

李俊、陈剑雄、陈颢, 2012, 基于地形倾斜值的场地效应校正方法研究, 中国地震, 28 (1), 33 ~ 41。

# 基于地形倾斜值的场地效应校正方法研究

李俊<sup>1,2)</sup> 陈剑雄<sup>3)</sup> 陈颢<sup>4)</sup>

1) 中国科学技术大学, 合肥市金寨路 96 号 230026

2) 浙江省地震局, 杭州市西湖区古荡湾塘苗路 7 号 310013

3) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

4) 中国地震局, 北京 100086

**摘要** 根据 Wald 等(2007)的研究发现, 从地形数据里分离出来的倾斜值分布和用非单一来源得到的区域场地效应图有很好的相关性, 但前者在质量和连续性方面又更胜一筹, 且与实际观测所得到的速度分布较接近。本文阐述了以地形倾斜值求  $V_s^{30}$  及做场地效应校正的原理和方法, 据此方法从全球地形数据中得到研究区域的浅层剪切波速度  $V_s^{30}$  分布图, 并以 2008 年汶川地震为应用例子, 求得场地放大因子, 对初始地震动进行场地效应校正。

**关键词:** 地形倾斜值 浅层剪切波速度  $V_s^{30}$  地震动 场地效应

[文章编号] 1001-4683(2012)01-033-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地面建筑受到地震的破坏, 一个主要影响因素就是地震动的振动效应, 而震害经验表明, 场地土效应对地震动是有影响的。Wood 等(1931)通过对 1906 年美国旧金山大地震震中区附近的震害详细现场调查发现, 不同场地条件上, 建筑物的震害差异十分明显, 而之后发生的几次大地震, 如关东大地震、唐山大地震、墨西哥大地震、土耳其大地震和台湾集集大地震等的震灾调查资料都支持了 Wood 等的观点(Yamakawa, 1998; Wu et al, 2000; 胡家富, 1999; 张学民, 2005)。

随着对表层土效应认识的深入, 研究人员认定开发场地条件地图的系统(Park et al, 1998; Wills et al, 2000; Holzer et al, 2005)与定量研究依赖的振幅和频率的场地放大因子(Borcherdt, 1994)一样重要。事实上, 许多美国的建筑物类型编码中需要明确的场地响应特性数据, 如  $V_s^{30}$  (Dobry et al, 2000; Building Seismic Safety Council (BSSC), 2000, 2004), 另外, 许多地震动经验公式的计算结果也需要用根据  $V_s^{30}$  描述的场地条件进行校正(Boore et al, 1997; Chiou et al, 2006)。

最直接的研究场地土效应的方法是建立井下台阵进行强震观测, 通过比较地下深处基

[收稿日期] 2009-06-18

[项目类别] 国家自然科学基金(40604004)和地震科技星火计划项目(XH12022Y)资助

[作者简介] 李俊, 男, 1982 年生, 博士。现在浙江省地震监测预报研究中心, 主要从事地震监测和地震灾害评估方向研究。E-mail: junli@ustc.edu

岩和地表土层的强震记录,得出场地土的影响。在中国台湾,美国加州日本 Amagasaki、Takasago、Nanko 等地都有场地土影响观测,这些观测提供了直接显示场地土的非线性影响和证实了场地土确实对基岩地震动有放大作用。地震学家对场地土影响也做了大量的研究 (Field et al, 1997; Field, 2000; Hartzell et al, 1998; Beresnev et al, 1996; Su et al, 1998; Wald et al, 1999; Hartzell et al, 2003; Wills et al, 2006; 黄振平, 1995; 杨学林等, 1997; 胡家富等, 1999; 张学民, 2005), 但是由于人力物力等限制,通过打井观测得到实测场地土效应的地区的数目还很有限。因此, Wald 等 (2007) 提出了一种通过计算地形倾斜来求取浅层剪切波分布,进而得到近似场地土效应的简单方法。

研究地理高程和场地条件关系的初衷是为了得到尽可能准确的场地放大因子,由此来更好、更快地测算场地对地震动所造成的影响,这也是 USGS 的美国国家地震信息中心 PAGER (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response) 项目的核心 (Wald et al, 2005)。

## 1 计算地形倾斜值和 $V_s^{30}$ 分布

由于得到区域的场地条件图不仅需要获取大量的地质学和构造学的的数据,还需要对稀疏数据进行插值,而在全全球的地震活动地带,地面的地质信息和 S 波速度信息或缺失或数据质量不佳,亦或数据空间分辨率很差,亦或难于采集,因此在全球只有少数的地震活动性较强的城市地区才有制作场地条件图的可能。另一方面,随着卫星技术的发展,全球的、有着统一的高分辨率的地理高程数据却很容易得到。直观查看地理高程的变化也就得到了地表面的地形学和岩石学特征,即陡峭的是岩石表面,比较平坦的是泥土表面,处于中间状态的是一些转换带。在实际情况中的加州地区的真实场地条件图和从地理信息中得到的图的相似性也体现了这一点。另外,对日本 (Matsuoka et al, 2005) 和中国台湾 (Chiou et al, 2006) 的研究也证实了  $V_s^{30}$  和地形倾斜以及地貌特征的良好相关性。

地形倾斜值,也叫梯度,可作为对  $V_s^{30}$  的一个诊断,因为坚硬岩石区 (高速) 对应的是陡峭的地方,而沉积盆地对应低梯度的地域。进一步,可以用沉积厚度来表征低波速的程度 (Park et al, 1998)。这也跟倾斜值有关,因为越是平坦的地方,河流或雨水对它冲刷的能量越小,沉积层也更厚。因此对于地形起伏不平的区域和地面平坦的地区应该分别计算  $V_s^{30}$ 。

本研究中采用美国 NASA 的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 30 秒分辨率的全球地理高程数据 (该数据也广泛地被全球地理和地震学家使用)。这里应该注意的是,不同分辨率的地理数据可能会得到倾斜值与  $V_s^{30}$  不同的相关系数,我们采用此数据也是因为 USGS 已经用此数据计算得出地形倾斜值与  $V_s^{30}$  的相关系数。Wald 等 (2007) 曾用过 9s 分辨率的数据,但是由于该数据没有被全球化,而且不同分辨率的数据对应的倾斜率和速度的关系系数也不同,因此不能被广泛使用。表 1 就是采用 SRTM30 数据,通过给出的地形梯度与剪切波速的相关系数,得到的不同场地类型对应的不同速度范围与地形倾斜值之间的对应关系。

由于活动性构造地区和稳定构造地区的地形倾斜度与表面剪切波速度的对应关系不一致 (表 1),因此还要先判断研究区域的地质构造活动类型。直观地看,倾斜度较大的区域对应着地形起伏较大的造山带或地质构造较活跃地区,而倾斜度较小的区域则对应着地形较

表 1 地形倾斜值范围与  $V_s^{30}$  及场地类型的对应关系

场地类别	$V_s^{30}$ (m/s)	活动性构造倾斜值 (m/m)	稳定性构造倾斜值 (m/m)
E	< 180	$< 3.2 \times 10^{-5}$	$< 1.0 \times 10^{-6}$
	180 ~ 240	$3.2 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-3}$
D	240 ~ 300	$2.2 \times 10^{-3} \sim 6.3 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$
	300 ~ 360	$6.3 \times 10^{-3} \sim 0.018$	$4.0 \times 10^{-3} \sim 7.2 \times 10^{-3}$
C	360 ~ 490	0.018 ~ 0.050	$7.2 \times 10^{-3} \sim 0.013$
	490 ~ 620	0.050 ~ 0.10	0.013 ~ 0.018
	620 ~ 760	0.10 ~ 0.138	0.018 ~ 0.025
B	> 760	> 0.138	> 0.025

注:数据来自 FEMA (Federal Emergency Management Agency)

平坦的地质构造稳定的平原或盆地, Allen 等 (2007) 和 Wald 等 (2007) 的研究发现, 可以用平均倾斜度的大小来表征一个地区的地质构造活动性, 当平均倾斜度大于 0.05, 则认为该地区为活动构造 (Active Tectonic); 反之, 则认为是稳定构造 (Stable Tectonic)。

## 2 场地效应校正系数

场地校正是基于地质条件和表层剪切波速度进行的 (Wills et al, 2000), 校正因子也依赖于频率和地震动幅值 (Borcherdt, 1994), 根据 Borcherdt (1994) 的研究结果, 可以用 30m 剪切波速度表征场地的特性, 并以此计算出短周期 (0.1 ~ 0.5s) 和中周期 (0.4 ~ 2.0s) 的校正因子。在进行地震动校正时,  $PGA$  用短周期校正因子校正,  $PGV$  用中周期校正因子校正。

$$F_a = (v_0/v)^{m_a} \quad (1)$$

$$F_v = (v_0/v)^{m_v} \quad (2)$$

式中,  $F_a$  和  $F_v$  是短周期和中周期校正因子,  $v$  是 30m 剪切波速度,  $v_0$  是场地类型的平均剪切波速度,  $m_a$  和  $m_v$  是软土场地校正系数 (Borcherdt, 1994)。

Boore 等 (1997) 对各剪切波速度区间的不同场地类型的响应因子进行了研究, 得到了如图 1 的曲线关系。从图 1 不仅可以看出不同周期对应的校正因子不同, 而且不同剪切波速度的场地对相同频率的地震动的场地校正因子也不同。相同频率下, 剪切波速度小的, 放大因子大; 相反, 剪切波速度大的, 放大因子小。

Field 等 (1997) 对 1994 年的 Northridge 地震主震和余震数据进行研究分析后得到如图 2 的结果。由图 2 可知, 同一个场地对强主震和弱余震产生的放大效应也不一样, 即场地对不同强度地震的放大因子不一样。因此, 对于同一个场地类型, 我们需要按照地震动的大小采用不同的放大因子来做相应的场地效应校正。

根据 Borcherdt (1994) 给出的公式, USGS 得到的短周期 (0.1s ~ 0.5s) 和中长周期 (0.4 ~ 2.0s) 的场地效应放大因子示于表 2, 其中的场地类型根据 NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) 标准来划分,  $V_{el}$  是该类场地最大表层剪切速度,  $PGA$  为峰值加速度。本文也是基于此表对地震动进行校正并得到校正后的地震动分布, 其中对  $PGA$  采用短周期的校正因子, 对  $PGV$  采用中长周期的校正因子。

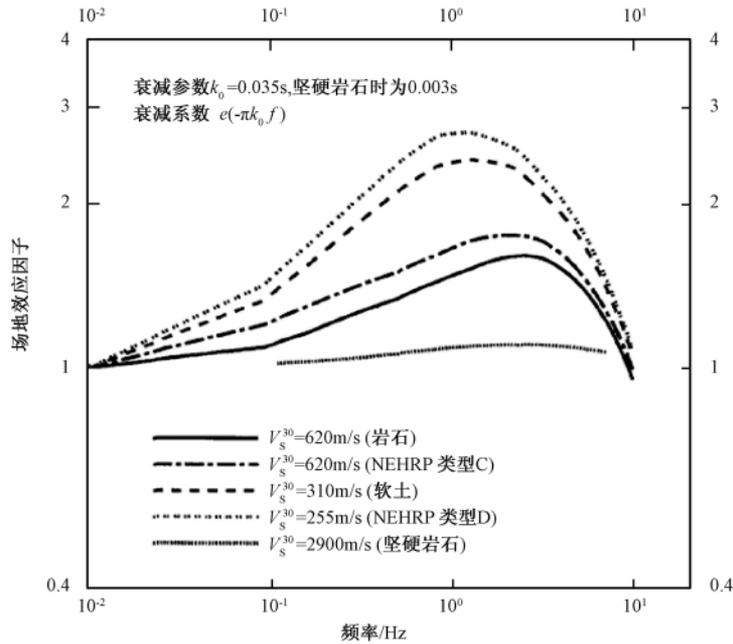


图 1 不同剪切波速度的场地效应与频率的关系(据 Boore 等(1997))

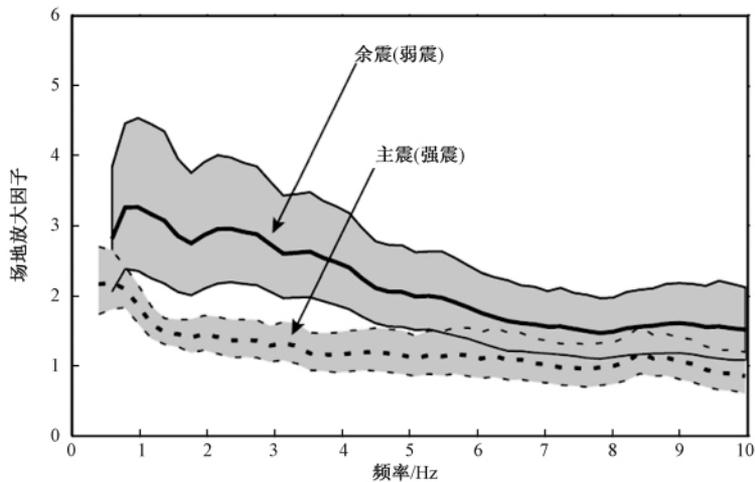


图 2 1994 年 Northridge 地震主震(强)和余震(弱)的场地效应放大因子比较(据 Field 等(1997))

表 2 地效应校正因子表(数据源自 USGS)

场地类型	Vel (m/s)	PGA (短周期) (gal)				PGV (中长周期) (gal)			
		< 150	150 ~ 250	250 ~ 350	> 350	< 150	150 ~ 250	250 ~ 350	> 350
B	686	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
BC	724	0.98	0.99	0.99	1.00	0.97	0.97	0.97	0.98
C	464	1.15	1.10	1.04	0.98	1.29	1.26	1.23	1.19
CD	372	1.24	1.17	1.06	0.97	1.49	1.44	1.38	1.32
D	301	1.33	1.23	1.09	0.96	1.71	1.64	1.55	1.45
DE	298	1.34	1.23	1.09	0.96	1.72	1.65	1.56	1.46
E	163	1.65	1.43	1.15	0.93	2.55	2.37	2.14	1.91

### 3 应用实例

根据以上方法,本文由地形数据得到了台湾地区场地速度分布,并与实际测定的场地分类进行对比,以验证此方法的适用性。本文还计算了汶川地震的初始(未校正)地震动分布,并根据以上方法得到场地放大因子分布,进行了场地效应校正。

#### 3.1 台湾地区的场地速度分布

台湾地区强震台网观测进行得较早,数据较大陆地区丰富,因此许多学者(Lee et al, 2001; Wang et al, 2007)已经对台湾地区的场地类型、速度结构进行了观测和研究。图 3(a)是 Lee 等(2001)根据各台站的记录划分的场地类型分布图,图 3(b)是本研究根据地形数据的倾斜值计算所得的浅层剪切波速度分布图。从两方法各速度分布图对比可看出,速度分布结构非常相似。图 3(a)所测场地类型分类和本文所得到图 3(b)的场地速度结构分布一致性非常好,且整体和局部的一致性都很好,而分辨率和精细度都高于受台站稠密度限制的实测场地类型分布,因此完全可以用此方法来做场地效应校正。

#### 3.2 汶川地震的场地效应

ShakeMap 可称为地震动制图系统,是一套能近乎实时计算地震动,并作出地震动图的程序,它由 Wald 构思设计,其后由 Wald 和 Quitoriano 完成,并在 1996 年率先成功应用于加州地震实时强震台网。ShakeMap 会自动快速地得到震动图,然后根据仪器烈度和当地的地质条件、地震震中、震级等来计算和得到该地震产生的烈度图。本文利用 ShakeMap 来计算初始(未校正)的地震动分布。

本文以汶川地震为例,对比了有、无场地效应校正的地震动分布,并以此分析场地效应的影响和通过地形倾斜值方法求场地效应的方法的有效性。

用于地震动计算的参数参考中国地震台网中心和 USGS 的震源数据和徐锡伟等(2008)、王卫民等(2008)、腾吉文等(2008)、张培震等(2008)的破裂带数据建立破裂模型,其中根据 USGS 的震源参数设定的震中为  $30.97^{\circ}\text{N}$ 、 $103.39^{\circ}\text{E}$ ,震源深度 14km,震级 8.0。

##### 3.2.1 DEM 地形图和 $V_s^{30}$ 速度分布图

图 4 为目标地区的地形图和用本文方法得到的浅层剪切波  $V_s^{30}$  分布图,由图 4 可见,青藏高原地区浅层剪切波速度明显比四川盆地的高,这与实际相符,此速度分布是进行下一步放大因子计算的基础。

##### 3.2.2 场地效应放大因子

在得到以上的  $V_s^{30}$  分布后,根据 ShakeMap 计算的地震动参数  $PGA$  的分布值就可以计算出如图 5 所示的短周期(0.1~0.5s)和中长周期(0.4~2.0s)校正因子。由图 5 可见,放大因子的分布特点正好与图 4 的  $V_s^{30}$  分布相反,四川盆地所处区域的放大因子明显比青藏高原的大,正这与实际所说的盆地土效应相符合。

##### 3.2.3 场地效应校正结果

图 6(a)为未经过场地效应校正的地震动及烈度分布,图 6(b)为经过场地效应校正的地震动及烈度分布。烈度通过  $PGA$  和  $PGV$  值根据 Wald 等(2005)提供的公式计算所得(李俊等,2010)。通过对比,可以明显看出场地效应的放大作用,即高烈度区域分布变广,且随着地形分布而更不规则,图 6(b)所示的不规则等值线便是由于场地效应校正的结果,越是

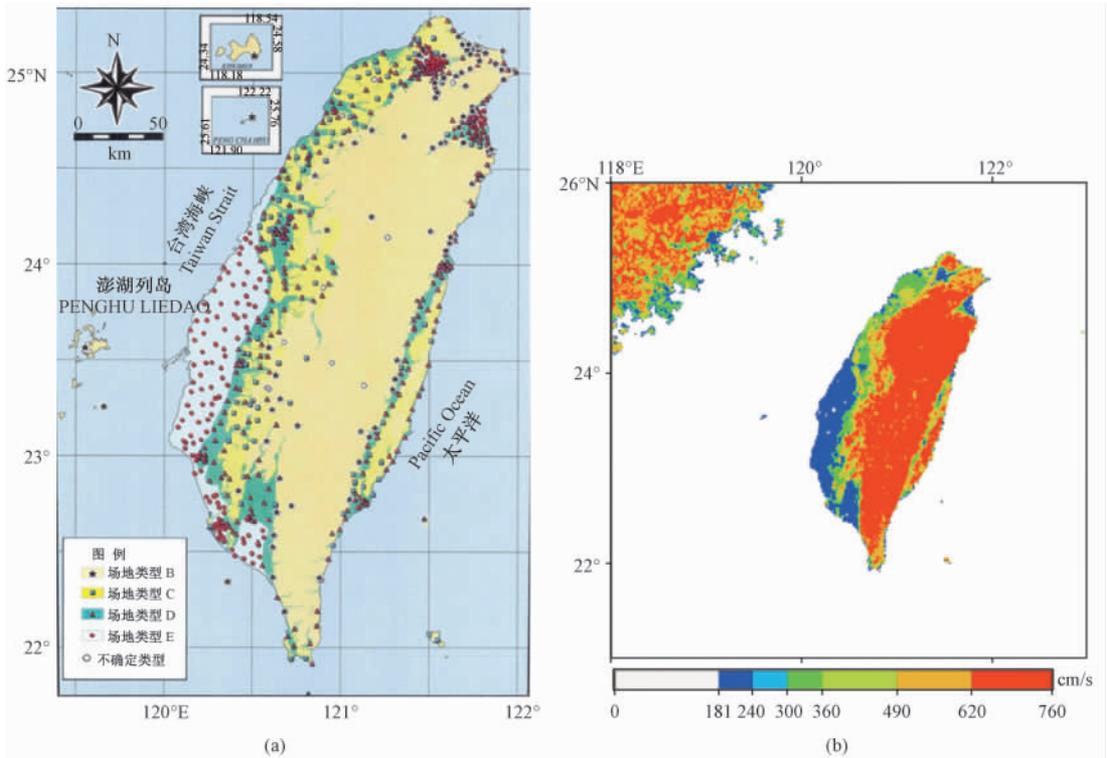


图3 台湾地区场地类型(据 Lee 等(2001)) (a) 和  $V_s^{30}$  速度分布(b)

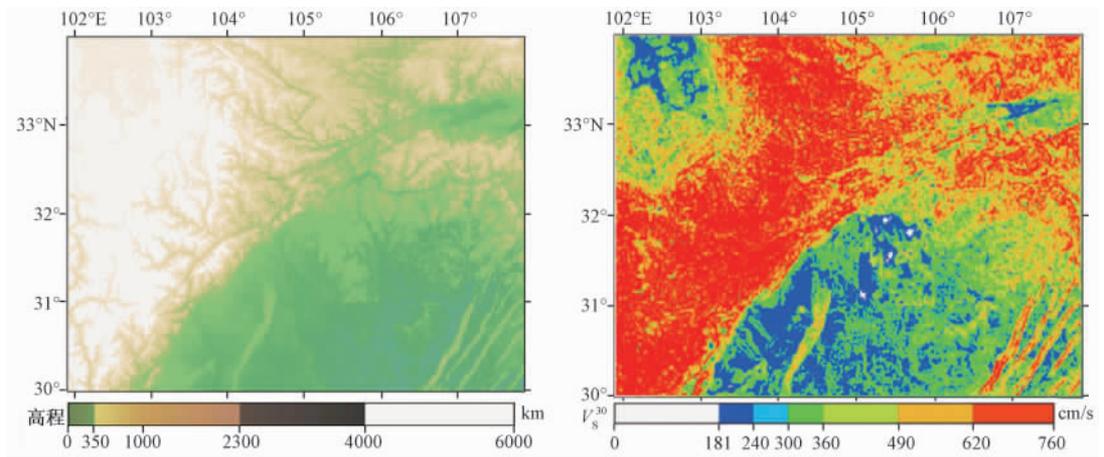


图4 研究区域的地形图和  $V_s^{30}$  分布图

不规则的分布,越能说明校正的精细程度。

## 4 结论与展望

在得到地震动的分布后,我们必须对地震动进行场地效应校正才能更客观、更符合实际

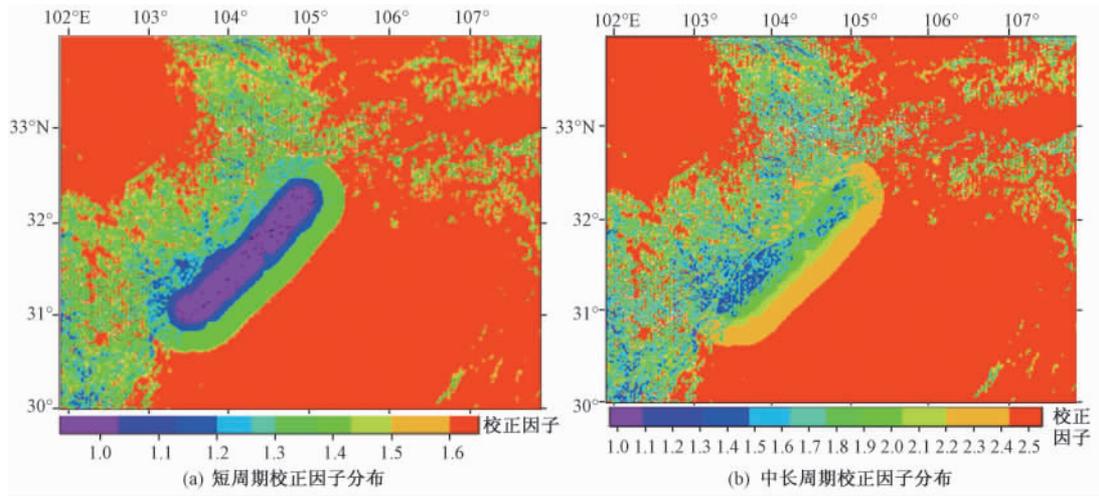


图5 校正因子分布

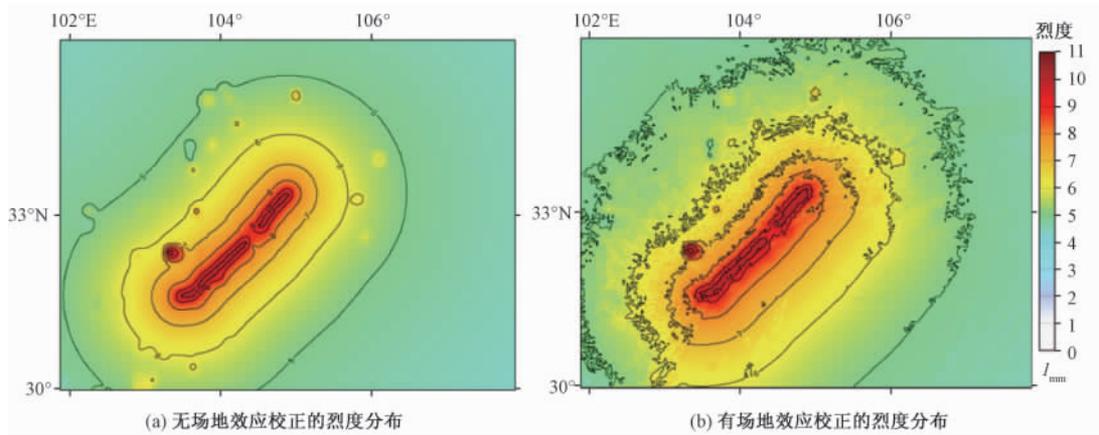


图6 有无场地效应校正的地震动分布对比

地反应地震引起的地表运动。对比各种场地效应研究方法,由于以往的方法都需要大量的实地测量资料,且局限于单台单点,因此我们根据 Wald 等(2007)提出的用地形倾斜值做快速  $V_s^{30}$  的空间分布,从而得到场地效应校正因子的空间分布。根据上述方法计算全球范围的场地  $V_s^{30}$  分布,并与已有实测资料进行对比,发现两者基本一致。我们进而以汶川地震为例,对比分析有无场地效应校正的地震动分布,结果可以明显地看出场地效应校正的效果。

对于所研究区域既有高原亦有山地,又有平原亦有盆地,若只用一个平均倾斜度值来判断构造类型则不近合理,故把研究区域进行网格化,分成  $1^\circ \times 1^\circ$  的小区域,每个小区域分别计算平均倾斜度来判断每个小区域的构造类型。

由于地形倾斜值与  $V_s^{30}$  的对应关系是统计相关分析结果,因此对于其中的物性原理尚需作进一步的深入探究。

## 参考文献

- 胡家富、杨润海,1999,利用 Rayleigh 波反演浅土层的剪切波速度结构,地球物理学报,**42**(3),393~400。
- 黄振平,1995,场地剪切波速度测量的误差分析,城市勘测,(2),30~34。
- 李俊、米宏亮、陈颀等,2010,ShakeMap 及其在震后快速预估中的应用,中国地震,**26**(1),103~111。
- 腾吉文、白登海、杨辉等,2008,2008 汶川  $M_s$ 8.0 地震发生的深层过程和动力学响应,地球物理学报,**51**(5),1385~1402。
- 王卫民、赵连锋、李娟等,2008,四川汶川 8.0 级地震震源过程,地球物理学报,**51**(5),1403~1410。
- 徐锡伟、闻学泽、叶建青等,2008,汶川  $M_s$ 8.0 地震地表破裂带及其发震构造,地震地质,**30**(3),597~629。
- 杨学林、吴世明,1997,利用短周期地脉动推断深层地基 S 波速度,振动工程学报,**10**(2),169~175。
- 张培震、徐锡伟、闻学泽等,2008,2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因,地球物理学报,**51**(4),1066~1073。
- 张学民,2005,剪切波速度结构研究方法综述,地球物理学进展,**20**(1),135~141。
- Allen T I, Wald D J,2007,Topographic slope as a proxy for global seismic site conditions ( $V_s^{30}$ ) and amplification around the globe, U S Geological Survey Open-File Report,**1357**,69。
- Beresnev I A, Wen K L,1996,Nonlinear Soil Response—A Reality? BSSA,**86**,1964~1978。
- Boore D M, Joyner W B,1997,Site Amplifications for Grneric Rock Sites, BSSA,**87**,327~341。
- Borcherdt R D,1994,Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), Earthquake Spectra,**10**,617~654。
- Building Seismic Safety Council (BSSC),2000,National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP). Part 1:Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures,2000 Edition (FEMA 368), Prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D C.
- Building Seismic Safety Council (BSSC),2004,NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures,2003 Edition (FEMA 450), Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Washington, D C.
- Chiou B S J, Youngs R R,2006,PEER-NGA empirical ground motion model for the average horizontal component of peak acceleration and pseudo-spectral acceleration for spectral periods of 0.01 to 10 seconds, Interim Report for USGS Review,219。
- Dobry R R D, Borcherdt C B, Crouse I M, et al,2000,New site coefficients and site classification system used in recent Building Seismic Code provisions, Earthquake Spectra,**16**,41~67。
- Field E H,2000, A modified ground-motion attenuation relationship for southern California that accounts for detailed site classification and a basin-depth effect, BSSA,**90**,S209~S221。
- Field E H, Beresnev I A, et al,1997,Nonlinear sediment amplification during the 1994 Northridge earthquake, Nature,**390**,599~602。
- Hartzell S H, Carver D, Robert A, et al,2003,Shallow Shear-Wave Velocity, and Wave Propagation at the San Jose, California, Dense Seismic Array, BSSA,**93**(1),443~464。
- Hartzell S H, Harmsen S, Frankel A, et al,1998,First-generation site response maps for the Los Angeles region based on earthquake ground-motions, BSSA,**88**,463~472。
- Holzer T L, Padovani A C, Bennett M J, et al,2005,Mapping  $V_s^{30}$  site classes, Earthquake Spectra,**21**,353~370。
- Huang M W, Wang J H, Ma K F,2007,Frequency-dependent site amplifications with  $f \geq 0.01$  Hz evaluated from velocity and density models in central Taiwan, BSSA,**97**,624~637。
- Lee C T, Cheng C T, Liao C W, et al,2001,Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations, BSSA,**91**,1283~1297。
- Matsuoka M, Wakamatsu K, Fujimoto K, et al,2005,Nationwide site amplification zoning using GIS-based Japan Engineering Geomorphologic Classification Map, Proc 9th Inter Conf on Struct Safety and Reliability,239~246。
- Park S, Elrick S,1998,Predictions of shear-wave velocities in southern California using surface geology, BSSA,**88**,677~685。
- Su F, Anderson J G, Zeng Y H,1998,Study of weak and strong ground motion including nonlinearity from the Northridge, California, earthquake sequence, BSSA,**88**,1411~1425。

- Wald D J, Allen T I, 2007, Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification, *BSSA*, **97**, 1379 ~ 1395.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, 1999, Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, *Earthquake Spectra*, **15** (3), 557 ~ 564.
- Wald D J, Worden B C, Quitoriano V, et al, 2005, *ShakeMap Manual: User Guide, Technical Manual, and Software Guide*: USGS Techniques and Methods, 128.
- Wang J H, Huang M W, 2007, Effect of Finite Frequency Bandwidth Limitation on Evaluations of Seismic Radiation Energy of the 1999 Chi-Chi Earthquake, *Terr Atmos Ocean Sci*, **18** (3), 567 ~ 576.
- Wills C J, Clahan K B, 2006, Developing a map of geologically defined sitecondition categories for California, *BSSA*, **96**, 1483 ~ 1501.
- Wills C J, Petersen M D, 2000, A site-conditions map for California based on geology and shear wave velocity, *BSSA*, **90**, 187 ~ 208.
- Wood H O, Neumann, 1931, Modified Mercalli intensity scale of 1931, *BSSA*, **21**, 277 ~ 283.
- Wu Y M, Lee W H K, Chen C C, et al, 2000, Performance of the Taiwan Rapid Earthquake Information Release System (RTD) during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake, *Seism Res Lett*, **71**, 338 ~ 343.
- Yamakawa K, 1998, The Prime Minister and the earthquake: Emergency Management Leadership of Prime Minister Marayama on the occasion of the Great Hanshin-Awaji earthquake disaster, *Kansai Univ Rev Law and Politics*, **19**, 13 ~ 55.

## Site conditions and amplification based on topographic slope

*Li Jun*<sup>1,2)</sup> *Chen Jianxiong*<sup>3)</sup> *Chen Yong*<sup>4)</sup>

- 1) University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
- 2) Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China
- 3) Institute of Geophysics, China Earthquake Administrator, Beijing 100081, China
- 4) China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

**Abstract** Site correction map derived from the slope of the topography is often well correlated with other independently-derived, regional-scale site-condition maps, but the latter maps vary in quality and continuity, and subsequently, also in their ability to match observed  $V_s^{30}$  measurements contained therein (Wald et al, 2007). This method has good application in the USA, as well as in Taiwan, Italy, and Australia. This paper elaborates on the theory and the method of generating shear-wave velocity maps and site correction amplification based on topographic slope, and studies the application in the 2008 Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake.

**Key words:** Topographic slope Shear-wave velocity Ground motion Site correction