

# Shakemap 场地校正方法及其在云南地震动强度和烈度速报中的应用\*

张彦琪<sup>1,2</sup>, 范柱国<sup>1</sup>, 陈坤华<sup>2</sup>, 崔建文<sup>2</sup>, 李世成<sup>2</sup>, 冉 华<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明, 650093; 2. 云南省地震局, 云南 昆明, 650224)

**摘要:** 将美国 Shakemap 场地校正方法用于云南地震动强度和烈度速报工作, 通过分析 Shakemap 场地校正方法及其要点, 将该方法应用于云南典型区域与实际场地情况进行对比分析, 探讨了 Shakemap 场地校正方法相关参数问题, 认为将该方法用于研究云南地区时应应对相关参数做一些改进, 首先要对其只基于地形坡度单指标的场地条件分类进行补充, 即应该考虑  $V_s^0$  与多指标因素的相关性 (如近地表地质状况、高程、距离河流的距离等)。同时, 必须从实际场地情况出发考虑局部场地条件对地震动的影响, 主要从盆地软弱土层、地质构造条件和局部砂土液化场地等方面修正局部场地条件对地震动的放大作用。这样, 在完善理论计算结果的基础上结合对实际场地情况的修正, 通过理论与实际双重的校正, 达到提高预测结果精度的效果, 为震后的应急决策提供有用的信息和帮助。

**关键词:** 地震动强度; 地震烈度; Shakemap 场地校正方法; 局部场地条件; 云南地区

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2013)01-0108-08

## 0 引言

当一个破坏性地震发生后, 政府部门急需要了解哪个地区地震动最强烈, 破坏最严重, 从而按照灾情程度合理分配救灾资源, 提高救灾效率, 最大限度减少灾害损失 (倪四道, 2008)。

为了深入贯彻以人为本、执政为民的理念, 2010 年的全国防震减灾会议将烈度速报工作确定为未来及今后一段时间内的重点工作之一, 之后召开的“全国地震烈度速报及预警技术专题研讨会议”提出, 把中强以上地震, 尤其是特别大震巨灾的烈度速报作为重点问题。“十二五”期间, 国家将在国内建设烈度速报和预警系统 (王瞰等, 2011)。

目前国际上的烈度速报模式主要有日本模式和美国模式两种。由于日本地震多, 加之经济实力雄厚, 利用密集型的烈度计台网, 在破坏性地震发生后的短时间内直接产出地震动强度和烈度分布等图件。美国国土面积大, 地震没有日本那么频繁, 也没有日本那样密度的强震台网, 因此

美国大量采用了计算机模拟技术, 在台距较大的台网内内插虚拟台站以增加数据量, 对通过一定衰减关系计算得到的虚拟台站的理论基岩地震动参数值, 根据场地条件将其校正到地表, 得到地表土层的地震动参数值, 从而获得较能真实反映灾区地面运动的地震动强度和烈度分布情况。

云南地区强震台网的台站数量不多、分布比较稀疏, 和美国的情况相类似。鉴于此, 云南地区可以基于本土的台网, 以监控系统的强震动观测数据为基础, 以美国模式 Shakemap (震动图软件) 为模版, 开展地震动强度和烈度分布的烈度速报工作。

如何考虑目标区的场地影响, 即不同场地条件对地震动的放大作用, 这是开展本项工作需要解决的一个重要问题。为此, 笔者首先分析了 Shakemap 场地校正方法及其要点, 并在云南地区选择典型区域对 Shakemap 场地校正方法进行实际运用; 通过与实际场地情况的对比探讨了局部场地条件对地震动的影响, 对基于强震动台网的云南地震动强度和烈度速报场地影响校正提出建议。

\* 收稿日期: 2012-05-30.

基金项目: 地震行业科研专项“宁洱 6.4 级地震现场综合考察和研究 (200808061)”资助。

# 1 Shakemap 场地校正方法研究

## 1.1 Shakemap 现状

日本地震学家金森博雄 (Kanamori) 最早提出了震动图的概念 (陈会忠等, 2009)。震动图描述地震发生后地震动的地理分布图形, 即显示的是地震产生的地面运动和可能的烈度破坏情况, 主要包括峰值地面加速度图 (Peak Ground Acceleration, PGA)、峰值地面速度图 (Peak Ground Velocity, PGV) 和仪器烈度值 (Imm) 分布图等 (泽仁志玛等, 2006)。

Shakemap 是对地震产生的地震动的一种图形表示, 最早由 Wald 构思, 是美国 USGS 在国家基金会的资助下于 20 世纪 80 年代开发, 由 Wald 等人完成, 并在 1996 年率先成功用于加州地震实时强震台网, 目前仍在不断升级完善中 (Wald *et al*, 2006)。美国 USGS 于 2006 年开始对全球发生的大地震进行烈度速报。

## 1.2 场地校正

### (1) 场地条件分类指标

Borcher (1994) 研究表明, 土层对基岩地震动的反应谱放大系数与地下 30 m 深度的土层平均剪切波速 ( $V_s^{30}$ ) 成比例关系。

美国 NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) 规范中, 用地下 30 m 深度的土层平均剪切波速 ( $V_s^{30}$ ) 作为场地条件的分类的量化指标 (Building Seismic Safety Council, 2004)。

### (2) 校正方法

众多研究者利用地表地质、 $V_s$  与土层物理性质 (年龄、颗粒大小、深度等) 的关系将  $V_s^{30}$  指定给研究区内相应的地质单元, 然后根据地表地质情况外推各个地质单元的剪切波速值, 进而得到场地条件分类 (陈鲲等, 2010)。该项操作需要事先掌握详细的地表浅层物质信息, 因此实际不好操作。

Wald 和 Allen (2007) 研究表明, 地貌指标、地形坡度、高程与  $V_s^{30}$  具有较好的相关性, 其中, 地形坡度与  $V_s^{30}$  的相关性更好。这样, 以地形坡度作为指标而生成的场地条件图和其它直接获取的图形相比相关性更好。因此, 以地形坡度为指标生成场地条件图是简单的行之有效的办法。而此项研究是基于假设地表地质状况与地形具有相似

性为前提的。

以地表地质状况与地形坡度的相似性为原则, 以地形坡度作为全球任一场点的场地条件分类指标, 利用地下 30 m 深度的平均剪切波速 ( $V_s^{30}$ ) 与地形坡度的相关性关系, 使用经过坡度计算的地形数据, 得到各个场点近似的  $V_s^{30}$  值, 再用  $V_s^{30}$  量化同时依赖于幅值和频率的场地放大系数。将由此建立的场地放大系数运用到 Shakemap (图 1), 校正通过一定衰减关系计算得到的目标区虚拟台站的理论基岩地震动参数值, 从而获得地表土层的地震动参数分布。

Wald 和 Allen (2007) 给出了两套地形坡度与  $V_s^{30}$  的经验关系: (1) 具有显著地形地貌的活动构造区; (2) 地形变化相对柔和的稳定地块区 (表 1)。在具体分析时, 首先应该区分目标区属于活动构造区还是稳定地块区。

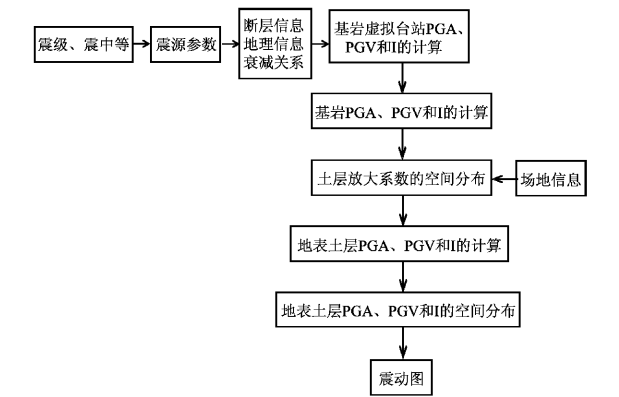


图 1 考虑场地影响的 Shakemap 计算流程图  
Fig. 1 Shakemap calculation flow considering site influence

表 1 坡度范围与 NEHRP  $V_s^{30}$ 、NEHRP 场地分类的关系  
Tab. 1 The relationship between slope range and NEHRP  $V_s^{30}$ 、NEHRP site classification

场地 分类	$V_s^{30}$ 范围 /m·s <sup>-1</sup>	坡度范围/m	
		活动构造区	稳定地块区
E	<180	<1×10 <sup>-4</sup>	<2×10 <sup>-5</sup>
	180~240	1×10 <sup>-4</sup> ~2.2×10 <sup>-3</sup>	2×10 <sup>-5</sup> ~2.0×10 <sup>-3</sup>
	240~300	2.2×10 <sup>-3</sup> ~6.3×10 <sup>-3</sup>	2.0×10 <sup>-3</sup> ~4.0×10 <sup>-3</sup>
D	300~360	6.3×10 <sup>-3</sup> ~0.018	4.0×10 <sup>-3</sup> ~7.2×10 <sup>-3</sup>
	360~490	0.018~0.050	7.2×10 <sup>-3</sup> ~0.013
	490~620	0.050~0.10	0.013~0.018
C	620~760	0.10~0.138	0.018~0.025
B	>760	>0.138	>0.025

(3) 场地放大系数

为了获取土层的放大系数,在已知  $V_S^{30}$  的情况下,可以使用 Borchardt (1994) 基于  $V_S^{30}$  得到的依赖于振幅和频率的放大系数。他用  $V_S^{30}$  计算出了短周期 (0.1 ~ 0.5 s) 和中周期 (0.4 ~ 2.0 s) 4 个加速度输入档下的放大系数 (表 2)。在 Shakemap 中,PGA 采用短周期场地放大系数校正,PGV 采用中周期场地放大系数校正。

$$F_a = (v_0/v)^{m_a}, \tag{1}$$
$$F_v = (v_0/v)^{m_v}. \tag{2}$$

式中,  $F_a$  和  $F_v$  分别为短周期和中周期放大系数;  $v_0$  为基岩的剪切波速,取 1 050 m/s;  $v$  为地下 30 m 深度的平均剪切波速;  $m_a$  和  $m_v$  是与基岩峰值加速度有关的统计参数。

表 2 NEHRP 场地分类下的场地放大系数

Tab. 2 Site amplification factor in the NEHRP site classification

场地分类	$V_S^{30}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	短周期 (PGA)				中周期 (PGV)			
		<150	150	250	350	<150	150	250	350
PGA *									
B	686	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	464	1.15	1.10	1.04	0.98	1.29	1.26	1.23	1.19
D	301	1.33	1.23	1.09	0.96	1.71	1.64	1.55	1.45
E	163	1.65	1.43	1.15	0.93	2.55	2.37	2.14	1.91

注: PGA \* 是输入 PGA 的分界值; PGA 对应于短周期 (0.1 ~ 0.5 s), PGV 对应于中周期 (0.4 ~ 2 s)。

场地放大系数的计算步骤及过程如下所述。

(1) 地形坡度值的计算。根据地形高程数据,通过 GMT 工具中的“grdgradient”命令操作 (Wessel, Smith, 1991)。

(2) 目标区的边界范围确定和平均坡度值计算。通过 GMT “grdinfo\_ l2” 坡度均值和标准差实现:如果平均坡度小于 0.05,用稳定地块区的坡度范围进行分析;如果平均坡度大于 0.05,使用活动构造区的坡度范围进行分析 (表 1)。需要强调的是,表 1 中的系数是以构造变化特征为基础的。

(3) 根据地形坡度值估计各场点的  $V_S^{30}$  和场地类别。

(4) 在综合各种场地因素、地面运动时间、(基于表 2 的场地放大系数) 修正输入振幅的基础上,得到各场点的场地放大系数。

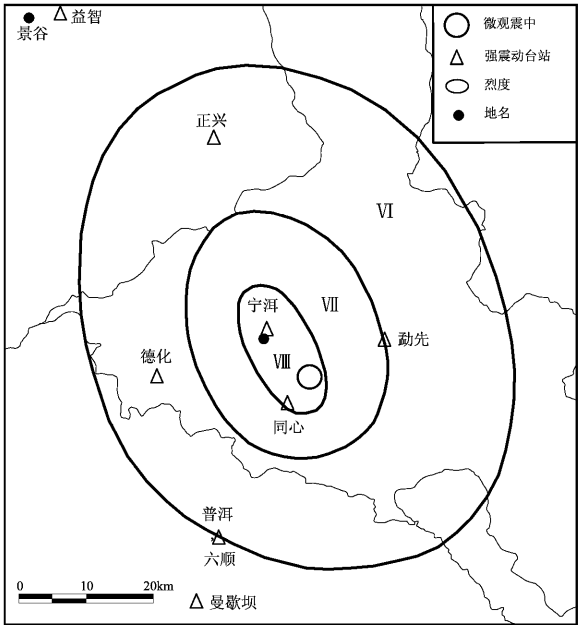


图 2 宁洱 6.4 地震烈度区及强震动台站分布图  
Fig. 2 Distribution of seismic intensity zone and strong-motion station in Ning'er 6.4 earthquake

## 2 Shakemap 场地校正方法在云南地区的实际应用

### 2.1 研究区的选择

宁洱 6.4 地震发生在云南省强震动台站分布较为密集的地区,震中四周分布有 8 个台站。地震发生时,共有 20 多个强震动台站记录到该地震产生的地面运动。这改变了中国大陆以往获取的强震动记录以余震记录为主 (高光伊等, 2001), 而

且即使取得主震记录,也多以远震为主的现状。这也是我国大陆自开展强震动观测以来在一次强震中同时获取记录最多的一次 (崔建文等, 2007)。但值得注意的是,位于实地考察得到的 VI 度及以上区域 (卢永坤等, 2007) 及 VI 度附近的 6 个强震动台站 (图 2), 其加速度峰值与烈度的对应值 (仪器烈度)

与考察得到的宏观烈度相比有一定差异（表 3）。中国地震烈度表（GB/T 17742 – 2008）给出了加速度峰值与烈度的对应关系（表 4）。

基于上述考虑，笔者选择宁洱 6.4 地震的Ⅵ度

区及其附近以及Ⅵ度以上区域作为研究区，假设区内的强震动台站为虚拟台站，通过 Shakemap 场地校正方法，对各强震动台站的场地影响进行了初步考量。

表 3 研究区各强震动台站记录参数

Tab. 3 Recording parameters of the strong-motion station in study area

序号	台站	纬度/(°)	经度/(°)	震中距/km（中国台网）	宏观烈度	加速度峰值/cm·s <sup>-2</sup>	仪器烈度
1	德化	23.002	100.88	22.2	Ⅵ	431.2（EW）	Ⅸ
2	正兴	23.331	100.96	39.3	Ⅵ	404.9（EW）	Ⅸ
3	勐先	23.053	101.21	12.4	Ⅵ	157.7（SN）	Ⅶ
4	曼歇坝	22.69	100.93	38.1	Ⅴ	58.4（EW）	Ⅵ
5	六顺	22.78	100.97	57.5	Ⅵ	19.8（SN）	Ⅳ
6	益智	23.502	100.74	67.1	Ⅴ	17.6（SN）	Ⅳ
7	同心	22.965	101.07		Ⅷ	故障未记录	
8	宁洱	23.065	101.04		Ⅷ	故障未记录	

注：仪器烈度依据中国地震烈度表（GB/T 17742 – 2008）加速度峰值与烈度的对应关系（表 4）获得。

表 4 烈度与加速度的对应关系

Tab. 4 Corresponding relationship between seismic intensity and acceleration

烈度	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ
水平向地面峰值加速度/cm·s <sup>-2</sup>	45 ~ 89	90 ~ 177	178 ~ 353	354 ~ 707

2.2 研究区各强震动台站的场地情况判定

按照前述 Shakemap 场地校正方法，我们对研究区各强震动台站的场地情况进行了判定。

（1）地形坡度值。通过 30″的 SRTM 地形高程数据，得到各强震动台站的地形坡度值，同时确定研究区的平均坡度为 0.324。

（2）活动构造区还是稳定地块区的判断。研究区的平均坡度值 0.324 大于 0.05，故使用活动构造区的地形坡度与  $V_s^{30}$  的相关性关系（表 1）进行  $V_s^{30}$  的估算。

（3）根据活动构造区的地形坡度与  $V_s^{30}$  的相关性关系（表 1）、地形坡度值等估计各强震动台站的  $V_s^{30}$  和场地类型（表 5）。在实际运用中，只需得到  $V_s^{30}$  所处场地分类的范围即可，以达到节约时间的目的。

（4）场地放大系数。德化台的场地类型为 B 类、地表土层的地震动参数值为 431.2 cm/s<sup>2</sup>，依据表 2 判定德化台的基岩地震动参数值为 431.2 cm/s<sup>2</sup>，场地放大系数为 1.00。同理，得到正兴、勐先和益智 3 个台站的基岩地震动参数值和场地放大系数（表 6）。

表 5 研究区各强震动台站的场地类型

Tab. 5 Site style of the strong-motion station in study area

台站	地形坡度	$V_s^{30}/m \cdot s^{-1}$	场地类型
德化	0.388	> 760	B
正兴	0.343	> 760	B
勐先	0.227	> 760	B
曼歇坝	0.088	490 – 620	C
六顺	0.016	300 – 360	D
益智	0.292	> 760	B

表 6 美国场地分类下各强震台站的场地放大系数

Tab. 6 Site amplification factor of the strong-motion station in U. S. site classification

台站	场地类型	地表土层的地震动 参数值/cm·s <sup>-2</sup>	基岩地震动 参数值/cm·s <sup>-2</sup>	场地放大系数
德化	B	431.2	431.2	1.00
正兴	B	404.9	404.9	1.00
勐先	B	157.7	157.7	1.00
曼歇坝	C	58.4	50.8	1.15
六顺	D	19.8	14.9	1.33
益智	B	17.6	17.6	1.00

曼歇坝台的场地类型为 C 类、地表土层的地震动参数值为  $58.4\text{ cm/s}^2$ ，依据表 2 判定曼歇坝台的基岩地震动参数值为  $50.8\text{ cm/s}^2$ ，场地放大系数为 1.15。同理，得到六顺台的基岩地震动参数值和场地放大系数（表 6）。

2.3 研究区各强震台站的实际场地情况

依据现场钻孔揭露的地层显示，研究区各强震动台站场址均建于土层之上，其场地类型按建筑抗震设计规范（GB 50011-2010）的方法，即先算出每个场地的等效剪切波速，然后根据等效剪切波速和覆盖层厚度这两个参数确定场地类型（表 7）。

表 7 研究区各强震动台站的场地情况						
Tab. 7 Site condition of the strong-motion station in study area						
台站	地层 编号	岩、土层 厚度/m	土层性质	等效剪切 波速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	场地情况 性质 类型	
德化	①	6.6	素填土	273.54	土层	Ⅱ
	②	5.0	粘土			
	③	1.4	微风化石灰岩			
正兴	①	1.7	粘土	336.73	土层	Ⅱ
	②	7.5	粘土			
	③	13.6	强风化泥岩			
	④	2.2	中风化泥岩			
勐先	①	1.6	粉质粘土	307.72	土层	Ⅱ
	②	4.1	全风化粉砂岩			
	③	17.4	全风化粉砂岩			
曼歇坝	①	0.8	耕土	335.41	土层	Ⅱ
	②	6.2	粘土			
	③	4.9	强风化泥岩			
	④	1.3	强风化泥质粉砂岩			
	⑤	4.0	中风化石英粉砂岩			
六顺	①	1.2	粘土	292.64	土层	Ⅱ
	②	8.4	粘土			
	③	2.6	未风化石灰岩			
益智	①	1.2	素填土	270.70	土层	Ⅱ
	②	4.6	粘土			
	③	8.4	粘土			
	④	3.4	微风化粉砂岩			

2.4 结果比较

美国 NEHRP 规范中的基岩是指  $V_s^{30}$  大于  $760\text{ m/s}$  的场地，且将场地分为 A、B、C、D、E 五类；而中国规范则规定  $V_s^{20}$  大于  $500\text{ m/s}$  的场地

为基岩；把场地划分出 I、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四类。两国规范对不同场地的分类指标参数范围的规定也不同，所以无法直接比较各强震动台站的场地类型。故只能根据各台站的场地类别和地表土层的地震动参数值，得到其在两国场地分类下的基岩地震动参数值及场地放大系数，进而对各台站在两国场地分类下的场地放大系数进行粗略比较。

（1）中国场地分类下研究区各台站的场地放大系数

吕红山和赵凤新（2007）根据研究，给出了适用于中国场地分类的场地放大系数（表 8）。

表 8 适用于中国场地分类的场地放大系数					
Tab. 8 Site amplification factor applies to the China site classification					
场地类型	基岩地震动参数值/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$				
	$\leq 100$	200	300	400	$\geq 500$
I	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ⅱ	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
Ⅲ	2.1	1.6	1.2	1.0	1.0
Ⅳ	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9

根据表 8 中的对应关系，由德化台的场地类型为Ⅱ类、地表土层的地震动参数值为  $431.2\text{ cm/s}^2$  判定该台站的基岩地震动参数值为  $392\text{ cm/s}^2$ ，场地放大系数为 1.1。同理，推出另外 3 个台站的场地放大系数（表 9）。

表 9 中国场地分类下各台站的场地放大系数				
Tab. 9 Site amplification factor of the strong-motion station in China site classification				
台站	场地 类型	地表土层的地震动 参数值/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$	基岩地震动 参数值/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$	场地放 大系数
德化	Ⅱ	431.2	392.0	1.1
正兴	Ⅱ	404.9	368.1	1.1
勐先	Ⅱ	157.7	121.3	1.3
曼歇坝	Ⅱ	58.4	41.7	1.4
六顺	Ⅱ	19.8	14.1	1.4
益智	Ⅱ	17.6	12.6	1.4

（2）中美两国场地分类下场地放大系数的比较

根据上述计算结果，通过对比表 6 和表 9 可以得到如下认识：在美国场地分类下，研究区的场地类型更为细化；美国场地分类下各台站的场地

放大系数值要略小,但差别不大。

## 3 Shakemap 场地校正方法在云南地区的应用分析

### 3.1 场地校正相关参数的考虑

#### (1) 场地条件分类指标

Shakemap 场地校正方法只基于地形坡度单指标的场地条件分类,这样得到的结果显然有很大的离散性。在一些特定地区,如当地形坡度与  $V_s^{30}$  的对应关系比较弱时,特别是在地形坡度较缓的地区,基本上不能区分 NEHRP 场地分类中的 E 类场地 ( $V_s^{30} < 180$  m/s)、我国建筑抗震设计规范中的 IV 类场地 (大致相当于  $V_s^{30} < 150$  m/s) (陈颀等, 2010)。这可能因为 30" 的 SRTM 地形高程数据的分辨率不够,对  $V_s^{30}$  较小地区造成不能识别或识别不够,也可能是这些地区的地形坡度与  $V_s^{30}$  单指标相关,本身数据的离散性太大,所以应该考虑  $V_s^{30}$  与多指标因素相关的情况,如近地表地质状况、高程、距离河流的距离等。对于近地表物质成分的估计,可以使用遥感技术来分析。

#### (2) 场地信息

##### ① 地形数据

目前,云南地区可以使用的 DEM (数字高程模型) 地形数据为 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 地形数据。美国对国外用户提供的可以免费下载的地形资料的分辨率为 3" 及其以上。

Allen 和 Wald (2009) 认为,虽然 3" 和 9" 的地形资料比 30" 的分析结果的质量要高,但在大空间尺度上并不适用。因为在大空间范围跨度下,使用高分辨率的地形数据,会导致计算时间的速度较慢,延缓地震预警的发布。

因此,云南地区可以基于 30" SRTM 地形高程数据、云南构造活跃区与稳定地块区分区特点及坡度范围与 NEHRP  $V_s^{30}$ 、NEHRP 场地分类的关系等,计算形成云南地区的  $V_s^{30}$  数据及其分布情况。

##### ② 断层数据

通过云南地区的断层数据,可以为确定地震动强度和烈度速报发震断层和烈度圈长轴展布方向提供依据。笔者认为云南地区的断层数据内容应该包括:地震构造背景及其区域分布特征;主要地震构造带的展布、组合和活动等特征,各构造带与地震活动的关系特征;地震构造带与地震

烈度分布的关系及地震极震区烈度圈长轴的分区分特点等。

#### ③ 地理信息数据

如果想在结果中显示更多的内容,需要事先将有关内容放到场地信息数据库中。因此,可将全省的高程信息,主要的公路、铁路信息,3 级以上河流的信息,全省州(市)、县(区)、乡镇、村(寨)的坐标信息等收录到场地信息数据库中。这样,通过 GMT 作图工具生成的图件中将会显示更多的信息内容。

### 3.2 场地条件的考虑

#### (1) 局部场地条件的影响

工程地震学研究中,场地条件系指场址区的工程地质条件,主要包括场址的地形地貌、岩土组成和性质、地质构造以及水文地质条件等。

中国地震烈度表 (GB/T17742 - 2008) 的 4.7 条规定:当有自由场地强震动记录时,水平向地震动峰值加速度和峰值速度可作为综合评定地震烈度的参考指标。地震动幅值的大小和震级的大小直接有直接关系,但同时也和地震波的传播途径及场地条件等因素有关。

一般认为局部场地条件对地震动(峰值加速度、反应谱等)有着显著的影响,具体表现为局部场地附近出现明显的地震动放大或缩小效应,从而直接影响到地震灾害的严重程度。

#### (2) 局部场地条件放大作用的修正

在把 Shakemap 场地校正方法应用于云南地区时,应该从以下几个方面重点把握局部场地条件对地震动的影响,以便对局部场地条件放大作用的修正,达到提高预测结果精度的效果。

##### ① 盆地软弱土层

盆地软弱土层,主要包括场地近地表土层特性、覆盖土层厚度和土层结构等。一方面,利用相关资料及文献(如 1:20 万区域地质、区域水文地质报告和地震安全性评价资料等);另一方面,收集全省的钻孔资料,根据钻孔揭示的地层信息,开展盆地软弱土层工作。

基于云南地区现有的强震动资源,通过强震动观测和地脉动观测等技术手段,开展有关盆地场地土特征、土层厚度及土层结构反演等方面的分析。

##### ② 地质构造条件

由于断层发震时两侧的地震动强度不同,从

而造成断层两侧一定范围内震害的显著差异,因此,首先要充分考虑断层的上盘效应。同时,由于断层的破裂方式一般是不规则的,需要把握活动断层是否会产生地表破裂及产生地表破裂的方式、活动断层及其附近地震动场分布特征等。

### ③ 局部砂土液化场地

发生砂土液化的土层主要是饱和粉细砂、粉土层。可以通过地震安全性评价资料,根据场地工程条件和水文地质条件,开展云南地区有关砂土液化场地的统计分析;另外,通过全省的钻孔资料,根据钻孔揭示的地层信息开展相关工作。

### 3.3 地形数据的补充

虽然在大空间范围上 30"SRTM 地形高程数据已经可以解决问题。但是,Allen 和 Wald (2009)的分析结果认为:9"和 3"等高分辨率资料对陡峭地形的情况更适用;高分辨率资料能够更加详细地显示地形坡度的变化以及地质体边缘地带(盆地边缘、毗邻盆地的丘陵突出地带、山谷等一些由于坡度变化明显的地带)的坡度变化情况;另外,高分辨率资料能够反映出小规模地质体的特征。

对于大地震,上述边缘地带是估计地面运动变化的重要因素。因此,在一些特殊场地,利用高分辨率资料对其地形进行详细分析是有必要的。

所以,云南地区有必要建立基于 9"SRTM 地形高程数据(甚至更高分辨率)的  $V_s^{30}$  数据库,以作补充和对比分析。

## 4 结语

基于强震动台网的云南地区地震动强度和烈度速报场地影响校正,在使用 Shakemap 场地校正方法进行具体分析时,首先要对其只基于地形坡度单指标的场地条件分类进行补充,因为只基于地形坡度单指标的场地条件分类得到的结果有很大的离散性。因此,应该考虑  $V_s^{30}$  与多指标因素的相关性,如近地表地质状况、高程、距离河流的距离等。同时,要从盆地软弱土层、地质构造条件和局部砂土液化场地等方面,修正局部场地条

件对地震动的放大作用。这样,在完善理论计算结果的基础上结合对实际场地情况的修正,达到提高预测结果精度的效果,为震后的应急决策提供有用的信息和帮助。

### 参考文献:

- 陈会忠,侯燕燕,王东斌,等. 2009. 汶川地震综合参数处理与地震台网救灾作用研究[J]. 地震,29(1):207-215.
- 陈鲲,俞言祥,高孟潭. 2010. 考虑场地效应的 ShakeMap 系统研究[J]. 中国地震,26(1):92-102.
- 崔建文,李正光,赵云旭. 2007. 2007 年宁洱 6.4 级地震强震动观测记录[J]. 地震研究,30(4):384-388.
- 高光伊,于海英,李山有. 2001. 中国大陆强震观测[J]. 世界地震工程,17(4):13-18.
- 卢永坤,曾应青,周光全,等. 2007. 2007 年宁洱 6.4 级地震震害综述[J]. 地震研究,30(4):364-372.
- 吕红山,赵凤新. 2007. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报,29(1):67-76.
- 倪四道. 2008. 应急地震学的研究进展[J]. 中国科学院刊,23(4):311-316.
- 王敏,龚宇,顾建华,等. 2011. 建立地震预警、地震报警和烈度速报综合系统的思考[J]. 国际地震动态,393(9):24-29.
- 泽仁志玛,陈会忠,何加勇,等. 2006. 震动图快速生成系统研究[J]. 地球物理学进展,21(3):809-813.
- Allen T I, Wald D J. 2009. On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions ( $V_s^{30}$ ) [J]. BSSA, 99(2A), 935-943.
- Borcherdt R D. 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification) [J]. Earthquake Spectra, 10(4):617-654.
- Building Seismic Safety Council. 2004. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (2003 edition) [S]. Washington D C: Building Seismic Safety Council, FEMA 450/451:19-38.
- GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB/T 17742-2008, 中国地震烈度表[S].
- Wald D J, Allen T I. 2007. Topographic Slope as a proxy for Seismic Site Conditions and Amplification [J]. BSSA, 97(5):1379-1395.
- Wald D J, Worden B C, Quitoriano V, et al. 2006. Shakemap manual; user Guide, Technical manual, and Software Guide, USGS Techniques and Methods [M]. Reston, Va: VS Geological Survey.
- Wessel P, Smith W H F. 1991. Generic Mapping Tools [M]. EOS, 72:441.

## Shakemap Site Correction Method and its Application in the Rapid Prediction of Ground Motion Intensity and Seismic Intensity in Yunnan

ZHANG Yan-qi<sup>1,2</sup>, FAN Zhu-guo<sup>1</sup>, CHEN Kun-hua<sup>2</sup>, CUI Jian-wen<sup>2</sup>, LI Shi-cheng<sup>2</sup>, RAN Hua<sup>2</sup>

(1. *Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China*)

(2. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

### Abstract

Applying the Shakemap site correction methods of U. S. for the rapid prediction of ground motion intensity and seismic intensity in Yunnan, we analyzed Shakemap site correction method and its main points, and applied it to the comparison and analysis of typical regions in Yunnan and the actual site conditions, and discussed the relevant parameters problems of it. We should improve the relevant parameters of Shakemap site correction method in Yunnan. Firstly, we supplied the classification of site conditions only based on topographic slope single indicator, which should be considered the correlation between  $V_s^{30}$  and multi-index factors (such as the near-surface geological conditions, elevation, the distance from the river etc.). At the same time, we must consider the impact of local site conditions on ground motion in the actual site conditions and modified the amplification of local site conditions on ground motion from the soft soil of basin, the geological structure and the local sand liquefaction sites etc. Basing on the theoretical calculation results, combining with modifying actual site conditions, we could improve the precision of predicted results by double correction of theoretical and practical, which could provide useful information and help for emergency decision after the earthquake.

**Key words:** ground motion intensity; seismic intensity; Shakemap site correction method; local site condition; Yunnan region