



近断层地震动加速度峰值比和脉冲特征的统计分析

张尚荣 何佳蔓 唐响 熊洋

Statistical analysis of near-fault ground motion acceleration peak ratio and pulse characteristics

Zhang Shangrong, He Jiaman, Tang Xiang, Xiong Yang

引用本文:

张尚荣, 何佳蔓, 唐响, 熊洋. 2024. 近断层地震动加速度峰值比和脉冲特征的统计分析. 地震学报[J], 46(6): 1051–1062. DOI: 10.11939/jass.20240001

Zhang S R, He J M, Tang X, Xiong Y. 2024. Statistical analysis of near-fault ground motion acceleration peak ratio and pulse characteristics. *Acta Seismologica Sinica*[J], 46(6): 1051–1062. DOI: 10.11939/jass.20240001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20240001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整

Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion
地震学报. 2020, 42(4): 471–481 <https://doi.org/10.11939/jass.20190155>

基于希尔伯特–黄变换的近断层地震动脉冲特性研究

Characteristics of pulses in near-fault ground motion based on Hilbert–Huang transform
地震学报. 2022, 44(5): 824–844 <https://doi.org/10.11939/jass.20220090>

近断层速度脉冲型地震动相关问题研究

Review on issues of near-fault velocity pulse-like ground motions
地震学报. 2022, 44(5): 765–782 <https://doi.org/10.11939/jass.20220141>

近断层地震动脉冲特性对设备–结构耦合隔震体系响应的影响

Effect of pulse characteristics of near-fault ground motions on the response of equipment–structure coupled isolation system
地震学报. 2022, 44(5): 891–902 <https://doi.org/10.11939/jass.20220129>

NGA-West2地震动预测模型对速度脉冲型地震动各分量的适用性

Applicability of the Next Generation Attenuation–West2 ground–motion models to the components of near-fault velocity pulse-like ground motions
地震学报. 2023, 45(2): 356–372 <https://doi.org/10.11939/jass.20210176>

地震动峰值特征参数对土坡地震响应的规律研究

Regularity research on the seismic response of characteristic parameters for ground motion peak to soil slope
地震学报. 2021, 43(4): 498–507 <https://doi.org/10.11939/jass.20200149>

张尚荣, 何佳蔓, 唐响, 熊洋. 2024. 近断层地震动加速度峰值比和脉冲特征的统计分析. 地震学报, 46(6): 1051–1062. doi: [10.11939/jass.20240001](https://doi.org/10.11939/jass.20240001).
Zhang S R, He J M, Tang X, Xiong Y. 2024. Statistical analysis of near-fault ground motion acceleration peak ratio and pulse characteristics. *Acta Seismologica Sinica*, 46(6): 1051–1062. doi: [10.11939/jass.20240001](https://doi.org/10.11939/jass.20240001).

近断层地震动加速度峰值比和脉冲特征的统计分析^{*}

张尚荣 何佳蔓[†] 唐 响 熊 洋

(中国银川 750021 宁夏大学土木与水利工程学院)

摘要 为进一步了解近断层地震动的显著竖向特性和速度脉冲特性, 基于 NGA-West2 强地面运动数据库选取 1 706 组强地震动记录, 研究了竖向与水平向加速度峰值比 a_V/a_H 的总体分布特征, 并探讨了 a_V/a_H 随矩震级 M_W 、断层距 R_{jb} 、场地类别和断层类型变化的规律。在此基础上, 通过 Baker 脉冲识别方法选取 140 组近断层速度脉冲地震动, 并提取出每条地震动记录的脉冲周期 T_p 和速度脉冲峰值 PGV_p, 研究其脉冲参数随矩震级 M_W 和断层距 R_{jb} 变化的统计规律及经验模型。结果表明: 近断层加速度峰值比 a_V/a_H 与地震动参数密切相关, 其概率分布呈极值 II 型分布; 脉冲周期 T_p 随矩震级的增大而增大, 与场地条件的相关性较弱, 脉冲周期 T_p 经验模型与 Shahi 和 Baker 模型在大震级范围内的差异小, 且差异随矩震级的增大而减小, 说明可忽略是否区分脉冲类型对脉冲周期随矩震级的定量关系的影响; 速度脉冲峰值 PGV_p 的大幅值主要出现在大震区和毗邻发震断层区域。

关键词 近断层 竖向地震动 加速度峰值比 脉冲参数 地震动参数

doi: [10.11939/jass.20240001](https://doi.org/10.11939/jass.20240001) **中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

Statistical analysis of near-fault ground motion acceleration peak ratio and pulse characteristics

Zhang Shangrong He Jiaman[†] Tang Xiang Xiong Yang

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To further understand the significant vertical characteristics and velocity pulse characteristics of near-fault ground motions, a comprehensive study was conducted using 1 706 sets of strong ground motion records selected from the NGA-West2 database. This study aimed to investigate the overall distribution patterns of the vertical-to-horizontal acceleration peak ratio, designated as a_V/a_H , and to explore how this ratio varies with various ground motion parameters such as moment magnitude M_W , fault distance R_{jb} , site type, and fault type. Additionally,

* 基金项目 国家自然科学基金(52268033)和宁夏自然科学基金优秀青年项目(2021AAC05003)共同资助。

收稿日期 2024-01-04 收到初稿, 2024-04-07 决定采用修改稿。

作者简介 张尚荣, 博士, 副教授, 主要从事结构减震控制研究, e-mail:

sr_zhang@nxu.edu.cn; ^{*}通信作者: 何佳蔓, 在读硕士研究生, 主要从事强地面运动特性和结构抗震研究. e-mail: hjm06062022@163.com



the study employed the multi-component velocity pulse identification method to obtain crucial pulse parameters, including the pulse period (T_p) and velocity pulse peak (PGV_p), for 140 groups of near-fault velocity pulse ground motions. The statistical patterns and empirical models were then established to assess the relationship between these pulse parameters and the moment magnitude, as well as the fault distance. The results revealed several intriguing insights. Firstly, it was observed that the near-fault acceleration peak ratio a_V/a_H exhibits a strong correlation with ground motion parameters. The probability distribution of a_V/a_H follows Frechet distribution, indicating that the occurrence of high a_V/a_H ratios is not random but rather follows a specific pattern. This finding indicates that the vertical characteristics of ground motion may be significant in the near-fault regions, especially under certain seismic conditions. In addition, it is also found that the a_V/a_H ratio tends to increase with moment magnitude increasing and fault distance decreasing, indicating that the ground motion with larger vertical acceleration is more likely to occur. Additionally, the study also observed that smaller equivalent shear wave velocities v_{S30} and fault types such as strike-slip and reverse faults are associated with a higher likelihood of generating larger a_V/a_H ratios. These findings highlight the importance of considering vertical ground motion in seismic hazard assessments and earthquake engineering design, especially in areas with these specific ground motion characteristics. The study also focused on the pulse characteristics of near-fault ground motions. The analysis revealed that the pulse period increases with moment magnitude increasing, while the correlation with site conditions is relatively weak. This suggests that the pulse period is primarily influenced by the magnitude of the earthquake rather than local site conditions. Furthermore, a comparison of the empirical model of pulse period with the model proposed by Shahi and Baker revealed that the two models exhibit minimal differences in the range of large magnitudes. More importantly, the difference between the two models decreases as the moment magnitude increases, indicating that whether or not to distinguish between different pulse types has a negligible impact on the quantitative relationship between pulse period and moment magnitude. This finding suggests that the empirical model for pulse period can be reliably used to predict pulse periods in near-fault regions, regardless of the specific pulse type. Finally, the study found that the largest amplitudes of velocity pulse peaks primarily appear in regions with high magnitude earthquakes and in proximity to the seismogenic fault. This observation underscores the significance of vertical ground motion in these areas, particularly during large earthquakes. It also highlights the need for enhancing seismic hazard assessments and engineering designs that specifically address the vertical component of ground motion in these high-risk regions. In summary, this comprehensive study provides valuable insights into the significant vertical and pulse characteristics of near-fault ground motion. The findings emphasize the importance of considering earthquake magnitude, fault distance, site conditions, and fault type in assessing the potential for extreme vertical ground motion and quantifying the key parameters of near-fault velocity pulses. These results not only enrich our understanding of the complex behavior of near-fault ground motion, but also provide essential guidance for earthquake engineers and researchers in refining seismic hazard assessments, designing earthquake-resistant structures, and developing effective risk mitigation strategies. The study underscores the necessity of incorporating these nuanced ground motion characteristics into future seismic design codes and guidelines so as to ensure the safety and recoverability of the near-fault area.

Key words: near-fault; vertical ground motion; acceleration peak ratio; pulse parameters;

ground motion parameters

引言

相较于远场地震动,近断层地震动具有显著竖向特性、速度脉冲特性和上盘效应等特征。近断层区域通常以某一断层距界限值来划分,迄今针对这一界限值并无统一标准,但通常采用断层距不超过20—60 km的范围开展近断层地面运动的研究(贾俊峰等,2015),本文的近断层地震动定义为断层距不超过40 km的地面运动。开展近断层地震动特征研究有助于了解结构的失效破坏机理,同时为近断层区域的隔震设计提供依据。

在1995年日本神户、1994年我国台湾集集和2008年我国汶川等地震期间记录到大量强竖向地震动,尤其在这些地震的极震区部分竖向地震动强度均超过水平向地震动,因此竖向地震动造成的损害不容小觑。我国建筑设计抗震规范(中国建筑科学研究院,2010)明确规定针对大跨度空间结构需要考虑竖向地震作用的影响,通常将其取为水平向地震作用的65%,但这一规定是基于大量远场地震动获得。赵培培等(2019)认为加速度峰值比 a_V/a_H 与震级和震源距离有关, a_V/a_H 大多超过规范值0.65,甚至达到或超过1.竖向与水平向地震动加速度反应谱比在谱的各个周期段内不是一个简单的常数,而与震级、断层距、场地类别等因素相关(周正华等,2003;韩建平,周伟,2012;李宁等,2020)。Gülerce和Abrahamson(2011)以及王晓磊等(2023)通过分析水平与竖向地震动强度参数的相关程度,给出了竖向与水平向加速度反应谱比的预测方程。现阶段研究人员分别基于小波分析方法、能量方法和希尔伯特(Hilbert)-黄变换方法提出多种速度脉冲识别方法,并针对脉冲参数与地震动参数的统计关系提出了经验模型(Baker, 2007; Zhai et al., 2013; Shahi, Baker, 2014; Chang et al., 2016; 王东升等, 2022),其中,小波分析方法使用最多,本文将采用Shahi和Baker(2014)提出的最强速度脉冲识别方法。

鉴于目前的研究,本文拟以NGA-West2强地面运动数据库中的171个地震事件的1706组近断层地震动为研究对象,探讨 a_V/a_H 的总体分布特征,对 a_V/a_H 随矩震级、断层距、场地类别和断层类型的变化进行量化分析,并基于小波方法获得140组脉冲型地震动的脉冲周期 T_p 和速度脉冲峰值PGVp研究脉冲参数随矩震级和断层距的变化规律,以进一步了解近断层地震动的脉冲特性。

1 地震动记录选取

本文地震动记录均选自NGA-West2强地面运动数据库(<http://ngawest2.berkeley.edu/>),选取原则为矩震级 $M_W \geq 5.0$ 、断层距 $R_{jb} \leq 40$ km且均含有一条竖向分量和两条水平向分量,最终共选取出1706组5118条地震动记录。这些记录均选自2011年以前的地震观测数据,主要覆盖了美国、日本、中国台湾等地震多发国家和地区,其中每条记录的水平向地震记录和竖向地震记录的峰值加速度(peak ground acceleration, 缩写为PGA)分布情况如图1所示,图中的“出现概率”定义为不同峰值加速度区段内的地震动记录数量占总数量(1706组)的比例。

我国建筑设计抗震规范(中国建筑科学研究院,2010)中的四种场地类别是以地表以下20 m场地覆盖土层等效剪切波速 v_{S20} 和土层厚度双指标划分,从NGA-West2数据库获取的台站记录的场地条件是以地表以下30 m内的等效剪切波速 v_{S30} 来表示。通过公式实现 v_{S30} 与我国抗震规范对应的场地类别的转换(温瑞智等,2021),结果见表1。需要说明的是,由于

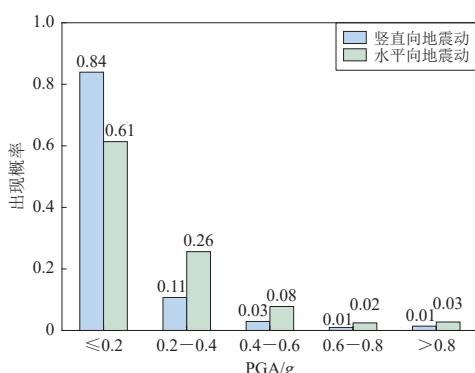


图 1 水平向、竖向地震动峰值加速度的分布
Fig. 1 Distribution of horizontal and vertical PGA

趋势, 依据表 2 绘制加速度峰值比的直方图, 如图 3 所示。可见: a_V/a_H 的最小值位于 $(0, 0.2]$, 最大值位于 $(1.8, 4.4]$, 平均值为 0.584, 标准差为 0.334, 变异系数为 0.573, 变异系数中等偏大说明 a_V/a_H 的离散程度较大, 原因可能是统计样本中超过均值的 a_V/a_H 值至少占 39.2%, 存在 12 组 a_V/a_H 大于 2.0 的数据, 且最大值高达 4.22, 显著提高了样本的标准差, 进而影响变异

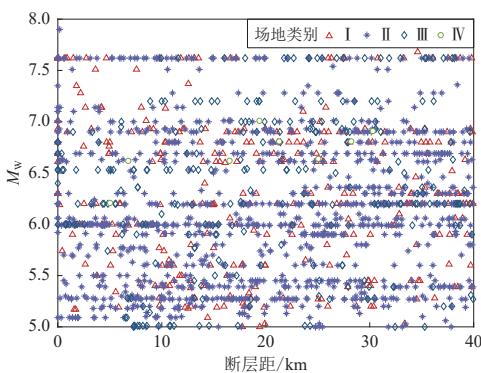


图 2 不同场地类别下 M_W 随断层距的变化
Fig. 2 Variation of seismic moment magnitude M_W with fault distance under four classes of sites

I_0 类场地样本数量过少, 仅有 30 组, 为确保统计分析的准确性和可靠性, 本文将 I_0 和 I_1 类场地合并为 I 类场地。不同场地类别下对应的矩震级和断层距分布如图 2 所示。

本文规定加速度峰值比 a_V/a_H 为同一台站竖向分量的峰值加速度与两条水平向分量的峰值加速度的较大值之比。将 a_V/a_H 的 1706 组地震动记录以 0.2 间隔划分为 22 个区间, 由于 $a_V/a_H > 1.8$ 的区间样本数量较少, 故将其合并为 1 个区间, 最终得到 10 个区间, a_V/a_H 的区间划分及相应的出现频数列于表 2。为了更直观地观察 a_V/a_H 的分布

表 1 我国建筑抗震设计规范场地类别与 NGA-West2 中 v_{S30} 的对应关系

Table 1 The corresponding relationship between standard site categories in the code for seismic design of building China and v_{S30} in NGA-West2

场地类别	$v_{S30}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
IV	<160
III	160~260
II	260~550
I (I_0, I_1)	>550

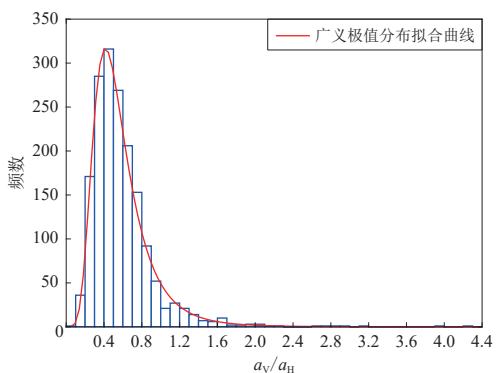


图 3 加速度峰值比 a_V/a_H 的频数分布直方图
Fig. 3 Frequency distribution histogram of acceleration peak ratio a_V/a_H

表 2 加速度峰值比 a_V/a_H 的区间划分及频数分布表
Table 2 Interval division and frequency distribution of acceleration peak ratio a_V/a_H

区间	(0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]	(1.0, 1.2]	(1.2, 1.4]	(1.4, 1.6]	(1.6, 1.8]	(1.8, 4.4]
频数	37	456	585	359	144	48	35	13	12	17

系数。 a_V/a_H 的频数分布呈左陡右缓, 近似广义极值分布, 计算得到的分布参数为: 形状参数 $\xi=0.1398$, 位置参数 $\mu=0.4394$, 尺度参数 $\sigma=0.1942$. 由于 $\xi=0.1398>0$, 可知 a_V/a_H 的总体分布趋向于极值 II 型分布, 亦称为 Frechet 分布.

加速度峰值比 a_V/a_H 的累积分布概率曲线如图 4 和表 3 所示, 可以看出 a_V/a_H 超越 0.65 的概率约为 30%, 超越 1.0 的概率约为 7%. 从累积概率来看, 计算竖向地震作用时简单地取为水平向地震作用的 0.65 倍, 可能偏保守, 故考虑近断层效应分析加速度峰值比 a_V/a_H 十分有必要.

表 3 加速度峰值比 a_V/a_H 的累积分布概率Table 3 Cumulative distribution probability of acceleration peak ratio a_V/a_H

a_V/a_H	≤ 0.2	≤ 0.4	≤ 0.65	≤ 0.8	≤ 1.0	≤ 1.2	≤ 1.6	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 4.4
累积概率	2.2%	28.9%	69.9%	84.2%	92.7%	95.5%	98.3%	99.4%	99.8%	100%

2 加速度峰值比 a_V/a_H 的统计分析

2.1 矩震级 M_W 的影响

加速度峰值比 a_V/a_H 随矩震级 M_W 的分布情况如图 5 和表 4 所示. 可见: 统计样本中的地震动记录主要集中于 $M_W 5.0\sim 6.0$ 和 $M_W 6.0\sim 7.0$ 内, $M_W 7.0\sim 8.0$ 范围内获取的地震动记录数量最少; a_V/a_H 最大值高达 4.22, 落于 $M_W 6.0\sim 7.0$ 区间; 尽管 a_V/a_H 的最大值位于

$M_W 6.0\sim 7.0$ 区间, 但 $M_W 7.0\sim 8.0$ 区间内 a_V/a_H 的平均值及超越 0.65 的概率均高于 $M_W 5.0\sim 6.0$ 和 $M_W 6.0\sim 7.0$ 范围内的相应数值; $M_W 7.0\sim 8.0$ 范围内的平均值最高, 其均值略大于规范的比值 0.65, 且最大值未出现在此区间, 原因可能是地震记录较少; 变异系数的大小同时受平均数和标准差的影响, $M_W 5.0\sim 6.0$ 区间内 a_V/a_H 的标准差和变异系数均最小, 说明此区间内 a_V/a_H 的离散程度最小, 比值相对集中. 经统计分析, 随着矩震级的增大, 加速度峰值比 a_V/a_H 超越 0.65 的概率也随之增加, 而 a_V/a_H 最大值随矩震级的变化规律不明显.

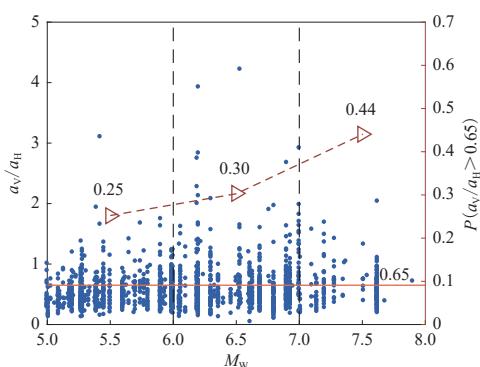
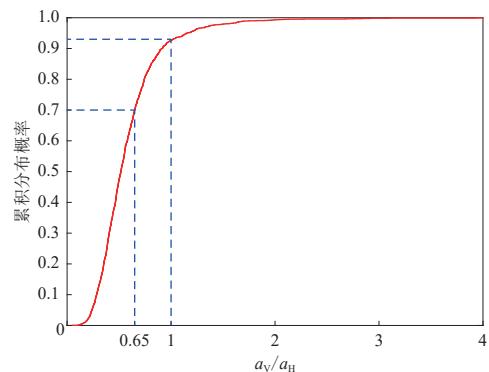
图 5 加速度峰值比 a_V/a_H 随 M_W 的分布Fig. 5 Distribution of acceleration peak ratio a_V/a_H with M_W 图 4 加速度峰值比 a_V/a_H 的累积分布概率曲线Fig. 4 Cumulative distribution probability curve of acceleration peak ratio a_V/a_H

表 4 不同矩震级 M_W 范围内加速度峰值比 a_V/a_H 的统计特征参数Table 4 Statistical characteristic parameters of ground acceleration peak ratio a_V/a_H within different moment magnitude ranges

M_W	地震动记录数	a_V/a_H 最大值	a_V/a_H 平均值	a_V/a_H 标准差	a_V/a_H 变异系数	$P(a_V/a_H > 0.65)$
5.0—6.0	695	3.10	0.54	0.26	0.48	0.25
6.0—7.0	784	4.22	0.60	0.37	0.63	0.30
7.0—8.0	227	2.92	0.67	0.37	0.55	0.44

2.2 场地条件的影响

加速度峰值比 a_V/a_H 随场地类别的分布如图 6 和表 5 所示。不同场地类别下的地震动记录分布不均匀，其中Ⅱ类场地记录数量居多，Ⅳ类场地记录数量最少。Ⅲ类和Ⅳ类场地的平均值均在规范值 0.65 之上，最大值出现在Ⅲ类场地，平均值和超越 0.65 的概率最大值出现在Ⅳ类场地，而Ⅳ类场地的最大值偏小，可能是地震记录数量较少造成的。随着等效剪切波速 v_{S30} 的增加， a_V/a_H 的最大值、平均值及超越 0.65 的概率呈现下降趋势； a_V/a_H 集中在等效剪切波速 v_{S30} 较小区域的可能性相对较高。结合图 6 可知，等效剪切波速 v_{S30} 越小，场地土越软，超越 0.65 的概率越大，越容易发生 a_V/a_H 较大的地震动。

2.3 断层距的影响

加速度峰值比 a_V/a_H 随断层距的分布如图 7 和表 6 所示。为了突出更近断层的影响，本文将断层距划分为 0—5 km, 5—15 km, 15—25 km 和 25—40 km 等四个区间。加速度峰值比 a_V/a_H 的最大值、平均数、标准差、变异系数以及 a_V/a_H 超越 0.65 的概率最大值均出现在断层距 0—5 km 区间内。根据标准差和变异系数的变化趋势， a_V/a_H 的离散程度随断层距的增大而

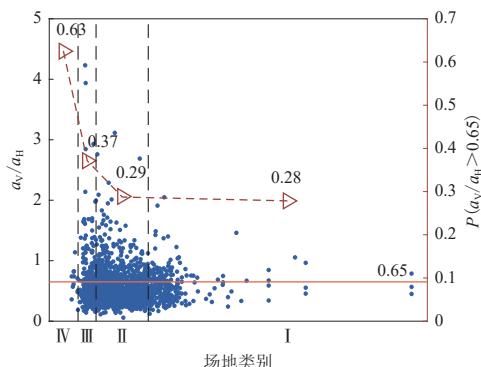
图 6 加速度峰值比 a_V/a_H 随场地类别的分布

Fig. 6 Distribution of acceleration peak ratio a_V/a_H with site category

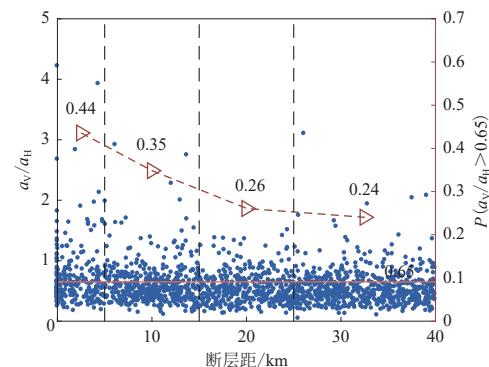
图 7 加速度峰值比 a_V/a_H 随断层距的分布

Fig. 7 Distribution of acceleration peak ratio a_V/a_H with fault distance

表 5 不同场地类别下加速度峰值比 a_V/a_H 的统计特征参数Table 5 Statistical characteristic parameters of peak acceleration ratio a_V/a_H under different site categories

场地类别	地震动记录数	a_V/a_H 最大值	a_V/a_H 平均值	a_V/a_H 标准差	a_V/a_H 变异系数	$P(a_V/a_H > 0.65)$
I ($v_{S30} > 550$ m/s)	316	2.04	0.55	0.25	0.46	0.28
II ($v_{S30} = 260$ — 550 m/s)	1129	3.10	0.57	0.30	0.53	0.29
III ($v_{S30} = 160$ — 260 m/s)	253	4.22	0.67	0.51	0.75	0.37
IV ($v_{S30} < 160$ m/s)	8	1.13	0.71	0.23	0.32	0.63

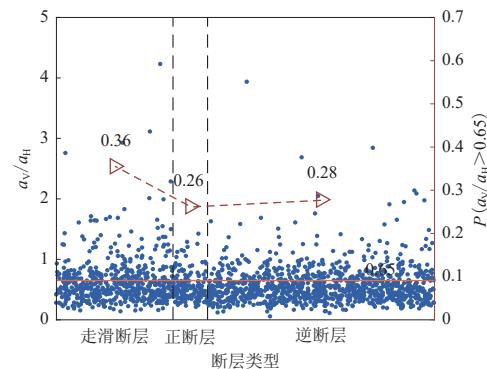
表 6 不同断层距下加速度峰值比 a_V/a_H 的统计特征参数Table 6 Statistical characteristic parameters of acceleration peak ratio a_V/a_H with different fault distances

断层距/km	地震动记录数	a_V/a_H 最大值	a_V/a_H 平均值	a_V/a_H 标准差	a_V/a_H 变异系数	$P(a_V/a_H > 0.65)$
0—5	241	4.22	0.72	0.51	0.70	0.44
5—15	442	2.92	0.61	0.33	0.54	0.35
15—25	395	1.51	0.54	0.25	0.46	0.26
25—40	628	3.10	0.54	0.28	0.52	0.24

降低。因此，随着断层距的增大， a_V/a_H 超越 0.65 的概率逐渐减小，表明距离发震断层越近，越容易出现竖向加速度较大的地震动。

2.4 断层类型的影响

在发震断层区域，断层类型与地震动特征的关系也十分密切。NGA-West2 数据库将台站记录根据断层类型分成五类：走滑断层、正断层、逆断层、逆断层-斜滑断层和正断层-斜滑断层。本文选取的 1706 组地震动记录中，正断层-斜滑断层样本非常少，仅有 25 组，统计代表性偏弱，故将正断层-斜滑断层归类为正断层、将逆断层-斜滑断层归类为逆断层进行分析。加速度峰值比 a_V/a_H 随断层类型的分布如图 8 和表 7 所示，可见：走滑断层、正断层、逆断层的地震动分布不均匀，正断层的记录数量最少，且超越概率最小，说明在三种断层类型中，出现正断层地震动的 a_V/a_H 偏小的可能性较大； a_V/a_H 的最大值、平均值、标准差、变异系数以及 a_V/a_H 超越 0.65 的概率最大值均出现在走滑断层的分布区域，逆断层的各项参数值仅次之。综上表明，竖向与水平地震动加速度峰值比的较大值易出现在走滑断层和逆断层，这两种断层的潜在发生区域应重视工程结构的竖向地震作用。

图 8 加速度峰值比 a_V/a_H 随断层类型的分布Fig. 8 Distribution of acceleration peak ratio a_V/a_H with fault type表 7 不同断层类型下加速度峰值比 a_V/a_H 的统计特征参数Table 7 Statistical characteristic parameters of acceleration peak ratio a_V/a_H for different types of faults

断层类型	地震动记录数	a_V/a_H 最大值	a_V/a_H 平均值	a_V/a_H 标准差	a_V/a_H 变异系数	$P(a_V/a_H > 0.65)$
走滑断层	526	4.22	0.63	0.40	0.63	0.36
正断层	156	1.41	0.56	0.23	0.42	0.26
逆断层	1024	3.93	0.56	0.31	0.55	0.28

3 近断层脉冲分析

近断层地震动的典型特性易使结构遭受严重损坏，特别是含前方向性效应的地震动在断层破裂速度接近土层剪切波速时，断裂传播方向的观测点会因为地震能量积累而产生显著的长周期脉冲。此外，含滑冲效应的速度脉冲还会伴随地面永久位移（赵晓芬，温增平，2022）。

过去多数学者以速度时程为依据，依靠视觉检查和经验来确定信号中是否包含脉冲成

分, 这种主观判断的方法被称为定性脉冲识别。半定量脉冲识别虽采用简化的脉冲模型来捕捉脉冲特性, 但仅仅运用数学模型的表征方法只能拟合重现脉冲波形, 实际运用仍需依靠眼观判别, 存在局限性(Alavi, Krawinkler, 2004; Dickinson, Gavin, 2011)。随着强震动记录的数量逐年增加, 识别工作量剧增, 定性、半定量脉冲识别方法的效率低下, 故更高效的定量识别方法应运而生。该方法多将速度脉冲分量的最大谱峰值 $S_{a,\max}$ 定义为最强速度脉冲分量, 但该方法难以全面反映速度脉冲的地震动特性, 且所选取的脉冲数量偏少(Chang et al., 2016; 王东升等, 2022)。Shahi 和 Baker (2014)提出最强速度脉冲的概念, 为最不利设计地震动参数提供了科学依据。本文拟采用基于连续小波变换的最强速度脉冲识别方法获取脉冲参数, 建立脉冲参数与地震动参数的经验模型, 以量化脉冲地震动所带来的危害和风险。

3.1 脉冲参数获取方法

连续小波变换能够在较小时频域内按照特定母小波分解信号, 这使得小波分析更适用于地震动分析。由于四阶 Daubechies 小波与地震脉冲信号的形状相似, 故将其作为母小波, 结合剩余小波提取地震动脉冲特征, 其余不具有明显特征的小波基系数则逐渐趋于 0。

连续小波变换参数通过下式计算, 即在特定位置 l 和尺度 s 对信号 $f(t)$ 进行积分求得。

$$c(s, l) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt, \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为小波母函数, t 为时间, s 为小波母函数的尺度参数, l 为平移小波母函数的位置参数。

小波系数大小可反映信号在时频域的能量集中程度。脉冲能量一般在小范围时频域内集中, 因此可通过这一属性识别脉冲。本文将地震动旋转至产生最大速度脉冲方向分量, 即将地震动的两条正交水平分量组合成任意方向的分量系数, 经过小波变换求得最大小波系数, 以脉冲因子 $PI > 0$ 为前提, 将最大小波系数对应的方向分量定义为最强速度脉冲方向分量。基本的计算步骤如下:

$$f(t, \theta) = f_1(t) \cos \theta + f_2(t) \sin \theta, \quad (2)$$

$$c(s, l, \theta) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t, \theta) \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt, \quad (3)$$

式中: $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 为地面运动的两条正交水平分量; $f(t, \theta)$ 为 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 线性组合得到的任意水平方向的速度分量。对 $f(t, \theta)$ 进行连续小波变换, 得到小波系数 $c(s, l, \theta)$ 。

将式(2)代入式(3), 可得

$$c(s, l, \theta) = c_1(s, l) \cos \theta + c_2(s, l) \sin \theta, \quad (4)$$

式中, $c_1(s, l)$ 和 $c_2(s, l)$ 为分别对应 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 方向上的小波系数。

确定任意方向上的小波系数的最大值 $c_{\max}(s, l)$ 及其对应的方向 β :

$$c_{\max}(s, l) = \max_{\theta} c(s, l) = \sqrt{c_1^2(s, l) + c_2^2(s, l)}, \quad (5)$$

$$\beta = \arctan \frac{c_2(s, l)}{c_1(s, l)}. \quad (6)$$

将 β 方向对应的分量定义为最强速度脉冲方向分量。定义

$$P_c = 0.63R_{PGV} + 0.777R_{en}, \quad (7)$$

$$R_{\text{PGV}} = \frac{V_{\text{res}}}{\text{PGV}}, R_{\text{en}} = \frac{V_{\text{res}}^2}{\text{PGV}^2}, \quad (8)$$

式中 R_{PGV} 和 R_{en} 分别为残余速度时程 V_{res} 与原始速度时程的地面上峰值速度(peak ground velocity, 缩写为 PGV)之比和能量之比。脉冲判别指标, 即脉冲因子 PI, 以速度脉冲峰值 PGVp 和 P_c 为参数, 其表达式如下:

$$\text{PI} = -(9.384P_c + 0.0004\text{PGVp}^2 + 0.557P_c \cdot \text{PGVp} - 17.191P_c - 0.625\text{PGVp} + 13.824), \quad (9)$$

若 $\text{PI} > 0$, 定义为脉冲地震动; 若 $\text{PI} < 0$, 定义为非脉冲地震动; 若 $\text{PI} = 0$, 方法失效。

3.2 脉冲参数的相关分析

所选取的 140 组脉冲地震动来自 29 个地震事件, 断层距 R_{jb} 均在 40 km 范围内, 其中 126 条记录在 20 km 断层距内, 占总量的 90%, 这些地震毗邻发震断层, 表现出的震害集中性更显著。29 个地震事件的矩震级为 M_W 5.4—7.9, 断层距 R_{jb} 为 0.1—38.36 km, 剪切波速 v_{S30} 为 139.21—2016.13 m/s, 速度脉冲峰值 PGVp 为 26.99—342.12 cm/s, 脉冲周期 T_p 为 0.32—13.12 s。为了建立脉冲参数的回归模型, 采用皮尔森(Pearson)线性相关系数描述脉冲参数与地震动参数之间的相关程度, 其相关性分析采用的数学表达式如下(王璐, 2009):

$$\rho_{xy} = \frac{n \sum (\ln x \ln y) - \sum \ln x \sum \ln y}{\sqrt{[n \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2][n \sum (\ln y)^2 - (\sum \ln y)^2]}}, \quad (10)$$

式中: ρ_{xy} 表示 x 与 y 的相关系数, x 为脉冲参数, y 为地震动参数, n 为地震动个数。 ρ_{xy} 的取值范围为 $-1 \leq \rho_{xy} \leq 1$, ρ_{xy} 的绝对值越大, 表明两组变量的相关程度越高, 离散程度越小。

经计算得到脉冲参数与地震动参数的相关系数, 列于表 8。可知: 速度脉冲峰值 PGVp 与 M_W 和断层距 R_{jb} 的相关系数分别为 0.20 和 -0.38, 均表现为弱相关性; 脉冲周期 T_p 与 M_W 的相关系数为 0.72, 表现为显著相关性, 但与断层距 R_{jb} 的相关系数为 0.27, 表现为弱相关性。

3.3 脉冲周期 T_p 与矩震级 M_W 的关系

本小节基于脉冲周期 T_p 与矩震级 M_W 的最小二乘法拟合, 得到二者的经验模型:

$$\ln T_p = 1.103M_W - 6.381, \quad (11)$$

由上式可知二者呈对数线性关系。图 9 和表 9 展示了脉冲周期随矩震级的分布情况以及本文与其它经验模型的对比。总体上看, 脉冲周期随矩震级的增大而增大。本文与 Baker (2007)、Shahi 和 Baker (2014)、赵晓芬等(2018)、Bray 和 Rodriguez-Marek (2004) 的经验模型的对比结果显示: 本文模型与 Shahi 和 Baker (2014) 模型的吻合度最高, 尤其在 $M_W \geq 6.4$ 范围内基本处于同一水平, 故在大震级范围内二者的差异可以忽略。此外, Shahi 和 Baker (2014) 模型采用的是含前方向性效应的记录, 而本文模型不区分脉冲类型, 这表明是否区分脉冲类型对脉冲周期与矩震级的定量关系影响不大。Bray 和 Rodriguez-Marek (2004) 模型的 T_p 预测值小于包

表 8 脉冲参数与地震动参数的相关性

Table 8 Correlation between pulse parameters and ground motion parameters

ρ_{xy}	M_W	R_{jb}	v_{S30}	PGVp	T_p
M_W	1.00	0.21	0.21	0.20	0.72
R_{jb}		1.00	-0.10	-0.38	0.27
v_{S30}			1.00	-0.05	-0.07
PGVp				1.00	0.11
T_p					1.00

注: ρ_{xy} 为皮尔森相关系数, R_{jb} 为断层距, v_{S30} 为 30 m 场地覆盖土层等效剪切波速, PGVp 为速度脉冲峰值, T_p 为脉冲周期。

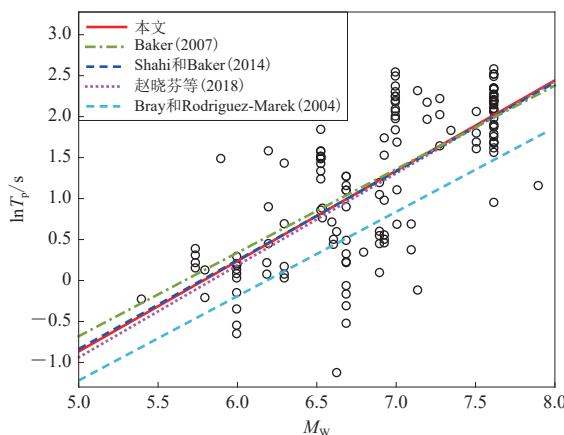
图 9 本文脉冲周期 T_p 的分布及其与其它模型的对比

Fig. 9 The distribution of pulse period T_p in this paper and comparison with the models from others

表 9 脉冲周期 T_p 随矩震级 M_w 变化的经验模型对比
Table 9 Comparison of empirical models of pulse period T_p changing with moment magnitude M_w

模型来源	经验模型关系式	脉冲分量	脉冲类型
Bray和Rodriguez-Marek (2004)	$\ln T_p = 1.03M_w - 6.37$	垂直或平行断层分量	不区分
Baker (2007)	$\ln T_p = 1.02M_w - 5.78$	垂直或平行断层分量	不区分
Shahi and Baker (2014)	$\ln T_p = 1.084M_w - 6.256$	最强速度脉冲分量	方向性效应脉冲
赵晓芬等(2018)	$\ln T_p = 1.123M_w - 6.548$	最强速度脉冲分量	不区分
本文	$\ln T_p = 1.103M_w - 6.381$	最强速度脉冲分量	不区分

3.4 速度脉冲峰值 PGVp 与矩震级 M_w 和断层距 R_{jb} 的关系

Mavroeidis 和 Papageorgiou (2003) 认为近断层的速度脉冲峰值 PGVp 不是随着矩震级和断层距的变化而无限增大，而是存在某个接近于典型断层滑动速率的饱和阈值，其平均峰值速度在 100 cm/s 左右。速度脉冲峰值 PGVp 随矩震级 M_w 和断层距 R_{jb} 的变化关系如图 10 所示。图中的红色圆圈标注了 TCU068 (209.07 cm/s) 和 TCU052 (342.12 cm/s) 两个地震记录的速度脉冲峰值 PGVp，这两个 PGVp 值远大于 Mavroeidis 和 Papageorgiou (2003) 提出的 100 cm/s 阈值，这可能是由地面运动产生的永久位移或土层性质所致。过大的数据会给拟合结果造成偏差，为了避免这种影响，本文在进行拟合分析时剔除这两个台站的记录。基于最小二乘法拟合得到速度脉冲峰值 PGVp 随矩震级 M_w 和断层距 R_{jb} 变化的统计模型为

括本文模型在内的其它四种模型的预测值，由于 Bray 和 Rodriguez-Marek (2004) 以及 Baker (2007) 所用均为垂直或平行断层走向的脉冲分量，因此排除脉冲分量差异的可能性，即造成其余模型预测值差异如此之大的原因可能是脉冲周期 T_p 的获取方法及样本数量的不同。同为采用最强速度脉冲周期的情况下，当 $M_w \leq 7.2$ 时，Baker (2007) 模型得到的脉冲周期比本文、Shahi 和 Baker (2014) 以及赵晓芬等(2018) 模型的脉冲周期都要大，表明在该矩震级范围内，最强速度脉冲周期大于垂直或平行断层分量的脉冲周期。

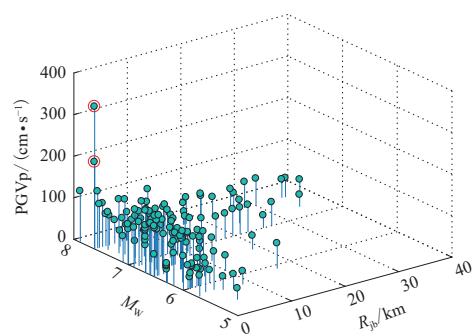
图 10 速度脉冲峰值 PGVp 随矩震级 M_w 和断层距 R_{jb} 的变化

Fig. 10 Variation of velocity pulse peak PGVp with M_w and fault distance R_{jb}

$$\ln PGV_p = 0.177M_W - 0.052\ln R_{jb} + 2.975. \quad (12)$$

剔除两条地震动记录后,剩余记录中速度脉冲峰值PGV_p的最大值为153.22 cm/s;幅值超过100 cm/s的记录主要集中于 $M_W > 6.5$ 且断层距 $R_{jb} < 10$ km范围内,小于100 cm/s的记录分布在矩震级的任意范围,说明速度脉冲峰值的大幅值主要出现在大震区和毗邻发震断层区域。

4 讨论与结论

本文基于NGA-West2数据库统计了1706组近断层地震动的竖向与水平向加速度峰值比 a_V/a_H ,分析了 a_V/a_H 随地震动参数的统计规律,探讨了脉冲地震动脉冲参数与地震动参数的影响关系,并回归得出相关经验模型。主要结果如下:

1) 近断层地震动的加速度峰值比 a_V/a_H 总体分布趋向于极值Ⅱ型分布, a_V/a_H 平均值约为0.58。从累积分布概率看, $a_V/a_H \leq 0.65$ 的总体累积概率为69.9%。

2) 近断层 a_V/a_H 受到地震动参数的影响,矩震级 M_W 越大,断层距 R_{jb} 越小,等效剪切波速 v_{S30} 越小。当断层为走滑断层和逆断层时,产生较大加速度峰值比的概率越大,越容易产生竖向效应的地震动,因此应重视近断层区域工程结构的竖向地震作用。

3) 本文与其它脉冲周期经验模型的对比表明脉冲周期随矩震级的增大而增大。当 $M_W \leq 7.2$ 时,垂直或平行断层方向分量的脉冲周期预测值低于最强速度脉冲方向分量;当 $M_W > 7.2$ 时,二者的脉冲周期差异非常小,可以忽略。本文模型与Shahi和Baker(2014)模型在大震级范围内的差异小,说明是否区分脉冲类型对脉冲周期与矩震级的定量关系影响不大。速度脉冲峰值的大幅值主要出现在大震级范围内和毗邻发震断层区域。

综上,本研究结果表明近断层地震动具有显著的竖向特性和速度脉冲特性,在近断层场地的抗震设防中需引起重视。需要指出的是,本文探讨的脉冲地震动特性均是以速度脉冲地震动记录为主,并未区分速度脉冲和加速度脉冲。现阶段对加速度特性及其与速度脉冲特性的差异研究甚少,下一步将加强对加速度脉冲特性的研究,以期深入探究近断层地震动特征。

参 考 文 献

- 韩建平,周伟.2012.汶川地震竖向地震动特征初步分析[J].*工程力学*,29(12):211-219.
- Han J P, Zhou W. 2012. Preliminary investigation on characteristics of vertical ground motion during Wenchuan earthquake[J]. *Engineering Mechanics*, 29(12): 211-219 (in Chinese).
- 贾俊峰,杜修力,韩强.2015.近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J].建筑结构学报,36(1):1-12.
- Jia J F, Du X L, Han Q. 2015. A state-of-the-art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures[J]. *Journal of Building Structures*, 36(1): 1-12 (in Chinese).
- 李宁,刘洪国,刘平,李忠献,谢礼立.2020.近断层竖向地震动特征统计分析[J].土木工程学报,53(10):120-128.
- Li N, Liu H G, Liu P, Li Z X, Xie L L. 2020. Statistical analysis of vertical ground motion characteristics in near-fault regions[J]. *China Civil Engineering Journal*, 53(10): 120-128 (in Chinese).
- 王东升,陈笑宇,张锐,国巍.2022.基于希尔伯特-黄变换的近断层地震动脉冲特性研究[J].*地震学报*,44(5):824-844.
- Wang D S, Chen X Y, Zhang R, Guo W. 2022. Characteristics of pulses in near-fault ground motion based on Hilbert-Huang transform[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 824-844 (in Chinese).
- 王璐.2009.SPSS统计分析基础、应用与实践[M].北京:化学工业出版社:173-175.
- Wang L. 2009. *Basic, Application and Practice of SPSS Statistical Analysis*[M]. Beijing: Chemical Industry Press: 173-175 (in Chinese).

- 王晓磊, 王海铭, 阎卫东, 吕大刚, 包旭. 2023. 基于Copula函数的水平和竖向地震动强度参数相关性分析[J]. *工程力学*, **40**(5): 79–92.
- Wang X L, Wang X M, Yan W D, Lü D G, Bao X. 2023. Correlation analysis of intensity measures of horizontal and vertical ground motions based on Copula function[J]. *Engineering Mechanics*, **40**(5): 79–92 (in Chinese).
- 温瑞智, 冀昆, 任叶飞. 2021. 工程地震输入: 从传统抗震设防到韧性提升[M]. 北京: 地震出版社: 40.
- Wen R Z, Yi K, Ren Y F. 2021. *Ground Motion Input for Engineering Applications: From Seismic Design to Resilience Enhancement*[M]. Beijing: Seismological Press: 40 (in Chinese).
- 赵培培, 王振宇, 薄景山, 谢志南. 2019. 南北地震带川滇甘陕地区竖向与水平向加速度反应谱比的统计分析[J]. 地震学报, **41**(3): 391–398.
- Zhao P P, Wang Z Y, Bo J S, Xie Z N. 2019. Statistic analyses on the vertical to horizontal acceleration response spectra ratios of Sichuan-Yunnan-Gansu-Shaanxi region in the North-South Seismic Belt[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **41**(3): 391–398 (in Chinese).
- 赵晓芬, 温增平. 2022. 近断层速度脉冲型地震动相关问题研究[J]. *地震学报*, **44**(5): 765–782.
- Zhao X F, Wen Z P. 2022. Review on issues of near-fault velocity pulse-like ground motions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **44**(5): 765–782 (in Chinese).
- 赵晓芬, 温增平, 陈波. 2018. 近断层地震动最强速度脉冲方向分量特性研究[J]. *地震学报*, **40**(5): 673–688.
- Zhao X F, Wen Z P, Chen B. 2018. Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **40**(5): 673–688 (in Chinese).
- 中国建筑科学研究院. 2010. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 19–20, 41–42.
- China Academy of Building Research. 2010. GB 50011—2010 *Code for Seismic Design of Buildings*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 19–20, 41–42 (in Chinese).
- 周正华, 周雍年, 卢滔, 杨程. 2003. 竖向地震动特征研究[J]. *地震工程与工程振动*, **23**(3): 25–29.
- Zhou Z H, Zhou Y N, Lu T, Yang C. 2003. Study on characteristics of vertical ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **23**(3): 25–29 (in Chinese).
- Alavi B, Krawinkler H. 2004. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **33**(6): 687–706.
- Baker J W. 2007. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(5): 1486–1501.
- Bray J D, Rodriguez-Marek A. 2004. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **24**(11): 815–828.
- Chang Z W, Sun X D, Zhai C H, Zhao J X, Xie L L. 2016. An improved energy-based approach for selecting pulse-like ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **45**(14): 2405–2411.
- Dickinson B W, Gavin H P. 2011. Parametric statistical generalization of uniform-hazard earthquake ground motions[J]. *J Struct Eng*, **137**(3): 410–422.
- Gülerce Z, Abrahamson N A. 2011. Site-specific design spectra for vertical ground motion[J]. *Earthq Spectr*, **27**(4): 1023–1047.
- Mavroelidis G P, Papageorgiou A S. 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(3): 1099–1131.
- Shahri S K, Baker J W. 2014. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(5): 2456–2466.
- Zhai C H, Chang Z W, Li S, Chen Z Q, Xie L L. 2013. Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(5): 2591–2603.