

# 地震滑坡危险性评价及编图 ——以映秀震中区为例

葛 华<sup>1</sup> 陈启国 王德伟

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

**摘要:**虽然宣称地球已进入地震多发期目前学术界还存在不少争议,但不得不承认近期的破坏性强震发生的频率较以往高。强震诱发的滑坡灾害也越来越成为了地质学家们研究的热点。在对一个地区发出中长期地震预报之后,如果也能相应地对该地区的斜坡稳定性进行评价,从而预测地震时滑坡最可能发生的地段,这对于减轻震区人民的伤亡和财产损失将具有重要的意义。本文对目前常用的地震滑坡危险性评价方法进行了简要介绍,并以“5.12”汶川地震映秀震中区为例,运用 Newmark 方法对该区进行了地震滑坡危险性评价和编图示范,探讨了目前常用地震滑坡危险性评价方法的优缺点及今后区域性地震滑坡危险性评价的发展方向。

**关 键 词:**地震滑坡;危险性评价;编图

**中图分类号:**P315.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-3657(2013)02-0644-09

## 1 引 言

虽然宣称地球已进入地震多发期目前学术界还存在不少争议,但不得不承认近期的破坏性强震发生的频率较以往高。2004 年,苏门答腊发生 9.1 级的巨震,隔年紧接着又发生了 8.6 级的强震;自 2008 年中国发生 5.12 汶川 8.0 级地震后,2010 年智利发生 8.8 级强震,2010 年 1 月 12 日海地又发生了 7.3 级地震,2011 年 3 月 11 日,日本东北部海域又发生了里氏 9.0 级强震。也就是说,在过去的 7 年间,全球已出现 4 次超过 8.6 级的特大地震,而强震诱发的滑坡灾害也越来越成为了地质学家们研究的热点。

中国西南山区区域地质背景复杂,新构造活动强烈,是中国大陆内强震活动频度最高的地区,加之该区特殊的地质环境条件、水文、降水等特点,发生在该区的强烈地震往往会引发大规模的地震滑坡、崩塌,造成严重的经济损失和人员伤亡。越来越多的人意识到,在对一个地区发出中长期地震预报之后,如果

也能相应地对该地区的斜坡稳定性进行评价,从而预测地震时滑坡最可能发生的地段,这对于减轻震区人民的伤亡和财产损失将具有重要的意义<sup>[1]</sup>。这实质上表明人们逐步认识到,针对区域地震滑坡进行危险性评价预测,在此基础上进行风险评估与管理,是滑坡减灾防灾的有效途径之一。

国内外学者对区域性的滑坡灾害易发性、危险性评价方法和模型进行了较多广泛深入的研究,但每种评价方法和模型都有各自适用条件和局限性,尤其是针对地震诱发的滑坡灾害,由于精确地震预测本身的困难,对地震滑坡的形成机理和孕灾地质环境条件认识上的不足,使得区域地震滑坡危险性评价方法的发展和推广受到阻碍。本文对目前常用的地震滑坡危险性评价方法进行了简要介绍,重点运用地震滑坡危险性评价的 Newmark 方法,并以“5.12”汶川地震映秀震中区为例,进行了地震滑坡危险性评价和编图示范,探讨了今后区域性地震滑坡危险性评价的发展方向。

收稿日期:2012-04-13;改回日期:2012-07-23

基金项目:中国地质调查局“地震滑坡灾害编图方法示范研究”(1212011140014)资助。

作者简介:葛华,男,1978 年生,博士,高级工程师,研究领域为地质灾害防治及危险性评价;E-mail:gehua\_cdcgs@qq.com。

## 2 地震滑坡危险性评价方法概述

国内外学者对区域性滑坡在降雨作用下的危险性评价方法研究较多,而由于地震预测本身的困难,对于区域地震滑坡危险性评价方法也大多借鉴降雨等因素诱发滑坡的研究成果。随着对地震诱发滑坡力学机理、动力作用认识的不断深入,数值模拟方法、3S 技术的不断发展,为区域性地震滑坡危险性评价的研究提供了新的技术手段。目前,针对地震滑坡危险性评价的方法大致可以分为以下三类:

### (一)统计分析法

统计分析法实际上是对某个区域某次地震后发生滑坡进行调查统计后,统计地震滑坡的分布与震中距、岩性、坡角等的关系,失稳斜坡(滑坡)面积与最大震级、最大震中距的关系等。1984 年美国学者 Keefer<sup>[2]</sup>通过对 1958—1977 年间刊登在《美国地震学会会刊》杂志上的 300 个地震报告数据的统计分析,得出了诱发各种类型滑坡的最小震级,以及一般地震滑坡分布与震中距、岩性、坡角等的关系。Rodriguez 等<sup>[3]</sup>对地震滑坡数据库进行了扩充,分析了滑坡面积、滑坡震中距与震级之间的关系,得出了与 Keefer 的研究结果类似的结论。Gorum T<sup>[4]</sup>,戴福初<sup>[5]</sup>等通过对汶川大地震诱发滑坡的统计分析,也得出了地震滑坡与震中距、地震地表破裂带距离、坡度坡向、PGA、岩性等的相关关系。

中国学者李天池<sup>[6]</sup>研究了地震与崩滑区范围的关系,结果表明对于一定震级的地震,崩塌和滑坡分布有一定的范围,超过这个范围,崩塌和滑坡就不会发生,因此把该范围称为地震崩滑区。乔建平<sup>[7]</sup>对中国川西南滇北接壤带 12 次地震滑坡进行了研究,结果表明,该地区滑坡的最大震中距与相应震级呈正相关关系。

统计分析方法的结果能对某地区某次地震发生后的地震滑坡发育分布规律进行较好的表述,但还未真正达到对区域地震滑坡的危险性进行预测评价的目的。

### (二)综合指标法

综合指标法的思路是对地震滑坡的影响因素按照影响力的大小分级赋值,综合考虑各个影响因素对地震滑坡的影响,可概况如下公式:

$$H(x_i) = \sum x_i \quad (1)$$

式中: $H(x_i)$ 为描述地震滑坡危险程度的函数; $x_i$ 为地震滑坡的影响因素。

中国学者王余庆、乔建平<sup>[8]</sup>等在收集地震滑坡实例资料基础上,使用综合指标法,考虑地层岩性、地形地貌、地质结构、水文气象等因素对地震崩滑的作用,并对不同因素的主次作用进行了区分和量化,对区域地震滑坡危险性进行了分级和评价。唐川<sup>[9]</sup>等采用综合指标法编制了云南省地震诱发滑坡危险区域预测图。综合指标法在实际应用中取得了一些不错的效果,但是较好的评价结果必须建立在对历史地震滑坡研究较充分的地方,及统计样本必须较精确才能获得较好的评价结果。同时,对各评价指标的选取和量化赋值的人为性,对评价结果也有较大影响。

### (三)确定性评价方法

对地震滑坡确定性的评价方法常常用于单体的斜坡动力稳定性分析中,也主要集中于两个方面:一是拟静力法,这一方法是基于刚体极限平衡法为基础发展起来的,通过地震系数把地震力等效为静载施加在斜坡上,研究的核心是如何估算地震系数的值。另一种方法是基于变形的单体斜坡稳定性估计,其中 Newmark<sup>[9]</sup>提出的地震滑坡永久位移估计方法具有划时代的意义,后来这一算法被很多学者改进和引用,并可应用于区域地震滑坡的危险性评价中。

## 3 地震滑坡危险性评价的 NEWMARK 方法

Newmark 最早利用滑块的永久累积位移分析,进行坝体的地震动力响应研究;Newmark 模型的理论基础是极限平衡理论,提出滑块的永久变形是由于在地震荷载作用下,滑动块体沿着最危险滑动面发生瞬时失稳后位移不断累积所致;当施加于最危险滑动面处的加速度超过临界加速度时,块体即沿破坏面发生滑动;对外力加速度与临界加速度的差值部分进行二次积分即得到永久位移量(图 2)。Newmark 模型的基本假设如下:

- (1)滑动块体为理想的刚塑性体,滑块内部不产生变形(图 1);
- (2)忽略块体滑动时岩土体抗剪强度的降低;
- (3)不考虑竖向地震力的作用;
- (4)仅当施加于块体的加速度超越临界加速度( $a_c$ )时,块体发生位移;

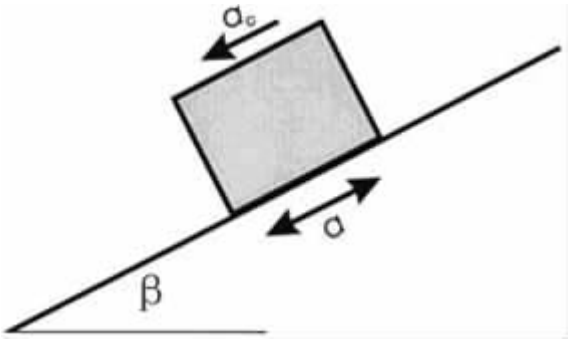


图 1 滑动块体模型( $a_c$  为临界加速度,  $a$  为地面地震加速度,  $\beta$  为边坡坡面倾角)

Fig.1 Sliding-block model used for Newmark analysis.  
 $a_c$  is the critical acceleration,  $a$  is the base acceleration representing the earthquake shaking,  $\beta$  is the slope angle

- (5)坡体失稳时会产生明显的破坏面;
- (6)滑块仅沿下坡方向产生位移。

自从 Newmark 方法建立后,许多学者利用 Newmark 方法进行地震作用下边坡稳定性评价及编图,后期不断得到改进,并在区域性地震滑坡危险性评价中得到广泛应用。1985 年 Wilson and Keefer<sup>[10]</sup>利用 Newmark 方法对洛杉矶地区进行地震边坡稳定分析并取得了较好的效果,2000 年 Jibson 等<sup>[11]</sup>对 1994 年加利福尼亚州 Northridge 地震进行研究时,利用震区滑坡编录、主震地震动记录、区域地质图和数字高程模型在 ArcGIS 平台上进行了 10 m 间距网格数字化。然后将计算得到的单元网格 Newmark 位移量与地震诱发的滑坡进行比较分析,得到失稳概率曲线,最后形成地震滑坡危险图,利用此图可以进行危险性评价和预测,同时还系统叙述了区域地震滑坡编图的详细方法及步骤。Newmark 方法通过 Jibson 等人的改进后,可以直接用于地震诱发滑坡的危险性区域预测,较之前述几种评价方法更能体现出地震发生前的预测和地震发生后的应急快速评估等优点。

4 映秀震中区应用实例

在映秀研究区,笔者获得了地震滑坡编图所需的各种数据,具体包括①由 5.12 地震引发的滑坡编目图;②1:50000 地形图;③1:50000 地质图;④岩组单元的物理力学数据;⑤地震监测数据,以上数据均用 GIS 工具进行了数字化及栅格化(10 m 栅格)处理。

地震滑坡危险性评价及编图按图 3 所示步骤进行。研究区具体评价及编图工作如下:

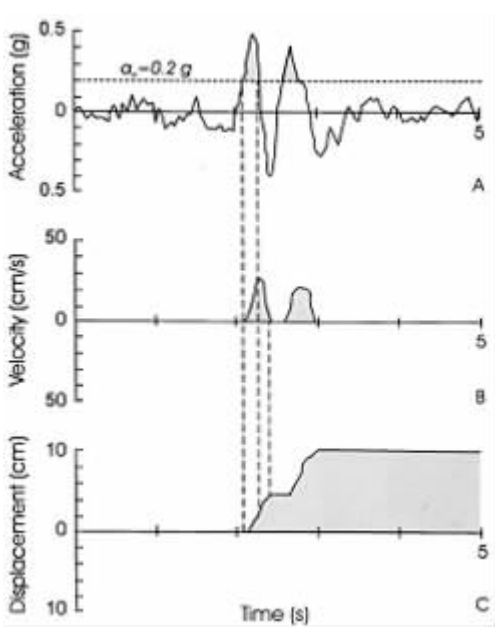


图 2 Newmark 方法, (A)为地震加速度,临界加速度为 0.2 g, (B)为滑块滑移速度, (C)为滑块位移

Fig.2 Demonstration of the Newmark-analysis algorithm (modified after Wilson and Keefer, 1983). (A) Earthquake acceleration - time history with critical acceleration (horizontal dashed line) of 0.20g superimposed, (B) Velocity of landslide block versus time, (C) Displacement of landslide block versus time

4.1 计算静态安全系数

无限边坡的静态安全系数可用以下公式计算

$$F = \frac{c' + (\gamma - m \gamma_w) z \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \tag{2}$$

其中:

- $c'$ ——有效内聚力 ( $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ );
- $\gamma$ ——岩土体重度 ( $\text{N/m}^3$ );
- $m$ —— $z_w/z$  (无量纲);
- $\gamma_w$ ——水的重度 ( $\text{N/m}^3$ );
- $z$ ——破坏面深度 (m);
- $z_w$ ——破坏面以上的地下水位埋深(m);
- $\beta$ ——边坡坡面倾角 ( $^\circ$ );
- $\phi'$ ——有效内摩擦角 ( $^\circ$ ).

考虑到区域性地震滑坡评价的特点,对以上公式中的一些参数的取值可作简化处理,由于地震时该区未进入汛期,前期降雨相对较少,在进行安全系数计算时可以不考虑地下水的影响,因此,公式中的  $m$  值取 0, 同时研究区大多数滑坡破坏面深度约 3 m,因而  $z$  值取 3 m。

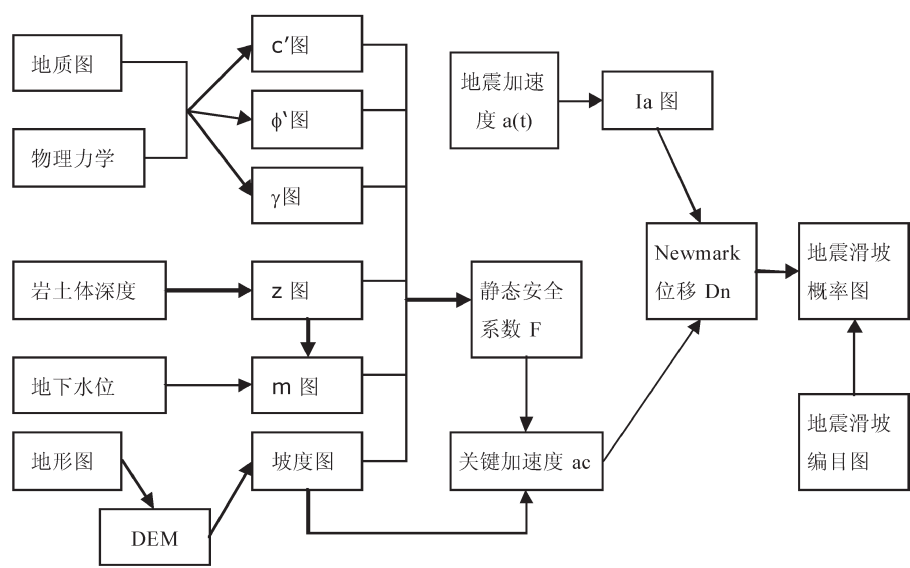


图 3 地震滑坡编图流程图

Fig.3 Flow chart showing steps involved in producing a seismic landslide hazard map

4.1.1 地质图

编图区内的地质图(图 4)主要参考映秀幅地质图(1:50000)<sup>①</sup>和映秀幅区域地质调查报告进行数字化处理。

以映秀—北川断裂为界,研究区可分为两个工程岩组区:其一为中央断裂北西侧以坚硬块状岩浆岩和侵入岩岩组为主的彭灌杂岩体;其二为中央断裂南东侧以沉积岩为主的碎屑岩类。彭灌杂岩体长轴呈北

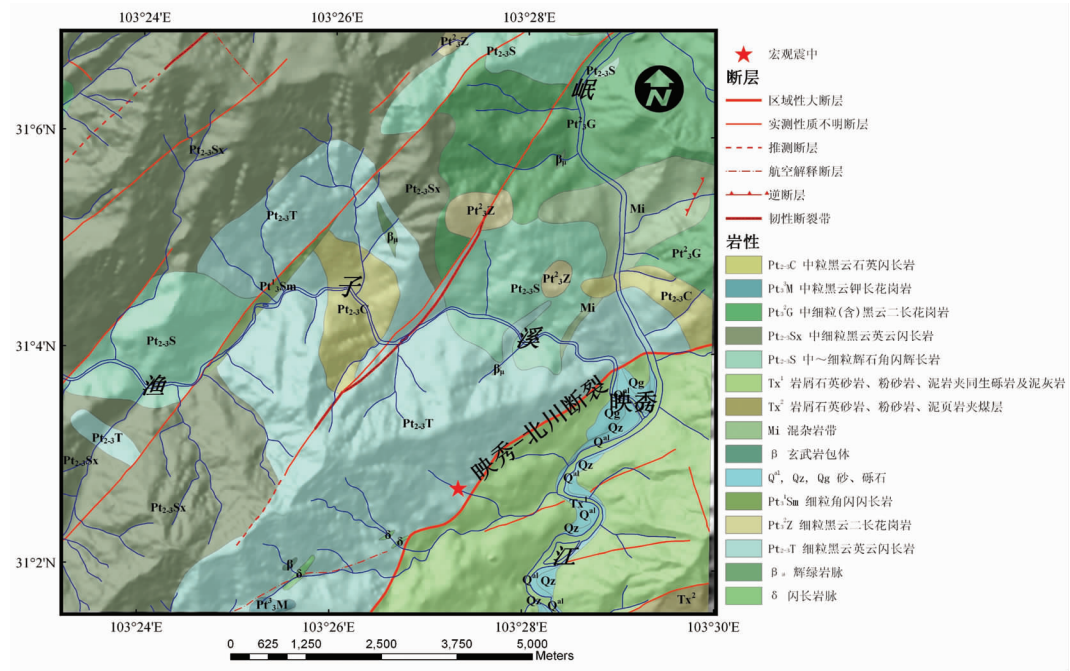


图 4 研究区地质图

Fig.4 Geological map of the study area

①成都理工学院区域地质调查一队,中华人民共和国区域地质图——1:50000 映秀幅(H-48-27-D),1995.

东-南西向延伸,岩石混染、混合岩化、自变质及动力变质强烈,为喷出-侵入,由超基性-酸性岩组成的多期复式杂岩体,其岩性极为复杂。沉积岩类以中生界侏罗系上统须家河组一段( $T_3x^1$ )-须家河组二段( $T_3x^2$ )为主,为海相、海陆交互相河湖沼泽相含煤建造。沿岷江分布有少量第四系广汉组( $Qg$ )、资阳组( $Qz$ )及现代河流沉积( $Qal$ ),其岩性主要为砂、砾石。

4.1.2 物理力学参数

物理力学参数通过收集分析区内已有资料和计算机反演模拟取得,区内各岩组单元的有效内聚力( $c'$ ),有效内摩擦角( $\phi'$ )及岩土体重度( $\gamma$ )取值见表 1。

通过把参数赋于研究区内的评价栅格单元中,可得到有效内聚力( $c'$ )图(图 5),有效内摩擦角( $\phi'$ )图(图 6)及岩土体重度( $\gamma$ )图(图 7)。

4.1.3 DEM

10 m 精度的 DEM 通过矢量化的 1:50000 地形图生成,生成的 DEM 见图 8。

4.1.4 坡度图

通过 DEM 得到的坡度图见图 9。

4.1.5 静态安全系数图

通过有效内聚力( $c'$ )图、有效内摩擦角( $\phi'$ )图、

土体重度( $\gamma$ )图及坡度图等的空间栅格计算可得到静态安全系数图(图 10)。

4.2 计算临界加速度

$$a_c \text{ 的值可利用下列公式计算:}$$
$$a_c=(F_s-1)g \sin \beta \tag{3}$$

$F_s$  为滑块的静态安全系数, $g$  为重力加速度, $\beta$  为边坡坡度。通过(3)式计算所得的临界加速度( $a_c$ )图见图 11。

4.3 计算 Newmark 位移

若按照 Newmark 理论定义的位移计算式,对地震时程曲线中外力加速度与临界加速度差值部分进行二次积分方可得到 Newmark 永久位移值。但在应用此方法进行区域性地震滑坡评价时,显然涉及地震参数获取及海量数据计算的问题,故必须对其改进。结合中国实际,采用 Jibson<sup>[12]</sup>研究得到的经验公式进行计算,公式如下:

$$\log_{10}D_N=-2.710+\log_{10}\left[\left(1-\frac{a_c}{PGA}\right)^{2.335}\left(\frac{a_c}{PGA}\right)^{-1.478}\right]+0.424M_w\pm0.454\tag{4}$$

其中, $D_N$  为 Newmark 位移 (cm), $a_c$  为临界加速度( $m/s^2$ ),PGA 为峰值加速度。

表 1 研究区各岩组单元的物理力学参数取值  
Table 1 Shear strengths assigned to geological formations in the study area

| 序号 | 地层代号           | 岩组单元   | 岩性                | $c(p)$ | $\phi'(^{\circ})$ | $\gamma(N/m^3)$ |
|----|----------------|--------|-------------------|--------|-------------------|-----------------|
| 1  | $Q^al$         | 现代河流沉积 | 砂、砾石              | 34000  | 35                | 21500           |
| 2  | $Q^z$          | 资阳组    | 砂、砾石              | 34000  | 35                | 21500           |
| 3  | $Q^g$          | 广汉组    | 砂、砾石              | 34000  | 35                | 21500           |
| 4  | $T_3x^2$       | 须家河组二段 | 岩屑石英砂岩、粉砂岩、泥页岩夹煤层 | 35000  | 32                | 21700           |
| 5  | $T_3x^1$       | 须家河组一段 | 岩屑石英砂岩、粉砂岩、泥岩及泥灰岩 | 36000  | 34                | 21700           |
| 6  | $Pt_{33}^M$    | 马桑坪单元  | 中粒黑云钾长花岗岩         | 40000  | 36                | 22000           |
| 7  | $Pt_{23}^G$    | 关山沟单元  | 中细粒(含)黑云二长花岗岩     | 40000  | 36                | 22000           |
| 8  | $Pt_{23}^Z$    | 皂角湾单元  | 细粒黑云二长花岗岩         | 40000  | 36                | 22000           |
| 9  | $Pt_{23}^{Sx}$ | 烧香洞单元  | 中细粒黑云英云闪长岩        | 40000  | 36                | 22000           |
| 11 | $Pt_{23}^T$    | 头道桥单元  | 细粒黑云英云闪长岩         | 40000  | 36                | 22000           |
| 12 | $Pt_{23}^C$    | 川兴店单元  | 中粒黑云石英闪长岩         | 40000  | 36                | 22000           |
| 13 | $Pt_{23}^S$    | 上坪单元   | 中~细粒辉石角闪辉长岩       | 38000  | 34                | 22000           |
| 14 | $Pt_{13}^{Sm}$ | 上木江坪单元 | 细粒角闪闪长岩           | 40000  | 36                | 22000           |
| 15 | Mi             | 混杂岩带   | 混杂岩带              | 36000  | 33                | 22000           |
| 17 | $\beta \mu$    | 辉绿岩脉   | 辉绿岩脉              | 35000  | 36                | 22000           |
| 19 | $\delta$       | 闪长岩脉   | 闪长岩脉              | 40000  | 36                | 22000           |
| 21 | $\beta$        | 玄武岩包体  | 玄武岩包体             | 35000  | 36                | 22000           |

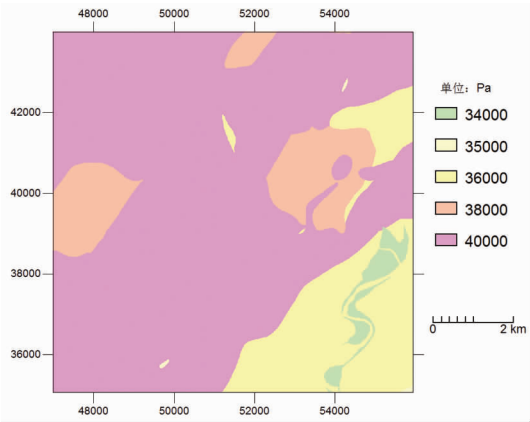


图 5 有效内聚力( $c'$ )图  
Fig.5 effective cohesion( $c'$ )

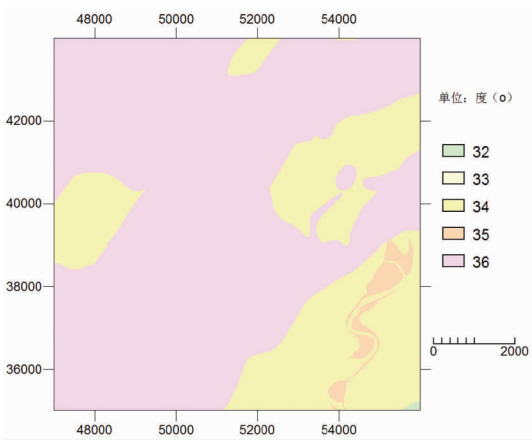


图 6 有效内摩擦角( $\phi'$ )图  
Fig.6 effective friction angle( $\phi'$ )

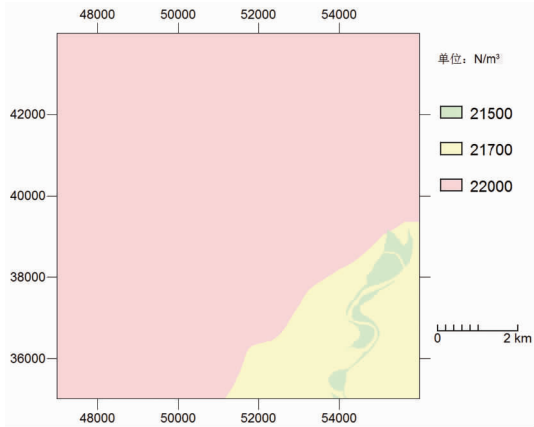


图 7 岩土体重度( $\gamma$ )图  
Fig.7 material unit weight( $\gamma$ )

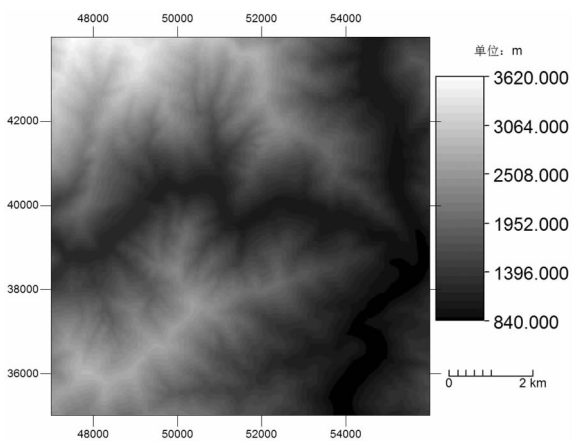


图 8 数字高程模型(DEM)  
Fig.8 Digital elevation model (DEM)

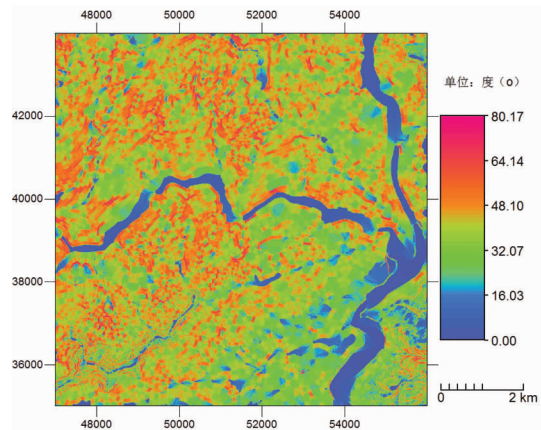


图 9 坡度图  
Fig.8 Slope angle map

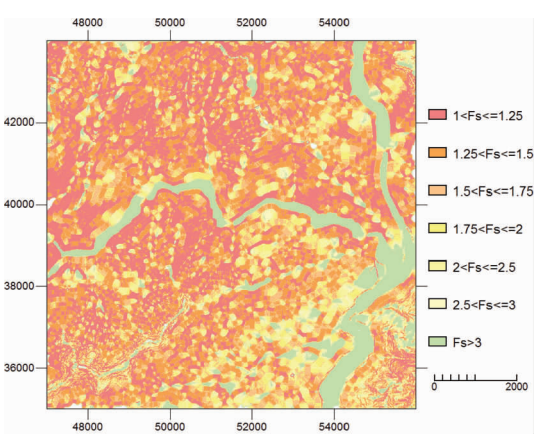


图 10 静态安全系数图  
Fig.10 Static factor-of-safety map

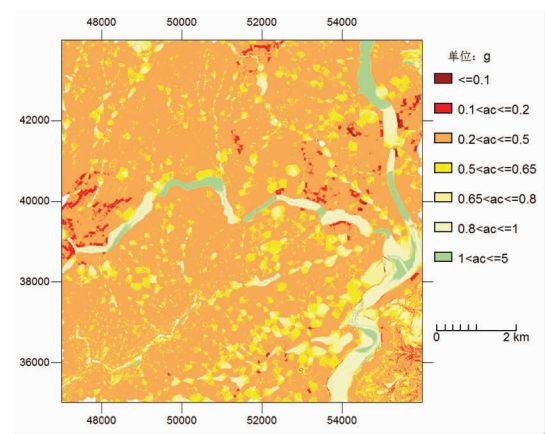


图 11 临界加速度(ac)图  
Fig.11 Critical acceleration (ac)

由于研究区内无地震监测站，采用映秀镇以西约 20 km 的卧龙站地震监测站的地震时程数据来计算  $D_{No}$ 。

通过计算所得 Newmark 位移( $D_N$ )图见图 12。

4.4 计算边坡失稳概率

Newmark 位移与边坡失稳不存在直接联系,但可将其与实际的地震滑坡编目进行对比分析以确定  $D_N$  与地震滑坡危险性之间的关系。美国南加州区域地震滑坡易发性的已有研究成果表明：对于浅层分裂型滑坡,首先将 Newmark 永久位移  $D_N$  进行分组后并利用 GIS 系统统计每个分组内处于滑坡源区的  $D_N$  栅格单元数与该分组内  $D_N$  总栅格单元数的比值，然后将该比值视为地震滑坡的失稳概率或易发性指数并作为因变量基于 Weibull 方程建立其与  $D_N$  的回归方程,最后利用所建立的回归方程对地震滑坡的易发性进行估算将地震滑坡中部高程以上面积定义为滑坡源面积，并以 Santa Susana 山区的 Northridge 地震触发滑坡编目为数据源建立的地震滑坡易发性指数与  $D_N$  的回归方程具有如下形式：

$$P(D_N)=m[1-\exp(aD_N^b)]$$
 (5)

其中方括号内为 Weibull 方程，系数  $m$  表示  $P(D_N)$  的最大值,而  $a$ 、 $b$  为选定参数,与每个分组内处于滑坡源区的  $D_N$  栅格单元数与该分组内  $D_N$  总栅格单元数的比值有关。滑坡编网图见图 13。

利用相同的方法，通过映秀震中区地震滑坡详细的编目数据拟合得到的边坡失稳概率函数为：

$$P(D_N)=0.5573[1-\exp(-1414D_N^{1.260})]$$
 (6)

4.5 滑坡概率分布图

Newmark 位移( $D_n$ )图的基础上,利用边坡失稳

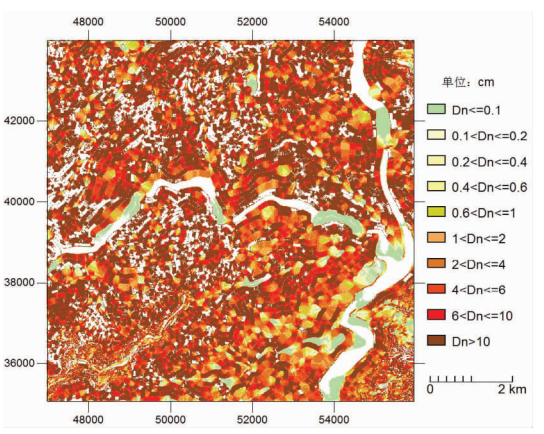


图 12 Newmark 位移( $D_n$ )图  
Fig.12 Newmark displacements ( $D_n$ )

概率函数(式 6)进行计算,从而得到滑坡概率分布图(图 14)

5 存在问题及建议

(1)综上所述,地震滑坡的危险性评价方法已经从定性逐步转变为定量研究，每种评价方法和模型都有各自适用条件和局限性。但由于精确地震预测本身的困难，以及对地震滑坡的形成机理和孕灾地质环境条件认识上的不足，目前地震滑坡危险性评价仍有很多难点。

(2)统计分析方法的结果能对某地区某次地震发生后的地震滑坡发育分布规律进行较好的表述，但单纯由地震震级与滑坡影响范围的统计公式推算出的滑坡范围过于粗略，还未真正达到对区域地震滑坡的危险性进行预测评价的目的。

(3)综合指标法在实际应用中取得了一些不错的效果，但是较好的评价结果必须建立在对历史地震滑坡研究较充分的地方，及统计样本必须较精确才能获得较好的评价结果。同时,对各评价指标的选取和量华赋值的人为性,对评价结果也有较大影响，并且容易忽视不同区域对地震滑坡最佳因素组合的考虑。

(4)基于定量分析的确定性方法依赖于运算和滑坡体强度参数的取值和地震参数的取值，具有理论上的优势,只要对模型输入数据选择恰当,是能够取得较高的精度的。但这些确定性方法（比如 Newmark 方法)所需的岩土体抗剪强度参数和地震作用参数较多，如何在区域性的范围内合理选取是一个难点。

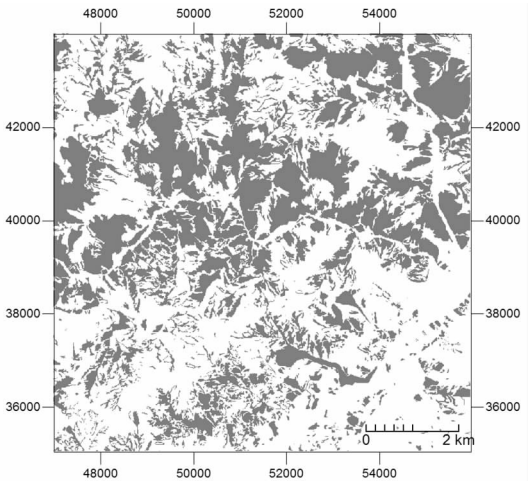


图 13 滑坡编目图

Fig.13 Landslides triggered by the earthquake

(5)在进行区域滑坡危险性评价时要依据研究区域的大小及相关资料的详细程度选择恰当的评价方法。较小的区域,如果能获得岩土工程的详细资料,可用滑坡稳定性的各种计算模型来评价;研究区域较大,且对历史滑坡研究较充分的地区,可用统计模型或综合指数法来进行评价。

(6)无论选用何种评价方法,重中之重是滑坡编目数据的准确和全面。滑坡编目数据的详细程度、精度、比例尺是决定滑坡危险性评价精度和比例尺的关键要素。

参考文献 (References):

[1] 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 Xiangrui. GIS Based Earthquake Triggered Landslide Hazard Prediction [J]. Journal of Seismological Research, 2001, 24(1):73-81 (in Chinese with English abstract).

[2] Keefer D K. Investigating landslides caused by earthquakes——A historical review[J]. Surveys in Geophysics, 2002, 23(6), 473-510.

[3] Rodríguez C E, Bommer J J, Chandler R J. Earthquake-induced landslides:1980 -1997 [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(5):325-346.

[4] Gorum T. et al. Distribution pattern of earthquake -induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake[J]. Geomorphology, 2010, 12.03.

[5] Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40:883-895.

[6] 李天池. 地震与滑坡的关系及地震滑坡预测的探讨[C]/ 铁道部

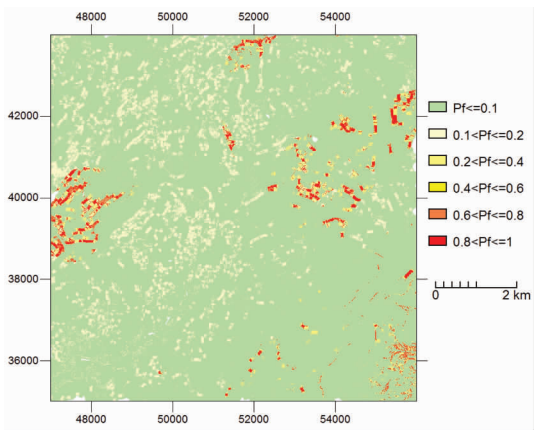


图 14 滑坡概率分布图

Fig.14 Map showing probability of seismic triggering of landslides

科学研究院西北研究所. 滑坡文集(第二集). 北京:人民铁道出版社, 1979:127-142.

Li Tianchi. Earthquake and landslide relations and seismic landslide prediction [C] / / Northwest Institute of Railway Sciences Academy. Landslide Papers Collected (Part 2) Beijing:People's Railway Publishing House, 1979:127 -142(in Chinese with English abstract).

[7] 乔建平, 赵宇. 滑坡危险度区划述评 [J]. 山地学报, 2001, 19(2): 157-160.  
Qiao Jianping, Zhao Yu. Review on rick degree regionalization of Landslide[J]. Journal of Mountain Research, 2001, 19(2):157-160 (in Chinese with English abstract).

[8] 王余庆, 高艳平, 辛鸿博. 预测岩土边坡地震崩塌的综合指标法研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3):311-314.  
Wang Yuqing, Gao Yanping, Xin Hongbo, et al. Study on comprehensive index method for predicting earthquake -induced landslides [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (3):311-314(in Chinese with English abstract).

[9] Newmark N M. Effects of earthquakes on dams and embankments [J]. Geotechnique, 1965, 15(2):139-160.

[10] Keefer D K, Wilson R C. Predicting earthquake -induced landslides, with emphasis on arid and semi-add environments [J]. Landslides in a Semi-Arid Environment, 1989, (2):118-149.

[11] Jibson R W, H arp E L, Michael J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide [J]. Eng. Geol., 2000, 58: 271-289.

[12] Jibson R W. Regression methods for estimating coseismic landslide displacement [J]. Engineering Geology, 2007, 90:209-218.

[13] 陈晓利. 人工智能在地震滑坡危险性评价中的应用[D]. 北京:中国地震局地质研究所, 2007.  
Chen Xiaoli. Application of Artificial Intelligence to Assessment of Earthquake -induced Landslide Susceptibility [D]:Beijing:Institute of Geology of China Earthquake Administration, 2007.

## The assessment and mapping of seismic landslide hazards: A case study of Yingxiu area, Sichuan Province

GE Hua, CHEN Qi-guo, Wang De-wei

*(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)*

**Abstract:** Although there exists controversy concerning the problem whether the Earth has entered into the earthquake-prone period or not, it is generally accepted that the frequency of the recent devastating earthquake is higher than that in the past. The earthquake-induced landslides are increasingly becoming the research focus of geologists. The prediction of the earthquake-induced landslide prone area and the assessment of the seismic landslide hazards are of great significance for reducing casualties and property losses after a regional long-term earthquake prediction. In this paper, the commonly used seismic landslide hazard evaluation methods are presented and the advantages and disadvantages of these methods are discussed. As an example, the seismic landslide hazards assessment and mapping in Yingxiu area was conducted by using Newmark model.

**Key words:** earthquake-induced landslides; hazard assessment; mapping

---

**About the first author:** GE Hua, male, born in 1978, senior engineer, doctor, mainly engages in the geohazards prevention and hazard assessment; E-mail: gehua\_cdcgs@qq.com.