

引文格式:高志钰,李彦川,单新建,等.基于模拟高频 GNSS 数据的安宁河断裂强震滑动分布快速反演研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(9):1527-1537.DOI:10.13203/j.whugis20230221



Citation:GAO Zhiyu,LI Yanchuan,SHAN Xinjian,et al.Rapid Inversion of Fault Slip Distribution for Strong Earthquakes Along the Anninghe Fault Based on High-Rate GNSS[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(9):1527-1537.DOI:10.13203/j.whugis20230221

基于模拟高频 GNSS 数据的安宁河断裂 强震滑动分布快速反演研究

高志钰^{1,2,3,4} 李彦川² 单新建² 黄 星²

1 兰州交通大学测绘与地理信息学院,甘肃 兰州,730070

2 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京,100029

3 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心,甘肃 兰州,730070

4 甘肃省测绘科学与技术重点实验室,甘肃 兰州,730070

摘要:为了探讨现有的高频全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)连续台站在强震潜能较高的安宁河断裂未来强震发生时震级快速预估、滑动分布快速反演的可靠性与时效性,利用以震间闭锁模型为约束的运动学数值模拟方法,合成 1 100 个 Mw 6.5~7.5 地震事件或破裂情景,模拟得到带有随机噪声信号的高频 GNSS 位移波形,结合最速下降法进行分析与讨论。统计结果表明,利用现有的 GNSS 连续台站能够在 8 s 左右反演得到初始震级(Mw 6.2),并能够在较短时间内或破裂完成之前反演得到准确的震级结果与滑动分布结果。在中国地震科学实验场即将加密建设的 GNSS 连续台站,能够为区域内强震震级快速估计、滑动分布快速反演甚至断层破裂优势方向予以更加有效地刻画。研究结果证实了利用高频 GNSS 数据在安宁河断裂强震震级快速估计和有限断层滑动分布快速反演中的可行性和适用性,为该区域强震速报预警提供理论依据与技术支持。

关键词:高频 GNSS;滑动分布反演;震级估计;安宁河断裂;运动学模拟

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2023-06-25

DOI:10.13203/j.whugis20230221

文章编号:1671-8860(2024)09-1527-11

Rapid Inversion of Fault Slip Distribution for Strong Earthquakes Along the Anninghe Fault Based on High-Rate GNSS

GAO Zhiyu^{1,2,3,4} LI Yanchuan² SHAN Xinjian² HUANG Xing²

1 Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

2 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

3 National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China

4 Key Laboratory of Science and Technology in Surveying & Mapping, Gansu Province, Lanzhou 730070, China

Abstract: Objectives: Infrequent strong earthquakes which occur on subduction and intraplate faults worldwide can be extremely destructive. The exploration on the reliability and timeliness of high-rate global navigation satellite system(GNSS) continuous stations can help rapid inversion of slip distribution and rapid estimation of earthquake magnitude. Especially for the Anninghe fault with high potential for strong earthquakes, this research has important practical significance for early warning of strong earthquakes in this region. **Methods:** We adopt a kinematic simulation method to synthesize stochastic rupture scenarios by incorporating the geodetic fault coupling model as prior constraints. For the Anninghe fault, we synthesize 1 100 earthquake events from Mw 6.5 to 7.5 and rupture scenarios, and simulate displacement waveforms by

基金项目:国家自然科学基金(U2139202,42104007,42174003);中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA2307);甘肃省科技计划项目(24JRRA289);兰州交通大学青年科学基金(2023003);兰州交通大学天佑博士后科学基金(TYBSH_KJ_202301)。

第一作者:高志钰,博士,讲师,主要研究方向为大地测量数据处理、同震参数反演与破裂模拟。gzy0801@163.com

通讯作者:李彦川,博士,副研究员。yanchuan@ies.ac.cn

using random noise signals from the existing and newly built GNSS stations. These waveforms are analyzed the reliability of fault slip distribution along the Anninghe fault in combination with the steepest descent method. **Results:** For these events along the Anninghe fault, the initial inversion magnitude of Mw 6.2 can be determined in about 8 s after the earthquake using the existing GNSS continuous stations. And the magnitude and slip distributions can be obtained within a short time or before the rupture completes. The GNSS continuous stations of the China earthquake science experimental field, which is about to be built, can not only effectively obtain the magnitudes and slip distributions, but also determine the dominant directions of fault rupture. **Conclusions:** The feasibility and usefulness of the high-rate GNSS data are confirmed in magnitude estimation and finite-fault slip inversion of strong earthquakes along the Anninghe fault. It can provide theoretical basis and technical support for earthquake early warning in this region.

Key words: high-rate GNSS; slip distribution inversion; magnitude estimation; Anninghe fault; kinematic simulation

中国大陆是全球地震高发区域之一,在约占全球 1/14 的陆地面积上承受了全球约 1/3 的内陆破坏性地震,且伴随着严重的滑坡、泥石流等次生地质灾害,造成严重的人员伤亡与经济损失。如 2008 年汶川 8.0 级地震造成约 7 万人伤亡、8 000 多亿元经济损失。面对如此严峻的震情形势,加强对强震及大震减灾方面的研究,实现可操作的防震减灾,是中国经济发展与社会稳定的重大需求^[1]。

随着地震观测技术的进步、数据实时传输能力的提高和计算机处理速度的增强,实时地震学成为有效获取震源参数的重要手段,包括震级快速预估、滑动分布快速反演等。常用的地震学方法主要依赖于密集的地震台网记录的地震波信号,在获取中小型地震震源参数时能够取得不错的效果,但面对强震时可能会存在一些问题^[2-3]。如宽频地震仪面对强烈的地震波,容易出现量程限幅的现象,导致难以捕获完整的地震波信号^[4];强震仪在近场区域由于地表的倾斜与旋转,导致仪器的坐标参考系统发生变化,记录的地震波信号发生扭曲,一次或两次离散积分得到的速度或位移序列也会产生不可靠的非线性漂移现象^[5]。以 2010 年墨西哥 Mw 7.2 地震为例,采用地震学方法在震后 13 s 获得的初始震级为 Mw 5.9,持续 5~6 s 后稳定在 Mw 6.8 左右,存在震级被低估的现象^[6]。因此,快速准确测定强震及大震的震源参数是科学界的重大关切及全社会的迫切需求^[1]。

近年来,随着新兴的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术的发展,尤其是中国北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)的建成并向全球提供服务,使得 BDS/GNSS 实时地震学成为目前研究的热点。高频(≥ 1 Hz) GNSS 数据在强震

震级估计、滑动分布快速反演方面具有独特的优势,可以有效避免量程饱和、震级低估的问题,也可以快速获取滑动分布结果,是传统地震学方法的一种有效补充手段^[7-10]。同样以 2010 年墨西哥 Mw 7.2 地震为例,利用高频 GNSS 数据回溯性反演得到的初始震级为 Mw 6.9,随着时间的演化在 Mw 6.8~7.2 之间波动^[6]。由于此次地震为单侧破裂事件且近场 GNSS 台站稀缺、分布不均匀,使用高频 GNSS 比地震学方法获取震级消耗更长时间;但已有研究表明地震学方法的缺陷可能会随震级的增大而逐渐凸显,如 2011 年日本 Mw 9.0 地震^[11-12]。

不同学者在不同区域基于不同数据源构建了高频 GNSS 数据实时处理、强震震源参数快速获取与滑动分布快速反演相关算法,并经过了有限强震震例数据的验证,如 2008 年汶川 Mw 7.9 地震、2011 年日本 Mw 9.0 地震、2021 年玛多 Mw 7.3 地震^[10,13-15]。在 GNSS 数据实时处理方面,结合在安宁河-则木河断裂系周边加密建设的 20 个包含 BDS 信号的多系统 GNSS 台站(图 1),在周边无地震事件触发时采用相对定位方法获取相应台站的位移时间序列结果,在强震事件发生时位移波形可采用单站测速方法快速获取,两种数据处理方法均利用实时的广播星历数据。统计分析发现,在无地震事件触发时的 GNSS 定位精度在水平向优于 1 cm、垂向优于 3 cm,加入 BDS 数据的多系统定位结果精度能够得到明显提升。由于 GNSS 台站在试运行期间无强震事件发生,故采用 2021 年玛多 Mw 7.3 地震、2021 年阿拉斯加 Mw 8.2 地震周边高频 GNSS 数据进行回溯性测试。结果表明,利用单站测速方法获取的位移时间序列结果与事后相对定位方法结果基本一致,获取的同震形变结果与其他机构公布结果、

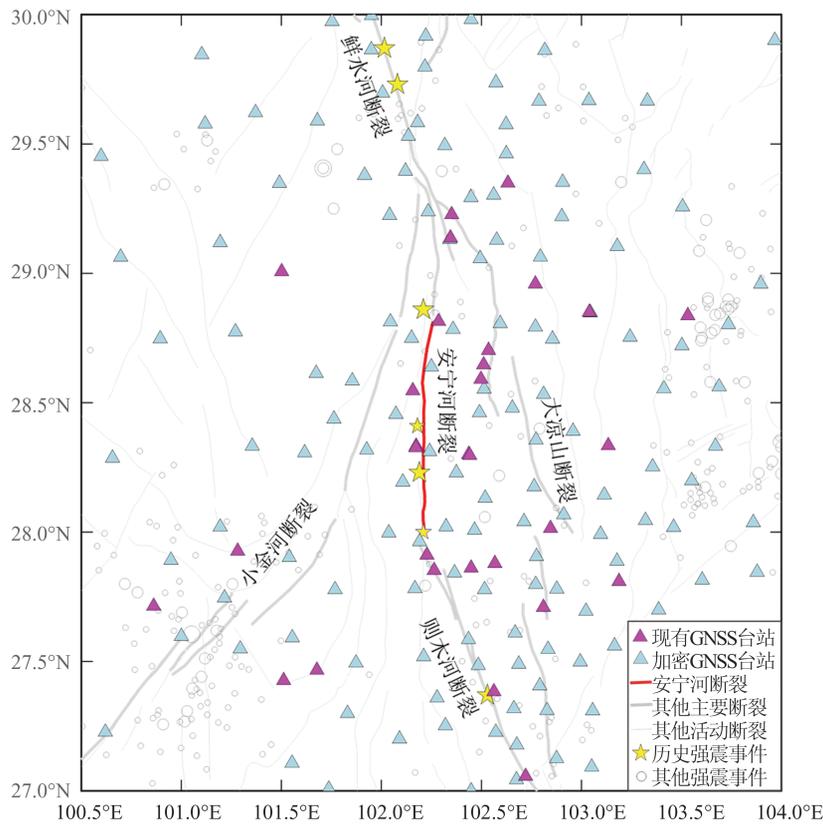


图1 研究区域的构造背景与GNSS连续台站分布

Fig. 1 Tectonic Background and Distribution of GNSS Stations in the Study Area

事后相对定位方法结果基本一致,进一步表明利用单站测速方法获取的同震形变结果精度较高^[13]。值得注意的是,已有研究表明,实时处理的GNSS数据较地震学数据具有明显的噪声水平,但已被证明能够有效地捕捉6.0级以上强震造成的地面运动^[16]。

尽管实时处理的GNSS定位精度能够满足强震监测与预警的需要,但受高频GNSS技术仍在发展阶段、台站分布较稀疏等因素的影响,通过高频GNSS监测到的中国大陆地区强震事件仍然有限,基于高频GNSS数据的强震震级快速估计与滑动分布快速反演方面的算法仍未得到有效测试。得益于现今断层位置与几何形状的不断确定,采用基于震间闭锁模型为约束的数值模拟方法可以合成已知断层上潜在的任意地震事件^[17-18],并能正演得到任意GNSS台站的理论位移波形,同时结合不同等级的区域噪声模型模拟得到更加真实的位移波形。已有研究表明这种数值模拟方法可以再现“真实”的强震滑动分布^[19],并已被应用于实时GNSS预警系统的测试^[20]。本文以强震潜能较高的安宁河断裂(图1)为例,采用以断裂震间闭锁模型为约束的数值模拟方法合成任意地震事件及位移波形,探讨在该区域利用现

有的或依托于中国地震科学实验场项目加密建设的GNSS连续台站在强震震级估计、滑动分布快速反演方面的时效性与可靠性,为今后在该区域开展地震速报预警提供理论依据与技术支持。

1 研究区域构造背景

近南北向的安宁河断裂为中国西南地区以左旋走滑为主的大型活动断裂,是川滇活动地块东边界的重要组成部分。根据史料记载,安宁河断裂曾发生过多次强震,最近的两次大地震分别是1480年石棉-冕宁M 7.5地震、1536年西昌新华M 7.5地震,距今已有约500年未发生大震。古地震学研究表明安宁河断裂地震离逝时间已接近地震复发平均周期(520~660 a)^[21]。安宁河断裂长约150 km,文献[22]根据震级和破裂长度之间的关系进行预测,在该断裂上能够发生的最大地震事件震级为Mw 7.6。文献[23]利用大地测量数据得到了该断裂系的闭锁特征,并选择1536年西昌新华M 7.5地震为起始点计算地震矩积累量,得到安宁河断裂现今存在发生一次Mw 7.5地震的潜能,并在此后数十年内达到地震破裂的最大可能。同时,相关研究表明2022年泸定Mw 6.7

地震对安宁河断裂、则木河断裂、龙门山断裂南段造成了库仑应力加载作用(>0.01 MPa),且在安宁河断裂北段的库仑应力加载超过了 0.1 MPa的经验触发阈值,表明川滇块体北东边界尤其是安宁河断裂的未来强震危险性需密切关注^[24]。其他地质与大地测量研究结果也得出相似的结论^[25-26],进一步表明安宁河断裂具有较高的地震危险性。

2 方法与模型

2.1 数值模拟方法

2.1.1 合成地震事件或破裂情景

首先给定目标震级的范围,并以 0.1 个震级单位为间隔,在每个震级范围内生成若干个破裂情景或地震事件。对于一个破裂情景或地震事件而言,震级确定后即可根据文献^[27]中的回归关系确定发震断层破裂的长度 l 和宽度 w 。回归关系的计算式为:

$$\begin{cases} \lg l = a_1 + b_1 M \\ \lg w = a_2 + b_2 M \end{cases} \quad (1)$$

式中, M 为设定地震的震级; a_1 、 b_1 、 a_2 和 b_2 为回归系数。对于不同类型的地震,地震破裂长度、宽度确定的回归系数略有不同,如走滑型地震相应的回归系数为 $a_1 = -2.69$ 、 $b_1 = 0.64$ 、 $a_2 = -1.12$ 、 $b_2 = 0.33$,但在合成同一个震级的破裂情景时,断层的长度和宽度并非完全一致。这一过程主要依赖于回归参数的不确定性,可以以概率分布的方式随机选择断层的长度和宽度。

在确定了合成地震事件的破裂范围后,可以定义随机滑动量的大小。假设每个子断层的滑动量服从正态分布,其均值为 μ_k 、标准差为 σ_k ,则断层面的滑动矢量 s 可以表示为:

$$s \sim N(\mu, \hat{C}) \quad (2)$$

式中, μ 为断层面滑动矢量的均值,控制断层面使其均匀滑动并保证足够的地震矩,以使其与目标震级相匹配; \hat{C} 为断层面滑动矢量的协方差矩阵,与每个子断层滑动量的标准差 σ_k 有关。为避免产生随机滑动分布时出现负值的状态,滑动矢量 s 可以描述为对数分布的形式。

基于此,理论上可以对任意震级的地震产生随机滑动分布。如果需要分析地震的可能的破裂过程,则需要对随机滑动分布赋予时间信息,采用地震破裂时域特征,假设背景破裂速度 v_r 为:

$$v_r = \begin{cases} 0.56v_s, & d < 10 \\ 0.80v_s, & d > 15 \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_s 表示局部横波速度模型; d 表示子断层中心的深度,单位为km,在 $10 \sim 15$ km之间采用线性过渡的方式予以赋值。这种深度相依的背景速度同样施加于子断层的破裂时间,从而保证滑动量大的子断层破裂传播更快,滑动量较小的子断层破裂传播较慢。每个子断层滑动持续时间 T_i 可表示为:

$$T_i = \begin{cases} \sqrt{2ks_i}, & d < 10 \\ \sqrt{ks_i}, & d > 15 \end{cases} \quad (4)$$

式中, s_i 为每个子断层滑动量,由局部的滑动-时间函数来给定; k 为常数项,控制整个断层面持续滑动的平均时间 T_a ,使其满足与地震矩 M_0 之间的经验公式 $T_a = 4.038 \times 10^{-7} \times M_0^{1/3}$ 。基于上述过程,即可合成设定震级的随机滑动分布及运动学特征。

2.2.2 正演 GNSS 理论位移波形并添加随机噪声信号

结合滑动分布结果及运动学特征,使用弹性动力学格林函数矩阵乘法可以正演得到GNSS台站的波形数据。使用文献^[28]提出的频率-波数积分算法计算每个子断层或站点每个频率的脉冲响应。通过使用获得的每一个破裂情景,检索子断层滑动持续的时间,为每个子断层建立相应的滑动-时间函数并对其进行处理,以使其能够积分产生正确的滑动量;随后,将其添加到格林函数矩阵中,一旦形成格林函数矩阵,与滑动量相乘就会得到所有GNSS台站相应频率(如 1 Hz或 0.2 Hz)的位移波形。引入加密建设的采样率为 1 Hz的多系统GNSS台站实时解算得到的噪声模型,分别提取出 10% 、 50% 、 90% 的噪声水平作为低等、中等、高等噪声模型的频谱值。对于不同地震事件对应的不同GNSS台站,随机选择上述不同等级的噪声水平,并将其添加到正演得到的理论位移波形中,形成真实的位移波形结果。

2.2 断层滑动分布快速反演方法

弹性位错模型是连接地表观测、断层面滑动、应力应变计算模拟的基础,也是计算格林函数的理论模型。随着弹性位错理论的发展和完善,其被广泛应用于同震破裂及滑动分布的反演研究中,其中又以Okada位错模型的应用最为广泛。选取Okada弹性半空间模型来探讨安宁河断裂断层面的滑动分布结果,其反演的基本思路是将断层面模型离散成一系列均匀或非均匀的矩形元或三角元,同时对离散化的各个子单元间的滑动量施加一定的光滑约束以避免滑动分布解的震荡(相邻单元间位错量或应力降差异较

大),再采用约束条件下的最小二乘法及最速下降法(steepest descent method, SDM)得到断层面的滑动分布^[29]。基于弹性位错理论,断层面的滑动量和观测值之间可以用线性关系表示为:

$$O = Gm + \epsilon \quad (5)$$

式中, O 是地表观测值; m 为每个子断层上的滑移量; G 为联系二者的格林函数; ϵ 是模拟值与观测值之间的差值。为避免求解的方程组存在病态问题而导致不能获得稳定和可靠的解,需要对方程施加断层位错或断层面应力降的平滑性等约束条件,即采用附加约束条件的最小二乘法拟合滑动矢量,将反演问题转换为一个由数据拟合残差和光滑因子组成的目标函数最小化问题,其数学表达式可表示为:

$$F(m) = \|Gm - O\|^2 + \alpha^2 \|H\tau\|^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

式中, H 为表示拉普拉斯算子的有限差分近似,用于计算断层滑移的粗糙程度; τ 为断层面上的应力降; α 为平滑因子,用来控制断层滑动的粗糙程度和模型预测值与观测值的吻合程度。

在有限断层滑动分布反演的同时,可以根据断层面的滑动量计算出 M_0 与 M ,其计算式为:

$$M_0 = KLW\bar{s} \quad (7)$$

$$M = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6.033 \quad (8)$$

式中, L 、 W 分别为有限断层的长度、宽度,单位为 km; K 为介质的刚性系数,通常取为 30 GPa; \bar{s} 为有限断层面的平均滑动量,单位为 m。值得注意的是,本文使用 SDM 进行断层滑动分布快速反演时,能够同时获得 M 。

3 基于震间断层闭锁状态的合成地震事件与位移波形

根据安宁河断裂断层位置与几何形态数据,构建该断裂系的断层模型。设置发震断层模型为沿断层走向长约 110 km,最大深度 20 km,并将整个断层模型沿走向和倾向划分成 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的矩形位错单元。在数值模拟方法合成地震事件时,首先引入了基于大地测量手段反演得到的该断裂震间闭锁模型作为随机地震事件的先验假设^[18],即从概率上保证该断裂的滑动分布与其闭锁程度成正相关;对于单个地震事件而言,断层滑动分布结果不一定严格遵循这个关系。由于以现今闭锁状态和滑动速率来定量计算得到的安宁河断裂在 1536—2022 年积累的地震矩为

$1.97 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$,等效于一次 Mw 7.5 地震^[23],所以给定的目标震级为 Mw 6.5~7.5,每个震级尺度合成 100 个随机地震事件,共计产生 1 100 个地震事件。同时设置模拟得到的最大滑动量为 15 m。在合成地震事件后,通过正演的方式能够得到所有事件对应的周边 GNSS 台站的 1 Hz 位移波形以及所有台站静态同震位移结果。

以一个 Mw 7.5 地震事件为例,其断层滑动分布、上升时间及破裂时间的演化过程如图 2 所示,其中绿色五角星为震中位置;该地震事件周边 4 个高频 GNSS 台站的位移波形如图 3 所示,其中图 3(a)~3(d)分别为 XICH、GYAO、BDBT、BDMN 测站在北(N)、东(E)、天(U)3 个方向的位移波形。

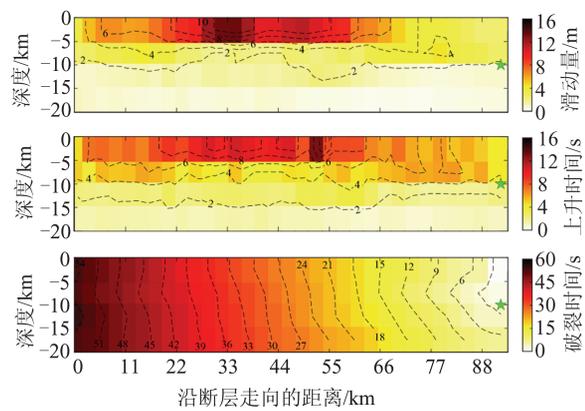


图 2 一个 Mw 7.5 地震事件的破裂场景

Fig. 2 Rupture Scenario of a Mw 7.5 Earthquake Event

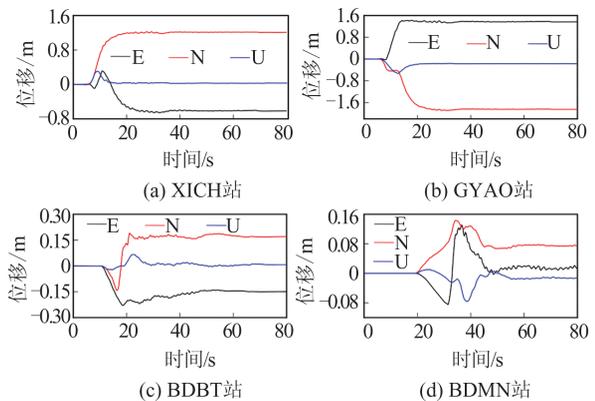


图 3 一个 Mw 7.5 地震事件的 GNSS 理论位移波形

Fig. 3 GNSS Displacement Waveforms of a Mw 7.5 Earthquake Event

同样,在安宁河断裂合成不同破裂范围、不同震级的事件,造成的水平同震形变结果如图 4 所示。其中图 4(a)~4(d)分别为 Mw 6.5、Mw 6.8、Mw 7.1、Mw 7.5 地震所引起的同震位移结果,可以看出,不同破裂范围、不同震级的强震事件造成的同震形变结果存在明显的差异性。

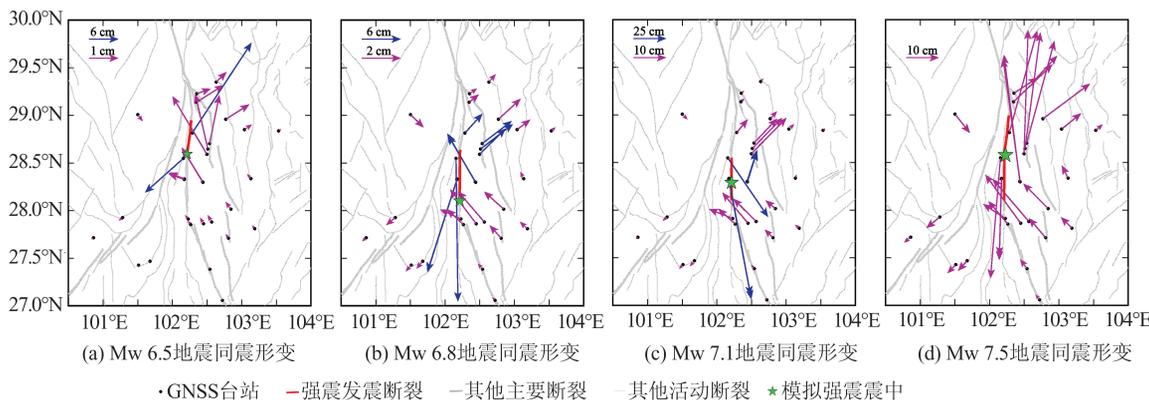


图4 不同发震断层、不同震级的地震事件同震形变结果

Fig. 4 Coseismic Deformation of Seismic Events with Different Seismogenic Faults and Different Magnitudes

1100个地震事件的滑动量、上升时间以及破裂时间等参数统计结果如图5所示。由图5(a)可以看出,发震断层的滑动量的平均值随着实际震级的增加而呈现出线性递增的趋势,对于任意震级地震事件,其滑动量平均值大致是恒定的,即模拟得到的平均滑动量受到实际震级大小的限

制,滑动量的最大值与离散度由滑动量的标准差度量,总体呈现随震级增大而逐渐增大的趋势,且不同震级地震事件之间存在较明显的差异。同时,地震事件的上升时间与破裂时间随震级的增大亦呈现出逐渐增大的趋势,如图5(b)、5(c)所示。

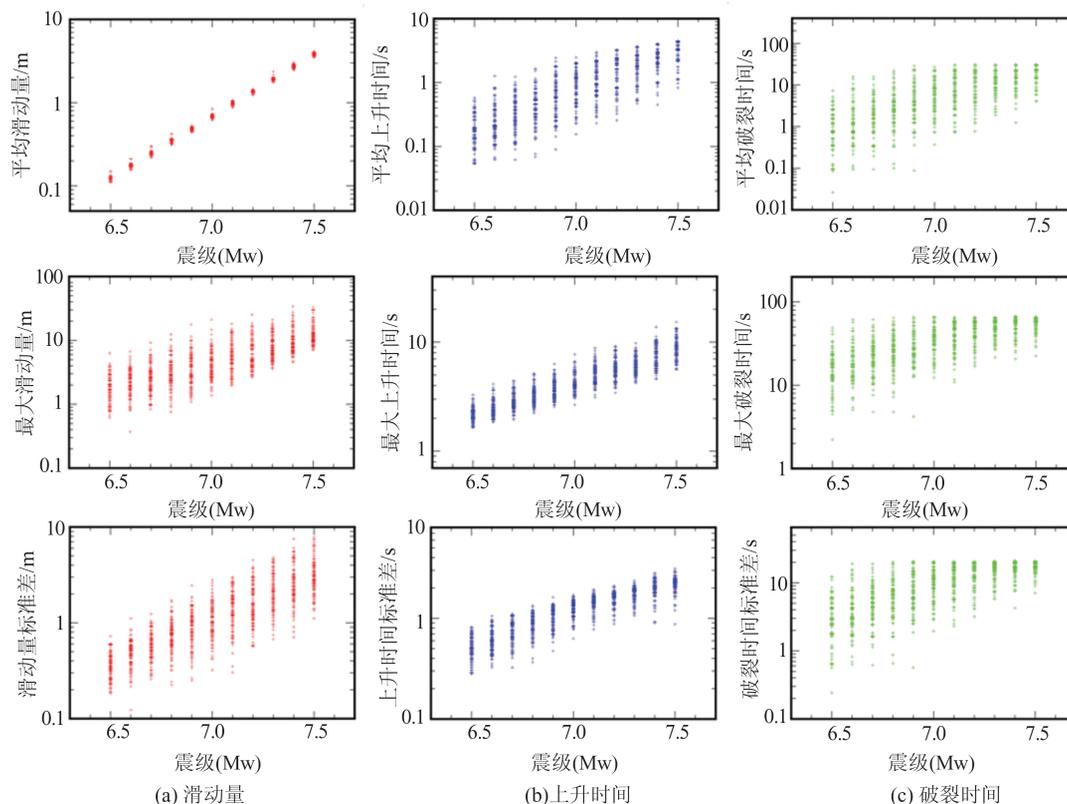


图5 1100个地震事件参数统计结果

Fig. 5 Summary Statistics for 1100 Earthquake Events

4 断层滑动分布反演结果分析与讨论

为了说明现有GNSS连续台站在断层滑动分布反演方面的可行性,本文以安宁河断裂上的一

个Mw 7.5地震为例,该地震事件引起的各台站水平位移波形结果如图6所示,其中红色、蓝色虚线分别表示有限断层反演初始震级获取的时间及震级达到稳定的时间。该地震事件的水平同震形变

场、断层滑动分布及震级演化过程如图 7 所示。

由图 6 可以看出,在震后 7 s 时,有 3 个 GNSS 台站水平位移同时大于给定的阈值 2 cm,通过反演能够获取初始震级 Mw 6.8;在震后 25 s 时完全形成第一个滑动凹凸体,反演得到的震级结果已达到 Mw 7.3;随后逐渐向北继续发生破裂,在震后 43 s 时,由此次地震产生的同震位移值大于 1 m 的 GNSS 台站对应的位移波形变化幅度小于 2 cm,即认为这些 GNSS 台站位移波形均达到平稳状态,如图 6(c)所示。此时完全形成了第二个滑动凹凸体,震级亦逐渐达到收敛状态,即反演得到的震级变化幅度小于 0.1 个矩震级单位;收敛后的震级估计结果 Mw 7.5 与实际输入震级基本一致,且得到的断层滑动分布结果与最终反演得到的结果基本一致,与模拟得到的破裂情景亦具有相似的一阶特征。随着震中距较大台站数据的不断更新,震级与滑动分布结果趋于稳定。值得注意的是,这个 Mw 7.5 合成地震为单侧破裂事件,其破裂时间约为 45 s,而利用现有的 GNSS 连续台站能够在震后 43 s 时确定准确的震级与滑动分

布结果,进一步说明利用现有的连续 GNSS 台站能够在地震破裂尚未完成时获得准确的震级与滑动分布结果。

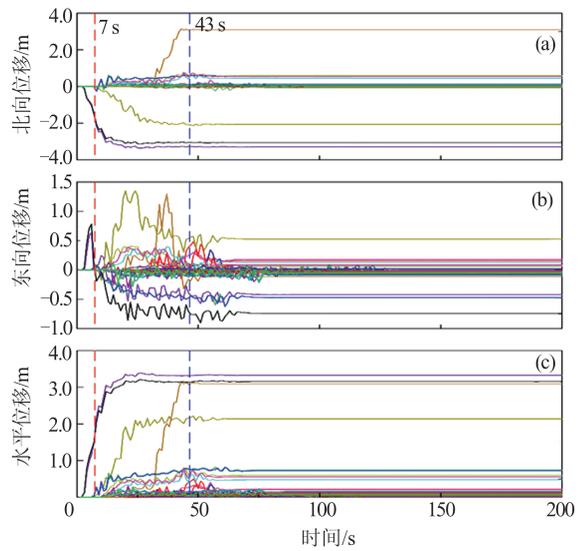


图 6 一个 Mw 7.5 地震事件水平位移波形

Fig. 6 Horizontal Displacement Waveforms of a Mw 7.5 Earthquake Event

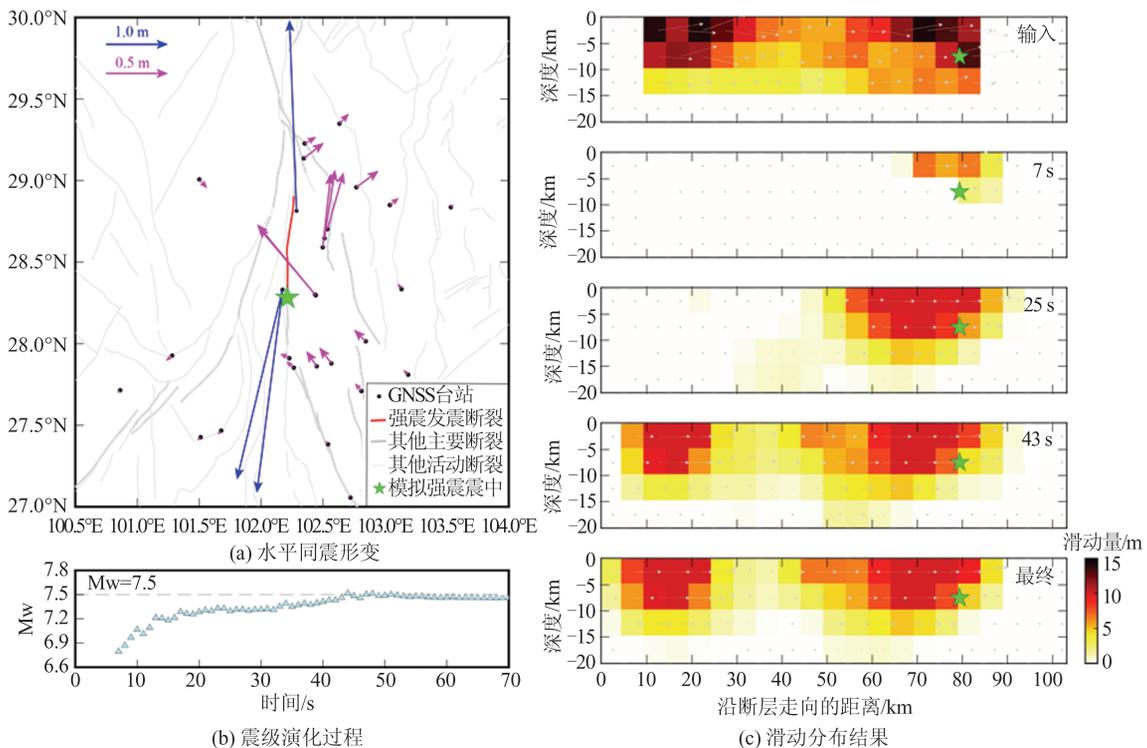


图 7 一个 Mw 7.5 地震事件现有 GNSS 连续台站断层滑动分布及震级演化过程

Fig. 7 Fault Slip Distribution and Magnitude Evolution of a Mw 7.5 Earthquake Event Based on the Existing GNSS Continuous Stations

基于现有的 GNSS 连续台站数据反演,统计得到安宁河断裂的 1 100 个 Mw 6.5~7.5 地震事件的初始震级、时间及最终震级,结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,针对实际输入震级为

Mw 6.5~7.5 的地震事件,现有的陆态网与课题组加密的 GNSS 连续台站能够在 24 s 内反演得到初始震级,最快能够在 5 s 内得到,其概率最大值对应的时间为 8 s,符合正态分布曲线。可以看出

当设置3个GNSS台站水平位移同时大于2 cm时,反演得到的初始震级处于Mw 5.5~6.8之间;统计结果显示初始震级概率最大值对应的震级为Mw 6.2,并未随实际输入震级的不断增大而呈现出逐渐增大的趋势,这也进一步说明了反演得

到的初始震级结果的可靠性。通过GNSS位移波形反演得到的最终震级集中在1:1线附近,并且随着实际输入震级的不断增大,反演得到的震级的离散度呈现逐渐减小的趋势,最终反演得到的震级与实际输入震级结果基本一致。

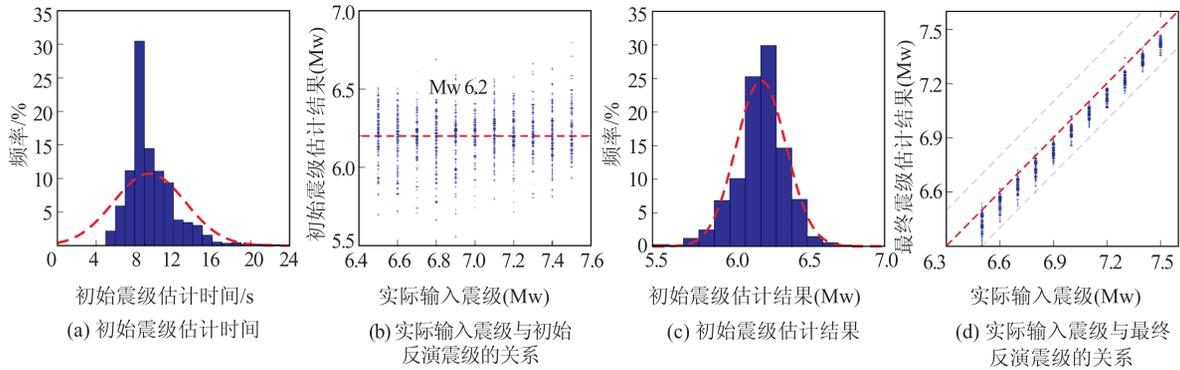


图8 现有GNSS连续站反演得到的初始震级、最终震级统计结果

Fig. 8 Statistical Results of Initial Magnitude and Final Magnitude Obtained by Inversion from the Existing GNSS Stations

现有的GNSS连续台站分布仍然较稀疏,尤其是安宁河断裂西侧分布相当稀疏,如图1所示,这可能造成在进行断层滑动分布反演时存在一定的局限性。随着中国地震科学实验场项目对现有GNSS台站分布的有效加密,同样以安宁河断裂的同一个Mw 7.5地震事件(图7)为例,绘制水平同震形变结果、断层滑动分布与震级演化过程结果,如图9所示。由图9可以看出,随着部分中国地震科学实验场项目拟建GNSS连续台站数据的加入,同样以3个GNSS台站水平位移同时大于给定的阈值(2 cm)为触发破裂反演条件,在震后3 s(时间早于现有GNSS连续台站结果)时能够获取初始震级(Mw 6.1);在震后7 s时震级能够达到Mw 6.8,与现有GNSS连续台站反演结果一致;但是在震后15 s时第一个滑动凹凸体破裂完成,早于现有GNSS连续台站相应的时间(25 s);随后地震事件逐渐向北发生破裂,在震后40 s时,完全形成第二个滑动凹凸体,早于现有GNSS连续台站的43 s,震级亦逐渐达到收敛状态(Mw 7.5),此时得到的断层滑动分布结果也与最终反演得到的结果更加趋于一致,其一阶特征也更加接近于合成的破裂情景结果,如图9(c)所示。经统计分析发现,针对实际输入震级为Mw 6.5~7.5的地震事件,依托于中国地震科学实验场加密建设的GNSS连续台站将能够在6 s左右反演得到初始震级,响应时间较现有GNSS连续台站提升了2 s;反演得到的初始震级处于Mw 6.5~7.5之间,概率最大值为Mw 6.1;如

图10所示,最终反演得到的震级与实际输入震级结果基本一致。综上所述可以看出,加密建设的GNSS台站在震级估计、滑动分布反演的时效性方面有明显提升,在断层滑动分布甚至破裂的优势方向快速判定方面具有更加明显的优势。

5 结 语

针对“历史地震空段+断层闭锁凹凸体+地震矩亏损+地震应力相互作用”的地震危险性评估方法获得的已具备发生Mw 7.5强震事件的安宁河断裂,利用以现今震间闭锁模型为约束的运动学数值模拟的方法合成1 100个Mw 6.5~7.5地震事件并模拟得到高频GNSS连续台站位移波形,以此探讨了高频GNSS连续台站在该区域强震震级快速估计、断层滑动分布快速反演的时效性与可行性,结论如下:

1) 利用现有的GNSS连续台站能够在8 s左右确定初始反演震级,能在较短的时间内或地震破裂完成之前反演得到收敛或稳定的震级结果,同时,反演得到的最终震级与模型输入震级基本一致,表明利用现有GNSS连续台站在该区域周边强震发生时能够快速获得可靠的震级结果,可以为地震学方法震级估计提供一种有效的补充。

2) 在强震造成的GNSS水平位移达到2 cm的阈值时,利用现有GNSS连续台站数据能够快速反演得到破裂断层的滑动分布结果,这将为强震震情快速综合研判、震后快速应急救援等提供重要的参考依据。

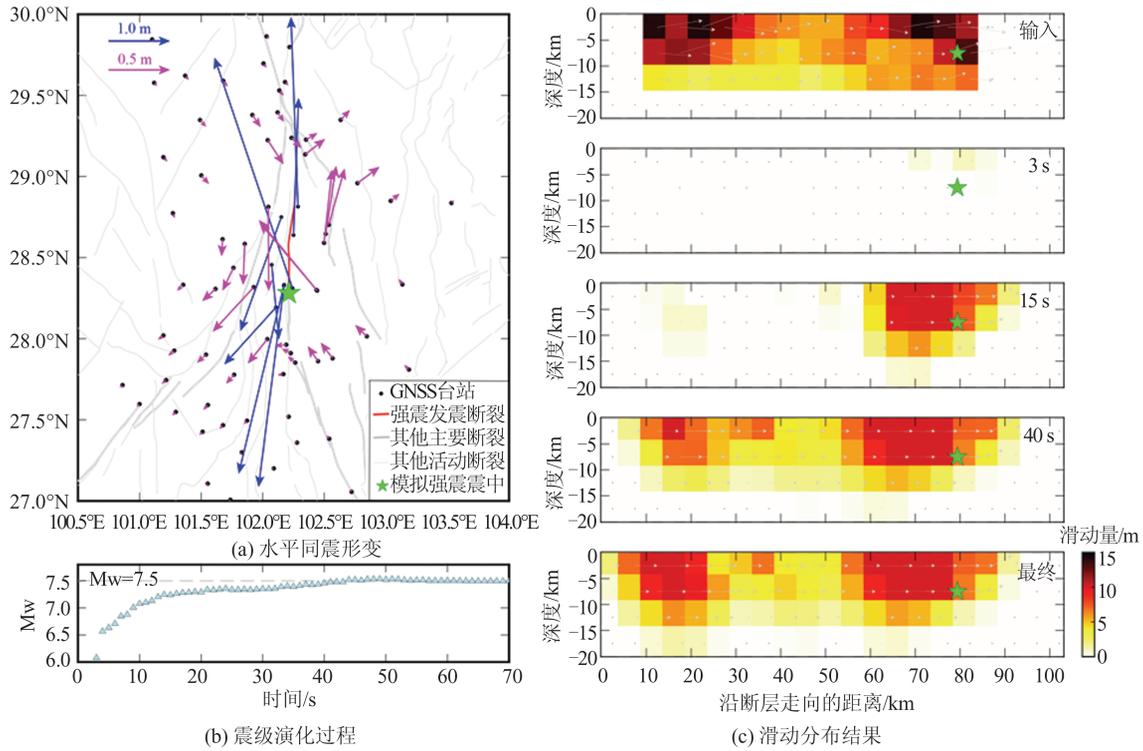


图 9 一个 Mw 7.5 地震事件加密 GNSS 连续台站断层滑动分布及震级演化过程

Fig. 9 Fault Slip Distribution and Magnitude Evolution Process of a Mw 7.5 Earthquake Event Based on the New-Built GNSS Stations

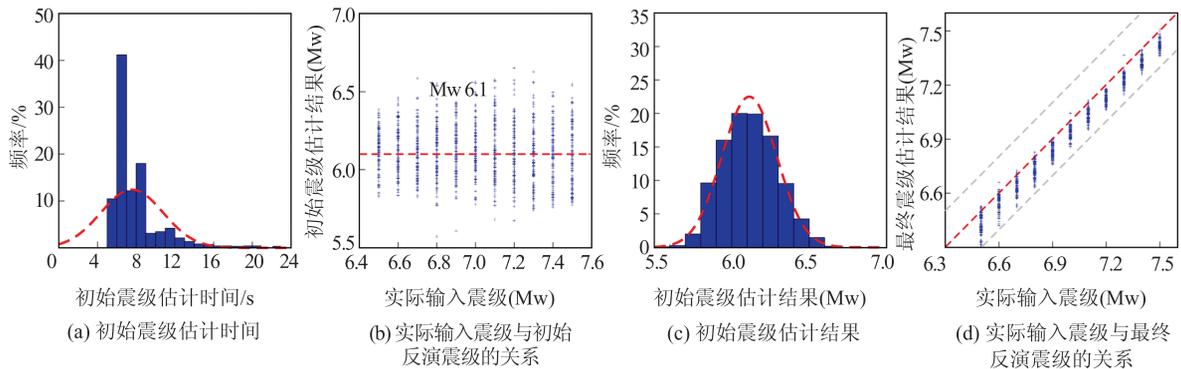


图 10 加密 GNSS 连续台站反演得到的初始震级、最终震级统计结果

Fig. 10 Statistical Results of Initial Magnitude and Final Magnitude Obtained by Inversion from the New-Built GNSS Stations

3) 在中国地震科学实验场加密建设的 GNSS 连续台站,将有助于进一步提升该区域未来强震发生时震级估计、断层滑动分布反演的可靠性,甚至能够更加有效地刻画断层破裂优势方向。

致谢:本文运动学破裂模拟及 GNSS 位移波形合成均采用 Mudpy 软件^[17]完成,所有图件均采用 GMT 软件^[30]绘制。

参 考 文 献

[1] Wang Dun, Sun Kun. How can Seismic Big Data

and AI Improve the Rapid Determination of Global Earthquake Parameters? [J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3915-3917. (王墩, 孙琨. 地震大数据和 AI 如何改进全球大震参数快速测定? [J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3915-3917.)

[2] Peng C Y, Ma Q, Jiang P, et al. Performance of a Hybrid Demonstration Earthquake Early Warning System in the Sichuan-Yunnan Border Region [J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91 (2A) : 835-846.

[3] Zeng Ran, Geng Jianghui, Xin Shaoming, et al. SMAG2000: Integrated GNSS Strong Seismograph

- and Analysis of Its Seismic Monitoring Performance [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 443-452. (曾燃, 耿江辉, 辛绍铭, 等. SMAG2000: 一体化 GNSS 强震仪及其地震监测性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3): 443-452.)
- [4] Bilich A, Cassidy J F, Larson K M. GPS Seismology: Application to the 2002 Mw 7.9 Denali Fault Earthquake [J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(2): 593-606.
- [5] Graizer V. Tilts in Strong Ground Motion [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96(6): 2090-2102.
- [6] Allen R M, Ziv A. Application of Real-Time GPS to Earthquake Early Warning [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(16): L16310.
- [7] Li Zhicai, Ding Kaihua, Zhang Peng, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake from GNSS Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1489-1497. (李志才, 丁开华, 张鹏, 等. GNSS 观测的 2021 年青海玛多地震 (Mw 7.4) 同震形变及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1489-1497.)
- [8] Chai Haishan, Chen Kejie, Wei Guoguang, et al. Coseismic Deformation Monitoring Using BDS-3 and Ultra-High Rate GNSS: A Case Study of the 2021 Maduo Mw 7.4 Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 946-954. (柴海山, 陈克杰, 魏国光, 等. 北斗三号与超高频 GNSS 同震形变监测: 以 2021 年青海玛多 Mw 7.4 地震为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 946-954.)
- [9] Li Zhicai, Chen Zhi, Wu Junli, et al. Co-seismic Deformation of the Jishishan 6.2 Earthquake in Gansu Province Based on High-Frequency GNSS Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240004. (李志才, 陈智, 武军娜, 等. 基于高频 GNSS 观测的甘肃积石山 6.2 级地震同震形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240004.)
- [10] Shan X J, Li Y C, Wang Z J, et al. GNSS for Quasi-Real-Time Earthquake Source Determination in Eastern Tibet: A Prototype System Toward Early Warning Applications [J]. *Seismological Research Letters*, 2021, 92(5): 2988-2997.
- [11] Colombelli S, Allen R M, Zollo A. Application of Real-Time GPS to Earthquake Early Warning in Subduction and Strike-Slip Environments [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(7): 3448-3461.
- [12] Sagiya T, Kanamori H, Yagi Y, et al. Rebuilding Seismology [J]. *Nature*, 2011, 473: 146-148.
- [13] Gao Zhiyu. Research on Rupture and Early Warning of Strong Earthquakes Based on High-Rate GNSS and Synthetic Earthquakes [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2022. (高志钰. 基于高频 GNSS 与合成地震的强震破裂及预警研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2022.)
- [14] Wei G G, Chen K J, Zou R, et al. On the Potential of Rapid Moment Magnitude Estimation for Strong Earthquakes in Sichuan-Yunnan Region, China, Using Real-Time CMONOC GNSS Observations [J]. *Seismological Research Letters*, 2022, 93(5): 2659-2669.
- [15] Zang J F, Wen Y M, Li Z C, et al. Rapid Source Models of the 2021 Mw 7.4 Maduo, China, Earthquake Inferred from High-Rate BDS3/2, GPS, Galileo and GLONASS Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(9): 58.
- [16] Li X X, Zheng K, Li X, et al. Real-Time Capturing of Seismic Waveforms Using High-Rate BDS, GPS and GLONASS Observations: The 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou Earthquake in China [J]. *GPS Solutions*, 2018, 23(1): 17.
- [17] Melgar D, LeVeque R J, Dreger D S, et al. Kinematic Rupture Scenarios and Synthetic Displacement Data: An Example Application to the Cascadia Subduction Zone [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(9): 6658-6674.
- [18] Small D T, Melgar D. Geodetic Coupling Models as Constraints on Stochastic Earthquake Ruptures: An Example Application to PTHA in Cascadia [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2021, 126(7): e2020JB021149.
- [19] Small D T, Melgar D. Can Stochastic Slip Rupture Modeling Produce Realistic M 9+ Events? [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2023, 128(3): e2022JB025716.
- [20] Ruhl C J, Melgar D, Grapenthin R, et al. The Value of Real-Time GNSS to Earthquake Early Warning [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(16): 8311-8319.
- [21] Wen X Z, Ma S L, Xu X W, et al. Historical Pattern and Behavior of Earthquake Ruptures Along the Eastern Boundary of the Sichuan-Yunnan Faulted-block, Southwestern China [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2008, 168(1/2): 16-36.

- [22] Wells D L, Coppersmith K J. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(4): 974-1002.
- [23] Li Yanchuan. Research on Characteristics and Mechanism of Fault Coupling Using Space Geodesy [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2020. (李彦川. 基于空间大地测量的断裂耦合特征及机制研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2020.)
- [24] Shan Xinjian, Li Yanchuan, Gao Zhiyu, et al. Co-seismic Deformation of the 2022 Luding Ms 6.8 Earthquake and Seismic Potential Along Adjacent Major Faults[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(8): 944-953. (单新建, 李彦川, 高志钰, 等. 2022年泸定 Ms 6.8 地震同震形变特征及周边强震危险性[J]. 科学通报, 2023, 68(8): 944-953.)
- [25] Jiang G Y, Xu X W, Chen G H, et al. Geodetic Imaging of Potential Seismogenic Asperities on the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe Fault System, Southwest China, with a New 3-D Viscoelastic Interseismic Coupling Model[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2015, 120(3): 1855-1873.
- [26] Yin L, Luo G, Liu M. Moment Budget and Seismic Potential of the Xianshuihe-Xiaojiang Fault System, Southeastern Tibetan Plateau [J]. *Tectonophysics*, 2023, 862: 229935.
- [27] Blaser L, Kruger F, Ohrnberger M, et al. Scaling Relations of Earthquake Source Parameter Estimates with Special Focus on Subduction Environment [J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(6): 2914-2926.
- [28] Zhu L P, Rivera L A. A Note on the Dynamic and Static Displacements from a Point Source in Multilayered Media [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 619-627.
- [29] Wang R J, Diao F, Hoechner A. SDM—A Geodetic Inversion Code Incorporating with Layered Crust Structure and Curved Fault Geometry [C]//EGU General Assembly Conference, Vienna, Austria, 2013.
- [30] Wessel P, Smith W H F, Scharroo R, et al. Generic Mapping Tools: Improved Version Released [J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2013, 94(45): 409-410.