引文格式:肖懿思,方荣新,李瑜,等.利用高频GNSS观测研究2025年西藏定日Ms 6.8地震地表形变及预警震级[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2176-2186.DOI:10.13203/j.whugis20250049

Citation:XIAO Yisi,FANG Rongxin,LI Yu,et al.Surface Displacement and Early Warning Magnitude of the 2025 Dingri,Xizang Ms 6.8 Earthquake Using High-Rate GNSS Observations[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(11):2176-2186.DOI:10.13203/j.whugis20250049

利用高频GNSS观测研究2025年西藏定日Ms 6.8地震地表形变及预警震级

肖懿思[1] 方荣新[2] 李 瑜[3] 邹 蓉[4] 丁 尧[1,2] 陈 国[2]
郑佳伟[1,2] 刘经南[2]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079
2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079
3 中国地震台网中心,北京,100045
4 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉,430074

摘 要:2025-01-07,西藏定日Ms 6.8地震造成了重大人员伤亡,快速获取近场同震地表形变并确定地震震级对震后快速响应、防震减灾至关重要。北斗三号精密单点定位(precise point positioning,PPP)B2b技术的成熟及地震周边高频全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)测站的布设,为此次地震研究提供了宝贵的观测资料。利用PPP-B2b技术对9个GNSS 1 Hz和50 Hz高频观测数据进行了地表形变监测和震级反演研究。首先利用PPP-B2b技术对广播星历进行改正,获取实时高精度轨道和钟差产品,然后基于PPP获取测站地表形变和地震波,并与事后PPP结果进行对比,最后开展基于GNSS观测的预警震级确定研究。结果表明,基于B2b改正产品解算的地震波形与事后精密产品解算结果相比,在东、北和垂向的均方根误差分别为0.40 cm、0.41 cm和1.34 cm,表明B2b改正产品可用于高频GNSS地震形变监测。基于B2b产品反演的震级结果为7.16,与事后PPP反演的震级相差0.08,与美国地质调查局发布的矩震级相差0.06,验证了B2b精密产品在震级反演中的有效性。50 Hz超高频GNSS结果表明,1 Hz GNSS监测对近场测站地震波存在一定失真,综合考虑网络传输能力和失真问题,认为5~10 Hz采样可满足地震监测相关需求。

关键词:北斗三号;PPP-B2b信号;超高频GNSS;定日地震;地表形变;预警震级

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-03-03

DOI:10.13203/j.whugis20250049 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2176-11

Surface Displacement and Early Warning Magnitude of the 2025 Dingri, Xizang Ms 6.8 Earthquake Using High-Rate GNSS Observations

XIAO Yisi[1] *FANG Rongxin*[2] *LI Yu*[3] *ZOU Rong*[4] *DING Yao*[1,2] *CHEN Guo*[2]
ZHENG Jiawei[1,2] *LIU Jingnan*[2]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China
3 The China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China
4 School of Geophysics and Space Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: **Objectives**: On January 7, 2025, the Ms 6.8 earthquake in Dingri, Xizang, China resulted in significant casualties. Rapidly capturing near-field seismic surface deformation and accurately estimating earthquake magnitude are crucial for post-earthquake response and disaster mitigation. The development of BDS-3 precise point positioning (PPP) B2b technology and the deployment of high-rate global navigation satellite system (GNSS) stations in the seismic region provide valuable observational data for this study.

基金项目:国家自然科学基金(42274025)。

第一作者:肖懿思,研究方向为高精度GNSS数据处理及应用。ysxiao@whu.edu.cn

通信作者:方荣新,博士,教授。rfang@whu.edu.cn

Methods: This study utilizes PPP-B2b corrections to process 1 Hz and 50 Hz GNSS data from nine stations for surface deformation monitoring and magnitude estimation. First, PPP-B2b is applied to correct broadcast ephemerides, generating real-time high-precision orbit and clock products. These corrections are then used in PPP to derive ground displacement and seismic waveforms, which are compared with post-processed PPP results. Finally, an investigation is conducted on earthquake magnitude estimation based on GNSS observations. **Results**: The results show that seismic waveforms derived using B2b-corrected products exhibit root mean square errors of 0.40 cm, 0.41 cm, and 1.34 cm in the east, north, and vertical components, respectively, compared to solutions based on post-processed precise products. This confirms the feasibility of B2b-corrected products for high-rate GNSS seismic deformation monitoring. The earthquake magnitude estimated using B2b-corrected products is 7.16, differing by 0.08 from the post-processed PPP result and by 0.06 from the moment magnitude reported by the United States Geological Survey, demonstrating the effectiveness of B2b precise products for magnitude estimation. Additionally, 50 Hz ultra-high-rate GNSS data reveal that 1 Hz GNSS monitoring exhibit aliasing distortion in near-field seismic waveforms. Considering both network transmission capacity and waveform fidelity, a sampling rate of 5-10 Hz is recommended for seismic monitoring applications. **Conclusions**: The BDS PPP-B2b technology, in conjunction with ultra-high-rate GNSS, has effectively facilitated the monitoring of surface deformation and the inversion of early warning magnitudes for the Ms 6.8 earthquake in Dingri, Xizang, demonstrating its feasibility and reliability.

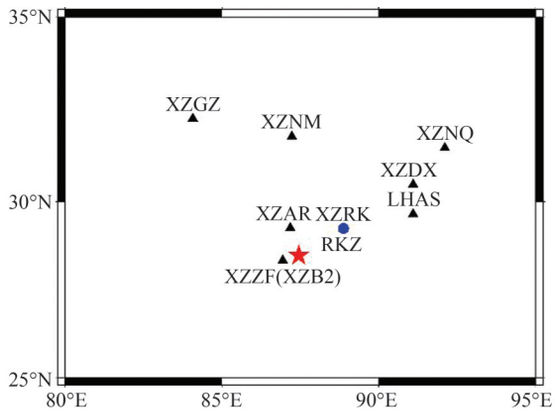
Key words: BDS-3; PPP-B2b signal; ultra-high-rate GNSS; Dingri earthquake; surface displacement; early warning magnitude

根据中国地震台网中心正式测定，北京时间 2025-01-07T09:05:16，西藏自治区日喀则市定日县（28.50°N，87.45°E）发生 Ms 6.8 地震，震源深度 10 km[1]。此次地震共造成 126 人遇难，350 人受伤，并对周边地区造成了严重的影响。地震发生后，相关机构和学者开展了震源特征探讨[2-4]、震动强度预测[5-7]、余震序列和危险性评估[8]等研究工作。中国地震局地球物理研究所利用远场体波数据反演初步得到了此次日喀则定日地震的破裂过程初步结果，表明此次地震以正断机制为主，主要持续时间约 20 s，破裂模式主要为由南向北单侧破裂[2]。王楠等[5]利用合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar，InSAR）数据对定日地震的震源机制进行了反演分析，反演的断层走向为 187°，倾角为 40°，最大位错为 6 m，矩震级为 Mw 7.1，同震形变最大为 2 m，该结果与现场调查及遥感影像分析结果一致。邹俊杰等[8]通过高分 2 号遥感数据开展震前与震后影像解译工作，结合地震由南向北单侧破裂的过程及震后余震分布的特点，认为南段未破裂区的危险性可能更高，并提出了相应震害防御的对策和建议。

随着高频（≥1 Hz）GNSS 接收机的出现和定位基准站布设密度的增加，高频 GNSS 技术在地震监测中得到了广泛的应用，例如 2008 年汶川地震[9-10]、2013 年芦山地震[11]、2021 年玛多地震[12-13]、2023 年积石山地震[14]。上述 GNSS 数据处理主要采用精密单点定位（precise point positioning，PPP）方法，该方法能够利用单站实现地震波快速监测，可有效克服传统地震监测仪器在强震条件下难以快速近场获取地表永久形变的问题，在大地震监测中展现出独特优势[15-18]。但传统 PPP 方法的精密解算需要依赖于网络传输精密轨道和钟差产品，在地震监测中可能会面临网络通信中断、网络传输受限等问题[19-20]。北斗三号卫星导航系统（BeiDou-3 navigation satellite system，BDS-3）利用 PPP-B2b 信号作为数据播发通道，通过 BDS-3 地球静止轨道（geostationary orbit，GEO）卫星传输精密轨道、钟差、码偏差等改正参数，根据广播星历和改正信息即可获得精密产品，为中国及周边地区用户提供实时 PPP 服务。由于基于 PPP-B2b 改正信号的定位方式采用卫星播发替代互联网传输模式，因此不受网络传输限制，特别适合复杂情况下实时 PPP 应用[21]。因此，基于 PPP-B2b 信号的实时 PPP 服务在地震地表形变监测以及震级快速反演等应用中具有巨大潜力。

目前已有相关学者利用 PPP-B2b 技术开展了少量震例研究，针对 2021 年 7.4 级玛多地震和 2022 年 6.8 级泸定地震，基于 B2b 改正产品对地

震实测GNSS数据进行处理,并利用同震位移波形进行回溯性反演震级、震源机制和断层滑动分布[22-24],初步验证了PPP-B2B技术在地震监测中的可行性。随着PPP-B2b技术的不断发展和逐渐成熟,本文基于该技术对2025-01-07西藏定日Ms 6.8地震进行地表形变监测并开展预警震级反演研究,进一步论证PPP-B2b技术在地震实时监测、震后快速响应中的应用潜力。本文收集了震中600 km以内陆态网络9个测站的1 Hz高频和50 Hz超高频GNSS数据,基于B2b改正产品和事后精密产品,解算提取可靠的地震位移波形,并通过对比不同产品的监测效果以及预警震级,评估北斗PPP-B2b服务在实时地震波监测方面的性能。



注:红色五角星表示震中位置,黑色三角形表示高频GNSS测站位置,蓝色圆点表示强震仪测站。

图1 西藏定日地震GNSS和强震仪测站分布

Fig. 1 Distribution of GNSS Stations and Strong Motion Measurement Stations of Dingri Earthquake, Xizang

1 研究区域

本文研究区域位于西藏自治区日喀则市定日县,地处喜马拉雅山脉北缘,毗邻印度和尼泊尔边界,处于印度板块与欧亚板块的交接地带。印度板块向北推挤并与欧亚板块发生相互作用,导致该区域地质构造复杂,构造应力高度集中,地壳变形显著,成为全球典型的地震高发区[25]。板块碰撞不仅引发了区域性的构造变形,还在青藏高原南部的拉萨地块形成了一系列南北走向的构造裂谷带,主要包括亚东-谷露裂谷、申扎-定结裂谷、岗嘎-当穹错裂谷中南段、聂拉木-措勤裂谷等,这些南北走向的张性断裂切割了青藏高原南缘近东西走向的藏南滑脱拆离带[26],表现出显著的活动性,并伴随多次强震事件。据统计,1900年以来,定日Ms 6.8地震震中50 km范围内共发生40次Ms 3.0以上的地震。其中Ms 6.0~6.9地震2次,Ms 5.0~5.9地震7次。最近的一次强震发生在2020-05-22,定日县发生Ms 6.4地震,震中距约为10 km[27]。

本文收集了震中附近9个GNSS测站(XZB2、XZZF、XZAR、XZRK、XZNM、LHAS、XZDX、XZGZ、XZNQ)1 Hz和50 Hz观测数据,用于开展高频GNSS地震监测和反演研究。测站分布如图1所示。

2 数据处理方法及策略

2.1 基于北斗PPP-B2b产品改正

BDS-3 GEO卫星播发的PPP-B2b信号主要播发4种信息类型,内容包括卫星掩码、轨道改正数及测距精度指数、码偏差改正数、钟差改正数。采用接收机实时接收PPP-B2b电文并进行解码和匹配,同时对BDS-3和GPS卫星广播星历进行卫星轨道、钟差和码间偏差改正。

1)卫星轨道改正

轨道改正信息参数为轨道改正向量$\delta \boldsymbol{O}$,其在径向(R)、切向(A)、法向(C)的分量分别为$[\delta O_{\mathrm{R}}\ \delta O_{\mathrm{A}}\ \delta O_{\mathrm{C}}]^{\mathrm{T}}$。由于改正向量$\delta \boldsymbol{O}$所在坐标系为星固系,需要联合利用广播星历计算出的卫星位置向量$\boldsymbol{X}_{\mathrm{broadcast}}$,将其转换为地固系下的卫星轨道改正数$\delta \boldsymbol{X}$。转换公式为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}=\dfrac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{C}}=\dfrac{\boldsymbol{r}\times\dot{\boldsymbol{r}}}{|\boldsymbol{r}\times\dot{\boldsymbol{r}}|} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{A}}=\boldsymbol{e}_{\mathrm{C}}\times\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}} \\ \delta\boldsymbol{X}=[e_{\mathrm{R}}\ \ e_{\mathrm{A}}\ \ e_{\mathrm{C}}]\cdot\delta\boldsymbol{O} \end{cases} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{r}$、$\dot{\boldsymbol{r}}$分别为广播星历卫星位置和速度矢量;$\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}$、$\boldsymbol{e}_{\mathrm{A}}$和$\boldsymbol{e}_{\mathrm{C}}$分别对应径向、切向和法向的单位矢量。联合解算卫星轨道改正数$\delta \boldsymbol{X}$和利用广播星历计算的卫星位置向量$\boldsymbol{X}_{\mathrm{broadcast}}$,即可得到改正后的卫星位置$\boldsymbol{X}_{\mathrm{orbit}}$。修正算法如下:

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{orbit}}=\boldsymbol{X}_{\mathrm{broadcast}}-\delta\boldsymbol{X} \tag{2}$$

2)卫星钟差改正

通过对PPP-B2b电文信息的解码和匹配,可以得到实时高精度的钟差改正数。钟差改正电文中的参数是相对于广播星历钟差的改正参数,计算公式为:

$$t_{\mathrm{satellite}}=t_{\mathrm{broadcast}}-\frac{c_0}{c} \tag{3}$$

式中，$t_{satellite}$ 为改正后的卫星钟差；$t_{broadcast}$ 为广播星历计算的卫星钟差参数；c_0 为 PPP-B2b 电文中的钟差改正参数；c 为光速。

3）卫星码偏差改正

由于卫星跟踪模式的不同，各观测值都包含一个与信号跟踪模式相关的偏差。码偏差改正用于消除不同信号得到的观测值之间存在的系统性偏差，实现各频率各信号同步处理。修正算法为：

$$\tilde{P}_{sig}=P_{sig}-DCB_{sig} \tag{4}$$

式中，$\tilde{P}_{sig}$ 为修正后的观测值；P_{sig} 为原始观测值；DCB_{sig} 为对应信号的码间偏差（differential code bias，DCB）。

通过解码来自 BDS-3 GEO 卫星播发的 PPP-B2b 信号，获取高精度的轨道、钟差和码间偏差改正数后，由导航电文计算得到卫星轨道位置与钟差，对计算结果利用解码获得的改正数进行改正，即可得到 B2b 信号改正后实时的精密轨道、钟差和码间偏差产品。最后和观测数据一起，进行 PPP 定位解算流程。PPP-B2b 高精度定位算法的实现流程如图 2 所示。

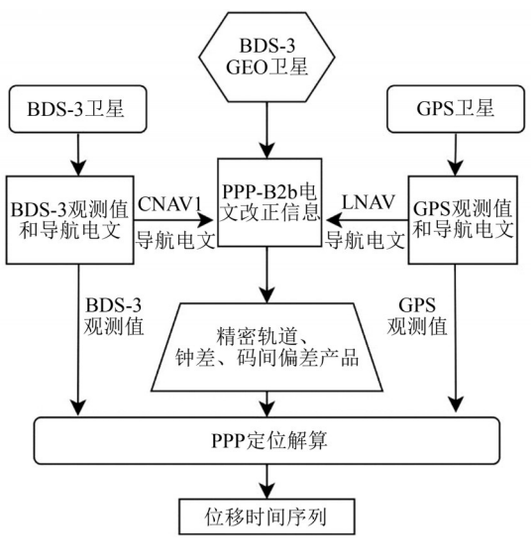


图 2　基于 PPP-B2b 产品的高精度定位算法流程

Fig. 2　Algorithm Flow of High-Precision Positioning Using PPP-B2b

2.2　基于 B2b 改正产品的 PPP 解算策略

PPP 解算策略使用双频无电离层（ionosphere-free，IF）组合消除电离层一阶项影响，IF 组合模型的伪距和载波相位观测方程可表示为：

$$\begin{cases} P_{IF}=\rho+c\cdot(dt-dT)+\delta_{trop}+dm+\varepsilon_P \\ L_{IF}=\rho+c\cdot(dt-dT)+\delta_{trop}+\lambda_{IF}N_{IF}+ \\ \qquad \delta m+\varepsilon_L \end{cases} \tag{5}$$

式中，P_{IF}、L_{IF} 是伪距、载波相位观测值；c 为光速；ρ 为站星距离；dt 为接收机钟差；δ_{trop} 为对流层延迟；λ_{IF} 为波长；N_{IF} 为双频无电离层组合模糊度；dT 为卫星钟差；ε_P、ε_L 分别为伪距和载波相位的观测值噪声；dm 和 δm 分别为伪距和载波的多径效应。

对流层延迟误差进行了 Saastamoinen 模型和全球投影函数的修正，其他误差如天线相位缠绕、相对论效应、潮汐效应和地球自转等则通过相应的模型进行了改正；采用无几何距离（geometry-free，GF）组合和 Melbourne-Wübbena 组合进行周跳探测，采用平方根信息滤波估计站坐标、模糊度、接收机钟差以及残余对流层湿延迟参数。采用的精密产品为 PPP-B2b 信号改正广播星历后轨道和钟差产品，为了验证 B2b 改正产品定位结果的精度，还利用武汉大学事后精密星历获得了 PPP 产品，并将两种精密产品获得的定位结果进行对比分析。PPP 解算采用武汉大学卫星导航定位技术研究中心自主研发的 PANDA 软件实现。

3　结果与分析

3.1　地震位移监测结果

利用 B2b 改正产品和武汉大学 IGS 数据中心精密产品（WUM）分别对震中附近 9 个 GNSS 测站 1 Hz 观测数据进行 PPP 解算，得到东向（E）、北向（N）、垂向（U）3 个方向的地震位移波形。为了评估基于 B2b 改正产品的 PPP 解算精度，图 3 展示了 9 个测站基于两种精密产品地震期间 E、N、U 方向的位移变化对比，为了展示地震波的波形大小，将波形按纵轴进行等尺度平移排列。

从图 3 中可以看出，利用 B2b 改正产品解算的 PPP 位移与 WUM 精密产品解算的 PPP 位移在水平方向上吻合良好，在垂直方向上，前者表现出一定的趋势项误差，但是能成功恢复地震波形。为了定量评估基于 B2b 改正产品的 PPP 形变监测的精度，以 WUM 精密产品的 PPP 位移为参考，计算两种定位结果的差值均方根（root mean square，RMS）。如表 1 所示，两者的差值 RMS 在 E、N、U 方向分别为 0.40 cm、0.41 cm 和 1.34 cm，表明基于 B2b 改正产品的地表形变监测精度与基于 WUM 精密产品的精度水平相当，可用于实时地震形变监测。

从图 3 还可以发现，地震波形最先到达距离震中最近的 XZZF 站和 XZB2 测站，且在 E 方向

上出现了明显的永久同震位移。XZAR测站地震波波形较大,甚至大于震中距更近的XZZF和XZB2测站。分析原因主要是因为XZAR测站位于震中的N向,而此次地震破裂模式为震中向北单侧破裂[2]。BOATWRIGHT等[28]指出,地面震动强度与破裂方向相关,沿着破裂方向上的地面震动强度相对较高,垂直于破裂方向上的地面震动强度相对较低。对于震中距大于100 km的测站,随着距离的增加,伴随着能量的衰减,高频信号的衰减程度越大,低频信号的占比增加。

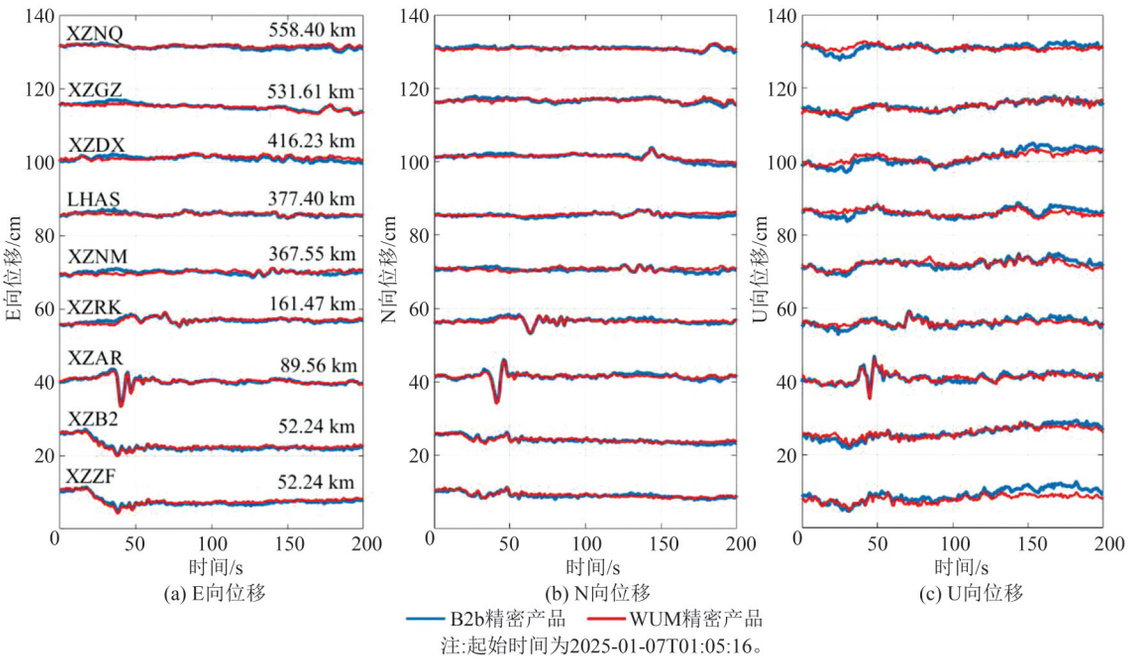


图3 基于WUM精密产品与B2b改正产品地震位移波形对比

Fig. 3 Comparison of Seismic Displacement Waveforms Using WUM Products and B2b Products

表1 基于两种精密产品地震波形定位结果差值RMS/cm

Table 1 RMS Difference of Seismic Waveform Positioning Results Based on Two Precision Products/cm

测站	E向	N向	U向
XZB2	0.37	0.35	1.08
XZZF	0.35	0.41	1.60
XZAR	0.28	0.41	1.35
XZRK	0.40	0.37	1.38
XZNM	0.54	0.54	1.35
LHAS	0.35	0.41	1.27
XZDX	0.52	0.43	1.52
XZGZ	0.39	0.43	1.39
XZNQ	0.43	0.33	1.12
均值	0.40	0.41	1.34

为了体现GNSS监测地震波的应用效果,还收集了测站XZRK附近1.1 km的强震仪测站(RKZ)100 Hz加速度数据,对其进行积分处理,并采用截止频率为0.02 Hz的4阶巴特沃斯(Butterworth)高通滤波进行趋势向消除[17],获得积分后的位移时间序列。图4为加速度积分位移与基于两种精密产品的位移对比结果。

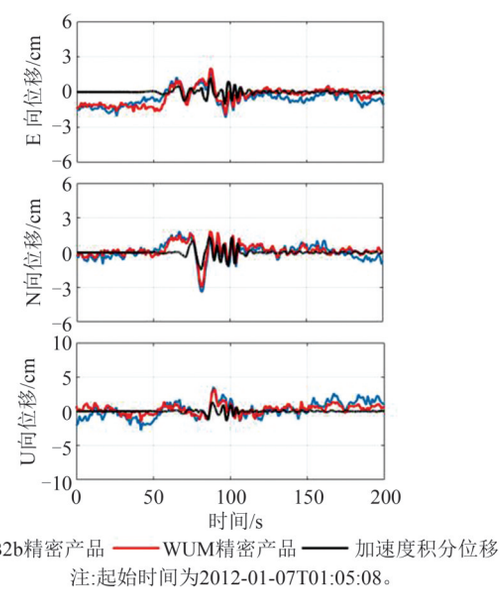


图4 加速度积分位移与基于两种精密产品位移对比

Fig. 4 Comparison of Acceleration Integral Displacement and Displacements Based on Two Precision Products

从图4可以看出,强震仪监测的地震波位移与基于两种精密产品的GNSS位移主要波形较为一致,但并非完全吻合,推测主要是由于强震仪测站RKZ与GNSS测站XZRK相隔1.1 km,站

间距较远，以及地震波在传播途中经历的传播介质不一致导致。从 E 方向结果可以看出，强震仪加速度积分的位移结果难以恢复地震同震位移，而 GNSS 技术测出了永久同震形变。尽管受到 GNSS 定位噪声的影响，但其仍然较好地测得了地震的波形，并恢复同震形变，体现出 GNSS 技术在地震监测中的优越性。

3.2　超高频 GNSS 信号对比分析

上述研究结果采用的是 1 Hz GNSS 观测，为研究基于 B2b 改正产品在超高频 PPP 定位中的表现，以及不同采样率对于地震动态位移的捕捉能力，对 50 Hz GNSS 观测数据进行研究分析。图 5 展示了距离震中较近的 XZZF、XZAR 和 XZRK 测站基于两种精密产品 1 Hz 采样率和 50 Hz 采样率 PPP 位移结果对比，并对于平均功率谱密度（power spectral density，PSD）进行了对比分析（图 6），进一步说明 B2b 改正产品在超高频 PPP 定位中的特性。

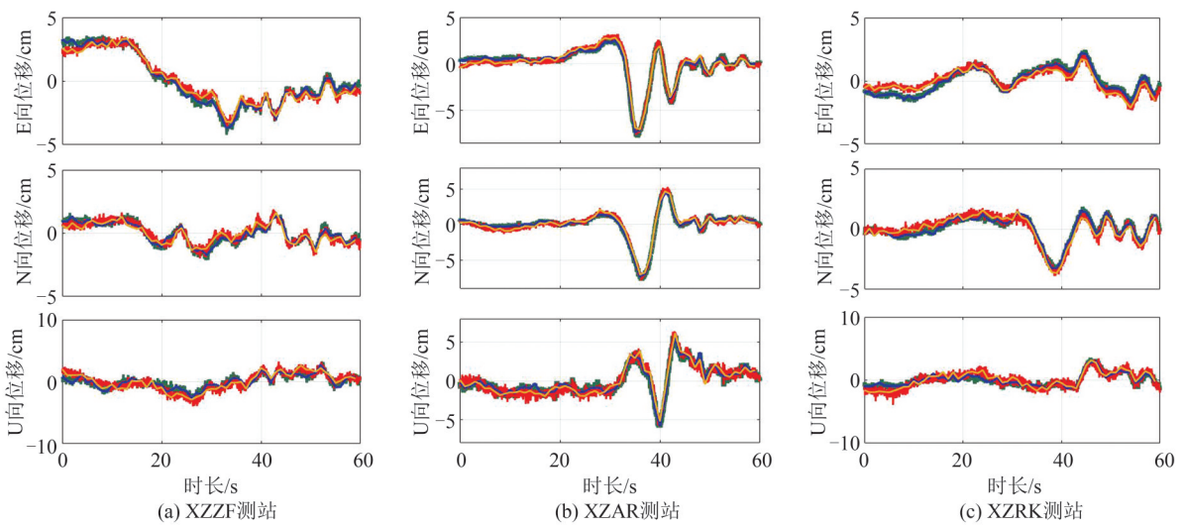


图 5　XZZF、XZAR、XZRK 测站不同采样率定位结果对比

Fig. 5　Displacement Comparison of Different Sampling Rates at XZZF, XZAR, XZRK Stations

从图 5 可以看出，对比 1 Hz PPP 结果，50 Hz PPP 中包含了过多的噪声，导致细节信息并不明显，但基于 B2b 改正产品的 50 Hz PPP 位移与 WUM 精密产品的 50 Hz PPP 位移吻合较好，两种精密产品在超高频上的定位结果非常一致。从图 6 可以看出，50 Hz PPP 误差的 PSD 在高于 1 Hz 的频段呈现白噪声特征。该结果与 BOCK 等[29]的分析结果相一致。但在较低频段（0～1 Hz），PSD 呈现出明显的下降趋势，表现出显著的有色噪声特征。相比之下，基于 WUM 精密产品的 PPP 结果噪声水平略优于基于 B2b 改正产品的 PPP 结果。但两种精密产品的 50 Hz PPP 结果在整体特性上保持一致，表明 B2b 改正产品在超高频 PPP 定位中的精度与 WUM 精密产品相当。

为了探讨不同采样频率对于地震动态位移细节信息的捕捉能力和低频 PPP 的失真问题，设置一系列采样率（1 Hz、5 Hz、10 Hz、50 Hz），分别利用 B2b 改正产品和 WUM 精密产品解算 PPP 获得 E、N、U 3 个方向的位移时间序列。图 7 以测站 XZZF 为例，展示了基于 B2b 改正产品不同采样频率的 PPP 位移结果对比。

从图 7 中可以看出，1 Hz PPP 虽然能够反映大致的震动波形，刻画地震峰值信息。但是存在较为明显的失真现象，难以恢复地震波丰富的细节信息。随着采样率的增加，细节信息逐渐得到体现，失真现象减弱，在 5～10 Hz 左右已经能够反映出完整的地震波细节信息。50 Hz PPP 结果相比 1 Hz 结果存在较为密集的噪声，可能会影响地震波的识别，其原因可能是 GNSS 采样频率提高时，系统在更短时间间隔内记录更多数据，导致噪声也被记录下来，这些噪声并不代表真实运动轨迹，因此高频采样下，噪声更为密集。而且 50 Hz 数据量庞大，实时传输会对网络带宽造成较大压力，在大地震等网络不稳定的情况下，会出现传输丢包、延迟增加等问题，从而影响最终的定位结果。综合考虑网络传输能力和细节失真问题，建议使用 5～10 Hz 采样率进行 GNSS 地震学相关研究，这与 LARSON[30]的研究结果相一致。

3.3　地震震级确定对比分析

地震震级是衡量地震能量释放大小的重要参数，它直接影响地震灾害的评估与预测，通过

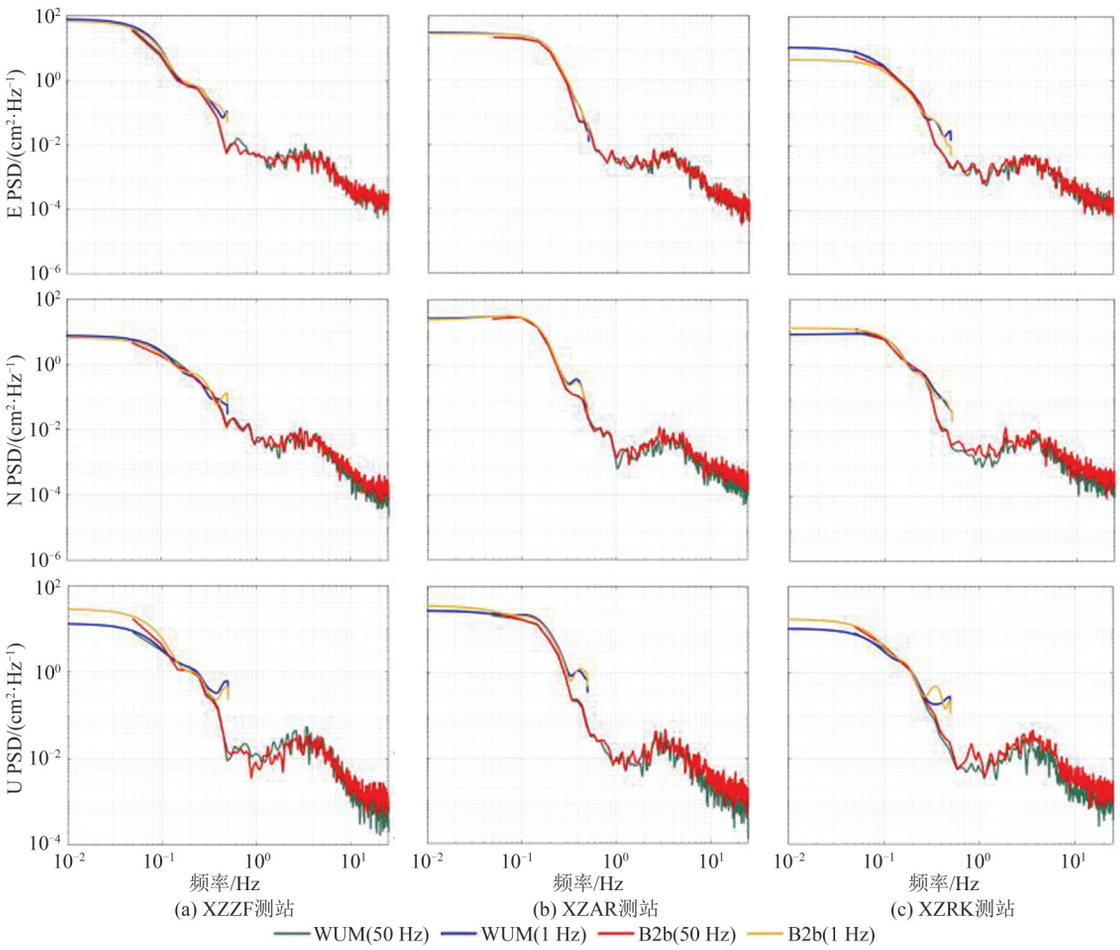


图6 XZZF、XZAR、XZRK测站平均功率谱密度

Fig. 6 Average Power Spectral Density of XZZF, XZAR, XZRK Stations

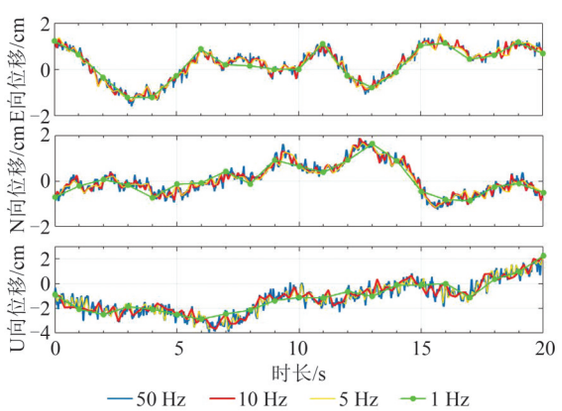


图7 XZZF测站不同采样率地震位移波形对比

Fig. 7 Comparison of Earthquake Displacement Waveforms at Different Sampling Rates at XZZF Station

地面峰值位移(peak ground displacement,PGD)可计算准确可靠的预警震级[31]。采用CROWELL等[32]提出的回归模型衡量PGD和矩震级(Mw)的关系,表达式为:

$$\lg(d_{\mathrm{PGD}})=A+B\cdot M_W+C\cdot M_W\cdot\lg R \tag{6}$$

式中,R为震中距(km);M_W表示矩震级;d_{PGD}为三维的地面峰值位移(m),其表达式为:

$$d_{\mathrm{PGD}}=\max\left(\sqrt{d_{\mathrm{N}}(t)^2+d_{\mathrm{E}}(t)^2+d_{\mathrm{U}}(t)^2}\right) \tag{7}$$

其中,$d_{\mathrm{N}}(t)$、$d_{\mathrm{E}}(t)$、$d_{\mathrm{U}}(t)$分别为t时刻N向、E向和U向的位移。RUHL等[33]根据地震震级、震中距、PDG参数的回归模型,利用全球29个Mw 6.0~9.0地震的1 Hz GNSS数据获得的位移拟合了PGD与矩震级的关系,采用的回归方程系数为$A=-5.919$,$B=1.000\,9$,$C=-0.145$。

为了与上述研究保持一致,本文也采用1 Hz GNSS位移结果提取各测站PGD,计算地震震级。表2展示了基于B2b改正产品和WUM精密产品地震期间9个GNSS测站位移结果提取的PGD值及相应的震级。

中国地震局地震台网中心公布此次地震的面波震级为6.8级,地震发生后,不同机构利用多种观测数据反演的矩震级在7.0~7.2之间。例如,李琦等[1]收集了全球地震台网70个远震记录,采用多时窗反演方法测得的矩震级为Mw 7.2;张喆等[2]通过矩心矩张量和同步源反演方法获得的矩震级为Mw 7.0;王楠等[5]利用InSAR技

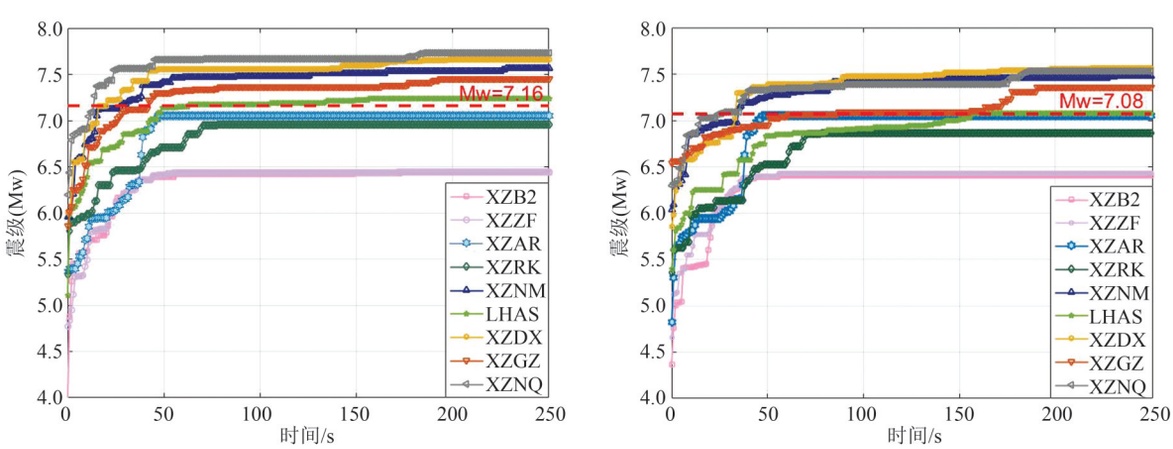
表 2　基于两种精密产品解算的 PGD 与震级结果

Table 2　PGD and Magnitude Results Based on Two Precise Product Solutions

测站	震中距/km	PGD/cm		震级	
		B2b改正产品	WUM精密产品	B2b改正产品	WUM精密产品
XZB2	52.24	9.37	8.89	6.44	6.41
XZZF	52.24	9.48	9.32	6.44	6.43
XZAR	89.56	15.89	15.92	7.05	7.05
XZRK	161.47	7.44	6.42	6.95	6.86
XZNM	367.55	7.98	6.99	7.57	7.48
LHAS	377.40	4.80	3.79	7.24	7.08
XZDX	416.23	7.95	6.90	7.66	7.56
XZGZ	631.61	4.53	3.98	7.45	7.36
XZNQ	558.40	5.76	4.77	7.66	7.53
震级均值				7.16	7.08

术反演得到矩震级为 Mw 7.1。另外，美国地质调查局（United States Geological Survey，USGS）官方发布的矩震级为 Mw 7.1。单个测站计算的震级范围在 6.4～7.6 之间，主要是由于各个测站的地震波受破裂传播方向和测站场地放大效应影响，通常沿断层破裂方向地震波强度更大，导致破裂方向区域的测站反演的震级更大。但基于 B2b 改正产品和 WUM 精密产品定位结果提取的震级平均值分别为 Mw 7.16 和 Mw 7.08，结果非常接近，差值仅为 0.08。以 USGS 发布的矩震级 Mw 7.1 为参考，基于 B2b 改正产品所提取出的震级与其仅相差 0.06。

图 8 展示了基于两种精密产品对 9 个 GNSS 测站模拟 PGD 预警震级的计算过程，地震波随时间传播至各 GNSS 测站，持续更新各测站的 PGD 值直至预警震级达到收敛。可以看出，各台站的震级结果不完全一致。基于 B2b 改正产品计算出的最大震级差为 1.22，基于 WUM 精密产品计算出的最大震级差为 1.15，其原因主要是受破裂传播方向和测站场地放大效应影响所致。两种精密产品的震级收敛过程均呈阶梯性变化，在震后 40 s 达到初始稳定，从近场测站 XZB2 和 XZZF 可检测到明显的地震波形，计算出较稳定的震级约为 Mw 6.4；震后 170 s 后，各测站均已检测到地震波形，收敛过程达到最终稳定，震级约为 Mw 7.1。值得注意的是，本次地震中 GNSS 测站震中距普遍较大，近场测站较少。对于 GNSS 测站更为密集的地区（如川滇地区），若发生地震，地震波到达各测站的时间更短，震级收敛速度更快，地震监测预警时效性更好，有助于 GNSS 对大震震级的快速确定，为传统地震震级的确定提供了辅助支持。



(a) 基于B2b改正产品震级收敛过程　　(b) 基于WUM精密产品震级收敛过程

注：起始时间为2005-01-07T01:05:16。

图 8　基于两种精密产品 GNSS 测站 PGD 预警震级收敛过程对比

Fig. 8　Comparison of PGD Magnitude Convergence Process Based on Two Precise Products of GNSS Stations

4　结　语

本文以 2025-01-07 Ms 6.8 西藏定日地震为例，深入探讨了 PPP-B2b 信号 PPP 服务与超高频 GNSS 在地震地表形变监测和预警震级反演上的应用潜力。利用 BDS-3 GEO 卫星播发的 B2b 改正信息，解码改正得到 B2b 精密轨道和钟差产品，对西藏定日 9 个 GNSS 测站收集的高频观测数据进行了 PPP 定位解算。通过与基于 WUM 精密产品的定位结果比较，验证 PPP-B2b 技术在西藏地震实时监测应用中的可行性。

利用 B2b 改正产品的 PPP 地震形变位移与利用 WUM 精密产品的 PPP 地震形变位移差值的 RMS 在 E、N、U 向分别为 0.40 cm、0.41 cm 和 1.34 cm，表明基于 B2b 改正产品的地震波监测精度与基于 WUM 精密产品结果水平相当。通过

对比不同采样率对地震波细节的捕捉能力,1 Hz采样率结果出现了失真现象。综合考虑网络传输能力和失真问题,建议采用5~10 Hz采样率进行地震监测相关研究。基于B2b改正产品定位结果提取的矩震级为Mw 7.16,与基于WUM精密产品解算的Mw 7.08相差0.08,与USGS所公布的Mw 7.1仅相差0.06,验证了B2b精密产品在震级反演中的有效性。研究结果为实时地震形变监测和震级快速反演提供了新的思路,展现了PPP-B2b信号在地震监测领域的应用前景。随着PPP-B2b技术的成熟和广泛应用,有望能够对地震进行高精度实时监测,为地震快速响应和防灾减灾提供更高效的技术支撑。

致谢:感谢中国地震台网中心中国大陆构造环境监测网络提供高频GNSS数据支撑,中国地震局工程力学研究所强震动观测中心为本文研究提供强震数据支持;事后精密轨道钟差产品来自武汉大学IGS数据中心。

参 考 文 献

[1] 中国地震局地震研究所. 西藏定日6.8级地震高频GNSS同震响应和震源破裂模型[OL]. (2025-01-09) http://www.iscea.ac.cn/info/1035/2124.htm.
Institute of Seismology, China Earthquake Administrate. High-Rate GNSS Coseismic Response and Source Rupture Model of the Ms 6.8 Dingri Earthquake in Xizang [OL]. (2025-01-09) http://www.iscea.ac.cn/info/1035/2124.htm.

[2] 中国地震局地球物理研究所. 2025年1月7日西藏日喀则市定日县6.8级地震科技支撑简报[EB/OL]. (2025-01-07) https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280883.html.
Institute of Geophysics, China Earthquake Administrate. Briefing on Scientific and Technological Support for the 6.8 Magnitude Earthquake in Dingri County, Shigatse City, Xizang on January 7, 2025 [EB/OL]. (2025-01-07) https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280883.html.

[3] 石峰, 梁明剑, 罗全星, 等. 2025年1月7日西藏定日6.8级地震发震构造与同震地表破裂特征[J]. 地震地质, 2025, 47(1): 1-15.
SHI Feng, LIANG Mingjian, LUO Quanxing, et al. Seismogenic Fault and Coseismic Surface Deformation of the Dingri Ms 6.8 Earthquake in Xizang, China [J]. *Seismology and Geology*, 2025, 47(1): 1-15.

[4] 白玲, 陈治文, 王绍俊. 2025年西藏定日6.8级地震: 构造背景分析与震源特征探讨[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 2025, 56(3): 258-263.
BAI Ling, CHEN Zhiwen, WANG Shaojun. The 2025 Dingri Ms 6.8 Earthquake in Xizang: Analysis of Tectonic Background and Discussion of Source Characteristics[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2025, 56(3): 258-263.

[5] 王楠, 李永生, 申文豪, 等. 2025年1月7日西藏定日Ms 6.8地震震源机制InSAR反演及强地面运动快速模拟[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 404-411.
WANG Nan, LI Yongsheng, SHEN Wenhao, et al. Source Parameters and Rapid Simulation of Strong Ground Motion of the Ms 6.8 Earthquake on January 7, 2025 in Dingri (Xizang, China) Derived from InSAR Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 404-411.

[6] 陈鲲, 杨婷, 王永哲, 等. 2025年1月7日西藏定日6.8级地震的快速产出参数[J]. 地震科学进展, 2025, 55(3): 164-172.
CHEN Kun, YANG Ting, WANG Yongzhe, et al. Quick Output Parameters Related to the 7 January 2025 M 6.8 Earthquake in Dingri County, Xizang [J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2025, 55(3): 164-172.

[7] XU X W, WANG S G, CHENG J, et al. Shaking the Tibetan Plateau: Insights from the Mw 7.1 Dingri Earthquake and Its Implications for Active Fault Mapping and Disaster Mitigation [J]. *NPJ Natural Hazards*, 2025, 2: 16.

[8] 邹俊杰, 邵志刚, 何宏林, 等. 2025年1月7日西藏定日Ms 6.8地震地表破裂解译与建筑物震害损毁统计[J]. 地震地质, 2025, 47(1): 16-35.
ZOU Junjie, SHAO Zhigang, HE Honglin, et al. Surface Rupture Interpretation and Building Damage Assessment of Xizang Dingri Ms 6.8 Earthquake on January 7, 2025 [J]. *Seismology and Geology*, 2025, 47(1): 16-35.

[9] 余建胜, 赵斌, 谭凯, 等. 汶川地震震后GNSS形变分析[J]. 测绘学报, 2018, 47(9): 1196-1206.
YU Jiansheng, ZHAO Bin, TAN Kai, et al. Analysis of GNSS Postseismic Deformation of Wenchuan Earthquake [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(9): 1196-1206.

[10] 丁开华, 许才军, 温扬茂. 汶川地震震后形变的GPS反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(2): 131-135.
DING Kaihua, XU Caijun, WEN Yangmao. Postseismic Deformation Associated with the 2008 Wenchuan Earthquake by GPS Data[J]. *Geomatics and*

Information Science of Wuhan University, 2013, 38(2): 131-135.

[11] 杨国华, 朱爽, 梁洪宝, 等. 芦山 Ms 7.0 级地震震前及同震地表形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(1): 121-127.
YANG Guohua, ZHU Shuang, LIANG Hongbao, et al. Pre-seismic and Co-seismic Deformation of Ms 7.0 Earthquake in Lushan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 121-127.

[12] 王迪晋, 王东振, 赵斌, 等. 2021 年青海玛多 Mw 7.4 地震 GNSS 同震形变场及其断层滑动分布[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 537-551.
WANG Dijin, WANG Dongzhen, ZHAO Bin, et al. 2021 Qinghai Madoi Mw 7.4 Earthquake Coseismic Deformation Field and Fault-Slip Distribution Using GNSS Observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 537-551.

[13] 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.
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.

[14] 李志才, 陈智, 武军郦, 等. 基于高频 GNSS 观测的甘肃积石山 Ms 6.2 地震同震形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 236-246.
LI Zhicai, CHEN Zhi, WU Junli, et al. Coseismic Deformation of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province Based on High-Frequency GNSS Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 236-246.

[15] SHI Y, XU P L, SHU Y M, et al. GNSS Gyroscopes: Determination of Angular Velocity and Acceleration with very High-Rate GNSS[J]. *Satellite Navigation*, 2024, 5(1): 9.

[16] SHU Y M, SHI Y, XU P L, et al. Error Analysis of High-Rate GNSS Precise Point Positioning for Seismic Wave Measurement[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(11): 2691-2713.

[17] 李成宏, 李陶, 栗广才, 等. 加速度计及其融合高采样 GNSS 的低频信号测量特性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(12): 1293-1298.
LI Chenghong, LI Tao, LI Guangcai, et al. Low-Frequency Signals Measurement Characteristics of Accelerometers and Its Combination with High-Rate GNSS for Earthquake Monitoring[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(12): 1293-1298.

[18] NIE Z X, YANG H Z, ZHOU P Y, et al. Quality Assessment of CNES Real-Time Ionospheric Products[J]. *GPS Solutions*, 2018, 23(1): 11.

[19] PAZIEWSKI J, STEPNIAK K, SIERADZKI R, et al. Dynamic Displacement Monitoring by Integrating High-Rate GNSS and Accelerometer: On the Possibility of Downsampling GNSS Data at Reference Stations[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 157.

[20] FANG R X, LÜ H H, SHU Y M, et al. Improved Performance of GNSS Precise Point Positioning for High-Rate Seismogeodesy with Recent BDS-3 and Galileo[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(8): 3255-3267.

[21] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件精密单点定位服务信号 PPP-B2b (1.0 版)[DB/OL]. (2020-07). http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/202008/P020200803362060731204.pdf.
China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Precise Point Positioning Service Signal PPP-B2b (Version 1.0)[DB/OL]. (2020-07). http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/202008/P020200803362060731204.pdf.

[22] FANG R X, LV H H, HU Z G, et al. GPS/BDS Precise Point Positioning with B2b Products for High-Rate Seismogeodesy: Application to the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 231(3): 2079-2090.

[23] ZANG J F, FAN S J, XU C J, et al. Performance Assessment of the BDS-3 PPP-B2b Service for Real-Time Earthquake Source Description: A Case Study for the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 26.

[24] 方荣新, 陈智潜, 李大炜, 等. 基于北斗 PPP-B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240163.
FANG Rongxin, CHEN Zhiqian, LI Dawei, et al. Real-Time Monitoring Method of Earthquake Coseismic Deformation Based on BeiDou PPP-B2b Correction Signal[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240163.

[25] YIN A, HARRISON T M. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211-280.

[26] 黄婷, 吴中海, 韩帅, 等. 西藏日喀则地区的活断

层基本特征及地震灾害潜在风险评估[J]. 地震科学进展, 2024, 54(10): 696-711.
HUANG Ting, WU Zhonghai, HAN Shuai, et al. The Basic Characteristics of Active Faults in the Region of Xigaze, Xizang and the Assessment of Potential Earthquake Disaster Risks [J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(10): 696-711.

[27] 西藏定日6.8级地震应急产品发布[OL]. https://data.earthquake.cn/gxdt/info/2025/334672994.html,2025.
National Earthquake Data Center. Emergency Product Released for the 6.8-Magnitude Earthquake in Dingri, Xizang[OL]. https://data.earthquake.cn/gxdt/info/2025/334672994.html,2025.

[28] BOATWRIGHT J. The Persistence of Directivity in Small Earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(6): 1850-1861.

[29] BOCK Y, MELGAR D, CROWELL B W. Real-Time Strong-Motion Broadband Displacements from Collocated GPS and Accelerometers[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(6): 2904-2925.

[30] LARSON K M. GPS Seismology[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3): 227-233.

[31] MELGAR D, CROWELL B W, GENG J H, et al. Earthquake Magnitude Calculation Without Saturation from the Scaling of Peak Ground Displacement [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13): 5197-5205.

[32] CROWELL B W, MELGAR D, BOCK Y, et al. Earthquake Magnitude Scaling Using Seismogeodetic Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(23): 6089-6094.

[33] RUHL C J, MELGAR D, GENG J H, et al. A Global Database of Strong-Motion Displacement GNSS Recordings and an Example Application to PGD Scaling[J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(1): 271-279.

(上接第2175页)

ZHANG Jinjiang, DING Lin. East West Extension in Tibetan Plateau and Its Significance to Tectonic Evolution[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2003, 38(2): 179-189.

[41] 张佳伟, 李汉敖, 张会平, 等. 青藏高原新生代南北走向裂谷研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(8): 848-862.
ZHANG Jiawei, LI Han'ao, ZHANG Huiping, et al. Research Progress in Cenozoic N-S Striking Rifts in Tibetan Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(8): 848-862.

[42] 黄星, 高原. 青藏高原及其周缘地区各向异性研究进展[J]. 地震学报, 2014, 36(6): 1141-1151.
HUANG Xing, GAO Yuan. Reviews on the Anisotropy Studies in the Tibetan Plateau and Its Adjacent Areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2014, 36(6): 1141-1151.

[43] 周征宇, 廖宗廷. 印度板块向欧亚板块俯冲碰撞的新模式及其对青藏高原构造演化的影响[J]. 沉积与特提斯地质, 2005, 25(4): 27-32.
ZHOU Zhengyu, LIAO Zongting. The Model for the Subduction and Collision of the Indian Plate with the Eurasian Plate and Its Implications for the Tectonic Evolution of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, 25(4): 27-32.

[44] 宛家宽. 联合重力和面波相速度反演青藏高原地壳上地幔密度结构[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
WAN Jiakuan. A Density Model of the Crust and Upper Mantle in Tibetan Plateau from the joint Inversion of Gravity and Surface Wave Phase Velocity [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[45] 王双杰. 花岗岩部分熔融电导率研究及其对青藏高原地壳高导异常的启示[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2020.
WANG Shuangjie. Study on Partial Melting Conductivity of Granite and Its Enlightenment to Crustal High Conductivity Anomaly in Qinghai-Tibet Plateau [D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting China, 2020.

[46] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(10): 1607-1620.
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active Faults, Earthquake Hazards and Associated Geodynamic Processes in Continental China [J]. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 2013, 43(10): 1607-1620.

[47] CHEN N S, TIAN S F, WANG F W, et al. Multi-wing Butterfly Effects on Catastrophic Rockslides[J]. *Geoscience Frontiers*, 2023, 14(6): 101627.

[48] YIN A, HARRISON T M. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211-280.