

DOI: 10.11779/CJGE201602022

# 安宁河河谷及邛海地区土层场地对地震动的放大作用

李 平, 薄景山, 李孝波, 肖瑞杰

(防灾科技学院, 河北 三河 065201)

**摘要:** 场地土层对地震动的影响研究一直是地震工程研究的主要问题之一。利用汶川地震中安宁河及邛海周边地区6个台站记录到的主震的加速度时程,采用传统谱比法研究了5个土层台站所在场地对地震动的放大作用,研究结果表明:①该区场地对地震动的放大作用与工程地质分区有着很好的相关性,不同的工程地质分区对地震动的放大效应不同,按放大作用大小排序,邛海湖滨平原亚区( $III_3$ )>邛海洪泛平原亚区( $III_2$ )>安宁河平原区(Ⅱ)>山麓坡洪积亚区( $I_2$ )>中山基岩亚区( $I_1$ )。②工程地质分区为山麓坡洪积亚区( $I_2$ )的场地对地震动低频分量没有放大作用,但是对地震动高频成分放大作用显著。③工程地质分区为安宁河平原区(Ⅱ)的场地对地震动低频和高频都有放大效应,并且高频放大作用大于低频,并且3个分量放大作用在低频和高频表现不同,低频时地震动放大效应 $UD > NS > EW$ ,高频时地震动放大效应 $EW > NS > UD$ 。④工程地质分区为邛海洪泛平原亚区( $III_2$ )的场地对地震动低频和高频放大作用都非常显著,并且放大系数最大值所在的频带都在1 Hz左右,且放大最大值相差不大。⑤对于工程地质分区为邛海湖滨平原亚区( $III_3$ )的场地对地震动低频和高频放大作用都有放大效应,放大系数较大,且放大效应显著频段分布较宽。

**关键词:** 放大作用; 场地条件; 地震动; 谱比法; 加速度时程

**中图分类号:** P315      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2016)02-0362-08

**作者简介:** 李 平(1981- ),男,副教授,博士,主要从事场地效应及岩土工程抗震方面研究。E-mail:  
chinajiping1981@126.com。

## Amplification effect of soil sites on ground motion in Anning River valley and Qionghai Lake area

LI Ping, BO Jing-shan, LI Xiao-bo, XIAO Rui-jie

(Institute of Disaster-Prevention, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** The effect of site soil on ground motion is one of the main issues about earthquake engineering research. Based on the acceleration time histories recorded at 6 stations in Anning River and Qionghai Lake area, the amplification effect of 5 soil stations is studied by using the traditional spectral ratio method. The results are as follows: (1) There is good correlation between the amplification on ground motion in these sites and the geological zone, and the amplification effect on ground motion is different in different geological zones. According to the amplification of the size, the descending sequence is Qionghai Lake Plain subregion ( $III_3$ ), Qionghai Lake and flood plain subregion ( $III_2$ ), Anning River Plain area (Ⅱ), piedmont alluvial subregion ( $I_2$ ) and Zhongshan bedrock subregion ( $I_1$ ). (2) The piedmont alluvial subregion has no amplification effect on the low-frequency component of ground motion but significant amplification effect on the high-frequency one. (3) The Anning River Plain area has amplification effect on both the low-and high-frequency components of ground motion, and the amplification effect on the high frequency is stronger than that on the low frequency. The amplification effects of three components are different, that is, the descending amplification in the low frequency is  $UD$ ,  $NS$  and  $EW$ , and that in the high frequency is  $EW$ ,  $NS$  and  $UD$ . (4) The Qionghai Lake flood plain subregion has significant amplification effect on both the low-and high-frequency components of ground motion, and the maximum factor of amplification is about 1 Hz, with small differences among the maximum factors. (5) The Qionghai Lake Plain subregion has amplification effect on both the low-and high-frequency components of ground motion, the amplification factor is large, and the distribution band of significant amplification is wide.

**Key words:** amplification effect; site condition; ground motion;  
spectral ratio method; acceleration time history

基金项目:中国地震局地震科技星火计划项目(XH15067Y);中央高校基本科研业务专项资金项目(ZY20140206)

收稿日期: 2015-03-17



## 0 引言

历次的震害调查表明, 河谷场地对震害有着重要的影响。1920年宁夏海原8.5级地震, 渭河河谷的姚庄地震烈度为Ⅶ度左右, 而相距仅2 km在相对高100 m河谷堤岸上的牛家庄烈度达到了IX度左右<sup>[1]</sup>。1970年7.7级的通海地震, 极震区沿曲江河谷展开分布, 长轴长约52 km<sup>[1]</sup>。1975年辽宁海城地震中, 在三岔某段河谷堤岸与河床相距高差58 m的两个测点的地面加速度相差近1.84倍<sup>[1]</sup>。2005年巴基斯坦巴控克什米尔地区7.8级地震, 巴拉考特镇的区域沿Kaghan河的大量建筑和基础设施震害损失严重, 造成了大量人员伤亡<sup>[2]</sup>。2008年“5·12”汶川特大地震中, 汉源县遭受了严重破坏, 出现高烈度异常, 经过研究表明河谷地形对汉源震害异常有着重要的影响<sup>[3]</sup>。此外, 汶川地震中安昌镇安易河、什邡市石亭江、甘肃白水河、平武县涪江、青川大坝山河、青川东阳河以及湔江等河谷场地不同场地位置震害不同的现象, 震害调查结果再次证明了河谷场地对震害有着重要的影响<sup>[4]</sup>。

随着对历次地震震害资料的收集与积累, 河谷地形效应越来越受到广大科技工作者的重视, 采用强震动观测经验法、解析分析和数值模拟方法对此开展了一系列研究, 取得了一些有意义的结论<sup>[5-9]</sup>。基于强震记录的经验分析法是被公认研究场地效应最为有效的方法, 主要包括传统谱比法、广义线性反演法和水平/垂直谱比法(H/V法)。国内外学者采用该方法对河谷场地效应开展了相关研究, Celebi根据地震的主、余震加速度时程, 采用传统谱比法研究了1985年智利、墨西哥地震和1987年加利福尼亚地震中烈度异常区, 得出了地形和土层放大效应<sup>[10]</sup>。Bonilla等根据1994年北岭地震的余震记录, 分别利用传统谱比法、广义线性反演法和H/V法研究了加州圣费尔南多山谷烈度异常区的场地放大效应<sup>[11]</sup>。Tsuda等用广义线性反演法分析了Kanto盆地, 得到了该烈度异常区是由土层放大作用引起的<sup>[12]</sup>。王海云利用汶川地震渭河河谷获取主震强震记录, 采用考虑几何衰减的传统谱比法研究了25个强震动台站附近区域的场地土层放大作用<sup>[13]</sup>。任叶飞等选取了96个汶川地震余震中28个强震动台站获取的602组强震动记录, 采用广义反演法研究了汶川地震场地效应, 给出了不同频段相关场地平均放大幅值<sup>[14]</sup>。综上所述, 基于强震记录的经验分析法已是研究场地土层对地震影响的常用方法之一, 该方法能客观的反应场地对地震的影响程度, 但是受一定客观条件的限制, 大量强震台站的布设并获取强震记录是该方法的前提条件。

2008年“5·12”汶川地震中中国数字强震观测台网获得了一批质量高、较珍贵的数字强震观测记录, 为中国地震工程及其相关研究提供了宝贵的基础性资料。安宁河河谷及邛海地区是中国地震局重点监测区, 在该区同样获得了一批强震记录, 为采用强震记录分析法研究安宁河河谷及邛海周边地区场地地震动效应提供了数据基础。

## 1 研究区的工程地质背景

根据地形形态、地貌单元、沉积时代、沉积环境和成因类型, 以及第四纪土层构成的特点等分析归类, 可把研究区划分为3个工程地质区, 即中山区(I)、安宁河平原区(II)、邛海盆地区(III)。

根据微地貌形态、地层时代、地层结构、岩性特点把研究区又划分为5个工程地质亚区, 即中山基岩亚区(I<sub>1</sub>), 山麓坡洪积亚区(I<sub>2</sub>), 西昌冲洪积台地亚区(III<sub>1</sub>), 邛海洪泛平原亚区(III<sub>2</sub>)和邛海湖滨平原亚区(III<sub>3</sub>)。如图1所示。各个区分别阐述如下。

### 1.1 中山区(I)

#### (1) 中山基岩亚区(I<sub>1</sub>)

该区海拔标高大致在1535~2600 m左右, 主要分布在邛海盆地周围和安宁河谷两侧。出露的地层以中生代碎屑岩为主, 为一套紫—紫红色为主的河湖相长石石英砂岩、粉砂岩、泥灰岩和泥岩等。局部出露三叠系白果湾组的地层, 为灰绿色细砂岩、粉砂岩与灰黑色炭质页岩。该类岩石强度介于坚硬岩与软弱岩之间, 又被称为中硬岩。在安宁河西侧和东侧北部的局部地段还出露不同时代的岩浆岩, 以花岗岩类为主, 性坚硬。另外, 局部还分布着老第三系地层, 为紫红砂砾岩、夹少许紫色粉砂岩、砂岩透镜体。在低海拔的斜坡地段还出露新第三系地层, 包括西昌组(Q<sub>1XC</sub>)的砂砾石层, 夹少许紫色粉砂质黏土岩, 砂岩透镜体, 砾石成分为紫红色砂岩、粉砂岩以及昔格达组的黏土岩、粉砂岩、砂岩等湖相沉积地层。

#### (2) 山麓坡洪积亚区(I<sub>2</sub>)

主要分布在泸山及安宁河谷两侧的山麓斜坡, 构成平原与山区过渡地带, 是溪沟和片状流水形成的坡洪积地层, 大致形成于全新世晚期(Q<sub>4</sub><sup>3pl</sup>), 为一套紫红—黄灰色砂质黏土层夹卵砾碎石。

### 1.2 安宁河平原区(II)

主要分布在安宁河东西两侧, 呈南北向带状分布, 一级阶地前缘陡坎一般在1 m左右, 有些地段一级阶地前缘与漫滩呈斜坡接触, 场地开阔平坦, 主要形成于全新世中期(Q<sub>4</sub><sup>2pl</sup>), 该亚区地层多呈二元结构, 地表为灰白色的粉土、粉细砂, 厚1~2 m左右, 其下

为砂砾卵石层夹砂层透镜体, 厚度 20~30 m 左右以上。卵砾由花岗岩、火山岩、石英岩、基性岩等组成, 地层具水平和交错层理, 卵砾定向排列特征明显, 优势倾斜方向指向流水上游。卵砾磨圆度好, 大小混杂, 排列较紧密。

### 1.3 邛海盆地区(III)

#### (1) 西昌冲洪积台地亚区(III<sub>1</sub>)

在地貌上, 西昌冲洪积台地有 1~5 级之多, 台地随级数增高, 距离盆地中心越远, 海拔越高, 时代越老, 主要由东河、西河及官坝河等河流冲洪积而成, 形成于中晚更新世不同时期( $Q_{2+3}^{apl}$ )堆积, 构成五级台地, 台面被冲沟、溪流切割得支离破碎, 形成高度不等的低矮山梁、山包。台面平缓略向盆地中心倾斜, 两侧坡度较陡, 以砂砾石层为主, 黏土质等粗粒组成, 呈灰红色。卵砾磨圆较好, 主要为中生代砂、泥岩, 分选性差, 混杂漂石和砂、黏性土。

#### (2) 邛海洪泛平原亚区(III<sub>2</sub>)

该区位于西昌冲洪积扇的前缘, 主要由东西河、官坝河与海河等河流冲洪积而成的泛洪平原, 形成于全新世晚期( $Q_4^{3apl}$ )是西昌城区的所在地, 地面开阔平缓, 略向盆地中心倾斜, 海拔高度 1510~1516 m 左右。地层结构比较松散, 为一套紫红色含黏土砂砾石层、粉土层、粉砂质黏土和岩块碎屑。

#### (3) 邛海湖滨平原亚区(III<sub>3</sub>)

该亚区主要沿邛海北岸一带分布, 西起东河河口之东, 东至官坝河河口, 地势低洼, 开阔平坦, 多有沟渠、池塘分布, 地下水位逼近地表。湖滨平原的物质组成主要来源于上述河流冲洪积细粒物质入海后的静水沉积, 后因湖水后退, 露出地表形成湖滨平原, 为一套灰—深灰色粉砂质黏土、黏质砂土层夹淤泥质土, 下部夹有砂砾石层。该区地层形成于晚全新世( $Q_4^{3l}$ ), 结构较松散。

### 1.4 第四系等厚线

为了全面了解规划区范围内的场地条件, 在进行《西昌市防震减灾规划编制》过程中, 调查收集了 457 份工程勘察和水文钻孔资料, 又新布置 33 个深不小于 20 m 和 1 个深 90 m 的钻孔, 其中超过 1000 m 的钻孔一个, 100~1000 m 的钻孔 60 个, 50~100 m 的钻孔 31 个, 20~50 m 的钻孔 71 个, 同时完成的 5.5 km 的浅层地震勘探工作, 结合钻孔资料和浅层地震勘探解译结果, 绘制得到了该区的第四系等厚线图, 如图 1 所示。

## 2 地震动观测数据

在安宁河河谷及邛海地区布设的数字强震动台网

属于中国数字强震台网的四川省部分, 于 2007 年建成投入使用。汶川特大地震中, 在该区有 6 个台站获得了良好的主震加速度记录, 其中小庙台为基岩台站, 其他 5 个都为土层台站。其中 6 个台站分布在每个工程地质单元, 如表 1 和图 1 所示。

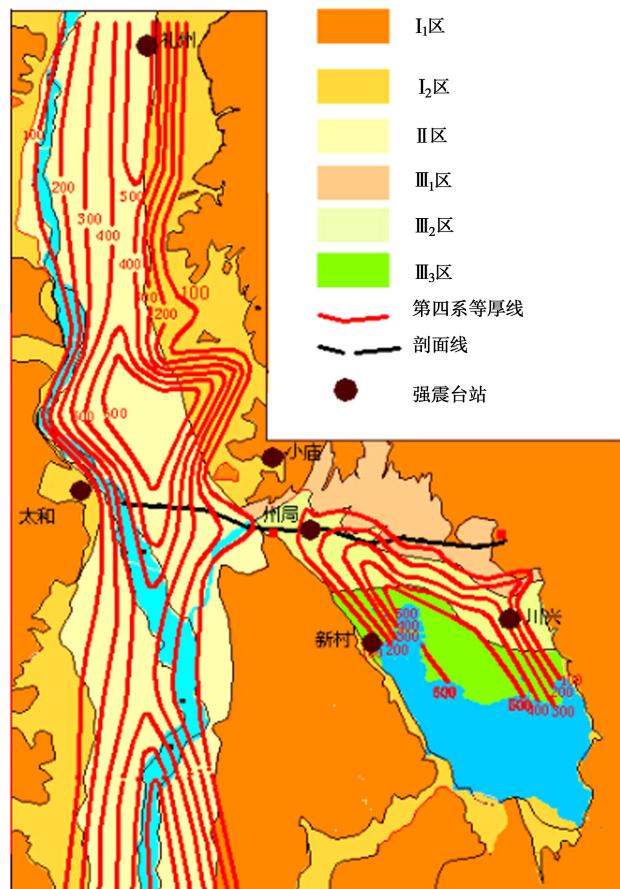


表1 汶川地震中安宁河河谷及邛海周边地区获得主震加速度记录的台站参数

Table 1 Station parameters of mainshock acceleration histories recorded in Anning River valley and Qionghai Lake area during Wenchuan Earthquake

序号	台站 名称	断层距 /km	场地 类型	场地类别	工程地质 分区		PGA/(cm·s <sup>-2</sup> )		
					EW	NS	UD		
1	小庙	342	基岩	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	5.8	4.1	3.3	
2	太和	338	土层	II类	I <sub>2</sub>	5.6	8.8	4.1	
3	礼州	300	土层	II类	II	15.9	22.1	11.5	
4	州局	342	土层	II类	III <sub>1</sub>	23.5	25.1	13.6	
5	新村	349	土层	II类	III <sub>3</sub>	38.6	44.2	21.1	
6	川兴	344	土层	II类	III <sub>2</sub>	23.2	29.1	10.0	

表2 汶川地震中在安宁河及邛海周边地区观测到的放大作用的放大系数及相应的卓越频率

Table 2 Amplification factors and corresponding predominant frequencies of amplification effects observed in Anning River and Qionghai Lake area during Wenchuan Earthquake

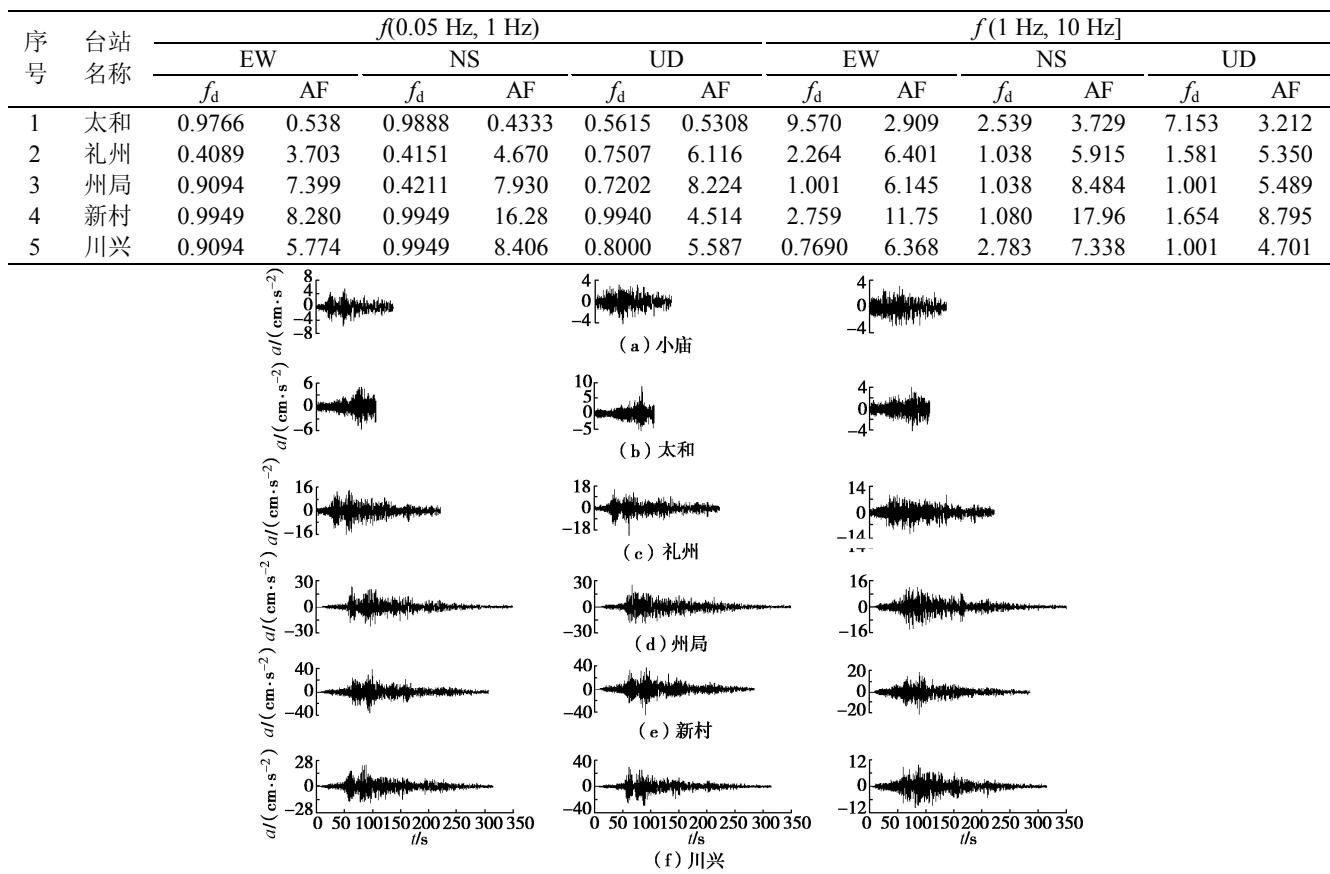


图2 各台站加速度时程

Fig. 2 Acceleration time histories at various stations

地覆盖层厚度差别显著, 小庙是基岩台站, 太和台的场地覆盖层较薄, 大约为 8 m, 而其他台站都达到了 100 m 以上; ②场地所处的工程地质单元不同, 导致场地的土层结构有很大差异, 小庙台位于中山基岩亚区 (I<sub>1</sub>), 太和台位于山麓坡洪积亚区 (I<sub>2</sub>), 州局台和川兴台位于邛海洪泛平原亚区 (III<sub>2</sub>), 礼州台位于安宁河平原区 (II), 新村台位于邛海湖滨平原亚区 (III<sub>3</sub>); ③地形地貌存在差异, 礼州台所处位置为安宁河河谷地形, 新村为邛海盆地, 州局台和川兴台冲积台地。

### 3 结果与分析

本文采用传统谱比法来分析安宁河及邛海周边地区的场地放大效应, 具体方法参见文献[13]。采用传统谱比法必须要有一个合适的基岩台站来作参考场地。如前所述, 小庙台为基岩台, 因此选择该台站为参考台站。采用传统谱比法估计 5 个土层的放大效应, 并用帕曾窗平滑, 带宽为 0.4 Hz, 计算结果如表 2 和图 4 所示。结果表明, 礼州台的地震动在低频和高频

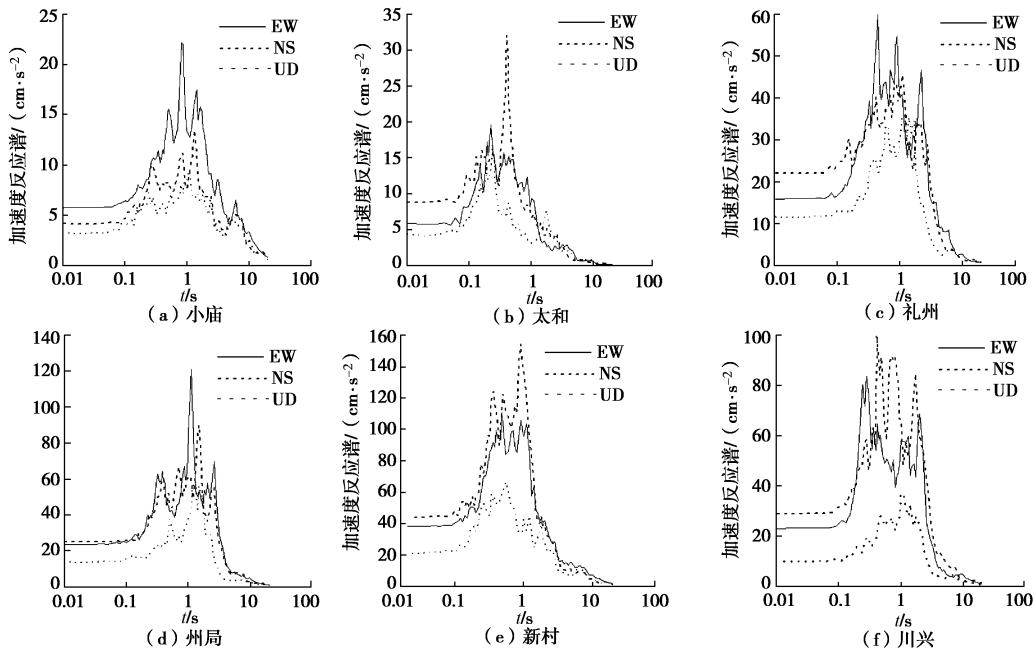


图 3 各台站加速度反应谱(阻尼: 5%)

Fig. 3 Response spectra at various stations (damping: 5%)

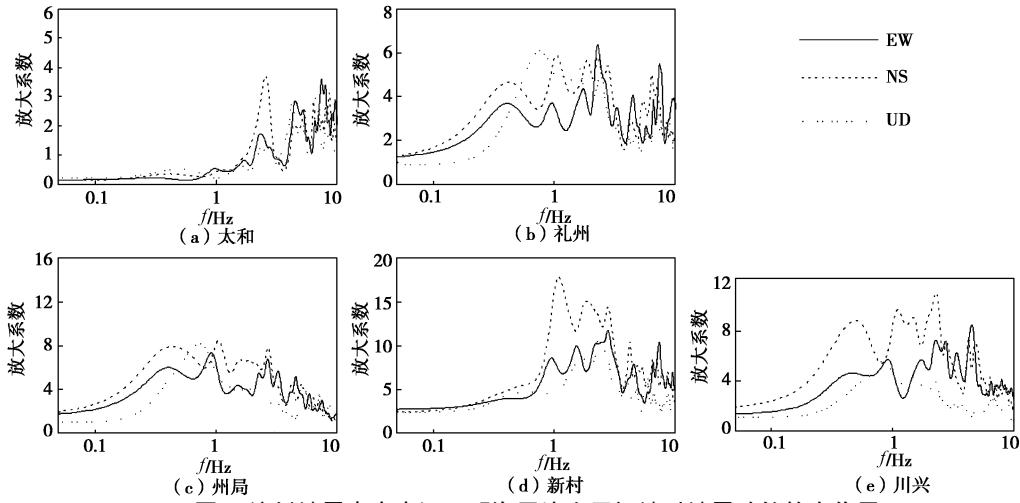


图 4 汶川地震中安宁河及邛海周边土层场地对地震动的放大作用

Fig. 4 Amplification effects of soil sites on ground motion in Anning River and Qionghai Lake area during Wenchuan Earthquake

段有显著的放大作用，而太和台的地震动在高频段有显著的放大作用，其余 4 个台站的地震动分别在 1 Hz 附近频段和高频段有显著的放大作用；并且所有台站的地震动 3 个分量的放大效应并不相同，低频阶段 NS 向放大效应显著， $NS > EW > UD$  的台站有太和、新村和川兴台， $UD > NS > EW$  的台站有礼州和州局台；高频阶段 3 个分量放大效应都显著， $NS > EW > UD$  的台站有州局、新村和川兴台， $EW > NS > UD$  的台站有礼州台， $NS > UD > EW$  的台站有太和台。

根据 0.05~10.0 Hz 频带不同的放大效应可将安宁河河谷及邛海周边地区场地分为 4 类：①低频没有放大效应及高频放大作用显著的场地，即是太和台，3 个分量放大效应的卓越频率同时出现在高频段，地震动放大效应  $NS > UD > EW$ ，其最大放大系数和对应

的频率分别是 3.729, 3.212, 2.909 和 2.539, 7.153, 9.570 Hz。②低频和高频放大作用都有放大效应，但是高频放大作用大于低频，并且 3 个分量放大作用在低频和高频不同，即是礼州台，低频时地震动放大效应  $UD > NS > EW$ ，其最大放大系数为 6.116, 4.670, 2.909，对应的频率分别是 0.7507, 0.4151, 0.4089 Hz；高频时地震动放大效应  $EW > NS > UD$ ，其最大放大系数为 6.116, 4.670, 2.909，对应的频率分别是 0.7507, 0.4151, 0.4089 Hz。③低频和高频放大作用都有放大效应，并且放大最大值所在的频带都在 1 Hz 左右，且放大最大值相差不大，即是州局台，其 EW、NS 和 UD 的最大放大系数和相应的频带分别为 6.145~7.399, 7.930~8.484 和 5.350~8.224; 0.9094~1.001 Hz、0.4211~1.038 Hz 和 0.722~1.001 Hz。④低频和

高频放大作用都有放大效应, 放大最大值较大, 且放大最大值所在的频带分布较宽, 即是新村台, 其 EW、NS 和 UD 的最大放大系数和相应的频带分别为 8.2804~11.75, 16.28~17.96 和 4.514~8.795, 0.9949~2.759 Hz, 0.9949~1.080 Hz 和 0.9940~1.654 Hz。

## 4 讨论

从上述谱比分析结果可以知道, 各个台站的放大效应明显不同, 分析数据采用的是汶川地震主震记录并且各台站距震源距离相差不大, 显然震源的影响及传播途径与距离的影响差别不大, 唯一的原因就是场地条件的不同。分析 4 个台站的场地条件, 主要有覆盖层厚度、地形地貌和土层结构不同, 不同的场地条件造成了不同的放大效应<sup>[15-16]</sup>。

### 4.1 深厚土层对地震动的放大作用

除了太和台站, 其余 4 个土层台站场地土层的覆盖层都达到了百米以上(图 1), 4 个土层台站的深厚土层场地对地震动低、高频分量都有显著的放大作用, 低频、高频分量放大效应基本相当, 并且谱比曲线出现多个峰值点, 频率值分别较宽, 例如州局台多峰分布的频带约 0.375~2.65 Hz, 可见放大效应显著频带横跨低频和高频。这些台站所在的土层场地对地震动的放大作用不但增加了高频分量地震动的振幅, 也同样增大了低频分量的地震动, 这使得在遇到强震时低层、高层建(构)筑物均会遭受不同程度的震害。

### 4.2 地形地貌对地震动的放大作用

为了分析地形对地震动的影响, 进一步分析礼州和州局台站的场地条件, 这两个台站的覆盖层厚度相差不大, 但是场地对地震动放大效应是有所差别的, 差别主要在低频分量的放大效应及其相应的频率, 州局台站对地震动的低频分量放大作用要强于礼州台站。为了探究造成差异的原因, 绘制了近东西向横贯全区剖面(图 5), 剖切了安宁河谷与邛海盆地两大工程地质单元(图 1)。剖面图有 18 个控制点, 其中含地质点 3 个, 钻孔点 15 个, 除地质点外, 有 5 个深钻

孔伸入基岩, 4 个 200 m 左右的深孔接近基岩, 其余 7 个孔的深度大致在 20~50 m 左右。第四系地层与下伏的昔格达组地层呈不整合接触, 昔格达组地层顶面的起伏变化十分明显, 大致展现了邛海盆地和安宁河谷两大工程地质单元的地层结构轮廓。该剖面层有两个沉积中心, 一是安宁河谷为地堑式构造形成的河谷平原, 南北向延伸, 宽数公里至 10 km。邛海盆地是另一个沉积中心, 位于该剖面的东段, 西昌市区所在地, 穿透第四系地层的钻孔较多, 但深孔分布很不均匀, 盆地的中东部深孔较少。盆地第四纪地层结构与安宁河谷相似。从地形上分析, 礼州台站主要受安宁河河谷地形的影响, 而州局台站主要受邛海盆地地形的盆地效应影响, 州局台站位于邛海盆地的近边缘, 盆地的边缘效应导致了地震动加大了放大效应<sup>[13]</sup>。

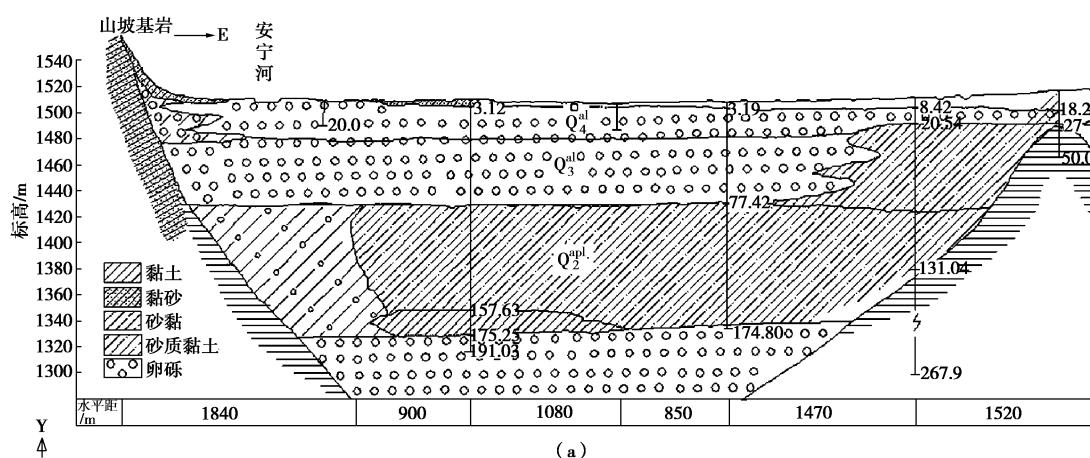
### 4.3 土层结构对地震动的放大作用

分析 4 个台站场地对地震动放大效应, 发现有一个台站对地震动放大作用明显与其他台站不同。主要不同有, 放大系数最大明显大于其他台站, 其值高出近一倍; 高频放大效应尤其显著, 截止频率到 10 Hz 时水平向地震动分量放大系数仍接近于 5。分析其台站场地条件, 发现该台站位于邛海湖滨平原亚区(III<sub>3</sub>), 该亚区沉积物主要为湖相沉积物, 物质组成为一套灰—深灰色粉砂质黏土、黏质砂土层夹淤泥质土, 从现场剪切波速测试结果可知该土层剪切波速值都小于 140 m/m, 属于软弱土层, 从相关研究成果可知, 软弱土层对地震动有放大效应, 因此该软弱土层进一步加大了对地震动放大效应<sup>[15-17]</sup>。

### 4.4 关于场地抗震分类的思考

为了在抗震设计中考虑场地条件对地震动特性的影响, 人们提出了多种分析方法。其中有一种是近似估计的经验方法。该方法首先应根据一定的场地分类原则和方法确定工程场地的类别, 而后基于场地类别与地震动参数之间统计得到的经验关系或规范规定值确定工程场地的地震动参数。

目前中国的各类专业抗震规范都规定了场地类别



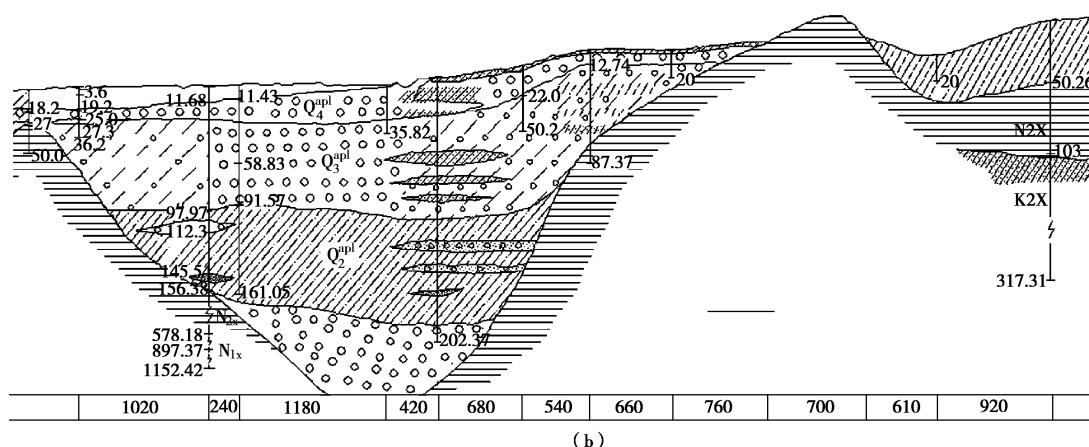


图 5 安宁河及邛海盆地剖面图  
Fig. 5 Profile of Anning River and Qionghai Lake basin

划分的原则,但各抗震规范的场地评定指标和分类方法不尽一致。抗震规范中有代表性的是“双指标法”和“场地指数法”。《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中采用的是剪切波速和覆盖层厚度两个物理指标来进行场地分类的双指标法<sup>[18]</sup>,《构筑物抗震设计规范》(GB50191—93)中则采用了场地指数法。这两种方法精度相当,所需资料基本相同,技术原则和思路基本类似,本质上不矛盾。目前,中国采用使用较广泛的双指标法进行场地类别划分,场地指数法已经很少被使用,修订的《构筑物抗震设计规范》(GB50191—2012)中也采用了双指标法。双指标法是根据场地土的等效剪切波速和覆盖土层厚度,将场地划分为场地类别。这一基于等效剪切波速及覆盖土层厚度指标的场地类别划分方法也被《水工建筑物抗震设计规范》、《公路工程抗震设计规范》、《铁路工程抗震设计规范》等采用。这种双指标的分类方法简单易操作,给工程技术人员带来了方便,但是这种分类方法有时可能低估对地震动效应。

由前文分析可知,上述土层台站按中国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)场地划分类别方法确定的场地类型都是Ⅱ类<sup>[18]</sup>,但是对地震动放大效应却有着显著的不同,同一场地类型对地震动的放大作用可能高出几倍,这就可能在进行工程抗震设计时选择被低估的地震动参数,给一般建(构)带来潜在的危险。另外,从地震动谱比分析结果可知,不同工程地质单元对地震动放大作用是不同的,因此有必要结合工程地质、地形地貌及土层结构等进行更为精细的场地抗震分类方法研究,这样才能给出科学和合理的输入设计地震动,减轻或避免地震灾害。

## 5 结 论

本文利用安宁河及邛海周边地区 6 个台站记录到的汶川特大地震主震的加速度时程,采用基于考虑几何衰减的传统谱比法研究了 5 个土层台站所在场地对

地震动的放大作用,得到了以下 5 点结论。

(1) 总体而言,该区场地对地震动的放大作用与工程地质分区有着密切的关系,不同的工程地质分区对地震动的效应不同,按放大作用排序,邛海湖滨平原亚区( $III_3$ )>邛海洪泛平原亚区( $III_2$ )>安宁河平原区(Ⅱ)>山麓坡洪积亚区( $I_2$ )>中山基岩亚区( $I_1$ )。

(2) 对于工程地质分区为山麓坡洪积亚区( $I_2$ )的场地对地震动低频分量没有放大作用,但是高频放大作用显著。

(3) 对于工程地质分区为安宁河平原区(Ⅱ)的场地对地震动低频和高频放大作用都有放大效应,但是地震动高频分量放大作用大于低频,并且 3 个分区放大作用在低频和高频不同,低频时地震动放大效应  $UD > NS > EW$ , 高频时地震动放大效应  $EW > NS > UD$ 。

(4) 对于工程地质分区为邛海洪泛平原亚区( $III_2$ )的场地对地震动低频和高频放大作用都有放大效应,并且放大最大值所在的频带都在 1 Hz 左右,且放大最大值相差不大。

(5) 对于工程地质分区为邛海湖滨平原亚区( $III_3$ )的场地对地震动低频和高频放大作用非常显著,放大最大值较大,且放大作用所在的频带分布较宽。

**致 谢:**感谢国家强震动台网中心提供的汶川地震主震强震记录,感谢西昌市人民政府、西昌市防震减灾局以及西昌市其他政府机关对收集基础性资料的支持和帮助,感谢中国地震局工程力学研究所孙平善研究员对工程地质分区的指导和帮助。感谢同行专家对本文的匿名评审和提出的有益建议。

## 参 考 文 献:

- [1] 肖文海. 大型河谷场地地震动特征研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008. (XIAO Wen-hai. The research of the characteristics of the ground motion in large

- valley terrain[D]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese))
- [2] 曲国胜, 黄建发, 李小军, 等. 南亚(巴基斯坦)地震灾害分布及成因分析[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(1): 85 - 94. (QU Guo-sheng, HUANG Jian-fa, LI Xiao-jun, et al. The hazard assessment and analysis of Pakistan earthquake in 2005[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(1): 85 - 94. (in Chinese))
- [3] 李平. 汶川特大地震汉源震害异常研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013. (LI Ping. The research of seismic damage anomalies in Hanyuan during Wenchuan Great Earthquake[D]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese))
- [4] 王伟. 地震动的山体地形效应[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011. (WANG Wei. Effect of hill topography on ground Motion[D]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011. (in Chinese))
- [5] GAO Y F, ZHANG N, ZHANG D Y. Effects of topographic amplification Induced by a U-Shaped canyon on seismic Waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America , 2012, 102: 1748 - 1763.
- [6] ZHANG N, GAO Y F, CAI Y Q. Scattering of SH waves induced by a non-symmetrical V-shaped canyon[J]. Geophysical Journal International, 2012, 191: 243 - 256.
- [7] Corine Frischknecht and Jean-Jacques Wagner. Seismic soil effect in an embanked deep alpine valley: a numerical investigation of two-dimensional resonance[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(1): 171 - 186.
- [8] PAOLA Bordoni, FRANCESCO Del Monaco, GIULIANO Milana. The seismic response at high frequency in central l'aquila: a comparison between spectral ratios of 2D modeling and observations of the 2009 aftershocks[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(3): 1374 - 1388.
- [9] 金丹丹, 陈国兴, 董菲蕃. 多地貌单元复合场地非线性地震效应特征二维分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1818 - 1825. (JIN Dan-dan, CHEN Guo-xing, DONG Fei-fan. 2D analysis of nonlinear seismic effect characteristics of multi-geomorphic composite site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1818 - 1825. (in Chinese))
- [10] CELEBI M. Topographical and geological amplification-case studies and engineering implications[J]. Structural Safety, 1991, 10: 199 - 217.
- [11] BONILLA L F, STEIDL J H, LINDLEY G T. Site amplification in the San Fernando Valley, California: Variability of site-effect estimation using the S-wave, Coda, and H/V methods[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(3): 710 - 730.
- [12] TSUDA K, KOKETSU K, HISADA Y. Inversion analysis of site response in the Kanto basin using data from a dense strong motion seismograph array[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(3): 1276 - 1287.
- [13] 王海云. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用[J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 137 - 150. (WANG Hai-yun. Amplification effects of soil sites on ground motion in the Weihe basin[J]. Chinses Journal of Geophysics, 2011, 54(1): 137 - 150. (in Chinese))
- [14] 任叶飞, 温瑞智, 山中浩明, 等. 运用广义反演法研究汶川地震场地效应[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊): 146 - 151. (REN Ye-fei, WEN Rui-zhi, HIROAKI Yamanaka, et al. Research on site effect of Wenchuan Earthquake by using generalized inversion technique[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S0): 146 - 151. (in Chinese))
- [15] 吕悦军, 彭艳菊, 兰景岩, 等. 场地条件对地震动参数影响的关键问题[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(2): 126 - 135. (LÜ Yue-jun, PENG Yan-ju, LAN Jing-yan, et al. Some key problems about site effects on seismic ground motion parameters[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(2): 126 - 135. (in Chinese))
- [16] 薄景山, 李秀领, 李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 11 - 15. (BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LI Shan-you. Some progress of study on the effect of site conditions on ground motion[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 11 - 15. (in Chinese))
- [17] 薄景山, 吴兆营, 翟庆生, 等. 三种土层结构反应谱平台值的统计分析[J]. 地震工程与工程震动, 2004, 24(2): 23 - 28. (BO Jing-shan, WU Zhao-ying, ZHAI Qing-sheng, et al. Statistical analysis on flat section values of response spectra in three kinds of soil layer constructions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(2): 23 - 28. (in Chinese))
- [18] GB5011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2010. (GB5011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2010. (in Chinese))