

贾召亮,郑川,吴艳梅,等. 2023. 基于 Newmark 模型的地震滑坡承灾体风险评估——以 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震为例[J]. 地震研究,46(3):366-375,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0043.

Jia Z L,Zheng C,Wu Y M,*et al.* 2023. Risk assessment of the hazard-bearing bodies by earthquake-induced landslides based on the Newmark model:A case study of the 2014 Ludian,Yunnan M_s 6.5 earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*,46(3):366-375,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0043.

基于 Newmark 模型的地震滑坡承灾体风险评估 ——以 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震为例*

贾召亮¹, 郑川¹, 吴艳梅¹, 张鹏², 许瑞杰¹, 壮延¹, 曹彦波¹

(1. 云南省地震局, 云南昆明 650224; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南昆明 650206)

摘要: 以云南省昭通市为研究区, 利用区域地质和地形数据, 基于 Newmark 位移模型开展斜坡临界加速度计算与地震滑坡危险性分析; 基于滑坡滑动距离统计模型, 建立简化的地震滑坡影响范围预测方法; 利用 2014 年鲁甸 6.5 级地震震动峰值加速度模拟数据, 引入建筑物、人口和道路数据, 尝试开展地震滑坡承灾体风险评估。结果表明: 昭通市地震滑坡高易发区主要分布在河流两岸陡坡地区和软弱岩层集中分布区域, 受坡度和岩性因素控制明显; 鲁甸地震因地质灾害死亡人口均分布在地震滑坡威胁建筑物和人口较多的乡镇; 地震滑坡道路致灾高风险路段与实际受灾严重路段重合度较高; 评估结果能在区域尺度反映承灾体的风险分布情况。

关键词: Newmark 模型; 地震滑坡; 承灾体; 风险评估; 鲁甸地震

中图分类号: R315.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)03-0366-10
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0043

0 引言

地震诱发的滑坡灾害是我国大陆山区最常见且破坏力最强的地震次生灾害(张铎等, 2013), 往往会造成大量的人员伤亡和经济损失。发生中强地震时, 其诱发的滑坡崩塌灾害, 特别是在山岳地区, 危害往往比地震直接灾害还要大(李忠生, 2003)。如 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震触发滑坡、崩塌、碎屑流等地质灾害点 3~5 万处, 致使重灾区房屋被毁、河道阻塞、交通中断、救援受阻, 直接造成约 2 万人死亡(黄润秋, 2009; 殷跃平, 2008); 2012 年 9 月 7 日彝良 5.7 级和 5.6 级地震触发滑坡 259 处, 崩塌、滚石 189 处, 掩埋校舍、砸毁房屋、阻断河流、阻断交通(王东坡等, 2013), 60 人因崩滑死亡, 占地震总

死亡人数的 74% (白仙富等, 2013); 2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震触发滑坡灾害点 3 883 处(许冲等, 2013), 滑坡、崩塌、落石等次生灾害砸毁民房、阻断交通, 造成多人伤亡(黄润秋等, 2013; 裴向军, 黄润秋, 2013); 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 6.5 级地震在震中 250 km² 的区域内触发面积 100 m² 以上山体滑坡 1 024 处(许冲等, 2014), 掩埋村庄、堵塞水道、阻断交通, 约 200 人因地震崩滑死亡或失踪(李永强, 李兆隆, 2016; 刘爱文等, 2014)。因此, 开展地震滑坡承灾体的风险评估工作对减轻地震灾害损失具有重要意义。

Newmark (1965) 在地震对坝体影响的研究中提出了滑块位移分析方法, 将滑坡体假设为具有临界加速度的刚塑性滑块; 当地震加速度超过临界加速度时, 滑块克服摩擦阻力开始滑动。New-

* 收稿日期: 2022-09-08.

基金项目: 中国地震局地震应急与信息青年重点任务 (CEA-EDEM (ITNS-202319)); 云南省地震局地震科学青年基金项目 (2022K07); 云南地震灾害风险调查和重点隐患排查工程——典型区域人员伤亡修正评估。

第一作者简介: 贾召亮 (1992-), 工程师, 主要从事地震应急相关理论研究工作. E-mail: 1063039949@qq.com.

mark 位移模型提出以来被众多学者应用和完善,并衍生出可以利用 GIS 技术和地震动参数计算滑坡永久位移的简化模型,被广泛应用到地震滑坡危险性评估中 (Jibson *et al.*, 2000; Peng *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2015; 王涛等, 2015; 徐声鑫等, 2022)。近年来,该方法逐渐被国内学者关注,并用于开展地震滑坡危险性评估工作。如王涛等 (2013)、陈晓利等 (2013)、刘甲美等 (2017)、杨志华等 (2017) 采用 Newmark 位移模型,开展了地震灾区地震滑坡危险性评估工作;程小杰等 (2017)、李雪婧等 (2019)、梅伟等 (2022) 和王琳等 (2021) 基于地震动参数区划数据开展了区域地震滑坡危险性评估工作;Peng 等 (2009) 将位移大于临界值的区域视为滑坡潜在源区,以南投地震为例开展地震滑坡影响范围预测,结果表明 Newmark 位移模型在地震滑坡易发性和危险性评估中具有较好的适用性。本文在已有研究成果基础上,以云南昭通市为研究区,计算区域斜坡临界加速度,引入建筑物、人口、道路等承灾体数据,以 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震为例开展基于 Newmark 位移模型的地震滑坡承灾体风险评估,以为区域地震滑坡承灾体风险评估、地震灾害防治方案制定、地震应急救援提供参考。

1 研究区概况

昭通市 ($26^{\circ}55' \sim 28^{\circ}36' \text{N}$, $102^{\circ}52' \sim 105^{\circ}19' \text{E}$) 位于云南省东北部,是云贵高原向四川盆地的过渡带,总面积 2.3万 km^2 ,地势西南高、东北低,最高海拔 4040m ,最低海拔 268m (图 1)。境内分布有金沙江、牛栏江、大关河、洛泽河等 393 条河流,均为雨水补给的高原河流类型 (《云南省地图集》编纂委员会, 2019)。2020 年,昭通市常住人口 509.3 万人,人口密度 $221 \text{人}/\text{km}^2$,生产总值 1 288.74 亿元 (云南省统计局, 2021)。

从地理位置上来看,昭通市位于川滇地块和华南地块之间的交界地带 (张培震等, 2003),分布有小江断裂、马边—盐津断裂、五莲峰断裂、鲁甸—昭通断裂等第四纪活动断裂 (安晓文等, 2018; 陈君贤等, 2021)。研究区构造运动强烈,地震

频发,加之境内地层岩性复杂、山高坡陡、岩石破碎,地质条件脆弱;一旦发生地震,地壳应力强烈释放,对地表岩土体扰动剧烈,极易诱发次生地质灾害。境内可开发利用的土地资源有限,居民地、生命线工程、耕地等多分布在山地缓坡和河谷地区,地震次生地质灾害往往会造成严重损失。如 2006 年 7 月 22 日盐津 5.1 级地震、2012 年 9 月 7 日彝良 5.7 级和 5.6 级地震、2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震等均诱发了严重的次生地质灾害,造成大量人员伤亡和经济损失 (非明伦等, 2006; 白仙富等, 2013; 李永强, 李兆隆, 2016; 宴金旭等, 2021; 钟江荣等, 2021)。昭通市地震活动频率高、地质灾害易发、地震次生地质灾害损失重,将昭通市作为研究区开展地震滑坡承灾体风险评估,对昭通地区地震灾害防治和地震应急救援工作具有重要意义。

2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分,云南省鲁甸县 (27.1°N , 103.3°E) 发生 6.5 级地震,震源深度 12km 。地震造成云南省鲁甸县、巧家县、昭阳区等县 (区) 的 70 个乡镇遭受不同程度破坏,617 人死亡、112 人失踪、3 143 人受伤,直接经济损失 235.78 亿元^①。本文以鲁甸 6.5 级地震的震级和震中位置作为设定地震参数,开展地震灾区地震滑坡危险性和承灾体风险评估。

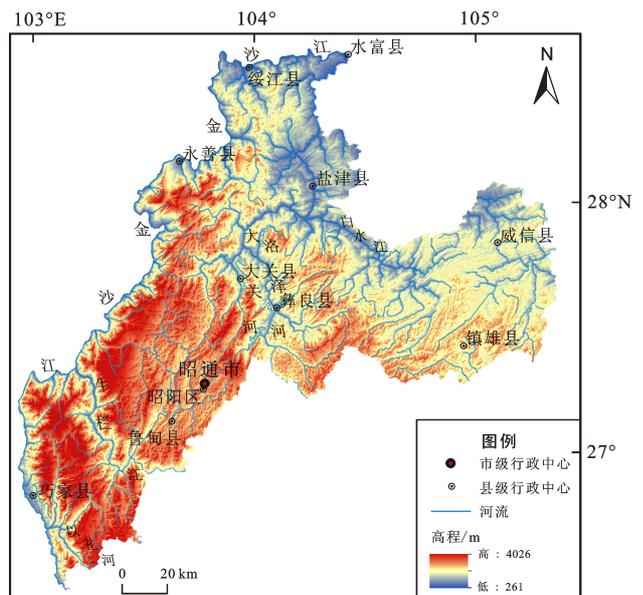


图 1 昭通市数字高程模型示意图

Fig. 1 The digital elevation model of Zhaotong city

① 云南省地震局. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 6.5 级地震灾害直接经济损失评估报告 (云南灾区).

2 研究方法 with 数据处理

2.1 Newmark 位移模型

Newmark 位移模型的理论基础是无限斜坡的极限平衡理论, 滑块的永久位移是在地震荷载作用下, 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; 将外荷载加速度与临界加速度的差值部分对时间进行二次积分即可得到永久位移量 (Newmark, 1965; Jibson *et al*, 2000)。简化的 Newmark 位移模型将水平地震动加速度方向简化为平行于滑坡面下坡方向输入, 方便了临界加速度的计算 (Wilson, Keefer, 1983)。临界加速度可以通过比较滑块在静力和地震动力条件下的受力状态, 利用无限斜坡法计算静态安全系数间接求解:

$$a_c = (F_s - 1)g \sin\alpha \quad (1)$$

式中: a_c 为临界加速度; F_s 为静态安全系数; g 为重力加速度; α 为滑坡面倾角, 本文取为斜坡坡角。

静态安全系数主要取决于滑坡面倾角和岩土体的物理学参数 (Jibson *et al*, 2000):

$$F_s = \frac{c'}{\gamma h \sin\alpha} + \frac{\tan\varphi'}{\tan\alpha} - \frac{m\gamma_w \tan\varphi'}{\gamma \tan\alpha} \quad (2)$$

式中: F_s 为静态安全系数; c' 为内聚力 (kPa); γ 为岩土体重度 (kN/m^3); h 为滑体厚度 (m); α 为滑坡面倾角 ($^\circ$); φ' 为内摩擦角 ($^\circ$); m 为滑体被水浸透的厚度比例; γ_w 为地下水的重度 (kN/m^3)。

Newmark 累积位移值的积分计算公式为:

$$D_N = \int \left\{ \int [a(t) - a_c] dt \right\} dt \quad (3)$$

式中: D_N 为累积位移值; $a(t)$ 为地震动加速度; a_c 为临界加速度; t 为时间。

在 Newmark 累积位移值的实际求解过程中, 因详细的地震动记录数据获取和精确的积分计算比较困难, 多位学者建立了累积位移值 (D_N) 与临界加速度 (a_c)、地震动峰值加速度 (a_{\max})、Arias 强度 (I_a) 等地震动参数的经验模型。Jibson (2007) 利用全球 30 次地震的 2 270 条水平分量强震动记录, 分别建立了累积位移值和几种地震动参数间的函数模型并进行了验证和对比, 本文采用其中相关系数较高的 D_N 与 a_c 和 a_{\max} 比值模型计

算 Newmark 累积位移值, 计算方法如下:

$$\lg D_N = 0.215 + \lg \left[\left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}} \right)^{2.341} \left(\frac{a_c}{a_{\max}} \right)^{-1.438} \right] \pm 0.510 \quad (4)$$

式中: D_N 为累积位移值; a_c 为临界加速度; a_{\max} 为地震动峰值加速度。

根据 Newmark 位移分析原理, 斜坡在地震作用下产生位移不一定会发生滑坡灾害, 只有当位移累积到一定程度才会导致斜坡失稳并发生滑坡。本文采用 Jibson 等 (2000) 基于 Weibull 分布函数建立的 Newmark 累积位移与滑坡发生概率统计关系, 对鲁甸地震滑坡危险性进行分级:

$$P(f) = 0.335 \times \left[1 - \exp(-0.048 \times D_N^{1.565}) \right] \quad (5)$$

式中: $P(f)$ 为滑坡发生概率。

2.2 滑坡影响范围预测方法

Newmark 位移模型的分析方法认为, 当斜坡的累积位移量达到临界值后才可能失稳并发生滑坡。Jibson (2011) 总结了大量研究案例中临界位移值的选取方案和建议 (这些临界位移值主要包括 510 和 15 cm), 认为临界位移值的大小跟坡体的特性有关, 脆性坡体的临界位移值要小于塑性坡体。结合前人研究成果和研究区坡体特征, 本文采用 5 cm 作为地震滑坡发生的临界位移值, 按坡向分割累积位移值大于临界位移值的坡体, 将分割后的坡体视为潜在滑坡体。

滑坡的影响范围是判断滑坡是否会对承灾体造成威胁的重要判断依据。由于滑坡成灾机理的复杂性, 滑坡影响范围的估算仍处于探索阶段, 特别是大区域潜在滑坡的定量预测建模还非常困难 (石菊松等, 2007)。结合前人研究成果, 考虑 GIS 实现难度和评估效率, 本文将滑坡影响范围的平面投影简化为以潜在滑坡体宽度和水平滑动距离为边长的矩形 (图 2)。

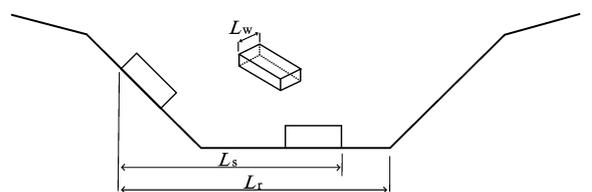


图 2 滑坡影响范围要素示意图

Fig. 2 Diagram of landslide-affected area

图 2 中 L_w 为潜在滑坡体宽度； L_s 为滑坡后缘至前缘的水平距离，即滑坡的最大水平滑动距离； L_r 为滑坡后缘至对向坡坡脚的水平距离，考虑地貌对滑动距离的影响，取 $L_s \leq L_r$ 。

本文采用李秀珍和孔纪名 (2010) 基于国内外 343 个滑坡实例得到的滑坡体积与水平滑动距离之间的统计模型，计算滑坡水平滑动距离：

$$L_s = 13.144 \times \exp \left[0.748 \times \log(S \times h) \right] \quad (6)$$

式中： L_s 为滑坡水平滑动距离 (m)； S 为潜在滑坡体平面投影面积 (m^2)； h 为潜在滑坡体厚度 (m)。

2.3 数据准备

利用研究区 1:50 万地质资料^①，参考《工程岩体分级标准》(GB/T 5028—2014) 以及王涛等 (2021) 给出的岩土体分组标准和物理学参数参考值，将研究区岩土体按地层岩性划分为：坚硬、较坚硬、较软、软、极软 5 类岩组并赋值式 (2) 中岩土体物理学参数 (图 3a)。其中：坚硬岩组分布较少，主要为花岗岩、辉绿岩等岩浆岩；较坚硬岩组分布较广，占研究区面积的 23.62%，主要

地层为澄江组、观音崖组、剑川组等，岩性以白云岩、灰岩、凝灰岩等为主；较软岩组分布最广，占研究区面积的 63.28%，主要地层为冈达概组、巧家组、箐门组等，岩性以砂岩、粉砂岩、泥灰岩等为主；软岩组占研究区面积的 12.19%，主要地层为仁和桥组、花开左组、漾江组等，岩性以页岩、泥岩为主；极软岩组分布较少，主要为第四系砂、砾、黏土等。

以 30 m 分辨率 DEM (Digital Elevation Model) 数据为基础^②，计算得出研究区坡度分布数据 (图 3b)，作为式 (1) 和 (2) 中斜坡坡角及滑坡面倾角参数。由图 3b 可知，研究区坡度区间为 $0^\circ \sim 86^\circ$ ，其中： 10° 以下区域面积占 20.96%， $10^\circ \sim 20^\circ$ 区域面积占 34.43%， $20^\circ \sim 30^\circ$ 区域面积占 24.85%， $30^\circ \sim 40^\circ$ 区域面积占 13.91%， 40° 以上区域面积占 5.83%。考虑到坡度小于 10° 的斜坡发生滑坡的概率较小，为提高计算效率，相应区域不参与计算。

地震动峰值加速度 (PGA) 是表征地震作用强弱程度的指标，对应于标准化地震动加速度反应谱最大值的水平加速度 (中国地震动参数区划图，GB/T 18306—2015)。PGA 分布的确定需要

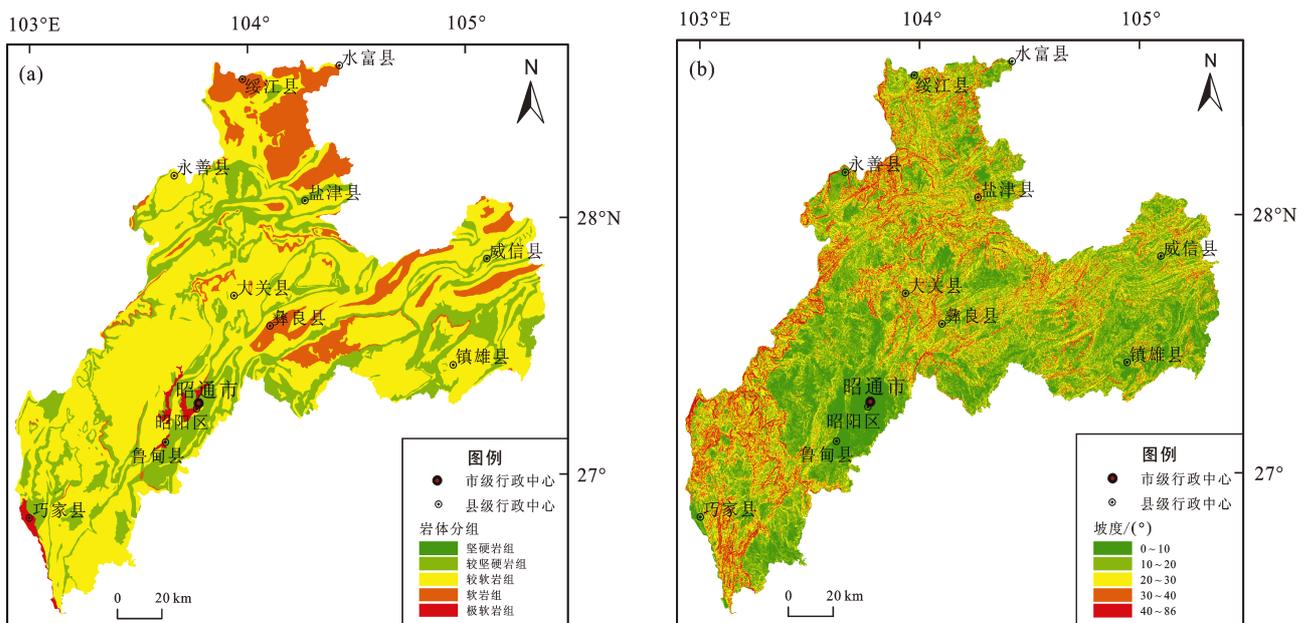


图 3 昭通市岩体 (a) 和坡度 (b) 分布

Fig. 3 Distribution of the rock mass (a) and the slope (b) in Zhaotong city

① 中国地质调查局发展研究中心全国地质资料馆 (<https://www.ngac.cn>) .

② 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>) .

震后高密度地震观测仪器的强震动观测数据作为支撑,获取难度大、用时长。本文采用王玉石等(2013)基于951条加速度记录数据得到的川滇地区水平向强地震动衰减关系,制作基于震中位置和震级的PGA分布模拟数据(图4),初步解决震前评估模拟数据需求和震后评估数据获取问题。由图4可知,PGA等值线在极震区呈长条形平行于发震断裂站NW向展布(徐锡伟等,2014),研究区内 $PGA > 4.02 \text{ m/s}^2$ 的区域面积为 167 km^2 (IX度区), $1.95 \text{ m/s}^2 < PGA < 4.01 \text{ m/s}^2$ 区域面积为 $1\,049 \text{ km}^2$ (VIII度区), $0.937 \text{ m/s}^2 < PGA < 1.94 \text{ m/s}^2$ 区域面积为 $3\,715 \text{ km}^2$ (VII度区), $0.457 \text{ m/s}^2 < PGA < 0.936 \text{ m/s}^2$ 区域面积有 $3\,847 \text{ km}^2$ (VI度区)。与鲁甸地震实际数据对比,该模型得出的最大PGA小于实际值,烈度区面积和空间分布与实际调查结果存在差异;模型结果可能导致地震滑坡评估结果分布范围偏大、极震区滑坡规模偏小、重灾区位置存在偏差。

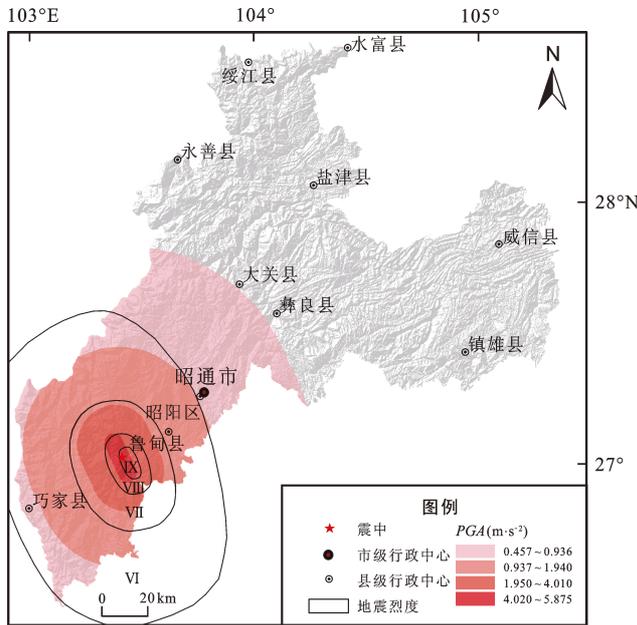


图4 鲁甸地震地震动峰值加速度分布

Fig. 4 Distribution of the peak ground acceleration of the Ludian earthquake

3 评估结果

3.1 昭通市地震滑坡危险性

相关研究表明,我国西南地区地震滑坡以0.5

~5 m厚度的浅层滑坡为主(周本刚,张裕明,1994)。参考刘甲美等(2017)对地震滑坡厚度的取值经验,取3 m作为研究区滑坡体厚度,即式(2)和式(6)中 $h = 3$,不考虑滑坡体孔隙水含量的影响,即式(2)中 $m = 0$ 。基于式(1)和(2)计算得到研究区斜坡临界加速度分布数据(图5)。临界加速度是地震触发斜坡位移的最小加速度,反映了斜坡抵抗地震破坏的能力;斜坡的临界加速度值越小,越容易在地震作用下发生滑坡。由图5可知,研究区斜坡临界加速度为0~1.13 g,采用自然断点法划分为高易发区(0~0.41 g)、中易发区(0.41~0.68 g)、低易发区(0.68~1.13 g)。对比图1、图3和图5可知,高易发区面积为 $3\,240 \text{ km}^2$,占昭通市面积的14%,主要分布在金沙江、牛栏江、大关河等河流及其支流两岸陡坡地区,受坡度因素控制显著;其次,绥江县北部、水富县、盐津县北部、彝良县中部和东北部等软弱岩层分布区域地震滑坡高风险区分布较集中,受岩性因素控制明显。

3.2 鲁甸地震滑坡危险性

利用研究区斜坡临界加速度和地震动峰值加速度分布模拟数据,基于式(4)制作了地震灾区

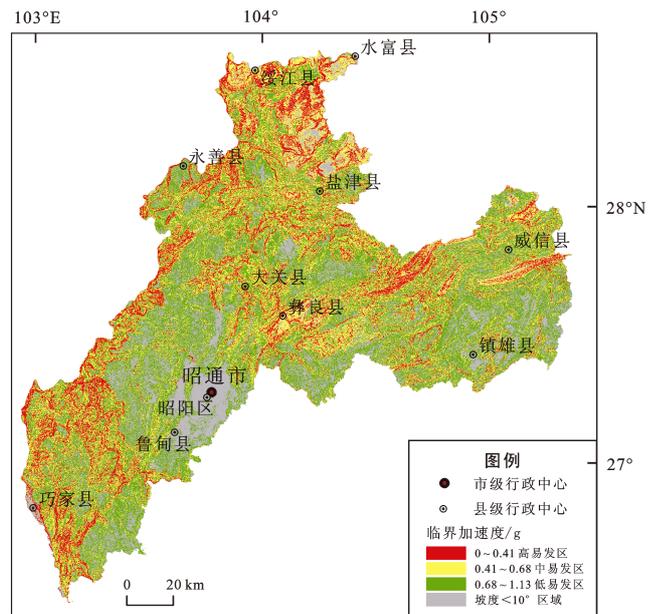


图5 昭通市斜坡临界加速度分布

Fig. 5 Distribution of critical acceleration of slopes in Zhaotong city

(烈度 VI 度及以上区域) 地震滑坡 Newmark 累积位移分布数据, 基于式 (5) 对地震滑坡危险性进行分级 (图 6)。根据滑坡发生概率计算结果, 将地震灾区地震滑坡危险性划分为 5 个等级: 极低风险 (<1%)、低风险 (1% ~ 5%)、中风险 (5% ~ 15%)、高风险 (15% ~ 25%)、极高风险 (25% ~ 33%)。结合图 1、图 3b 和图 6 可知, 高-极高风险区主要分布在高陡深切河谷地区, 与实际地震滑坡分布特点较一致 (殷志强等, 2016)。

3.3 鲁甸地震滑坡承灾体危险性

王秀英等 (2010) 在汶川地震诱发滑坡的研究中发现, 0.2 g 是龙门山地区地震滑坡发生的临界加速度值, 大部分滑坡都发生在 $PGA > 0.2 g$ 的区域。为提高评估效率, 参考前人研究成果, 本文主要对 VIII 度及以上 ($PGA \geq 1.95 m/s^2$) 区域开展地震滑坡承灾体风险评估。基于滑坡影响范围预测方法和地震灾区斜坡累积位移值计算结果, 制作地震滑坡影响范围分布数据 (图 7)。

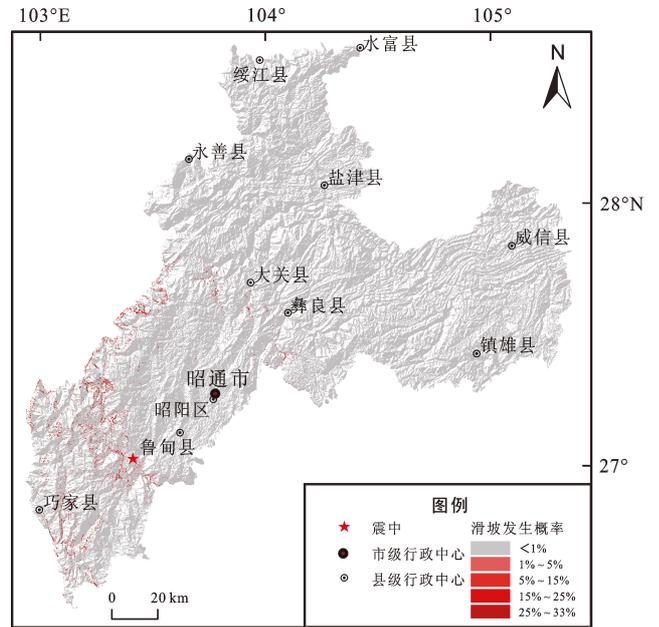


图 6 鲁甸地震滑坡发生概率分布

Fig. 6 Distribution of the probability of the landslide occurrence of the Ludian earthquake

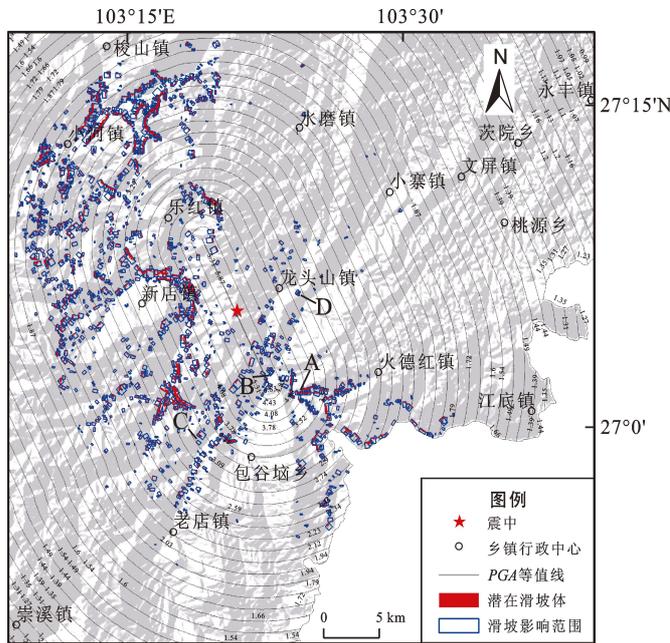
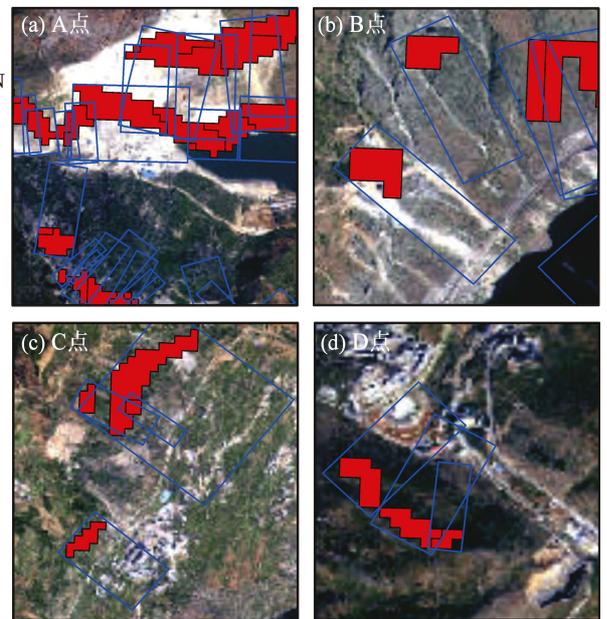


图 7 鲁甸地震灾区地震滑坡影响范围分布

Fig. 7 Distribution of the areas affected by earthquake-induced landslides in Ludian

地震滑坡灾害的承灾体主要包括人口、建筑物、交通道路、农作物、土地资源等。其中人口是震后最重要的救援对象, 建筑物毁坏是导致人员伤亡的主要原因, 交通系统功能损坏是影响震后应急救援的重要因素。鉴于此, 本



文选取建筑物、人口和道路作为评估对象, 开展地震滑坡承灾体风险评估。

3.3.1 建筑物

采用 Zhang 等 (2022) 基于深度学习模型和多源遥感影像制作的昭通市建筑物屋顶矢量

数据，叠加滑坡影响范围，生成地震滑坡威胁建筑物分布图（图 8a），统计了各乡镇地震滑坡威胁建筑物数量（表 1）。由图 8a 和表 1 可知，地震滑坡威胁建筑物 1 523 栋，主要分布

在小河镇、乐红镇、新店镇、龙头山镇等乡镇。因采用的建筑物数据为震后数据，统计结果仅反映区域风险分布情况，与实际受灾情况可比性较低。

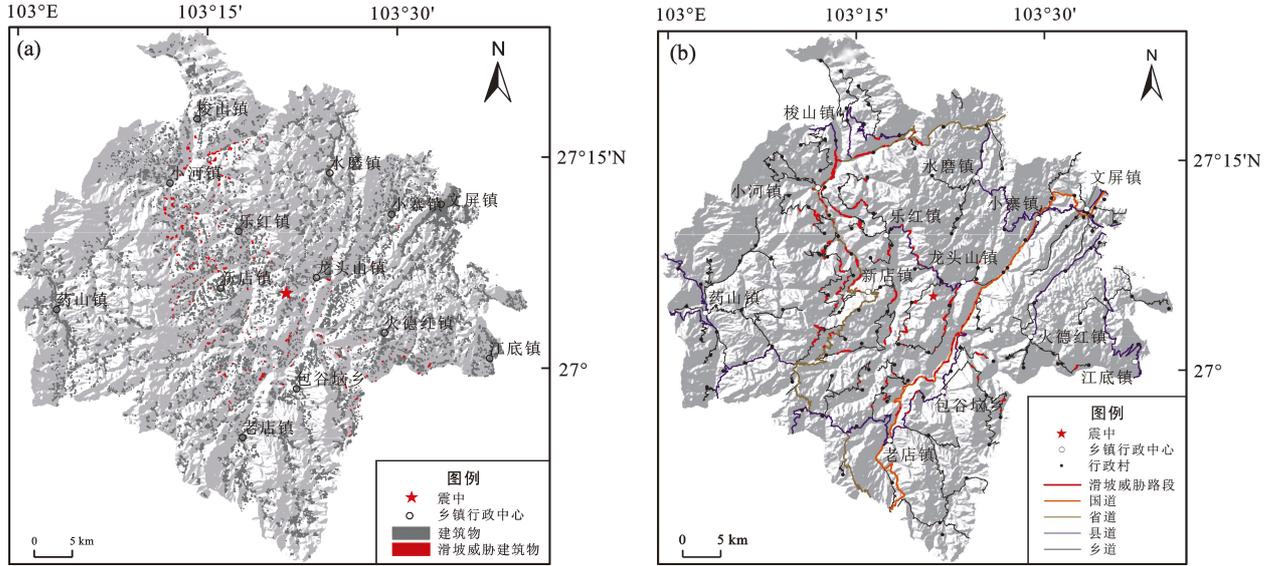


图 8 鲁甸地震灾区地震滑坡威胁建筑物 (a) 及道路 (b) 分布

Fig. 8 Distribution of the buildings (a) and roads (b) affected by earthquake-induced landslides in Ludian

表 1 地震滑坡威胁承灾体和实际致灾数据统计

Tab. 1 The estimated hazard-bearing bodies and actual disaster caused by earthquake-induced landslides in Ludian

乡镇	威胁建筑物/栋	威胁人数	地质灾害致死人数
小河镇	283	2 131	0
乐红镇	277	2 231	1
新店镇	267	1 176	4
龙头山镇	189	1 182	120
老店镇	159	701	0
包谷垭乡	129	610	4
梭山镇	111	875	0
火德红镇	83	348	41
水磨镇	20	81	0
小寨镇	5	16	1
文屏镇	0	0	0
药山镇	0	0	0
江底镇	0	0	0

注：表中地质灾害死亡人数为 2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震诱发地质灾害造成死亡人数。

3.3.2 人口

通过遥感影像目视分析，评估区涉及乡镇建筑物以独户住宅为主，高层居民楼和工业建筑较少。假设单位建筑物占地面积内的人口数量相同，将乡镇人口数量按建筑物占地面积平均分配，统计了地震滑坡威胁建筑物内的人口数量（表 1）。由表 1 可知，地震滑坡威胁建筑物内人口 9 351 人，小河镇、乐红镇、新店镇等 8 个乡镇威胁人口均超过百人。与实际致灾情况对比，地震地质灾害死亡人口均分布在地震滑坡威胁人口较多的乡镇；地震滑坡威胁人口和实际死亡人口在乡镇空间分布上出入较大，表现为小河镇、乐红镇、新店镇等乡镇地震滑坡威胁人数多而实际死亡人数少，这可能与地震滑坡预测的准确度、PGA 模拟数据精度、承灾体数据时效性等因素有关。

3.3.3 道路

根据鲁甸地震现场灾害损失调查情况，灾区道路震害主要表现为：滑坡阻塞交通，滚石砸坏路面，路面开裂，路基下沉、开裂，挡墙开裂、垮塌，路基塌方等。其中鲁甸县境内昭巧二级公路，沙坝—龙头山—乐红、鲁甸—铅厂、新店—小河、牛栏江

大桥—天花板、龙头山—龙井—西屏—银屏—翠屏、乐红—施初，火德红—红石岩等 234 条公路共 2 453 km 受损，损毁严重路段中断 452 条次；巧家县境内县乡公路、通村公路共 102 条 189.51 km 受损，塌方 5 631 处 1 022 万 m^3 。

通过叠加滑坡影响范围和道路图层，生成鲁甸地震灾区地震滑坡威胁道路分布图（图 8b）。由图 8b 可知，龙头山镇、包谷埡乡、新店镇、乐红镇、小河镇等乡镇境内道路受地震滑坡威胁较严重；部分道路地震滑坡威胁路段长、威胁点多，导致道路中断的风险较高。与鲁甸地震道路震害情况对比，评估结果与实际受灾严重路段重合度较高，可以在一定程度上反映地震滑坡道路危险性分布情况。

4 讨论

由于地震滑坡运动机理涉及的许多问题还处于探索阶段，使得区域范围内地震滑坡的预测还十分困难（张铎等，2013），因此通过预测区域地震滑坡来判断承灾体的危险性还没有成熟的解决方案。Newmark 位移模型基于地震作用下斜坡位移量计算，通过临界位移值判断边坡失稳的可能性，达到预测地震滑坡的目的。该方法虽然定量地给出了预测地震滑坡发生的判断依据，但评价结果只表示地震滑坡发生的区域和可能性，并不能准确预测潜在滑坡体的具体位置和范围。为确定地震滑坡的影响范围，本文尝试采用了单体滑坡的评估方法，将同一斜坡上位移量大于临界位移值的坡体视为潜在滑坡体。通过震后遥感影像滑坡体分布和潜在滑坡体评估结果进行目视对比，发现评估结果可以在一定程度上反应滑坡体的坡体分布和影响范围，但该方法的适用性以及结果的准确性还需要检验和优化。

本文引入建筑物、人口和道路数据，尝试开展地震滑坡承灾体的风险评估工作。从评估结果与鲁甸地震灾情对比来看，评估结果可以在一定程度上反映灾情的空间分布情况，但在灾情规模和空间分布的反映上还存在不足。分析认为其原因主要包括 3 个方面：一是地震滑坡预测的准确度不够。简化的 Newmark 位移模型建立在诸多假设条件成立的基础上，模型本身的预测能力有限；同时本文主要参考前人的研究成果和经验选取模型参数，未进行模

型参数的研究区适用性检验和优化，进一步限制了地震滑坡预测的准确性。二是 PGA 模拟数据精度不够。本文采用的 PGA 模拟数据未考虑地形和场地条件对地震动强度变化的影响，忽略了局部地震动强度衰减的差异；模拟数据中 IX 度区较实际面积偏大、范围向 NW 向扩大，导致震中 NW 方向的小河镇、乐红镇和新店镇等乡镇灾情评估结果偏重。三是承灾体数据的时效性不足。本文采用的承灾体数据为震后数年的数据，灾区恢复重建已对工程建设选址进行了优化，数据对地震发生时灾区情况的反应能力有限。

Newmark 位移模型主要是基于区域地质、地形数据和地震动参数实现地震滑坡危险性评估。其中岩土体物理参数和地形坡度数据的精确度决定了区域斜坡稳定性评价的可靠性，因此，建立高精度的地质和地形资料数据库是基于该方法开展区域地震滑坡风险评估的基础。而地震动参数模拟数据的准确性和震后高精度观测数据的快速获取，是制约评估结果可靠性和评估效率的重要因素。因此，从长远发展来看，优化区域地震动参数衰减模型提高模拟数据准确性，基于国家地震烈度速报与预警工程建设的高密度台站观测系统建立震后地震动参数快速获取机制，这些举措有助于提高震前评估结果的可靠性，实现震后快速评估。在以上基础上，建立定期更新、可追溯的地震滑坡承灾体数据库和同震滑坡及致灾统计数据库，开展地震滑坡承灾体风险评估与地震滑坡致灾研究工作，对地震滑坡灾害防治、地震应急处置、减轻灾害损失具有重要意义。

5 结论

本文采用 Newmark 位移模型，开展了昭通市地震滑坡危险性分析，以 2014 年鲁甸 6.4 级地震为例，通过建立简化的地震滑坡影响范围预测方法，开展地震滑坡承灾体风险评估，得出以下结论：

(1) 从地震滑坡危险性分布来看，昭通市地震滑坡高易发区面积 3 240 km^2 ，占昭通市面积的 14%；主要分布在金沙江、牛栏江、大关河等河流两岸陡坡地区，以及绥江县北部、水富县、盐津县北部、彝良县中部和东北部等软弱岩层集中分布区域，受坡度和岩性因素控制明显。

(2) 通过对比地震滑坡承灾体风险评估结果和实际受灾信息,鲁甸地震因地质灾害死亡人口均分布在受地震滑坡威胁的建筑物和人口较多的乡镇,地震滑坡道路致灾高风险路段与实际受灾严重路段重合度较高,评估结果能在区域尺度反映承灾体的风险分布情况。

地震滑坡灾害的成灾机理复杂,影响因素较多,大范围地震滑坡承灾体风险预测较困难。本文评估方法以多个理想化模型和统计模型为基础,这些模型的适用性和准确性还需要进一步检验和优化,本文评估方法不适用于地震滑坡致灾位置和数量的精确评估,评估结果仅在区域范围内受威胁承灾体空间分布评价中有一定参考意义。

参考文献:

安晓文,常祖峰,陈宇军,等. 2018. 云南第四纪活动断裂[M]. 北京:地震出版社.

白仙富,戴雨炎,戴靖,等. 2013. 昭通地区地震灾害区域性特征分析[J]. 地震研究,36(4):514-524.

陈君贤,韩竹军,程捷. 2021. 小江断裂带南段新寨盆地新构造运动特征[J]. 华南地震,41(3):82-91.

陈晓利,袁仁茂,庾露. 2013. Newmark 方法在芦山地震诱发滑坡分布预测研究中的应用[J]. 地震地质,35(3):661-670.

程小杰,杨为民,向灵芝,等. 2017. 基于 Newmark 模型的天水市北山地震黄土滑坡危险性评价[J]. 地质力学学报,23(2):296-305.

非明伦,周光全,谢英情,等. 2006. 盐津 5.1 级地震现场调查与烈度分布[J]. 地震研究,29(4):411-417.

黄润秋,王运生,裴向军,等. 2013. 4·20 芦山 $M_s7.0$ 级地震地质灾害特征[J]. 西南交通大学学报,48(4):581-589.

黄润秋. 2009. 汶川 8.0 级地震触发崩塌滑坡灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报,28(6):1239-1249.

李秀珍,孔纪名. 2010. “5·12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测[J]. 四川大学学报(工程科学版),42(5):243-249.

李雪婧,高孟潭,徐伟进. 2019. 基于 Newmark 模型的概率地震滑坡危险性分析方法研究——以甘肃天水地区为例[J]. 地震学报,41(6):795-808.

李永强,李兆隆. 2016. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震致人死亡情况分析[J]. 中国地震,32(4):787-800.

李忠生. 2003. 国内外地震滑坡灾害研究综述[J]. 灾害学,18(4):65-71.

刘爱文,帅向华,吕红山,等. 2014. 鲁甸地震生命线工程震害特点及应急抢修[J]. 震灾防御技术,9(3):359-367.

刘甲美,王涛,石菊松,等. 2017. 四川九寨沟 $M_s7.0$ 级地震滑坡应急快速评估[J]. 地质力学学报,23(5):639-645.

梅伟,顾世祥,周云,等. 2022. 玉溪市地震诱发滑坡危险性分析[J]. 武汉大学学报(工学版),55(5):454-461.

裴向军,黄润秋. 2013. “4·20”芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),40(3):257-263.

石菊松,石玲,吴树仁. 2007. 滑坡风险评估的难点和进展[J]. 地质论评,53(6):797-806.

王东坡,何思明,葛胜锦,等. 2013. “9·07”彝良地震诱发次生山地质灾害调查及减灾建议[J]. 山地学报,31(1):101-107.

王琳,罗祚浩,杨天青,等. 2021. 2019 年贵州沿河 $M_s4.9$ 级地震烈度调查与震害特征[J]. 华南地震,41(3):132-140.

王涛,刘甲美,栗泽桐,等. 2021. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究[J]. 中国地质,48(1):21-39.

王涛,吴树仁,石菊松,等. 2013. 基于简化 Newmark 位移模型的区域地震滑坡危险性快速评估——以汶川 $M_s8.0$ 地震为例[J]. 工程地质学报,21(1):16-24.

王涛,吴树仁,石菊松,等. 2015. 地震滑坡危险性概念和基于力学模型的评估方法探讨[J]. 工程地质学报,23(1):93-104.

王秀英,聂高众,王登伟. 2010. 汶川地震诱发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究[J]. 岩石力学与工程学报,29(1):82-89.

王玉石,李小军,周正华. 2013. 川滇地区水平向强地震动衰减关系研究[J]. 地震学报,35(2):238-249.

徐声鑫,王岩,汪志民,等. 2022. 云南跨断层场地特征强度指标分析[J]. 华南地震,42(2):17-24.

徐锡伟,江国焰,于贵华,等. 2014. 鲁甸 6.5 级地震震断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球物理学报,57(9):3060-3068.

许冲,徐锡伟,沈玲玲,等. 2014. 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震触发滑坡编录及其对一些地震参数的指示[J]. 地震地质,36(4):1186-1203.

许冲,徐锡伟,郑文俊,等. 2013. 2013 年四川省芦山“4.20”7.0 级强烈地震触发滑坡[J]. 地震地质,35(3):641-660.

宴金旭,肖本夫,张露露,等. 2021. 云南漾濞 $M_s6.4$ 级地震土木结构房屋震害分析[J]. 华南地震,41(3):71-75.

杨志华,张永双,郭长宝,等. 2017. 基于 Newmark 模型的尼泊尔 $M_s8.1$ 级地震滑坡危险性快速评估[J]. 地质力学学报,23(1):115-124.

殷跃平. 2008. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报,16(4):433-444.

殷志强,徐永强,陈红旗,等. 2016. 2014 年云南鲁甸地震触发地质灾害发育分布规律及与景谷、盈江地震对比研究[J]. 地质学报,90(6):1086-1097.

《云南省地图集》编纂委员会. 2019. 云南省地图集[M]. 西安:西安地图出版社.

云南省统计局. 2021. 云南统计年鉴(2021)[M]. 北京:中国统计出版社.

张铎,吴中海,李家存,等. 2013. 国内外地震滑坡研究综述[J]. 地质力学学报,19(3):225-241.

张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学,33(S1):12-20.

钟江荣,张令心,沈俊凯. 2021. 基于震害资料的云南地区砌体结构易损性研究[J]. 华南地震,41(1):108-116.

- 周本刚,张裕明.1994.中国西南地区地震滑坡的基本特征[J].西北地震学报,16(1):95-103.
- Jibson R W, Harp E L, Michael J A. 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. Engineering Geology, 58(3-4):271-289.
- Jibson R W. 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement[J]. Engineering Geology, 91(2):209-21.
- Jibson R W. 2011. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective[J]. Engineering Geology, 122(1-2):43-50.
- Lee J H, Park D, Ahn J K, et al. 2015. Development of permanent displacement model for seismic mountain slope[J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 31(4):57-66.
- Newmark N M. 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments [J]. Geotechnique, 15(2):139-160.
- Peng W F, Wang C L, Chen S T, et al. 2009. Incorporating the effects of topographic amplification and sliding areas in the modeling of earthquake-induced landslide hazards, using the cumulative displacement method[J]. Computers & Geosciences, 35(5):946-966.
- Wilson R C, Keefer D K. 1983. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote lake, California, earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(3):863-877.
- Zhang Z X, Qian Z, Zhong T, et al. 2022. Vectorized rooftop area data for 90 cities in China[J]. Scientific Data, 9(1):1-12.
- GB/T 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].
- GB/T 50218—2014, 工程岩体分级标准[S].

Risk Assessment the Hazard-bearing Bodies by the Earthquake-induced Landslides Based on the Newmark Model:

A Case Study of the 2014 Ludian, Yunnan M_s 6.5 Earthquake

JIA Zhaoliang¹, ZHENG Chuan¹, WU Yanmei¹, ZHANG Peng², XU Ruijie¹, ZHUANG Yan¹, CAO Yanbo¹

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Huaneng Lancang River Hydropower INC, Kunming 650206, Yunnan, China)

Abstract

Using geological and topographic data of Zhaotong city, the critical acceleration of the slope is calculated based on the Newmark model, and the risk of earthquake-induced landslides in this region is analyzed. Based on the statistical model of the sliding distance of the landslides, a simplified forecasting method for the area affected by the earthquake-induced landslides is established. Using the data of buildings, population, roads and simulated peak ground acceleration of the 2014 Ludian M_s 6.5 earthquake, the risk assessment of the hazard-bearing bodies induced by the earthquake landslides is carried out. The results show that the high-prone places of the earthquake-induced landslides in Zhaotong city are mainly distributed in the steep slope area on both sides of the river and the concentrated area of the soft strata of the rock. And the distribution of high-prone areas is mainly controlled by slope and lithology. Victims of geological disasters in the Ludian earthquake event were in towns and villages where lots of buildings and large population are threatened by earthquake landslides. The high-risk roads evaluated are consistent with the actual situation in Zhaotong city. The assessment results can display the risk distribution of the disaster-bearing body on the regional scale.

Keywords: the Newmark model; earthquake-induced landslide; hazard-bearing body; risk assessment; the Ludian earthquake