

Analysis of Ground Motion Duration Characteristics of Wenchuan Earthquake

Xiaoyan Ma^{1*}, Zhenghua Zhou², Yan Huang³

¹Qindao College, Qingdao Technological University, Qingdao Shandong

²Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu

³Heilongjiang Earthquake Agency, Harbin Heilongjiang

Email: *xiaorenwu0811@126.com

Received: May 8th, 2019; accepted: May 22nd, 2019; published: May 29th, 2019

Abstract

Based on several commonly used definitions of ground motion duration, the statistical results of ground motion duration under different definitions are analyzed and compared by using strong motion acceleration data recorded by China Earthquake Network Center in Wenchuan Earthquake. The results show that the ground motion induced by this earthquake has long duration characteristics, and the statistical results given by different definitions of ground motion duration are quite different. On the other hand, at the same station, absolute strong earthquake duration is the longest and 70% energy duration is the shortest. In addition, using the acceleration records of typical strong motion stations forward and backward rupture, the directional characteristics of ground motion duration are analyzed. The results show that the time duration of ground motion acceleration forward rupture has no obvious trend with the epicenter distance, while the time duration backward rupture increases with the epicenter distance, and the time duration forward rupture is obviously shorter than that behind rupture. The results of this paper can be useful for the study of the influence of the ground motion duration on the seismic response of structures.

Keywords

Wenchuan Earthquake, Duration, Directivity, Ground Motion

汶川地震地震动持时特性分析

马小燕^{1*}, 周正华², 黄艳³

¹青岛理工大学琴岛学院, 山东 青岛

²南京工业大学, 江苏 南京

³黑龙江省地震局, 黑龙江 哈尔滨

Email: *xiaorenwu0811@126.com

*通讯作者。

收稿日期：2019年5月8日；录用日期：2019年5月22日；发布日期：2019年5月29日

摘要

基于目前常用的几种地震动持时定义，利用汶川地震中由中国数字强震动台网记录的地面运动加速度时程，分析并比较了不同定义下地震动持时的统计结果，结果表明，此次地震引起的地震动具有较长持时特点，且不同持时定义给出的统计结果存在较大差异，同一台站，绝对强震持时最长，而70%能量持时最短。此外，利用破裂前后方典型强震动台站加速度记录，重点分析了地震动持时的方向性分布特征，结果显示，破裂前方的地震动加速度时程持时随震中距无明显变化趋势，而破裂后方的持时随震中距增加而不断增加，且破裂前方的持时明显小于破裂后方的持时。本文结果可为地震动持续时间对结构地震反应影响的研究提供参考。

关键词

汶川地震，持时，方向性，地震动

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震作为一种自然灾害，具有突发性大、破坏力强的特征，对人类危害极大，因此，对地震活动的研究受到世界各国普遍的重视。特别是我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间，属于地震多发国家，具有发生破坏性地震条件的地区分布极为广泛。且随着我国城市化进程的发展，地震已经成为影响城市安全的重要因素。

发生于2008年的5.12汶川Ms8.0级特大地震给我国带来了极大的人员伤亡与财产损失。该地震事件为开展地震动特征、宏观地震震害、发震构造及其同震位移、震源机制等研究提供了丰富的宝贵资料，国内学者对其进行了不同层面的研究。李小军等人针对汶川地震强震动观测进行了总结并进行了初步分析[1]，周正华等人结合地震现场震害调查实践给出了进行地震宏观震害调查的几点建议[2]。清华大学等土木工程结构专家组对震害状况进行了统计分析[3]。徐锡伟等人研究了汶川地震中地表破裂带及其发震构造[4]。卢书楠等人分析了汶川地震中强震持时的特征[5]。滕吉文等人研究了汶川地震发生的深层次过程和动力学响应[6]。

作为描述地震动特征的三要素之一，地震动持时对结构的破坏是一个不容忽视的主要因素。现行的我国抗震设计规范中采用反应谱理论，并没有考虑地震动持时对结构地震响应的影响。这可能导致对长持时地震动作用下的结构破坏程度做出不可靠的估计。因此，考虑地震动持时对结构破坏的累积效应是十分必要的。本文主要基于汶川地震中获取的地震动加速度记录，统计地震动持时特点，比较不同定义持时的差异性和合理性，为进一步探寻地震动持时与结构破坏之间的内在关系提供基础。

2. 地震动持时的定义

地震动持时可分为地震动总持时和强震动持时。由于强度低的地震动对工程潜在破坏性较小，因此，

地震工程学中重点关注强震动持时，即对工程有影响的强地面运动的持续时间。虽然大多数研究者都认识到强震动持时的重要性，但是强震动持时的定义并没有统一。大体上可分为记录持时和反应持时两大类，记录持时是根据地震动记录计算得到一个时间参数，而反应持时是从工程应用的角度出发，将地震动记录通过控制某个结构反应量得到的持时定义，由此定义的持时与结构的反应量相联系。在本文中主要研究地震动记录持时，下面根据阈值的取值不同，分别给出地震动记录持时的几种定义。

1) 绝对持时。又称括号持时，由 Bolt [7]提出，该定义取加速度记录绝对值在第一次和最后一次达到或超过事先设定的值(如 0.05 g 或 0.1 g 等)之间所经历的时间作为地震动持续时间。

2) kAmax 相对持时。该定义取加速度峰值的 k 倍作为阈值，强震持时为地震动记录首末两次达到或超过该阈值的时间长度，Amax 表示加速度记录峰值，k 取 0.2~0.5。

3) 能量相对持时。该持时定义最早由 Trifunac [8]提出，常用的有 90%能量持时，即将地震动能量达到总能量 5%开始至达到总能量的 95%结束所经历的时间作为地震动持时。也有用地震动能量达到总能量 5%开始至达到总能量的 75%结束所经历的时间作为地震动持时，即 70%能量持时。如 70%能量持时定义公式如下[8]:

$$T_d = T_2 - T_1 \tag{1}$$

$$I(T) = \frac{\int_0^T a^2(t) dt}{\int_0^{T_{all}} a^2(t) dt}, I(T_1) = 0.05, I(T_2) = 0.75 \tag{2}$$

其中， T_d 为能量持时， T_2 表示 75%能量对应的时间， T_1 表示 5%能量对应的时间， $I(T)$ 为到 T 时刻累积的能量占总能量比值， T_{all} 为地震动总记录时长， $a(t)$ 为 t 时刻的地震加速度幅值。

4) 均方根持时。如果将地震动加速度时程看作平稳随机过程，该平稳过程的均方根为 A_{rms} ，持续时间为 T_d ，则满足关系式[9]:

$$\int_0^{T_d} a^2(t) dt = A_{rms}^2 T_d \tag{3}$$

5) 二阶距持时。该定义由谢礼立、周雍年提出[10]，该方法记加速度平方图全部面积的重心坐标为 T_c ，则一般来说(多次地震事件例外)在 T_c 附近的那个时段应该是地震动时程中震动比较强烈的部分，即主震段或强震段。而平方加速度图上能量分布的二阶距，通过假定在时间 T_d 内加速度峰值出现的平均概率为一次，即可确定持时。

$$T_d = \left| \frac{\int_0^T (t - T_c)^2 a^2(t) dt}{\int_0^T a^2(t) dt} \right|^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

$$T_c = \left(\int_0^T t a^2(t) dt \right) / \int_0^T a^2(t) dt \tag{5}$$

式中， T_d 反映地震动能量相对其重心的一个分布特征，同时也反映地震动强震集中或分散的程度，亦即反映地震动持时的特征。据此谢、周定义以 T_c 为中心两倍 T_d 为地震动持时，简称二阶距持时[10] T_{xz} ，即:

$$T_{xz} = 2T_d \tag{6}$$

3. 汶川地震地震动持时统计分析

汶川 8.0 级地震引起的地震动强度很大，波及范围很广，地震波传播至山西、河北、河南、北京等

地区的自由场地时峰值加速度仍大于 10 cm/s^2 ，远至福建、山东、江苏、上海等地区的多个台站仍记录到了加速度时程波形。在中国数字强震动观测网络(见图 1 [11])的 478 个台站的加速度记录中，最大水平向峰值加速度为 957.7 cm/s^2 ，最大竖向峰值加速度为 948.1 cm/s^2 ；单分量峰值加速度大于 90 cm/s^2 的有 127 条，大于 10 cm/s^2 的有 375 条[1]。本文统计了汶川地震中的 450 个台站共 1349 条地震动加速度记录，分别利用上述定义的 0.05 g 绝对持时、70%能量持时、90%能量持时、0.35 A_{\max} 相对持时和二阶距持时，计算了汶川地震的地震动持时，并进行了分组，其结果如表 1 所示。

5.12汶川地震记录台站分布图

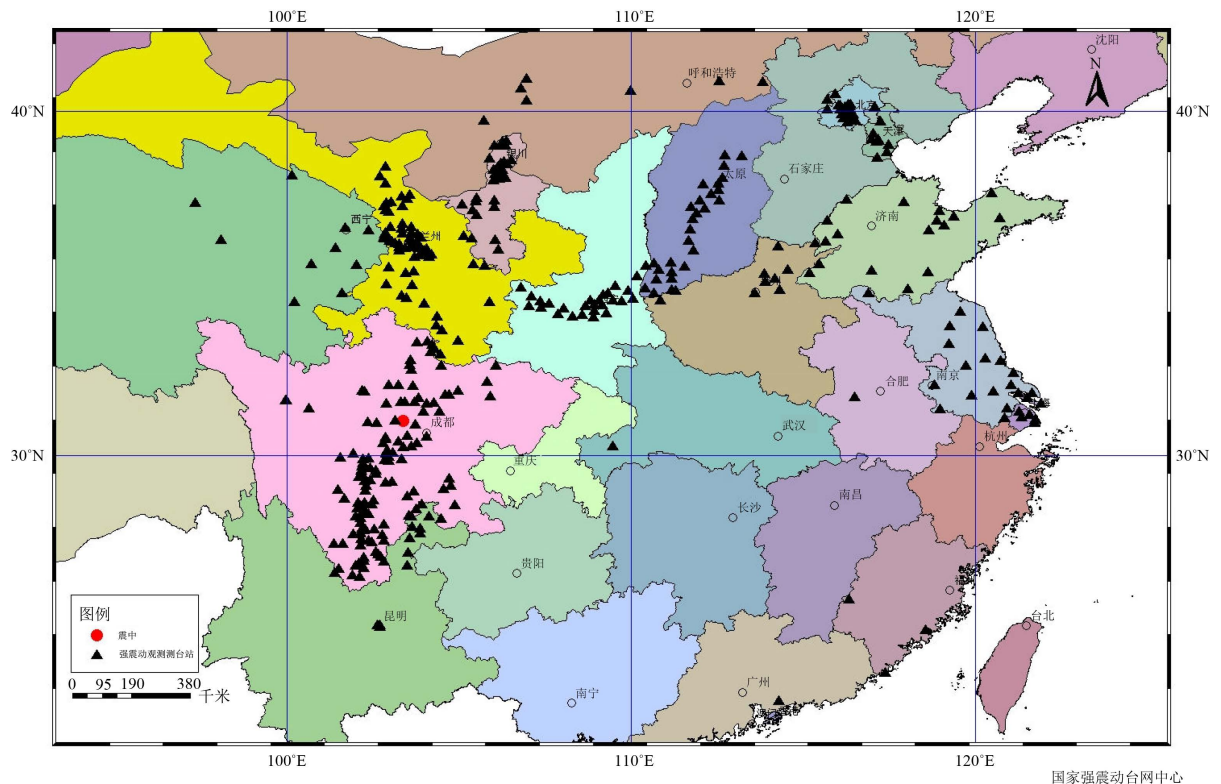


Figure 1. Distribution of Wenchuan earthquake stations (from China earthquake administration)

图 1. 汶川地震主震记录台站分布图

Table 1. Statistical results of ground motion duration with five definitions in the Wenchuan earthquake

表 1. 汶川地震中五种定义下地震动持时的统计结果

持时类型	小于 50 s	50~100 s	大于 100 s
70%能量持时	1089	233	28
90%能量持时	426	662	262
0.05 g 绝对持时	1278	62	10
0.35 A_{\max} 持时	385	599	366
二阶距持时	621	642	87

从表 1 首先可以看出与以往地震动持续时间仅为几秒到几十秒不同，此次汶川地震动记录的典型特征为持时较长，以 90%能量持时为例，持时大于 50 s 的有 924 条，大于 100 s 的有 262 条。这主要是由

于汶川地震的震源较浅，破裂长度达两百多公里，因此其地震动持时较以往地震长许多。从表 1 还可以看出，不同定义下持时的统计结果存在着明显的差别。在小于 50 s 的统计中，0.05 g 绝对持时定义下的样本最多，而在 50~100 s 持时统计结果中 95% 能量相对持时与二阶矩持时统计结果相当，其记录样本数约为 0.05 g 绝对持时的 10 倍。而对于大于 100 s 的持时中 0.05 g 绝对持时样本数最少，0.35 Amax 持时的样本数最多。

从上述的分析可以看出同一组实验记录，在不同持时定义下计算结果存在明显的差别，因此在研究地震动作用下结构地震反应的模拟中考虑地震动持时影响时必须针对相同持时定义的持时影响，不同定义下的持时无可比性。

4. 地震动持时的方向特性

以汶川地震中所获得的加速度记录为基础数据，对位于断层附近强震动台站所获得的地震动持时进行了统计。以微观震中为参考点，沿断层走向分为破裂前方和破裂后方两组地震动，分别选择了 7 个破裂前方和 6 个破裂后方的地震加速度记录，进行了断层方向性效应对地震动持时的影响研究，其中台站、距离及其不同定义下的地震动持时结果分别如表 2 和表 3 所示，距离 L 取值示意图见图 2，为震中距在断层破裂方向的投影。

每个台站地震动记录分别有南北向(NS)、东西向(EW)、竖向(UD)三个方向，由于水平向地震动对结构的影响较大，以下仅就各台站的 EW 方向地震动记录进行了统计分析。

在破裂前方地震动持时统计分析中，利用上述五种地震动持时的定义方法，对 7 个台站的加速度记录进行了计算，结果如表 2 和图 3 所示。在破裂后方地震动持时统计分析中，共统计 6 个台站的加速度记录，计算结果如表 3 和图 4 所示。

Table 2. Statistical results of ground motion duration in EW direction at forward rupture

表 2. 断层破裂前方 EW 方向地震动持时统计结果

记录点	场地类别	距离(km)	70%能力持时(s)	90%能力持时(s)	0.05 g 绝对持时(s)	0.35 Amax 持时(s)	二阶矩持时(s)
郫县走石	ROCK	35	15.69	30.03	28.20	32.34	28.91
什邡八角	SOIL	64	16.24	45.59	132.54	47.95	47.78
安县塔水	SOIL	110	18.81	40.85	94.98	30.34	39.59
茂县叠溪	SOIL	117	23.04	66.72	100.73	35.31	54.31
江油地震	SOIL	154	13.64	54.08	88.29	65.05	39.44
江油重华	SOIL	181	12.62	31.78	46.57	32.35	29.54
平武木座	SOIL	208	22.64	40.97	63.11	44.23	35.71

Table 3. Statistical results of ground motion duration in EW direction at backward rupture

表 3. 破裂后方 EW 方向地震动持时统计结果

记录点	场地类别	距离(km)	70%能力持时(s)	90%能力持时(s)	0.05 g 绝对持时(s)	0.35 Amax 持时(s)	二阶矩持时(s)
汶川卧龙	ROCK	21	6.57	25.09	125.83	23.95	33.69
大邑银屏	SOIL	48	43.84	71.25	78.93	79.55	57.71
邛崃油榨	SOIL	83	36.96	71.47	80.56	77.22	58.25
宝兴民治	SOIL	71	42.70	77.71	80.92	80.78	64.50
泸定水厂	SOIL	160	35.75	78.02	0.0	88.02	63.17
康定	SOIL	172	35.44	78.45	0.0	94.61	63.83

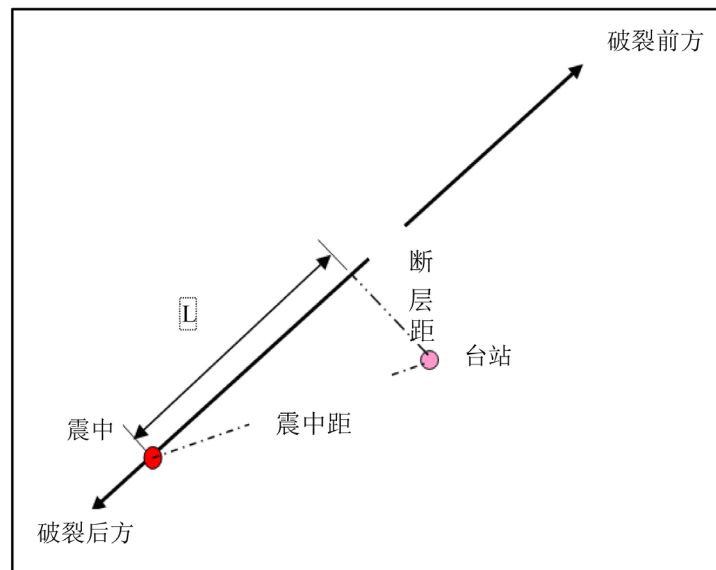


Figure 2. Diagram of distance L

图 2. 距离 L 取值示意图

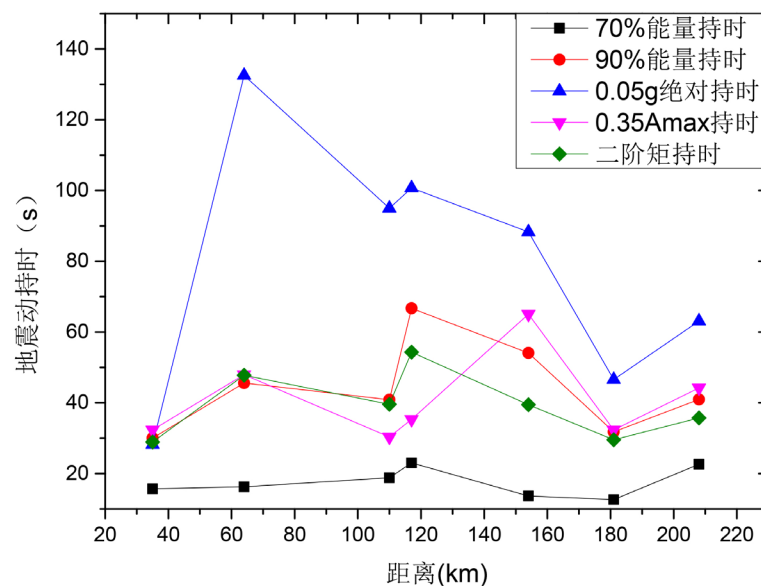


Figure 3. Comparisons of EW direction ground motion duration with distance at forward rupture

图 3. 断层破裂前方 EW 方向地震动持时随距离的变化比较图

为了更清楚的比较断层破裂前后地震动持时的变化,沿断层走向选取 21 个台站的 EW 向加速度记录按照 90%能量持时定义计算了地震动持时,结果见图 5。综合比较图 3~图 5 断层破裂前后持时随距离的变化,可以得到如下特征:

- 1) 不同的定义方法获得的地震动持时结果存在较大差异,一般而言 70%能量持时计算获得的结果最小,而 0.05 g 绝对持时方法计算的持时较大,其他三种定义方法获得的持时变化规律基本一致。
- 2) 在相近的距离条件下,破裂后方的持时明显大于破裂前方,这是由断层破裂的方向性效应引起的。
- 3) 断层破裂前方,持时随距离无明显变化规律,如图 3 所示;而断层破裂的后方,除 0.05 g 绝对持时方法外,其他四种方法计算的地震动持时随距离增加而不断增加,在超过大约 80 km 后趋向于稳定。

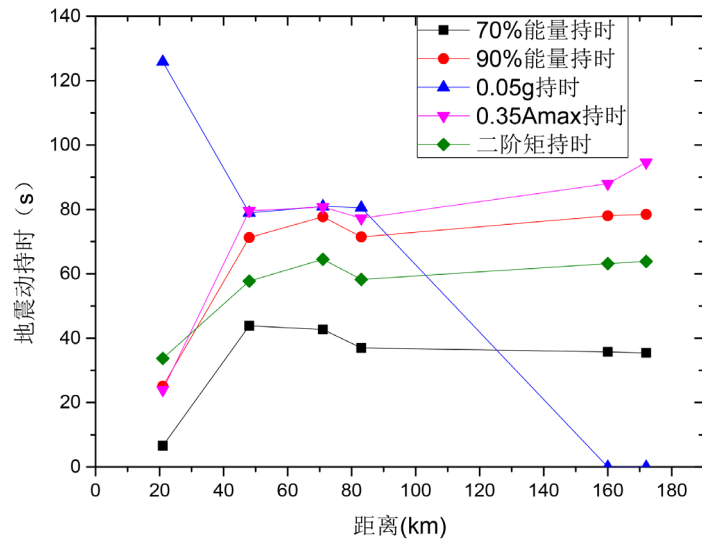


Figure 4. Comparisons of EW direction ground motion duration with distance at backward rupture
图 4. 断层破裂后方 EW 方向地震动持时随距离的变化比较图

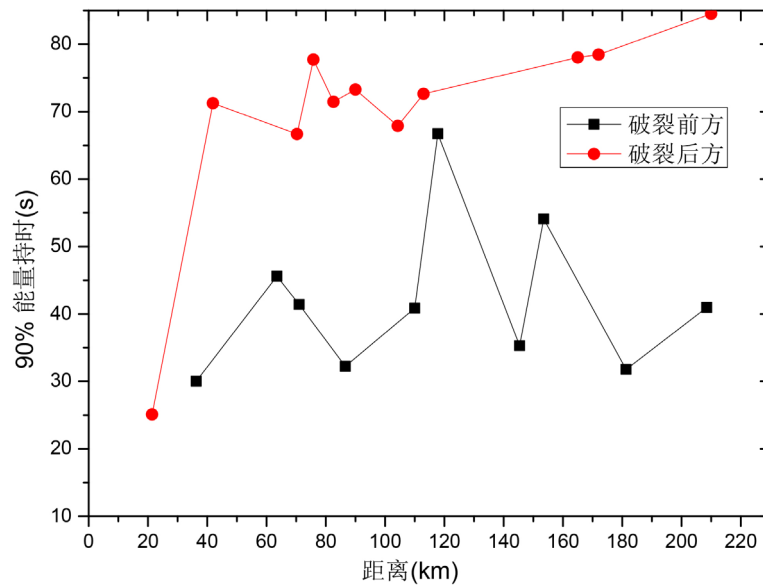


Figure 5. Comparisons of ground motion duration with distance in EW direction at forward and backward rupture
图 5. 断层破裂前方与后方 EW 方向地震动持时随距离的变化比较图

4) 在图 4 中, 0.05 g 绝对持时在距离超过 160 km 的泸定水厂与康定均获得了地震动持时为 0 s 的结果, 而实际上两地均在汶川地震中遭受了震害, 因此, 0.05 g 绝对持时方法在本实例中给出的结果明显不合理。

5. 结束语

本文在简述了地震动持时的几种定义之后, 利用中国数字强震动台网记录的汶川地震强震动加速度记录, 获得了不同定义下地震动持时的统计结果, 显示不同持时定义下的计算结果存在明显的差别, 分析了地震动持时的方向性分布特征, 结果表明, 破裂前方的地震动持时无明显变化规律, 而破裂后方的持时随距离增加而不断增加, 且破裂前方的持时明显小于破裂后方的持时。本文统计得到的地震动持时

特征可为未来研究地震动持时对结构地震响应影响及结构抗震设计如何考虑地震动持时特征提供参考。

致 谢

本文数据来源于中国地震局工程力学研究所,工力所的同志为本文工作提供了无私帮助与有益探讨,作者对此深表感谢!

参考文献

- [1] 李小军,周正华,于海英,等.汶川 8.0 级地震强震动观测及记录初步分析[C]//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告,2008: 1-6.
- [2] 周正华,温瑞智,王玉石,等.地震宏观震害调查的几点建议[J].震灾防御技术,2008,3(3): 266-270.
- [3] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专家组,北京交通大学土木工程结构专家组,等.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4): 1-9.
- [4] 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等.汶川 Ms 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J].地震地质,2008,30(3): 597-630.
- [5] 卢书楠,翟长海,谢礼立.汶川地震中强震持时的特征研究[J].地震工程与工程振动,2013,33(2): 1000-1301.
- [6] 滕吉文,白登海,杨辉,等.2008 汶川 Ms 8.0 地震发生的深层过程和动力学响应[J].地球物理学报,2008,51(5): 1385-1402.
- [7] Bolt, B.A. (1973) Duration of Strong Ground Motion. *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, 6, 1304-1313.
- [8] Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975) A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, 581-626.
- [9] 谢礼立,张晓志.地震动记录持时与工程持时[J].地震工程与工程振动,1988,8(1): 31-38.
- [10] 谢礼立,周雍年.一个新的地震动持续时间定义[J].地震工程与工程振动,1984,4(2): 27-35.
- [11] 于海英,王栋,杨永强,等.汶川 8.0 级地震强震动加速度记录的初步分析[J].地震工程与工程振动,2009,29(1): 1-13.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org