of seismic geological hazards in the high risk area account for 70.74% and 66.38% respectively of the total amount, which indicates that the prediction is highly reliable. Thus, this study has a certain significance to promote the research on seismic geological hazard risk assessment in small watershed.

收稿日期: 2016-07-20; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)资助课题(20115122110012); 中国地质调查局地质调查子项目(12120113011000)

第一作者: 李佩佩(1991-), 男, 甘肃平凉人, 在读硕士研究生, 主要从事地质灾害评价与防治工作。E-mail: 2675715414@qq.com

通讯作者: 沈军辉(1964-), 男, 浙江奉化人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质、环境地质研究。E-mail: jhshen2001@sina.com

Keywords: risk assessment; seismic geological hazard; analytical hierarchy process (AHP); geographical information system (GIS)

0 引言

近年来的地震活动特征表明地壳活动进入相对活跃期,地震诱发的一系列地质灾害给灾区人民带来了沉重灾难。现阶段,相关部门组织实施县(市)地质灾害调查与区划工作取得了一定成果,但总体上评价工作精度较低,评价成果还不能有效地应用于小流域(流域面积在 $5 \sim 30 \text{ km}^2$ 的自然闭合集水区^[1])的防灾减灾之中。小流域流域面积小,人口分散,地质灾害防灾减灾工作难度大。为了使评价成果更好地应用于小流域防灾减灾的具体实施,为流域建设规划及地质灾害高危险区的综合治理,开展高精度小流域地震地质灾害危险性评价是十分必要的。

本文借鉴现有地震地质灾害研究成果^[2-17],结合野外调研,并考虑原始资料获得的难易程度,选取影响地震地质灾害评价因子,以北川县杨家沟为典型实例,采用层次分析法,基于GIS平台,进行小流域地震地质灾害危险性评价。

1 地震地质灾害评价因子选取及量化赋值

地震地质灾害发生主要受坡度、坡向、地层岩性、斜坡结构、高程、坡形、地面粗糙度等斜坡自身性质的控制,也受到地震动峰值加速度、地震烈度等触发因素的影响。本文借鉴现有的地震地质灾害形成条件、发育特征等研究成果,结合野外调研及小流域自身特征,选取了坡度、坡向、地层岩性、距断裂带距离、斜坡结构、高程、坡形七个影响因素为地震地质灾害危险性评价的评价因子。

1.1 坡度

坡度对地震地质灾害发生的影响主要有两方面。一方面反映在该斜坡地段是否具备有效临空面,而有效临空面又与地形坡度有很大关系^[9],一般坡度越大地震地质灾害越发育。另一方面,随着坡度的增加,坡面有效受雨面积不断减小,导致坡面径流量随坡度增大而减少,冲刷能力相应减弱,有效受雨面积大的斜坡在地震作用下更容易发生崩滑。受上述两方面共同影响,斜坡的坡度越大,地震地质灾害愈发育,但当坡度大于某个值时,稳定性又会增加^[10]。结合汶川地震地质灾害的相关研究成果,当斜坡的坡度在 $20^\circ \sim 45^\circ$ 之间时,地质灾害最发育,大于 45° 次之,小于 20° 灾害发

育最少^[9-11]。因此,将坡度按危险性程度进行赋值,危险性越大,赋值越高,反之越低,最低赋值为1。

1.2 坡向

无论纬度、高程或坡度,其不同坡向上的日照、太阳辐射、温度、湿度和降水等级都有很大的差异^[13],它间接地影响斜坡稳定性。根据应力波的理论^[14],岩土体普遍存在裂隙,当压缩的地震波传播时遇到自由面,将反射成一个大小相等、方向相反的拉伸波,压缩波和拉伸波的叠加使岩土体产生拉裂破坏。唐春安等^[8]通过模拟动态冲击载荷模型试验,应力波从左侧向右侧传播,在右侧首先产生拉裂破坏,随着时间增加,最终斜坡破坏,这与实地调查中背靠震源方向滑坡明显比面向震源方向滑坡发育相吻合。表明应力波方向不同(与震源位置有关),边坡的破坏位置不同。因此,按照地震波传播方向的关系进行分类赋值,背靠震源方向赋值最高,面向震源方向赋值最低为1,其他的方向介于1与最高值。

1.3 地层岩性

地震地质灾害发育程度与岩性关系密切,不同岩石地层单元地质灾害分布数量差别较大。一般,硬岩和较硬岩地层中常发生崩塌灾害,较坚硬岩类中通常滑坡最集中发育,这与斜坡在非地震破坏的岩性特征有一定差别^[16]。地震地质灾害发育最多的岩性为砂岩、粉砂岩、灰岩、闪长岩、花岗岩等,其次为页岩、砂砾岩、黏土岩为主、偶夹板岩、千枚岩等。根据上述不同岩性对地震地质灾害的贡献,依次赋值。

1.4 距断裂带距离

地震地质灾害的空间分布主要受发震断裂带的控制。地震波对坡体的强烈冲击是触发地质灾害的决定性因素^[17]。距发震断层越近,地震波对坡体的作用越强烈,就越容易破坏。根据相关研究成果统计^[17-19],80%以上的地震地质灾害分布在断层两侧10 km以内,强发育区在断层7 km范围内。按距断裂带距离由远到近依次由小到大赋值。

1.5 斜坡结构

斜坡结构综合体现了地层产状与斜坡坡度和坡向的空间状况及组合形式^[20],在很大程度上决定了斜坡岩土体变形的方式和强度^[21],对地质灾害的分布起着重要的作用。根据斜坡坡度、坡向和岩层倾向、倾角四者在空间上的相互组合^[22],将斜坡结构类型划分为:

顺向飘倾坡、顺向层面坡、顺向伏倾坡、顺斜坡、横向坡、逆斜坡、和逆向坡 7 类。在地震作用下,顺向、斜向一顺向坡内有利于层面与节理面的贯通,更容易发生破坏。将顺向坡赋值最高,将逆向坡赋值为 1。其中顺向坡中的飘倾坡,倾角小于坡度,最危险;其次为坡度大于 10° ,倾角与坡度相等的层面坡;最后为倾角大于坡度的伏倾坡。

1.6 高程

根据斜坡地震动放大效应^[23],山顶的地震加速度比山脚放大效应明显。主要由于强震作用下,地震波丰富的波长成分与地形尺寸耦合作用,产生的动力效应超过或远远超过斜坡岩土体的强度进而产生破坏。在汶川地震中 74.8% 的崩滑地质灾害主要分布在 800 ~ 2 000 m^[24],其中 1 000 ~ 1 500 m 密度最大,高于 2 000 m 地质灾害明显减少。故将高程 800 ~ 2 000 m 赋值最高,高于 2 000 m 赋值次之,低于 800 m 的赋值为 1。

1.7 坡形

坡面形态主要有凹形坡、斜线坡和凸形坡^[13]三类。坡形影响地震波的传播方向和能量的释放,从而影响崩塌、滑坡的发育。一般用地面曲率来衡量坡形,地面曲率是对地形表面扭曲程度的定量化度量因子^[25],地面曲率决定地表及土壤中物质移动的相对速度,以及地表径流对坡面的侵蚀程度。地面曲率大于 0 为凸形坡,表明移动加速,侵蚀强度大;小于 0 为凹形坡,表明移动减速,侵蚀强度小。凸形坡,从基部到顶部,坡度随坡形而急剧复杂变化,导致凸形坡上部坡缘的高应力集中区,在其它条件一致的情况下,斜线坡和凹形坡对应应力在剖面上的分布影响较小^[22]。因此,凸形坡比其他坡形稳定性要差。根据斜坡曲率值由正到负依次由大到小赋值,最小赋值为 1。

2 层次分析法原理

将地震地质灾害影响的因素视为系统,按照分解、比较、判断、综合的思维方法进行决策,并按各因素间的相互关系分层次,形成一个多层次的结构体系。建立判别因子比较矩阵,最后求得各因子的相对权重。

根据前人的研究数据资料、专家意见和本文作者对北川县城野外考察的认识,加以平衡后给出的^[26]。一般引用 Saaty 等学者提出 1 ~ 9 标度对重要性判断结果进行量化,依次对两两指标进行比对赋值,将赋值结果矩阵化,得 $n \times n$ 阶矩阵。本文用方根法对判断矩阵

求解特征向量和最大特征值。

由于层次分析法是解决一些现象测度的一种方法(表 1),结果的不一致性是客观存在的,但这种不一致性需要一个度,因此一致性检验就非常有必要。一致性指标为:

$$C. R. = C. I. / R. I.$$

其中 $C. I. = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵 A 的最大特征值, $R. I.$ 为随机一致性指标^[28]。对于一致性比例,一般在 $C. R. = 0$ 时,可以称 A 是完全一致性矩阵,当 $C. R. < 0.1$ 时,该判断矩阵具有一致性,当 $C. R. > 0.1$ 时,则该判断矩阵不具有 consistency。

表 1 层次分析法评价尺度

成对比标准	定义	内容
1	同等重要	A 要素和 B 要素具有同样的重要性
3	稍微重要	认为 A 要素要比 B 要素稍微重要
5	相当重要	根据经验与判断,强烈倾向于 A 要素
7	明显重要	实际上非常倾向于 A 要素
9	绝对重要	有证据确定,在两个要素比较时, A 要素非常重要
1/3, ..., 1/9		用于上述标准之间的折中值
2, 4, 6, 8		A 要素与 B 要素比较时与上述说明相反

3 实例应用

3.1 杨家沟概况

杨家沟位于汶川地震重灾区北川县陈家坝乡,为侵蚀构造中山地形,地形坡度一般为 $20^\circ \sim 40^\circ$,流域最高高程 2 200 m,沟口处高程 800 m,相对高差 500 ~ 1 000 m。沟道全长约 9 km,流域面积约 20.69 km²。杨家沟沟谷上游呈“V”型,下游呈“U”型,谷宽 50 ~ 200 m。地层岩性主要为志留系韩家店组(Sh)页岩、绢云母千枚岩;志留系茂县组(Sm)绢云母千枚岩夹细粒粉砂岩;奥陶系宝塔组(Ob)块状粒晶灰岩、生物碎屑灰岩;寒武系油房组(ϵy)变凝灰质砂岩;寒武系邱家河组(ϵq)深灰-黑灰色碳质板岩,变碳质粉砂岩,局部有四宗坪侵入体(Ts)为辉绿玢岩。NE 向北川逆冲断层从杨家沟沟口通过,断层倾向北西,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。受构造走向控制,岩层走向以北东走向为主。沟内斜坡结构主要以顺斜坡、横向坡、逆斜坡、和逆向坡为主。根据中国地震局对汶川地震圈定的地震烈度图,杨家沟地震烈度达 XI 度。

受上述地形地貌、地层岩性及构造等的控制,汶川地震时杨家沟共发育大小地质灾害 119 处(图 1),类型以中小型崩滑为主。距离断裂带 4 km 范围内发育最为密集,造成大量人员伤亡。而且耕地、林地及农作

物大面积受损,水、电、通讯基本被摧毁,乡村道路 60% 被破坏。

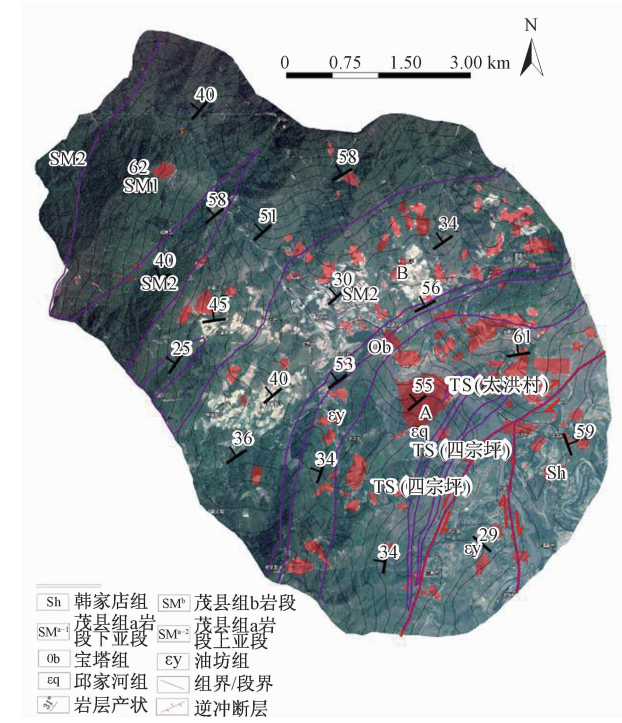


图 1 杨家沟流域特征

Fig.1 The characteristics of Yangjiagou watershed

3.2 判断矩阵的构造及一致性检验

对影响地震地质灾害发育的 7 个评价因子,按照 (表 2) 规则进行两两比较,矩阵结果见表 3。由于小流域内降雨差异基本可以忽略,但是有些因子对降雨敏感性强,故在因子对比时将降雨影响明显的因子在对比时赋值有所调整。计算得到矩阵的最大特征值为 7.428 8,各个评价因子的权重为 {0.129 8,0.023 4,0.190 8,0.459 9,0.094 2,0.051 3,0.051 3} (表 2)。一致性指标为 C. R. =0.054 <0.1,表明各评价因子相互比较在合理范围内。评价因子权重计算结果表明,距断裂带距离是对地质灾害影响最严重的因子,其他依次是坡度、斜坡结构、地层岩性、高程、坡形、坡向。

表 3 杨家沟地震地质灾害评价因子及其分类赋值

Table 3 Seismic geological disaster evaluation factors and its classification assignment for Yangjiagou		
评价因子	分类数量	分类赋值
坡度/(°)	7	7:31~40; 6:25~30; 5:41~45; 4:21~25; 3:>45; 2:11~20; 1:<10。
坡向/(°)	7	7:0~45; 6:46~90; 5:315~360; 4:91~135; 3:270~315; 2:136~180; 1:181~269。
斜坡结构	7	7:顺向飘倾坡;6:顺向层面坡;5:顺向飘倾坡;4:顺斜坡;3:横向坡;2:逆斜坡 1:逆向坡。
离断层的距离/km	7	7:0~1; 6:1~2; 5:2~3; 4:3~4; 3:4~5; 2:5~6 1:6~7。
地层岩性	5	5:εq 碳硅质板岩; 4:εy 变凝灰质砂岩; 3:Ob 块状粒晶灰岩、生物碎屑灰岩; 2:Sh 页岩、绢云母千枚岩 1:SM 绢云母千枚岩夹细粒粉砂岩。
高程/m	7	7:1 000~1 300;6:1 300~1 500;5:800~1 000;4:1 500~2 000;3:800~650;2:>2 000; 1:<650。
坡形	5	5:凸形坡; 4:上凸下凹形坡; 3:上凹下凸形坡; 2:斜线形坡; 1:凹形坡。

表 2 评价因子权重的成对比较矩阵

Table 2 Pair-wise comparison matrix for evaluation factor weights

评价因子	坡度	坡向	斜坡结构	离断层距离	地层岩性	高程	坡形	权重
坡度	1	5	1/2	1/5	2	3	3	0.129 8
坡向	1/5	1	1/7	1/9	1/6	1/3	1/3	0.023 4
斜坡结构	2	7	1	1/5	2	5	5	0.190 8
离断层的距离	5	9	5	1	6	7	7	0.459 9
地层岩性	1/2	6	1/2	1/6	1	2	2	0.094 2
高程	1/3	3	1/5	1/7	1/2	1	1	0.051 3
坡形	1/3	3	1/5	1/7	1/2	1	1	0.051 3

3.3 数据处理及危险性评价

在 ARCGIS 10.1 平台上,采用 Transverse _ Mercator 投影系统。本文用地震前 1: 50 000 地形图上的等高线、高程点得到数字高程模型 (DEM)。坡度、坡向、坡形 3 个因子图层均用 ARCGIS10.1 表面分析获得。岩性与断裂均来自于 1: 50 000 陈家坝幅地质图。斜坡结构根据现场调查得到的产状点数据,通过克里金插值法网格化处理,得到空间上连续的岩层倾向、倾角网格化数据,该数据栅格单元要与坡度、坡向保持一致。当作图区域地质构造比较复杂时,不能简单地进行空间插值,应当进行分区片处理——如断层、褶皱等进行岩层产状分块处理^[21]。然后利用 ARCGIS10.1 栅格计算器用岩层倾向减去坡向,岩层倾角减去坡度,将得到的两个图层进行叠加并重分类赋值,得到最终的斜坡结构图层。由于断裂带在图上为线性表示,首先利用 ArcGIS 10.1 邻域分析生成半径差为 1 km 的多环缓冲区,转化为与其他因子栅格单元相同的栅格图层。按照第 2 节中各评价因子中各个级别对地震地质灾害的影响程度重分类标准,将杨家沟各因子进行分类赋值 (表 3),得到各因子分区图。最后应用 ARCGIS10.1 平台空间分析模块中的栅格计算工具对各因子加权叠加,得到最终的研究区危险性评价分区图。

最后参照地质灾害风险度分级标准,结合研究区实际情况,使用 Arcgis10.1 重分类将研究区划分为高度危险区、中度危险区、低度危险区、极低度危险区 4 类,得到研究区地震地质灾害危险性评价结果(表 4、图 2)。

表 4 地质灾害危险性统计

Table 4 Statistics of Seismic geological disaster risk

评价结果	高危险区	中危险区	低危险区	极低危险区
预测面积/m ²	8 982 550.69	5 117 974.87	4 426 680.37	2 171 417.63
预测面积百分比/%	43.4	24.73	21.39	10.49
地质灾害面积/m ²	1 537 445.81	475 264.96	144 590.06	16 255.68
地质灾害面积百分比/%	70.74	21.87	6.65	0.7
地质灾害数量	79	27	10	3
地质灾害数量百分比/%	66.38	22.68	8.4	2.52

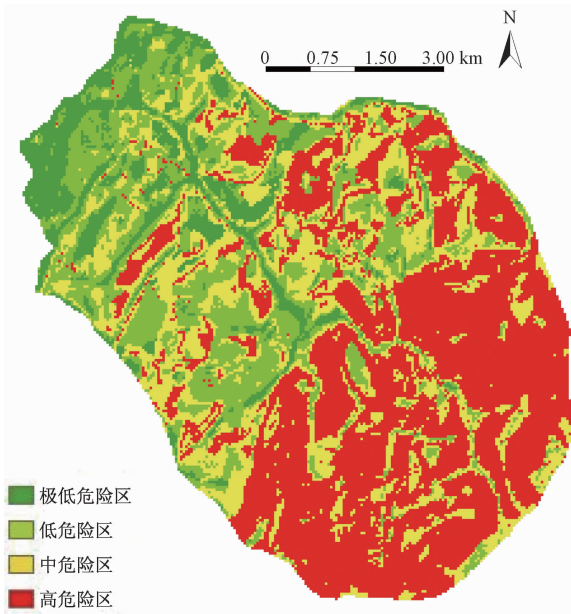


图 2 杨家沟危险性分区成果图
Fig.2 Risk zoning map of Yangjiagou

根据图 2 对杨家沟地震地质灾害进行初步分析,地质灾害高危险区集中在距断裂带 4 km 的区域及其一些零散区域内。高危险区约占杨家沟总面积的 43.4%,地质灾害 70% 以上分布在该区,且面积大于 $2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的地质灾害几乎全部在该区域内,与实际比较一致。在高危险区无论是地质灾害数量还是面积远远大于其他区,其中汶川地震发生的沙坝里滑坡(图 1 中的 A、图 3)形成堰塞湖,对下游造成严重威胁。

流域内一老滑坡体(图 1 中的 B、图 4),在本次地震中除局部滑塌外,整体未有明显变形复活,其原因是由于老滑坡体早期的高位势能得到充分耗散,并且深厚覆盖层堆积体吸收地震波的能量,使得老滑坡体在汶川强烈的地震荷载作用下只出现局部垮塌,没有出现整体失稳。在图 2 成果图中为低危险区。



图 3 沙坝里滑坡
Fig.3 Shabali landslide



图 4 老滑坡体
Fig.4 Old landslide

4 结论

(1)本文以杨家沟为小流域地震地质灾害危险性评价的典型实例,选取坡度、坡向、地层岩性、距断裂带距离、斜坡结构、高程、坡形 7 个评价因子。用层次分析法构建各评价因子比较矩阵,得到各评价因子的权重,得出对地震地质灾害影响最大的因子为距发震断裂带距离,其次为斜坡结构、坡度、地层岩性、高程、坡形及坡向。

(2)基于 GIS 平台分析处理得到的杨家沟危险性

评价成果图,将杨家沟按危险性程度分为高危险区、中危险区、低危险区与极低危险区4类,其中高度危险区面积为8.99 km²,占流域总面积的43.4%,主要集中于距NE向北川断裂4 km范围内,其他区域仅零散分布。

(3)评价结果与汶川地震地质灾害实际情况进行对比,占面积70.74%或占总数66.38%的地震地质灾害位于高危险区内,危险性评价成果可信度较高。表明在地质灾害影响因素分析及合理选用影响因子基础上,采用层次分析法应用于小流域地震地质灾害危险性评价是可行的。

参考文献:

- [1] 赵爱军. 小流域综合治理模式研究[D]. 湖北, 华中农业大学, 2005: 19-23.
ZHAO Aijun. The Research on comprehensive control model in small watershed[D]. Huazhong Agricultural University, 2005: 19-23
- [2] 唐川, 朱静, 张翔瑞. GIS支持下的地震诱发滑坡危险区预测研究[J]. 地震研究, 2001, 24(1): 73-81.
TANG Chuan, ZHU Jing, ZHANG Qiangrui. GIS Based earthquake triggered landslide hazard prediction [J]. Journal of Seismological Research, 2001, 24(1): 73-81
- [3] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京, 科学出版社, 2008: 20-40.
HUANG Runqiu, XU Qiang. Typical catastrophic landslides in China[M]. Beijing, Science Press, 2008: 20-40.
- [4] 黄润秋, 李为乐. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(3): 1-7.
HUANG Runqiu, LI Weile. Analysis on the number and density of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(3): 1-7.
- [5] 姚鑫, 许冲, 戴福初, 等. 四川汶川 Ms8 级地震引发的滑坡与地层岩性、坡度的相关性. 地质通报, 2009, 28(8): 1156-1162.
YAO Xin, XU Chong, DAI Fuchu, et al. Contribution of strata lithology and slope gradient to landslides triggered by Wenchuan Ms 8 earthquake, Sichuan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 1156-1162
- [6] 殷跃平, 张永双, 马寅生, 等. 青海玉树 MS 7.1 级地震地质灾害主要特征[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 289-296.
YIN Yueping, ZHANG Yongshuang, MA Yinsheng, et al. Research on major characteristics of geohazards induced by the Yushu Ms7.1 earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 289-296.
- [7] 刘应辉. 汶川地震区都汶公路沿线崩塌滑坡灾害特征与评价[D]. 兰州, 兰州大学, 2009: 18-22.
LIU Yinghui. The characteristic and evaluation of collapse and landslide disaster along Du-wen highway in wenchuan earthquake region [D]. Lanzhou, Lanzhou University, 2009: 18-22.
- [8] 杨德宏, 范文. 基于 ArcGIS 的地质灾害易发性分区评价——以旬阳县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 27(1): 82-86.
YANG Dehong, FAN Wen. Zoning of probable occurrence level of geological disasters based on ArcGIS—a case of Xunyang [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015. 27(1): 82-86.
- [9] 梁京涛. 遥感和 GIS 在汶川地震灾区地质灾害调查与评价中的应用研究——以青川县为例[D]. 成都, 成都理工大学, 2009: 30-35.
LIANG Jingtiao. Research on survey of earthquake triggering geohazards and risk assessment in Wenchuan earthquake stricken areas using RS and GIS—a case study of Qingchuan county [D]. Chengdu, Chengdu University of Technology, 2009: 30-35.
- [10] 祁生文, 许强, 刘春玲, 等. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 39-49.
QI Shengwen, XU Qiang, LIU Chunlin, et al. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5.12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 39-49.
- [11] 王秀英, 聂高众. 汶川 MS 8.0 级地震诱发崩滑特点及其与地震动参数对应关系初析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1378-1383.
WANG Xiuying, NIE Gaozhong. Characteristics of landslides induced by Wenchuan Ms 8.0 earthquake and preliminary analysis of their relations with ground motion parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1378-1383.
- [12] 庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 5.12 汶川地震崩塌滑坡分布特征及评价因子评价——以都江堰至汶川公路沿线为例[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 16-22.
ZHUANG Jianqi, CUI Peng, GE Yonggang, et al. Distribution characteristics and impact factors

- assessment of collapses and landslides caused by 5.12 Wenchuan earthquake: taking Dujiangyan-Wenchuan highway as a sample [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(2): 16-22.
- [13] 徐茂其. 地貌要素对自然边坡稳定性的影响[C]. 自然边坡稳定性分析暨华蓥山边坡变形趋势研讨会, 1991.
- XU Maoqi. Effect of landscape elements on natural slope stability [C]. Stability analysis and deformation trends seminar in Huaying Mountain Slope of the natural slope, 1991.
- [14] Cho S H, Ogata y, Kaneko K. Strain rate dependency of the dynamic fracture process in rock. International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40: 763-777.
- [15] 唐春安, 左宇军, 秦泗凤. 汶川地震中边坡浅表层破裂与抛射模式及其动力学解释[C]. 汶川大地震工程震害调查分析与研究, 2009.
- TANG Chunan, ZUO Yujun, QIN Sifeng. Slope shallow chipped and aerosol propellant mode and its dynamics explanation in Wenchuan earthquake [C]. Wenchuan Earthquake Engineering Disaster Investigation Analysis and Research, 2009.
- [16] 童立强, 祁生文, 刘春玲, 等. 喜马拉雅山东南地区地质灾害发育规律初步研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 721-729.
- TONG Liqiang, QI Shengwen, LIU Chunlin. Preliminary study of geohazard development patterns in the southeast region of himalaya mountains [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6): 721-729.
- [17] 黄润秋, 李为乐. 5.12 汶川大地震触发地质灾害的断层效应研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 19-28.
- HUANG Runqiu, LI Weile. Analysis of geo-hazard triggered by wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 19-28.
- [18] 黄润秋, 李为乐. 汶川地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592.
- HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th may, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [19] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 29-38.
- YIN Yueping. Features of landslide triggered by the wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 29-38.
- [20] 乔彦肖, 马中社, 吕凤军. 汶川地震地质灾害发育特点及动因机制分析[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 736-741.
- QIAO Yanxiao, MA Zhongshe, LYU Fengjun. Characteristics and dynamic cause mechanism of the Wenchuan earthquake geological hazards [J]. Geology in China, 2009, 36(3): 736-741.
- [21] 李景富, 牛瑞卿. 基于 GIS 的斜坡结构图自动化制图方法研究[J]. 人民长江, 2009, 40(19): 38-40.
- LI Jingfu, NIU Ruiqing. Research on automatic drawing method of slope structure map based on GIS [J]. Yangtze River, 2009, 40(19): 38-40.
- [22] 邱丹丹, 牛瑞卿, 赵艳南, 等. 斜坡单元支持下地震滑坡危险性区划——以芦山地震为例[J]. 吉林大学学报(自然科学版), 2015, 45(5): 1470-1478.
- Qiu Dandan, NIU Ruiqing, ZHAO Yannan, et al. Risk zoning of earthquake-induced landslides based on slope units: a case study on lushan earthquake [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(5): 1470-1478.
- [23] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京, 地质出版社, 2008: 112-150.
- ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. Principles of engineering geological analysis [M]. Beijing, Geological Publishing House, 2008: 112-150.
- [24] 祁生文. 强震触发斜坡失稳机理及动力过程研究结论报告[R]. 成都, 成都理工大学, 2009: 10-17.
- QI Shengwen. Earthquake triggered slope instability mechanism and dynamic process research report [R]. Chengdu, Chengdu University of Technology, 2009: 10-17.
- [25] 范红艳, 戚鹏程, 黄天勇. 关于 GIS 中三种地面曲率的探讨[J]. 南阳师范学院学报, 2011, 10(6): 66-69.
- FAN Hongyan, QI Pengcheng, HUANG Tianyong. Discussion on the three kinds of ground curvature in GIS [J]. Journal of Nanyang Normal University, 2011, 10(6): 66-69.
- [26] 眭封云. 库区公路边坡稳定性分析[D]. 陕西: 长安大学, 2006: 32-40.
- SUI Fengyun. The highway slope stability analysis of reservoir area [D]. Shanxi: Chang'an University, 2006: 32-40.