

李宗超, 纪志伟, 孙吉泽, 陈鲲, 谢俊举. 2025. 基于安徽合肥 $M_S4.7$ 地震快速估计本地区 $M_S6.0$ 设定地震加速度时程及其破坏能力[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(3): 338-351. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-046.

Li Z C, Ji Z W, Sun J Z, Chen K, Xie J J. 2025. Rapid estimation of $M_S6.0$ scenario earthquake acceleration waveform and its destructive capacity in local area based on the $M_S4.7$ earthquake in Anhui Province[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(3): 338-351 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-046.

基于安徽合肥 $M_S4.7$ 地震快速估计本地区 $M_S6.0$ 设定地震加速度时程及其破坏能力

李宗超¹, 纪志伟², 孙吉泽³, 陈 鲲^{1*}, 谢俊举¹

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3 深圳防灾减灾技术研究院, 深圳 518003

摘要: 2024 年 9 月 18 日, 安徽省合肥市发生 $M_S4.7$ 地震, 造成了一定的建筑损坏和社会恐慌, 这是 2024 年合肥地区发生的最大震级的地震. 在自媒体高度发达的今天, 东部沿海地区发生轻微破坏性地震引起的社会关注度居高不下, 尤其是该地震发生在郯庐地震带南段, 2024 年以来发生过多次 3 级左右的小地震. 如果这次地震的震级不是 $M_S4.7$ 而是 $M_S6.0$ 会怎样呢? 随着中国地震监测能力的大幅提升, 可以比较完整地记录此次 $M_S4.7$ 地震的波形数据. 经验格林函数方法可以利用小震波形作为格林函数合成大地震的地震动, 而这个 $M_S4.7$ 的地震恰好比较符合该方法选择小震作为格林函数的标准. 本文拟采用本次 $M_S4.7$ 地震作为格林函数, 采用经验格林函数方法作为模拟工具, 从地震应急角度快速估计一次 $M_S6.0$ 设定地震在合肥地区的 7 个台站处的加速度波形, 并分析本次设定地震在确定的建筑模型中的震害响应及破坏能力. 结果表明: 如果本次地震的震级是 $M_S6.0$, 将会在肥东地区展示出较强的破坏能力, PGA 值在震中距 30 km 内会出现 0.25~0.6 g 幅值, 建筑物存在严重破坏的风险, 尤其是对于当地的老旧建筑和高层建筑. 本研究是一次从地震应急角度进行的强震地面运动特征估计和建筑震害分析的尝试, 相关结果也可以为当地的抗震设计及地震应急产品等提供参考.

关键词: 安徽地震; 格林函数; 地震应急; 设定地震; 破坏能力估计

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-046

中图分类号: P315

文献标识码: A

Rapid estimation of $M_S6.0$ scenario earthquake acceleration waveform and its destructive capacity in local area based on the $M_S4.7$ earthquake in Anhui Province

Li Zongchao¹, Ji Zhiwei², Sun Jize³, Chen Kun^{1*}, Xie Junju¹

1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2 Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3 Shenzhen Academy of Disaster Prevention and Reduction, Shenzhen 518003, China

Abstract: On September 18, 2024, the $M_S4.7$ earthquake occurred in Hefei, Anhui Province, causing certain building damage and social panic. This was the largest earthquake of magnitude to occur in the Hefei area in 2024.

收稿日期: 2024-10-12; 录用日期: 2024-11-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (42104053); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项资助项目 (DQJB24X22, DQJB22R30)

Supported by the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (Grant No. 42104053), and the Research Project Fund of the Institute of Geophysics, China Earthquake Administration (Grant Nos. DQJB24X22, DQJB22R30)

第一作者: 李宗超 (1989-), 男, 副研究员, 主要从事强震地震学、宽频带地震动模拟研究. E-mail:

lizongchaoigo@163.com

*通信作者: 陈鲲 (1976-), 男, 研究员, 主要从事地震区划、地震危险性分析及地震动强度图等方面的研究. E-mail:

chenkun-6620@163.com



In today's highly developed self-media, the social attention caused by minor destructive earthquakes in the eastern coastal regions remains high, especially the earthquake in the southern section of the Tanlu earthquake zone, where several small earthquakes of around $M_S3.0$ have occurred recently. If the magnitude of this earthquake is not $M_S4.7$ but $M_S6.0$, what will happen? With the significant improvement of China's earthquake monitoring capabilities, the waveform data of this earthquake can be recorded relatively completely. The empirical Green's function method can use small earthquake waveforms as Green's functions to synthesize the seismic motion of large earthquakes, and this $M_S4.7$ earthquake happens to meet the criteria for selecting small earthquakes as Green's functions in this method. This article intends to use the $M_S4.7$ earthquake as Green's function and the empirical Green's function method as the simulation tool to quickly estimate the acceleration waveform of a set $M_S6.0$ earthquake at seven stations in the Hefei area from the perspective of earthquake emergency and analyze the seismic damage response and destructive capacity of this set earthquake in a determined building model. The results indicate that if the magnitude of this earthquake is $M_S6.0$, it will demonstrate strong destructive power in the Feidong area, with PGA values ranging from 0.25–0.6 g within a distance of 30 km from the epicenter. There is a risk of serious damage to the building, especially for old and high-rise buildings in the area. This study attempts to estimate the characteristics of strong earthquake ground motion and analyze building damage from the perspective of earthquake emergency response. The relevant results can also provide a reference for local seismic design and earthquake emergency products.

Keywords: Anhui earthquake; Green's function; earthquake emergency response; scenario earthquake; estimation of destructive capacity

0 引言

据中国地震台网中心测定: 北京时间 2024 年 9 月 18 日, 安徽省合肥市肥东县发生 $M_S4.7$ 地震, 震中位于 31.98°N 、 117.60°E (图 1), 震源深度约为 12 km. 此次地震震中距肥东县 16 km、距合肥市 37 km. 震中附近 50 km 内共有 7 个强震台站记录到了此次地震的加速度波形, 波形的幅值最高为 200.2 cm/s^2 , 最小为 1.5 cm/s^2 . 此次 $M_S4.7$ 地震并未造成人员伤亡, 但是在较广的范围内引起了较为明显的震感, 例如江苏省南京市、浙江省杭州市等地地震感强烈.

地震发生后, 中国地震台网中心和北京大学张勇团队给出的破裂过程反演结果表明此次 $M_S4.7$ 地震表现出右旋走滑机制, 发震断层位于郯庐地震带断裂南段 (秦晶晶等, 2018). 2024 年 9 月 25 日, 在相同的地方又发生一次 $M_S3.8$ 地震, 截止到 2024 年 10 月 1 日, 合肥地区在 2024 年已发生 6 次 $M_S3.0$ 以上地震, 最大震级为 2024 年 9 月 18 日的 $M_S4.7$. 短期内多次有感地震也引起了当地社会的较高关注度, 大家最关心的还是这些小地震的发生与郯庐地震带的活动性有什么关系? 未来是不是有可能发生更高震级的地震?

众所周知, 地震的短临预报仍然是一个尚未解决的全球性科学难题. 尽管地震的发生无法准确预测, 但通过科学手段, 可以在一定程度上估计某地区若发生破坏性地震, 其可能的破坏能力及地震动特征 (Ji et al., 2024a, 2024b). 这些预测可以帮助制定科学合理的防范措施, 从而在未来地震发生时有效减轻其对社会和公众的影响.

基于上述背景, 本文采用 $M_S4.7$ 地震作为格林函数, 借助经验格林函数方法快速估计本地区若发生 $M_S6.0$ 地震的地震动特征, 获取震中附近的多个强震台站处可能出现的加速度波形及反应谱. 随后, 本文将模拟的这些加速度波形作为地震动输入, 分析某确定的框架结构的震害响应. 本文的研究目标在于探索一种基于实际小震预估未来可能发生的强震 ($>M_S6.0$) 的破坏能力的快速估计方法, 从地震应急角度 (Chen et al., 2022; 胡进军等, 2023; 张婷, 2024; 周中红等, 2024) 为当地的地震灾害预防提供科技支撑.

1 安徽肥东地区构造背景

郯庐断裂带是中国东部沿海地区最被关注的一条大型地震断裂带. 据统计, 自公元 1400 年以来, 断裂带周围 200 km 范围内地震活动从未间断 (刘

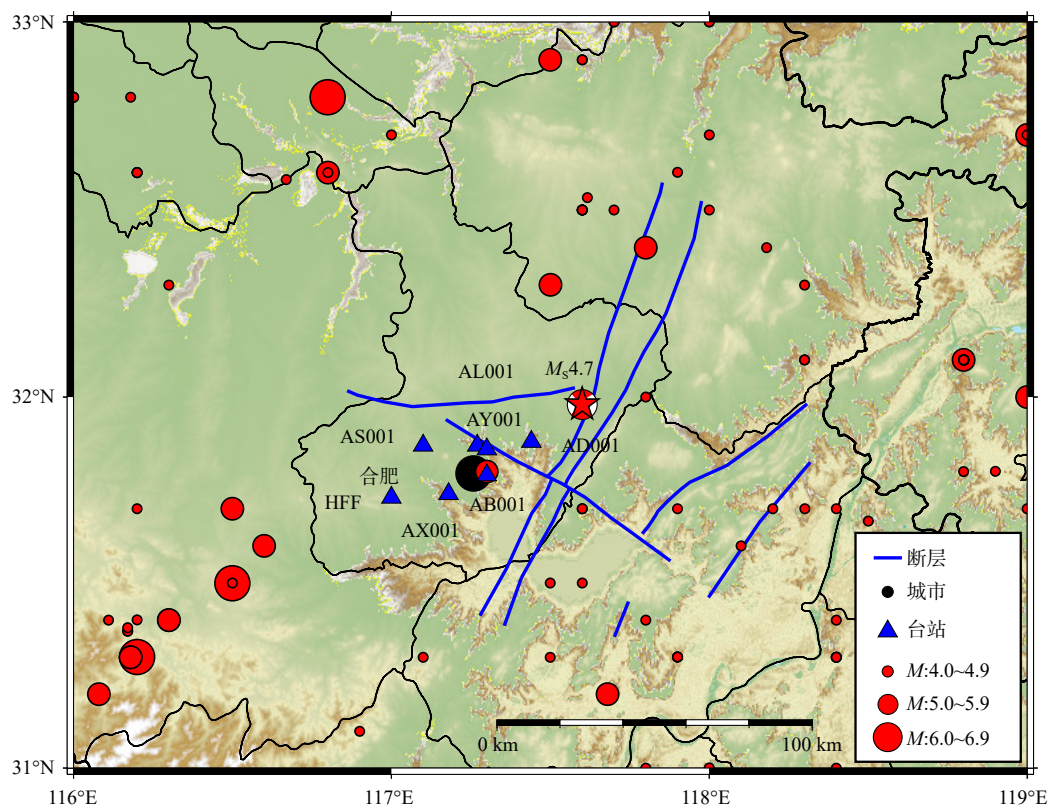


图1 合肥盆地区域地质构造及历史地震震中分布

Fig. 1 Regional geological structure and distribution of historical earthquake epicenters in the Hefei Basin

备等, 2015; Xu et al., 2014; 朱光等, 2001)。但它分为三段, 风险有很大不同: 北段沈阳以北的东北地区, 南段江苏宿迁以南的苏皖鄂地区, 地震活跃, 但断裂带基底较软, 强度小, 历史上的地震都比较小 (朱红彬等, 2010)。郯庐断裂带安徽段呈北东向延伸, 在安徽境内长约为 400 km, 郯庐断裂带肥东段位于整个安徽段的中部。该段西侧为华北板块上的合肥盆地, 东侧为张八岭隆起南段 (李云平等, 2006; 谭静等, 2022)。本次地震的震中位置位于郯庐地震带南端, 肥中断裂带东段与五河—合肥断裂交汇区域, 靠近五河—合肥断裂带。其中五河—合肥断裂是郯庐断裂带的西边界断裂, 该断裂自五河县向南, 经合肥市、舒城县, 长约 350 km (郑颖平, 2017), 属于规模较大、切割较深的走向北东、倾向北西的第四纪隐伏活动断裂 (秦晶晶等, 2018)。

2 地震动模拟方法及设定地震参数确定方案

日本地震学家 Irikura 等人的研究表明 (Miyake et al., 2003), 利用震源区附近观测到的小地震记

录来模拟大震的强地震动特征是模拟强地震动最有效的方法之一。本文采用的地震动模拟方法为经验格林函数方法。在目前众多的地震动模拟方法中, 经验格林函数方法也是唯一采用实际的小震波形作为格林函数来合成大地震的方法, 其基本思想是 (Irikura, 1986): 用小震记录作为格林函数合成大震地震动。将大震震源看作是由一系列子震震源构成, 选择一个大小合适的余震或者前震记录作为格林函数, 将小震等同于子震, 按照一定的破裂方式, 将这些经验格林函数叠加得到大震地震动时程 (图 2)。小震记录包含了真实的震源破裂过程、传播介质以及浅表场地响应的复杂性因素, 用小震记录合成的大震在一定程度上也包含这些复杂性信息。经过众多学者的不断努力, 经验格林函数方法已经发展成为一种比较成熟的强地震地面运动模拟方法, 已被广大学者认可 (Hartzell, 1978; Irikura, 1983; Kamae et al., 1998; Kanamori, 1977; 李宗超等, 2016, 2019a, 2019b; Li et al., 2021a, 2021b; Miyake et al., 2003)。受地震台站分布的影响和限制, 本方法比较适合模拟确定的地震台站处以及其他布设各类地震台站的重大工程场址处的加速度波形, 也就是说该方法的优势在于模拟具体点位的地震动。本文使用的经验格林函数方法主要公式如下

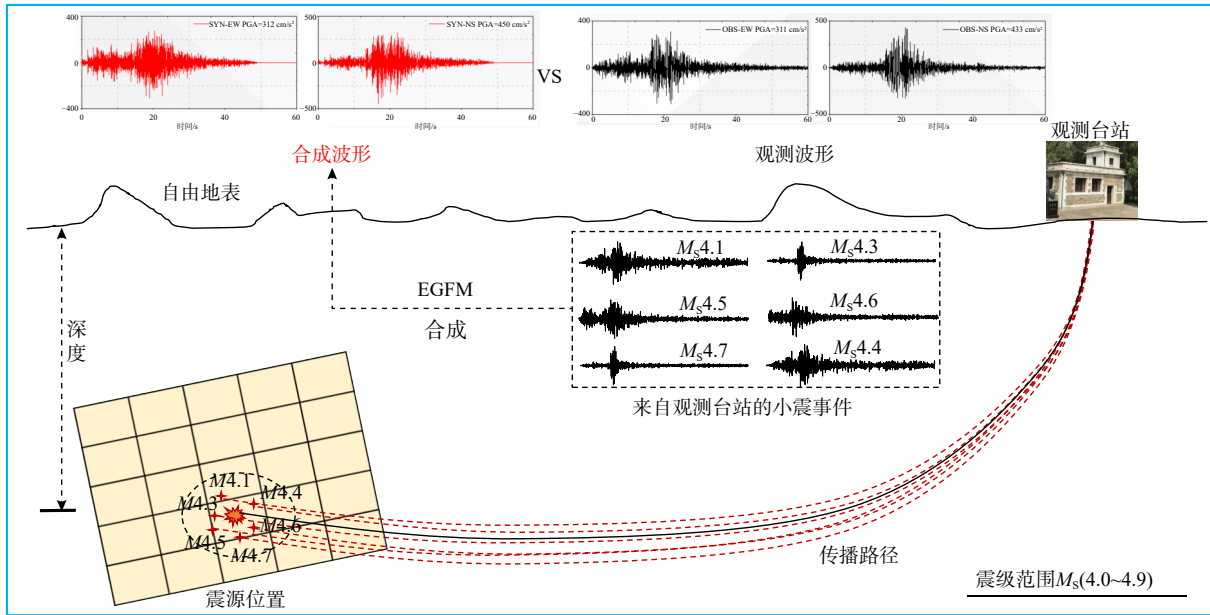


图 2 小震合成大震示意图

Fig. 2 Schematic of synthesizing small earthquakes into large earthquakes

(Irikura, 1986):

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r_s}{r_{ij}} F(t) * (C \cdot u(t)) \quad (1)$$

$$F(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[\delta \left\{ t - t_{ij} - \frac{(k-1)T}{(N-1)n'} \right\} \right] \quad (2)$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{V_s} + \frac{\xi_{ij}}{V_r} \quad (3)$$

$$U_0/u_0 = M_0/m_0 = CN^3 \quad (4)$$

$$C = \Delta\sigma_{\text{large}} / \Delta\sigma_{\text{small}} \quad (5)$$

其中, $U(t)$ 表示合成的大地震的地震动; $u(t)$ 表示小地震的地震动; r_{ij} 和 r_s 分别表示第 (i, j) 个子断层和小震震中到观测点的距离; t_{ij} 表示第 (i, j) 个子断层相对于初始破裂点在地表接收点的时间延迟; ξ_{ij} 为第 (i, j) 个子断层到初始破裂点的距离; (i, j) 分别表示沿断层走向和倾向的第 i 个和第 j 个子断层; T 为大地震的上升时间; $F(t)$ 是小地震的修正函数 (Miyake et al., 2003); N 和 C 分别表示大小地震断层尺度的比值和大小地震应力降的比值; n' 是弱化模拟过程中可能产生的人造周期的整数; V_s 和 V_r 分别表示震源处的剪切波速和断层破裂面上的破裂速度; $\Delta\sigma_{\text{large}}$ 和 $\Delta\sigma_{\text{small}}$ 分别表示大小地震的应力降. 本文设定大震的震源机制与小震的一致, 首先满足了经验格林函数方法对大小地震相似性的基本要求.

以往对于经验格林函数方法的使用, 都是先有

的大震事件, 然后根据大震的震源机制、传播路径和场地环境等选择小震事件来合成大地震. 而本文的步骤正好相反, 我们先有了这次肥东 $M_S 4.7$ 地震, 以此小震的波形作为格林函数, 然后合成与 $M_S 4.7$ 地震的震源机制和震中位置完全一致的 $M_S 6.0$ 地震在合肥地区的 7 个台站的加速度波形, 该过程同样保证了大小地震的震源机制、传播路径、场地环境的高度一致, 符合最高标准的经验格林函数方法选择小震的要求. 同时本工作是一次从地震应急角度开展的地震动模拟, 参数不确定性方面考虑得较为简单. 此外, 本次 $M_S 4.7$ 地震较多参数是比较确定的, 因此在模拟 $M_S 6.0$ 地震时主要考虑了初始破裂点的不确定性. 根据安徽地区地震目录 (中国地震局监测预报司, 2005), 合肥地区历史地震最大震级为 $M_S 5.5$, 同时参考第五代地震动参数区划图 (GB 18306—2015) 在本地区的潜源上限为 $M_S 6.5$. 考虑潜源的地震空间分布函数以及当地的地质构造, 根据“历史地震调整法”的定级原则, 本文设定地震的震级为 $M_S 6.0$. 设定地震的主要震源参数参考肥东 $M_S 4.7$ 地震的震源参数 (表 1), 选择的 7 个强震台站在肥东 $M_S 4.7$ 地震中记录到完整的小震波形 (图 3).

3 $M_S 6.0$ 设定地震模拟结果分析

确定好 $M_S 6.0$ 设定地震的震源参数后, 本文基于经验格林函数方法合成了 $M_S 6.0$ 地震在 7 个强震

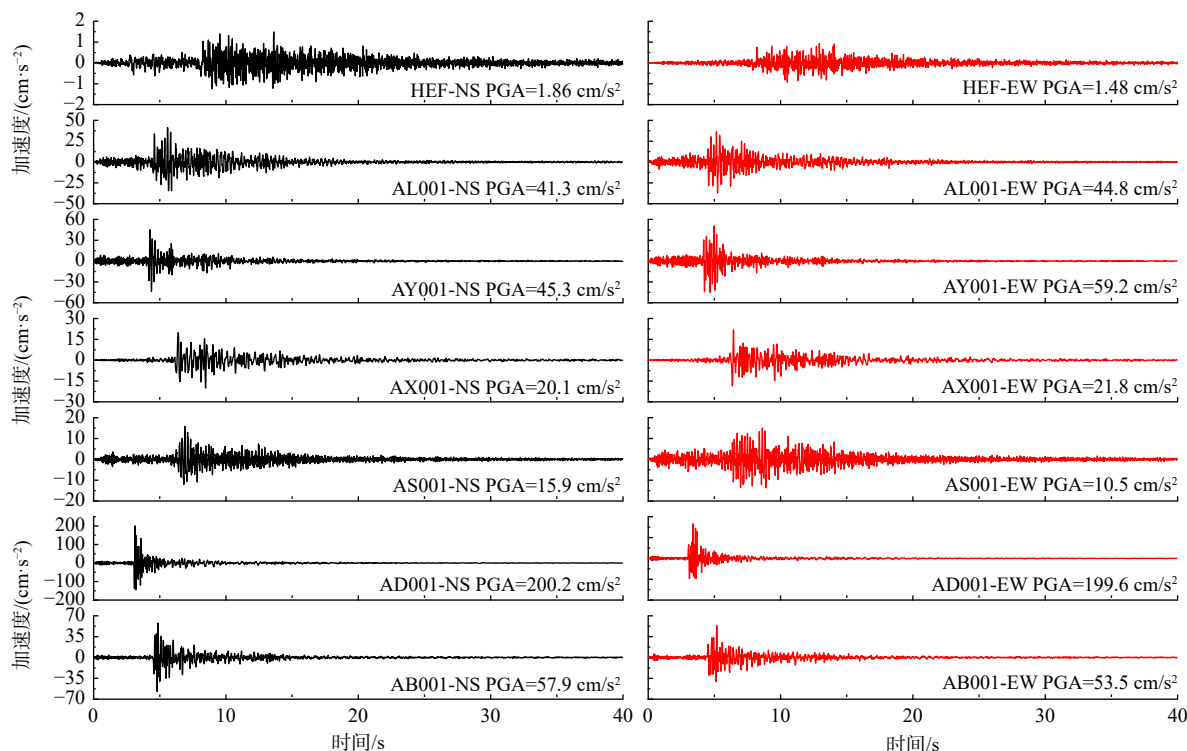
表 1 $M_S6.0$ 情景地震考虑的主要震源参数Table 1 Main source parameters considered for $M_S6.0$ scenario earthquakes

情景地震参数	取值	参考来源
震源深度	9~11 km	肥东 $M_S4.7$ —中国地震台网中心
震级	$M_S6.0$	设定参数
震源机制	$226^\circ/80^\circ/-175^\circ$	肥东 $M_S4.7$ —中国地震台网中心
地震矩	1.12×10^{25} dyne.cm	李宗超等(2019a)
凹凸体地震矩	5.5×10^{24} dyne.cm	Somerville等(1999)
破裂面积	130 km ²	
凹凸体面积	28.3 km ²	
凹凸体数量	1个	
震源上升时间	0.48 s	何奕成等(2021); Tian等(2022)
破裂速度	2.73 km/s	
剪切波速	3.5 km/s	李宗超等(2019a)
大小地震应力降比值C	1.94	
主震划分子断层数量N	4	
初始破裂位置	(2, 4), (3, 4)	设定2个初始破裂位置的坐标(i, j), i 表示延断层走向, j 表示沿断层面向

台站的加速度波形 (图 4), 并展示了每个强震台站记录到的 $M_S4.7$ 小震和合成的 $M_S6.0$ 设定地震的加速度反应谱 (图 5). 每个台站都分别计算了 EW

分量和 NS 分量的加速度波形, 并且考虑了初始破裂位置的不确定性, 因此每个台站我们获得了 4 条加速度波形. 取每个台站 4 条加速度波形 PGA 的最大值和最小值, 获得了每个强震台站可能的 PGA 取值范围 (表 2).

综合表 2、图 4 和图 5 给出的 $M_S6.0$ 设定地震的地震动特征, 本次设定地震呈现出较大的地震动强度, 除了距离较远的 HEF 台站外, 其余 6 个台站的 PGA 的范围都呈现出较大的取值, 在 30 km 范围内, 计算台站的仪器烈度达到了 VIII~IX, 尤其是在 AD001 台站 (下一节会有详细解释), 其 PGA 达到了 1.0 g, 烈度甚至达到了 X. 也就是说如果本次地震的震级是 $M_S6.0$, 那么很可能会给当地的建筑造成较严重的损害. 出现台站整体幅值较大的原因主要是采用的 $M_S4.7$ 地震在近场区域整体幅值较大. $M_S4.7$ 地震最大的 PGA 出现在震中距在 14.3 km 处的 AD001 台站, 幅值达到 0.2 g, 在较远处的 AB001、AL001、AY001 台站, PGA 都达到了 0.05 g, 因此当其被作为格林函数时, 合成的 $M_S6.0$ 地震的加速度幅值整体偏大. 另外本地区正好处于合肥盆地范围内 (秦晶晶等, 2018), 不可避免地会有不同程度的盆地放大效应以及场地放大效应的影响. 当然比较特殊的是 AD001 台站出现

图 3 本次肥东 $M_S4.7$ 地震在合肥地区的 7 个强震台站记录到的小震波形Fig. 3 The small seismic waveforms recorded by seven strong earthquake stations in the Hefei area during the Feidong $M_S4.7$ earthquake

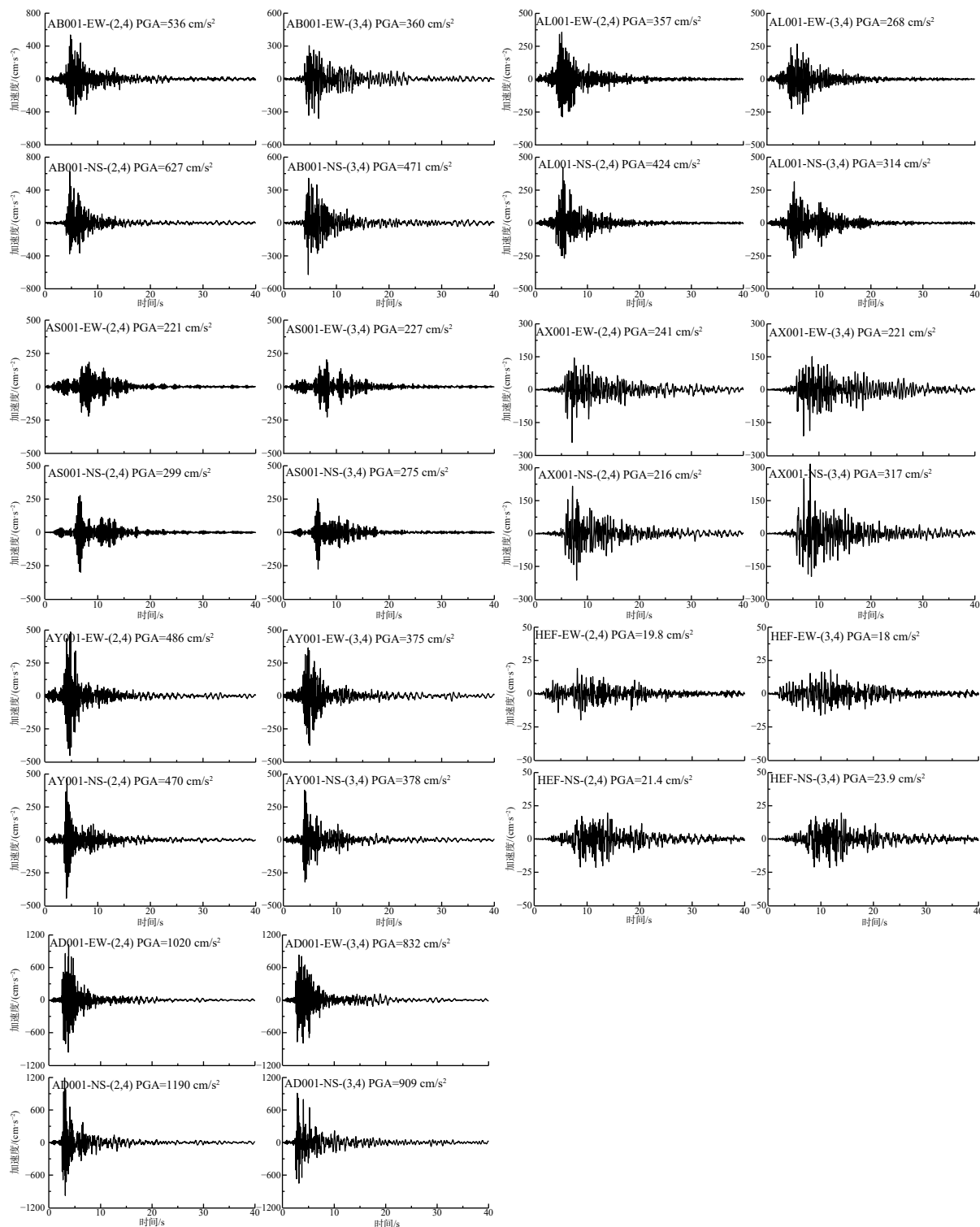


图 4 肥东地区 $M_S 6.0$ 设定地震在合肥地区 7 个强震台站处的加速度波形。(2,4) 和 (3,4) 分别表示考虑两种初始破裂位置的坐标

Fig. 4 Acceleration waveforms of $M_S 6.0$ scenario earthquake in Feidong area at 7 strong earthquake stations in Hefei area. (2, 4) and (3, 4) represent the coordinates considering the two initial rupture positions, respectively

了 $1.0 g$ 左右的 PGA, 对于 $M_S 6.0$ 地震来说在震中距为 14.3 km 处的地震动强度比较罕见. 本文在下一环节将单独对其讨论分析. 而在较远处的 HEF 台站, 其对应的 PGA 仅有 20 cm/s^2 , 在所有 7 个台站的模拟结果中是最小的, 从地震强度的统计学角

度看, 这个 PGA 值在 $M_S 6.0$ 地震距离震中 50 km 处是比较符合强度衰减规律的. 但在此次设定地震而言, 其他台站的 PGA 是 HEF 台站的 $20 \sim 40$ 倍, 就格林函数而言, 其他台站的 PGA 是 HEF 台站的 $20 \sim 100$ 倍, 本文认为 HEF 台站 PGA 偏小是其场

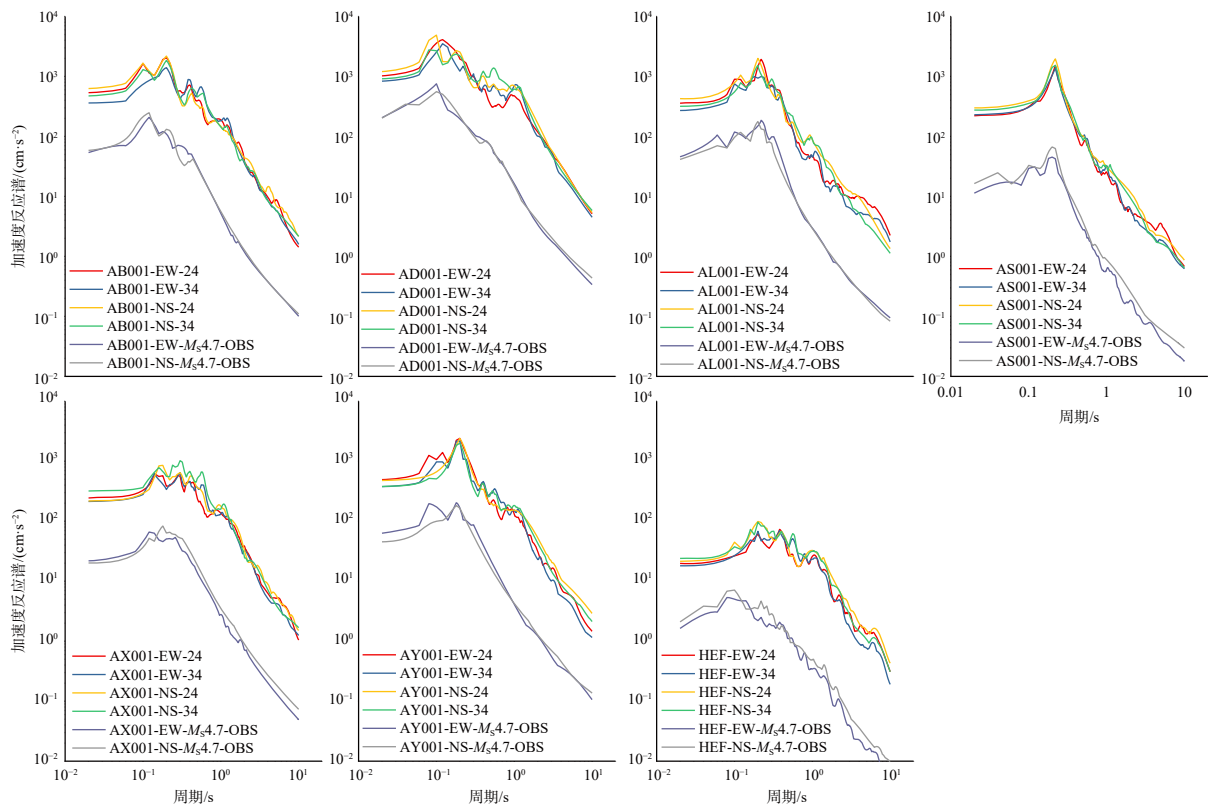


图 5 合肥地区 7 个强震台站处的小震和设定大震的加速度反应谱

Fig. 5 The acceleration response spectra of small earthquakes and scenario large earthquakes at 7 strong earthquake stations in Hefei area

表 2 合肥地区 7 个强震台站处 $M_{\text{S}}6.0$ 设定地震 PGA 可能的取值范围

Table 2 Possible ranges of scenario seismic PGA values for $M_{\text{S}}6.0$ at 7 strong earthquake stations in Hefei area

台站编号	震中距/km	方位角/(°)	PGA范围/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	仪器烈度 (GB 17742—2020)
AH.AB001.20	26.89	233.49	360~627	VIII~IX
AH.AD001.20	14.26	233.80	832~1 190	X
AH.AL001.20	26.79	248.74	268~424	VIII, IX
AH.AS001.20	40.35	255.67	221~299	VIII
AH.AX001.20	36.64	236.31	216~317	VIII
AH.AY001.20	24.66	244.95	375~486	VIII, IX
AH.HEF.20	49.66	244.14	18~24	IV, V

地环境的特殊性、距离震中较远等多因素造成的。

对设定地震的估计结果有效的验证方案之一是用地震动预测方程（GMPEs）作为参照（Li et al., 2021a, 2021b; 李宗超等, 2022）。最适合本地区的衰减关系是中国第五代地震动参数区划图中东部地区的衰减关系。图 6 展示的是强震台站模拟的 PGA 与第五代地震动参数区划图的衰减关系的对比。结果表明，本次 $M_{\text{S}}6.0$ 设定地震的强度整体高于基于统计学角度获得的地震动强度，也就是如果发生和

$M_{\text{S}}4.7$ 地震相同震源机制的 $M_{\text{S}}6.0$ 地震，其破坏能力会处于较高水平。

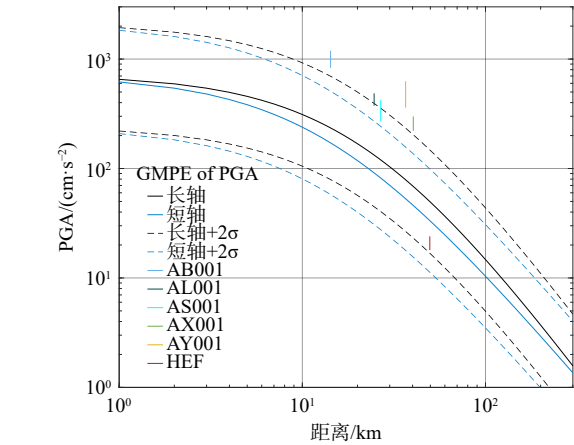


图 6 $M_{\text{S}}6.0$ 地震在第五代地震动参数区划图衰减关系中的强度对比

Fig. 6 Comparison of intensity of $M_{\text{S}}6.0$ earthquake in the attenuation relationship of the fifth-generation seismic ground motion parameters zonation map of China

4 AD001 台站地震动特征分析

本研究中， $M_{\text{S}}6.0$ 设定地震在强震台站 AD001 出现了特别大的幅值，达到了 1.0 g 左右，这个结果非常罕见。首先分析采用的格林函数的特点，就

本次 $M_S4.7$ 地震而言, 其在 AD001 台站就表现出了异常的高幅值的加速度波形. 我们推测 AD001 台站出现较高幅值加速度的原因是来自场地环节而不是震源环节. 如果是震源环节的原因, 那么此次 $M_S4.7$ 地震在某个方向或者某个区域会出现整体较大的幅值或者异常的地震动特征. 从图 7 和图 8 来看, AD001 台站在加速度时程及其反应谱整体差

异较大, 相比较其他台站, 其幅值表现出比其他强震台站大好几倍的异常现象. 7 个强震台站的方位角基本都位于 $233^\circ \sim 255^\circ$ 之间, 除了 AH.HEF 强震台站之外, 其余台站彼此之间的距离较小. 综上分析, 本次地震在 AD001 台站出现异常较大的幅值的原因来自于场地环节, 很可能是特殊土层的场地放大效应的影响.

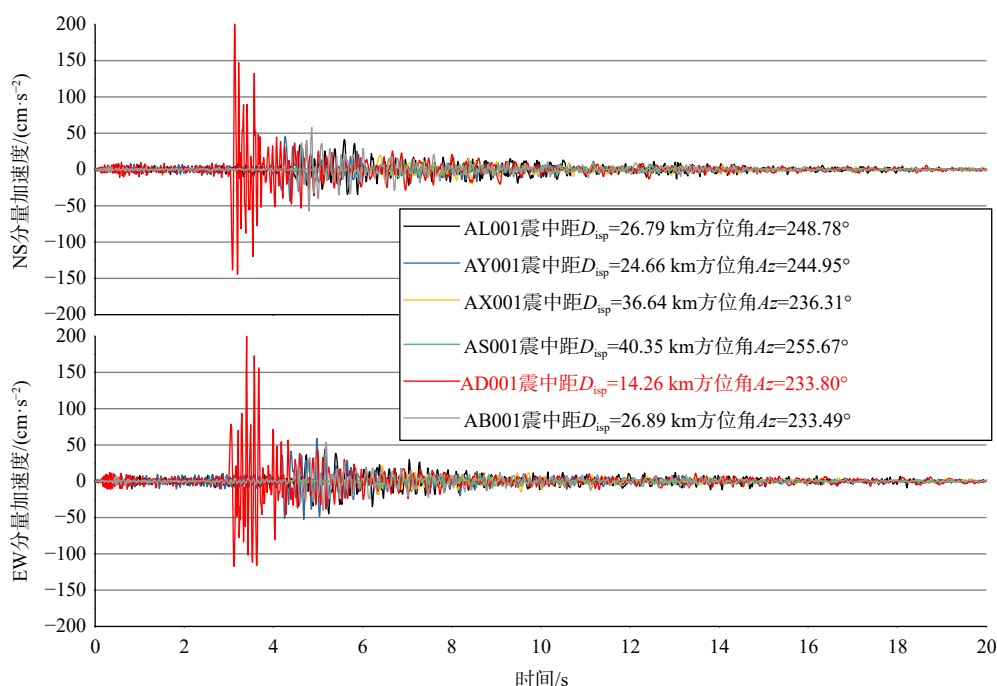


图 7 本次 $M_S4.7$ 地震 7 个强震台站在 EW 和 NS 分量的加速度时程

Fig. 7 The acceleration time histories of the EW and NS components at 7 strong earthquake stations during the $M_S4.7$ earthquake

格林函数在台站 AD001 的特殊情况也表明, 在选择台站处的小震作为格林函数时, 波形和幅值特征比较异常的小震应当特别关注并补充分析. 选择具备特殊地形和场地条件的台站的小震波形作为格林函数时, 考虑到场地非线性规律的复杂性和地形的影响, 应当从钻孔资料、场地分类、地形特征等角度补充数据, 以验证该类台站地震动结果模拟的可靠性.

本次 AD001 台站的地震动幅值超过 $1.0 g$, 由于暂时缺乏详细的地震地质资料的支持, 无法从更可靠的其他角度验证其可靠性和合理性. 就近几年国内外的地震记录而言, 虽然也出现过 $M_S6.0$ 地震记录到 $1.0 g$ 的 PGA, 但数量很罕见 (参考本次 $M_S4.7$ 地震在 AH.A0006 烈度台站出现了 577 cm/s^2 的高幅值). 随着国内越来越多高质量的地震监测台网的建成, 类似异常情况的震例及波形会越来越多, 越来越多的异常波形和幅值也会不断更新我们对地震动复杂特性的认知. 就本次地震应急产出的

角度而言, 我们暂时不将 AD001 台站的结果作为应急产出的内容.

5 破坏能力分析

合肥 $M_S4.7$ 地震发生后, 虽然没有造成人员伤亡, 但是合肥市区的建筑结构存在开裂的现象. 为了分析 $M_S6.0$ 设定地震对建筑结构的破坏能力, 本文选择地震影响区内的一种典型钢筋混凝土框架结构进行建模分析 (图 9). 结构长 35.7 m , 宽度为 18 m , 高 22.2 m , 1 层层高 4.2 m , 2~6 层每层高 3.6 m . 结构设计使用年限为 50 年, 建筑抗震设防类别为重点设防类. 抗震设防烈度为 7 度 ($0.15 g$), 设计地震分组为第三组, 建筑场地类别为 I_0 类, 特征周期为 0.30 s , 框架抗震等级为二级, 抗震措施按 8 度考虑, 结构阻尼比为 $\zeta=0.05$. 利用有限元分析软件 SAP2000 对该框架结构进行建模. 梁柱构件采用杆系单元模拟. 柱子尺寸 $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$,

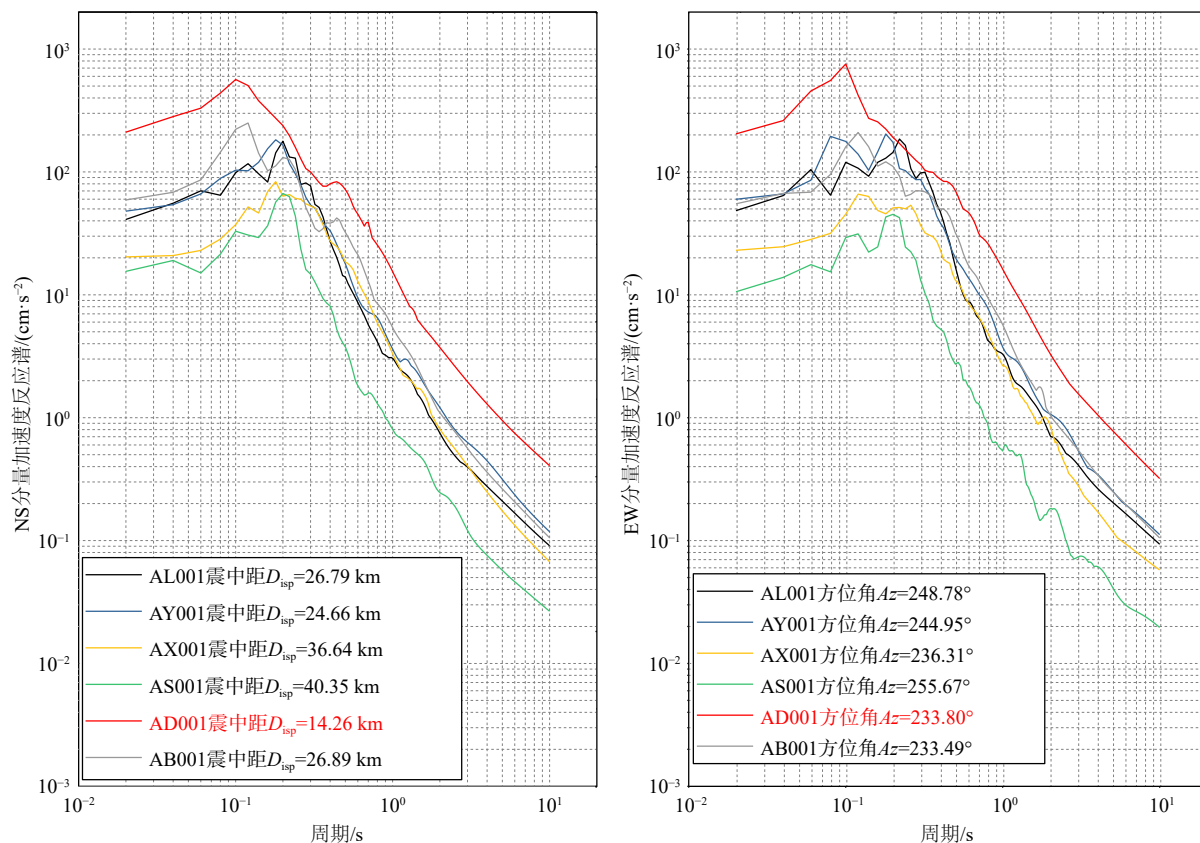


图8 本次 $M_S4.7$ 地震 7 个强震台站在 EW 和 NS 分量的加速度反应谱

Fig. 8 The acceleration response spectrum of the EW and NS components at 7 strong earthquake stations during the $M_S4.7$ earthquake

混凝土等级 C30, 钢筋选用 HRB400.

本文在第 3 节模拟了 7 个台站 14 条地震动. 由于场地条件, AD001 台站的地震动幅值的结果存在较多不确定的因素, 暂时不作为地震应急的结果. 在选择输入到框架结构的地震动时, 我们选择了除 AD001 以外的 6 个台站共 12 条地震动, 其加速度反应谱和均值如图 10 所示. 结构在 12 条地震动作用下的每层峰值加速度反应对比如图 11 所示. 从图中可以看出, 有 4 条模拟地震动使得框架结构第 6 层的東西方向的峰值加速度超过 400 cm/s^2 , 而在 3 条模拟地震动作用下, 框架结构第 6 层的南北方向峰值加速度超过 500 cm/s^2 . 框架结构 1~5 层峰值加速度最大值不超过 200 cm/s^2 .

由图 12 可知, 各楼层的层间位移随着地震动强度的增加, 都呈现出从 6 层到 1 层逐渐增加的趋势. 表 3 给出了框架结构在 12 条地震动作用下的破坏状态. 模拟得到的 AX001 台站 EW 方向的地震动作用于框架结构南北方向时, 结构的层间位移角最大为 $1/70$, 小于 $1/50$, 此时结构发生严重破坏 (《建筑抗震设计规范》, GB50011—2010). 当 AS001 台站和 HEF 台站模拟得到的 4 条地震动作用于框

架结构时, 东西方向的层间位移角为 $1/440$. 按照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 规定, 此时框架结构处于轻微破坏. 为了提高结构的抗震性能, 可以通过考虑在结构的某些薄弱位置设置阻尼器 (闫维明等, 2016), 利用阻尼器的滞回变形消耗输入的地震能量, 使得结构内部构件免遭破坏.

6 结论及讨论

本文采用本次 $M_S4.7$ 地震作为格林函数, 采用经验格林函数方法作为模拟工具, 从地震应急角度快速地估计一次 $M_S6.0$ 设定地震在本地区的 7 个台站处的加速度波形, 并检验本次设定地震在确定的建筑波形中的震害响应及破坏能力. 若将本文整个计算过程设计成应急产品, 参考地震局各研究所当前主要地震应急产品的产出速率, 本工作预计可在震后 8 小时左右给出应急产出结果. 本文获得初步结果如下:

(1) 本次设定地震呈现出较大的地震动强度, 在 30 km 范围内, 计算台站的仪器烈度达到了 VIII~IX, 也就是说如果本次地震的震级不是 $M_S4.7$,

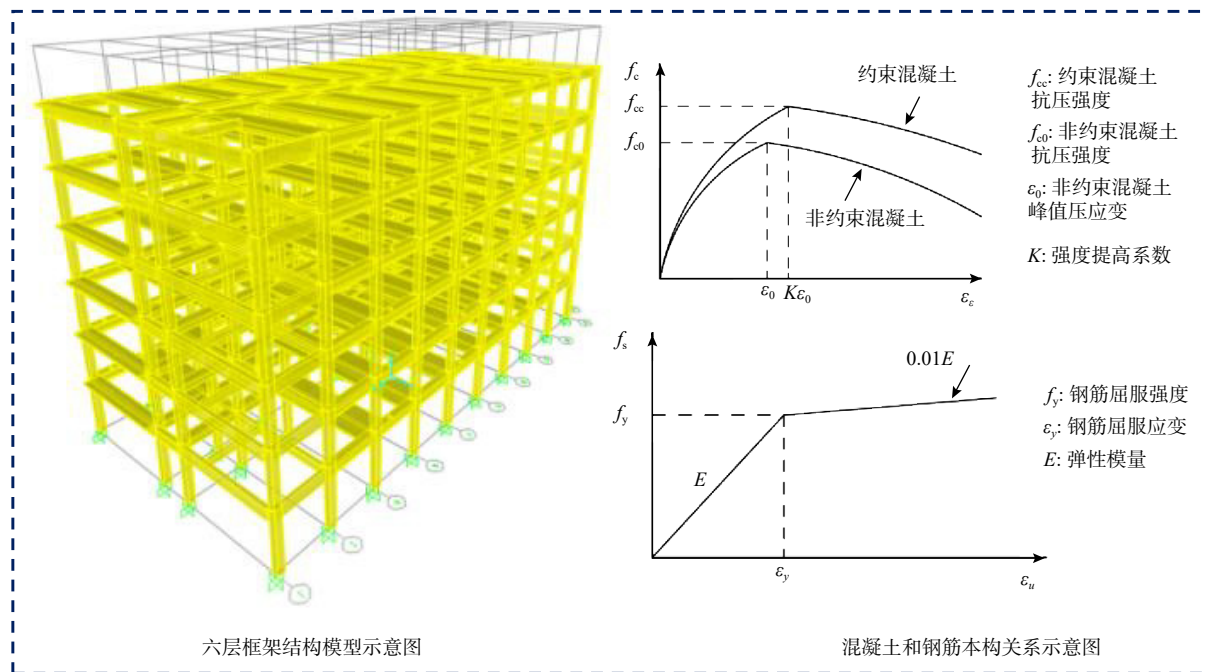


图 9 6 层框架结构以及混凝土和钢筋本构关系示意图

Fig. 9 Schematic of six-story frame structure and constitutive relationship between concrete and steel reinforcement

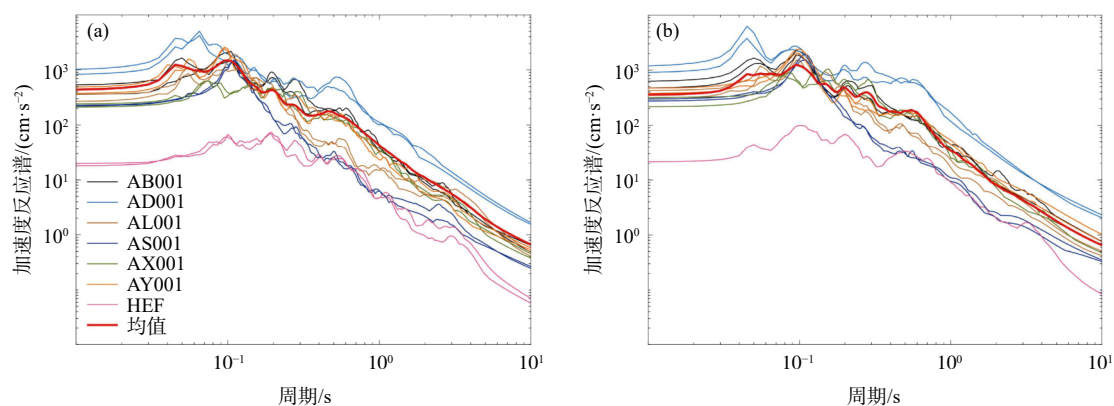


图 10 输入结构响应的地震动反应谱及均值. (a) 东西方向; (b) 南北方向

Fig. 10 Ground motion response spectrum and mean of input structural response. (a) EW direction; (b) NS direction

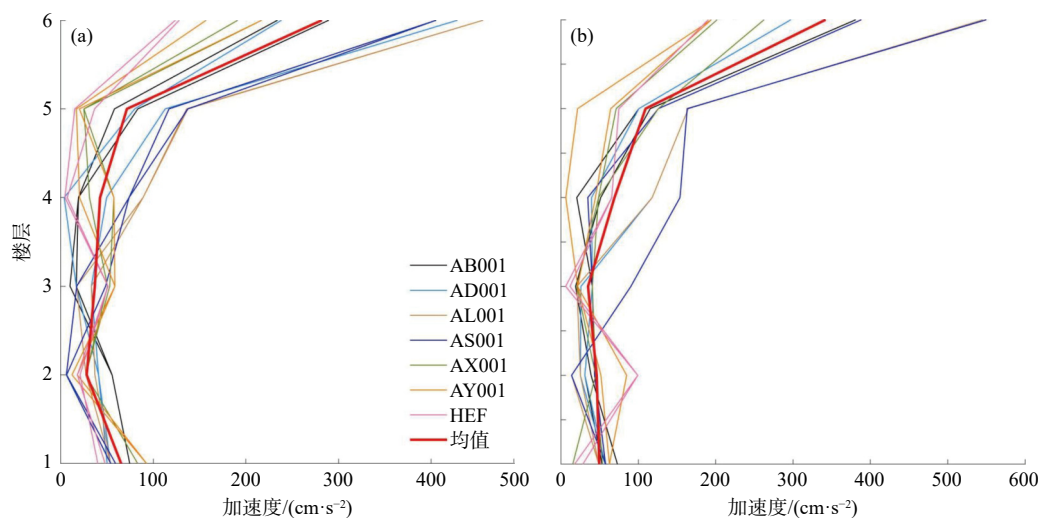


图 11 各楼层加速度及其均值. (a) 东西方向; (b) 南北方向

Fig. 11 Acceleration and mean of each floor. (a) EW direction; (b) NS direction

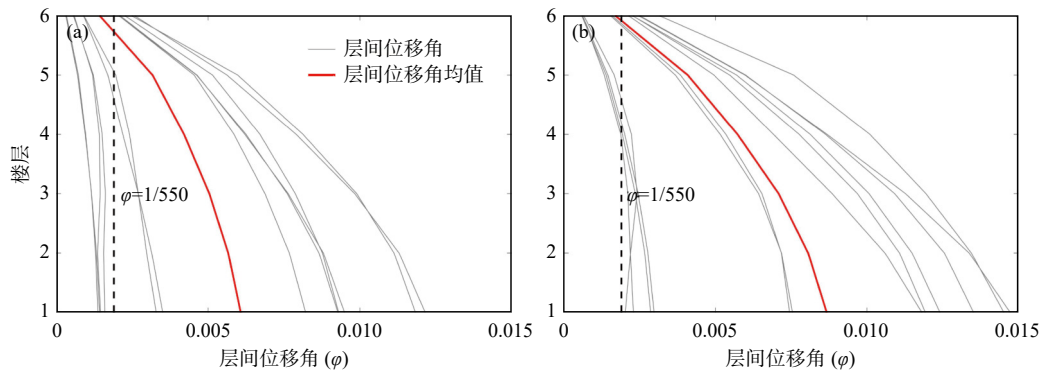


图 12 楼层各层层间位移角及均值. (a) 东西方向; (b) 南北方向

Fig. 12 Displacement angles and mean values of each floors. (a) EW direction; (b) NS direction

表 3 框架结构的破坏状态

Table 3 The destructive state of the framework structure

台站EW方向波形	层间位移角		结构破坏状态	台站NS方向波形	层间位移角		结构破坏状态
	东西方向	南北方向			东西方向	南北方向	
AB001	1/80	1/80	严重破坏	AB001	1/80	1/80	严重破坏
AL001	1/280	1/130	中等破坏	AL001	1/300	1/130	中等破坏
AS001	1/680	1/410	轻微破坏	AS001	1/620	1/440	轻微破坏
AX001	1/110	1/70	严重破坏	AX001	1/120	1/70	严重破坏
AY001	1/110	1/80	严重破坏	AY001	1/110	1/70	严重破坏
HEF	1/730	1/350	轻微破坏	HEF	1/700	1/340	轻微破坏

而是 $M_{\text{S}}6.0$, 那么很可能会给当地的建筑造成较严重的损害;

(2) 经验格林函数方法在合成设定地震时, 对于波形特征异常的台站应当慎重分析结果的合理性, 多角度分析模拟结果的可靠性;

(3) 模拟得到的高幅值使得 6 层框架结构的顶部加速度最大, 1 层层间位移角最大, 特殊地震动下, 楼层层间位移角均值最大为 1/115, 模拟得到的高幅值的地震动会对结构造成严重破坏.

随着中国地震预警台网的建成, 我们已经具备了全世界规模最大的地震监测网络, 地震监测能力的不断提升, 会记录到更多质量更优的小震波形, 小震格林函数数据库也将更加完善. 目前已初步完成的格林函数数据库已收录大概 160 万条的小震的加速度波形 (图 13), 在不断完善格林函数数据库的基础上, 我们可以基于经验格林函数方法做以下几个方面的技术推广工作: (a) 地震应急角度开展典型位置大震地震动预测和波形合成 (图 14).



图 13 已初步建成的小震格林函数数据库

Fig. 13 The preliminary established Green's function database for small earthquakes

当小地震发生后,为了防范更高震级的地震发生,或者大地震发生后缺乏主震波形的宽频带地震台处,可以依靠这些合适的小震数据快速估计地震影响区内台站的加速度时程,进而开展典型建筑的震害响应分析,估计灾害损失,助力地震应急救援和灾害损失估计;(b) 设定地震和当地历史地震的加速度波形估计. $M_s4.0\sim5.0$ 小地震发生之后,区域内地震台网会获得较为丰富的地震记录. 可以以这些地震台站的小震记录作为格林函数,合成较高概率和精度的未来设定地震的加速度波形,助力当地的

抗震设计以及震害响应分析,提供具备区域衰减和场地特征的加速度波形;(c) 重大工程场址处最大可信地震动估计. 目前国内的重大特工程(核电站、水库大坝等)均布设小区域地震监测台网,在获得当地的小震数据之后,可以依托本文的研究思路开展重大工程在设定地震作用下的震害响应分析,不断积累和完善重大工程的地震设防和地震安全的应急预案. 基于以上工作设想,我们也做了一些前期的研究(黄亭等, 2024; Ji et al., 2022; 李宗超等, 2022).

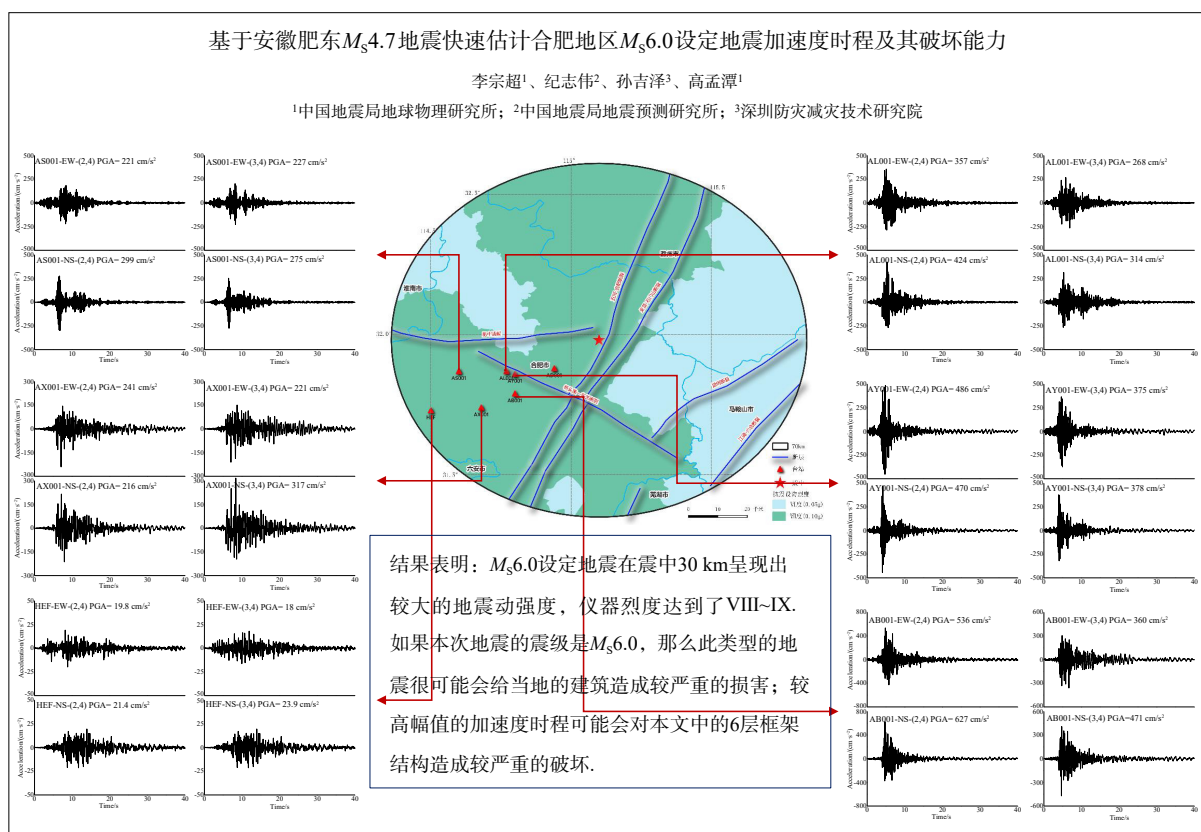


图 14 本文总结的计算结果展示模版

Fig. 14 The calculation result display template summarized in this paper

致谢

本文所用的小震数据来自中国地震台网中心, 在此特别向台网中心刘奕君博士表示感谢. 本工作采用的经验格林函数方法的源代码来自东京大学地震研究所的 Hiroe Miyake 教授, 在此表示感谢.

附件

文中图 4 和图 5 的模拟数据见“资源附件”: <https://www.sjdz.org.cn/article/doi/10.19975/j.dqyxx.2024-046>.

References

- Chen W, Wang D, Zhang C, et al. 2022. Estimating seismic intensity maps of the 2021 $M_w7.3$ Madoi, Qinghai and $M_w6.1$ Yangbi, Yunnan, China earthquakes[J]. *Journal of Earth Science*, 33: 839-846.
- Hartzell S. 1978. Earthquake aftershocks as Green's functions[J]. *Geophysical Research Letters*, 5(1): 1-4.
- He Y C, Fan X P, Zhao Q G, et al. 2021. Segmentation of crustal structure beneath the middle-south segment of Tan-Lu Fault Zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(9): 3164-3178 (in Chinese).
- Hu J J, Ding Y T, Zhang H, et al. 2023. A real-time seismic intensity prediction model based on long short-term memory neural network[J]. *Earth Science*, 48(5): 1853-1864 (in Chinese).
- Huang T, Li Z C, Tang F T, et al. 2024. The regional disaster investigation of Dadu River of Luding earthquake and feasibility study of Green's function database application[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 55(4): 440-452 (in Chinese).
- Irikura K. 1983. Semi-empirical estimation of strong ground motion during large earthquake[J]. *Bulletin of the Disaster Prevention Re-*

- search Institute, 33: 63-104.
- Irikura K. 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function[C]//Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 151-156.
- Ji Z, Li Z, Gao M, et al. 2022. Simulation of strong earthquake characteristics of a scenario earthquake ($M_s 7.5$) based on the enlightenment of 2022 $M_s 6.9$ earthquake in Menyuan[J]. *Earthquake Science*, 35(6): 485-496.
- Ji Z, Li Z, Zhang Y, et al. 2024a. Long-period ground motion simulation and pulse probability distribution characteristics of the Kumamoto $M_w 7.1$ earthquake in Japan[J]. *Earthquake Spectra*. DOI: 10.1177/87552930241276395.
- Ji Z, Li Z, Yan Z, et al. 2024b. Statistical analysis of characteristic parameters and probability distribution of near-fault velocity pulses-A case study on the 1999 $M_w 7.6$ Chi-Chi earthquake[J]. *Seismological Research Letters*, 95(6): 3433-3448.
- Kamae K, Irikura K, Pitarka A. 1998. A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2): 357-367.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 82(20): 2981-2987.
- Li Y P, Wu S G, Han W G, et al. 2006. A study on geophysical features of deep structures of the Hefei Basin and the southern Tan-Lu fault zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(1): 115-122 (in Chinese)
- Li Z C, Chen X L, Gao M T, et al. 2016. Research progress of empirical Green function method simulation strong ground motion[J]. *World Earthquake Engineering*, 32(2): 209-216 (in Chinese).
- Li Z C, Gao M T, Chen X L, et al. 2019a. Simulation of ground motion by the 2017 Jiuzhaigou $M_s 7.0$ earthquake and estimation of ground motion intensity in the Zhangzha Town[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(7): 2567-2581 (in Chinese).
- Li Z C, Gao M T, Chen X L, Wu Q. 2019b. Engineering ground motion parameters simulation and distribution characteristics analysis of Kumamoto $M 7.3$ earthquake in 2016[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 41(1): 100-110 (in Chinese).
- Li Z C, Chen X, Chen K, et al. 2021a. Predicting near-field strong ground motion of the Huaxian $M_s 8.5$ earthquake based on uncertainty factors of asperities[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 178(26): 1-18.
- Li Z C, Sun J, Chen X, et al. 2021b. Predicting the near-field strong ground motion based on uncertainties in asperities: An opportunity to reproduce the characteristics of the 1970 Tonghai earthquake ($M_s 7.8$)[J]. *Journal of Seismology*, 25: 875-898.
- Li Z C, Sun J Z, Gao M T, et al. 2022. Preliminary judgment of ground motion characteristics of Yematan bridge in Qinghai Maduo $M 7.4$ earthquake[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 53(1): 101-106 (in Chinese).
- Liu B, Zhu G, Zhai M J, et al. 2015. Features and genesis of active faults in the Anhui segment of the Tan-Lu fault zone[J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(2): 611-630 (in Chinese).
- Miyake H, Iwata T, Irikura K. 2003. Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6): 2531-2545.
- Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration. 2005. Catalogue of Strong Earthquakes in China (23rd Century BC—June 2005)[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Qin J J, Shi J H, Zhang Y, et al. 2018. Structural characteristics of the Wuhe-Hefei fault on the Hefei segment of the Tanlu fault zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11): 4475-4485 (in Chinese).
- Somerville P, Irikura K, Graves R, et al. 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion[J]. *Seismological Research Letters*, 70(1): 59-80.
- Tan J, Li J H, Chen S W, et al. 2022. Quaternary activity characteristics and latest active age of the Feidong segment of the Tan-Lu fault zone[J]. *Chinese Journal of Geology*, 57(2): 356-374 (in Chinese).
- Tian X F, Mooney W D, Deng X G, et al. 2022. Crustal P- and S-wave velocity structure of the North China Craton at 36°N from active-source seismic data and its tectonic implications[J]. *Journal of Earth Science*, 33(3): 642-663.
- Xu G S, Xu Z X, Gong D Y, et al. 2014. Relationship between Tanlu fault and hydrocarbon accumulation in Liaozhong Sag, Bohai Bay, eastern China[J]. *Journal of Earth Science*, 25(2): 324-336.
- Yan W M, Gao X L, Xie Z Q. 2016. An optimization method for the parameters and locations of displacement-based energy dissipative devices in asymmetric buildings based on complex-3D finite element model and artificial fish swarm algorithm[J]. *Engineering Mechanics*, 33(9): 155-163 (in Chinese).
- Zhang T. 2024. Design and implementation of Jiangsu earthquake emergency contact directory based on WeChat mini program[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 54(2): 159-163 (in Chinese).
- Zheng Y P, Fang L H, Shu P, et al. 2017. Characteristics analysis of remote sensing on the Mingguang-Lujiang segment of the Tancheng-Lujiang fault zone[J]. *Earthquake Research in China*, 33(1): 129-140 (in Chinese).
- Zhou Z H, Sun Y P, Zhu R. 2024. Evaluation of post-earthquake buried personnel based on a new model of seismic intensity rapid assessment[J]. *Earth Science*, 49(2): 437-450 (in Chinese).
- Zhu G, Wang D X, Liu G S, et al. 2001. Extensional activities along the Tan-Lu fault zone and its geodynamic setting[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 269-278 (in Chinese).
- Zhu H B, Xing C Q, Li H, et al. 2010. Segmentation of main seismic belts and strong earthquakes in North China tectonic region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 10(6): 705-717, 766 (in Chinese).

附中文参考文献

- 何奕成, 范小平, 赵启光, 等. 2021. 郯庐断裂带中南段地壳结构分段特征[J]. *地球物理学报*, 64(9): 3164-3178.
- 胡进军, 丁伟天, 张辉, 等. 2023. 基于长短期记忆神经网络的实时地震烈度预测模型[J]. *地球科学*, 48(5): 1853-1864.
- 黄亭, 李宗超, 唐方头, 等. 2024. 泸定地震大渡河区域灾害调查及格林函数库应用可行性探讨[J]. *地球与行星物理理论评 (中英*

- 文), 55(4): 440-452.
- 李云平, 吴时国, 韩文功, 张岳桥. 2006. 合肥盆地和郯庐断裂带南段深部地球物理特征研究[J]. *地球物理学报*, 49(1): 115-122.
- 李宗超, 陈学良, 高孟潭, 等. 2016. 经验格林函数方法模拟强地面运动的研究进展[J]. *世界地震工程*, 32(2): 209-216.
- 李宗超, 高孟潭, 陈学良, 等. 2019a. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震强地震动模拟及漳扎镇地震动强度预测[J]. *地球物理学报*, 62(7): 2567-2581.
- 李宗超, 高孟潭, 陈学良, 吴清. 2019b. 2016 年熊本 $M_j7.3$ 地震的工程地震动参数模拟及分布特征分析[J]. *地震学报*, 41(1): 100-110.
- 李宗超, 孙吉泽, 高孟潭, 等. 2022. 青海玛多 $M7.4$ 地震中野马滩大桥地震动特征初判[J]. *地球与行星物理论评*, 53(1): 101-106.
- 刘备, 朱光, 翟明见, 等. 2015. 郯庐断裂带安徽段活断层特征与成因[J]. *地质科学*, 50(2): 611-630.
- 秦晶晶, 石金虎, 张毅, 等. 2018. 郯庐断裂带合肥段五河—合肥断裂构造特征[J]. *地球物理学报*, 61(11): 4475-4485.
- 谭静, 李加好, 陈守文, 等. 2022. 郯庐断裂带肥东段第四纪活动特征及最新活动时代[J]. *地质科学*, 57(2): 356-374.
- 闫维明, 杲晓龙, 谢志强. 2016. 基于复杂三维有限元模型和鱼群算法的平面不规则结构中位移型阻尼器参数和位置的优化方法[J]. *工程力学*, 33(9): 155-163.
- 张婷. 2024. 基于微信小程序的江苏地震应急联络通讯录设计与实现[J]. *地震科学进展*, 54(2): 159-163.
- 郑颖平, 方良好, 疏鹏, 等. 2017. 郯庐断裂带明光-庐江段遥感特征分析[J]. *中国地震*, 33(1): 129-140.
- 中国地震局监测预报司. 2005. 中国强地震目录(公元前 23 世纪—公元 2005 年 6 月) [M]. 北京: 地震出版社.
- 周中红, 孙艳萍, 朱瑞. 2024. 基于新型地震烈度快速评估方法的震后人员压埋估计[J]. *地球科学*, 49(2): 437-450.
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 2001. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景[J]. *地质科学*, 36(3): 269-278.
- 朱红彬, 邢成起, 李红, 韩孔艳. 2010. 华北构造区主要地震带分段与强震活动[J]. *地震学报*, 10(6): 705-717, 766.