

# 地震震源机制对长周期地震动的影响研究

俞言祥, 胡聿贤, 潘 华

(中国地震局 地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:**长周期地震动特性的研究对自振周期较长的大型结构的抗震设计具有重要意义。利用1997年新疆伽师强震群的宽频带数字地震记录,研究了震级大小和震源机制对长周期地震动特性的影响。结果表明:地震震级对长周期地震动的影响较为明显,震级越大,长周期地震动的成分越多;与走滑型地震相比,倾滑型地震的垂直向长周期成分更为丰富;走滑型地震的水平向长周期加速度反应谱值高于正断层型地震的水平向长周期加速度反应谱值。

**关键词:**地震工程;长周期反应谱;震源机制

**中图分类号:** O 319.56

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)17-3113-06

## STUDY ON IMPACT OF FOCAL MECHANISM ON LONG-PERIOD GROUND MOTIONS

YU Yan-xiang, HU Yu-xian, PAN Hua

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The study of long-period ground motions is significant to seismic design of large-scale engineering structures. The digital broad-band seismic records of strong earthquake swarm obtained in Jiashi, Xinjiang, China, in 1997 are used to study the impact of earthquake magnitude and focal mechanism on long-period ground motions. The results show that: (1) Earthquake magnitude has strong effects on the long-period ground motions. Larger earthquake has more long-period ground motion contents. (2) Compared with the strike-slip earthquakes, the oblique-faulting earthquakes have more long-period contents in vertical component. (3) The long-period horizontal acceleration response spectra of strike-slip earthquakes are higher than those of the normal-faulting earthquakes.

**Key words:** earthquake engineering; long-period response spectrum; focal mechanism

## 1 引 言

地震对工程有很强的破坏力,研究工程的抗震问题需要了解地震动特性。具有较长自振周期的大型工程如大跨度桥梁等,对长周期地震动更为敏感,因此,长周期地震动特性的研究对这类大型工程的抗震设计具有重要意义。

目前国内外对长周期地震动的研究还处于较为

初步的阶段,主要问题在于强震记录在长周期段存在较大误差<sup>[1,2]</sup>。相对而言,地震监测所使用的数字宽频带地震记录则在长周期段具有较高的信噪比,比较适合长周期地震动研究<sup>[2-4]</sup>。

近年来获得的强震记录表明,地震震源机制对加速度峰值有很大影响,逆断层型地震的近场加速度峰值比走滑型地震要大20%~30%<sup>[5-8]</sup>。一些研究者也研究了地震动的上盘效应<sup>[9,10]</sup>。地震动包含了

**收稿日期:** 2005-02-23; **修回日期:** 2005-05-08

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412706);国家自然科学基金资助项目(40374017);中国地震局“十五”重点资助项目(0102)

**作者简介:** 俞言祥(1964-),男,博士,2002年于中国地震局地球物理研究所获博士学位,现任研究员,主要从事工程地震和地震灾害方面的研究工作。E-mail: yanxiang@cdsn.org.cn.

震源、地震波传播路径和局部场地条件等因素的影响,要在记录到的地震动中分别分离出它们是非常困难的。1997 年,我国新疆伽师地区发生了一个强地震群,在新疆乌什地震台获得了这些地震的数字宽频带记录。由于这些地震震中位置相近,地震震源机制不同,并且在同一台站获得了记录,因此,这些记录中所包含的地震波传播路径和场地条件的影响是基本相同的,它们之间的差异反映的主要是震源特性的影响,这为研究地震震源对地震动,特别是长周期地震动的影响提供了极好的条件。

在研究震源机制对地震动的影响方面,一般通过在地震动衰减关系中引入震源机制项来进行<sup>[5-8]</sup>,但也只限于周期小于 4 s 的短周期地震动。限于资料的原因,国内外对长周期地震动研究还不够深入,更没有对长周期地震动受震源机制的影响进行专门研究。本文的目的,是利用具有可靠长周期特性的数字宽频带记录,通过去除传播路径和场地的影响,着重研究地震震源机制对长周期地震动的影响。

## 2 伽师强震群

自 1997 年 1 月 21 日新疆伽师发生 6.0 级和 6.2 级地震之后,该区强震不断,至当年 6 月 24 日,共发生 5.0~5.9 级地震 8 次,6 级以上地震 7 次。根据震中精确定位结果,伽师强震群集中在一个 30 km × 15 km × 15 km(长 × 宽 × 高)的狭小区域中。表 1 为伽师震群经过精确定位后的目录<sup>[11]</sup>。另外,在该震群 NW 向约 70 km 的阿图什于 1996 年 3 月 19 日

发生了 6.9 级地震。伽师震群和阿图什地震距乌什台的距离大致相同,约 260 km。因此,本文将阿图什地震与伽师震群一并用于本项研究。

伽师震群中有 10 个地震得到了矩心矩张量(centroid-moment tensor, CMT)解,这些地震的矩心矩张量解见表 2。由表 2 可知,共有 1 个逆断层型地震(1<sup>#</sup> 地震),4 个正断层型地震(5<sup>#</sup>~8<sup>#</sup> 地震)和 5 个走滑型地震(2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>, 9<sup>#</sup>, 10<sup>#</sup> 地震)。

表 1 伽师震群  $M > 5.0$  地震及阿图什地震的地震目录  
Table 1 Catalog of Jiashi earthquake swarm( $M > 5.0$ )

编号	时间 /年-月-日	发震时刻 /时:分:秒	震中位置/(°)		深度 /km	震级 /级
			北纬	东经		
1	1996-03-19	23:00:26.0	39.99	76.70	22	6.9
2	1997-01-21	09:47:12.7	39.50	77.08	17	6.0
3	1997-01-21	09:48:21.1	39.58	77.05	18	6.2
4	1997-01-29	16:20:13.1	39.57	77.07	13	5.2
5	1997-02-12	04:20:57.8	39.45	77.08	27	5.0
6	1997-03-01	14:04:14.0	39.72	76.97	20	6.0
7	1997-04-06	07:46:16.5	39.55	77.03	29	6.4
8	1997-04-06	12:36:31.8	39.50	77.10	21	6.2
9	1997-04-06	13:09:27.0	39.50	77.02	20	5.1
10	1997-04-06	20:58:12.1	39.47	77.05	16	5.1
11	1997-04-11	13:34:43.3	39.65	77.05	21	6.4
12	1997-04-11	13:48:15.4	39.52	77.05	22	5.0
13	1997-04-13	05:09:08.4	39.52	77.05	23	5.5
14	1997-04-16	02:19:09.4	39.68	77.02	18	6.2
15	1997-05-17	11:58:22.3	39.65	77.02	26	5.4
16	1997-06-24	17:24:45.3	39.50	77.00	19	5.0

表 2 伽师强震群部分地震的震源机制 CMT 解  
Table 2 CMT solution of 10 Jiashi swarm earthquakes

编号	时间 /年-月-日	发震时刻 /时:分:秒	震级 /级	节面 I			节面 II			震源机制
				走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	
1	1996-03-19	23:00:26.0	6.9	273	26	109	72	66	81	逆断层
2	1997-01-21	09:48:21.1	6.2	315	75	-177	224	87	-15	走滑断层
3	1997-03-01	14:04:14.0	6.0	180	80	-173	89	83	-10	走滑断层
4	1997-04-06	07:46:16.5	6.4	161	78	179	251	89	12	走滑断层
5	1997-04-06	12:36:31.8	6.2	253	43	-36	10	67	-127	正断层
6	1997-04-06	20:58:12.1	5.1	227	36	-61	12	59	-109	正断层
7	1997-04-11	13:34:43.3	6.4	240	37	-45	9	65	-118	正断层
8	1997-04-13	05:09:08.4	5.5	243	48	-65	28	48	-115	正断层
9	1997-04-16	02:19:09.4	6.2	170	66	-162	73	74	-25	走滑断层
10	1997-06-24	17:24:45.3	5.0	345	72	-167	251	78	-18	走滑断层

### 3 数据处理与结果

新疆乌什地震台的数字宽频带地震仪从 1988 年开始记录。地震仪的频率响应是速度平坦型的，速度平坦周期为 0.2 ~ 400 s，因此该地震仪的频率响应是满足长周期地震动研究的。

文[12]从数字宽频带地震仪的仪器响应特征、地震动恢复、信噪比分析等方面研究了该类地震记录用于长周期地震动研究的可靠性，结果表明，即使周期长达 20 s 时，数字宽频带地震记录也具有较高的信噪比，适合于长周期地震动研究。

对这些地震记录的处理包括地震仪器响应校正和截止周期为 40 s 的高通滤波<sup>[12]</sup>。图 1 是经过上述处理后所得到的 1997 年 4 月 11 日 6.4 级地震乌什地震台的 NS 向和 EW 向地面加速度、速度和位移时程。图 1 中  $a$ 、 $v$  和  $d$  分别代表加速度、速度和位移。由图 1 可知，恢复的地面运动时程是可接受的，无明显基线误差。最后，再计算出所有地震记录的周期至 20 s 的绝对加速度反应谱  $Sa$  和放大谱  $Sa/PGA$  即  $\beta$ ，其中， $PGA$  表示加速度峰值。

根据 CMT 解，将表 2 中 10 个地震的水平向绝对加速度放大谱依震源机制绘在图 2(a)中，图 2(b) 是不同震源机制地震记录的平均放大谱。由图 2 可知，阿图什地震(逆断层)的加速度反应谱在长周期部分较高，正断层地震的谱值在长周期部分相对较低，而走滑断层地震的长周期谱居于前两者之间。但是，还不能就此说明对长周期加速度反应谱的以上影响是由不同震源机制引起的，因为，虽然此处可抛开传播路径和场地条件的影响，但地震大小和应力降也可能影响长周期谱。根据震源谱的  $\omega^{-2}$  模型，应力降越小，其谱值也越低<sup>[13-15]</sup>。根据文[11]的研究，这次新疆伽师强震群的正断层型地震的应力降相对较低，因此，此处正断层地震的水平向长周期谱值较低究竟是震源机制还是应力降相对较低造成的，尚需进一步研究。

将垂直向的加速度放大谱按震源机制不同绘于图中，见图 3。由图 3 可知，逆断层型地震的垂直向加速度反应谱在长周期部分依然最高，但正断层型地震的垂直向加速度反应谱与走滑断层型的相比，在周期大于 1 s 后两者相当，在周期 6 s 以后正断层型的甚至还要高一些。因此，相对于水平向的

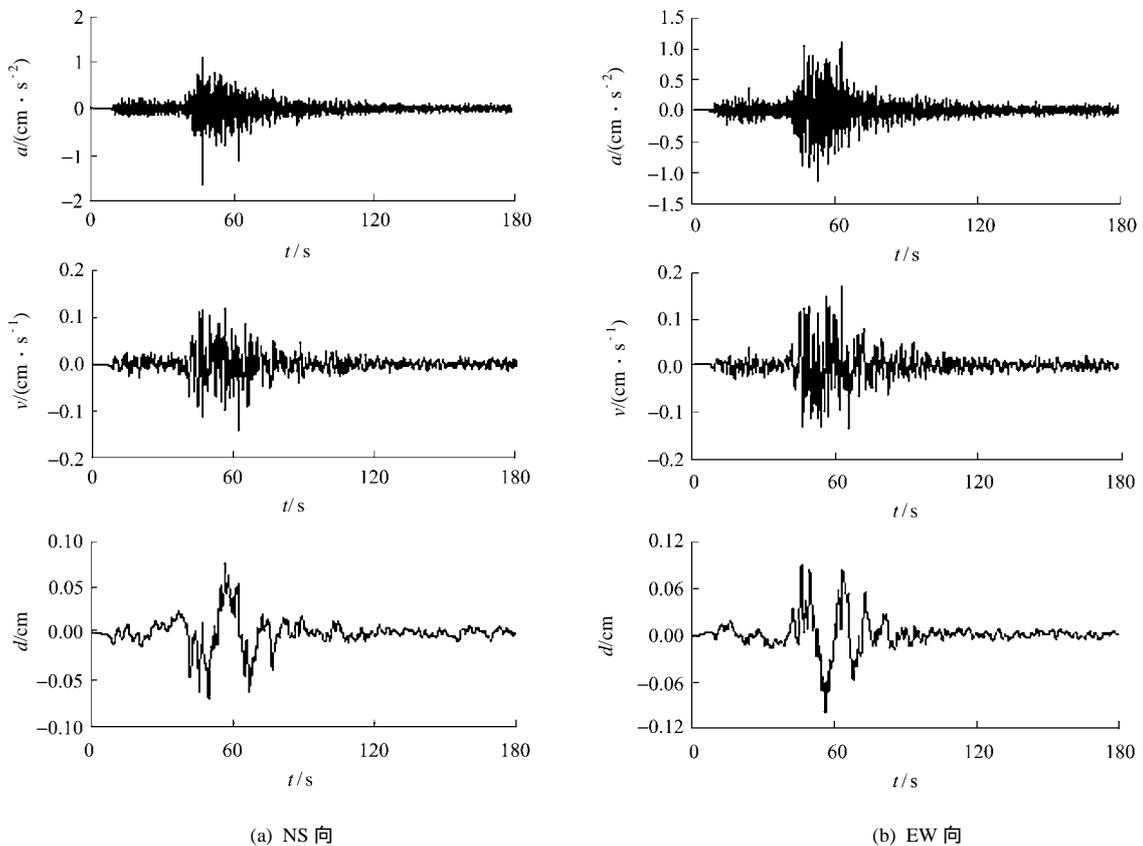


图 1 1997 年 4 月 11 日伽师 6.4 级地震地面运动加速度、速度和位移时程

Fig.1 Ground acceleration, velocity and displacement of Jiashi earthquake on April 11, 1997, with a magnitude of 6.4

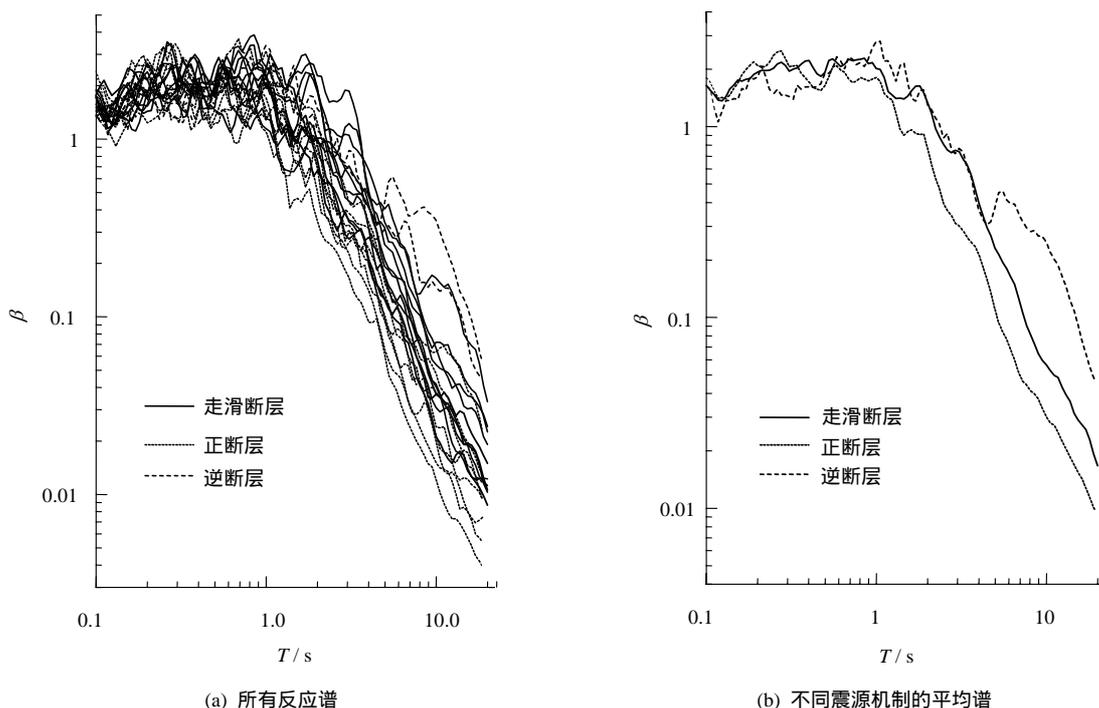


图 2 按震源机制绘制的水平向加速度反应谱放大谱  
 Fig.2 Horizontal response spectral shapes versus focal mechanisms

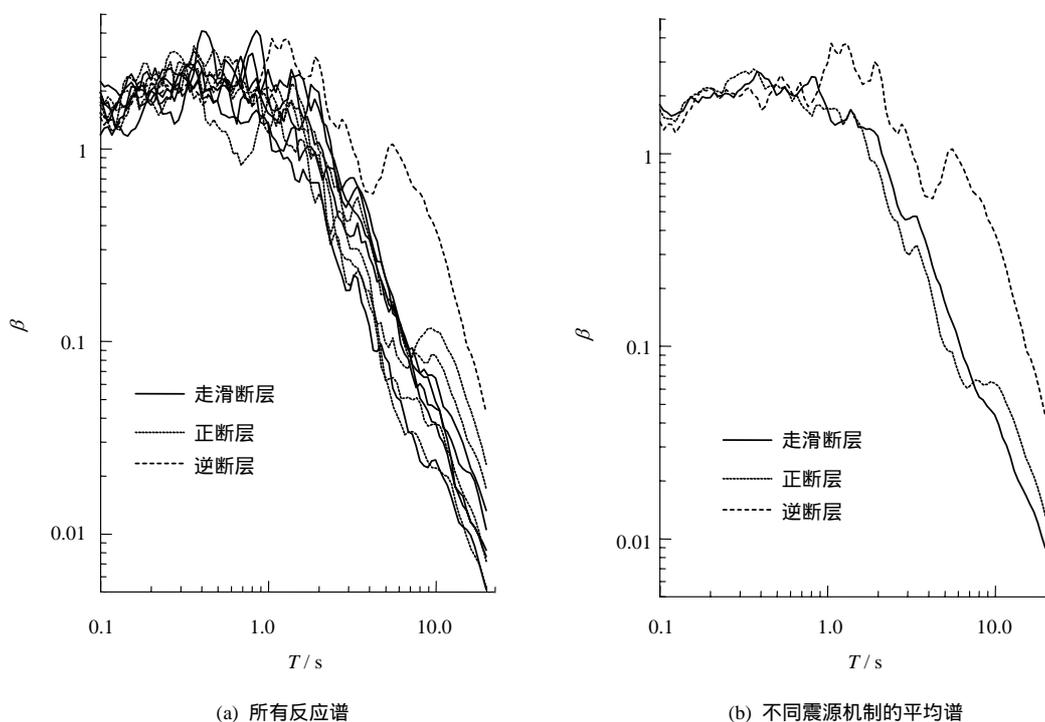


图 3 按震源机制绘制的垂直向加速度反应谱放大谱  
 Fig.3 Vertical response spectral shapes versus focal mechanisms

结果至少可得出如下结论，即与走滑型地震相比，倾滑型地震(正断层型地震和逆断层型地震)的长周期反应谱在垂直方向上要相对丰富。由于倾滑型地

震断层上下运动的分量较大，造成了所辐射的地震波在垂直向相对较大。

地震大小对长周期谱也有很大影响，一般认

为，震级越大，长周期成分越丰富。为考察地震大小的影响，按震级  $M = 6.0$  和  $M = 5.9$  绘出了所有水平加速度放大谱，见图 4(a)。图 4(b)是这两种情况的平均谱。由图 4 可知，大震级地震的长周期部分相对较大，而短周期部分相对较小，小震级地震的则相反，这与其他研究结果相同<sup>[16]</sup>。垂直向的结果见图 5，亦为同样的情况。

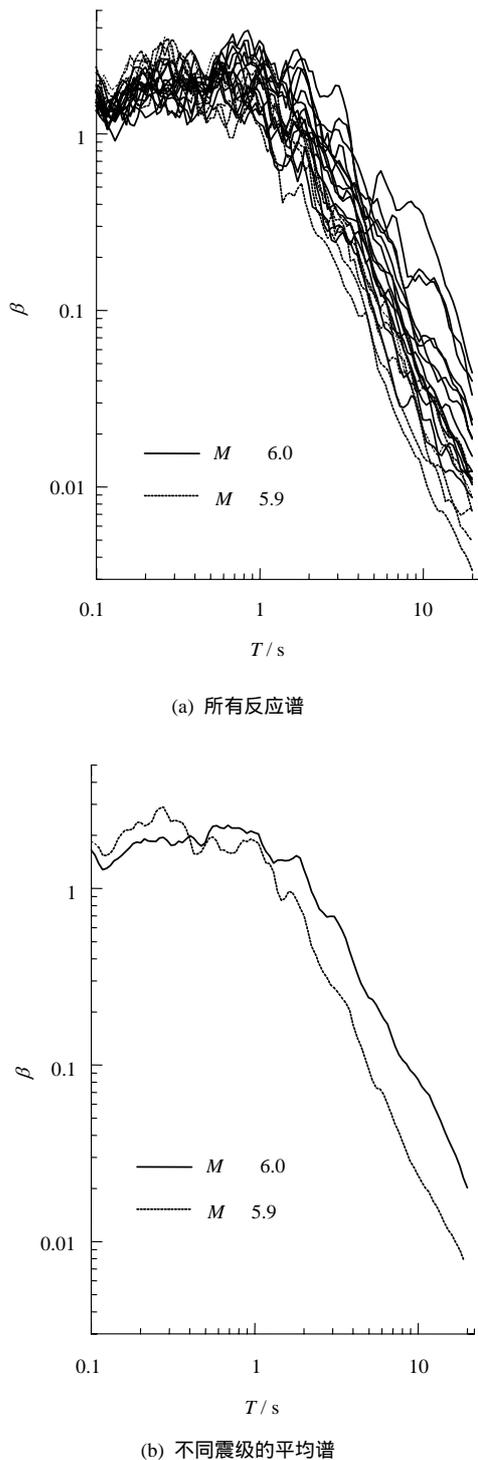


图 4 按震级大小绘制的水平向加速度反应谱放大谱  
Fig.4 Horizontal response spectral shapes versus magnitude

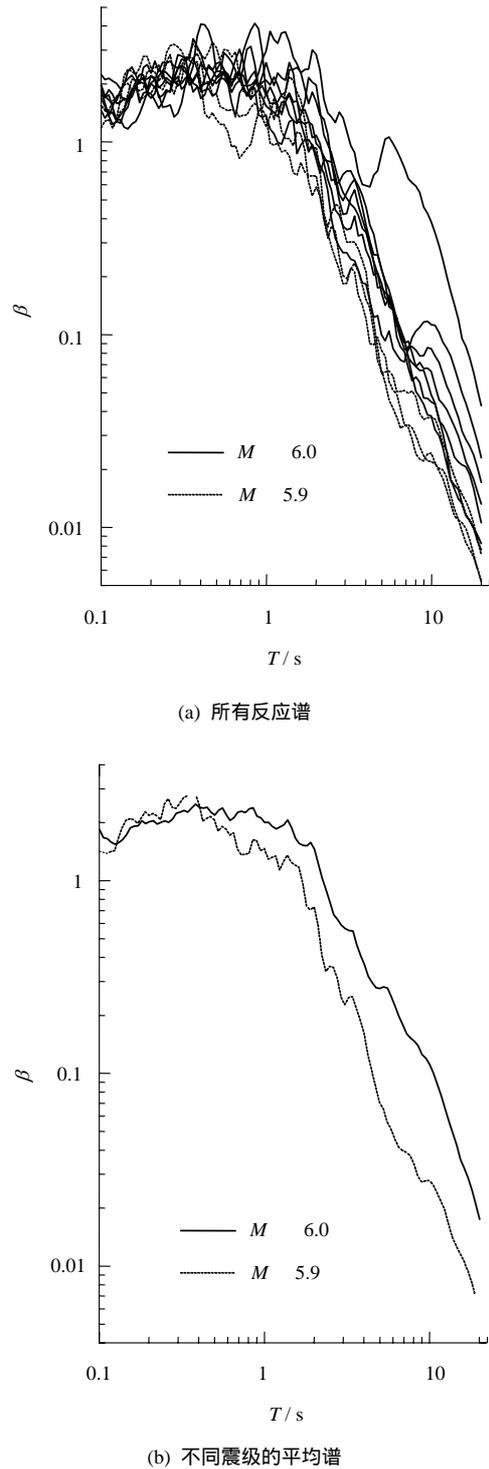


图 5 按震级大小绘制的垂直向加速度反应谱放大谱  
Fig.5 Vertical response spectral shapes versus magnitude

## 4 结 论

- (1) 地震震级对长周期地震动有很大影响，震级越大的地震长周期成分越丰富。
- (2) 倾滑型地震的长周期成分相对于走滑型地

震，在垂直方向上较丰富。

(3) 伽师强震群正断层型地震的水平向长周期反应谱值较走滑型地震的为低。因资料的限制目前还无法确定这是震源机制的影响还是较低应力降的影响，需要补充资料进行进一步的研究，反应谱受影响的程度也有待于研究。

### 参考文献(References)：

- [1] 俞言祥. 长周期地震动研究综述[J]. 国际地震动态, 2004, 7: 1-5.(Yu Yanxiang. Review of long-period ground motion study[J]. Recent Development in World Seismology, 2004, 7: 1-5.(in Chinese))
- [2] 俞言祥. 长周期地震动衰减关系研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002.(Yu Yanxiang. Study on attenuation relationships of long period ground motions[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2002.(in Chinese))
- [3] 汪素云, 俞言祥, 吕红山. 利用中国数字地震台网宽频带记录研究长周期地震动反应谱特性[J]. 地震学报, 1998, 20(5): 481-488.(Wang Suyun, Yu Yanxiang, Lu Hongshan. Study of characteristics of long-period ground motion response spectra by using broad-band records of the Chinese Digital Seismograph Network[J]. Acta Seismologica Sinica, 1998, 20(5): 481-488.(in Chinese))
- [4] Hu Y X, Yu Y X. A seismological-engineering approach to the estimation of wide response spectrum for distant earthquake[A]. In: Ko J M, Xu Y L ed. Advances in Structural Dynamics[C]. Amsterdam: Elsevier, 2000. 193-200.
- [5] Abrahamson N A, Silva W J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes[J]. Seism. Res. Lett., 1997, 68(1): 94-109.
- [6] Boore D M, Joyner W B, Fumal T E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western north American earthquakes: a summary of recent work[J]. Seism. Res. Lett., 1997, 68(1): 128-153.
- [7] Campbell K W. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra[J]. Seism. Res. Lett., 1997, 68(1): 154-179.
- [8] Sadigh K, Chang C Y, Egan J A, et al. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data[J]. Seism. Res. Lett., 1997, 68(1): 180-189.
- [9] Abrahamson N A, Somerville P G. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1996, 86(1B): S93-S99.
- [10] 俞言祥, 高孟潭. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应[J]. 地震学报, 2001, 23(6): 615-621.(Yu Yanxiang, Gao Mengtan. Effects of the hanging wall and footwall on peak acceleration during the (Chi-Chi)Earthquake, Taiwan[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(6): 615-621.(in Chinese))
- [11] 周仕勇, 许忠淮, 陈晓非. 伽师强震群震源特征及震源机制力学成因分析[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 654-662.(Zhou Shiyong, Xu Zhonghui, Chen Xiaofei. Analysis of the source characteristics of the 1997 Jiashi swarm, Western China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5): 654-662.(in Chinese))
- [12] Yu Y X, Hu Y X. A combine method to establish attenuation relation of long-period response spectrum[A]. In: Spencer J B F, Hu Y X ed. Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium[C]. Lisse: A. A. Balkema, 2001. 177-182.
- [13] Boore D M, Atkinson G M. Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in eastern North America[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1987, 77(2): 440-467.
- [14] Atkinson G M, Silva W. Stochastic modeling of California ground motions[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 2000, 90(2): 255-274.
- [15] 吕红山. 反应谱的标定及其长周期外延[硕士学位论文][D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 1995.(Lu Hongshan. The scaling of response spectrum and its extension to long-period[M. S. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 1995.(in Chinese))
- [16] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.(Hu Yuxian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 1988.(in Chinese))