



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

夏垫断裂 $M_w \geq 7.5$ 地震动的预测

周红 王文静

Ground motion prediction of $M_w \geq 7.5$ on Xiadian fault

Zhou Hong, Wang Wenjing

引用本文:

周红, 王文静. 2022. 夏垫断裂 $M_w \geq 7.5$ 地震动的预测. 地震学报[J], 44(5): 853–867. DOI: 10.11939/jass.20220089

Zhou H, Wang W J. 2022. Ground motion prediction of $M_w \geq 7.5$ on Xiadian fault. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(5): 853–867. DOI: 10.11939/jass.20220089

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220089>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用浅层地震反射法探测夏垫断裂浅部特征及空间展布

Shallow structural characteristics and spatial distribution of Xiadian fault by shallow seismic reflection method

地震学报. 2018, 40(4): 399–410 <https://doi.org/10.11939/jass.20170166>

面向地震烈度仪的现地地震动预测模型的构建与验证

Construction and verification of onsite ground motion prediction models for seismic intensity instrument

地震学报. 2021, 43(5): 643–655 <https://doi.org/10.11939/jass.20210075>

相对局部区域震源参数随机不确定性经验关系研究

Empirical relationship of stochastic uncertainty of source parameters in relative local area

地震学报. 2021, 43(4): 483–497 <https://doi.org/10.11939/jass.20200153>

玉溪盆地三维速度结构建模

3-D modeling of velocity structure for the Yuxi basin

地震学报. 2017, 39(6): 930–940 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.011>

台湾双冬断层近场脉冲型地震动的数值模拟

Numerical simulation of near-field pulse-like ground motion for the Shuantung fault in Taiwan region

地震学报. 2019, 41(3): 377–390 <https://doi.org/10.11939/jass.20180103>

基于强震动数据的龙门山地区地震动预测模型参数反演

Parameter estimation of ground-motion prediction model in Longmenshan region based on strong motion data

地震学报. 2018, 40(3): 374–386 <https://doi.org/10.11939/jass.20170215>

周红, 王文静. 2022. 夏垫断裂 $M_W \geq 7.5$ 地震动的预测. 地震学报, 44(5): 853–867. doi: 10.11939/jass.20220089.
Zhou H, Wang W J. 2022. Ground motion prediction of $M_W \geq 7.5$ on Xiadian fault. Acta Seismologica Sinica, 44(5): 853–867.
doi: 10.11939/jass.20220089.

夏垫断裂 $M_W \geq 7.5$ 地震动的预测*

周 红[†] 王文静

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 针对夏垫断裂开展了 $M_W \geq 7.5$ 地震动预测研究. 首先基于全破裂模式设定震源(使其尽可能涵盖夏垫断裂的未知信息)模拟得到夏垫断裂发生 $M_W \geq 7.5$ 地震时研究区域内的地面地震动场, 进而依据分位数筛选出各场点的地震动空间分布, 讨论了包含不确定震源下的加速度峰值和速度峰值的分布特征, 结果显示当夏垫断裂发生 $M_W 7.9$ 地震时, 通州城区、北京中心城区均会发生强烈的运动. 之后对比讨论了仿真震源下 $M_W 7.5$ 地震所引起的地面运动场的空间变化, 结果显示对于同等震级而言, 两种震源的模拟结果可以相互印证.

关键词 夏垫断裂 NNSIM 随机有限断层法 震源设定 地震动预测

doi: 10.11939/jass.20220089 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Ground motion prediction of $M_W \geq 7.5$ on Xiadian fault

Zhou Hong[†] Wang Wenjing

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The prediction of ground motion fields for potential earthquakes is important for urban planning and regional seismic hazard assessment. In this paper, the prediction of $M_W \geq 7.5$ ground motion is carried out for the Xiadian fault. Firstly, the earthquake source is set based on the full rupture patterns to cover the unknown information of the Xiadian fault as much as possible. Then the ground motion field in the study area is simulated due to the $M_W \geq 7.5$ earthquake on the Xiadian fault. Furthermore, the spatial distribution of ground motion at each site is filtered based on the quantile method, and the distribution characteristics of peak ground acceleration and peak ground velocity for the inclusion of uncertain sources are discussed. The results show that an $M_W 7.9$ earthquake on the Xiadian fault will produce the strong ground motion in Tongzhou district and Beijing center zone. After that, the spatial distribution of the ground motion due to the $M_W 7.5$ earthquake from the simulated source is discussed. The results illustrate that the simulated ground motion from the two types of sources can corroborate each other for the same magnitude. Our study provides a method for the earthquake hazard predictions due to the potential sources with some unknowns.

* 基金项目 国家自然科学基金面上项目(42174070)、北京市自然科学基金面上项目(8222035)和国家重点研发计划(2017YFC1500205)联合资助。
收稿日期 2022-06-07 收到初稿, 2022-07-28 决定采用修改稿。
作者简介 周红, 博士, 研究员, 主要从事强地面运动模拟、地震波传播激发理论的研究, e-mail: zhouhong@cea-igp.ac.cn



Key words: Xiadian fault; NNSIM stochastic finite fault method; seismic source setting; ground motion prediction

引言

夏垫断裂位于北京东南偏南的廊坊市附近,是该地区的主要活动断层,具有发生强震的危险,而这些地震会对北京市及其周边的人口稠密地区构成威胁(黄秀铭等, 1991; 焦青, 邱泽华, 2006; Zhang, Wang, 2017). 已有研究表明夏垫断裂为大厂隐伏盆地的边界控制性断裂,是由从古近纪伸展变形到新近纪以来压剪构造环境下的应变动态变化所致,现在仍处于活动状态(冉勇康等, 1997; 徐锡伟等, 2005; 吴晶等, 2007). 该断裂走向北东—北东东,呈上陡下缓的趋势,构造性质属于正断层,从深部到浅部倾角逐渐减小(江娃利等, 2000; 张先康等, 2002; 赵金仁等, 2004; 何付兵等, 2013; 雍凡等, 2014; 李赫等, 2020). 夏垫断裂南北向长约 120 km,向西南方向延伸至文安,可能与霸县—束鹿—邯郸断裂带发生相互作用,这些断裂与夏垫断裂一起构成夏垫断裂带(杨晓平等, 2012; 冉志杰等, 2013; 李赫等, 2020).

在夏垫断裂上开展的钻井和探槽开挖研究结果(张晚霞等, 1995)显示夏垫断裂呈东南盘下降、西北盘抬升的正断倾滑性质,兼有右旋走滑分量. 高景华等(2007)通过浅层地震勘探成功地探测到夏垫断裂的南段及其上断点,为隐伏夏垫断裂的地质构造、区域活动性特点等的进一步研究提供了可靠的依据. 长期研究显示夏垫断裂两侧的灾害状况差异极大,产生的差异源于地层结构、沉积物高度和反射波能量等方面(高振寰, 1979; Sun *et al.*, 1998; 赵金仁等, 2004; 刘保金等, 2009; 毛昌伟等, 2010; 杨晓平等, 2012),因此,从纵向和横向上来看震源区均处于地壳结构差异明显的接触带上,该接触带进而也可能成为孕育大地震的有利区域(Li *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2019). 同样,力学研究结果也表明,夏垫断裂是未来可能发生强震的关键之地(Stein *et al.*, 1997; Harris, 2000; 沈正康等, 2004; Robinson, Zhou, 2005; Liu *et al.*, 2007; Karakostas *et al.*, 2013).

关于夏垫断裂未来活动性方面的研究主要有:高景华等(2008)经由探测试验得到夏垫断裂在 1679 年三河—平谷地震震源西南方向约 3 km 处的活动性减弱;肖修来等(2017)基于 G-R 关系利用最小二乘法对华北地区和三河—平谷地区的地震复发周期进行时间扫描计算,计算结果表明两地区的地震活动性自 1976 年唐山地震以来趋于稳定;余中元等(2020)采用时间相依的布朗模型、随机特征滑动模型和通用模型对断层破裂源上特征型地震活动的时间相依特征开展研究,其结果也表明夏垫断裂在未来三十年内发生强震活动的可能性较低. 虽然强震发生的可能性较低意味着夏垫断裂的活动性较弱,但强震复发间隔和同震位移均有很大的不确定性,所以夏垫断裂的地震危险性仍然有必要进一步分析.

为了评估夏垫断裂潜在的地震危险性,诸多科研人员针对夏垫断裂开展了多方面的研究,包括其复杂的断裂行为、对大地震分布的控制以及与潜在地震风险评估的内在关系,还有该断裂的构造演化历史、地壳上地幔速度结构、地球化学特征以及断裂形成和变形机制(高清武,李霓, 1998; 刘博研等, 2007; 刘保金等, 2009; 雍凡等, 2014; 张培震等, 2014; Wang *et al.*, 2014). 与此同时,夏垫断裂活动构造的几何结构特征和运动学、其最新活动期、全新世的古地震活动、晚第四纪的构造变形和分段以及强震模拟和地震危险性预测方面的研究也在展开(冉勇康等, 1997; 张先康等, 2002; 邓起东等, 2003; 徐锡伟等, 2005; 张培震等, 2014; Wang *et al.*, 2014). 此外,前人还通过二十世纪九十年代分布在夏垫断裂带上的东

六合屯村、潘各庄村和齐辛庄村的沟渠进行了地震危险性分析参数的研究(冉勇康等, 1997; 江娃利等, 2000). 这些研究对于夏垫断裂所在地区的地震危险性分析和未来地震活动预测都具有重要意义.

本文拟在上述研究的基础上, 利用多震源、多破裂方式对夏垫断裂开展地震动模拟, 分析通州城区和北京中心城区可能发生的地震动灾害, 为首都圈地震危险性分析提供理论支撑.

1 方法

随机有限断层法广泛应用于地震动预测模型的构建中, 其基本思想是将一个断层分成 N 个可视为点源的子断层, 最终按照一定的时间延迟将各子断层的地震动模拟结果叠加起来即可得到整个大断层的模拟地震动效应(Beresnev, Atkinson, 1997). 针对传统的随机有限断层法的模拟结果仅在高频部分可靠, Zhou 和 Chang (2019) 提出了 NNSIM (non-uniform stress and non-uniform window function simulation method) 随机有限断层法, 该方法与传统的随机有限断层法不同主要在于: 一是用不同源时间函数替换每个点源特定的时间函数, 从而提高了低频模拟部分结果的可靠性; 二是加入变化的应力降, 以减少单个应力降在模拟过程中所产生的影响, 使最终的模拟结果更加接近于实际情况.

NNSIM 随机有限断层法沿用传统随机有限断层法的叠加思想, 先把整个断层分为 N 个子断层, 并将每个子断层看作一个点源, 按照特定破裂模式和速度下的时间顺序, 分别叠加子断层的模拟结果, 从而得到有限断层破裂的地震动效应.

$$a(t) = \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_w} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}), \quad (1)$$

式中: n_l 和 n_w 分别表示断层在长和宽两个方向上划分的子断层个数, Δt_{ij} 为第 ij 个子断层点源到观测点的相对延时, $a_{ij}(t)$ 是在第 ij 个子断层上用随机点源法计算得到的地震加速度, $a(t)$ 为大断层在观测点的模拟加速度. 计算第 ij 个子源产生的地震动 $a_{ij}(t)$ 时, 需要使用非均匀拐角频率(Zhou, Chang, 2019), 第 ij 个子源的角频率为

$$f_{ij} = 4.9 \times 10^6 \beta^3 \sqrt{\frac{\Delta \sigma_{ij}}{M_{0ij}}}, \quad (2)$$

式中, $\Delta \sigma_{ij}$ 和 M_{0ij} 分别表示第 ij 个子断层的应力降和地震矩, 其中下标 ij 表示各子源的地震矩和应力降不相同. $\Delta \sigma_{ij}$ 由 Andrews (1980) 的位错与应力降之间的数学关系式计算得到. NNSIM 方法的详情请参阅之前相关研究(周红, 2018; Zhou, Chang, 2019; 周红等, 2021).

2 多震源设定

我们在前人研究(高孟潭等, 2002; 潘波等, 2006, 2009; 刘博研等, 2007; 付长华等, 2012; 巴振宇等, 2022)的基础上, 将此次研究区域选取为夏垫断裂中间部分, 该部分总长度约为 80 km, 宽度约为 25 km. 选取 $M_w 7.9$, $M_w 7.8$ 和 $M_w 7.5$ 等三个震级, 每个震级均分别按照多震源、多破裂的方式进行模拟. Somerville 等(1999)指出震级大于 $M 7.5$ 时进行地震动模拟应当设置两个凹凸体, 本文依此均设置两个凹凸体进行模拟. 各震级的破裂模式按照 Somerville 等(1999)的震源设定方式来确定. 具体设定方法如下: ① 凹凸体为两个; ② 两个

凹凸体面积占总破裂面积的 22%; ③ 凹凸体破裂地震矩占总破裂地震矩的 44%; ④ 宏观震中处于主凹凸体之外; ⑤ 主凹凸体面积占总破裂面积的 17.5%. 按照上面的震源设定方式, 将夏垫断层均分成 80 个子断层, 每个断层为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$. 按照凹凸体面积比例, 得出主凹凸体的大小为 350 km^2 , 对应 14 个子断层, 次凹凸体大小为 90 km^2 , 对应 4 个子断层, 凹凸体位错为平均位错的两倍, 其余 62 个子断层为背景位错. 设置主凹凸体与次凹凸体在 80 个子断层上充分排列组合, 且主、次凹凸体所对应的子断层不能重合, 也不位于最边缘, 按照这种分布方式, 用排列组合的方法计算得到满足条件的破裂方式共有 180 种. 本研究中断层模型兼顾走滑与倾滑的性质(向宏发等, 1988; 张先康等, 2002), 断层中每个凹凸体的埋深受倾角的影响不尽相同, 设置顶点的埋深为 1 km .

3 夏垫断裂 $M_W7.8$ 和 $M_W7.9$ 地震的强地震动分析

夏垫断裂上发生于 1679 年的三河—平谷地震应该是弱 $M_W7.9$ 或强 $M_W7.8$ 的一次巨震. 因此我们有必要评估如果夏垫断裂上再次发生这样的巨震会引起怎样的强地面运动, 又会导致何等破坏.

如何评估夏垫断裂上未来可能发生的 $M_W7.9$ 和 $M_W7.8$ 地震的地震动? 由于任何一次特定破裂模式的震源所激发的强地面运动不足以代表某一震级地震产生的地震动, 而仅能代表特定破裂模式本身产生的地震动, 因此对于某个震级引起的地震动变化, 需要引用多破裂模式总体讨论该震级地震所产生的地震动变化. 利用 Zhou 和 Chang (2019) 提出的 NNSIM 随机有限断层法, 按照 Somerville 等(1999)的震源设定方式, 最大凹凸体中心位于宏观震中之外, 我们限定最大凹凸体在宏观震中的西南, 这样对于夏垫断裂上可能的 $M_W7.9$ 和 $M_W7.8$ 复发地震的地震动, 满足该限制条件的设定破裂模式共 180 种. 下面我们将讨论这 180 种破裂模式的总体效果.

对于地表每个场点, 分别模拟 $M_W7.9$ 和 $M_W7.8$ 地震的每个破裂模式产生的地震动. 根据地震矩、应力降等参数的计算可以得到每个场点对应的振幅谱, 基于该振幅谱的反傅里叶变换得到场点的地震动时程, 然而由于所需相位谱是随机产生的, 因此每个场点的地震动时程都需要经过多次计算才能得到比较可信的峰值. 考虑到计算量, 我们选取 5 次计算. 这样, 同一个震级下每个场点得到 180×5 个模拟结果, 即 900 个加速度和速度记录. 取每条加速度峰值(PGA)和速度峰值(PGV)或者反应谱为研究对象, 讨论其空间分布特征. 这里以 PGA 为例, 每个场点 900 个 PGA, 分别取这 900 个 PGA 值的 50%, 60%, 70% 和 80% 分布概率所对应的 PGA 值即为某一震级 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数的 PGA 值, 其中 50% 分位数的 PGA 代表该场点的地震动相对较小, 80% 分位数的 PGA 代表该场点的地震动比较高, 该震级大部分地震激发的地震动小于该值.

图 1 为 $M_W7.8$ 震级的四个分位数所对应的 PGA 分布, 402 cm/s^2 等值线对应于 IX 烈度, 分位数从 50% 增至 60%, 70% 和 80% 时, IX 烈度范围逐渐加大, 相对应的面积分别为 6.92 万 km^2 , 7.23 万 km^2 , 7.67 万 km^2 和 11.6 万 km^2 . 从图 1c 和 1d 可见: 作为北京副中心的通州城区, 其 PGA 接近 831 cm/s^2 , 对应于 X 烈度圈; 北京处于 195 cm/s^2 线上, 靠近 XI 烈度圈. 图 2 为对应 $M_W7.9$ 地震 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数所对应的 PGA 空间分布, 可见: 对应的 IX 烈度圈内的面积从 10.3 万 km^2 依次增加至 10.7 万 km^2 , 11.2 万 km^2 , 最后增至 11.9 万 km^2 ; XI 烈度圈(图 2 中内红线)也有明显的增加; 通州城区的 PGA 达到了 1000 cm/s^2 , 在 X 烈度圈里.

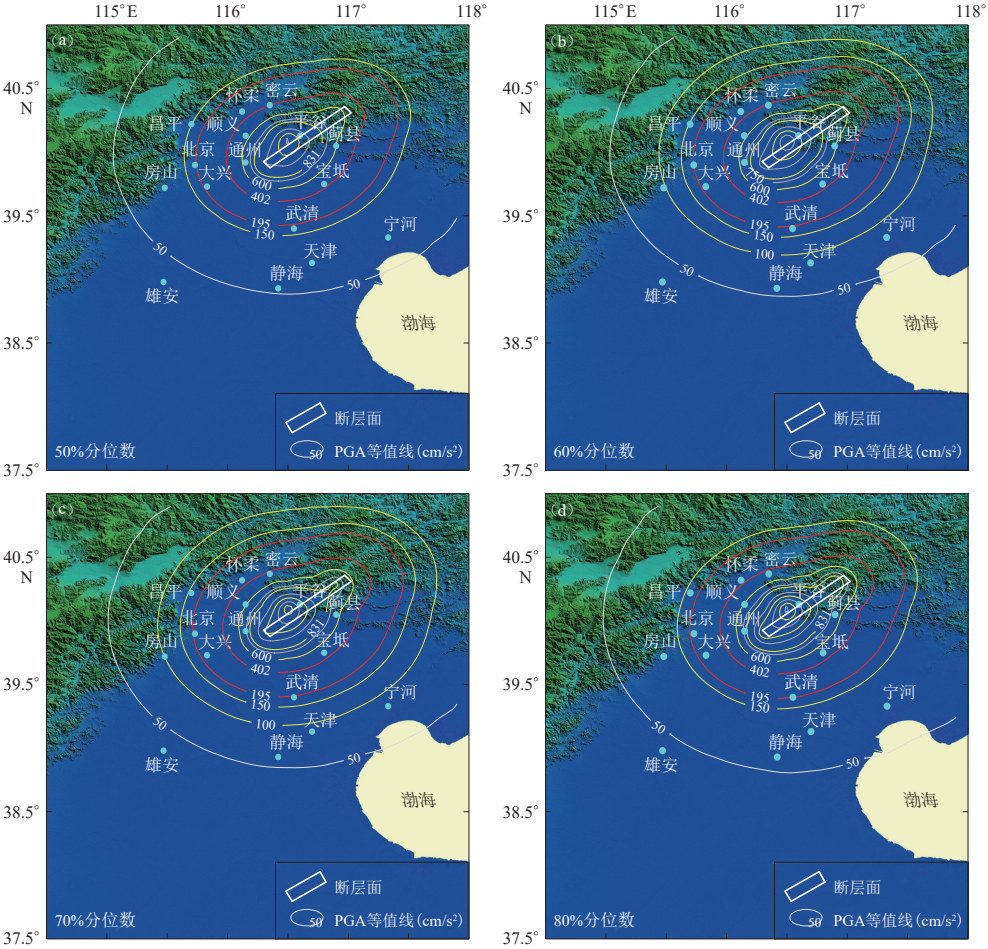


图 1 $M_W 7.8$ 地震多破裂模式下 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数的地震动峰值(PGA)分布
Fig. 1 Distribution of 50%, 60%, 70% and 80% quantile PGAs at $M_W 7.8$ by multiple rupture patterns

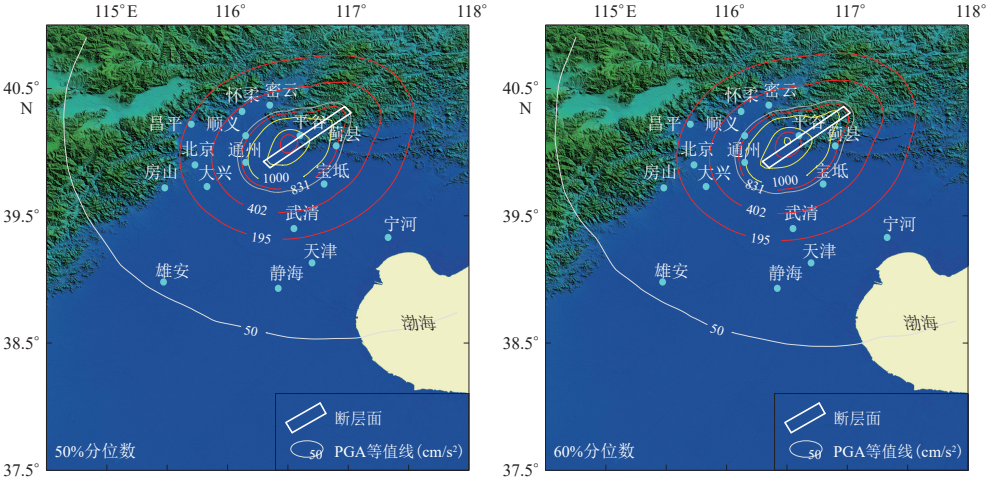


图 2 $M_W 7.9$ 地震多破裂模式下 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数的 PGA 分布
Fig. 2 Distribution of 50%, 60%, 70% and 80% quantile PGAs at $M_W 7.9$ by multiple rupture patterns

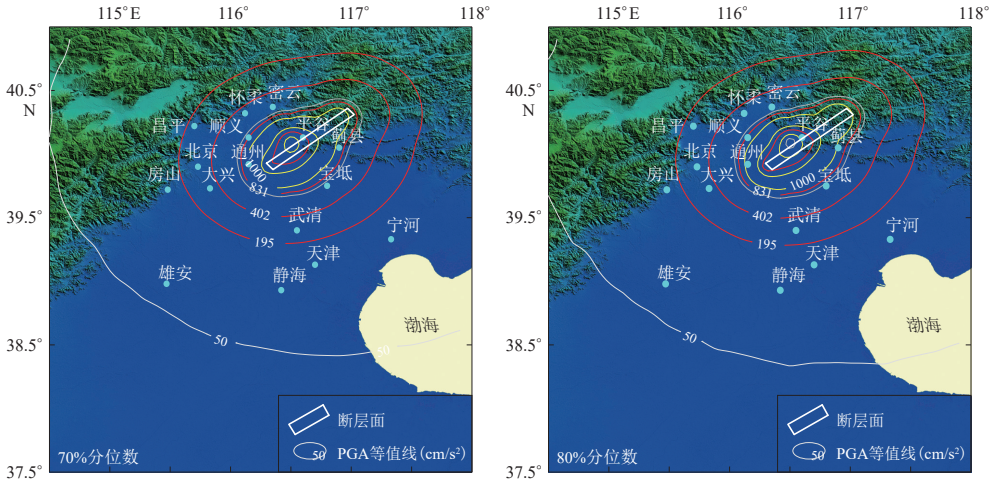


图2 $M_W7.9$ 地震多破裂模式下50%, 60%, 70%和80%分位数的PGA分布

Fig. 2 Distribution of 50%, 60%, 70% and 80% quantile PGAs at $M_W7.9$ by multiple rupture patterns

4 夏垫断裂 $M_W7.5$ 地震多破裂模式下的强地震动场分析

4.1 夏垫断裂多断层多破裂模式下的地震动分布

夏垫断裂真实的走向至今还不确定, 多数研究成果显示夏垫断裂的总体走向处于 30° — 60° 之间. 为了使本文的讨论结果更具有代表性和普遍性, 我们在多破裂模式下总体讨论 $M_W7.5$ 地震产生的地震动变化, 再在模拟中加入走向因素, 针对走向为 30° , 45° , 55° 的三条断层, 研究其强地面运动的分布特征. 对于每组走向断层, 断层长度仍然设定为破裂长度为 80 km, 宽度为 25 km, 子断层大小为 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$. 对于多震源设定部分, 我们取消凹凸体位置的限制, 再按照排列组合的计算方法, 得出每条断层发生破裂的可能方式共有 294 种.

三个走向下的断层在 294 种破裂方式下模拟的地震动也按 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数筛选, 对应的地震动分布如图 3—5 所示. 从图中显然可见地震动分布呈现如下特征: ① 50%, 60%, 70%, 80% 分位数地震动均环绕断层呈近似椭圆分布; ② 80% 分位数地震动对应的 IX 度烈度圈较 50% 分位数地震动对应的 XI 度烈度圈明显增大, 即分位数越大, 地震动所对应的 IX 度烈度圈的范围越大; ③ 对于通州城区而言, 在断层走向为 30° , 45° 和 55° 三种情况下, 30° 走向断层距离 IX 度烈度圈最近; ④ 同样分位数 PGA 在三种断层走向下, 30° 走向在北京中心城区处产生的地震动峰值最大; ⑤ 不管哪个走向, 均在 70% 和 80% 分位数时才会产生较为明显的大于 750 cm/s^2 的加速度, 这说明分位数增高时在同一走向条件下, PGA 值会随之增大.

将三个走向断层的加速度合在一起进行综合评价, 仍采用分位数方法, 得到图 6 所示的 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数的 PGA 分布图. 相较于图 3—5, 变化主要表现在: ① 等值线变宽, 如 402 cm/s^2 对应的 IX 烈度圈等值线有明显的加宽; ② 由于断层南端不动, 而北端发生移动, 因此等值线形状由围绕断层较均匀的椭圆变成一头细一头粗的梨形, 即等值线形状由于不同走向断层的加入而发生了变化, 且变得更为复杂; ③ 合成后的等值线值与走向为 30° 时的结果相差明显, 说明 30° 走向时断层对地震动的影响占比较大; ④ 此时通州城区位于 402 cm/s^2 PGA 等值线附近, 即靠近 IX 烈度圈.

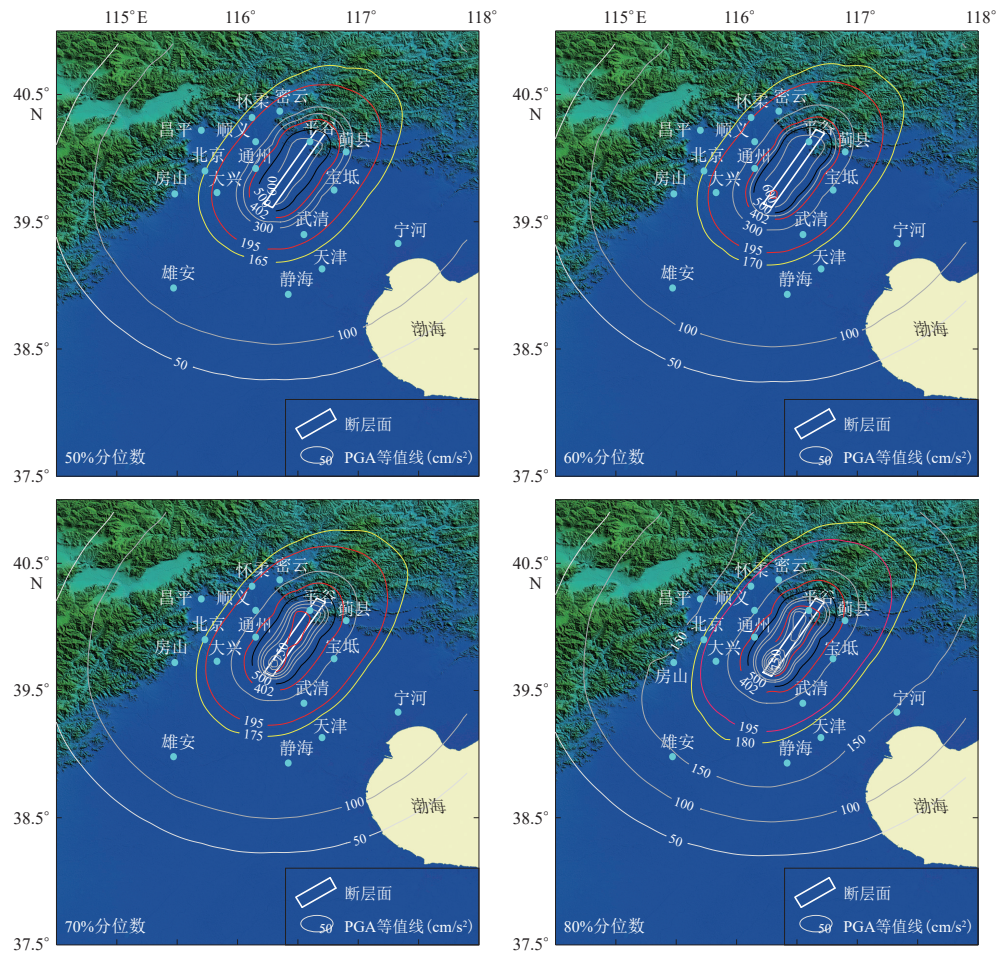


图 3 断层走向为 30° 时 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数下的地震动 PGA 分布

Fig. 3 PGA distribution of ground motion at 50%, 60%, 70% and 80% quartile due to the fault with strike 30°

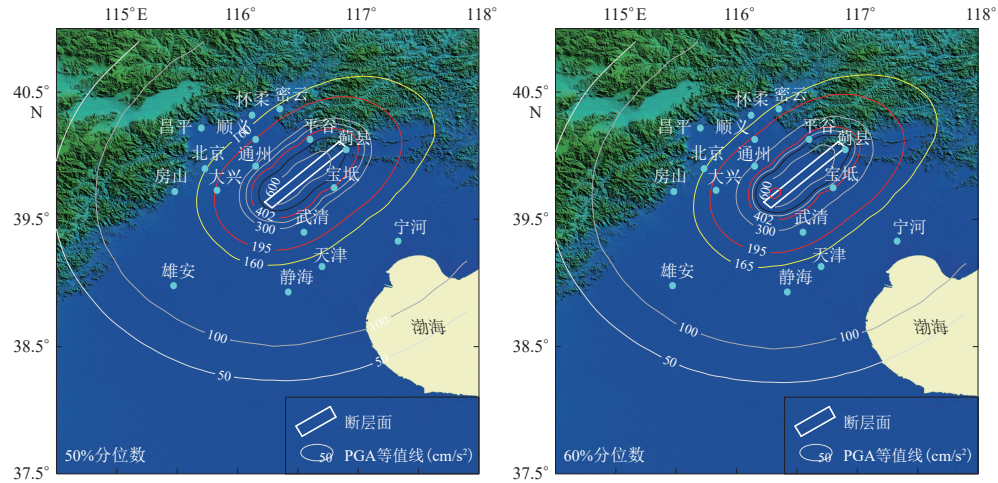


图 4 断层走向为 45° 时 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数下的地震动 PGA 分布

Fig. 4 PGA distribution of ground motion at 50%, 60%, 70% and 80% quartile due to the fault with strike 45°

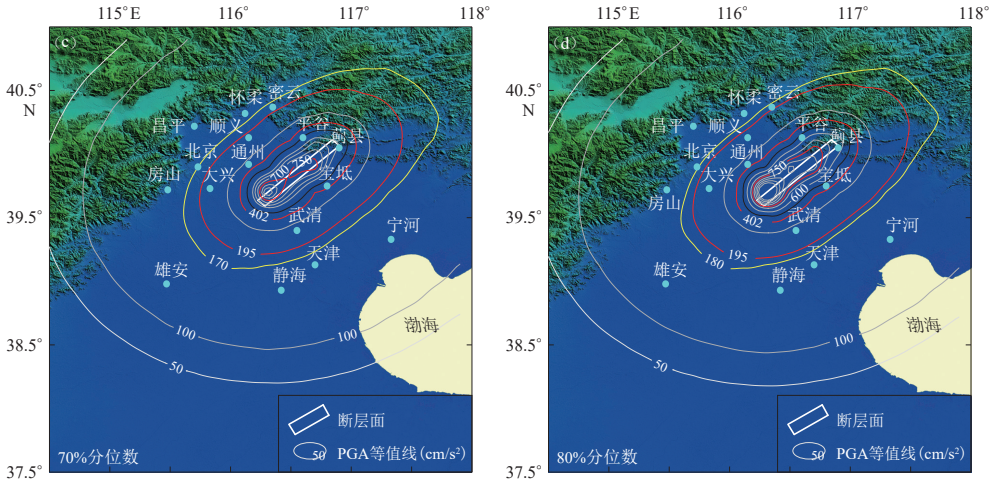


图 4 断层走向为 45°时 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数下的地震动 PGA 分布

Fig. 4 PGA distribution of ground motion at 50%, 60%, 70% and 80% quartile due to the fault with strike 45°

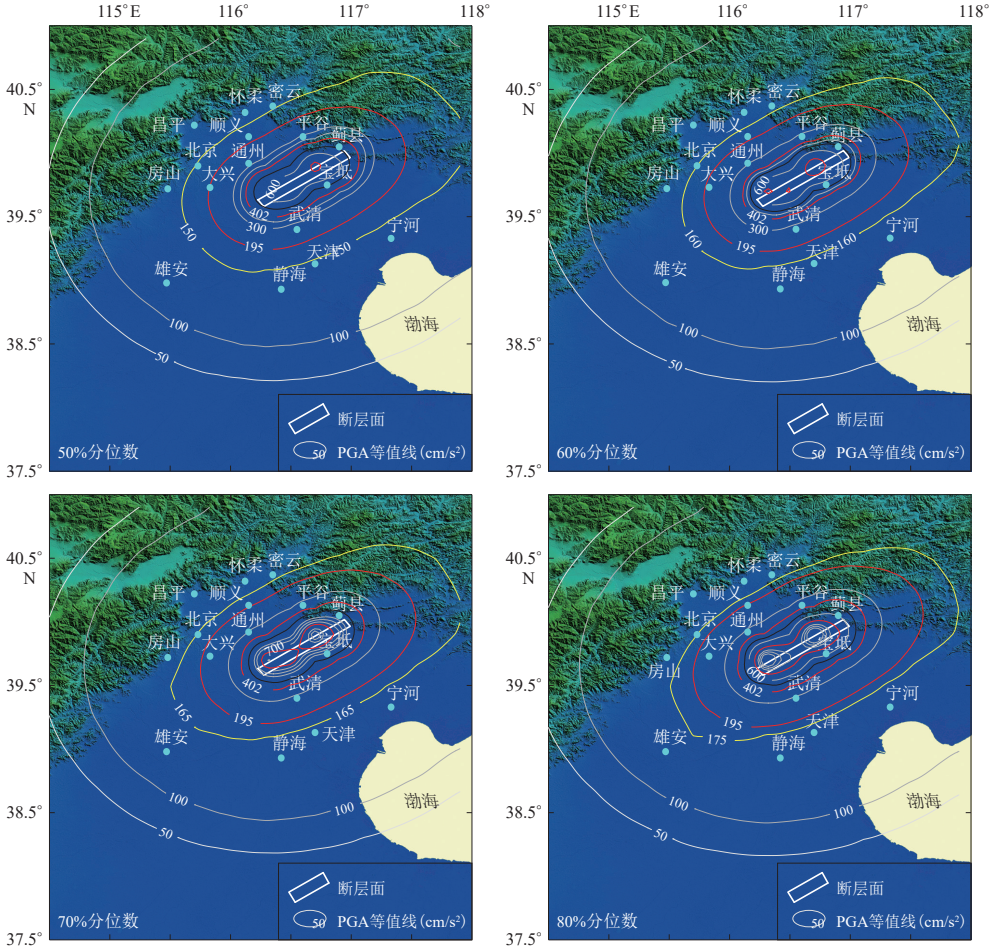


图 5 断层走向为 55°时 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数下的地震动 PGA 分布

Fig. 5 PGA distribution of ground motion at 50%, 60%, 70% and 80% quartile due to the fault with strike 55°

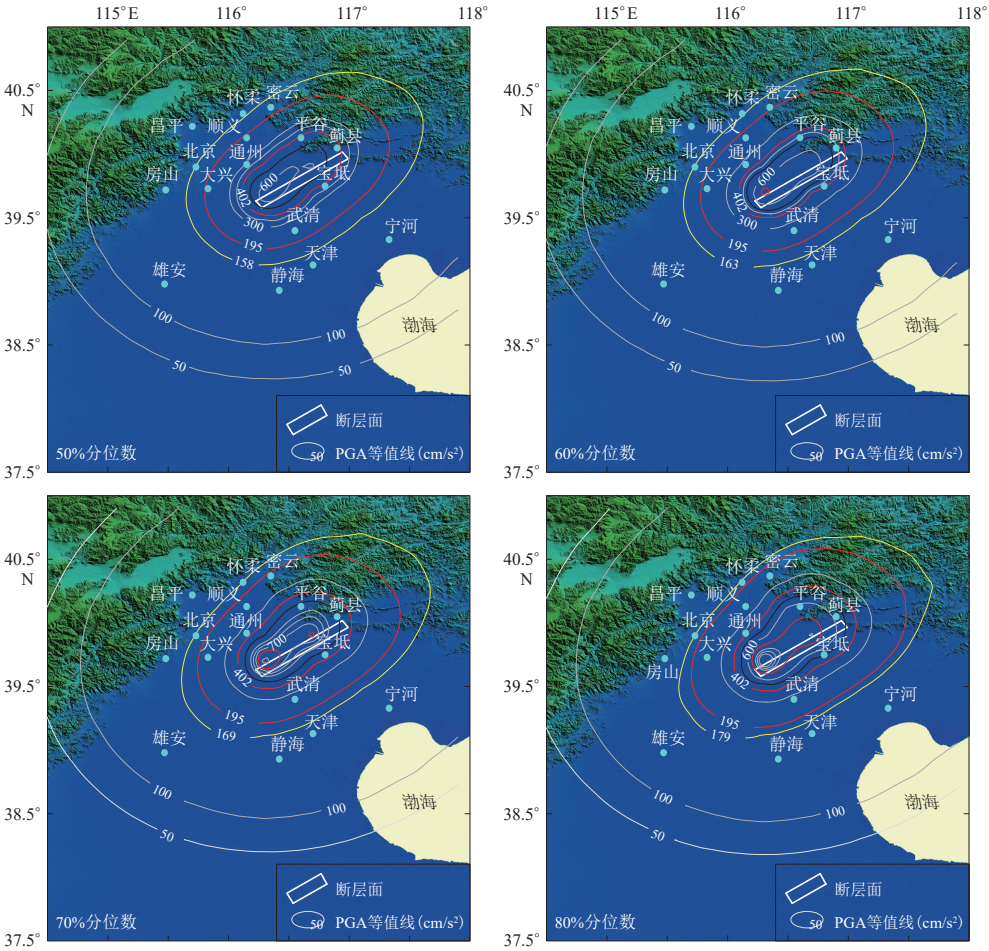


图 6 三个走向的加速度合成后 50%, 60%, 70% 和 80% 分位数的下地震动 PGA 分布

Fig. 6 Distribution of PGAs of the synthesis records at 50%, 60%, 70% and 80% quartiles for the faults with three strikes

4.2 夏垫断裂 $M_W 7.5$ 仿真地震破裂模式下地震动分布

Wang 等^①针对夏垫断裂利用滑动摩擦准则模拟了 $M_W 7.5$ 地震的仿真破裂过程, 本文将其计算结果作为发震震源, 依然采用 NNSIM 随机有限断层法, 按照第二节中的震源设定方式开展了 $M_W 7.5$ 的地表地震动模拟. 图 7 为模拟的加速度峰值及其反应谱分布, 图 8 为速度峰值及其对应的反应谱分布, 图中断层(黄色线框)为非规则曲面, 其几何形态更接近实际断层面. 对于加速度(图 7), 我们选择长周期($T=3\text{ s}$)、中周期($T=1\text{ s}$)和短周期($T=0.2\text{ s}$)的反应谱作为代表以呈现加速度反应谱(pseudo-acceleration response spectrum, 即 PSA)的空间分布, 由图 7 显然可见: ① 随着周期变短, PSA 最大值减小, 短周期($T=0.2\text{ s}$)的 PSA 最大值超过了 $1\,000\text{ cm/s}^2$, 长周期($T=3\text{ s}$)的 PSA 最大值小于 100 cm/s^2 ; ② 在距离断层垂直距离 20 km 范围内, 短周期($T=0.2\text{ s}$)的 PSA 均超过了 $1\,000\text{ cm/s}^2$, 距离断层垂直距离 50 km 范围

① Wang Z Y, Li Y L, Wang W Q, Zhang W Q, Zhang Z G. 2022. Revisiting paleoearthquakes with computational seismology: A case study of the 1679 Sanhe-Pinggu earthquake (submitted).

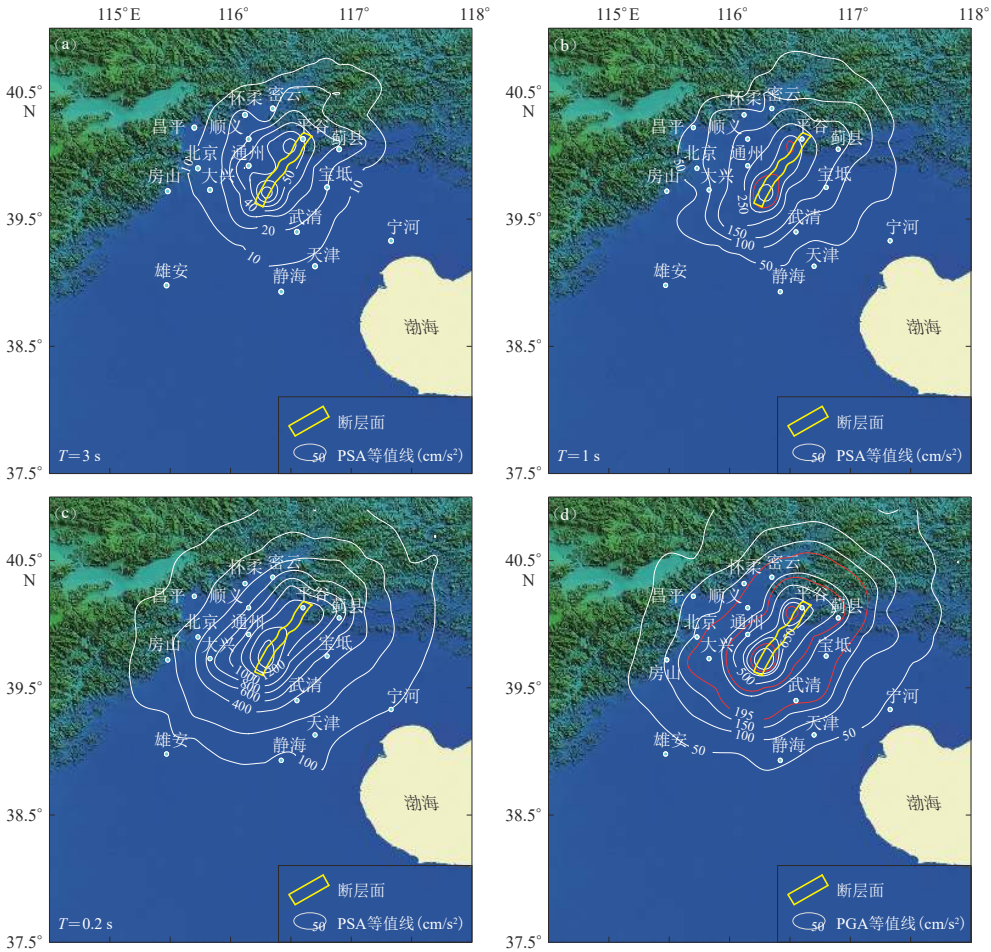


图 7 模拟 $M_W7.5$ 加速度峰值及其对应的不同周期 T 的反应谱分布

Fig. 7 The distribution of simulated acceleration peaks and response spectra with different period T for $M_W7.5$

内短周期($T=0.2\text{ s}$)的 PSA 均超过了 400 cm/s^2 . 图 7d 的 PGA 分布显示, 仿真破裂产生了两个峰值区域(最内红圈), PGA 超过 750 cm/s^2 , IX 烈度圈(第二红圈, 对应 402 cm/s^2)的形态随内红圈变换, 呈现为两头大中间小的形态; 通州在 IX 烈度圈内, PGA 达到 500 cm/s^2 ; 北京中心的 PGA 达到 160 cm/s^2 .

图 8 为模拟的 $M_W7.5$ 速度峰值及其对应的速度反应谱(pseudo-velocity response spectrum, 即 PSV)分布, 可见: 长周期($T=3\text{ s}$)、中周期($T=1\text{ s}$)和短周期($T=0.2\text{ s}$)的速度反应谱 PSV 大致为围绕断层变化的椭圆, 断层南端 PSV 变化大于断层北端, 表现为等值线变化剧烈; 中周期($T=1\text{ s}$)的 PSV 最大值大于长周期($T=3\text{ s}$)和短周期($T=0.2\text{ s}$)的 PSV 最大值, 其最大值大于 100 cm/s ; PGV 的空间变化最为复杂, 有明显的上盘效应, 表现为 PGV 等值线向渤海方向延伸; 通州的 PGV 约为 25 cm/s , 北京中心处的 PGV 小于 10 cm/s . 图 7 和图 8 显示对于模拟的 $M_W7.5$ 地震, 其地面地震动分布复杂, IX 烈度圈(图 7 第二红线圈)大致距离断层 40—50 km.

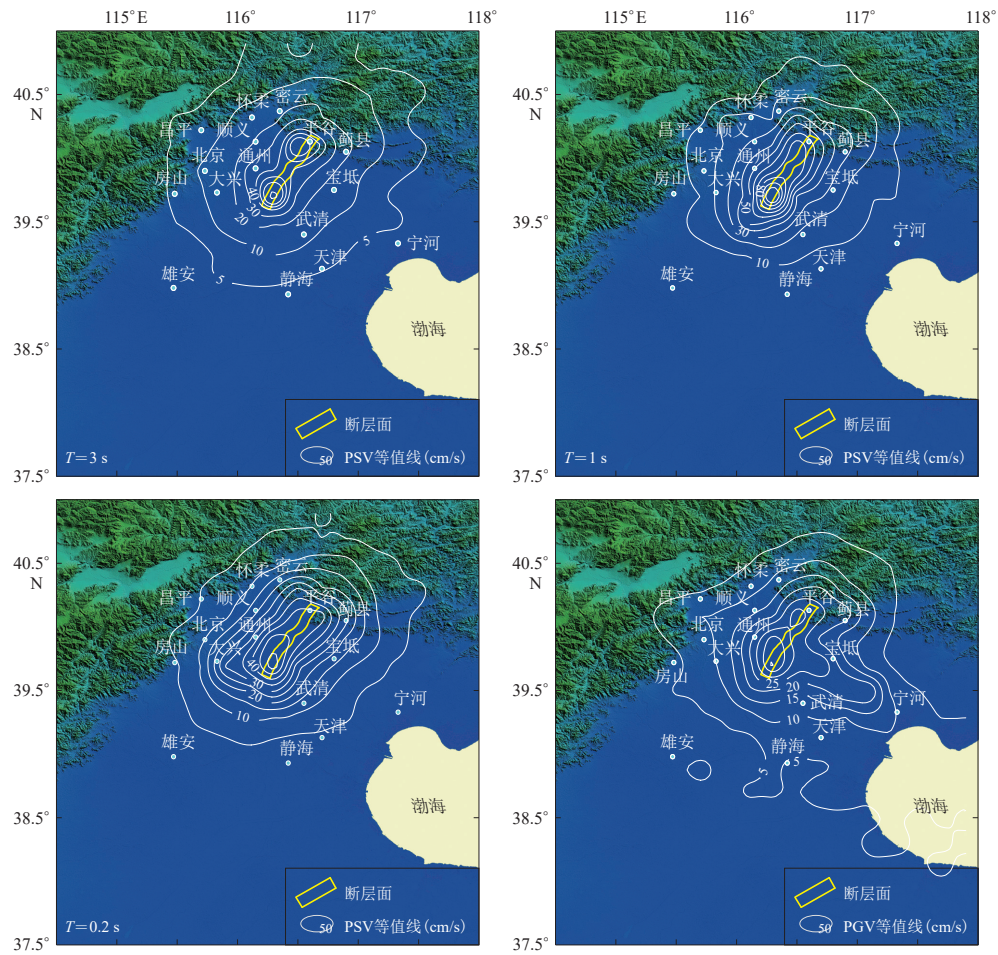


图 8 模拟 $M_W 7.5$ 速度峰值及其对应的不同周期 T 的反应谱分布

Fig. 8 Distribution of the simulated velocity peaks and response spectra with different period T for $M_W 7.5$

5 讨论与结论

夏垫断裂是影响北京地区及首都圈地震安全的最重要的断裂带, 1679 年曾经发生过 $M_W 8.0$ 巨震, 对北京地区产生了极为严重的破坏. 本文通过全破裂模式设定震源, 模拟了夏垫断裂发生强震在首都圈产生的地面运动及分布特征, 可以为首都圈及其附近区域的地震预测及防震减灾工作提供参考, 主要结论如下:

- 1) 多震级、多破裂模式的地震动模拟提供了震区各场点的地震动变化范围, 较一次地震的模拟结果更可信, 其模拟结果显示: 夏垫断裂发生 $M_W \geq 7.5$ 地震时, 地面运动 IX 烈度圈的范围较大, 首都圈可能遭受严重的破坏, 而通州城区位于 IX 烈度圈内, 受破坏程度可能更为严重; 夏垫断裂发生 $M_W < 7.9$ 地震时, 北京中心城区位于 VIII 烈度圈外, 发生 $M_W 7.9$ 时, 其位于 VIII 烈度圈内, 遭受严重破坏的可能性明显加大;
- 2) 基于摩擦准则提供的仿真断层破裂过程震源, 可以提供更复杂的震源变化. 基于仿真震源与设定震源的模拟结果量级一致, 两结果可以相互印证、互为补充.

参 考 文 献

- 巴振宁, 赵靖轩, 吴孟桃, 梁建文. 2022. 基于 CPU-GPU 异构并行的复杂场地近断层地震动谱元法模拟[J]. *地震学报*, **44**(1): 182–193.
- Ba Z N, Zhao J X, Wu M T, Liang J W. 2022. Simulation of near-fault ground motions in complex sites based on CPU-GPU heterogeneous parallelism by spectral element method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **44**(1): 182–193 (in Chinese).
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 陈立春. 2003. 中国活动构造与地震活动[J]. *地学前缘*, **10**(增刊 1): 66–73.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, Yang X P, Min W, Chen L C. 2003. Active tectonics and earthquake activities in China[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(S1): 66–73 (in Chinese).
- 付长华, 高孟潭, 陈颀. 2012. 北京盆地结构对长周期地震动反应谱的影响[J]. *地震学报*, **34**(3): 374–382.
- Fu C H, Gao M T, Chen K. 2012. A study on long-period response spectrum of ground motion affected by basin structure of Beijing[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(3): 374–382 (in Chinese).
- 高景华, 徐明才, 荣立新, 柴铭涛, 王广科, 王小江, 刘冠军. 2007. 探测城市断裂活动性的浅层地震方法技术[J]. *物探与化探*, **31**(增刊 1): 4–8.
- Gao J H, Xu M C, Rong L X, Chai M T, Wang G K, Wang X J, Liu G J. 2007. The shallow seismic method for detecting city fault activity[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, **31**(S1): 4–8 (in Chinese).
- 高景华, 徐明才, 荣立新, 柴铭涛, 王广科, 王小江, 刘冠军. 2008. 利用地震剖面研究夏垫断裂西南段的活动性[J]. *地震地质*, **30**(2): 497–504.
- Gao J H, Xu M C, Rong L X, Chai M T, Wang G K, Wang X J, Liu G J. 2008. Activity of the southwest segment of Xiadian fault investigated by seismic reflection profiling[J]. *Seismology and Geology*, **30**(2): 497–504 (in Chinese).
- 高孟潭, 俞言祥, 张晓梅, 吴健, 胡平, 丁彦慧. 2002. 北京地区地震动的三维有限差分模拟[J]. *中国地震*, **18**(4): 356–364.
- Gao M T, Yu Y X, Zhang X M, Wu J, Hu P, Ding Y H. 2002. Three-dimensional finite-difference simulations of ground motions in the Beijing area[J]. *Earthquake Research in China*, **18**(4): 356–364 (in Chinese).
- 高清武, 李霓. 1998. 夏垫断裂气释放与地震活动的关系[J]. *地震学报*, **20**(4): 432–436.
- Gao Q W, Li N. 1998. Relationship between H_2 release and seismicity on Xiadian fault[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **11**(4): 501–505.
- 高振寰. 1979. 唐山地震引起北京地区烈度异常区的原因分析[J]. *地震地质*, **1**(2): 74–82.
- Gao Z H. 1979. On distribution of intensity anomalies in the Beijing region caused by the Tangshan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **1**(2): 74–82 (in Chinese).
- 何付兵, 白凌燕, 王继明, 刘予, 蔡向民, 孙永华, 张磊, 方同明, 郭高轩. 2013. 夏垫断裂带深部构造特征与第四纪活动性讨论[J]. *地震地质*, **35**(3): 490–505.
- He F B, Bai L Y, Wang J M, Liu Y, Cai X M, Sun Y H, Zhang L, Fang T M, Guo G X. 2013. Deep structure and Quaternary activities of the Xiadian fault zone[J]. *Seismology and Geology*, **35**(3): 490–505 (in Chinese).
- 何宏林, 闵伟, 原口强. 2008. 1679 年三河—平谷 8 级地震破裂带的大地切片实验研究[J]. *地震地质*, **30**(1): 289–297.
- He H L, Min W, Haraguchi T. 2008. Testing geo-slicer on the rupture of the M_8 Sanhe-Pinggu earthquake of 1679[J]. *Seismology and Geology*, **30**(1): 289–297 (in Chinese).
- 黄秀铭, 汪良谋, 徐杰, 方仲景, 张裕明, 向家翠, 王辉. 1991. 北京地区新构造运动特征[J]. *地震地质*, **13**(1): 43–51.
- Huang X M, Wang L M, Xu J, Fang Z J, Zhang Y M, Xiang J C, Wang H. 1991. Characteristics of neotectonic movement in Beijing area[J]. *Seismology and Geology*, **13**(1): 43–51 (in Chinese).
- 江娃利, 侯治华, 肖振敏, 谢新生. 2000. 北京平原夏垫断裂中心探槽古地震事件分析[J]. *地震地质*, **22**(4): 413–422.
- Jiang W L, Hou Z H, Xiao Z M, Xie X S. 2000. Study on paleoearthquakes of Qixinzhuang trench at the Xiadian fault, Beijing plain[J]. *Seismology and Geology*, **22**(4): 413–422 (in Chinese).
- 焦青, 邱泽华. 2006. 北京平原地区主要活动断裂带研究进展[G]//地壳构造与地壳应力文集(18). 北京: 地震出版社: 72–84.
- Jiao Q, Qiu Z H. 2006. Research progress of major active faults in Beijing plain area[G]//*Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics* (18). Beijing: Seismological Press: 72–84 (in Chinese).

- 李赫, 董一兵, 王熠熙, 彭研枫, 刘双庆, 吴博洋. 2020. 廊固凹陷深部剪切破裂构造的地震学证据[J]. *地球物理学报*, **63**(2): 492–504.
- Li H, Dong Y B, Wang Y X, Peng Y F, Liu S Q, Wu B Y. 2020. Seismological evidence for a deep-seated shear zone in the Langgu depression[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(2): 492–504 (in Chinese).
- 刘保金, 胡平, 孟勇奇, 鄧少英, 石金虎, 姬计法. 2009. 北京地区地壳精细结构的深地震反射剖面探测研究[J]. *地球物理学报*, **52**(9): 2264–2272.
- Liu B J, Hu P, Meng Y Q, Feng S Y, Shi J H, Ji J F. 2009. Research on fine crustal structure using deep seismic reflection profile in Beijing region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(9): 2264–2272 (in Chinese).
- 刘博研, 史保平, 张健. 2007. 复合地震源模拟强地面运动: 以 1679 年三河—平谷 $M_S 8.0$ 地震为例[J]. *地震学报*, **29**(3): 302–313.
- Liu B Y, Shi B P, Zhang J. 2007. Strong motion simulation by the composite source modeling: A case study of 1679 $M 8.0$ Sanhe-Pinggu earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(3): 302–313 (in Chinese).
- 毛昌伟, 丁锐, 龚正, 张世民. 2010. 1679 年三河—平谷 8 级地震地表断层陡坎的 GPS 测量[G]//地壳构造与地壳应力文集(22). 北京: 地震出版社: 11–18.
- Mao C W, Ding R, Gong Z, Zhang S M. 2010. GPS survey of the surface fault scarp of 1679 Sanhe-Pinggu $M 8$ earthquake[G]// *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics* (22). Beijing: Seismological Press: 11–18 (in Chinese).
- 潘波, 许建东, 关口春子, 何宏林. 2006. 北京地区近断层强地震动模拟[J]. *地震地质*, **28**(4): 623–634.
- Pan B, Xu J D, Sekiguchi H, He H L. 2006. Simulation of the near-fault strong ground motion in Beijing region[J]. *Seismology and Geology*, **28**(4): 623–634 (in Chinese).
- 潘波, 许建东, 刘启方. 2009. 1679 年三河—平谷 8 级地震近断层强地震动的有限元模拟[J]. *地震地质*, **31**(1): 69–83.
- Pan B, Xu J D, Liu Q F. 2009. Simulations of the near-fault strong ground motion of the 1679 Sanhe-Pinggu $M 8$ earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **31**(1): 69–83 (in Chinese).
- 冉勇康, 邓起东, 杨晓平, 张晚霞, 李如成, 向宏发. 1997. 1679 年三河—平谷 8 级地震发震断层的古地震及其重复间隔[J]. *地震地质*, **19**(3): 2–10.
- Ran Y K, Deng Q D, Yang X P, Zhang W X, Li R C, Xiang H F. 1997. Paleoequakes and recurrence interval on the seismogenic fault of 1679 Sanhe Pinggu $M 8$ earthquake, Hebei and Beijing[J]. *Seismology and Geology*, **19**(3): 2–10 (in Chinese).
- 冉志杰, 李皓, 吕国军, 温超, 杨柳, 杨歧炎, 孟立鹏, 彭远黔, 骆艳欣. 2013. 夏垫断裂夏垫段浅部构造特征地震探测[J]. *地震工程学报*, **35**(3): 656–663.
- Ran Z J, Li H, Lü G J, Wen C, Yang L, Yang Q Y, Meng L P, Peng Y Q, Luo Y X. 2013. Seismic detecting for the shallow tectonic features of the Xiadian fault[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(3): 656–663 (in Chinese).
- 沈正康, 万永革, 甘卫军, 李铁明, 曾跃华. 2004. 华北地区 700 年来地壳应力场演化与地震的关系研究[J]. *中国地震*, (3): 2–19.
- Shen Z K, Wan Y G, Gan W J, Li T M, Zeng Y H. 2004. Crustal stress evolution of the last 700 years in North China and earthquake occurrence[J]. *Earthquake Research in China*, (3): 2–19 (in Chinese).
- 吴晶, 高原, 陈运泰, 黄金莉. 2007. 首都圈西北部地区地壳介质地震各向异性特征初步研究[J]. *地球物理学报*, **50**(1): 209–220.
- Wu J, Gao Y, Chen Y T, Huang J L. 2007. Seismic anisotropy in the crust in northwestern capital area of China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **50**(1): 209–220 (in Chinese).
- 向宏发, 方仲景, 徐杰, 李如成, 贾三发, 郝书俭, 王景钵, 张晚霞. 1988. 三河—平谷 8 级地震区的构造背景与大震重复性研究[J]. *地震地质*, **10**(1): 15–28.
- Xiang H F, Fang Z J, Xu J, Li R C, Jia S F, Hao S J, Wang J B, Zhang W X. 1988. Seismotectonic background and recurrence interval of great earthquakes in 1679 Sanhe-Pinggu $M = 8$ earthquake area[J]. *Seismology and Geology*, **10**(1): 15–28 (in Chinese).
- 肖修来, 李莹甄, 许同旭, 沈军. 2017. 三河—平谷地区 b 值和地震复发周期的时间变化分析[J]. *防灾科技学院学报*, **19**(4): 23–29.

- Xiao X L, Li Y Z, Xu T X, Shen J. 2017. Analysis on the time variation of b -value and earthquake recurrence period in Sanhe-Pinggu area[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, **19**(4): 23–29 (in Chinese).
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾斓. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. *地震地质*, **27**(3): 446–461.
- Xu X W, Zhang P Z, Wen X Z, Qin Z L, Chen G H, Zhu A L. 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan Province and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, **27**(3): 446–461 (in Chinese).
- 杨晓平, 曹景虎, 陈献程. 2012. 夏垫活动断裂两盘岩心氧化铁变化[J]. *地震地质*, **34**(4): 659–671.
- Yang X P, Cao J H, Chen X C. 2012. The iron oxide changes in drilling cores from the two walls of Xiadian active fault[J]. *Seismology and Geology*, **34**(4): 659–671 (in Chinese).
- 雍凡, 蒋正中, 罗水余, 李颜贵, 刘建生, 刘子龙. 2014. 夏垫断裂北段浅部构造的高分辨率地震反射勘探研究[J]. *地球物理学报*, **11**(6): 832–836.
- Yong F, Jiang Z Z, Luo S Y, Li Y G, Liu J S, Liu Z L. 2014. The seismic reflection study on high-resolution profile of shallow structure in north part of Xiadian fault[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, **11**(6): 832–836 (in Chinese).
- 余中元, 潘华, 沈军, 李金臣, 张萌, 戴训也. 2020. 夏垫断裂荣家堡探槽揭示的断裂活动特征及未来地震危险性概率评价[J]. *地震地质*, **42**(3): 688–702.
- Yu Z Y, Pan H, Shen J, Li J C, Zhang M, Dai X Y. 2020. The activity features of Xiadian fault zone revealed by Rongjiabao trench and its probabilistic seismic hazard evaluation[J]. *Seismology and Geology*, **42**(3): 688–702 (in Chinese).
- 张培震, 张会平, 郑文俊, 郑德文, 王伟涛, 张竹琪. 2014. 东亚大陆新生代构造演化[J]. *地震地质*, **36**(3): 574–585.
- Zhang P Z, Zhang H P, Zheng W J, Zheng D W, Wang W T, Zhang Z Q. 2014. Cenozoic tectonic evolution of continental Eastern Asia[J]. *Seismology and Geology*, **36**(3): 574–585 (in Chinese).
- 张晚霞, 向宏发, 李如成. 1995. 夏垫隐伏断裂土壤气氛分布特征的初步研究[J]. *西北地震学报*, **17**(2): 46–50.
- Zhang W X, Xiang H F, Li R C. 1995. Preliminary study on soil-radon distribution along the Xiadian buried fault[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **17**(2): 46–50 (in Chinese).
- 张先康, 赵金仁, 刘国华, 宋文荣, 刘保金, 赵成斌, 成双喜, 刘建达, 顾梦林, 孙振国. 2002. 三河—平谷 8.0 级大震区震源细结构的深地震反射探测研究[J]. *中国地震*, **18**(4): 326–336.
- Zhang X K, Zhao J R, Liu G H, Song W R, Liu B J, Zhao C B, Cheng S X, Liu J D, Gu M L, Sun Z G. 2002. Study on fine crustal structure of the Sanhe-Pinggu earthquake ($M_{8.0}$) region by deep seismic reflection profiling[J]. *Earthquake Research in China*, **18**(4): 326–336 (in Chinese).
- 赵金仁, 张先康, 张成科, 张建狮, 杨卓欣, 刘宝峰, 刘保金, 赵成斌. 2004. 利用宽角反射/折射和深反射探测剖面揭示三河—平谷大震区深部结构特征[J]. *地球物理学报*, **47**(4): 646–653.
- Zhao J R, Zhang X K, Zhang C K, Zhang J S, Yang Z X, Liu B F, Liu B J, Zhao C B. 2004. Deep structural features of the Sanhe-Pinggu great earthquake area imaged by wide-angle and deep seismic reflection profiling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **47**(4): 646–653 (in Chinese).
- 周红. 2018. 基于 NNSIM 随机有限断层法的 7.0 级九寨沟地震强地面运动场重建[J]. *地球物理学报*, **61**(5): 2111–2121.
- Zhou H. 2018. Reconstruction of strong ground motion of Jiuzhaigou $M_{7.0}$ earthquake based on NNSIM stochastic finite fault method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(5): 2111–2121 (in Chinese).
- 周红, 李亚南, 常莹. 2021. 云南漾濞 6.4 级地震强地面运动的模拟和空间分布特征分析[J]. *地球物理学报*, **64**(12): 4526–4537.
- Zhou H, Li Y N, Chang Y. 2021. Simulation and analysis of spatial distribution characteristics of strong ground motions by the 2021 Yangbi, Yunnan Province $M_{6.4}$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(12): 4526–4537 (in Chinese).
- Andrews D J. 1980. A stochastic fault model: 1. Static case[J]. *J Geophys Res*, **85**(B7): 3867–3877.
- Beresnev I A, Atkinson G M. 1997. Modeling finite-fault radiation from the ω_n spectrum[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **87**(1): 67–84.
- Harris R A. 2000. Earthquake stress triggers, stress shadows, and seismic hazard[J]. *Curr Sci*, **79**(9): 1215–1225.
- Karakostas V, Papadimitriou E, Jin X S, Liu Z H, Paradisopolou P, He Z. 2013. Potential of future seismogenesis in Hebei

- Province (NE China) due to stress interactions between strong earthquakes[J]. *J Asian Earth Sci*, **75**: 1–12.
- Li S Z, Zhao G C, Santosh M, Liu X, Dai L M, Suo Y H, Tam P Y, Song M C, Wang P C. 2012. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. *Precambrian Res*, **200/201/202/203**: 59–73.
- Liu M A, Yang Y Q, Shen Z K, Wang S M, Wang M, Wan Y G. 2007. Active tectonics and intracontinental earthquakes in China: The kinematics and geodynamics[G]//*Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues*. Boulder: Geological Society of America: 13–24.
- Robinson R, Zhou S Y. 2005. Stress interactions within the Tangshan, China, earthquake sequence of 1976[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(6): 2501–2505.
- Somerville P, Irikura K, Graves R, Sawada S, Wald D, Abrahamson N, Iwasaki Y, Kagawa T, Smith N, Kowada A. 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion[J]. *Seismol Res Lett*, **70**(1): 59–80.
- Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering[J]. *Geophys J Int*, **128**(3): 594–604.
- Sun R, Vaccari F, Marrara F, Panza G F. 1998. The main features of the local geological conditions can explain the macroseismic intensity caused in Xiji-Langfu (Beijing) by the $M_s 7.7$ Tangshan 1976 earthquake[J]. *Pure Appl Geophys*, **152**(3): 507–521.
- Wang X S, Feng X D, Xu X W, Diao G L, Wan Y G, Wang L B, Ma G Q. 2014. Fault plane parameters of Sanhe-Pinggu $M 8$ earthquake in 1679 determined using present-day small earthquakes[J]. *Earthquake Science*, **27**(6): 607–614.
- Yu Z Y, Pan H, Xi H, Zhang Y H, Chen H. 2019. Late Quaternary paleoseismicity of the Xiadian fault in the North China Plain with implications for earthquake potential[J]. *J Asian Earth Sci*, **184**. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103997>.
- Zhang X, Wang M F. 2017. Research on the application of change detection technology based on multisource remote sensing images in the dynamic change of land use[C]//*2017 3rd International Conference on Computational Systems and Communications (ICCSC 2017)*. Beijing: Int. Conf. Comput. Syst. Commun: 34–40.
- Zhou H, Chang Y. 2019. Stochastic finite-fault method controlled by the fault rupture process and its application to the $M_s 7.0$ Lushan Earthquake[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **126**: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105782>.