

吴柏辰,秦满忠,郭晓,等.基于线性密集台阵的2023年甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震断层低速带研究[J].地震工程学报,2024,46(3):734-741.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240306003

WU Baichen, QIN Manzhong, GUO Xiao, et al. Low-velocity fault zone of the 2023 Jishishan Gansu $M_s6.2$ earthquake based on linear dense array data [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46 (3): 734-741. DOI: 10. 20000/j. 1000-0844. 20240306003

基于线性密集台阵的2023年甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震断层低速带研究

吴柏辰^{1,2}, 秦满忠^{1,2}, 郭晓^{1,2}, 王亚红², 孙点峰², 温淑琳^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 2023年12月18日,甘肃省积石山县发生 $M_s6.2$ 逆冲型地震。该地震发生在祁连活动地块拉脊山北缘断裂带,在断裂两侧曾发生过20余次5级左右中强地震,地震活动频次高,因此研究拉脊山断裂带特征具有重要意义。根据拉脊山断裂走向和此次地震余震分布,在刘集乡布设一条线性密集台阵,利用不同方位的余震事件计算体波的走时延时和放大效应。结果表明,P波和S波分别存在6个采样点(约0.012 s)和15个采样点(约0.03 s)的走时延时,推断出台阵西侧存在一个约150 m宽近似垂直的断层低速带,且该结果与远震P波相似性系数矩阵结果一致。

关键词: 甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震; 走时延时; 体波放大效应; 线性密集台阵; 断层低速带

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)03-0734-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240306003

Low-velocity fault zone of the 2023 Jishishan Gansu $M_s6.2$ earthquake based on linear dense array data

WU Baichen^{1,2}, QIN Manzhong^{1,2}, GUO Xiao^{1,2}, WANG Yahong², SUN Dianfeng², WEN Shulin^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Gansu Lanzhou Geophysics Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: On December 18, 2023, an $M_s6.2$ reverse-type earthquake struck Jishishan County, Gansu Province, along the northern margin of the Lajishan fault zone, Qilian active block. Given that over 20 $M5.0$ earthquakes have occurred on both sides of the Lajishan fault, investigating its characteristics is paramount. Thus, based on the strike of the Lajishan fault and its aftershock distribution, we deployed a linear dense array in Liuji Town. Considering aftershock events in different directions, we determined travel time delays and amplification effects of body waves. The results identified six (approximately 0.012 s) and 15 (approximately 0.03 s) sampling points of travel time delays for the P- and S-waves, respectively. This confirmed the presence of a nearly

收稿日期: 2024-03-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42230305); 甘肃省科技重大专项(21ZD4FA011); 国家重点研发计划课题(2018YFC1503206)

第一作者简介: 吴柏辰(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事密集台阵与断层结构研究。E-mail: 523402038@qq.com。

通信作者: 秦满忠(1981-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事地球内部结构、主动源重复探测技术与应用等方面的研究工作。

E-mail: qinmzh@163.com。

vertical low-velocity zone with a width of approximately 150 m along the west side of the array. The obtained results align with teleseismic P-wave similarity coefficient matrix calculations.

Keywords: Jishishan $M_s6.2$ earthquake in Gansu; travel time delay; amplification effect of body wave; linear dense array; low-velocity zone of the fault

0 引言

地壳断层是在地壳运动过程中普遍形成的一种地质构造现象。地震通常发生在断层带附近,是断层的剧烈运动形式。因此,了解活动断层带及周围的破裂特征在地球物理学研究中有着重要的意义。地震时产生的强烈破裂、角砾岩作用、流体饱和度,以及断层附近孔隙流体压力的升高等因素都有助于断层低速带的形成^[1]。断层带的产生是地震作用的结果,该区域主要由高度破碎的物质、断层角砾岩、黏土和岩石碎屑组成^[2]。这些物质的存在会显著影响地震波的传播路径和速度,为进行详细的断层结构研究奠定了有利条件^[3]。

学术界对断层的研究内容比较广泛,包括断层的地面几何分布、地形变化观测研究及断层带的内部形态结构、地球物理学特征和物性参数等,通常利用重力、电磁测量、走时层析成像和基于地震波形的反演建模等多种地球物理方法研究断裂带的性质^[4]。与其他的地球物理学方法相比,密集地震台阵方法具有价格成本低,布设方便、环保^[5],且检测微震相的能力强、敏感度高^[6]等优势,特别是利用测线的方式布设台站^[7]。该方法已经成为地壳断层结构探测研究中的重要手段,密集台阵可以对近震及远震事件进行高质量观测,可以提高定位精度和区域地震监测能力^[8]。

近年来,许多地震学家基于密集台阵方法研究地球内部不同尺度的速度结构^[9-10],了解断层带的物性信息,主要包括近震或远震事件的体波到时延时方法^[11],近震事件的体波放大效应^[12-13]并反演断层带围陷波^[14-16],利用断层带首波计算断层内外速度差^[17-18],以及利用背景噪声计算放大效应^[19]。在断层带可以产生更长周期、更大振幅的体波和尾波时,低速带与高速围岩的区域将会产生更明显的波形放大效应^[20]。利用体波在低速介质中产生的放大效应可以有效地研究断层带结构,特别是在确定断层带宽度方面具有明显的优势。Li Y G 等^[21]利用体波在低速介质下的放大效应特征有效约束了美国加州 Landers 断层宽度约 200 m;在昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震断层区,Li S L 等^[22]利用体波在低速介质下的放大效应特征有效约束了 300 m 宽的断层

区域。野外科考发现,甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震并没有产生明显的地表破裂,但在不同区域观察到了较明显的同震地表现象(地裂缝)^[23]。项目组根据拉脊山断裂带走向、余震分布及地震科考同震地表现象等信息,结合野外实地勘察,在刘集乡布设了一条线性密集地震台阵。本研究将基于布设的线性密集台阵观测到的近震事件及远震事件,计算体波震相的走时延时及放大效应,并结合远震 P 波相似性系数矩阵,推断断层低速带的具体位置及宽度。

1 构造概况及台阵布设

甘肃积石山地震发生在青藏高原东北缘柴达木—祁连地块拉脊山断裂带南段附近^[24]。拉脊山断裂带由拉脊山北缘断裂和拉脊山南缘断裂两条向 NE 方向凸出的弧形逆冲构造带构成^[25],运动性质以挤压逆冲为主,兼左旋走滑,是调节 NNW 向热水—日月山右旋走滑断裂带与 NWW 向西秦岭北缘左旋走滑断裂带之间的构造转换带。晚第四纪以来该断裂带有新活动,不断向盆地内部挤压逆冲产生局部应力积累,使得该断裂未来存在发生中强地震的构造条件。

甘肃积石山发生 $M_s6.2$ 地震后,许多地震专家的科考结果表明,该地震没有明显的地表破裂。本文根据拉脊山断裂带走向、余震分布及地震科考同震地表现象等信息,结合野外实地勘察^[26],在刘集乡布设了一条线性密集台阵。该台阵位于拉脊山北缘断裂与拉脊山南缘断裂之间[图 1(a)]。各台站相对位置及其高程见图 2。

2 数据采集与处理

布设的线性密集台阵包括 26 个便携式一体化地震仪,总长度约 700 m[图 1(b)],采样率为 500 Hz。观测时间从 2023 年 12 月 28 日开始,至 2024 年 1 月 18 日结束。地震仪记录了地表速度,并观测到 0.1~100 Hz 相对平缓的波形信号(图 3)。

台阵在布设期间记录到了大量的近震与远震事件[图 1(a)]。其中,近震序列整体呈 NW 向展布,大部分近震集中在主震西侧,并且集中分布在拉脊山北缘断裂和拉脊山南缘断裂之间。在深度方向

上,根据左可桢等^[27]定位结果,近震主要集中在5~15 km,且绝大部分事件震源深度比主震浅,精定位结果揭示了主震的破裂特征。近震在频谱图中表现为频率在0.4~20 Hz间,表明其有更高的能量。与近震事件的波形相比,远震产生的地震波则具有更持久的低频能量,通常低于2 Hz(图3)。这种能量

和频率的差异可以用来研究特定区域的速度变化。考虑到本研究所使用仪器的固有频率为0.2 Hz,本文将远震数据引入分析过程,旨在补充和验证已收集的近震数据,从而提供更加全面和准确的地震活动信息,使得本次研究的地震资料既有高频数据(近震),也有低频数据(远震)。

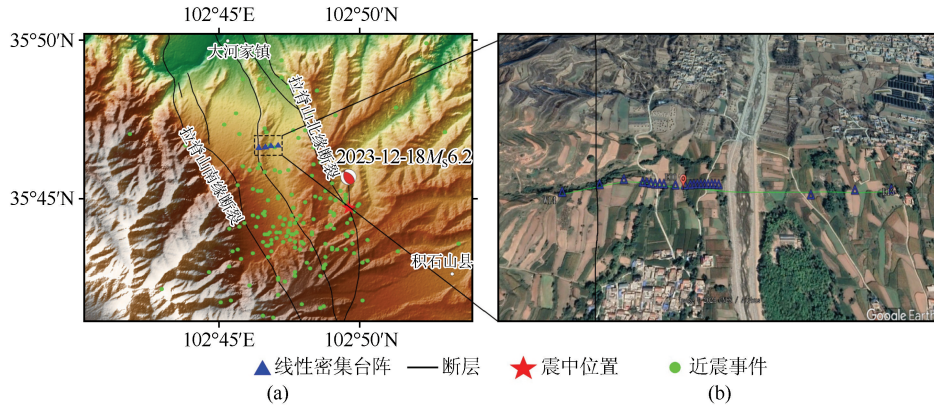


图1 线性密集台阵位置及观测到的近震事件分布图

Fig.1 Location of linear dense array and distribution of local events

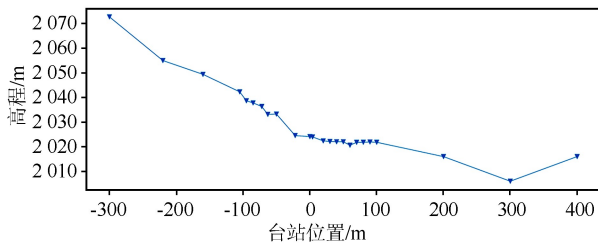


图2 各台站相对位置及其高程

Fig.2 Relative position and elevation of each station

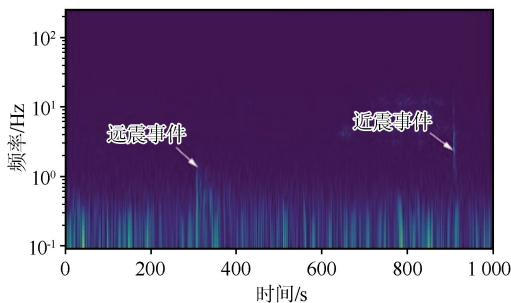


图3 1454台所观测地面垂直分量的1000 s功率谱密度图

Fig.3 1000-s power spectral density map of the vertical component recorded by NO. 1454 station

根据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)地震目录,本文共选取了震中距大于 15° , $M > 5$,且信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)大于3的9个远震事件进行远震P波相似性系数矩阵计算(表1)。

表1 所选远震事件地震目录

Table 1 Catalog of selected teleseismic events

NO.	发震时刻(UTC)	纬度 /($^\circ$)	经度 /($^\circ$)	深度 /km	震级
1	2024-01-06 T11:46:32	3.11	65.48	10	5.6
2	2024-01-08 T20:48:42	4.86	126.18	68	6.7
3	2024-01-09 T02:54:57	-14.05	167.27	203	5.2
4	2024-01-09 T04:45:06	0.08	96.58	10	5.1
5	2024-01-09 T08:59:10	37.87	137.76	10	5.9
6	2024-01-11 T09:20:26	36.50	70.60	206	6.4
7	2024-01-12 T07:46:21	56.38	-135.80	20	5.9
8	2024-01-15 T12:52:26	54.81	109.65	10	5.4
9	2024-01-17 T12:32:02	8.54	126.50	51	5.6

本文利用中国地震局地震台网目录,使用ObsPy软件包^[28]中的ar_pick函数进行体波(P波、S波)到时检测,然后针对所有台站波形人工核对数据质量。共观测到165个余震事件,并人工筛选出100个高信噪比的地震事件进行近震事件体波延时分析、放大效应等研究。

在利用近震确定断层位置时,不仅可以利用近震体波放大效应的观测数据,还可以结合近震与远震的体波走时延时分析法,从而有效地确定断层的位置^[29]。本文参考Yang等^[30]数据处理流程,并根据实际观测数据做相关改进:(1)远震事件使用0.2~2 Hz带通滤波进行计算,并对数据进行去均、灭尖处理;近震事件使用1~10 Hz带通滤波进行处理,并对数据进行去均、灭尖处理。(2)考虑到地形和高程对P波到时的影响,使用地表速度

2.7 km/s 对台站高程进行校正^[31],从而消除地表高程对 P 波到时的影响。(3) 在 2 s 长的窗口范围内拾取精确的近震事件 P 波到时,从而尽可能避免在拾取 P 波到时的过程中产生误差;对于远震事件,本文对每个远震事件根据 P 波到时截取了 10 s 的观测波形,并计算波形间的相关系数,以评估断裂带两侧的波形相似性。

在近震事件中观测到了部分台站记录的体波走时延时,这与体波信号穿过断层低速带有关。经过低速带的体波有长周期和大振幅的特征,特别是体波的尾波会产生放大效应,该特征为寻找断层低速带提供了理论依据^[32-33]。

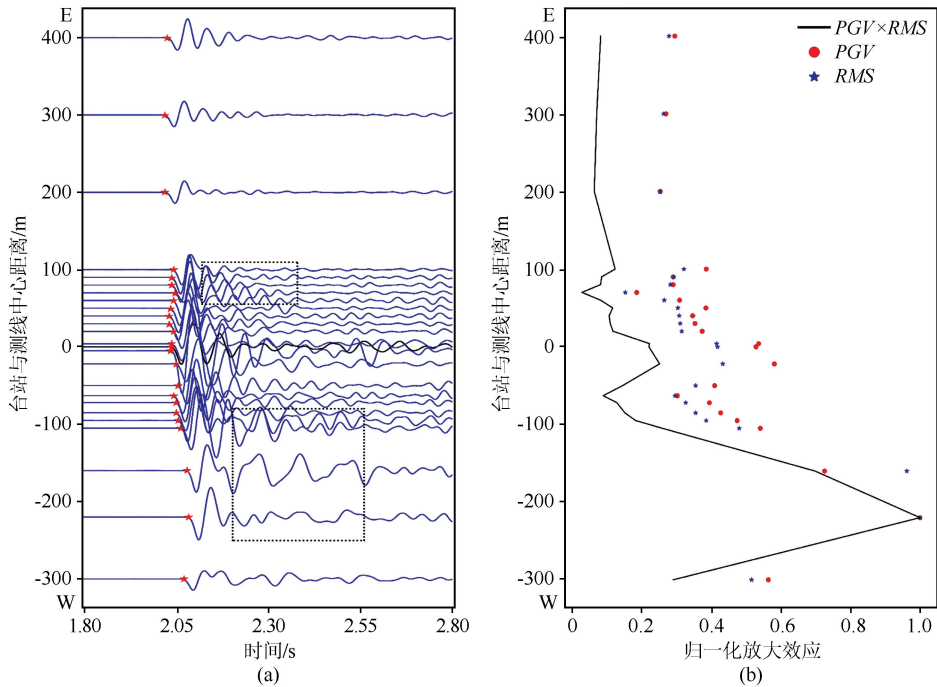


图 4 近震事件观测波形及放大效应

Fig.4 Observation waveform and amplification effect of local events

没有一致性对应特征,说明延时现象与台阵下方区域介质速度较低有关。

3 方法与分析

3.1 远震相关系数矩阵计算

远震 P 波在穿过断层低速带时,位于低速带附近的台站观测到的波形具有一定相似性。基于 Zhang 等^[34]的远震相关系数矩阵计算方法,选取了表 1 中 9 个分布在不同方位的远震事件,运用窗长为 2 s 的 P 波计算各台站之间的波形相似性,并构建了相似性矩阵(图 5),其中每个颜色块代表台站之间同一远震事件波形的最大相关系数值,颜色块大小与台站间距成正比。在相似性矩阵中,对角线代

本文以观测到的一个质量较好的近震事件为例(图 4),即密集台阵于 2023 年 12 月 29 日 15:35:13 (UTC) 观测到的震级为 $M 1.1$ 的近震事件,并对各台站观测波形做了 1~10 Hz 带通滤波处理,图中红星代表自动拾取的 P 波到时;分别对各台站观测到的波形做归一化处理,并计算其地表峰值速度(Peak Ground Velocity, PGV)和均方根值(Root Mean Square, RMS),黑色曲线为 PGV 与 RMS 的乘积[图 4(b)]。该曲线代表地表介质对地震波的放大效应,本文在密集台阵西侧 100~250 m 的区域观测到了明显的放大效应。同时,在该区域也发现了明显的 P 波走时延时,而走时延时与地表高程并

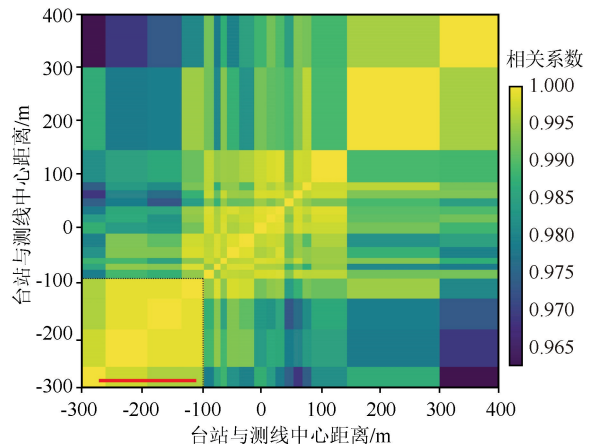


图 5 远震 P 波相关性系数矩阵

Fig.5 Correlation coefficient matrix of teleseismic P-wave

表每个台站自相关的结果(值均为 1);在非对角线处通常相关性系数会随着台站间距的增加而减少。然而在图 5 的左下角存在相关性系数高值区域,说明该区域内观测到的 P 波具有高相似性,这与布置的线性密集台阵下方存在断层带有关,由于断层带中存在的破碎物质使得穿过断层的波形相似度变高。

3.2 近震延时分析

台阵观测到的直达 P 波具有较高的频率,主频

率大于 7 Hz (图 3)。通过分析近震事件直达 P 波到达每个台站的时间,可以获得更高分辨率的局部断裂带结构信息。本研究选取了近震事件目录中高信噪比($SNR > 10$)的垂直分量波形计算到时延时。

本文在 2023 年 12 月 29 日 8:46:39 发生在台阵东侧的近震事件波形中观测到了明显的体波放大效应及走时延时,并对应了具有低速特征的断层带(图 6 中红色线段)。

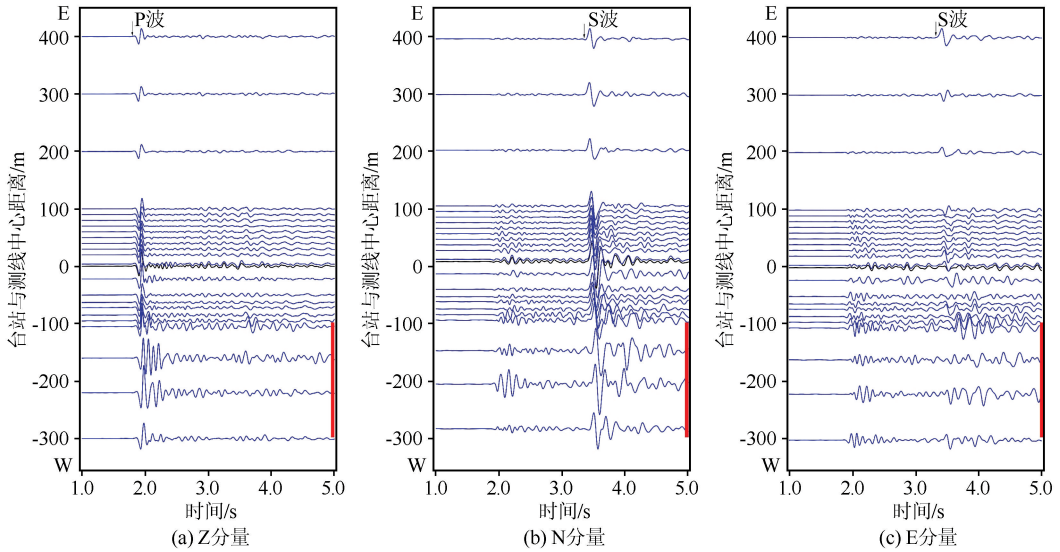


图 6 近震事件三分量原始观测波形(2023-12-29T8:46:39)

Fig.6 Three-component raw waveforms of local events (2023-12-29T8:46:39)

基于参考台计算了每个近震事件 P 波、S 波与各台站间走时延时曲线,并计算了每个台站 100 个近震事件的走时延迟平均值(图 7)。使用地表速度 2.7 km/s 对台站高程进行校正,选取从到时开始窗长为 0.1 s 的 P 波及窗长为 0.2 s 的 S 波波形,利用互相关法计算每个事件台站间的 P 波与 S 波走时延时,误差条表示 100 个近震事件走时延时曲线的

两个标准差。结果显示,在台阵西侧存在明显的走时延时特征,P 波最大平均延时约 6 个采样点(0.012 s),S 波最大平均延时约 15 个采样点(0.03 s),其对应的断层低速带宽度约 150 m(图 7 中红色线段),与 P 波在断层低速带的延时相比,S 波具有更为明显的高延时特征,反映出 S 波在计算到时延时的过程中比 P 波更敏感。

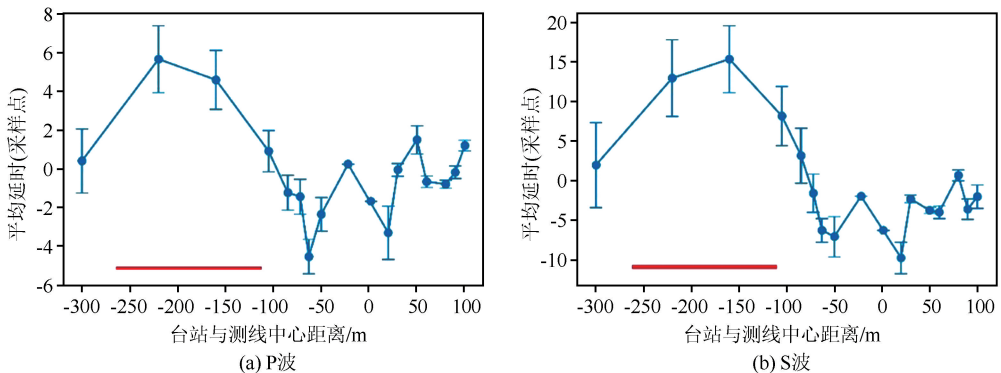


图 7 近震事件 P 波、S 波到时延时分析

Fig.7 Analysis of travel time delays of P-and S-waves for local events

3.3 放大效应分析

由于地震波的几何扩散与高衰减特性,在台阵低速区观测到远震波形的信噪比相对较低^[35]。本研究用于体波放大效应分析的近震事件均在距离台阵 30 km 的范围内,且有较高信噪比,计算出不同方位近震事件窗长为 2 s 的 S 波放大效应。图 8 显示了 PGV 和 RMS 的乘积值归一化曲线,该曲线可以表示台阵下方介质对近震事件 S 波的放大效应。

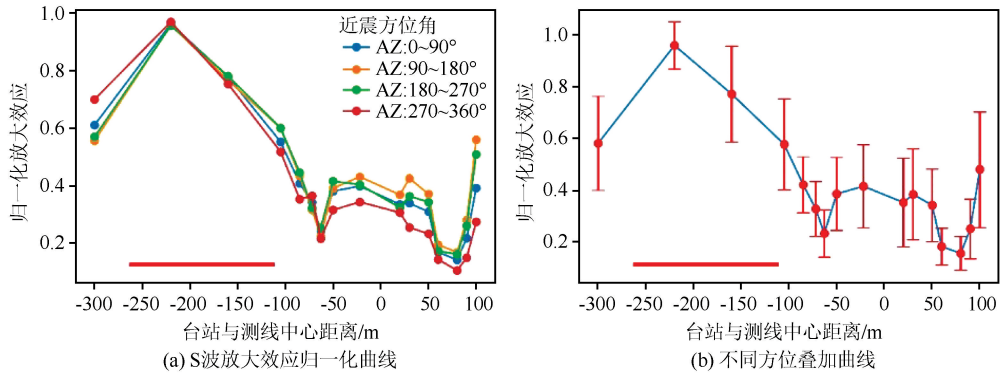


图 8 不同方位近震事件 S 波放大效应归一化曲线

Fig.8 Normalized curves of S-wave amplification effect of local events in different directions

4 结论

甘肃积石山地震是近年来发生在青藏高原东北缘的又一次中强地震,研究该地震的发震断层对于了解此次地震孕震机理及青藏高原东北缘地震风险评估都具有重要意义。发震断层引起的岩石孔隙、压力场和地震波速度的变化会导致线性密集台阵记录到的波形间产生差异,从而为研究断层低速带位置及宽度奠定理论基础。许多地震学家通过布设密集台阵,基于走时延时、放大效应等方法开展了小尺度断层精细结构方面的研究,并取得了丰硕成果。本文根据拉脊山断裂走向、地表裂缝及余震分布在刘集乡布设了一条线性密集台阵,通过台阵观测到的近震体波走时延时分析、放大效应,以及远震 P 波相关系数矩阵,在台阵西侧观测到了一个宽度约 150 m 的断层低速带,其位于拉脊山北缘断裂与拉脊山南缘断裂之间的中部区域,并存在 P 波平均走时延时约 6 个采样点(约为 0.012 s),S 波平均走时延时约 15 个采样点(约为 0.03 s)。通过放大效应计算得到的断层低速带宽度与近震事件体波延时曲线和远震相关系数矩阵结果一致,宽度约 150 m。

致谢:本研究中的断层分布数据由兰州大学袁道阳教授提供,在此特别表示感谢。

由于该方法对地壳低速断层带更敏感,可以代表不同台站覆盖区域出现断层低速带的概率。本文将所选取的近震事件根据不同方位进行了划分[图 8(a)],且计算得到的结果一致性较高,表明该台阵下方的低速介质的方向差异性较小,这与断层低速带近似垂直分布有关。得到的断层低速带宽度与近震事件 P 波延时曲线、远震相关系数矩阵结果一致,宽度约 150 m。

参考文献(References)

- [1] MOONEY W D,GINZBURG A.Seismic measurements of the internal properties of fault zones[J].Pure and Applied Geophysics,1986,124(1):141-157.
- [2] EVANS J P,CHESTER F M.Fluid-rock interaction in faults of the San Andreas system:inferences from San Gabriel fault rock geochemistry and microstructures[J].Journal of Geophysical Research:Solid Earth,1995,100(B7):13007-13020.
- [3] BEN-ZION Y,SAMMIS C G.Characterization of fault zones [J].Pure and Applied Geophysics,2003,160(3):677-715.
- [4] 赵莉,刘白云,范兵,等.2022 年 1 月 8 日青海门源 $M 6.9$ 地震余震精确定位与断层面拟合[J].地震工程学报,2023,45(6):1457-1466.
ZHAO Li,LIU Baiyun,FAN Bing,et al.Relocation and fault plane fitting of the Menyuan $M 6.9$ earthquake on January 8, 2022[J].China Earthquake Engineering Journal,2023,45(6):1457-1466.
- [5] 潘啟安,沈旭章.基于短周期密集地震台阵观测的空间自相关法及其在粤港澳大湾区的应用[J].地震学报,2023,45(2):246-257.
PAN Qi'an,SHEN Xuzhang.Spatial autocorrelation method based on dense short-period seismic array and its application in the Guangdong—Hong Kong—Macao Greater Bay[J].Acta Seismologica Sinica,2023,45(2):246-257.
- [6] 周玲.新疆和田小孔径台阵监测能力分析[J].地震工程学报,2017,39(增刊 1):113-116.
ZHOU Ling.Analysis of monitoring ability of Hetian small-

- aperture seismic array[J].China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(Suppl01): 113-116.
- [7] 王顺, 廖武林, 姚运生, 等. 测线方位对微动线形阵列探测效果影响研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(2): 483-490.
WANG Shun, LIAO Wulin, YAO Yunsheng, et al. Influence of line orientation on the detection effect of a microtremor linear array[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 483-490.
- [8] 徐顺强, 刘巧霞, 李怡青, 等. 密集台网微震定位技术在矿山开采动态监测中的应用研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(1): 266-270.
XU Shunqiang, LIU Qiaoxia, LI Yiqing, et al. Application of the dense network micro-seismic location method to dynamic mining monitoring [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 266-270.
- [9] 靳炎锡, 秦满忠, 李少华. 利用前驱波研究地幔间断面的若干进展[J]. 地震工程学报, 2023, 45(1): 209-219, 243.
JIN Yanxi, QIN Manzhong, LI Shaohua. Some progress in the study of mantle discontinuities using precursor waves[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(1): 209-219, 243.
- [10] 李敏娟, 沈旭章, 张元生, 等. 基于密集台阵的青藏高原东北缘地壳精细结构及九寨沟地震震源区结构特征分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 2075-2087.
LI Minjuan, SHEN Xuzhang, ZHANG Yuansheng, et al. Fine crustal structures of northeast margin of the Tibetan Plateau and structural features of Jiuzhaigou earthquake focal area constrained by the data from a high-density seismic array[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 2075-2087.
- [11] QIU H R, BEN-ZION Y, CATCHINGS R, et al. Seismic imaging of the M_w 7.1 Ridgecrest earthquake rupture zone from data recorded by dense linear arrays[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 2021, 126(7): e2021JB022043.
- [12] QIN L, BEN-ZION Y, QIU H, et al. Internal structure of the San Jacinto fault zone in the trifurcation area southeast of Anza, California, from data of dense seismic arrays[J]. Geophysical Journal International, 2018, 213(1): 98-114.
- [13] MCGUIRE J, BEN-ZION Y. High-resolution imaging of the Bear Valley section of the San Andreas fault at seismogenic depths with fault-zone head waves and relocated seismicity [J]. Geophysical Journal International, 2005, 163(1): 152-164.
- [14] HILLERS G, CAMPILLO M, BEN-ZION Y, et al. Seismic fault zone trapped noise[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119(7): 5786-5799.
- [15] COCHRAN E S, LI Y G, SHEARER P M, et al. Seismic and geodetic evidence for extensive, long-lived fault damage zones [J]. Geology, 2009, 37(4): 315-318.
- [16] LEWIS M A, PENG Z, BEN-ZION Y, et al. Shallow seismic trapping structure in the San Jacinto fault zone near Anza, California [J]. Geophysical Journal International, 2005, 162(3): 867-881.
- [17] YANG W, PENG Z G, WANG B S, et al. Velocity contrast along the rupture zone of the 2010 M_w 6.9 Yushu, China, earthquake from fault zone head waves[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 416: 91-97.
- [18] LEWIS M A, BEN-ZION Y, MCGUIRE J J. Imaging the deep structure of the San Andreas fault south of Hollister with joint analysis of fault zone head and direct P arrivals[J]. Geophysical Journal International, 2007, 169(3): 1028-1042.
- [19] 余大新, 耿冠世. 利用背景噪声估计华北地区场地放大效应 [J]. 地震工程学报, 2017, 39(4): 719-724.
YU Daxin, GENG Guanshi. Estimation of site amplification effect in North China from ambient seismic noise [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 719-724.
- [20] KURZON I, VERNON F L, BEN-ZION Y, et al. Ground motion prediction equations in the San Jacinto fault zone: significant effects of rupture directivity and fault zone amplification [J]. Pure and Applied Geophysics, 2014, 171(11): 3045-3081.
- [21] LI Y G, AKI K, ADAMS D, et al. Seismic guided waves trapped in the fault zone of the Landers, California, earthquake of 1992 [J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 1994, 99(B6): 11705-11722.
- [22] LI S L, LAI X L, YAO Z X, et al. Fault zone structures of northern and southern portions of the main central fault generated by the 2008 Wenchuan earthquake using fault zone trapped waves[J]. Earthquake Science, 2009, 22(4): 417-424.
- [23] 杨传成, 李智敏, 熊仁伟, 等. 2023年甘肃积石山6.2级地震青海灾区地震地质灾害初步调查分析[J]. 地震, 2024, 44(1): 216-225.
YANG Chuancheng, LI Zhimin, XIONG Renwei, et al. Preliminary investigation and analysis of seismic geological hazards in Qinghai disaster area induced by the 2023 M_s 6.2 Jishishan earthquake [J]. Earthquake, 2024, 44(1): 216-225.
- [24] 杨攀新, 熊仁伟, 胡朝忠, 等. 2023年甘肃积石山6.2级地震震害构造浅析[J]. 地震, 2024, 44(1): 153-159.
YANG Panxin, XIONG Renwei, HU Chaozhong, et al. Seismogenic structure of the 2023 $M_6.2$ Jishishan earthquake in Gansu Province [J]. Earthquake, 2024, 44(1): 153-159.
- [25] 李智敏, 李延京, 田勤俭, 等. 拉脊山断裂古地震与喇家遗址灾变事件关系研究[J]. 地震研究, 2014, 37(增刊1): 109-115.
LI Zhimin, LI Yanjing, TIAN Qinjian, et al. Study on the relationship between paleoseismic on Laji Mountain fault and catastrophic event on Lajiashan site [J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(Suppl01): 109-115.
- [26] 王辽, 谢虹, 蒲小武, 等. 2023年积石山地震诱发中川乡滑坡-泥石流滑动过程与成因机理研究[J/OL]. 地震工程学报, 2024 [2024-03-06]. <https://doi.org/10.2000/j.1000-0844.20240113003>.
WANG Liao, XIE Hong, PU Xiaowu, et al. Sliding process and causative mechanism of the Zhongchuan landslide-mudflow disaster chain induced by the 2023 Jishishan earthquake [J/

- OL]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2024 [2024-03-06]. <https://doi.org/10.2000/j.1000-0844.20240113003>.
- [27] 左可桢,赵翠萍.2023 年甘肃积石山 6.2 级地震序列精定位 [J].*地震*,2024,44(1):204-208.
ZUO Kezhen,ZHAO Cuiping.Relocation of the 2023 $M_s6.2$ Jishishan earthquake sequence in Gansu Province [J]. *Earthquake*,2024,44(1):204-208.
- [28] BEYREUTHER M, BARSCH R, KRISCHER L, et al. ObsPy: a Python toolbox for seismology [J]. *Seismological Research Letters*,2010,81(3):530-533.
- [29] SHARE P E, BEN-ZION Y, ROSS Z E, et al. Internal structure of the San Jacinto fault zone at Blackburn Saddle from seismic data of a linear array [J]. *Geophysical Journal International*,2017,210(2):819-832.
- [30] YANG H F, LI Z F, PENG Z G, et al. Low-velocity zones along the San Jacinto fault, southern California, from body waves recorded in dense linear arrays [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*,2014,119(12):8976-8990.
- [31] 张勇,徐晨雨.2023/12/18 积石山 $M_w6.0$ 地震初步破裂模型 [R].北京:北京大学地球物理学系张勇研究组,2023.
ZHANG Yong,XU Chenyu.Preliminary rupture model of the Jishishan $M_w6.0$ earthquake on 2023/12/18 [R]. Beijing: Zhang Yong Research Group, Department of Geophysics, Peking University, 2023.
- [32] JIANG X H, HU S Q, YANG H F. Depth extent and v_p/v_s ratio of the Chenghai fault zone, Yunnan, China constrained from dense-array-based teleseismic receiver functions [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*,2021,126(8): e2021JB022190.
- [33] SONG J H, YANG H F. Seismic site response inferred from records at a dense linear array across the Chenghai fault zone, Binchuan, Yunnan [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*,2022,127(1): e2021JB022710.
- [34] ZHANG Z, DENG Y F, QIU H R, et al. High-resolution imaging of fault zone structure along the creeping section of the Haiyuan fault, NE Tibet, from data recorded by dense seismic arrays [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2022,127(9): e2022JB024468.
- [35] PENG Z G, BEN-ZION Y, MICHAEL A J, et al. Quantitative analysis of seismic fault zone waves in the rupture zone of the 1992 Landers, California, earthquake: evidence for a shallow trapping structure [J]. *Geophysical Journal International*, 2003,155(3):1021-1041.

(本文编辑:张向红)