

# 2016年青海门源6.4级地震强震记录特征分析\*

万秀红, 吴哲, 李智敏, 统蓓蕾, 黄伟

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 采用2016年青海门源6.4级地震震中周边64个台的加速度峰值和其中10个台的强震波形数据对地震动的衰减、反应谱及垂直分量与水平分量的比值进行了分析。研究结果表明: 门源地震动衰减规律基本符合青藏区的地震动衰减关系变化规律, 震中距300 km以内, 水平向与垂直向地震动衰减速度相近, 震中距大于300 km时, 水平向比垂直向地震动衰减速度缓慢; 在200 km范围内, 部分垂直向与南北向PGA比值偏大的台站基本上分布在托莱山断裂和冷龙岭断裂以北的地区。从加速度反应谱三分量的对比分析发现, 土层场地与基岩场地相比呈现明显的场地放大效应; 反应谱比的凹槽现象说明在工程抗震中应重视垂直向地震动的作用。

**关键词:** 门源地震; 加速度峰值; 加速度反应谱; 垂直与水平谱比值

**中图分类号:** P315.914

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)增刊1-0095-06

## 0 引言

根据中国地震台网测定, 2016年1月21日1时13分, 青海省海北州门源县(37.68°N, 101.62°E)发生6.4级地震, 震源深度约10 km, 此次地震是近年来继青海省2010年玉树7.1级地震后的又一次6级以上强震。本次地震为主余震型, 波及青海省和甘肃省很多区域, 极震区烈度为Ⅷ度, 主要涉及青海省门源县泉口镇; Ⅵ度及以上的区域主要包括青海门源县、祁连县、大通县、互助县和甘肃省天祝县、武威市、肃南县、永昌县等地的部分区域。

地震发生后, 有必要对震源区周边的断层、应力场(易桂喜等, 2014; 黄禄渊等, 2016)、强震记录特征(崔建文等, 2014)以及地震的发震原因、发震断层及造成的损失情况开展研究, 以便为该地区以后的工程抗震提供相应的一些参考资料。青海门源地区是地震多发区, 屠泓为等(2014)通过研究西宁盆地周边地震震源机制解探讨地下应力状态, 推测了该区域的受力背景及发生中强地震的可能。胡朝忠等(2016)对门源6.4级地震的发震机制进行了研究, 认为本次地震是继2008年于田7.4级地震、2014年于田7.3级地震后青藏高原块体向北东方向推挤生长过程中发

生的一次地震事件。李祥等(2016)通过对门源6.4级地震构造应力场进行研究, 认为此次地震是在区域构造应力场控制下发生的。李媛等(2016)认为青藏高原东北部边缘长期受印度板块东向挤压运动的影响而应力不断积累, 以及2008年汶川地震后南北地震带北段的陇西块体及周边地区应力积累的增强, 使得本次地震发生具有一定的孕震背景。由于对该地区强震动特征的研究甚少, 本文通过收集到的强震资料对本次地震加速度峰值衰减规律及反应谱变化特征进行初步分析, 以为该地区场地效应、工程抗震工作提供相应的参考。

## 1 研究区构造背景及资料选取

截至2016年1月27日8时33分23秒, 门源地震震区共监测到0级以上余震1 235次, 最大余震为2016年1月21日1时18分的4.1级地震, 其中小于1级的地震659次, 1~1.9级地震464次, 2~2.9级地震99次, 3~3.9级地震12次, 4~4.9级地震1次。

本次地震发生在祁连山地震带东段的冷龙岭断裂与托莱山断裂交汇区附近, 冷龙岭断裂是全新世的左旋走滑兼逆冲断裂, 该断裂地处青藏高原隆起区的东北缘, 属于北祁连山活动断裂带的

\* 收稿日期: 2016-08-23.

基金项目: 中国地震局星火攻关计划(XH16039)资助.

一部分,其东段与古浪断裂及毛毛山断裂相接,西段与托莱山断裂相连(何文贵等,2000)。2015年11月23日的祁连5.2级地震就发生在本次地震震中西北方向的托莱山断裂附近,1986年8月26日的门源6.5级地震(37.78°N,101.63°E)发生在冷龙岭主峰附近的北祁连主干断裂上(陈兵等,2003)。

图1为本次地震的主震及台站分布,实心三角形为收集到的有波形数据的台站,空心三角形为只收集到加速度峰值(PGA)的台站。本文共收集了震中周边64个台站的加速度峰值PGA(中国地震信息网)和其中10个台站的强震波形数据,对本次地震进行相关的分析。

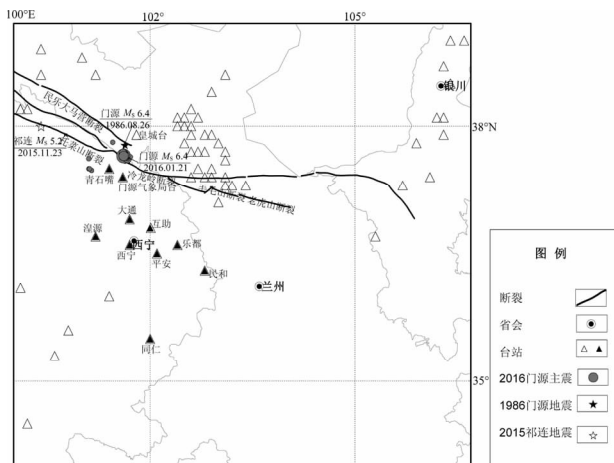


图1 门源6.4级地震及强震台站分布示意图

Fig. 1 The schematic map of the distribution of the epicenter of Menyuan  $M_s6.4$  earthquake and strong earthquake stations

## 2 地震动加速度峰值分析

通过对选取数据计算发现,距震中33.6 km的门源气象局台水平向PGA为104.7 gal,垂直向PGA为46.2 gal,而距震中30.5 km的皇城台水平向PGA为95.5 gal,垂直向PGA为65.1 gal。一般PGA会随着震中距的增大而减小,然而震中距较大的门源气象局台水平向PGA大于震中距较小的皇城台水平向PGA。由台站的分布可知,皇城台位于震中东北向,处于冷龙岭断裂以北,门源气象局位于震中的南向,处于冷龙岭断裂以南。该地区受青藏块体的长期NE向挤压和北侧稳定的阿拉善块体的阻挡,造成对祁连山地震带NE-WS

向的挤压(李祥等,2016),断层两侧区域受力不同以及不同地区场地条件的差别,可能都是造成上述情况的原因。

### 2.1 加速度峰值衰减特征

近几年,我国许多专家在加速度峰值衰减方面进行了研究,得到了很多成果(胡聿贤,1982;王亚勇等,1991;刘本玉等,2012)。在地震区划工作中,地震烈度及地震动参数的衰减关系是不可缺少的。汪素云等(2000)在研究中国分区地震动衰减关系的确定时,以地震动衰减关系的一般形式给出了中国西部的地震动衰减关系:

$$\log Y = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \log [R + c_5 \exp(c_6 M)]. \quad (1)$$

中国西部长轴:

$$\log Y = 2.492 + 0.786M - 2.787 \log [R + 3.269 \exp(0.451M)]; \quad (2)$$

中国西部短轴:

$$\log Y = 1.093 + 0.591M - 1.794 \log [R + 1.046 \exp(0.451M)]. \quad (3)$$

其中, $Y$ 为峰值加速度; $M$ 为震级; $R$ 为震中距; $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 、 $c_4$ 、 $c_5$ 、 $c_6$ 分别为回归常数;中国西部地震动衰减关系标准差 $\sigma$ 为0.242。

《GB18306—2015<中国地震动参数区划图>宣贯教材》(高孟潭,2015)中采用转换方法建立的参考地区地震动参数衰减关系得到了我国各分区的地震动衰减关系:

$$\lg Y = A + BM + C \lg [R + D \exp(EM)]. \quad (4)$$

青藏区长轴:

$$\lg Y = 2.387 + 0.645M - 2.416 \lg [R + 2.647 \exp(0.366M)]; \quad (5)$$

青藏区短轴:

$$\lg Y = 1.003 + 0.609M - 1.854 \lg [R + 0.612 \exp(0.457M)]. \quad (6)$$

其中, $Y$ 为峰值加速度; $M$ 为震级; $R$ 为震中距; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 分别为回归常数;青藏区峰值加速度衰减关系标准差 $\sigma$ 为0.236。

地震动衰减关系受震级、震中距及场地条件等因素的影响,会呈现出地区差异性。笔者根据中国西部及青藏区的峰值加速度衰减关系对门源

6.4 级地震进行了分析。通过图 2 可以看出, 中国西部地震动衰减关系曲线比青藏区衰减关系曲线偏小, 两者的加速度峰值随震中距的增大而减小。震中距在 300 km 范围内, 大部分台站水平向与垂直向记录到的 PGA 基本在中国西部和青藏区地震动衰减关系曲线之间及以下; 震中距大于 300 km 时, 大部分台站东西向和南北向 PGA 都在衰减关系曲线之上, 垂直向 PGA 在衰减关系曲线之下, 以上均说明本次地震衰减规律基本符合青藏区的地震动衰减关系变化规律。从图中还可以看出, 震中距 300 km 之内, 水平向与垂直向地震动衰减速度相近, 震中距大于 300 km 时, 水平向地震动衰减比垂直向地震动衰减缓慢, 垂直向地震动的影响明显低于水平向地震动的影响。震级相同, 震中距相近的不同台站的 PGA 的差异性, 可能受场地条件的影响, 因为不同地区的场地放大效应不同。

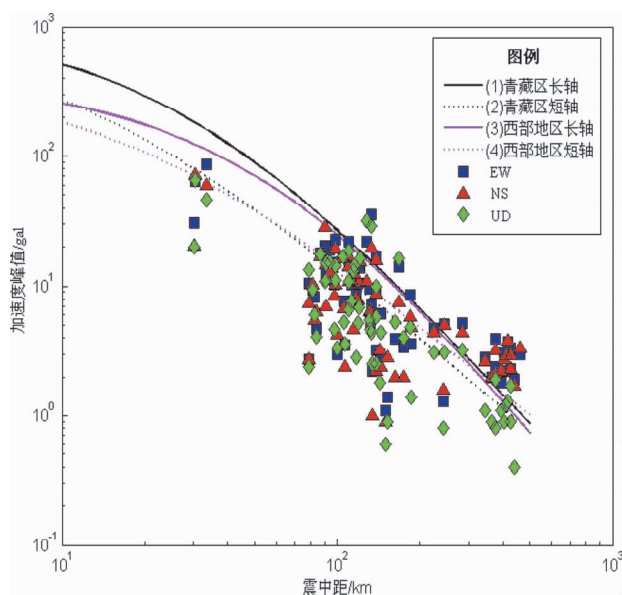


图 2 中国西部及青藏区地震动衰减关系  
与门源地震 64 个台站的记录对比

Fig. 2 Comparison of the ground motion attenuation relationship of west area and Tibetan area of China and the records of Menyuan  $M_s 6.4$  earthquake recorded by 64 stations

## 2.2 加速度峰值之比变化特征

图 3 为 64 个台的垂直向与水平向的地震动加速度峰值比值随震中距的变化情况, 从图中可以明显的看出, 垂直向与水平向的 PGA 比值随震中

距的增大而减小, 呈现下降趋势, 随着震中距的增大, 2 条趋势线逐渐靠近相交, 说明了当震中距较小时, 垂直向与水平向地震动强度相差较大, 但随着震中距的增大愈来愈接近。垂直向与东西向的比值相比于垂直向与南北向的比值小, 垂直向与东西向的比值趋势线明显比垂直向与南北向的比值趋势线低, 说明了东西向 PGA 值大于南北向的值。在 200 km 范围内有部分台站垂直向与南北向的 PGA 比值偏大, 如果把该地区以冷龙岭断裂为界划分为南部地区和北部地区, 这些台站基本上分布在托莱山断裂和冷龙岭断裂以北地区。根据李祥等 (2016) MSATSI 软件反演结果, 此次地震为逆冲和左旋走滑为主的构造体系, 由于该区域主要受 NE-WS 向挤压活动, 这种特征可能是受断层破裂性质及方向的影响结果。

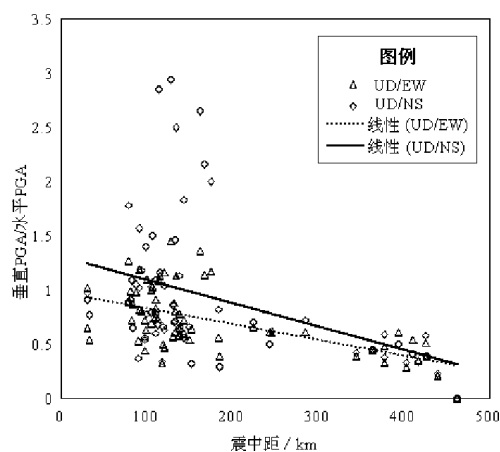


图 3 64 个台站地震动加速度峰值垂直向与水平向  
比值随震中距的变化

Fig. 3 The ratio of vertical and horizontal components of acceleration peak of ground motion recorded by 64 stations varied with epicenter distance

## 3 加速度反应谱分析

我们共收集到青海省 10 个台站记录的门源地震的波形数据, 分别为大通台、湟源台、互助台、乐都台、门源气象局台、民和台、平安台、青石嘴台、同仁台、西宁台, 该区有冷龙岭断裂、托莱山断裂、毛毛山老虎山断裂等多条断裂经过。钻孔资料显示这 10 个台除了乐都台与青石嘴台为

基岩台,其他都为土层台<sup>①</sup>。通过计算给出了 10 个台站阻尼比为 5% 的三分向反应谱(图 4),并选取了 2 个 PGA 较高的台站的波形数据进行了三分向反应谱对比分析,最后对垂直向与水平向反应谱之比进行了分析。

### 3.1 三分向加速度反应谱分析

图 4 给出了 10 个台站的加速度反应谱,从图中可以看出,东西向反应谱值最大,其次依次为南北向和垂直向,这可能与该地震的发震构造变形有关;水平向(东西、南北向)的反应谱明显较“胖”,特征周期约在 0.4~0.6 s 之间,垂直向的反应谱除了门源气象局记录数据在 0.5~1 s 出现第二个谱峰之外,总体偏“瘦”,特征周期约在 0.2~0.4 s 之间,可以看出水平向反应谱特征周期比垂直向特征周期长。

由于本次地震记录到的数据都比较小,因此,只挑选了 2 个 PGA 值较高的台站(门源气象局、青石嘴)波形数据进行了三分向反应谱对比分析(图 5)。一般地震动强度随着震中距增大而不断衰减变小,青石嘴台的震中距(30.3 km)小于门源气象局的震中距(33.6 km),但从图 5 中可以看到,青石嘴台的加速度峰值和加速度反应谱峰值却小于门源气象局台。影响地震动强度的因素除了震中距,还有场地条件等方面的影响。场地条件包括场地土层的软硬程度、土层结构及覆盖层厚度等方面的因素,震后这些因素可能都会受断层的影响而发生变化。根据建台报告<sup>①</sup>可知,青石嘴台为基岩台,门源气象局台为土层台,因此判断上述情况可能属于土层场地对地震动的放大效应,本次地震动的放大效应约一般在 0~2.5 之间,最高可超过 3。

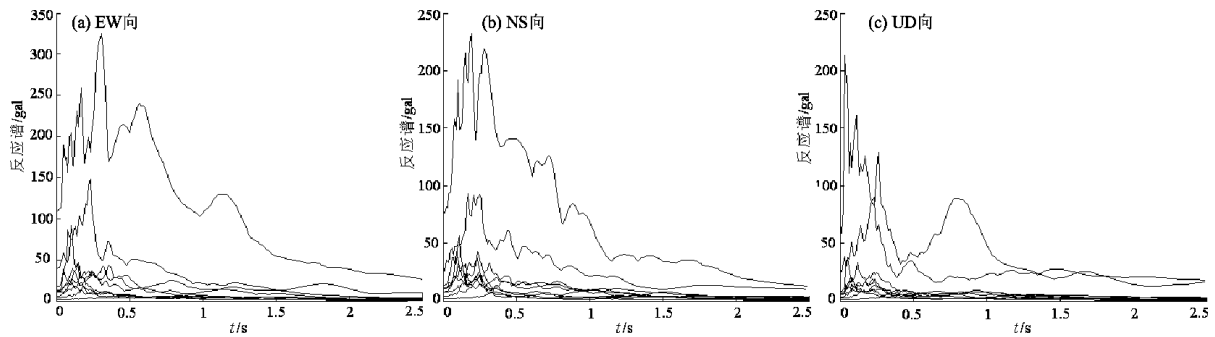


图 4 10 个台站水平向与垂直向反应谱

(a) EW 向; (b) NS 向; (c) UD 向

Fig. 4 The response spectrum of horizontal and vertical components of Menyuan  $M_s6.4$  earthquake recorded by 10 stations

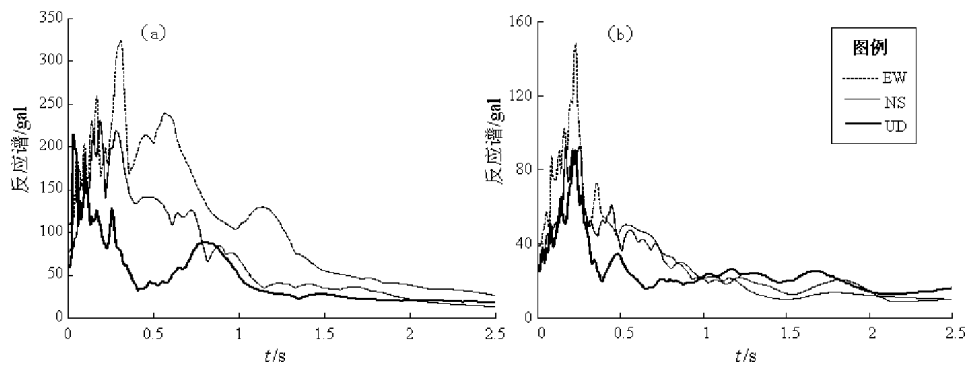


图 5 门源气象局台 (a) 和青石嘴台 (b) 的反应谱

Fig. 5 The response spectrum of Menyuan  $M_s6.4$  earthquake recorded by Menyuan Station (a) and Qingshizui Station (b)

① 青海省地震局. 2007. “十五”项目, 大通台、湟源台、互助台、乐都台、门源气象局台、民和台、平安台、青石嘴台、同仁台、西宁台建台报告.

### 3.2 垂直向与水平向反应谱比分析

一般认为垂直向与水平向加速度反应谱比值的统计平均值在  $1/2 \sim 2/3$  之间, 但影响这一平均值的因素众多且复杂。Campbell 和 Bozorgnia (2003), Bozorgnia 和 Campbell (2004) 对  $0.04 \sim 3$  s 周期之间的垂直向和水平向反应谱的研究表明, 在短周期段 ( $< 0.1$  s) 垂直向与水平向的加速度反应谱比值有时超过 1, 甚至高达 1.8, 这比  $2/3$  大很多, 在  $0.3 \sim 1.0$  s 周期的比值却低于  $1/2$ 。谢俊举等 (2010) 研究表明近断层地震动垂直向与水平向谱比在短周期段 ( $< 0.1$  s), 远大于  $2/3$ , 部分台站甚至超过 1.5。

从图 6 可以看出, 这 10 个台站垂直向与水平向反应谱的比值规律性不明显, 但明显大于一般

公认值。在短周期段 ( $< 0.1$  s) 和  $0.3 \sim 1.0$  s 周期段除个别台谱比大于 1, 甚至高达 2 之外, 大部分台谱比都小于 1, 说明了反应谱比受周期、断层距等的影响较大。垂直向与南北向的谱比值约在  $0.2 \sim 0.8$  s 有一个凹槽 (图 6a), 垂直向与东西向的谱比值约在  $0.2 \sim 0.7$  s 有一个凹槽 (图 6b), 凹槽两边的值都相对较大, 说明在这个周期垂直向与水平向的反应谱值比较接近, 而这个周期段两边水平向与垂直向的值相差较大。从图中还可以看出,  $0.6$  s 后基本上属于反应谱下降段,  $0.2 \sim 0.6$  s 基本为反应谱的平台段, 表明反应谱平台段水平向与垂直向的反应谱值比较接近, 因此, 在工程抗震中也应重视垂直向地震动的作用。

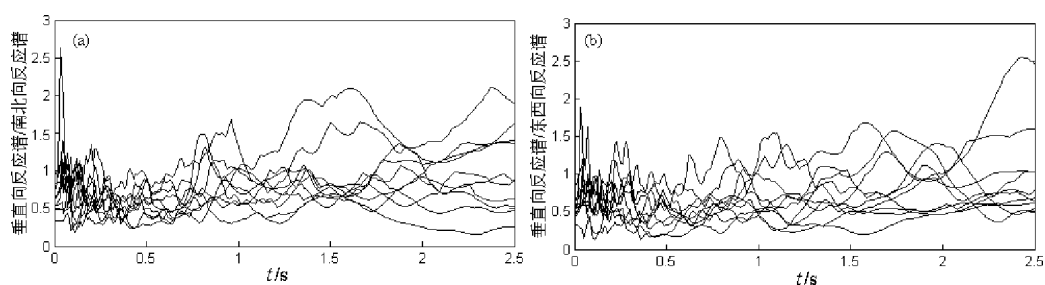


图 6 10 个台站水平分量与垂直分量反应谱比

Fig. 6 The ratio of response spectrums of vertical and horizontal components of Menyuan  $M_s 6.4$  earthquake recorded by 10 stations

## 4 结论

2016 年青海门源 6.4 级地震是继 1986 年青海门源 6.5 级地震后该地区发生的又一次 6 级以上地震, 随着强震台站架设的增多, 为地震研究提供了更多的数据基础。本文通过收集到的 64 个台的加速度峰值及其中 10 个台的强震波形数据对本次地震加速度峰值随震中距的变化、加速度峰值垂直向与水平向的 PGA 比值、反应谱的变化及反应谱比值进行了初步分析, 得出以下几点结论:

(1) 本次地震的加速度峰值衰减规律基本符合青藏区的地震动衰减关系变化规律, 震中距在 300 km 范围内, 水平向与垂直向地震动衰减速度相近, 震中距大于 300 km 时, 垂直向地震动比水平向地震动衰减快。受场地放大效应及其它场地条件的影响, 震中距相近的不同台站的 PGA 呈现一些差异性。

(2) 垂直向分别与东西向、南北向 PGA 的比

值随震中距的增大而减小, 呈现下降趋势, 随着震中距的增大, 2 条趋势线慢慢相交在一起, 说明了在震中距较小时, 垂直向与水平向地震动强度相差较大, 但随着震中距的增大, 水平向与垂直向地震动强度愈来愈接近; 从台站的分布情况来看, 在 200 km 范围内, 部分台垂直向与南北向 PGA 比值偏大的台站基本上分布在托莱山断裂和冷龙岭断裂以北地区, 由于该区域主要受 NE-WS 向挤压活动, 此种特征可能受断层破裂性质及方向性的影响。

(3) 不同场地条件的加速度反应谱会因各类因素的影响而不同, 例如震中距、场地条件等都是影响因素之一。研究认为场地条件对该次地震的影响较明显, 又一次验证了土层场地对地震动的放大效应。在门源地区地震动研究较少的情况下, 了解该地区加速度反应谱的这些特征, 具有实践意义。

(4) 垂直向与水平向反应谱的比值的规律性不明显, 反应谱比值明显大于一般公认值。约在

0.2~0.8 s 周期段水平向与垂直向的反应谱值比较接近,在凹槽时段的两边水平向与垂直向的反应谱值相差较大,表明反应谱平台段水平向的值与垂直向的值比较接近,在工程抗震中应重视垂直向地震动的作用。由于只获得了 10 个台的波形数据,今后对更多的强震加速度数据进行研究,可更好地验证相关的分析结果。

### 参考文献:

- 陈兵,江在森,张四新等. 2003. 1986 年门源地震( $M_s6.4$ )过程地形变化特征及块体模型解析[J]. 西北地震学报,25(3):240-245.
- 崔建文,刘琼仙,段建新等. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震强震观测记录及初步分析[J]. 地震研究,37(4):542-548.
- 高孟潭. 2015. GB1830—2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京:中国质检出版社,中国标准出版社.
- 何文贵,刘百箴,袁道阳等. 2000. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. 西北地震学报,22(1):90-97.
- 胡朝忠,杨攀新,李智敏等. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震的发震机制探讨[J]. 地球物理学报,59(5):1637-1646.
- 胡聿贤. 1982. 工程地震[M]. 北京:地震出版社.
- 黄禄渊,杨树新,陈连旺等. 2016. 2015 年尼泊尔  $M_w7.9$  地震对强余震的触发作用和对周边断层的影响[J]. 地震研究,39(2):187-195.
- 李祥,万永革,催华伟等. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海门源  $M_s6.4$  地震构造应力场[J]. 华北地震科学,34(2):36-41.
- 李媛,刘峡,刘希康等. 2016. 2016 年门源 6.4 级地震前祁连山周边断层活动分析[J]. 大地测量与地球动力学,36(4):288-293.
- 刘本玉,梁毓恒,温一波. 2012. 云南地区地震动衰减特性的研究[J]. 地震研究,35(2):226-235.
- 屠泓为,万秀红,赵燕杰等. 2014. 西宁盆地周围区域中小地震震源机制解的计算及其构造意义[J]. 地球物理学进展,29(1):148-154.
- 汪素云,俞言详,高阿甲等. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震,16(2):99-106.
- 王亚勇,刘小弟,黎家佑等. 1991. 澜沧—耿马强震地面运动特征研究[J]. 地震工程与工程振动,11(2):11-19.
- 谢俊举,温增平,高孟潭等. 2010. 2008 年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J]. 地球物理学报,53(8):1796-1805.
- 易桂喜,付虹,王思维等. 2014. 1988 年澜沧—耿马地震前震源区应力状态分析[J]. 地震研究,37(3):332-338.
- Bozorgnia Y, Campbell K W. 2004. The vertical to horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H vertical design spectra[J]. Journal of Earthquake Engineering, 8(2):175-207.
- Campbell K W, Bozorgnia Y. 2003. Updated near-source ground motion attenuation relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra[J]. Bulletin of seismological Society of America,93(1):314-331.

## Analysis on Characteristics of Strong Earthquake Records of Qinghai Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in 2016

WAN Xiuhong, WU Zhe, LI Zhimin, ZHAN Beilei, HUANG wei  
(Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

### Abstract

Using the acceleration peaks of 64 stations and the strong earthquake waveform data of 10 stations in the area around the epicenter of Qinghai Menyuan  $M_s6.4$  earthquake, we analyzed the attenuation of ground motion, the acceleration response spectrum and the ratio of vertical component and horizontal component. The research results show as follows: the ground motion attenuation law of Menyuan earthquake basically accords with that in Tibetan area. When the epicenter distance is within 300 km, the attenuation speed of horizontal and vertical ground motions are close; when the epicenter distance is greater than 300 km, the attenuation speed of horizontal ground motion attenuation is slower than that of the vertical ground motion. When the epicenter distance is within 200 km, some stations with larger PGA ratio of UD/NS are basically distributed in the north area of Lenglongling Fault and Tuolaishan Fault. Compared analysis on the three-component of acceleration response spectrum, we find that compared with bedrock site, the soil layer site presents obvious site amplification effect. The groove phenomenon of response spectrum shows that the role of vertical ground motion should be paid attention to the engineering earthquake resistance.

**Key words:** Menyuan earthquake; acceleration peak; acceleration response spectrum; V/H spectrum ratio