

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240417003

# 2023年2月6日土耳其 $M_w7.8$ 和 $M_w7.5$ 地震序列 近断层速度脉冲变化特征及震源影响分析\*

党志颖<sup>1</sup>, 曹泽林<sup>1,2</sup>, 王可意<sup>1</sup>, 孙志宇<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘要:** 2023年2月6日土耳其东南部东安纳托利亚断裂带发生了 $M_w7.8$ 和 $M_w7.5$ 两次强烈地震, 同一断裂带同日发生的两次大地震均观测到近断层速度大脉冲, 本文研究了土耳其地震序列脉冲型地震动特性及震源影响特征。首先, 收集了两次地震水平分量地震动观测记录, 基于小波识别算法分别提取出28条和8条速度脉冲记录, 分析了脉冲记录的空间分布特征以及速度脉冲周期、反应谱放大系数等参数变化特征, 通过与脉冲参数经验关系式的比较, 讨论土耳其地震的个体特性。然后, 比较了两次地震在相同台站观测到的速度脉冲, 从而探讨震源破裂过程对速度脉冲的影响。结果表明, 两次地震的速度脉冲存在明显变化, 脉冲周期因受震源复杂影响而明显区别于以往经验关系式, 脉冲对反应谱的放大系数在1.8~7.5。脉冲记录台站大多位于邻近断层区域, 脉冲周期随断层距呈增大趋势, 震源错动分布对近断层速度脉冲特性具有显著影响。研究成果有助于深化学理解近断层速度脉冲与震源关系, 为近断层速度脉冲预测模型构建及脉冲型地震动抗震输入提供科学参考。

**关键词:** 土耳其地震; 脉冲型地震动; 震源; 脉冲周期; 反应谱放大系数

**中图分类号:** P315.9   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0338-11

## Analysis of Variation Characteristics of Near-Fault Velocity Pulses and Source Effect in $M_w7.8$ and $M_w7.5$ Turkey Earthquake Sequence on February 6, 2023

DANG Zhiying<sup>1</sup>, CAO Zelin<sup>1,2</sup>, WANG Keyi<sup>1</sup>, SUN Zhiyu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** On February 6, 2023, two strong earthquakes with magnitudes of  $M_w7.8$  and  $M_w7.5$  occurred along the East Anatolian Fault Zone in southeastern Turkey. Large near-fault velocity pulses were observed during both major earthquakes occurring on the same fault zone within one day. This study investigated the characteristics of pulse-type ground motions and the effects of the source of the Turkish earthquake sequence. First, horizontal-component ground motions recorded during the two

\* 收稿日期:2024-04-17;修回日期:2024-06-14

基金项目:河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室开放基金项目(FZ247102)、河北省自然科学基金(E2022402077)、国家自然科学基金(52308495)、河北省教育厅科学研究项目(BJK2023062)资助

作者简介:党志颖(2000—),女,硕士研究生。主要从事近断层地震动研究。E-mail: 1815603593@qq.com

通信作者:曹泽林(1990—),男,讲师,硕导,博士。主要从事近断层地震动研究。E-mail: caozelin@hebeu.edu.cn

earthquakes were collected, and 28 and 8 velocity pulse records were extracted, respectively, using a wavelet-based identification algorithm. The spatial distribution characteristics of the pulse records, as well as the variations in parameters such as velocity pulse period and response spectrum amplification factors, were analyzed. By comparing these results with empirical relationships for pulse parameters, the individual characteristics of the Turkish earthquakes were discussed. Subsequently, velocity pulses observed at the same stations during both earthquakes were compared to explore the effect of source rupture process on velocity pulses. The results showed significant variations in velocity pulses of the two earthquakes, with pulse periods notably differing from previous empirical relationships due to complex source effects. The response spectrum amplification factors by pulses ranged from 1.8 to 7.5. Most pulse-recording stations were located in areas adjacent to the fault, and pulse periods exhibited increasing trends with fault distance. Source slip distribution had a significant effect on the characteristics of near-fault velocity pulses. These findings contribute to a deeper understanding of the relationship between near-fault velocity pulses and source, providing scientific references for establishing prediction models for near-fault velocity pulses and determining seismic inputs for pulse-type ground motions in earthquake-resistant engineering.

**Keywords:** Turkey earthquake; pulse-type ground motion; earthquake source; pulse period; response spectrum amplification factor

## 0 引言

2023年2月6日,土耳其东南部卡赫拉曼马拉什省连续发生两次 $M_w$ 7.0以上地震。第一次地震发生于当地时间01时17分,矩震级为7.8,发生在土耳其中南部 Kahramanmaraş 省 Pazarcık 地区,震中位于 $37.226^\circ\text{N}/37.014^\circ\text{E}$ ,震源深度17.5 km。第二次地震为当日10时24分发生在Elbistan地区的 $M_w$ 7.5地震,其震中位于 $38.011^\circ\text{N}/37.196^\circ\text{E}$ ,震源深度13.5 km<sup>[1]</sup>。两次地震震源机制表明, $M_w$ 7.8和 $M_w$ 7.5地震均发生在接近垂直的走滑断层上,地震断层破裂长度分别为 $350\pm 30$  km和 $170\pm 20$  km<sup>[2]</sup>。截止2023年2月19日,地震造成直接经济损失约为342亿美元,死亡人数超过41 000人,120多万人流离失所,并有超过10.5万幢建筑严重受损或倒塌,严重的地震灾情引起了全球的广泛关注<sup>[3]</sup>。

V. V. Bertero等<sup>[4]</sup>对1971年San Fernando地震观测记录研究并发现近断层灾害主要是由速度脉冲引起的。此后,1979年Imperial Valley地震和1992年Landers地震都观测到显著的脉冲型地震动记录。近断层地震动包含的大幅值、长周期且携带较高能量的脉冲信号会对结构造成很大层间位移和永久变形<sup>[5-6]</sup>,因此,近断层速度脉冲研究是近几十年地震工程领域的一个热点问题。目前,对速度脉冲特性的研究主要是依据近断层地震动实际观

测记录,利用定量脉冲识别方法研究脉冲参数与震级、场地条件等因素之间的关系。研究发现,脉冲周期随矩震级的增加整体呈上升趋势<sup>[7-9]</sup>,且在小震级时土层场地的脉冲周期要普遍大于岩石场地记录到的脉冲周期<sup>[10]</sup>;脉冲放大作用影响的周期范围随震级增大变宽,并会随着场地剪切波速的增大向短周期移动<sup>[11]</sup>。

近断层速度脉冲受到震源机制、场地条件和传播介质的共同影响。由于近断层速度脉冲的观测台站距离发震断层很近,复杂震源的影响相较于后两者更为显著<sup>[12]</sup>。并且,土耳其两次地震在同一台站观测到的速度脉冲记录具有相同的场地条件,为研究震源破裂对速度脉冲的影响提供重要数据。

地震发生后,梁朋等<sup>[13]</sup>对 $M_w$ 7.8地震进行了地表破裂特征分析,冯军等<sup>[14]</sup>对 $M_w$ 7.8地震进行地震破裂带初步调查。同时,对于工程领域关注的近断层速度脉冲,F. Wu等<sup>[15]</sup>基于Baker(2007)方法研究了 $M_w$ 7.8地震记录,揭露了脉冲型地震动的空间分布、方向范围及脉冲特性;丁龙兵等<sup>[16]</sup>基于能量法对土耳其地震序列的四次强震记录进行了脉冲型地震动的分类识别,并探讨了矩震级和断层距对脉冲参数的影响。鉴于不同识别方法之间的差异,本文采用Shahi和Baker(2014)方法识别 $M_w$ 7.8和 $M_w$ 7.5地震的观测记录,以更全面的认识多分量地震动速度脉冲特性并重点比较两次地震速度脉冲的区别。

为便于表述,下文将两次地震分别简写为  $M_w$ 7.8地震和  $M_w$ 7.5地震。本文依据获取到的地震动记录,基于连续小波算法进行速度脉冲的识别与分类,分析脉冲台站的空间分布特征,同时研究速度脉冲周期、加速度反应谱放大系数的变化特征,并在比较两次地震整体脉冲记录 and 同一台站的两次脉冲记录的基础上,分析震源对速度脉冲特征参数的影响。

## 1 近断层地震动记录数据

### 1.1 地震动记录数据获取

地震发生以后,土耳其灾害与应急管理部(Di-saster and Emergency Presidency of Turkey, AFAD)官方网站(<https://tadas.afad.gov.tr/map>)发布了所有的地震动记录。其中  $M_w$ 7.8地震共有 379 个台站,三分量共 1 137 条地震动记录,均为有效数据,  $M_w$ 7.5地震共 386 个台站,三分量共 1 158 条地震动记录,可下载地震动数据为 370 组的 1 110 条。本文对两次地震共计 749 组双水平分量记录进行脉冲识别。土耳其地震台站空间分布相对均匀,部分台站临近国界线,覆盖地域广泛,且近断层区域台站分布相对密集,对强地震动具有较好的观测结果。

### 1.2 地震动峰值分析

两次地震动水平分量峰值空间分布如图 1 所示,图中沿断层分布的两条蓝色线段夹角范围内为破裂前方,发现两地震断层迹线附近区域地震动峰值地面加速度( $PGA$ )和峰值地面速度( $PGV$ )明显较大,并随着断层距的增加地震动峰值呈现为明显的减小趋势。其中  $M_w$ 7.8地震断层靠近叙利亚,推断叙利亚境内缺乏台站区域也会出现高数值。土耳其境内  $M_w$ 7.8地震共计 16 个台站的  $PGV$  在 100 cm/s 以上,69 个台站  $PGA$  在 100 cm/s 以上,并且在 3 123 台站测得此次地震  $PGV$  最大值 177.45 cm/s,该台站断层距 8.66 km。  $M_w$ 7.5地震共有 14 个台站  $PGA$  大于 100 cm/s,  $PGV$  值在 100 cm/s 以上的台站仅有一个,最大值 177.13 cm/s 在 4 612 台站测得,其断层距仅 14.02 km。  $M_w$ 7.5地震  $PGV$  整体小于  $M_w$ 7.8地震,50~100 cm/s 范围内仅有 4 631 台站,其余均小于 50 cm/s,这一数据现象是  $M_w$ 7.5地震脉冲记录相对  $M_w$ 7.8地震偏少的原因之一。

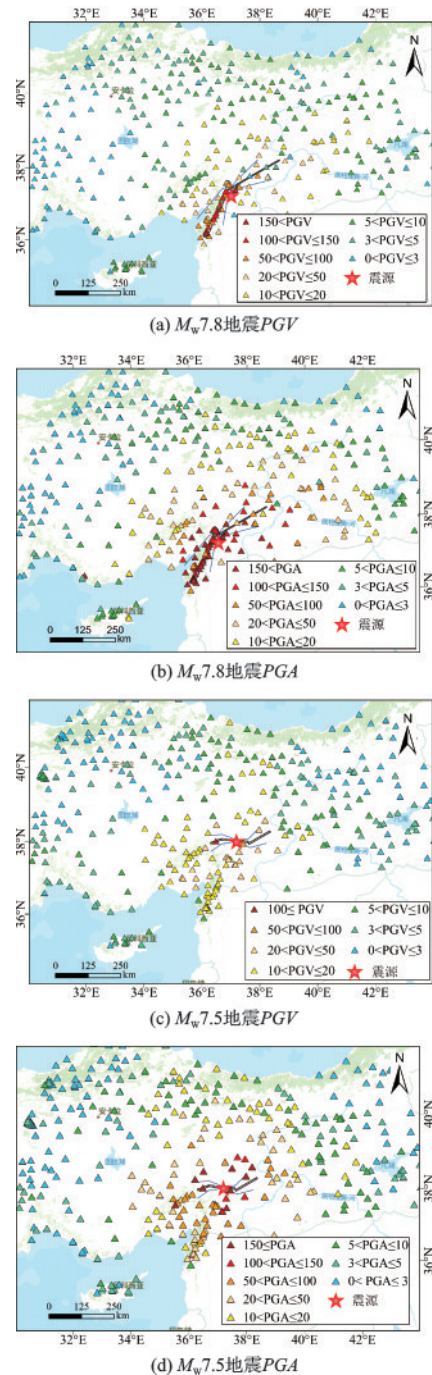


图 1 土耳其  $M_w$ 7.8地震和  $M_w$ 7.5地震强震动台站及地震动峰值的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of strong motion stations and peak ground motions for  $M_w$ 7.8 and  $M_w$ 7.5 earthquakes in Turkey

## 2 基于小波分析的脉冲识别

### 2.1 脉冲识别方法

S. K. Shahi等<sup>[17]</sup>提出一种算法来分类地震动为



脉冲型与非脉冲型。该算法采用4阶Daubechies小波作为小波基函数,利用地震动两水平分量的小波变换来寻找可能包含最强脉冲的方向。再将地震动记录旋转 to 这些特定的方向,提取脉冲时程,根据分类原则对地震动进行分类。其中分类原则如下:

(1)原始速度记录提取出的脉冲具有简单长周期和足够大的能量。将脉冲因子(*Pulse indicator*, *PI*)为0定义为分类边界,当*PI*为正时,地震动为脉冲型地震动。

$$PI = 9.384(0.76 - PC - 0.0616PGV)(PC + 6.914 \times 10^{-4}PGV - 1.072) - 6.179 \quad (1)$$

$PC = 0.63 \times (PGV \text{ ratio}) + 0.777(\text{energy ratio})$ (2)式中,*PGV ratio*为提取脉冲后的残余地震动与原始地震动的*PGV*比值;*energy ratio*为残余地震动的能量与原始地震动的能量比值。

两次地震NAR台站的水平分量提取长周期脉冲信号的结果如图2所示,图中表示了原始地震动记录与提取的脉冲,两次地震台站的*PI*分别为20.98和1.70,均为正数,符合分类边界判定条件。

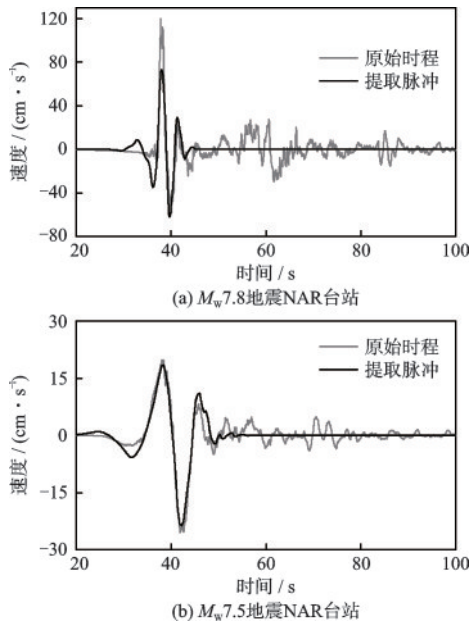


图2  $M_w$ 7.8地震和 $M_w$ 7.5地震NAR台站速度时程  
Fig.2 Velocity time histories at NAR Station for  $M_w$ 7.8 and  $M_w$ 7.5 earthquakes

(2)由方向性效应引起的近断层速度脉冲应出现在时程的早期。判定的方法为分别计算提取出的脉冲时程和原始时程的累计平方速度(CSV)随时间变换的函数,即能量时间函数

$$CSV(t) = \int_0^t V^2(u) du \quad (3)$$

其中,速度脉冲出现在时程早期需满足提取出的脉冲信号达到总能量5%的时刻 $t_{5\%,pulse}$ ,出现在原始记录达到总能量17%的时刻 $t_{17\%,orig}$ 之前。即:

$$t_{5\%,pulse} < t_{17\%,orig} \quad (4)$$

## 2.2 速度脉冲识别结果

根据上述脉冲型地震动识别方法,对两次地震的水平分量记录进行识别,确定其中的脉冲型地震动记录。对比 $M_w$ 7.8地震NAR台站的早到脉冲和 $M_w$ 7.8地震3139台站的晚到脉冲,如图3所示,发现3139台站原记录前17%的能量发生的时刻要晚于脉冲记录前5%能量发生时刻,属于晚到脉冲,故在统计脉冲型记录时将其去除。

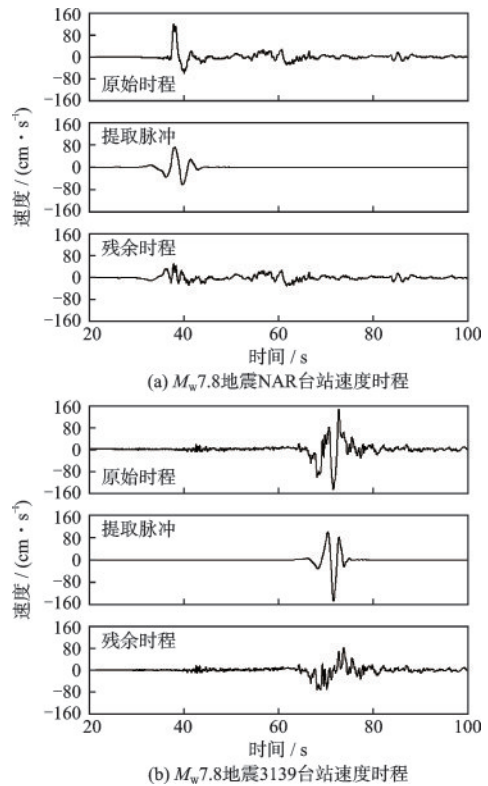


图3  $M_w$ 7.8地震NAR台站早到脉冲和3139台站晚到脉冲对比

Fig.3 Comparison of early arrival pulse at NAR station and late arrival pulse at station 3139 during  $M_w$ 7.8 earthquake

两次地震共判定出36条脉冲记录,其中大部分记录分布于断层附近,在两次地震中4615和NAR台站均识别到速度脉冲。 $M_w$ 7.8地震共识别出28条速度脉冲记录,详细信息见表1。脉冲周期( $T_p$ )分布于1.76~14.45 s,平均值为7.8 s,有8个台站脉

冲周期大于 10 s。其中,最大脉冲周期台站为 3115,最小脉冲周期台站为 3129。 $M_w7.5$ 地震 8 个台站出脉冲记录,详细信息见表 2。脉冲周期分布于 6.15~

11.59 s,平均值为 9.4 s,4611 与 0132 两个台站识别出的脉冲周期大于 10 s,最大脉冲周期出现在 0132 台站,最小脉冲周期出现在 4612 台站。

表 1  $M_w7.8$ 地震 28 个脉冲型地震动记录的参数

Table 1 Parameters of 28 pulse-type ground motions recorded during  $M_w7.8$  earthquake

台站	经度/(°)	纬度/(°)	断层距/km	脉冲周期 $T_p/s$	$PGV/(cm \cdot s^{-1})$	$PI$	是否处于破裂前方
0213	37.929 6	37.896 7	11.20	9.14	99.11	5.73	是
2712	37.832 8	37.184 0	19.34	6.97	128.32	7.22	否
2715	36.685 6	36.855 4	76.93	6.80	61.19	11.44	是
2716	36.688 3	36.856 4	76.63	6.62	69.32	8.43	是
2717	36.691 0	36.855 5	76.33	6.75	58.95	11.56	是
2718	36.626 6	37.007 8	84.58	6.03	117.25	22.58	是
3115	36.164 6	36.546 3	137.37	14.45	54.44	1.85	是
3116	36.206 6	36.616 2	131.68	14.39	46.08	5.46	是
3123	36.159 7	36.214 2	146.56	2.62	177.45	20.22	是
3124	36.172 2	36.238 7	144.45	3.63	106.77	2.46	是
3125	36.132 6	36.238 1	148.55	3.42	119.20	6.53	是
3126	36.137 5	36.220 2	148.63	3.37	119.11	6.61	是
3129	36.134 3	36.191 2	149.95	1.76	169.52	10.41	是
3131	36.163 3	36.191 2	146.99	12.26	56.94	0.74	是
3134	36.204 9	36.827 6	130.21	11.61	47.14	3.03	否
3136	36.247 2	36.115 9	141.46	13.57	55.12	0.02	是
3137	36.488 5	36.692 9	99.77	9.34	103.70	18.57	是
3142	36.366 1	36.498 0	116.64	10.09	79.96	1.05	是
3143	36.557 1	36.848 9	91.16	7.15	160.30	20.74	是
3144	36.485 7	36.756 9	99.43	8.25	142.70	13.65	是
3145	36.406 4	36.645 4	109.41	4.24	147.94	23.31	是
3146	36.227 0	36.490 8	131.71	12.94	55.37	8.20	是
3147	36.064 4	35.902 4	168.33	12.14	27.58	0.71	是
4615	37.138 0	37.386 8	46.92	5.47	146.22	30.96	是
4616	36.838 4	37.375 5	75.11	7.94	101.87	12.42	是
4625	36.981 9	37.538 7	68.57	4.49	79.02	0.43	是
8002	36.562 0	37.191 6	95.45	8.87	39.97	2.91	否
NAR	37.157 4	37.391 9	45.28	4.75	120.10	20.98	是

表 2  $M_w7.5$ 地震 8 个脉冲型地震动记录的参数

Table 2 Parameters of 8 pulse-type ground motions recorded during  $M_w7.5$  earthquake

台站	经度/(°)	纬度/(°)	断层距/km	脉冲周期 $T_p/s$	$PGV/(cm \cdot s^{-1})$	$PI$	是否处于破裂前方
0118	35.318 4	37.036 1	161.89	9.03	25.76	0.43	否
0132	36.114 9	37.855 9	50.89	11.59	23.33	0.58	是
4611	37.284 3	37.847 2	28.10	10.79	39.08	3.61	否
4612	36.481 9	38.024 0	14.02	6.15	177.13	14.12	是
4614	37.297 8	37.485 1	56.90	9.25	32.71	3.16	否
4615	37.138 0	37.386 8	69.22	9.18	29.02	2.85	否
4631	37.427 7	37.966 3	2.67	9.91	97.11	13.79	是
NAR	37.157 4	37.391 9	68.48	9.49	25.44	1.70	否

### 3 近断层速度脉冲参数分析

#### 3.1 脉冲周期与矩震级的关系

近断层速度脉冲主要由方向性效应引起,大量

研究表明脉冲周期  $T_p$  与矩震级  $M_w$  之间存在对数线性关系<sup>[6-7,17-20]</sup>。为分析土耳其地震动的脉冲周期,研究速度脉冲的主要参数与震源参数之间的关系,下文对比了32条速度脉冲的脉冲周期与矩震级关系式,如表3和图4所示。

表3 速度脉冲周期  $T_p$  与矩震级  $M_w$  的经验关系式

来源	经验式	脉冲分量
谢俊举 <sup>[6]</sup>	$\ln T_p = -2.53 + 0.446M_w$	最强速度脉冲分量(水平)
Bary和Marek <sup>[7]</sup>	$\ln T_p = -6.37 + 1.03M_w$	垂直或平行断层分量
Shahi和Baker <sup>[17]</sup>	$\ln T_p = -6.55 + 1.12M_w$	最强速度脉冲分量(水平)
Baker <sup>[18]</sup>	$\ln T_p = -5.78 + 1.02M_w$	垂直或平行断层分量
Shahi和Baker <sup>[19]</sup>	$\ln T_p = -5.73 + 0.99M_w$	最强速度脉冲分量(水平)
赵天次和赵伯明 <sup>[20]</sup>	$\ln T_p = -6.11 + 1.06M_w$	最强速度脉冲分量(三分量)

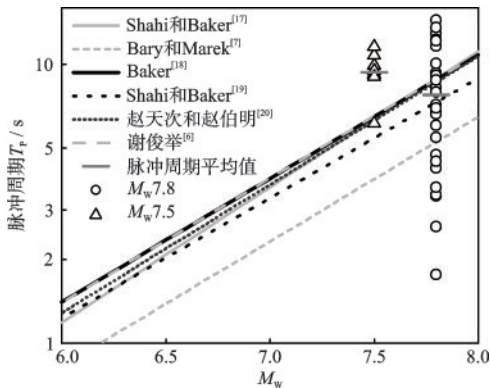


图4  $M_w7.8$ 地震和 $M_w7.5$ 地震速度脉冲周期与经验关系式的比较

Fig.4 Comparison of velocity pulse period and empirical relationship between  $M_w7.8$  and  $M_w7.5$  earthquakes

统计分析表明,地震震级对脉冲周期有显著影响,震级越大脉冲周期越长。 $M_w7.8$ 和 $M_w7.5$ 地震的脉冲周期标准差分别为3.74和1.59, $M_w7.8$ 地震离散程度大于 $M_w7.5$ 地震,是因为 $M_w7.8$ 地震脉冲台站位置广,脉冲周期受场地条件、震源特征、距离等因素的复杂影响<sup>[6-7,17]</sup>。 $M_w7.8$ 地震脉冲周期平均值明显高于Bary和Marek<sup>[7]</sup>经验式,略高于Shahi和Baker<sup>[19]</sup>经验式,整体上接近多种经验式的平均预测值,可能与脉冲识别算法和样本数量有关。 $M_w7.5$ 地震脉冲周期平均值高于各经验式,且大于 $M_w7.8$ 地震的现象产生原因有二,一是由于脉冲识别方法基本原理不同,小波方法得到的脉冲周期整体偏大<sup>[21]</sup>;二是震源破裂方向及距离显著影响着脉冲周期, $M_w7.5$ 地震的多数脉冲台站不在破裂前方造成 $M_w7.5$ 地震脉冲周期较大。

#### 3.2 速度脉冲对反应谱的影响

为研究两次地震速度脉冲对地震反应谱的放大效应,图5分析了原始脉冲时程与提取脉冲后的残余时程反应谱。阴影部分表示脉冲对反应谱的放大作用。如图所示,脉冲对反应谱具有显著的窄带放大作用,残余时程的反应谱在短周期内与原始时程基本接近,但在长周期时残余时程明显小于原始时程。

两次地震同时观测到速度脉冲的台站为4615、NAR。 $M_w7.8$ 和 $M_w7.5$ 地震4615台站反应谱分别放大了2.8倍、5.7倍,NAR台站放大了3.3倍、5.1倍,相同台站的不同差异将在后文进行研究。其中 $M_w7.8$ 地震识别的脉冲记录与残余记录相比反应谱放大了1.8~7.3倍,最大放大系数发生在3131台站,该台站脉冲周期为12.26 s。 $M_w7.5$ 地震识别出的速度脉冲周期大小接近,反应谱放大倍数为3.5~7.5倍,脉冲周期最小0118台站反应谱放大系数为3.78倍,两个10 s以上脉冲周期台站均放大6倍以上。 $M_w7.8$ 地震反应谱放大倍数数值范围较广, $M_w7.5$ 地震放大倍数相较于 $M_w7.8$ 地震集中。在两次地震中,反应谱放大系数整体呈现出随着脉冲周期增大而增大的趋势,如图6所示,特别是在 $M_w7.8$ 地震中,最大谱放大系数出现在周期较长的台站记录中。造成 $M_w7.8$ 地震反应谱放大倍数数值范围较广而 $M_w7.5$ 地震放大倍数更为集中的原因,可能与相同场地条件下脉冲放大作用随震级增大的影响范围变宽<sup>[11]</sup>有关。 $M_w7.8$ 地震反应谱系数较大值在

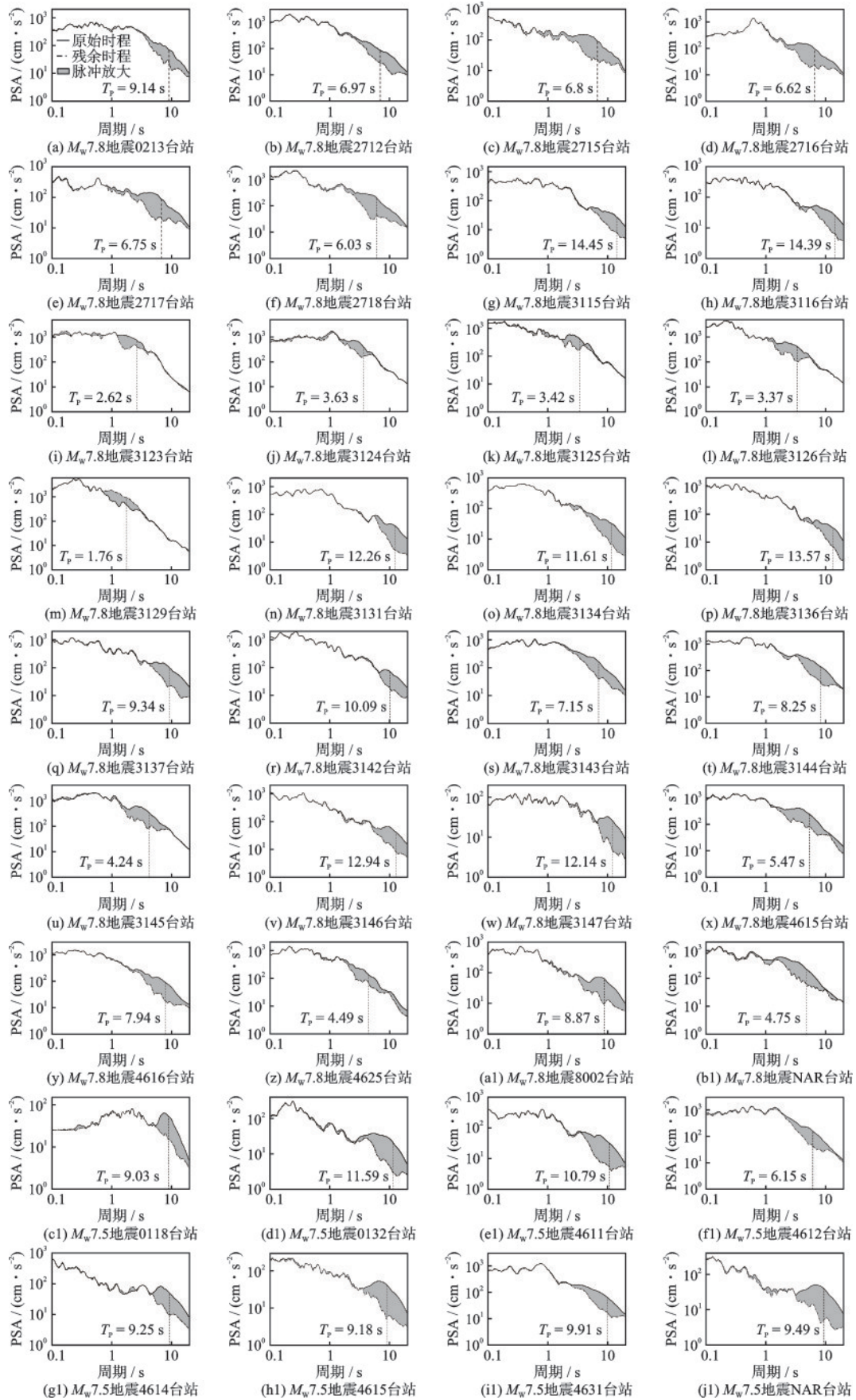


图5  $M_w$ 7.8地震和 $M_w$ 7.5地震脉冲型记录原始时程与残余时程反应谱

Fig.5 Response spectra of original and residual time histories for pulse-type records during  $M_w$ 7.8 and  $M_w$ 7.5 earthquakes



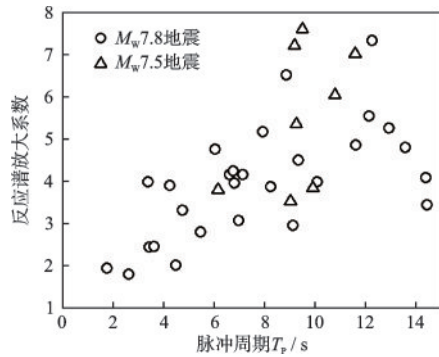


图6  $M_w7.8$ 地震和 $M_w7.5$ 地震速度脉冲周期与反应谱放大系数的关系

Fig.6 Relationship between velocity pulse period and response spectrum amplification factor of  $M_w7.8$  and  $M_w7.5$  earthquakes

长周期与放大系数曲线的峰值随震级增大向长周期方向移动<sup>[11]</sup>的规律吻合。

## 4 震源对近断层脉冲的影响探究

### 4.1 两次地震相同台站脉冲记录的对比分析

近断层速度脉冲受震源、传播路径、场地条件等因素的影响,对相同台站进行分析可以排除场地条件的作用,以突出震源对速度脉冲影响。两次地震同时识别出速度脉冲的台站为4615和NAR台站,两台站原始时程和残余时程的波形与反应谱比较如图7所示。时程图显示 $M_w7.8$ 地震在两个台站记录的PGV值均明显大于 $M_w7.5$ 地震,是由于 $M_w7.8$ 地震时两记录到震源位置的距离均小于 $M_w7.5$ 地震的距离。 $M_w7.8$ 地震4615台站与NAR台站,断层距分别为33.99和33.39 km,脉冲周期分别为5.47和4.75 s,反应谱放大系数分别为2.8和3.3;  $M_w7.5$ 地震两台站断层距分别为69.22和68.48 km,脉冲周期分别为9.2和9.5 s,反应谱放大系数分别为7.2和7.6。两个台站相距较近,因此单次地震中两台站脉冲周期与反应谱放大系数数值差距较小。其中脉冲周期应随矩震级增加呈上升趋势<sup>[6-7,17-20]</sup>,但同一台站 $M_w7.8$ 地震两脉冲参数数值均小于 $M_w7.5$ 地震的现象也显示其中受到震源的影响。

### 4.2 震源对近断层速度脉冲的影响探究

选取各地震错动量最大的断层计算断层距

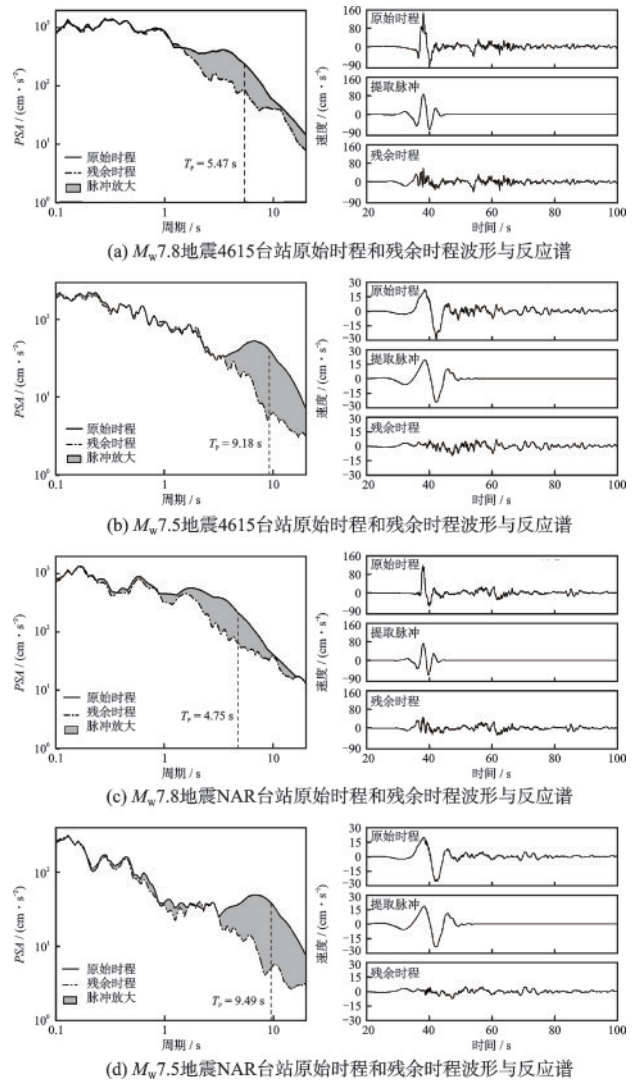


图7 两次地震4615和NAR台站原始时程和残余时程波形与反应谱比较

Fig.7 Comparison of original and residual time history waveforms and response spectra at 4615 and NAR stations during two earthquakes

( $M_w7.8$ 地震为断层2, $M_w7.5$ 地震为断层1), $M_w7.8$ 地震脉冲记录的断层距在11.20~146.99 km, $M_w7.5$ 地震脉冲记录的断层距在2.67~161.89 km,速度脉冲台站断层距的范围可以看出脉冲记录发生位置受断层空间位置的影响,发生区域多为近断层区域。两次地震中断层与脉冲参数的关系如图8所示。两次地震脉冲台站空间分布如图9所示。 $M_w7.8$ 脉冲型地震动的位置与沿各段走向的破裂传播方向基本一致,主要沿着平行于断层的方向分布。 $M_w7.5$ 地震脉冲型地震动的位置大多垂直断层,位于破裂后方,因而此次地震脉冲周期与反应谱放大系数的数值偏大。在 $M_w7.8$ 地震中,图8蓝



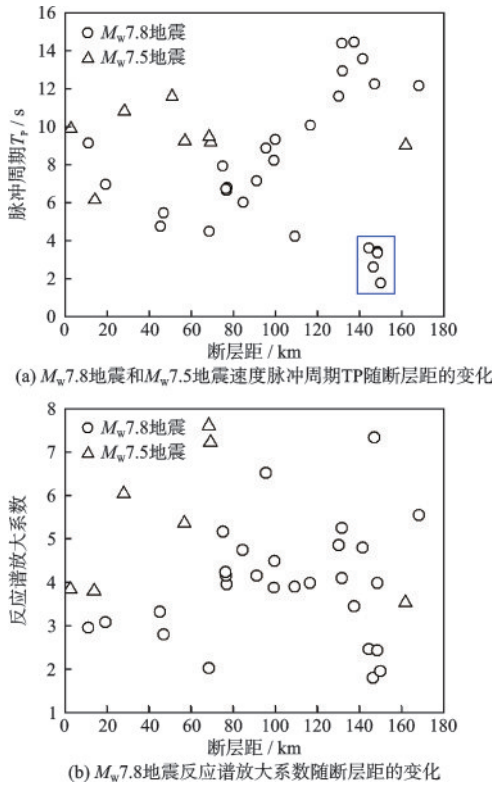


图8  $M_w7.8$ 地震和 $M_w7.5$ 地震速度脉冲周期  $T_p$  与反应谱放大系数随断层距的变化

Fig.8 Variation of velocity pulse period  $T_p$  and response spectrum amplification factors with fault distance for  $M_w7.8$  and  $M_w7.5$  earthquakes

色框内五个台站(3123、3124、3125、3126、3129)脉冲周期值与反应谱放大系数较小,是由于近断层地震动的复杂性且五个台站位置更接近于断层3。除此之外,其余台站两脉冲参数随断层距增加有显著上升趋势。 $M_w7.5$ 地震破裂前方仅有3个台站,其变化规律并不明显,但位于破裂前方更远处0132台站的脉冲周期与反应谱放大系数均大于更近处的4612台站,此现象仍表达了这一规律。

地震发生后,USGS基于断层破裂映射分析提出了震源错动分布图,如图10(引自 <https://earthquake.usgs.gov>)所示,将两次地震中的断层破裂均简化为三个平面断层段。从图中可以明显看出, $M_w7.8$ 地震错动量较大区域为震源破裂面较浅区域, $M_w7.5$ 地震错动量较大区域在震源深度水平位置处。 $M_w7.8$ 地震中,震源位置周围的错动量较断层内其他位置更大,其中最大错动量高达约11 m,位于东安纳托利亚断层的开始破裂处,距震源位置20 km左右。接近此处范围的台站如4615、4625、NAR台站脉冲周期与反应谱放大系数数值较周围

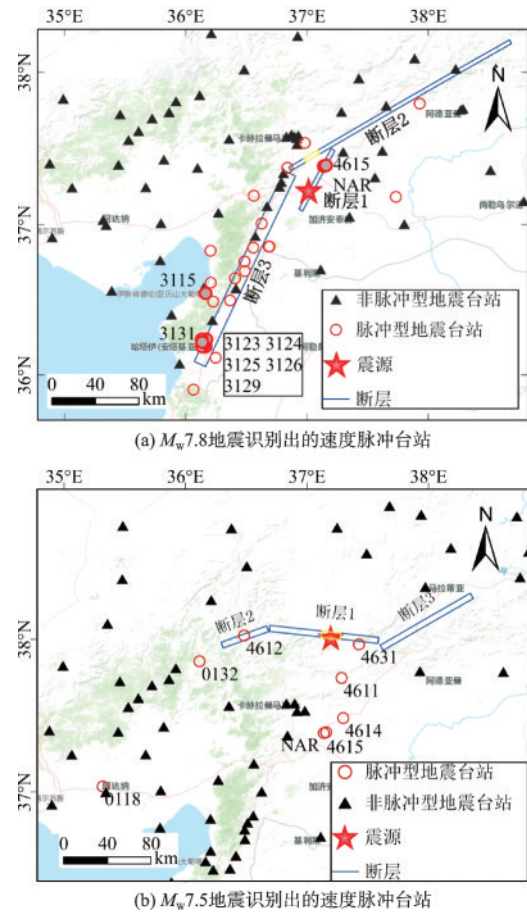


图9 两次地震识别出的速度脉冲台站

Fig.9 Stations with identified velocity pulses for two earthquakes

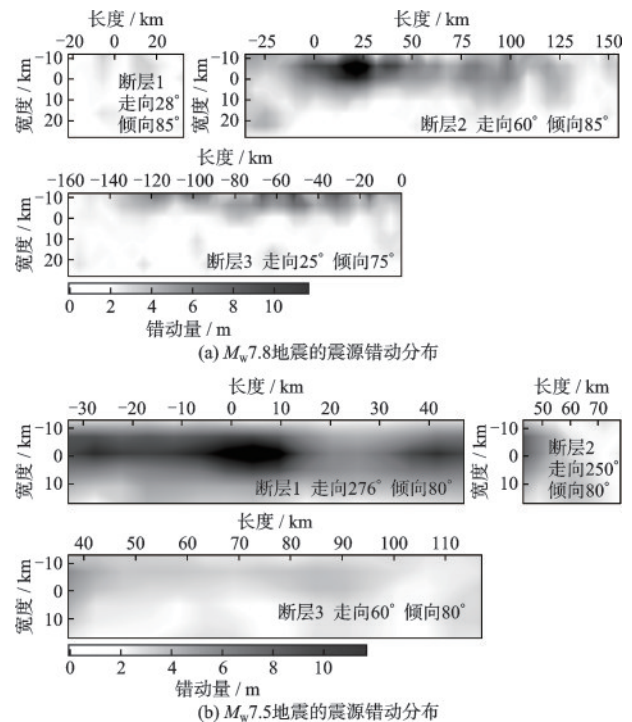


图10  $M_w7.8$ 和 $M_w7.5$ 地震的震源错动分布

Fig.10 Source slip distributions of  $M_w7.8$  and  $M_w7.5$  earthquakes

台站偏小。对于 $M_w7.5$ 级地震,错动模型显示错动量较大的区域主要集中在震源附近,特别是震源所在的断层段,其整体错动量显著大于另外两个断层段。最大错动量同样约为11 m,发生在震源东面的震源深度处。位于此处的4631台站,其反应谱放大系数为脉冲记录中的较小值。其中与错动量大的区域相对应的,是两脉冲参数的数值均小于其他区域,进一步印证了震源错动对近断层速度脉冲的显著影响。

## 5 结 论

整理、分析了2023年2月6日发生的 $M_w7.8$ 和 $M_w7.5$ 地震的两水平分量速度记录,基于多分量小波分析方法进行了脉冲识别,研究了脉冲周期、反应谱放大系数等脉冲参数的特点,分析了此次地震速度脉冲对反应谱的放大作用,探究了震源对近断层速度脉冲的影响,获得了如下结论。

(1)土耳其地震台站较好地覆盖了近断层区域,两次地震近断层区域地震动峰值均明显大于其他区域,并随断层距增大呈现减小趋势。 $M_w7.8$ 地震和 $M_w7.5$ 地震 $PGV$ 在 $100\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的分别有16个和1个台站,是 $M_w7.8$ 地震脉冲记录多于 $M_w7.5$ 地震的原因之一。

(2)根据双分量小波分析脉冲识别方法发现土耳其 $M_w7.8$ 和 $M_w7.5$ 地震分别有28条和8条脉冲型地震动,并识别出 $M_w7.8$ 地震还有一次晚到脉冲,其中大部分记录分布于断层附近。此外,两次地震在4615和NAR台站均观测到速度脉冲,为探究震源对速度脉冲的影响提供数据基础。

(3)地震震级与脉冲周期呈对数线性分布,其中 $M_w7.5$ 地震平均值高于经验关系式,主要原因在于此次地震震源到脉冲台站之间的空间方位与震源破裂前方的间隔较大。脉冲对反应谱的放大倍数可达1.8~7.5,并且两次地震放大系数的对比表明,随着震级的增大,脉冲放大系数变化范围更大,放大系数的峰值随震级增大向长周期方向移动。

(4)通过对比两次地震在相同台站观测到的速度脉冲,发现 $M_w7.8$ 地震脉冲周期和脉冲放大系数均小于 $M_w7.5$ ,显示出与常规认识不同的特征,主要是由于震源影响着脉冲参数。两次地震的脉冲识别结果及震源影响分析发现,大多脉冲记录均位于

断层周围,且脉冲周期受断层距影响有着增大趋势,脉冲特征受到震源错动分布的显著影响。

## 参考文献:

- [1] Maletckii B, Astafyeva E, Sanchez S A, et al. The 6 February 2023 Türkiye earthquake sequence as detected in the ionosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2023, 128(9): e2023JA031663.
- [2] Meng J N, Kusky T, Mooney W D, et al. Surface deformations of the 6 February, 2023 earthquake sequence, eastern Türkiye [J]. Science, 2024, 383(6680): 298-305.
- [3] World Bank Group. Global rapid post-disaster damage estimation (GRADE) report: February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes Türkiye report [R]. Washington: The World Bank, 2023.
- [4] Bertero V V, Mahin S A, Herrera R A. 1978. A seismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1978, 6(1): 31-42.
- [5] 陈笑宇,王东升,付建宇,等.近断层地震动脉冲特性研究综述[J].工程力学,2021,38(8):1-14,54. Chen X Y, Wang D S, Fu J Y, et al. Review of pulse characteristics of near-fault ground motion[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(8): 1-14,54.
- [6] 谢俊举,温增平,李小明,等.基于小波方法分析汶川地震近断层地震动的速度脉冲特性[J].地球物理学报,2012,55(6):1963-1972. Xie J J, Wen Z P, Li X J, et al. Based on the wavelet method, the velocity pulse characteristics of near-fault ground motion of Wenchuan earthquake are analyzed [J]. According to Geophysics, 2012, 55(6): 1963-1972. (in Chinese)
- [7] Bray J D, Rodriguez-Marek A. Characterization of forward directivity ground motions in the near fault region [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2004, 24(11): 815-828.
- [8] Alavi B, Krawinkler H. Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design [C]//Proceedings 6th World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand: The New Zealand Society for Earthquake Engineering. 2000, 2665: 1-8.
- [9] Mavroidis G P, Papageorgiou A S. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. Bulletin

- of the Seismological Society of America, 2003, 93: 1099-1131.
- [10] Rodriguez-Marek A, Bray J D. Seismic site response for near-fault forward directivity ground motions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(12): 1611-1620.
- [11] 谢俊举, 李小军, 温增平. 近断层速度大脉冲对反应谱的放大作用[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 194-211. Xie J J, Li X J, Wen Z P. Amplification of response spectrum by large pulse near-fault velocity [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 194-211. (in Chinese)
- [12] 罗全波, 陈学良, 高孟潭, 等. 近断层速度脉冲与震源机制的关系浅析[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(3): 646-661. Luo Q B, Chen X L, Gao M T, et al. Analysis of the relationship between near-fault velocity pulse and focal mechanism [J]. Earthquake Disaster Prevention Technology, 2018, 13(3): 646-661. (in Chinese)
- [13] 梁朋, 田勤俭, 徐岳仁, 等. 2023年2月6日土耳其  $M_w$ 7.8 帕扎尔哲克地震地表破裂特征分析[J]. 震灾防御技术, 2023, 18(3): 483-494. Liang P, Tian Q J, Xu Y R, et al. Analysis of surface rupture characteristics of the  $M_w$ 7.8 Pazarcık earthquake in Turkey on February 6, 2023 [J]. Earthquake Disaster Prevention Technology, 2023, 18(3): 483-494. (in Chinese)
- [14] 冯军, 闫纪元, 赵晓霞. 2023年2月6日土耳其  $M$ 7.8 级地震地表破裂带初步调查[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2023, 59(6): 945-950. Feng J, Yan J Y, Zhao X X. Preliminary investigation of the surface rupture zone of the  $M$ 7.8 earthquake in Turkey on February 6, 2023 [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2023, 59(6): 945-950. (in Chinese)
- [15] Wu F, Xie J, An Z, et al. Pulse-like ground motion observed during the 6 February 2023  $M_w$ 7.8 Pazarcık Earthquake (Kahramanmaraş, SE Turkey) [J]. Earthquake Science, 2023, 36(4): 328-339.
- [16] 丁龙兵, 胡进军, 李培旭, 等. 土耳其地震序列的近断层脉冲型地震动识别与特征分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(23): 71-79. Ding L B, Hu J J, Li P X, et al. Near-fault pulse-type ground motion identification and characteristic analysis of Turkish earthquake sequence [J]. Vibration and Shock, 2023, 42(23): 71-79. (in Chinese)
- [17] Shahi S K, Baker J W. An efficient algorithm to identify strong velocity pulses in multicomponent ground motions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2456-2466.
- [18] Baker J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.
- [19] Shahi S K, Baker J W. An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(2): 742-755.
- [20] 赵天次, 赵伯明. 基于小波分析的近断层地震动最强速度脉冲识别方法与应用[J]. 振动与冲击, 2021, 40(8): 41-49. Zhao T C, Zhao B M. Identification method and application of the strongest velocity pulse of near-fault ground motion based on wavelet analysis [J]. Vibration and Shock, 2021, 40(8): 41-49. (in Chinese)
- [21] 常志旺. 近场脉冲型地震动的量化识别及特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. Chang Z W. Quantitative identification and characteristics of near-field pulse-like ground motion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)