

基于不同位移预测模型的地震滑坡危险性 评估研究—以天水地区为例

刘甲美^{1,2}, 王涛^{1,2}, 石菊松³, 辛鹏^{1,2}, 吴树仁^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要:近年来, Newmark 累积位移分析方法经过不断的改进和应用成为国际主流的地震滑坡危险性评估方法之一, 众多学者基于位移预测模型开展区域地震滑坡危险性评估, 然而鲜有针对不同位移模型对评估结果影响的定量研究。以天水地区为例, 基于不同的位移预测模型开展地震滑坡危险性评估, 对比位移模型对地震滑坡危险性评估的影响, 探讨建立适用于我国的 Newmark 位移预测模型。结果表明: 基于不同位移预测模型评估所得的地震滑坡危险性结果整体趋势一致, 均能区分区域地震滑坡危险性等级的相对差异, 但在同样的危险性分级标准下, 所得中、高危险区的分布范围有较大差异。这与位移模型的函数形式及其区域相关性有关, 在引入 Newmark 累积位移分析方法开展地震滑坡危险性评估的同时, 应尽快建立考虑地震动衰减特征和工程地质背景的 Newmark 位移预测模型, 为中国潜在地震滑坡危险性预测评估、震后滑坡快速评估等提供技术支撑。

关键词: 地震滑坡; 危险性评估; Newmark 位移预测模型; 天水地区

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

THE INFLUENCE OF DIFFERENT NEWMARK DISPLACEMENT MODELS ON SEISMIC LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT: A CASE STUDY OF TIANSHUI AREA, CHINA

LIU Jiamei^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, SHI Jusong³, XIN Peng^{1,2}, WU Shuren^{1,2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

3. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: Recent years, the Newmark sliding-block model is one of the most widely-used methods for assessing the stability of slopes during earthquakes; however, the influence of different Newmark displacement models on seismic landslide hazard assessments need to be investigated and quantified. Through the comparison between the displacements estimated by various Newmark displacement models in the Tianshui area, the influence of Newmark displacement models on seismic landslide hazard assessments are discussed. The results show that the overall tendency of the seismic landslide risk

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160271); 国家自然科学基金 (41372374, 41572313)

作者简介: 刘甲美 (1987-), 男, 博士后, 主要从事地震地质灾害调查与定量评估研究。E-mail: ljm19870918@126.com

通讯作者: 王涛 (1982-), 男, 副研究员, 主要从事工程地质与地质灾害评价等研究工作。E-mail: wangtao_ig@163.com

收稿日期: 2017-05-28; **修回日期:** 2017-08-13

吴芳编辑

assessment based on different displacement prediction models is consistent; however, due to the region dependent and various function forms of these models, there is a great difference in the distribution of moderate and high seismic landslide hazard area. It suggests that a Newmark displacement prediction model considering the attenuation characteristics of ground motion and the engineering geological background of China should be established as soon as possible, which will provide support for the potential seismic landslide hazard assessment and the rapid assessment of post-earthquake landslide.

Key words: seismic landslide; hazard assessment; Newmark displacement prediction model; Tianshui area

0 引言

滑坡风险评估与管理在国际上越来越流行和普及,已经成为国际减灾防灾战略的重要组成^[1],在各种成因的滑坡类型中,地震滑坡具有体积规模更大、分布范围更广、灾难效应更重的典型特征,因而地震滑坡的机理和危险性研究也越来越受关注^[2~5]。在众多地震滑坡危险性评估方法中,Newmark^[6]提出的累积位移分析方法基于力学原理定量分析坡体失稳机制,给出斜坡在地震动作用下的累积位移作为滑坡危险性等级划分的依据^[7]。相比拟静力法、数值模拟法以及指标体系^[8]的等评估方法,Newmark方法基本不受地质背景差异的限制而具有推广优势,经过不断的改进和应用,已逐步成为国际主流的地震滑坡位移及定量危险性评估方法^[9~10]。该方法已经广泛应用于震后地震滑坡危险性评估^[11]、潜在地震滑坡危险性分析^[12~13]和历史地震滑坡反演^[14]。Newmark累积位移(D_n)是通过将地震动加速度大于斜坡临界加速度(a_c)的部分对时间二次积分得到^[15],然而强震台站的空间分布稀疏不一,很难获取每个场点处的地震动加速度记录。鉴于实际应用的不便同时出于震前预测的需要,众多学者提出利用地震动参数(IM)与 a_c 计算累积位移(D_n),并建立了相应的经验关系式^[7,16~22],常用地震动参数有峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)、Arias烈度(AI)等,这其中又以 AI 参数同时兼顾了地震动的持时和强度信息,与地震滑坡发相关性较好。

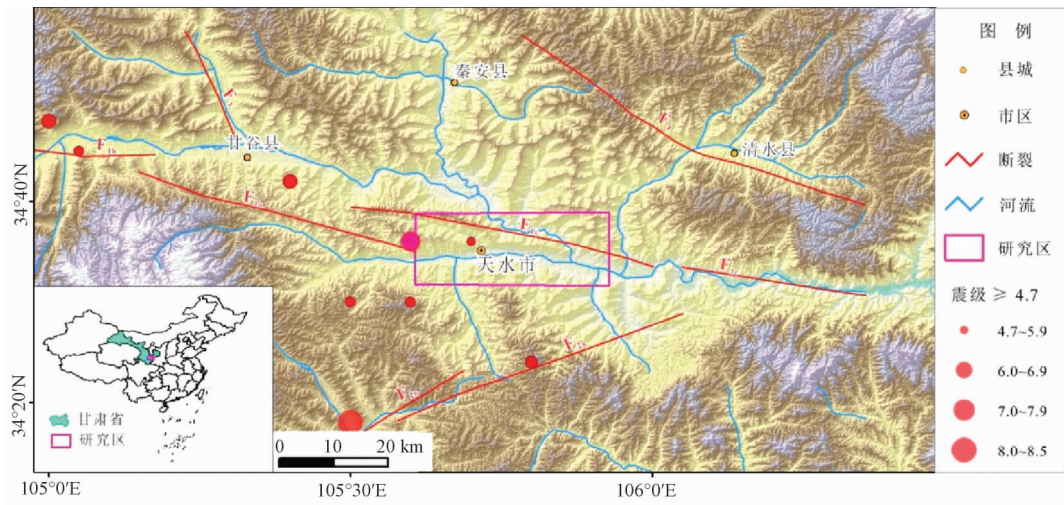
目前,国际上广泛利用Newmark位移经验预测公式开展区域地震滑坡危险性评估^[23~26],国内也逐渐引入Newmark位移方法,但尚处于起步阶段,基本以直接引用国外的位移经验公式为

主^[27~30],很少探讨不同的位移预测公式的适用性以及采用不同的位移预测公式对评估结果的影响。故以天水研究区为例,基于以Arias烈度和斜坡临界加速度为参数的Newmark位移预测模型,开展地震滑坡危险性评估,通过对比不同位移模型对地震滑坡危险性评估结果的影响,探讨建立适用于国内的Newmark位移预测模型。

1 研究区背景

天水位于甘肃省东南部(见图1),构造上位于南北地震带中段北端,西秦岭断裂带和祁连山-六盘山断裂带的交汇处附近,是中国南北地震构造带中段与中央造山带复合的关键部位。该区主要受北西西向左旋走滑的西秦岭北缘断裂(F_1)和北东东向的右旋走滑兼正断分量的礼县-罗家堡断裂(F_2)等主要活动断裂影响,强震活动频繁。根据史料记载,推断西秦岭北缘断裂天水-武山段(F_{1a})和礼县-罗家堡断裂中段(F_{2b})分别为734年天水7.0级地震及1654年天水南8级地震的发震断裂^[31~32]。两次地震均诱发了大规模滑坡,例如,有关734年天水地震诱发地震滑坡的记载仅仅寥寥数语:“时天水地震,陵迁为谷……”;据《天水地震史料汇编》记载1654年礼县罗家堡大地震^[33]:“……罗家堡七十峪,两山拽成一处,雍河成潭。礼县木门(今天水牡丹乡)地方山崩水壅,压漂居民村落,水聚为海,名曰海子,近复变桑田”,至今尚存延长约4 km的地震滑坡遗迹和两个残存的堰塞湖。

天水地处西秦岭山地与陇西黄土丘陵的过渡带,西秦岭由西北向东南横贯本区,构成黄河水系(渭河、籍河以及牛头河)和长江水系(西汉水)的分水岭,地貌上逐渐从侵蚀构造低山地、侵蚀堆积红层盆地、剥蚀—构造丘陵区向和河谷



F₁—西秦岭北缘断裂 (F_{1a}—天水段, F_{1b}—武山段, F_{1c}—宝鸡段);
F₂—礼县—罗家堡断裂 (F_{2a}—东段, F_{2b}—西段); F₃—通渭断裂; F₄—清水断裂

图1 研究区构造位置图

Fig. 1 Structural map of the study area

堆积地貌过渡。区内出露的地层岩性从老到新主要包括：①前寒武系牛头河群的片岩、片麻岩夹大理岩等，②古生界泥盆系大草滩群的砂岩、板岩互层夹砾岩，③新生界古近系的砾岩、砂岩、砂砾岩夹砂质泥岩，④新近系的红色泥岩夹砂砾岩及灰白、灰绿色粘土岩等，⑤第四系的风成黄土、坡堆积物、河流相及泥石流堆积物等。通过区域工程地质和地质灾害调查，天水地区的典型滑坡类型如图2所示。该区易滑地层主要包括上新世泥岩和第四纪黄土，其主要滑坡类型为浅层黄



a—磨峪沟浅层碎屑流；b—后峪沟变质砂岩风化层；c—天水郡村南泥岩滑坡；d—南沟河支沟黄土滑坡

图2 天水地区典型滑坡类型

Fig. 2 Typical landslides in Tianshui area

土滑坡、黄土—泥岩接触型滑坡、大型深切泥岩滑坡, 而由片岩、片麻岩及砂岩等构成的岩质斜坡, 由于坡体上部平缓, 坡体稳定性较好, 而斜坡中下部以薄层黄土、残坡积层和强风化碎裂岩混杂, 多发育浅层碎屑流和坡面流。然而由于年代都较为久远, 历史地震诱发浅层小型滑坡的遗迹难以保留, 加之史料记载不详等原因, 地震滑坡分布难以考证。依托“甘肃天水等城镇和成兰交通廊道工程地质调查”项目所开展的天水地区 1:5 万的地质灾害详查, 依滑体厚度进行分类统计, 显示该区接近 70% 的滑坡为浅层滑坡 (厚度 < 10 m)。

2 评估方法

鉴于天水地区所具有的强震活动和滑坡易发的地震构造和工程地质背景, 于两次历史强震开展了设定地震滑坡危险性的初步评估^[34], 表明未来若发生类似 734 年的地震, 极有可能在天水市周边诱发大规模滑坡。对天水市周边, 假定在西秦岭北缘断裂发生一次这样的 7.0 级地震, 采用 Newmark 位移分析方法, 基于不同的位移预测模型开展地震滑坡危险性评估。Newmark 累积位移方法以临界加速度 a_c (单位 g) 表示斜坡强度, 其物理含义是使单位质量的斜坡物质由稳定趋向滑动

(极限平衡状态) 所需要的最小的力^[35]。由极限平衡原理可得:

$$FS = \frac{c}{\gamma t \sin \theta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} - \frac{m \gamma_w \tan \varphi}{\gamma \tan \theta} \quad (1)$$

$$a_c = (FS - 1) g \sin \theta \quad (2)$$

其中 FS 称为静态安全系数; c 、 φ 、 γ 分别为斜坡岩土体等效黏聚力 (MPa)、内摩擦角 ($^\circ$) 和重度 (kN/m^3); θ 为斜坡坡度 ($^\circ$); t 为潜在滑体厚度 (m); w 为水的重度 (kN/m^3); m 为潜在滑体饱和部分厚度占滑体总厚度的比值。

研究区内斜坡地层岩性 (见图 3) 主要为新生界第四系残坡积黄土、第三系泥岩, 参考室内土工试验^[36-38] 对其强度参数进行赋值, 对部分基岩则参照《工程岩土体分级标准》和国内外工程岩土分组经验等进行取值, 具体参数值详见文献[13, 34]; 区域内斜坡坡度数据则通过 25 m 的 DEM 数据获取; 研究区为相对干燥的气候条件, 考虑空隙水压力的影响 (公式 1 中 $m=0$); 鉴于该区以浅层滑坡为主, 取滑体厚度 $t=3$ m。在此基础上, 根据公式 (1) ~ (2) 计算区域斜坡临界加速度 (见图 4)。可以看出, a_c 与斜坡岩土体类型和坡度密切相关, 反映了地震滑坡易发性程度, 即斜坡岩土体物质越松软、坡度越陡, 则 a_c 值越小, 触发斜坡失稳所需要的地震力就越小, 斜坡在地震作用下越不稳定。

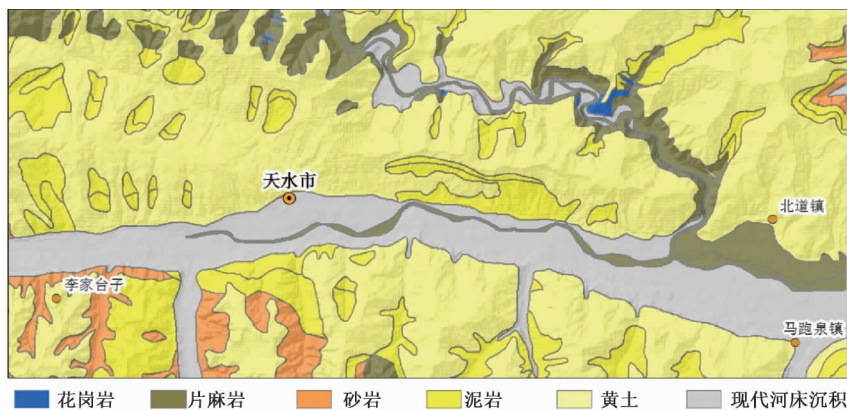


图 3 研究区斜坡地层岩性简图

Fig. 3 Distribution diagram of the slope formation lithology in the study area

采用经验位移公式计算区域内地震滑坡 Newmark 位移分布, 这些位移公式以地震动参数 AI 和斜坡临界加速度 a_c 为变量。Jibson^[16] 最早以 AI 和 a_c 为变量建立了累积位移 D_n 预测公式:

$$\log D_n = 1.460 \log AI - 6.642 a_c + 1.546 \quad (3)$$

由于上式中 $\log D_n$ 与 a_c 线性相关, Jibson^[18] 认为 D_n 随 a_c 值变化比较敏感, 而对其进行了改进:

$$\log D_n = 2.401 \log AI - 3.481 \log a_c - 3.230 \quad (4)$$

Hsieh 和 Lee^[19] 则针对累积位移 D_n 随 AI 及 a_c 的变化进行了深入讨论, 认为当 a_c 值较大时, $\log D_n$ 与 $\log AI$ 呈较强的线性相关, 随着 a_c 值减小, 二者的线性相关度降低, 而 $\log D_n$ 与 a_c 为稳定的线性相关, 并利用全球 4 次地震数据建立了 2 个位移预测公式, 其中拟合效果较好的为:

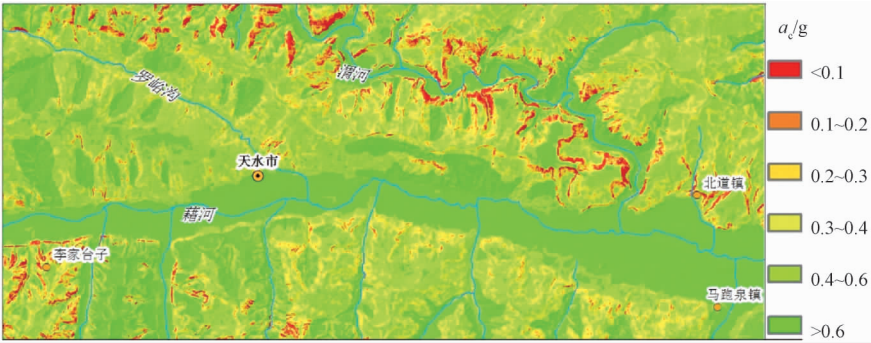


图 4 研究区斜坡临界加速度分布

Fig. 4 Map showing critical acceleration in the study area

$$\log D_n = 0.847 \log AI - 10.62 a_c + 6.587 a_c \cdot \log AI + 1.84$$

(5)

袁仁茂等^[21]利用 2013 年 4 月 20 日芦山 Ms 7.0 级地震获取的强震数据进一步验证了 Hsieh 和 Lee 的结论, 得到了以下位移公式:

$$\log D_n = 1.147 \log AI - 13.664 a_c + 9.673 a_c \cdot \log AI + 1.396$$

(6)

各位移公式的参数特征如表 1 所示。

设定地震震级为 Ms7.0, 震中即为 734 年地震位置 (105.6°E, 34.6°N), 发震断裂为西秦岭北缘断裂天水段 (见图 5 中 F_{1a}), 断层走向 108°, 倾角 70°, 参考中国大陆地震震级和地震活动断层长度的关系及 2013 年芦山 Ms7.0 级地震断层参

表 1 不同位移公式参数特征

Table 1 Parameter characteristics of different displacement formulas

位移公式	震级范围 (记录数)	临界加速度 范围 (g)	相关系数 (标准差)
公式 (3)	5.8 ~ 7.5 (11)	0.02 ~ 0.40	0.87 (0.409)
公式 (4)	5.3 ~ 7.6 (875)	0.05 ~ 0.40	0.71 (0.656)
公式 (5)	6.7 ~ 7.4 (290)	0.01 ~ 0.40	0.89 (0.295)
公式 (6)	6.7 (20)	0.01 ~ 0.20	0.90 (0.172)

数^[39~40], 断层面破裂长度为 65 km, 宽约 35 km。利用 Travararou et al.^[41]所建立的 Arias 烈度经验衰减关系, 获取区域地震动参数 AI 分布 (见图 5)。基于位移公式 3~6 开展地震滑坡危险性分析, 对比不同位移模型对地震滑坡危险性评估结果的影响。

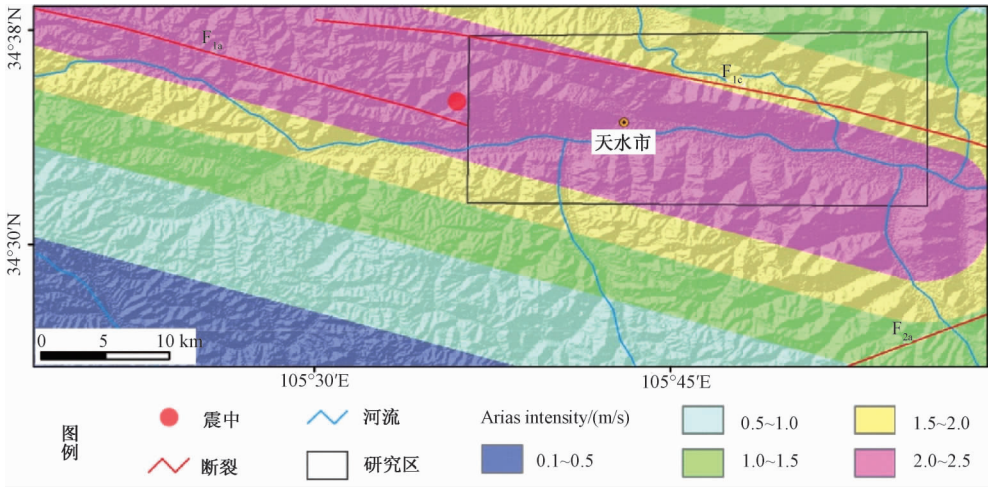


图 5 设定地震 Arias 烈度空间分布

Fig. 5 Map showing the distribution of Arias intensity for the scenario earthquake

3 评估结果

基于不同的位移预测模型评估得到了 Newmark

累积位移分布 (见图 6)。参考 Legg et al.^[42]对位移值与破坏程度相关性的研究成果, 根据位移 D_n 大小将地震滑坡危险性分区为低危险区 (0 ~ 0.5 cm)、中危险区 (0.5 ~ 5 cm)、高危险区 (5 ~

50 cm)、极高危险区 (> 50 cm)。可以看出,整体上利用不同的位移预测公式得到的 Newmark 位移值地震滑坡危险性相对分级的分布趋势一致,河流沟谷和黄土梁顶等坡度较小的区域,均被识别为地震滑坡低危险区,而松散黄土覆盖及坡度较高的渭河两岸及藉河右岸李家台子附近,均为地震滑坡中等以上危险区。但各危险区的分布范围仍有一定差异,因而局部地区地震滑坡危险性

等级可能有较大差异。如表 2 所示,利用 Jibson^[17] 的位移公式 3 得到的中、高危险区的面积百分比分别为 7.4% 和 1.9%,均为 4 个评估结果中比例最高,利用 Jibson^[19] 的位移公式 4 评估的极高危险区面积最大,占比约 0.4%,而利用 Yuan et al.^[22] 的位移公式 6 评估得到的中、高危险区的面积相对较低,分别为 1.3% 和 0.7%,没有 Newmark 位移大于 50 cm 的极高危险区。

表 2 不同位移预测公式多得位移区间分布

Table 2 Displacement interval distribution based on different displacement prediction formulas

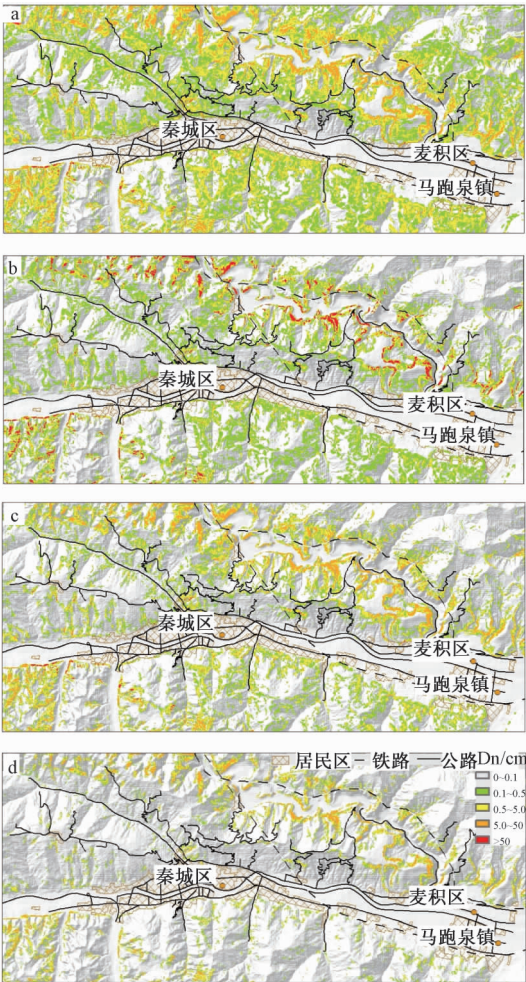
位移公式	Newmark 位移 (占研究区总面积百分比)			
	0 cm ~ 0.5 cm	0.5 cm ~ 5.0 cm	5.0 cm ~ 50 cm	> 50 cm
公式 (3)	90.7%	7.4%	1.9%	0.1%
公式 (4)	97.1%	2.0%	0.5%	0.4%
公式 (5)	95.1%	3.4%	1.4%	0.1%
公式 (6)	98.0%	1.3%	0.7%	0

针对设定地震滑坡危险性的预测,无法利用实际滑坡编录去检验基于不同位移预测模型评估所得结果的优劣。区域尺度上,几种位移模型评估结果的整体一致性表明,采用不同的位移预测模型均可识别出地震滑坡危险性的相对等级高低,可以作为地震滑坡危险性评判的初步依据;然而基于不同位移模型计算的 Newmark 位移在局部场地尺度上仍有一定差异,导致局部地区地震滑坡危险性等级尤其是中、高危险区的分布范围有较大差异。

4 讨论与结论

Newmark 累积位移是地震边坡稳定性的重要判识依据,而位移预测模型也就成为开展震后地震滑坡快速评估及潜在地震滑坡危险性区划的重要基础。目前国内外基于 Newmark 累积位移分析方法开展地震滑坡危险性评估,基本以直接引用相应的位移经验公式为主,对模型参数(岩土强度、DEM 精度等)的不确定性也开展了广泛讨论,然而针对位移模型的选择对结果的影响却鲜有研究,以天水地区为例,基于不同的位移预测模型开展地震滑坡危险性评估,取得了以下成果与认识:

(1) 基于不同的位移预测模型评估所得地震滑坡危险性结果整体趋势一致。但由于 Newmark 位移预测模型有一定的区域相关性且函数形式有所不同,导致地震滑坡危险性等级尤其是中、高危险区的分布范围有较大差异。



a—公式 3; b—公式 4; c—公式 5; d—公式 6

图 6 基于不同位移预测公式的地震滑坡 Newmark 位移分布

Fig. 6 Map showing the comparison of the Newmark displacement from multi-displacement models

(2) 采用不同的位移模型所引起地震滑坡位移值差异,将直接影响滑坡失稳准则的建立。最为典型的是基于 Newmark 位移与地震滑坡编录建立的 Newmark 位移—失稳概率曲线或位移阈值评价地震滑坡失稳概率。尽管地震滑坡编录相对是确定的,但 Newmark 位移值的分布与所选用的位移公式有很大关系,相应的有关位移与滑坡失稳的判别准则也与位移公式相关。

(3) 由于 Newmark 位移公式具有区域相关性,加之不同研究者使用的数据样本量不一,导致位移公式的函数形式及变化趋势有所不同。在推动这一国际主流的区域地震滑坡位移及定量危险性评估方法在国内的应用的同时,应进一步建立适用于国内的考虑地震动衰减特征和工程地质背景的 Newmark 位移预测模型,为我国潜在地震滑坡危险性预测评估、震后滑坡快速评估等提供技术支撑。

参考文献/References

- [1] 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.
WU Shuren, SHI Jusong, ZHANG Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28 (8): 995 ~ 1005. (in Chinese with English abstract)
- [2] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡高速远程特征分析 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (2): 153 ~ 166.
YIN Yueping. Rapid and long run-out features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (2): 153 ~ 166. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张永双,石菊松,孙萍,等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 131 ~ 141.
ZHANG Yongshuang, SHI Jusong, SUN Ping, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 131 ~ 141. (in Chinese with English abstract)
- [4] 许冲,戴福初,徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述 [J]. 地质论评, 2010, 56 (6): 860 ~ 874.
XU Chong, DAI Fuchu, XU Xiwei. Wenchuan earthquake-induced landslides: an overview [J]. Geological Review, 2010, 56 (6): 860 ~ 874. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨志华,张永双,郭长宝,等. 基于 Newmark 模型的尼泊尔 M_s 8.1 级地震滑坡危险性快速评估 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (1): 115 ~ 124.
YANG Zhihua, ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, et al. Landslide hazard rapid assessment in the M_s 8.1 Nepal earthquake-impacted area, based on Newmark model [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (1): 115 ~ 124. (in Chinese with English abstract)
- [6] Newmark N M. Effects of earthquakes on dams and embankment [J]. Geotechnique, 1965, 18 (2): 139 ~ 160.
- [7] Jibson R W, Harp E L, Michael J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. Engineering Geology, 2000, 58 (3 ~ 4): 271 ~ 289.
- [8] 石菊松,张永双,董诚,等. 基于 GIS 技术的巴东新城区滑坡灾害危险性区划 [J]. 地球学报, 2005, 26 (3): 275 ~ 282.
SHI Jusong, ZHANG Yongshuang, DONG Cheng, et al. GIS-based landslide hazard zonation of the new Badong county site [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26 (3): 275 ~ 282. (in Chinese with English abstract)
- [9] Jibson R W. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—a retrospective [J]. Engineering Geology, 2011, 122 (1/2): 43 ~ 50.
- [10] 王涛,吴树仁,石菊松,等. 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, 2015, 23 (1): 93 ~ 104.
WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Concepts and mechanical assessment method for seismic landslide hazard: a review [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23 (1): 93 ~ 104. (in Chinese with English abstract)
- [11] Godt J, Şener B, Verdin K, et al. Rapid assessment of earthquake-induced landsliding [A]. Proceedings of the First World Landslide Forum [C]. Tokyo: United Nations University, 2008.
- [12] Del Gaudio V, Pierri P, Wasowski J. An approach to time-probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93 (2): 557 ~ 569.
- [13] 刘甲美,高孟潭,吴树仁. 概率性地震滑坡危险性区划方法及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (S1): 3100 ~ 3110.
LIU Jiamei, GAO Mengtan, WU Shuren. Probabilistic seismic landslide hazard zonation method and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (S1): 3100 ~ 3110. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王涛,吴树仁,石菊松,等. 历史强震对渭河中游群发大型滑坡的诱发效应反演 [J]. 地球学报, 2015, 36 (3): 353 ~ 361.
WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Inversion of the inducing effects of historical strong earthquakes on large-scale landslides around the middle reaches of the Weihe River [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36 (3): 353 ~ 361. (in Chinese with English abstract)
- [15] 宋志,倪化勇,周洪福,等. 基于多层次物理力学参数的小区域地震滑坡危险性评估——以长江上游石棉县城及周为例 [J]. 地质力学学报, 2016, 22 (3): 760 ~ 770.
SONG Zhi, NI Huayong, ZHOU Hongfu, et al. Risk

- assessment of seismic landslide within small region based on multi-level physical and mechanical parameters; a case study of Shimian and adjacent areas in the upper reaches of Yangtze River [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22 (3): 760 ~ 770. (in Chinese with English abstract)
- [16] Ambraseys N N, Menu J M. Earthquake-induced ground displacements [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1988, 16 (7): 985 ~ 1006.
- [17] Jibson R W. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis [J]. *Transportation Research Record*, 1993, (1411): 9 ~ 17.
- [18] Bray J D, Rathje E M. Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124 (3): 242 ~ 253.
- [19] Jibson R W. Regression models for estimating coseismic landslide displacement [J]. *Engineering Geology*, 2007, 91 (2/4): 209 ~ 218.
- [20] Hsieh S Y, Lee C T. Empirical estimation of the Newmark displacement from the Arias Intensity and critical acceleration [J]. *Engineering Geology*, 2011, 122 (1/2): 34 ~ 42.
- [21] Chousianitis K, Del Gaudio V, Kalogeras I, et al. Predictive model of Arias Intensity and Newmark displacement for regional scale evaluation of earthquake-induced landslide hazard in Greece [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 65: 11 ~ 29.
- [22] Yuan R M, Deng Q H, Cunningham D, et al. Newmark displacement model for landslides induced by the 2013 M_s 7.0 Lushan earthquake, China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10 (4): 740 ~ 750.
- [23] Capolongo D, Refice A, Mankelov J. Evaluating earthquake-triggered landslide hazard at the basin scale through GIS in the upper Sele River valley [J]. *Surveys in Geophysics*, 2002, 23 (6): 595 ~ 625.
- [24] Refice A, Capolongo A. Probabilistic Modeling of Uncertainties in Earthquake-induced landslide hazard assessment [J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28 (6): 735 ~ 749.
- [25] Murphy W, Mankelov J M. Obtaining probabilistic estimates of displacement on a landslide during future earthquakes [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2004, 8 (1): 133 ~ 157.
- [26] Mahdaviifar M, Jafari M K, Zolfaghari M R. Real-time generation of arias intensity and seismic landslides hazards maps using GIS [J]. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 2008, 10 (2): 81 ~ 90.
- [27] 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 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_s 8.0 级地震为例 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21 (1): 16 ~ 24.
- WANG Tao, WU Shuren, Shi Jusong, et al. Case study on rapid assessment of regional seismic landslide hazard based on simplified Newmark displacement model: Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21 (1): 16 ~ 24. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈晓利, 袁仁茂, 庾露. 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*, 2013, 35 (3): 661 ~ 670.
- CHEN Xiaoli, YUAN Renmao, YU Lu. Applying the Newmark's model to the assessment of earthquake-triggered landslides during the lushan earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 2013, 35 (3): 661 ~ 670. (in Chinese with English abstract)
- [29] 葛华, 陈启国, 王德伟. 地震滑坡危险性评价及编图——以映秀震中区为例 [J]. *中国地质*, 2013, 40 (2): 644 ~ 652.
- GE Hua, CHEN Qiguo, WANG Dewei. The assessment and mapping of seismic landslide hazards: a case study of Yingxiu area, Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 2013, 40 (2): 644 ~ 652. (in Chinese with English abstract)
- [30] Liu J M, Gao M T, Wu S R, et al. A hazard assessment method for potential earthquake-induced landslides—a case study in Huaxian County, Shaanxi province [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2016, 90 (2): 590 ~ 603.
- [31] 雷中生, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 734 年天水 7 级地震考证与发震构造分析 [J]. *地震地质*, 2007, 29 (1): 51 ~ 62.
- LEI Zhongsheng, YUAN Daoyang, GE Weipeng, et al. Textual research on the Tianshui M 7 earthquake in 734 ad and analysis of its causative structure [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29 (1): 51 ~ 62. (in Chinese with English abstract)
- [32] 杨晓平, 冯希杰, 黄雄南, 等. 礼县—罗家堡断裂晚第四纪活动特征: 兼论 1654 年礼县 8 级地震孕震机制 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58 (2): 504 ~ 519.
- YANG Xiaoping, FENG Xijie, HUANG Xiongnan, et al. The late quaternary activity characteristics of the Lixian-Luojiabu fault: a discussion on the seismogenic mechanism of the Lixian M 8 earthquake in 1654 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58 (2): 504 ~ 519. (in Chinese with English abstract)
- [33] 袁道阳, 雷中生, 王爱国. 1654 年甘肃天水南 8 级地震补充考证 [J]. *地震工程学报*, 2017, 39 (3): 509 ~ 520.
- YUAN Daoyang, LEI Zhongsheng, WANG Aiguo. Additional textual criticism of southern Tianshui M 8 earthquake in Gansu Province in 1654 [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39 (3): 509 ~ 520. (in Chinese with English abstract)
- [34] Liu J M, Shi J S, Wang T, et al. Seismic landslide hazard assessment in the Tianshui area, China, based on scenario earthquakes [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, doi: 10.1007/s10064 ~ 016 ~ 0998 ~ 8. (in Press)
- [35] 刘甲美, 王涛, 石菊松, 等. 四川九寨沟 M_s 7.0 级地震滑坡应急快速评估 [J]. *地质力学学报*, 2017, 23 (5): 639 ~ 645.
- LIU Jiamei, WANG Tao, SHI Jusong, et al. Emergency rapid assessment of landslides induced by the Jiuzhaigou M_s 7.0 earthquake, Sichuan, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23 (5): 639 ~ 645. (in Chinese with English abstract)
- [36] 段汝文, 王峻, 李兰. 黄土的物理力学指标与黄土易损性分析研究 [J]. *西北地震学报*, 1997, 19 (3): 81 ~ 85.

DUAN Ruwen, WANG Jun, LI Lan. On relationship between physical mechanical indices and vulnerability of loess [J]. Northwestern Seismological Journal, 1997, 19 (3): 81 ~ 85. (in Chinese with English abstract)

[37] Zhang Z L, Wang T, Wu S R, et al. Dynamics stress-strain behavior of Tianshui soils [J]. Landslides, 2017, 14 (1): 323 ~ 335, doi: 10.1007/s10346-016-0694-6.

[38] Zhang Z L, Wang T, Wu S R, et al. Seismic performance of loess-mudstone slope by centrifuge tests [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76 (2): 671 ~ 679, doi: 10.1007/s10064-015-0846-2.

[39] 董瑞树, 冉洪流, 高铮. 中国大陆地震震级和地震活动断层长度的关系讨论 [J]. 地震地质, 1993, 15 (4): 395 ~ 400.

DONG Ruishu, RAN Hongliu, GAO Zheng. The relationship between earthquake magnitude and length of active fault in China [J]. Seismology and Geology, 1993, 15 (4): 395 ~ 400. (in Chinese with English abstract)

[40] 孟令媛, 周龙泉, 刘杰. 2013 年四川芦山 $M_s7.0$ 地震近断层强地面运动模拟及烈度分布估计 [J]. 地球物理学报, 2014, 57 (2): 441 ~ 448.

MENG Lingyuan, ZHOU Longquan, LIU Jie. Estimation of the near-fault strong ground motion and intensity distribution of the 2013 Lushan, Sichuan, M_s 7.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57 (2): 441 ~ 448. (in Chinese with English abstract)

[41] Travarasrou T, Bray J D, Abrahamson N A. Empirical attenuation relationship for arias intensity [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32 (7): 1133 ~ 1155.

[42] Legg M, Slosson J, Eguchi R. Seismic hazard for lifelines vulnerability analyses [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation [C]. Seattle, Washington, 1982.