

王宏伟, 强生银, 温瑞智等. 2024. 2023 年 2 月 6 日土耳其 M_w 7.8 和 M_w 7.6 两次大地震的地震动特征及模拟. 地球物理学报, 67(8): 2990-3003, doi: [10.6038/cjg2023R0092](https://doi.org/10.6038/cjg2023R0092).

Wang H W, Qiang S Y, Wen R Z, et al. 2024. Characteristics and simulations of ground motions in Turkey M_w 7.8 and M_w 7.6 great earthquakes on 6 February 2023. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(8): 2990-3003, doi: [10.6038/cjg2023R0092](https://doi.org/10.6038/cjg2023R0092).

2023 年 2 月 6 日土耳其 M_w 7.8 和 M_w 7.6 两次大地震的地震动特征及模拟

王宏伟^{1,2}, 强生银^{1,2}, 温瑞智^{1,2*}, 任叶飞^{1,2}

1 中国地震局工程力学研究所, 地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080

2 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 哈尔滨 150080

摘要 2023 年 2 月 6 日土耳其东南部连续发生 M_w 7.8 和 M_w 7.6 大地震, 强震动观测台网获取到了大量的强震动观测记录, 利用两次地震的强震动记录, 对比土耳其地区地震动预测方程, 分析了地震动的衰减特征, 探讨 M_w 7.8 地震的震源破裂特征对近断层地震动空间分布、速度脉冲的产生及观测台站方位相关的地震动总残差的影响, 采用随机有限断层三维地震动模拟方法给出了基于数值模拟记录的仪器地震烈度图, 得到以下结论: (1) 两次地震中地震动的震源效应明显强于土耳其地区浅地壳地震的平均震源效应, M_w 7.8 地震对中长周期地震动的震源效应比 M_w 7.6 地震更强烈; (2) 两次地震中远场地震动的非弹性衰减明显强于土耳其地区的平均水平; (3) M_w 7.8 地震中最强烈的地震动主要集中于卡赫拉曼马拉什—安塔基亚的狭长区域内, 该区域观测记录普遍具有双向速度脉冲特征, 地震动总残差与台站方位角有明显相关性, 推断 M_w 7.8 地震沿北东走向的东安纳托利亚断裂向北东向破裂传播, 同时沿南南西走向的东安纳托利亚断裂的卡赫拉曼马拉什—安塔基亚段向南南西方向破裂传播; (4) 模拟记录能大致反映近断层地震动强度及距离衰减特征, M_w 7.8 和 M_w 7.6 地震中破裂面附近地震烈度分别达到 IX 和 VIII 度, 烈度分布主要受破裂断层和局部场地条件的影响。

关键词 土耳其大地震; 强震动记录; 衰减特征; 震源破裂特征; 地震动模拟

doi: [10.6038/cjg2023R0092](https://doi.org/10.6038/cjg2023R0092)

中图分类号 P315

收稿日期 2023-02-16, 2023-07-04 收修定稿

Characteristics and simulations of ground motions in Turkey M_w 7.8 and M_w 7.6 great earthquakes on 6 February 2023

WANG HongWei^{1,2}, QIANG ShengYin^{1,2}, WEN RuiZhi^{1,2*}, REN YeFei^{1,2}

1 Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

2 Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China

Abstract Two great earthquakes with M_w 7.8 and M_w 7.6 successively hit southeast Turkey on 6 February 2023. The dense strong-motion observation networks captured large numbers of strong-motion recordings from both events. The recordings after manually processing were used to analyze the attenuation characteristics of ground motions by comparisons with the ground-motion prediction equations applicable for Turkey. We then investigated the spatial distribution of near-fault ground motions, the generation of pulse-like velocity

基金项目 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2020C05); 国家自然科学基金项目(U1901602); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2020E021)资助。

第一作者简介 王宏伟, 男, 1990 年生, 副研究员, 主要从事地震动特征及模拟研究. E-mail: whw1990413@163.com

*** 通讯作者** 温瑞智, 男, 1968 年生, 研究员, 主要从事强震动观测、工程地震等研究. E-mail: ruizhi@iem.ac.cn

waveforms, and the correlation between total residuals and station azimuths to provide some explanations on the source rupture characteristic of the M_w 7.8 event. Finally, the stochastic finite-fault method was used to simulate the three-component ground motions for mapping the instrumental seismic intensity. The meaningful conclusions were drawn as following. (1) The source effects of both Turkey events on ground motions are significantly stronger than the mean effect for shallow crustal earthquakes over Turkey. The stronger source effects on ground motions at moderate-to-long periods are observed in M_w 7.8 event than those in the M_w 7.6 event. (2) Compared with the average level in Turkey, the far-field ground motions in both events showed the stronger anelastic attenuation. (3) The strongest ground motions in the M_w 7.8 event are concentrated in a narrow region from Kahramanmaraş in the north to Antakya in the south where most strong-motion recordings were characterized by the bilateral velocity pulse. The total residuals show a significant dependency on the station azimuth. Comprehensively considering these phenomena, we inferred that the M_w 7.8 event ruptured to the northeast along the northeast-trending East Anatolia fault, meanwhile ruptured to the south-southwest along the south-southwest-trending Kahramanmaraş-Antakya section of East Anatolia fault. (4) The simulated ground motions roughly describe the intensity of near-fault ground motions and the attenuation trend with distance. The instrumental seismic intensities around the ruptured fault plane reach IX and VIII in the M_w 7.8 and M_w 7.6 events, respectively. The spatial distributions of intensity were mainly affected by the fault rupture and local site effects.

Keywords Great Turkey earthquakes; Strong-motion recordings; Attenuation characteristics; Source rupture characteristic; Ground-motion simulations

0 引言

据土耳其灾害和应急管理局(AFAD, <https://tadas.afad.gov.tr/>)测定, 2023 年 2 月 6 日 01:17(UTC)土耳其卡赫拉曼马拉什省(Kahramanmaraş)帕扎尔克(Pazarcık)发生 M_w 7.7 地震, 震中位于 37.288°N、37.043°E, 震源深度 8.6 km, 当天 10:24(UTC)卡赫拉曼马拉什省埃尔比斯坦(Elbistan)再次发生 M_w 7.6 地震, 震中位于 38.089°N、37.239°E, 震源深度 7 km, 两次地震的震中相距约 96 km. 美国地质调查局(USGS)测定的第一次地震的震中位于 37.174°N、37.032°E, 震源深度 17.9 km, $M_w = 7.8$, 第二次地震的震中位于 37.203°N、38.024°E, 震源深度 10.0 km, $M_w = 7.6$. 根据不同机构提供的震源机制解(AFAD、USGS、Global CMT), 两次地震均为走滑型地震. 截至 2 月 12 日 23:00(UTC), 已发生 4.0 级以上余震 171 次, 其中 6.0~6.9、5.0~5.9 和 4.0~4.9 级余震分别有 1、17 和 153 次, 01:28(UTC)在第一次地震震中西北约 18 km 处发生 M_w 6.6 最大余震.

土耳其主要位于欧亚板块、非洲板块、阿拉伯板块碰撞交汇的安纳托利亚板块上, 其北部和东部分别以近东西走向延伸 1500 km 的右旋走滑北安纳托利亚断裂带(NAFZ)和北东走向延伸 550 km 的左

旋走滑东安纳托利亚断裂带(EAFZ)为边界(Bozkurt, 2001), 土耳其历史地震主要发生于 NAFZ 和 EAFZ (Zare et al., 2014). 这两次土耳其大地震均发生于 EAFZ 西南段, EAFZ 由一系列平行、近似平行或倾斜于总体走向的断层组成, 从东北部的卡尔勒奥瓦(Karlıova)延伸至西南部的卡赫拉曼马拉什, 其东北端与 NAFZ 东端交汇, 是安纳托利亚板块、阿拉伯板块和欧亚板块的三重交汇处, 其西南端与近南北走向的左旋走滑的死海断裂带北端交汇, 是安纳托利亚板块、阿拉伯板块和非洲板块的三重交汇处. 根据震源机制解及地震序列震中分布, 土耳其 M_w 7.8 地震可能发生于北东走向的 EAFZ 主断裂西南端, 而土耳其 M_w 7.6 地震可能发生于近东西走向的 EAFZ 分支断裂(Sürgü断裂), 该断裂是主断裂在切利汗(Celikhan)附近的西侧分叉, 与主断裂夹角约为 30° (Koç and Kaymakci, 2013). EAFZ 是土耳其地震最为活跃的地区之一, 也是地震危险性最高的地区之一, 历史上曾经发生过多 次破坏性大地震, 例如 1939 年埃尔津坎(Erzincan) 8.0 级地震、1949 年 Elmalıdere-Bingöl 7.1 级地震、1992 年埃尔津坎 6.8 级地震、2020 年 Doganyol M_w 6.7 地震等等, M_w 7.8 地震的破裂面大致是 2020 年 Doganyol M_w 6.7 地震破裂面向西南方向的进一步延续(Lin et al., 2021). 中东

地震区划图中该地区 50 年超越概率 10% 和 2% 的基岩场地 ($V_{S30}>800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的峰值地面加速度 (PGA) 均分别达到 0.5g 和 1.0g 的最高水平 (Şeşetyan et al., 2018).

土耳其的强震动观测台网系统自 2006 年开始运行, 2006 年之前, 仅在 Duzce 和 Eskisehir 布设了两个强震动观测台站, 截至 2023 年, 已建成了覆盖土耳其全境范围的 857 个强震动观测台站组成的密集强震动观测台网, 主要安装了瑞士 GeoSig 生产的 GMS 型强震仪、英国 Guralp 生产的 CMG-5T 型强震仪和意大利 SARA 生成的 ACEBOX 型强震仪, 数字采集器采样率主要为 100 Hz. 土耳其强震动观测台网在两次大地震中均获取了大量强震动观测记录, AFAD 公开发布了这些观测记录, 这些观测记录对认识两次地震的地震动特征、了解震源破裂特征、解释地震破坏等均具有重要价值. 本文通过对土耳其地区的地震动预测方程, 分析两次地震的震源效应和衰减特征, 通过分析近断层地震动空间分布、速度脉冲的产生及观测台站方位相关的地震动总残差揭示 $M_w7.8$ 地震的震源破裂特征, 考虑区域衰减特征和局部场地效应, 模拟了两次地震的地震动场, 基于模拟记录给出了两次地震的影响场.

1 强震动观测数据

土耳其强震动观测台网在土耳其 $M_w7.8$ 和 $M_w7.6$ 地震中分别获取了 275 组和 239 组三分量自由场加速度记录, 通过人工波形检查删除了加速度波形有问题的部分记录 (噪声、严重丢尾), 分别保

留了土耳其 $M_w7.8$ 和 $M_w7.6$ 地震中 251 组和 233 组质量可靠的记录用于地震动特征分析 (见图 1). 对这些记录进行常规处理, 包括基线校正、记录首尾加窗补零、0.1~25 Hz 四阶巴特沃斯带通滤波, 计算了各种地震动强度指标 (GMIM), 包括 PGA、峰值地面速度 (PGV)、0.05~8 s 谱周期的 5% 阻尼比拟加速度反应谱 (PSA)、显著持时等. 根据 USGS 测定的震中位置和震源深度, 计算了记录震中距 (R_{epi}) 和震源距 (R_{hyp}); 根据北京大学张勇教授基于远震资料反演的震源破裂模型 (ZYM, <https://pku-geophysics-source.group/>), 破裂面地表投影见图 1, 计算了记录的破裂距 (R_{rup}) 和 Joyner-Boore 距离 (R_{JB}). 记录 R_{JB} 分布如图 2 所示, $M_w7.8$ 地震中获取了 17 组 $R_{\text{JB}}<20\text{ km}$ 的近断层记录, 其中 2718 和 3413 台站在破裂面地表投影范围内, $R_{\text{JB}}=0\text{ km}$, $M_w7.6$ 地震中仅获取 1 组 $R_{\text{JB}}<20\text{ km}$ 的近断层记录 (4612 台站). $M_w7.8$ 地震中最大 PGA 记录由 $R_{\text{JB}}=19.62\text{ km}$ 的 4614 台站获得, 其东西、南北、竖向分量 PGA 分别为 1970.44、1854.80、1370.43 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$, $M_w7.6$ 地震中最大 PGA 记录由 $R_{\text{JB}}=5.41\text{ km}$ 的 4612 台站获得, 其东西、南北、竖向分量 PGA 分别为 525.11、641.48、425.13 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$.

2 地震动衰减特征

地表观测的地震动是地震震源、传播介质和局部场地综合作用的结果, 地震动衰减特征反映了 GMIM 随观测台站至破裂断层距离的变化规律, 准确评估地震动衰减特征是合理预测地震动及震害分布的基础工作. 土耳其 $M_w7.8$ 和 $M_w7.6$ 地震中地震

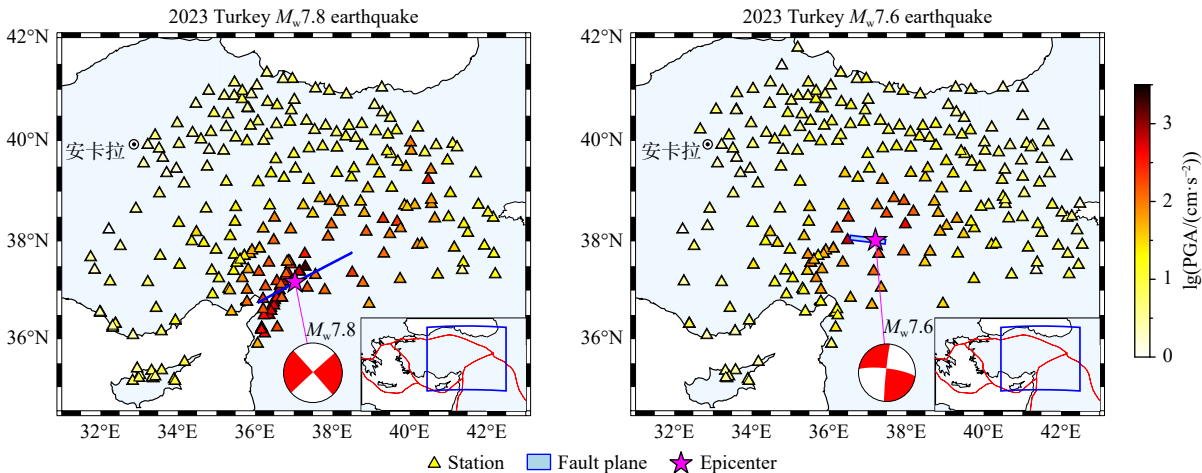


图 1 两次地震中强震动记录台站的空间位置
Fig 1 Geographical coordinates of the strong-motion stations triggered during the Turkey $M_w7.8$ and $M_w7.6$ earthquakes, respectively

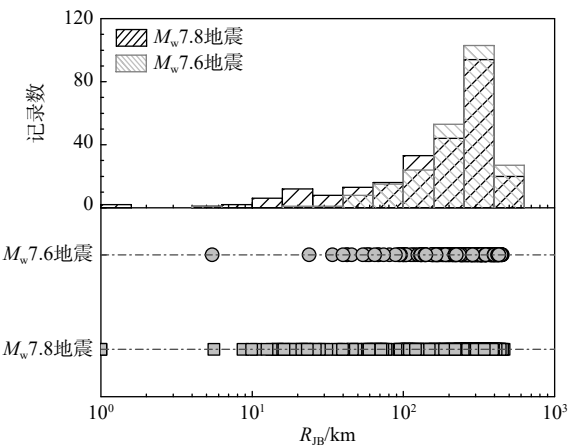


图 2 两次地震中观测记录的 R_{JB} 分布

Fig. 2 The Joyner-Boore distances (R_{JB}) of the recordings from both Turkey earthquakes

动观测记录水平向 PGA、PGV、部分周期 PSA 随 R_{JB} 的衰减分别如图 3、4 所示, 水平向 GMIM 为两个正交水平分量 GMIM 的几何平均值. Kale 等(2015) 基于土耳其强震动观测数据建立了适用于土耳其地区的地震动预测模型(K15 模型), K15 模型考虑了震级项、断层类型项、震级相关的几何扩散衰减项、 $R_{JB} > 80$ km 的 GMIM 的非弹性衰减项、 V_{S30} (地

下 30 m 土层等效剪切波速) 相关的线性和非线性场地项. 利用 K15 模型分别给出了土耳其 M_w 7.8 和 M_w 7.6 地震中观测台站的水平向 PGA、PGV、PSA 预测中位值, 并与观测值进行对比(见图 3、4). 总残差反映了预测中位值与观测值的对数偏差, 总残差大于(小于)0 说明观测值被低估(高估), 两次地震 PGA、PGV、PSA 的总残差如图 5 所示, 总残差主要在 ± 1.0 范围内(预测中位值是观测值的 0.1~10 倍), 整体在 0 附近波动, 总残差与 R_{JB} 相关, 随 R_{JB} 减小总残差近似呈减小的趋势. $R_{JB} \leq 200$ km 记录的总残差普遍大于 0, 在 0.2 附近变化(0.63 倍), 随周期变化不明显; 远场记录($R_{JB} > 200$ km)总残差普遍小于 0, 且随周期变化明显, PGA、PGV 和短周期(< 0.2 s) PSA 的总残差在 $-0.2 \sim 0.0$ 范围内波动(1.6~1.0 倍), 而中长周期 PSA(0.2~4.0 s)的总残差大致在 -0.4 至 -0.6 范围内波动(2.5~4.0 倍). K15 模型整体上略低估了两次地震的近场地震动, 对远场短周期地震动略有高估, 明显高估了远场中长周期地震动.

进一步将总残差分解为表示震源影响的事件间残差和表示路径和场地影响的事件内残差两部分 (Al Atik et al., 2010), 两次地震水平向 PGA、PGV、

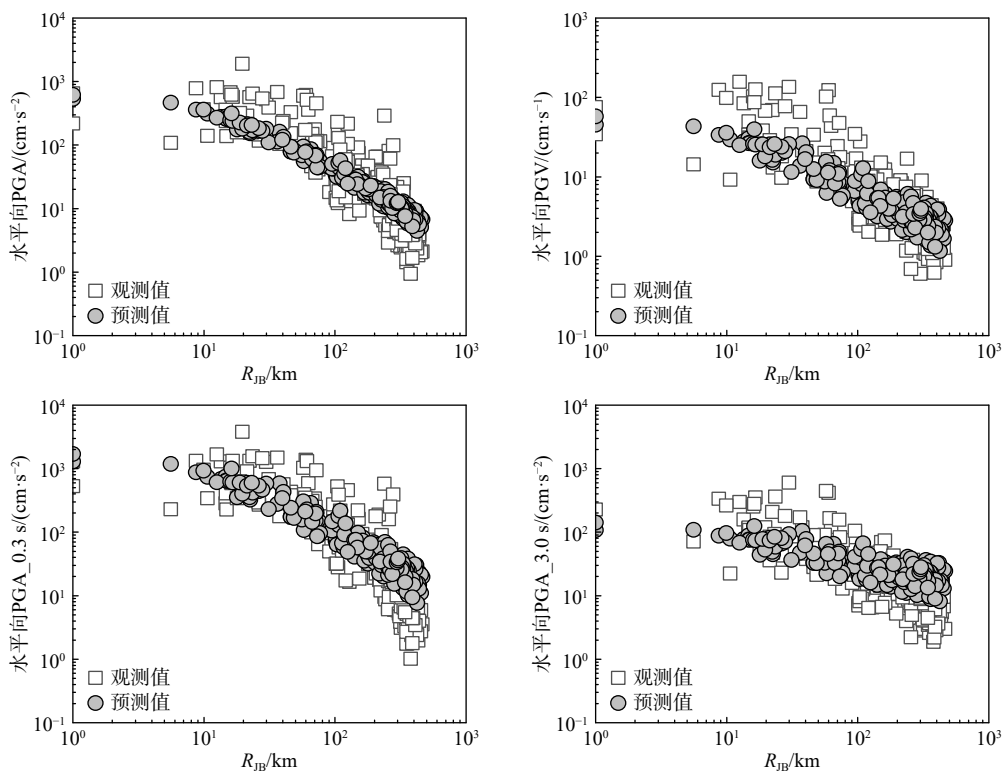


图 3 土耳其 M_w 7.8 地震中记录水平向 PGA、PGV、周期 0.3 s 和 3.0 s 的 PSA 与 K15 模型预测中位值对比, 位于纵坐标轴上的观测记录的 R_{JB} 为 0 km

Fig. 3 Comparisons of the observed horizontal PGAs, PGVs, and PSAs at periods of 0.3 and 3.0 s from the Turkey M_w 7.8 earthquake with the predicted medians of the K15 model. The R_{JB} values are equal to 0 km for those on the vertical axis

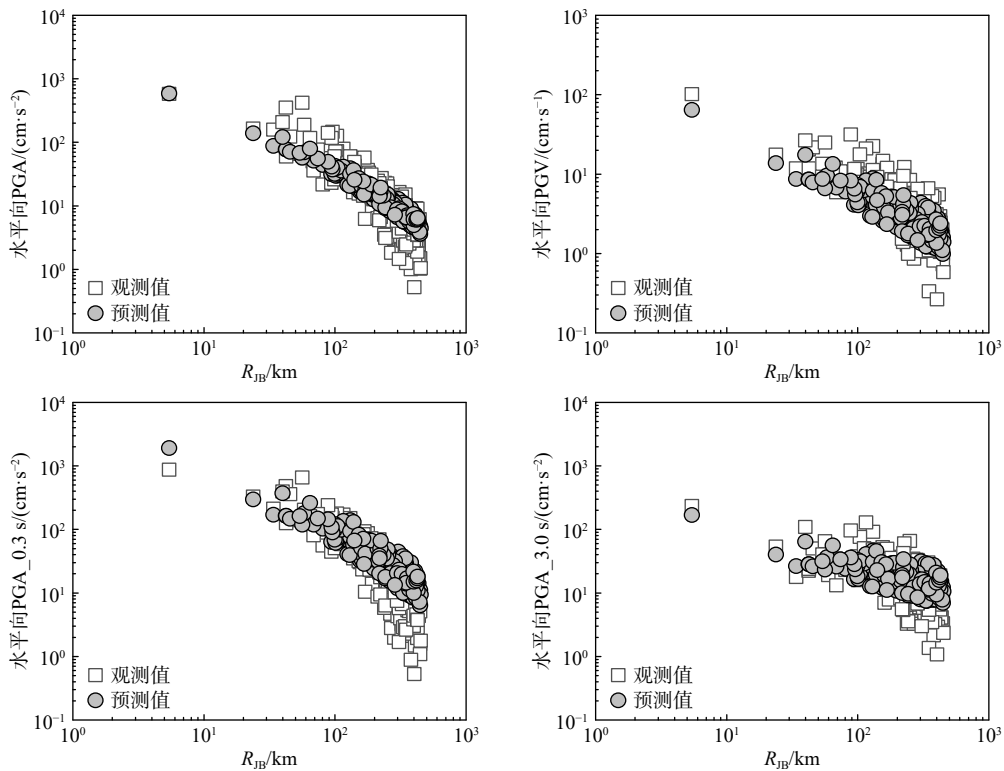


图 4 土耳其 M_w 7.6 地震中记录水平向 PGA、PGV、周期 0.3 s 和 3.0 s 的 PSA 与 K15 模型预测中位值对比

Fig. 4 Comparisons of the observed horizontal PGAs, PGVs, and PSAs at periods of 0.3 and 3.0 s from the Turkey M_w 7.6 earthquake with the predicted medians of the K15 model

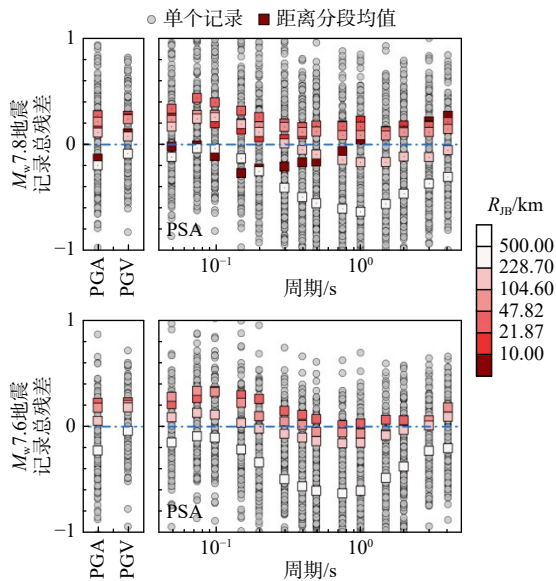


图 5 两次地震中记录水平向强度指标 (PGA、PGV、PSA) 的总残差以及各指标的距离分段的残差平均值

Fig. 5 The total residuals of the horizontal ground-motion intensity measures (PGAs, PGVs, and PSAs) for both Turkey earthquakes. The residual means in each distance bin were also plotted for each ground-motion intensity measure

PSA 的事件间残差如图 6 所示。除 M_w 7.6 地震中 0.5~1.5 s 的 PSA 事件间残差小于 0, 两次地震事件

间残差均不小于 0, 这说明与土耳其地区浅地壳地震的地震动平均震源效应相比, 两次地震的震源效应更强, 同时两次地震短周期 (< 0.2 s) PSA 事件间残差明显大于中长周期, 这说明两次地震短周期地震动的震源效应更强于平均震源效应。两次地震中 PGA 和短周期 (< 0.2 s) PSA 的事件间残差接近, 但对于中长周期 (0.2~4.0 s) PSA 事件间残差, 尤其是 0.5~3.0 s 周期段, M_w 7.8 地震明显大于 M_w 7.6 地震, 说明 M_w 7.8 地震对中长周期地震动的震源效应比 M_w 7.6 地震更强烈。

两次地震水平向 PGA、PGV 和部分周期 PSA 的事件内残差如图 7 所示, 远场事件内残差整体上小于 0, 且随距离增大整体上呈下降趋势, 说明两次地震中远场地震动的非弹性衰减明显强于土耳其地区的平均水平, 远场事件内残差 (δW_{es}) 随 R_{JB} 的变化可近似表示为

$$\delta W_{es} = \Delta b_{10} (R_{JB} - R_{ref}) + \Delta,$$

其中参考距离 $R_{ref} = 80$ km (Kale et al., 2015), Δ 表示近场事件内残差的均值, Δb_{10} 表示 K15 模型中非弹性衰减系数 (b_{10}) 的调整值, 两次地震的 Δb_{10} 值如图 7 所示, 两次地震中地震动 PGA、PGV、PSA 的 Δb_{10}

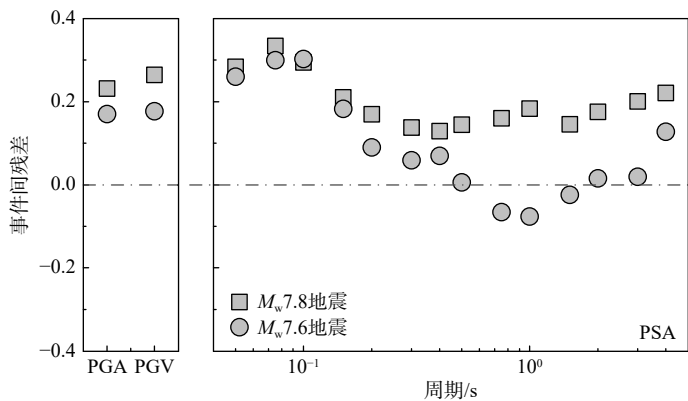


图 6 两次地震水平向 PGA、PGV 以及 0.05~4.0 s 周期 PSA 事件间残差

Fig. 6 The inter-events residuals of the horizontal PGA, PGV, and PSAs at periods of 0.05~4.0 s for both Turkey earthquakes

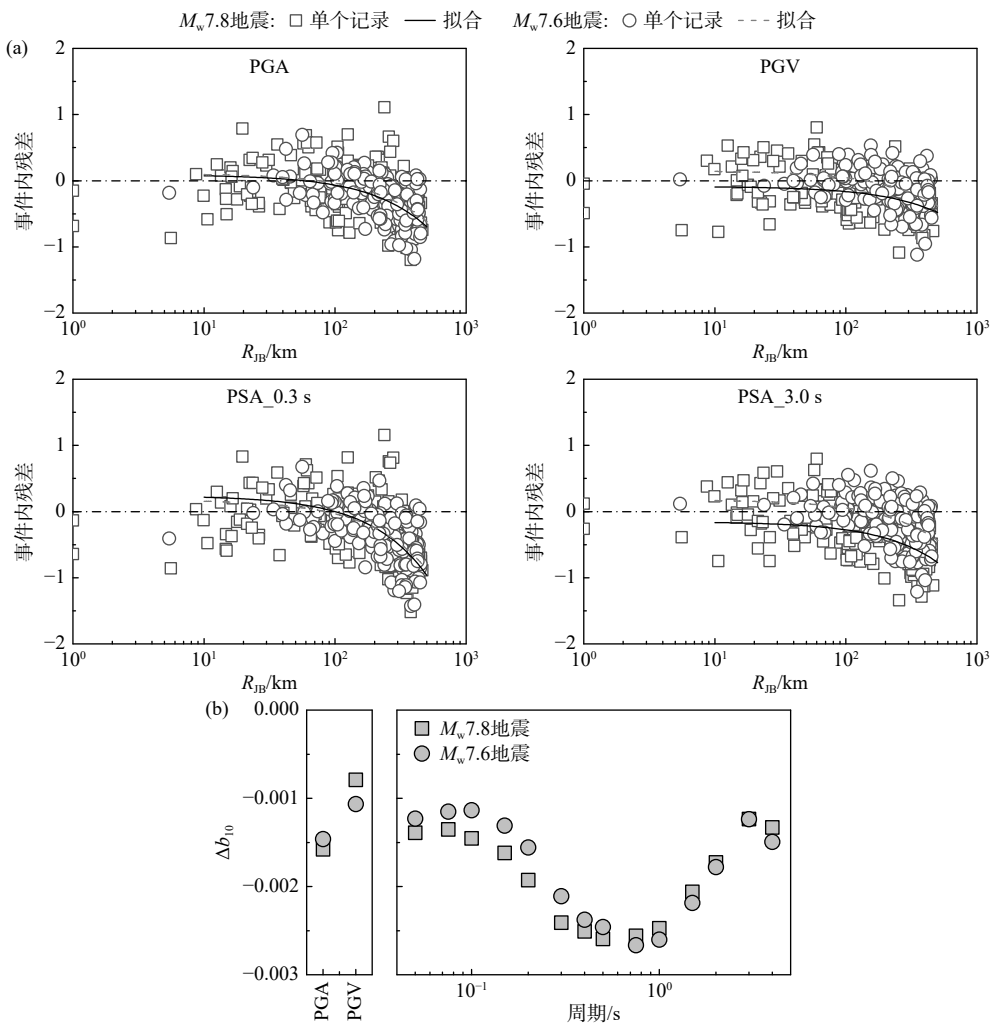


图 7 两次地震(a)水平向 PGA、PGV 以及 0.05~4.0 s 周期 PSA 的事件内残差, (b)反映非弹性衰减的系数 Δb_{10}

Fig. 7 The intra-event residuals of the horizontal PGA, PGV, and PSAs at periods of 0.05~4.0 s (a), and the adjustment coefficients (Δb_{10}) of the anelastic attenuation (b) for both Turkey earthquakes

值在-0.001 至-0.003 范围内变化, Δb_{10} 与周期相关, 随着周期的增大呈先减小后增大的大致趋势, 0.75 s 的 PSA 的 Δb_{10} 值最小, 说明两次地震中 0.75 s 附近周期的地震动的非弹性衰减最强烈.

3 近断层的地震动

大地震的震源破裂过程对近断层地震动具有显著的影响,例如地震动的上盘效应、破裂方向性效应等,土耳其 M_w 7.8 地震中获取了很多近断层记录,根据 ZYM, M_w 7.8 地震的破裂面走向 243° 、倾角 86° 、倾向北北西,根据图 1 给出的水平向地震动 PGA 的空间分布, M_w 7.8 地震中最强烈的地震动并非集中于 ZYM 地面投影附近的小区域内,而是集中于与破裂面走向呈一定夹角的从卡赫拉曼马拉什延伸至安塔基亚(Antakya)的狭长区域内(见图 1)。

破裂方向性效应主要表现为地震动的强度、持时与记录台站相对破裂面方位的相关性,一般来说,破裂前方比破裂后方的地震动幅值大、持时短. 本文根据 ZYM 破裂面走向、USGS 测定的震中位置及观测台站位置,将观测台站划分为 SW1、SW2、NE 三组(见图 8),以震中指向破裂面走向(243°)起顺时针旋转至震中与观测台站的夹角为观测台站方位角,方位角 $330^\circ\sim 360^\circ$ 、 $0^\circ\sim 30^\circ$ 、 $150^\circ\sim 210^\circ$ 观测台站分别为 SW1、SW2 和 NE 组(图 8 中蓝色三角形、红色三角形和绿色正方形),NE 组近断层台站

较少,尽管在 NE 方向近断层区域布设有大量强震动台站(图 8 中灰色十字形),但这些台站并未获取到记录,这可能与地震造成的通讯中断或者台站破坏有关. 三组台站观测记录的总残差如图 9 所示,NE 组总残差普遍高于 SW2 组,SW1 和 SW2 组中近断层观测台站($R_{JB} < 20$ km)的记录总残差大致处于相近水平,但 SW1 组距离断层破裂面更远的观测台站($R_{JB} = 20\sim 60$ km)的记录总残差明显高于 SW2 组和 NE 组的整体水平. 我们也注意到 SW1 组记录总残差近似随 R_{JB} 增大呈增大趋势,这说明 SW1 组台站随 R_{JB} 的增大,预测中位值的低估更严重.

进一步基于 Shahi 和 Baker(2014)提出的速度脉冲型地震动的识别方法,识别 M_w 7.8 土耳其地震的观测记录是否是脉冲型地震动,该方法对两个正交水平分量(EW 和 NS 分量)速度时程的线性组合进行连续小波变换,提取速度脉冲,确定脉冲周期,利用脉冲指标判别脉冲地震动. 18 组记录被识别为脉冲型地震动(见表 1),脉冲周期主要在 $3\sim 8$ s 范围内,脉冲地震动的速度时程以及提取的速度脉冲如图 10 所示. 脉冲型地震动主要是由破裂传播方向性效应或滑冲效应引起的,破裂传播方向性引起的

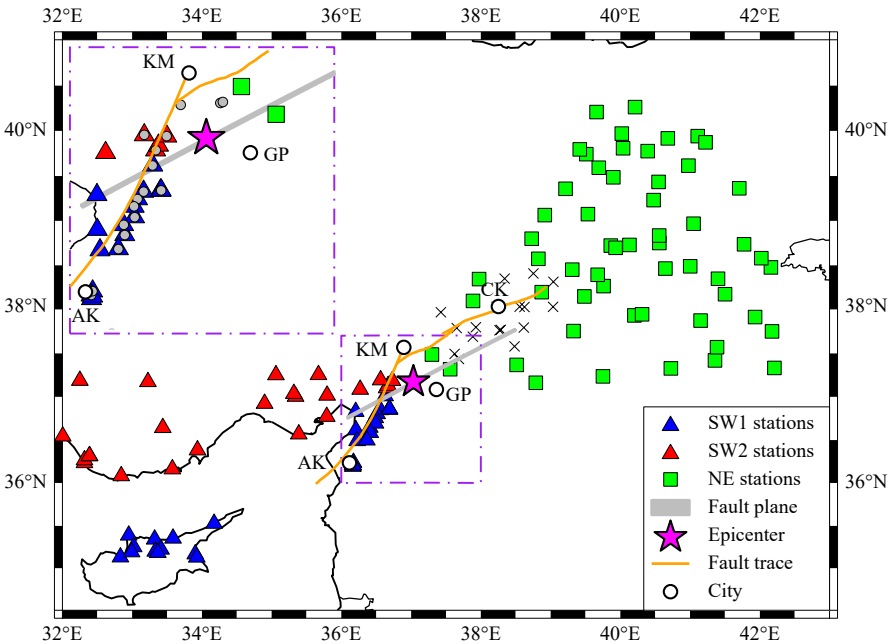


图 8 台站根据其相对断层破裂面位置的分组以及识别为速度脉冲型地震动的台站位置

蓝色三角形、红色三角形、绿色正方形、灰色圆圈分别表示 SW1、SW2、NE 组观测台站及记录到速度脉冲的观测台站, KM、GP、AK、CK 分别为卡赫拉曼马拉什、加济安泰普、安塔基亚、切利汗,左上角插图为震中附近区域的放大.

Fig. 8 Classifications of the stations based on the locations with respect to the ruptured fault plane and the station recorded the pulse-like velocity waveforms

Blue triangles, red triangles, green squares, and gray circles represents observation stations classified into the SW1, SW2, NE groups and observation stations recorded the pulse-like data, respectively. KM, GP, AK, and CK are short for Kahramanmaras, Gaziantep, Antakya, and Celikhan, respectively. The inset in the upper left corner shows an enlargement of the small area near the epicenter.

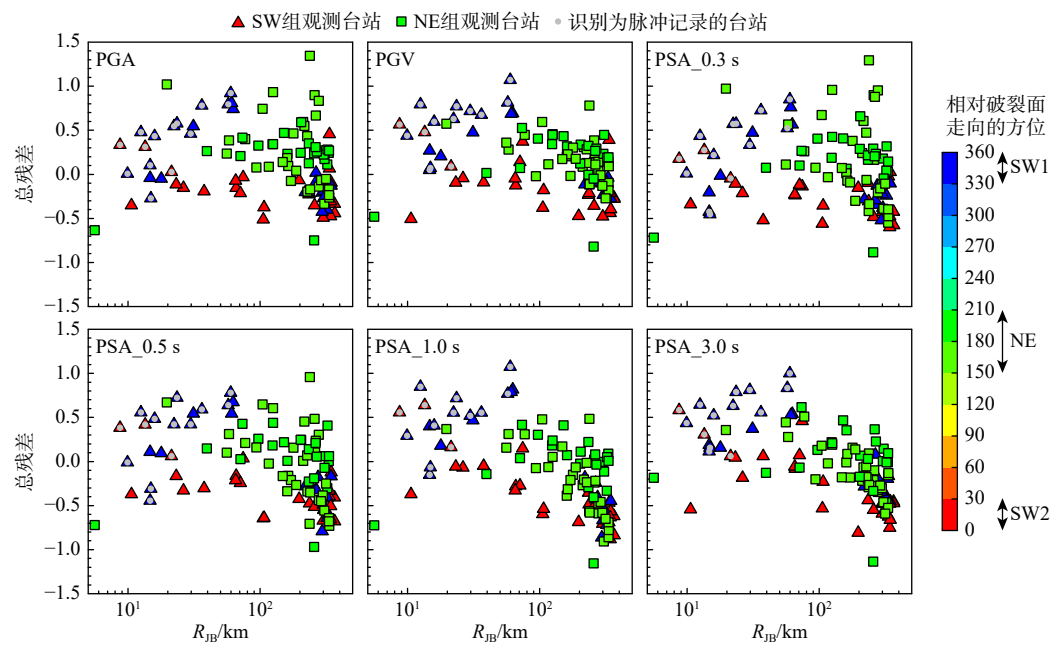


图 9 根据台站相对断层破裂面位置进行分组(颜色表示)的台站的地震动强度指标的总残差

Fig. 9 The ground-motion intensity measures (GMIMs) total residuals of recordings from stations classified into various groups (various colors) based on the locations with respect to the ruptured fault plane

表 1 识别的脉冲型地震动

Table 1 The identified pulse-like ground motions							
记录台站	台站经度	台站纬度	R_{JB} (km)	水平PGV ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	脉冲PGV ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	残余PGV ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_p (s)
2708	36.64837	37.09933	8.70	150.20	88.32	82.42	3.094
2712	36.73283	37.18400	13.46	103.11	38.69	74.14	6.132
2715	36.68562	36.85537	14.68	43.56	39.39	11.60	5.796
2717	36.69099	36.85548	14.89	44.05	38.19	12.39	5.782
2718	36.62660	37.00777	0.00	98.61	71.75	50.31	5.418
3123	36.15973	36.21423	59.95	181.00	127.74	73.90	2.520
3124	36.17220	36.23870	57.37	108.81	90.83	68.46	3.570
3137	36.48852	36.69293	22.29	71.11	36.18	44.36	8.596
3138	36.51119	36.80262	12.50	159.40	79.52	101.65	5.768
3139	36.41439	36.58383	29.83	141.26	146.63	68.49	3.052
3142	36.36612	36.49797	36.19	57.89	41.92	36.44	4.032
3143	36.55714	36.84891	9.91	138.43	63.98	95.65	6.706
3144	36.48574	36.75691	15.91	111.01	77.29	63.66	4.760
3145	36.40640	36.64536	23.47	130.06	91.92	71.93	4.186
4615	37.13803	37.38676	16.53	130.40	84.54	46.21	5.166
4616	36.83836	37.37547	27.84	82.44	40.77	59.17	7.014
8002	36.56195	37.19156	21.35	34.13	23.03	19.14	7.644
NAR	37.15740	37.39190	16.24	106.35	71.36	40.10	4.578

速度脉冲表现为双向速度脉冲 (Somerville et al., 1997), 而滑冲效应引起的速度脉冲表现为单向脉冲 (Somerville, 2005), 识别的 M_w 7.8地震的脉冲型地震动主要表现为双向速度脉冲, 其产生主要与破裂传

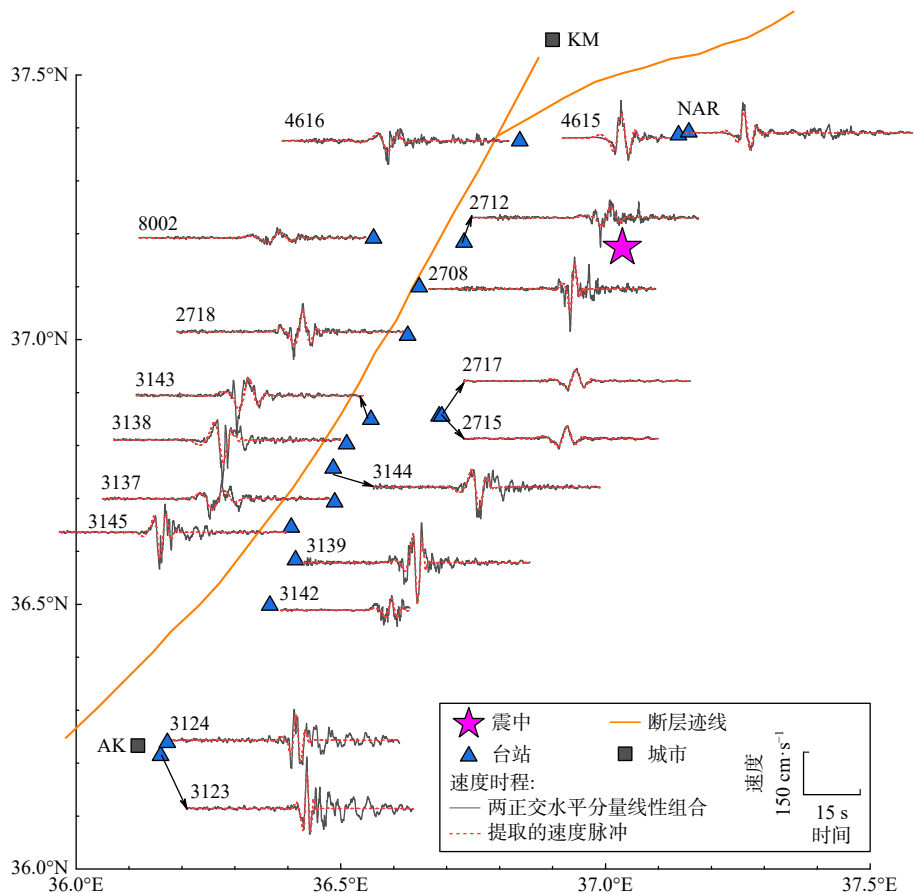


图 10 脉冲型记录的速度时程以及提取的速度脉冲
时程上的数字(如 4615)或字母(如 NAR)为台站代码, KM 和 AK 分别表示卡赫拉曼马拉什和安塔基亚.

Fig. 10 Pulse-like velocity waveforms and the extracted velocity pulse
Numbers, such as 4615, or characters, such as NAR on top of the waveforms are the station codes.
KM and AK are short for Kahramanmaras and Antakya, respectively.

播方向性有关,图 8 中标识出了获取脉冲型地震动的观测台站位置(灰色圆),这些观测台站大体上为 SW1 组近断层台站,这说明 SW1 方向可能是破裂传播的前方.

结合地震动空间分布、地震动总残差与观测台站位置的相关性以及识别的速度脉冲型地震动的位置,大致判断土耳其 $M_w7.8$ 地震自破裂起始点开始,沿近北东方向的 EAFZ 向北东向破裂传播,同时沿南南西走向的 EAFZ 的卡赫拉曼马拉什—安塔基亚断裂向南南西方向破裂传播,因此观测的最强的地震动集中于卡赫拉曼马拉什—安塔基亚的狭长区域内,破裂前方的 NE 组和 SW1 组观测台站地震动总残差明显高于 SW2 组,基于 ZYM 模型计算的 SW1 观测台站 R_{JB} 高估且 R_{JB} 越大时高估越严重,SW1 组预测值因 R_{JB} 高估而偏小严重,总残差明显偏大,破裂前方的 SW1 组台站记录普遍表现为双向速度脉冲型地震动.

4 地震动模拟

两次地震破裂断层靠近土耳其南部边境,尤其是 $M_w7.8$ 地震,仅获取了土耳其境内的强震动记录,破裂断层南部叙利亚境内并未获得强震动观测记录.为全面了解两次地震的地震动影响场的分布情况,本文采用随机有限断层三维地震动模拟方法(王宏伟等, 2021)分别模拟土耳其 $M_w7.8$ 和 $M_w7.6$ 地震中距离地震破裂面一定范围内 6262 和 4553 个虚拟观测点的三分量(EW、NS、UD)的加速度时程,该方法分别模拟子断层源产生的 P、SV 和 SH 波,考虑破裂传播过程的时间延迟叠加子断层源产生的 P、SV 和 SH 波得到三分量的地震动加速度时程.

两次地震的震源破裂模型均采用了北京大学张勇教授基于远震资料的反演结果, $M_w7.8$ 地震破裂面长度和宽度分别为 240 km 和 30 km,根据 Aki (1972)给出的细长型矩形破裂面的地震应力降表达

式, $M_w7.8$ 地震应力降为 6.76 MPa, 而 $M_w7.6$ 地震为在 $80\text{ km} \times 30\text{ km}$ 的倾角 70° 的破裂面上的走滑地震, 地震破裂至地表面, 根据诺波夫断层模式 (Knopoff, 1958), $M_w7.6$ 地震的应力降为 4.98 MPa, 与 Bindi 和 Kotha(2020) 谱反演估计的意大利—爱琴海—安纳托利亚地区 $M_w \geq 5.5$ 地震的平均应力降 6.02 MPa 接近. 地震应力降的不确定性很大, 根据理论模型计算的两次地震的应力降可能与地震实际应力降有差距, 这可能会导致地震动模拟结果, 尤其是高频地震动, 与实际观测有一定偏差. 衰减模型采用了 Bindi 和 Kotha(2020) 基于谱反演给出的爱琴海和安纳托利亚地区的几何扩散 ($-1.0, R \leq 10\text{ km}; -1.03480, 10\text{ km} < R \leq 52\text{ km}; -0.57393, 52\text{ km} < R \leq 147\text{ km}; -1.21310, R > 147\text{ km}$) 和 S 波品质因子 ($Q_s = 182.4f^{0.36}$), 根据 P 波品质因子 Q_p 与 Q_s 之比为 1.5 (Sato et al., 2002; 王勤彩等, 2005) 给出 Q_p , S 波路径延时模型采用了 Boore 和 Thompson (2014) 基于 NGA-West2 强震动记录数据库建立的活动地壳区 (ACR) 的模型, 采用 V_{s30} 相关的 SS14 场地效应模型 (Seyhan and Stewart, 2014) 考虑局部场地条件对地震动的影响, SS14 模型中参考基岩场地的 V_{s30} 为 $760\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相当于 NEHRP 规定的 B、C 类场地的分界 V_{s30} 值, 同时也考虑参考基岩场地对地震动的影响 (Atkinson and

Boore, 2006), 虚拟观测点的 V_{s30} 根据 USGS 基于地形坡度的全球 V_{s30} 估计值给出 (Worden et al., 2015). 模拟记录水平向 PGA、PGV 整体上与观测值具有较好的一致性 (见图 11), 地震动模拟结果大致能够反映两次地震中近断层地震动的水平以及地震动随距离的衰减趋势. 图 12 展示了基于 ZYM 给出的部分台站 (8002、2715、3143、3139、3124) 在 $M_w7.8$ 地震中的模拟记录加速度时程与观测记录的对比, 台站位置详见图 10, 这些台站均位于震中西南部 (卡赫拉曼马拉什—安塔基亚), 越是远离震中的西南部台站, 基于 ZYM 的模拟记录的幅值与观测值相差越大, 位于安塔基亚的 3124 台站模拟记录 PGA 是观测记录幅值的 1/10, 这主要与 ZYM 破裂面可能与包括了卡赫拉曼马拉什—安塔基亚段的实际地震破裂面不一致有关. 基于虚拟观测点三分量地震动加速度时程的模拟结果, 根据《中国地震烈度表 (GB/T17742-2020)》, 利用三分量合成 PGA 和 PGV 计算了各虚拟观测点的仪器地震烈度, $M_w7.8$ 和 $M_w7.6$ 地震的仪器地震烈度空间分布如图 13 所示. $M_w7.8$ 地震的最大烈度达到 X 度, 破裂面附近烈度普遍达到 IX 度, $M_w7.6$ 地震的最大烈度可达 X 度, 破裂面附近烈度普遍达到 VIII 度. 仪器地震烈度空间分布体现了震源破裂、局部场地条件的影响. 由于 $M_w7.8$

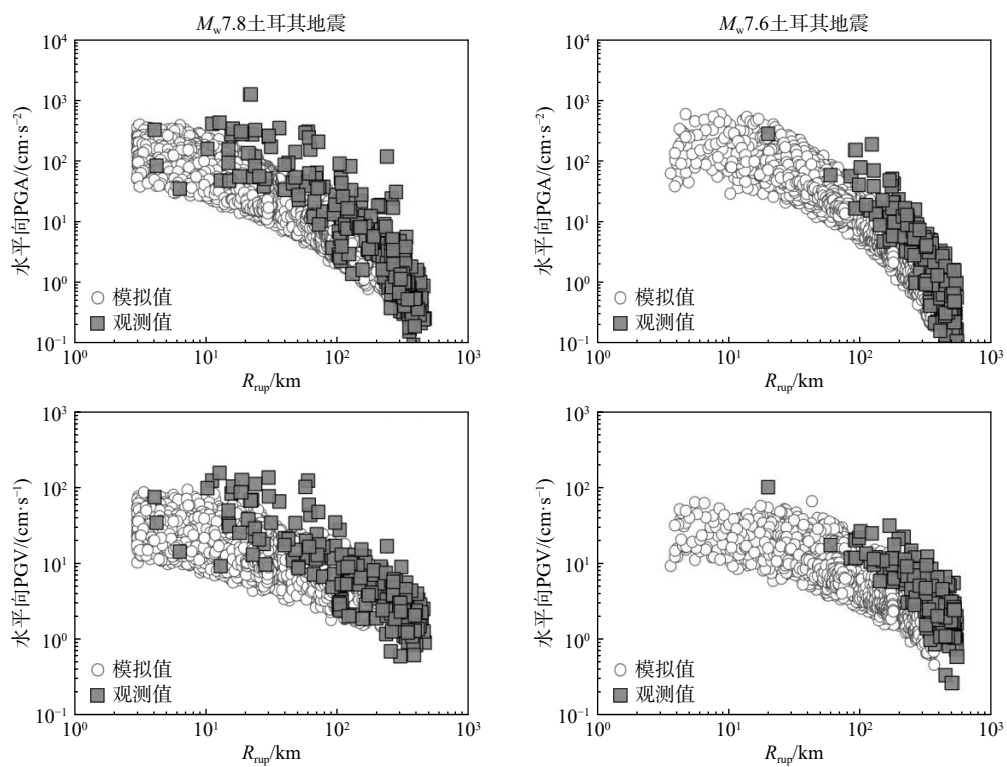


图 11 两次地震模拟与观测记录水平向 PGA、PGV 对比

Fig. 11 Comparisons of the horizontal PGAs and PGVs observations with the simulated ones for both Turkey earthquakes

地震断层面东南侧场地 V_{S30} 普遍小于西北侧, 受到局部场地条件的影响, 东南侧地震动衰减明显比西北侧慢, 叙利亚北部部分地区的仪器地震烈度达到 VIII 度. 杰伊汉 (Ceyhan) 附近区域以及安塔基亚北部的阿姆克山谷的地震烈度异常偏高也与局部场地条件有关, $M_w7.8$ 地震中两个地区的仪器地震烈度均达到 VIII 度, 这两个地区地震危险性分析中尤其需要考虑局部场地条件对地震动的显著放大作用. 根据近断层地震动特征分析, 推断 $M_w7.8$ 地震的破

裂面可能沿阿姆克山谷延伸, 近断层效应与局部场地放大效应的叠加作用下, 阿姆克山谷的地震动可能要强于采用 ZYM 的模拟结果, 烈度可能会达到 IX 度.

本研究根据强震动观测结果推断的 $M_w7.8$ 地震的破裂与 USGS 发布的破裂面模型相符, 图 14 中给出了破裂面地表投影, 图中破裂面为根据 Somerville 等 (1999) 的裁减方法裁减后的破裂面, 主要包括东北和南南西两段破裂面. 根据 USGS 破裂模型模拟

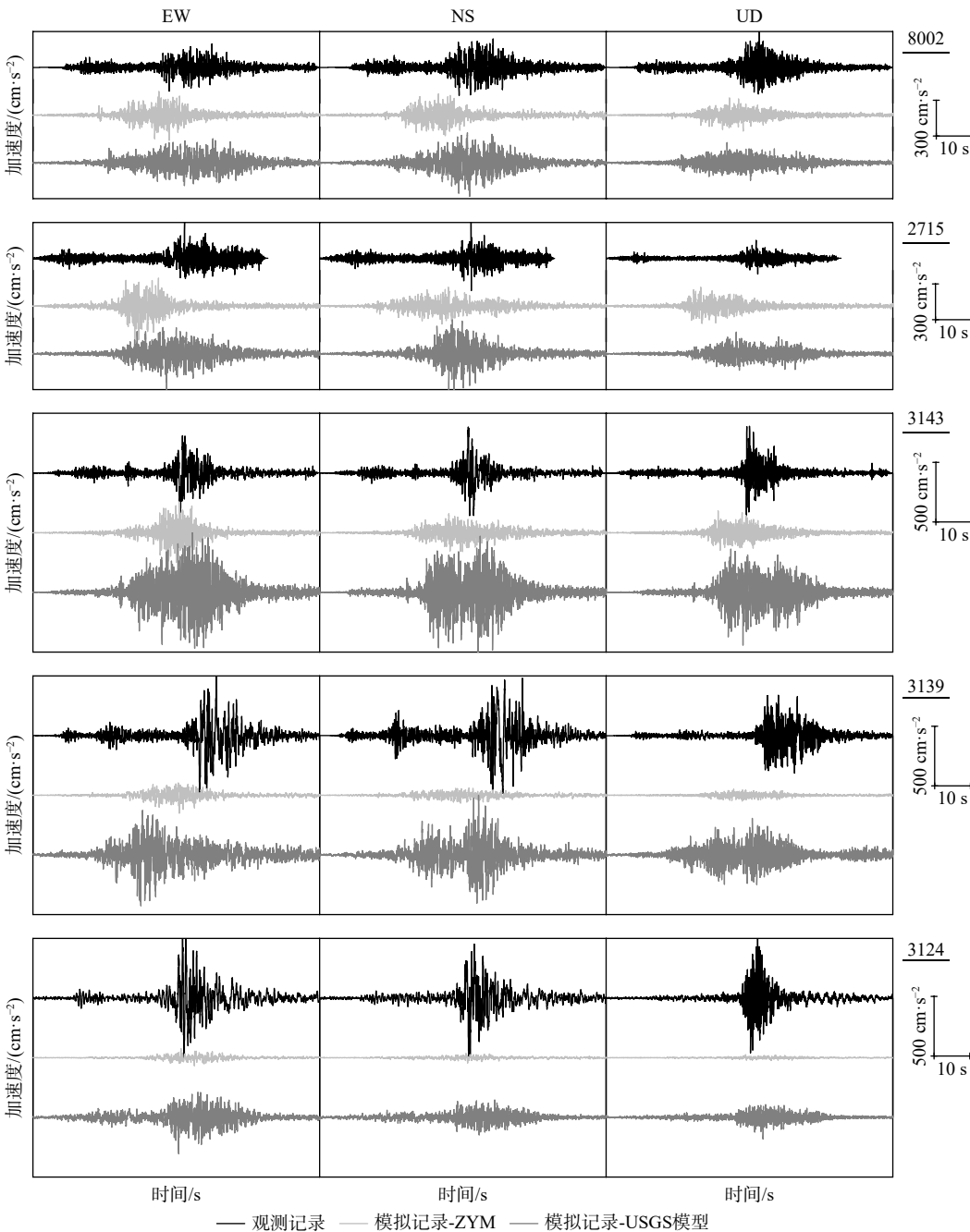


图 12 $M_w7.8$ 地震中部分台站的模拟与观测记录的加速度时程对比, 模拟记录分别基于 ZYM 和 USGS 模型
Fig. 12 Comparisons of the accelerations recorded at some station in the $M_w7.8$ event with those simulated based on the ZYM and the USGS model, respectively

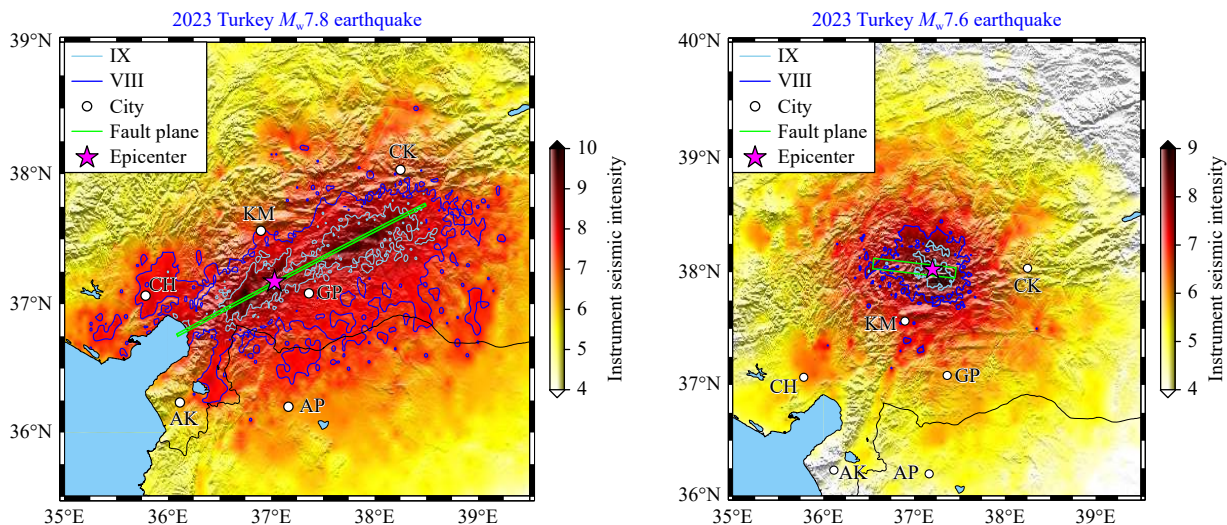


图 13 基于 ZYM 的三分量模拟记录给出的土耳其 M_w 7.8 和 M_w 7.6 地震的仪器地震烈度分布图

KM、GP、AK、CK、CH、AP 分别为卡赫拉曼马拉什、加济安泰普、安塔基亚、切利汗、杰伊汉、阿勒颇。

Fig. 13 Instrumental seismic intensities provided by the simulated three-component ground motions using ZYM for Turkey M_w 7.8 and M_w 7.6 earthquakes

KM, GP, AK, CK, CH, and AP are short for Kahramanmaras, Gaziantep, Antakya, Celikhan, Ceyhan, and Aleppo, respectively.

了 M_w 7.8 地震中距离地震破裂面一定范围内 5261 个虚拟观测点的三分量 (EW、NS、UD) 的加速度时程, 图 12 中同时对比了模拟给出的几个典型台站的加速度时程, 与基于 ZYM 破裂模型的模拟记录对比, 基于 USGS 破裂模型的模拟记录, 尤其是在远离震中的西南部, 能更好的体现观测记录的幅值, 基于模拟记录的仪器地震烈度空间分布如图 14 所示, 最大烈度达 X 度, IX 度的极震区范围受破裂面范围控制, 极震区也包括了震中东北和南南西两部分, 其中南南西方向的仪器地震烈度从基于 ZYM 的 VIII 增大到基于 USGS 模型的 IX. 基于 USGS 模型得到的仪器地震烈度空间分布大致与 USGS 提供的修正麦卡利烈度 (MMI) 图 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/map>) 一致, 尽管两者采用了不同的烈度表。

5 结论

2023 年 2 月 6 日土耳其两次大地震中获取了大量的强震动观测记录, 本文基于强震动观测记录, 重点分析了地震动的衰减特征、近断层地震动特征, 并根据地震动模拟记录给出了两次地震的影响场, 得到以下主要结论:

(1) 两次地震的震源效应明显强于土耳其地区浅地壳地震的平均震源效应, 尤其是对短周期 ($<0.2\text{ s}$) 地震动; M_w 7.8 地震对中长周期地震动的震源效应

比 M_w 7.6 地震更强烈; 两次地震中远场地震动的非弹性衰减明显强于土耳其地区的平均水平. 两次地震的近场地震动水平高于土耳其地区相同震级地震的平均水平, 但远场衰减更快, 两次地震更容易在近场区域造成更严重地震破坏。

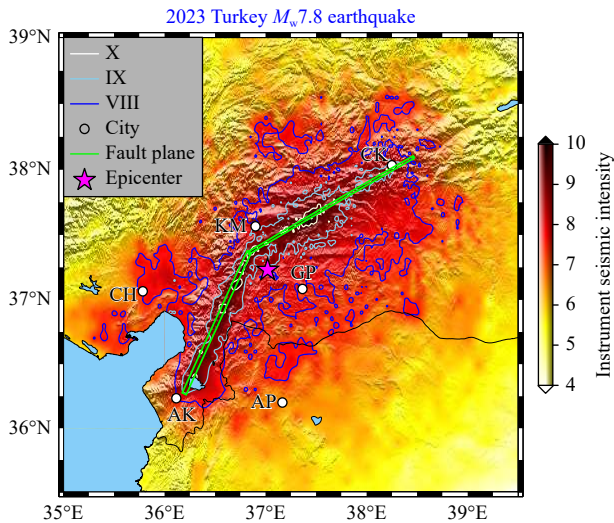


图 14 基于 USGS 破裂模型的三分量模拟记录给出的土耳其 M_w 7.8 地震的仪器地震烈度分布图

KM、GP、AK、CK、CH、AP 分别为卡赫拉曼马拉什、加济安泰普、安塔基亚、切利汗、杰伊汉、阿勒颇。

Fig. 14 Instrumental seismic intensities provided by the simulated three-component ground motions using the rupture model from USGS for Turkey M_w 7.8 earthquake

KM, GP, AK, CK, CH, and AP are short for Kahramanmaras, Gaziantep, Antakya, Celikhan, Ceyhan, and Aleppo, respectively.

(2) 土耳其 $M_w7.8$ 地震中最强烈的地震动主要集中于卡赫拉曼马拉什—安塔基亚的狭长区域内, 这个区域内的多数观测记录被识别为双向速度脉冲型地震动, 该区域地震动总残差大于 NE 和 SW2 组, NE 组记录总残差整体上大于 SW2 组, 综合这几方面的近断层地震动特征, 大致判断 $M_w7.8$ 土耳其地震自破裂起始点开始, 沿近北东方向的 EAFZ 向北东向破裂传播, 同时沿南南西走向的 EAFZ 的卡赫拉曼马拉什—安塔基亚断裂向南南西方向破裂传播, NE 组总残差高于 SW2 组以及卡赫拉曼马拉什—安塔基亚的狭长区域内记录的双向速度脉冲特征均与破裂方向性有关。

(3) 基于两次地震的 ZYM 给出了模拟的三分量加速度时程, 模拟记录水平向 PGA、PGA 能大致反映近断层地震动水平及随距离衰减特性, $M_w7.8$ 地震破裂面附近烈度普遍达到 IX 度, $M_w7.6$ 地震破裂面附近烈度普遍达到 VIII 度, 地震烈度空间分布主要受到断层破裂和局部场地效应的影响, 因局部场地效应叙利亚北部部分地区在 $M_w7.8$ 地震中烈度可达 VIII, 局部场地效应可能是杰伊汉附近区域以及安塔基亚北部的阿姆克山谷的地震烈度异常偏高的主要原因, 考虑到 $M_w7.8$ 地震的破裂面可能沿阿姆克山谷延伸, 近断层效应与局部场地放大效应的叠加作用下, 阿姆克山谷的地震动可能会达到 IX 度。基于 USGS 提供的 $M_w7.8$ 土耳其地震破裂模型的模拟记录, 给出的仪器地震烈度在震中南南西方向(沿阿姆克山谷)的烈度确实增加到 IX 度。大地震的破裂模型是控制近场区域地震动空间分布特征的最主要因素。

致谢 本文强震动观测记录下载自 AFAD 网站(<https://tadas.afad.gov.tr/>); 感谢北京大学张勇教授提供的土耳其 $M_w7.8$ 和 $M_w7.6$ 地震的震源破裂模型(<https://pku-geophysics-source.group/>); 土耳其 $M_w7.8$ 地震的破裂模型下载自 USGS 网站(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/finite-fault>); 文中部分图件采用 GMT 软件绘制。

References

- Aki K. 1972. Earthquake mechanism. *Tectonophysics*, 13(1-4): 423-446.
- Al Atik L, Abrahamson N, Bommer J J, et al. 2010. The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters*, 81(5): 794-801.
- Atkinson G M, Boore D M. 2006. Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6): 2181-2205.
- Bindi D, Kotha S R. 2020. Spectral decomposition of the Engineering Strong Motion (ESM) flat file: regional attenuation, source scaling and Arias stress drop. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(6): 2581-2606.
- Boore D M, Thompson E M. 2014. Path durations for use in the stochastic-method simulation of ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5): 2541-2552.
- Bozkurt E. 2001. Neotectonics of Turkey — a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14(1-3): 3-30.
- Kale Ö, Akkar S, Ansari A, et al. 2015. A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: investigation of possible regional effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A): 963-980.
- Knopoff L. 1958. Energy release in earthquakes. *Geophysical Journal International*, 1(1): 44-52.
- Koç A, Kaymakçı N. 2013. Kinematics of Sürgü fault zone (Malatya, Turkey): a remote sensing study. *Journal of Geodynamics*, 65: 292-307.
- Lin X, Hao J L, Wang D, et al. 2021. Coseismic slip distribution of the 24 January 2020 $M_w6.7$ Doganyol earthquake and in relation to the foreshock and aftershock activities. *Seismological Research Letters*, 92(1): 127-139.
- Sato H, Fehler M, Wu R S. 2002. Scattering and attenuation of seismic waves in the lithosphere. //Lee W H K, Kanamori H, Kanamori P C, et al eds. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*. Amsterdam: Academic Press, 81: 195-208.
- Şeşetyan K, Danciu L, Tümsa M B D, et al. 2018. The 2014 seismic hazard model of the Middle East: overview and results. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8): 3535-3566.
- Seyhan E, Stewart J P. 2014. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations. *Earthquake Spectra*, 30(3): 1241-1256.
- Shahi S K, Baker J W. 2014. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5): 2456-2466.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, et al. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68(1): 199-222.
- Somerville P G. 2005. Engineering characterization of near fault ground motions. //2005 NZSEE Conference, <http://db.nzsee.org.nz/2005/Paper01.pdf>.
- Somerville P, Irikura K, Graves R, et al. 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*, 70(1): 59-80.
- Wang H W, Ren Y F, Wen R Z. 2021. A modified stochastic finite-fault method for simulating ground motions in three dimensions: a case study of Ludian earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics (in Chinese)*, 41(2): 181-191.
- Wang Q C, Liu J, Zheng S H, et al. 2005. Frequency-dependent attenuation of P and S waves in Yunnan Region. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 27(4): 451-461.

Chinese), 27(6): 588-597.

Worden C B, Wald D J, Sanborn J, et al. 2015. Development of an open-source hybrid global V_{s30} model. //Seismological Society of America Annual Meeting. Pasadena, California. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/science/vs30-models-and-data>.

Zare M, Amini H, Yazdi P, et al. 2014. Recent developments of the Middle East catalog. *Journal of Seismology*, 18(4): 749-772.

附中文参考文献

王宏伟, 任叶飞, 温瑞智. 2021. 一种随机有限断层的三维地震动模拟方法——鲁甸地震为例. *地震工程与工程振动*, 41(2): 181-191.

王勤彩, 刘杰, 郑斯华等. 2005. 云南地区与频率有关的 P 波、S 波衰减研究. *地震学报*, 27(6): 588-597.

(本文编辑 何燕)