



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

2023年云南芒市 M_S 5.0地震震源深度测定及其发震机理探讨

顾慧冬 姜金钟 李姣 常玉巧 杨跃文 王光明 张帅 姚远

Focal depth determination of the M_S 5.0 earthquake in Mangshi, Yunnan, 2023, and discussion on its seismogenic mechanism

Gu Huidong, Jiang Jinzhong, Li Jiao, Chang Yuqiao, Yang Yuewen, Wang Guangming, Zhang Shuai, Yao Yuan

引用本文:

顾慧冬, 姜金钟, 李姣, 常玉巧, 杨跃文, 王光明, 张帅, 姚远. 2025. 2023年云南芒市 M_S 5.0地震震源深度测定及其发震机理探讨. *地震学报*[J], 47(5): 611–631. DOI: 10.11939/jass.20240026

Gu H D, Jiang J Z, Li J, Chang Y Q, Yang Y W, Wang G M, Zhang S, Yao Y. 2025. Focal depth determination of the M_S 5.0 earthquake in Mangshi, Yunnan, 2023, and discussion on its seismogenic mechanism. *Acta Seismologica Sinica*[J], 47(5): 611–631. DOI: 10.11939/jass.20240026

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20240026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单台sPL震相测定珊溪水库地震震源深度

Focal depth determination of Shanxi reservoir earthquakes from sPL phase with single station
地震学报. 2019, 41(6): 735–742 <https://doi.org/10.11939/jass.20190110>

利用初至P震相测定石嘴山 M_L 4.4地震序列的震源深度

Calculation of focal depths of Shizuishan M_L 4.4 earthquake sequence by using the first arrival P phases
地震学报. 2017, 39(1): 13–22 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.01.002>

2019年黄海 M_L 4.6地震序列的震源机制和发震构造

Focal mechanism and seismogenic structure of the 2019 Yellow Sea M_L 4.6 earthquake sequence
地震学报. 2020, 42(5): 543–551 <https://doi.org/10.11939/jass.20190194>

2013年三台 M_S 4.7地震震源机制及发震构造研究

Study on earthquake focal mechanism and seismogenic structure of the Santai M_S 4.7 earthquake in 2013
地震学报. 2021, 43(6): 716–729 <https://doi.org/10.11939/jass.20200201>

2019年6月17日四川长宁地震重定位及震源机制研究

Relocation and focal mechanism inversion for the Changning, Sichuan, earthquake on 7 June 2019
地震学报. 2020, 42(3): 245–255 <https://doi.org/10.11939/jass.20190132>

几种常用地方震相对天然地震震源深度测定的误差解析分析及数值对比

Natural hypocentral depth error calculated from some conventional local seismic phases by analytic method and numerical simulation
地震学报. 2018, 40(2): 143–159 <https://doi.org/10.11939/jass.20170106>

顾慧冬, 姜金钟, 李姣, 常玉巧, 杨跃文, 王光明, 张帅, 姚远. 2025. 2023 年云南芒市 $M_s5.0$ 地震震源深度测定及其发震机理探讨. 地震学报, 47(5): 611–631. doi: 10.11939/jass.20240026.
Gu H D, Jiang J Z, Li J, Chang Y Q, Yang Y W, Wang G M, Zhang S, Yao Y. 2025. Focal depth determination of the $M_s5.0$ earthquake in Mangshi, Yunnan, 2023, and discussion on its seismogenic mechanism. Acta Seismologica Sinica, 47(5): 611–631. doi: 10.11939/jass.20240026.

2023 年云南芒市 $M_s5.0$ 地震震源深度测定及其发震机理探讨*

顾慧冬^{1,2)} 姜金钟^{1,2,3),*} 李 姣¹⁾ 常玉巧^{1,3)}
杨跃文¹⁾ 王光明^{1,3)} 张 帅^{1,3)} 姚 远^{1,3)}

- 1) 中国昆明 650224 云南省地震局
2) 中国昆明 650504 云南大学地球科学学院
3) 中国昆明 650224 中国地震局昆明地震预报研究所

摘要 基于云南地震台网近震波形资料和两种区域速度模型, 利用 CAP 方法反演了 2023 年 12 月 2 日云南省芒市地震序列中 $M_s5.0$ 主震和 4 次 $M_L \geq 3.5$ 余震的震源机制解和震源深度, 然后采用 sPL 深度震相进一步测定了震源深度, 最后综合震源深度、地震烈度和地震重定位等结果探讨了此次芒市地震的发震机理. 结果表明: 芒市 $M_s5.0$ 主震为走滑型地震兼具正断分量, 最佳双力偶机制解节面 I 为走向 89° , 倾角 78° , 滑动角 -20° , 节面 II 为走向 183° , 倾角 70° , 滑动角 -167° ; 4 次 $M_L \geq 3.5$ 余震为走滑兼逆冲型或逆冲型地震, 其最佳双力偶机制解均存在 NE 走向节面, 该节面的走向、倾角、滑动角平均值约为 247° , 65° , 26° , 与芒市地震序列震中分布走向和地震烈度长轴走向比较一致; $M_s5.0$ 主震与 4 次 $M_L \geq 3.5$ 余震的震源深度均在 5–7 km 范围内, 说明震区内地震主要发生在上地壳浅部. 鉴于此次主震发生在水库库区且地震时库区处于高水位、震源分布较浅且主余震震源机制解明显不一致, 本研究初步推测库区流体作用可能促进了此次地震的发生, 且主震破裂引起局部应力调整所导致的邻近断层滑动使得本次地震序列余震的优势分布方向沿 NE 向展布.

关键词 芒市地震序列 震源深度 震源机制解 sPL 深度震相 发震机理
doi: 10.11939/jass.20240026 中图分类号: P315.3⁺3 文献标识码: A

Focal depth determination of the $M_s5.0$ earthquake in Mangshi, Yunnan, 2023, and discussion on its seismogenic mechanism

* 基金项目 云南省地震局科技专项(2021ZX04, 2023ZX03)、“云南地震重点危险区密集台阵观测系统建设”项目和云南省地震局“地震机理与孕震环境研究”创新团队项目共同资助.
收稿日期 2024-02-25 收到初稿, 2024-06-10 决定采用修改稿.
作者简介 顾慧冬, 硕士, 工程师, 主要从事震源机制解和破裂方向性方面的研究, e-mail: guhuidong@stu.ynu.edu.cn; *通信作者: 姜金钟, 博士, 副研究员, 主要从事地震学方面的研究, e-mail: jiangjz@seis.ac.cn



Gu Huidong^{1,2)} Jiang Jinzhong^{1,2,3), †} Li Jiao¹⁾ Chang Yuqiao^{1,3)}
 Yang Yuewen¹⁾ Wang Guangming^{1,3)} Zhang Shuai^{1,3)} Yao Yuan^{1,3)}

1) Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

2) School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650504, China

3) Kunming Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Kunming 650224, China

Abstract: Focal depth is an important parameter for the study of regional seismicity and seismic hazard. Accurate focal depths can provide valuable references for seismic hazard assessment and seismogenic mechanism research. However, it is a challenge to determine an accurate focal depth for earthquakes that occur in regions with sparse seismic networks. Traditional methods relying on seismic wave (*e.g.* the P and S phases) arrival times are severely limited by network density, resulting in low measurement accuracy. Nonetheless, utilizing information such as seismic wave amplitudes, spectra, and depth phases, even in sparse seismic networks, can facilitate the accurate determination of focal depths.

In recent years, the sPL depth phase method has been widely utilized for determining the focal depths of local small and moderate earthquakes. The travel time of the sPL depth phase is primarily related to the focal depth and almost independent of the epicentral distance. Therefore, utilizing the sPL depth phase method not only avoids the compromise between the origin time and focal depth of earthquakes, but also effectively reduces measurement errors induced by velocity models. Moreover, the CAP (cut-and-paste) method is a full waveform inversion method with significant advantages in determining focal depths for moderate earthquakes.

On 2 December, 2023, at 01:36:33 Beijing time, an earthquake with $M_S 5.0$ (local magnitude is $M_L 5.3$) occurred in Mangshi, Yunnan Province, followed by four $M_L \geq 3.5$ aftershocks. Different institutions have reported significant disparities in the determined focal depth of the Mangshi $M_S 5.0$ mainshock. Hence, it is necessary to reassess the focal depth of the $M_S 5.0$ mainshock by using more regional seismic waveforms and different methods. Based on the broadband waveform data from the Yunnan Seismic Network and two regional velocity models, this study employed the CAP method to invert the focal mechanisms and focal depths of the mainshock ($M_S 5.0$) and four aftershocks ($M_L \geq 3.5$) in the Mangshi earthquake sequence. Additionally, we employed the sPL depth phase to further determine the focal depths. Our research results indicate that: the Mangshi $M_S 5.0$ mainshock is characterized by a strike-slip fault with a significant normal fault component. The optimal double-couple focal mechanism solution of the mainshock is as follows: strike 89° , dip 78° , rake -20° for fault plane I; strike 183° , dip 70° , rake -167° for fault plane II. The four $M_L \geq 3.5$ aftershocks exhibit strike-slip with thrust or pure thrust mechanisms, the optimal double-couple focal mechanism solutions for these aftershocks all feature fault planes trending northeast (NE), and the strike, dip, and rake of the average plane for the four $M_L \geq 3.5$ aftershocks are approximately 247° , 65° , 26° , respectively. This orientation of the average plane is consistent with the distribution of the double-difference relocated aftershocks and the orientation of the major axis of seismic intensity for the Mangshi earthquake sequence. Furthermore the focal mechanisms of both the mainshock and the four aftershocks of $M_L \geq 3.5$ have complex orientations of the P and T axes, indicating the presence of a complex stress regime within the source region. It is plausible to speculate that the rupture of the $M_S 5.0$ mainshock may have triggered nearby faults (with different fault planes) due to regional stress adjustments, resulting in significant differences in the focal mechanism types between the $M_S 5.0$ mainshock and the subsequent four $M_L \geq 3.5$ aftershocks.

Additionally, by using the CAP method, the optimal focal depth of the $M_S5.0$ mainshock in Mangshi is determined to be 7 km, while the focal depths of the four $M_L \geq 3.5$ aftershocks range from 5 to 7 km. On the other hand, the focal depth of the $M_S5.0$ mainshock in Mangshi is estimated to be 7 km, and the focal depths of the four aftershocks are all approximately 5 km by utilizing the sPL depth phase method. The consistency between the focal depths determined by both two methods (with a difference of less than 2 km) indicates that the Mangshi earthquake sequence mainly occurred in the shallow part of the upper crust.

Considering that the epicenter of the Mangshi earthquake is located within the Longjiang Reservoir area, we statistically analyze the relationship between the $M_L \geq 1.0$ seismic events and water level changes in the Longjiang Reservoir area from 2010 to 2024 to depict the characteristics of seismic activities in the reservoir area after the reservoir impoundment. Our study results indicate that seismic events with $M_L \geq 3.0$ in the Longjiang Reservoir area are closely related to reservoir water levels, except for one $M_L3.1$ earthquake, which occurred during a period of low annual water level on June 8, 2013, all other $M_L \geq 3.0$ earthquakes in the reservoir area occurred during periods of high annual water levels. Among them, the largest earthquake, with a magnitude of $M_L4.2$, occurred on September 24, 2011, during a period of high water levels after the impoundment of the Longjiang Reservoir.

The seismic activities in the Longjiang Reservoir area can be divided into four stages: the first stage is from January 2010 to February 2016, during which seismic activities of $M_L \geq 1.0$ earthquakes were relatively calm (monthly frequency less than 10 times), with a calm period of about six years; the second stage is from March 2016 to December 2017, during which the water level of the reservoir changed drastically, and the seismic activities were relatively active, with monthly frequencies of $M_L \geq 1.0$ seismic activity ranging from a dozen to several dozen times; the third stage is from January 2018 to September 2023, during which the seismicity with magnitude above $M_L1.0$ was relatively calm (monthly frequency less than 10 times) over a period of almost six years; the fourth stage is from October 2023 to December 2023, during which the reservoir was at a high water level and its water level changed drastically followed the Mangshi $M_S5.0$ earthquake on December 2, suggesting that there may be a certain correlation between the water level changes in the Longjiang Reservoir and the occurrence of this $M_S5.0$ earthquake.

Given that this earthquake occurred within the Longjiang Reservoir area, as well as factors such as high water levels, shallow hypocentral distribution, and conspicuous discrepancies in the focal mechanism solutions of the mainshock and aftershocks, this study tentatively hypothesizes that the infiltration of fluids into pre-existing fault fractures with potential for generating moderate to strong earthquakes within the reservoir area may have facilitated the occurrence of this $M_S5.0$ mainshock. Additionally, the rupture of the mainshock was likely to induce adjustments of the local stress field, triggering slip along nearby NE-trending faults, and resulting in the predominant NE-oriented distribution of aftershocks in this seismic source area.

Key words: Mangshi earthquake sequence; focal depth; focal mechanism solutions; sPL depth phase; seismogenic mechanism

引言

震源深度是研究区域地震活动和地震危险性的一个重要参数,震源深度对探索地震孕

育和发生的深部环境、地震能量集结和释放的活动构造背景以及地壳内部构造变形等具有重要意义(张国民等, 2002). 然而由于震源深度反演存在多解性, 如何准确测定震源深度成了地震学家关注的重点, 目前常用的方法包括基于震相走时和基于地震波形两大类. 基于震相走时虽然能够较为快速地测定震源深度, 但该方法的精度在很大程度上取决于震中附近台网的密度, 一般要求台站的震中距小于 1—2 倍震源深度(罗艳等, 2013), 基于我国大部分地区测震台站较为稀疏的现状, 利用该方法测定的震源深度往往存在较大误差.

针对传统震相走时方法测定震源深度的不足, 地震学家又发展了基于地震波形测量震源深度的方法, 即从地震波形中提取的震源信息有助于更好地约束震源深度, 例如深度震相法(Ma, 2010; Rajkumar *et al.*, 2022)、振幅谱法(Fox *et al.*, 2012)和全波形反演法(Helmberger *et al.*, 1992; Zhu, Helmberger, 1996)等, 其中深度震相法运用较为广泛. 深度震相是指地震波从震源出发向上传播, 经地表反射后传播至监测台站的震相. 由于深度震相与其参考震相的传播路径相似, 两者的走时差主要与震源深度有关而与震中距几乎无关(罗艳等, 2013), 因此利用深度震相法测定震源深度不仅可以避免发震时刻与震源深度的折衷性, 还能有效降低速度模型引起的测量误差.

针对不同震级大小的地震采用不同的深度震相测深方法: 对于较大地震($M \geq 5.0$), 可采用远震深度震相(sP, pP, swP, pwP 等)进行测定, 而对于中小地震($M < 5.0$), 可采用波形信号记录质量较好的近震或地方震深度震相(sPg, sPmP, sPn, sPL 等)测定. 近年来利用近震或地方震深度震相测定中小地震震源深度的方法得到了广泛应用, 例如: 包丰等(2013)利用 sPL 震相测定安庆 $M_{\text{S}}4.4$ 地震序列震源深度, 并建立了不同震源深度下 sPL-P 的走时差与震中距的关系曲线; 针对不同研究人员和机构测定 2008 年攀枝花 $M_{\text{S}}6.1$ 地震序列震源深度存在分歧的情况(张瑞青, 吴庆举, 2008; 龙锋等, 2010; Wang *et al.*, 2011), 罗艳等(2020)利用 sPL 震相进一步测定该序列中 $M3.0$ 以上余震, 发现其主要分布在 12—18 km 深度范围; 此外国内外许多学者利用 sPn 等近震深度震相测定了不同地震的震源深度(潘睿等, 2019; 李姣等, 2021; Rajkumar *et al.*, 2022).

北京时间 2023 年 12 月 2 日 1 时 36 分 33 秒, 云南省德宏州芒市(24.26°N, 98.08°E)发生一次 $M_{\text{S}}5.0$ (地方震震级 $M_{\text{L}}5.3$) 地震, 随后该区域又发生了 4 次 $M_{\text{L}} \geq 3.5$ 余震. 根据中国地震台网中心(2023)测定, 此次芒市主震的震源深度为 10 km, 美国地质调查局(USGS, 2023)测定的震源深度为 17.5 km, 而中国地震局地球物理研究所(2023)给出的震源深度为 6 km. 不同机构发布的主震震源深度存在明显差异, 因此有必要对其进行重新测定.

为了获得芒市 $M_{\text{S}}5.0$ 主震及 4 次 $M_{\text{L}} \geq 3.5$ 余震更加准确的震源深度, 本文基于区域宽频带地震波形, 利用 CAP (cut and paste) 方法(Zhao, Helmberger, 1994; Zhu, Helmberger, 1996)在两种不同区域速度模型下分别反演芒市地震序列中 $M_{\text{L}} \geq 3.5$ 地震的震源机制解和最佳矩心深度, 并利用 sPL 深度震相观测波形与理论地震图(理论波形)对比结果进一步确认震源深度的可靠性, 最后综合震源机制解、震源深度、地震烈度分布和重定位等研究结果和资料, 对此次芒市地震序列的震源深度分布特征和发震机理进行分析探讨.

1 数据选取和研究方法

1.1 台站分布和数据选取

此次地震发生在云南省德宏州芒市境内, 云南地震台网中震中距小于 300 km 的固定台

站, 记录到了 $M_L \geq 3.5$ 地震事件的宽频带波形——该波形震相清晰、信噪比高, 为后续研究提供了有力的数据支持. 需要说明的是, 由于震中位于中缅边境附近, 固定台站主要分布在主震以东一侧(图 1), 为了最大程度地保证震源机制解和震源深度反演结果的准确性和可靠性, 本文采用对台站空间分布要求不高的 CAP 方法反演震源机制及其震源深度, 并在实际研究前测试台站分布对 CAP 方法反演震源机制解结果的影响.

1.2 研究方法

在均匀半空间模型中, 由震源激发的上行 S 波传播至地表时将一部分能量转换为 P 波, 当入射角大于等于临界角时, 转换的 P 波将会沿地表水平传播, 此时所形成的震相被地震学家 Aki 定义为“自由地表 P 波”(surface P wave, 图 2a). 由于该震相沿地表水平传播, 能量衰减较快, 其波形振幅径向分量(R)最强, 垂向分量(Z)次之, 切向分量(T)最弱(图 2b, 图 3). “自由地表 P 波”在实际地下介质的传播过程中会耦合 P 波在地表浅层(如盖层)的一系列多次反射和转换震相, 崇加军等(2010)将这些震相与 Aki 定义的“自由地表 P 波”形成的一个波列定义为 sPL (s coupled into P wave)震相.

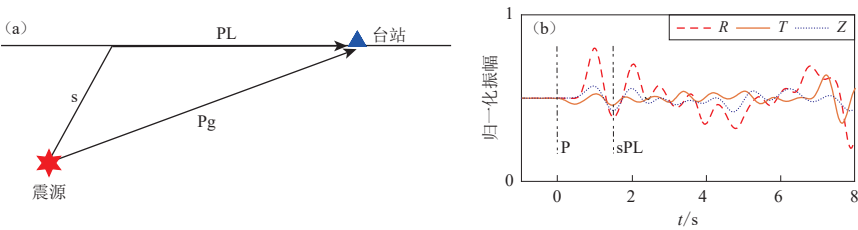


图 2 sPL 射线路径示意图(a)和铜壁关台(震中距 53 km)记录的三分量波形(b)
Fig. 2 Schematic of sPL ray paths (a) and three-component waveforms recorded at the seismic station TBG (epicentral distance 53 km) (b)

sPL 震相到时介于 P 波与 S 波之间, 波形振幅一般没有 P 波尖锐, 通常在震中距 30—50 km 范围内发育较好且无其它震相, 因此震相拾取相对简单(崇加军等, 2010; Wang et al, 2011). sPL 震相到时对震源深度的变化较为敏感, 许多研究表明 sPL 深度震相在测定震源深度时具有明显优势(Wang et al, 2011; 董彦君等, 2018; 段刚, 2019). 在均匀半空间模型下, 利用频率-波数($f\kappa$)法(Zhu, Rivera, 2002)合成的理论地震图表明: 对于震源深度为 10 km 的地震事件, sPL 与直达 P 波的到时差几乎不随震中距的变化而变化(图 3a), 而当震源深度逐

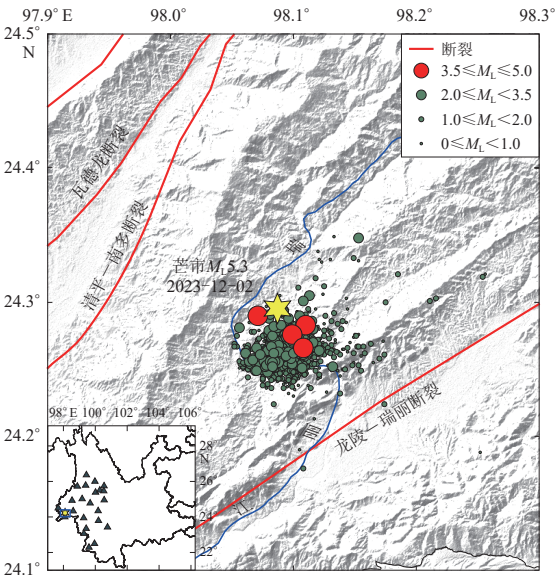


图 1 芒市地震震中位置及断裂和周边台站分布
Fig. 1 Location of epicenters and distribution of faults and surrounding stations in Mangshi area

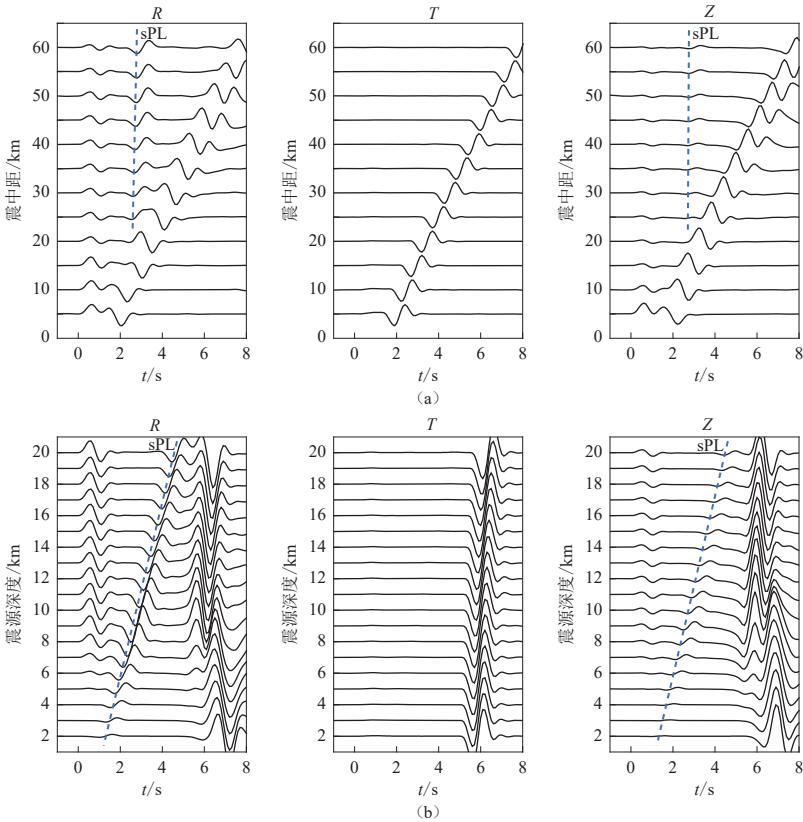


图 3 均匀半空间下逆冲型双力偶源(257°/51°/53°)的三分量格林函数波形图(滤波频率为 0.01—1.5 Hz)

(a) 震源深度为 10 km 时波形随震中距的变化图; (b) 震中距为 43 km 时波形随震源深度的变化图

Fig. 3 Three-component Green function waveforms of a thrust-type double couple source (257°/51°/53°) in a homogeneous half space model, all waveforms are band-passed with frequency range of 0.01–1.5 Hz

(a) Plot of waveforms versus epicenter distance for a focal depth of 10 km; (b) Plot of waveforms versus focal depth for an epicenter distance of 43 km

渐增加时, sPL 与直达 P 波的到时差近似线性增加(图 3b)。

根据均匀半空间模型, sPL 震相与 P 波的到时差 $t_{\text{sPL-P}}$ 和震中距 Δ 的关系(包丰等, 2013)可表示为

$$t_{\text{sPL-P}} = \frac{H \sqrt{\alpha^2 - 1} + \Delta - \sqrt{H^2 + \Delta^2}}{v_p}, \tag{1}$$

式中, Δ 为震中距, H 为震源深度, α 为 P 波与 S 波的波速比。sPL 震相通常出现在震中距 30—50 km 范围内, 而构造地震的震源深度一般在 10 km 左右, 此时 Δ^2 远大于 H^2 , Δ 值将趋近于 $\sqrt{H^2 + \Delta^2}$, 则式(1)可改写为

$$t_{\text{sPL-P}} = \frac{H \sqrt{\alpha^2 - 1}}{v_p}. \tag{2}$$

由式(2)可知, 当震源深度与震中距满足一定条件时, sPL 与直达 P 波的到时差与震源深度 H 呈近似正比关系, 而几乎与震中距 Δ 无关, 因此可利用 sPL 与直达 P 波的到时差来测定震源深度。

对于震级较大(一般 $M_L\geq 3.5$)的地震事件,可通过波形拟合方法如CAP方法测定震源矩心(或质心)深度,并利用反演得到的震源机制解参数和区域速度模型计算深度震相的理论波形,通过对比深度震相的理论波形与实际观测波形进一步确认测定深度的准确性和可靠性. CAP方法作为震源参数全波形反演方法之一,在地震学中运用广泛(姜金钟等, 2021; 李皎等, 2021; Zhao *et al.*, 2021). 该方法将宽频带地震波形分成较短周期的Pnl波和较长周期的面波两部分,分别对Pnl波和面波赋予不同的权重,计算理论地震波形与真实观测波形的互相关系数和误差函数,并采用网格搜索法搜索出理论地震波形与观测波形全局差异最小时的震源机制解和最佳矩心深度. CAP方法在确定震源深度方面具有明显优势,一方面其反演时所用的体波波形部分包含了深度震相(sPL, sPmP或sPg等震相),另一方面体波与面波的相对强度也能较好地约束震源深度(罗艳等, 2013).

2 CAP方法反演震源机制解及矩心深度

挑选芒市地震序列中5次 $M_L\geq 3.5$ 地震(表1)的宽频带波形数据,对其作去均值、去线性趋势、去除仪器响应等预处理后,手动拾取P波初至到时,并将速度记录从NS-EW-UD分量旋转到大圆弧路径上,从而获得 R - T - Z 分量的波形记录;芒市震区地壳速度模型(图4a)来

表1 云南地震台网给出的2023年芒市地震序列中 $M_L\geq 3.5$ 地震目录
Table 1 The catalogue of earthquakes with $M_L\geq 3.5$ in Mangshi area from Yunnan Seismic Network

事件编号	发震时刻		震中位置		深度/km	M_L
	年-月-日	时:分:秒	北纬/ $^{\circ}$	东经/ $^{\circ}$		
202312020136	2023-12-02	01:36:32.60	24.29	98.09	10.0	5.3 ($M_S5.0$)
202312020214	2023-12-02	02:14:53.20	24.28	98.11	7.0	3.5
202312020216	2023-12-02	02:16:23.10	24.28	98.10	13.0	3.9
202312020224	2023-12-02	02:24:55.60	24.29	98.07	8.0	4.2
202312031514	2023-12-03	15:14:50.70	24.27	98.11	8.0	3.6

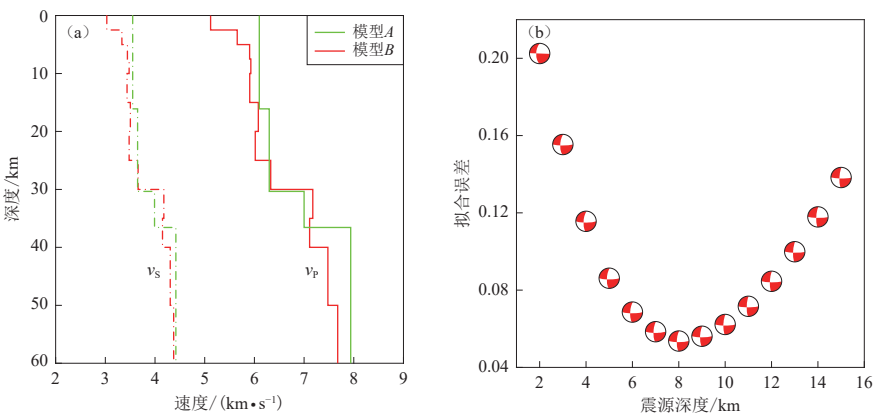


图4 台站方位角分布不均对CAP方法反演震源机制的影响测试
(a) 一维速度模型; (b) 震源深度拟合误差

Fig. 4 Testing of the effect of uneven station azimuthal distribution on the inversion of focal mechanism solutions by the CAP method
(a) 1-D velocity model; (b) Focal depth fitting error

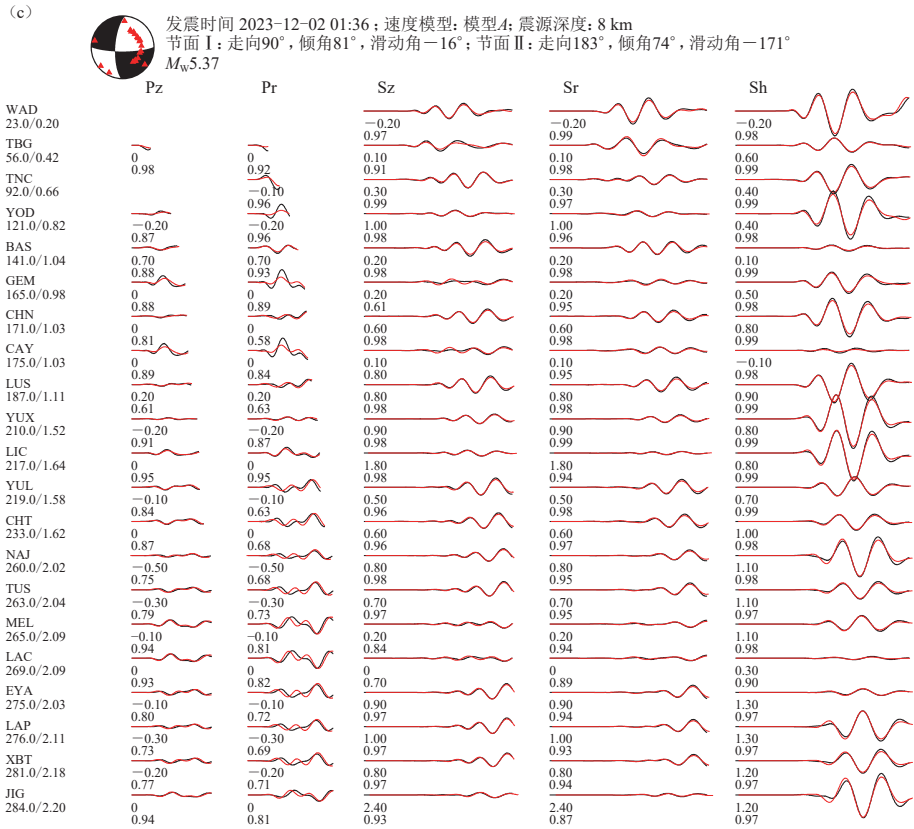


图 4 台站方位角分布不均对 CAP 方法反演震源机制的影响测试

(c) 最优震源深度对应的理论(红色)和观测(黑色)波形拟合图. 波形左侧的大写字母为台站名, 字母下方分别为震中距(单位: km)和相对偏移时间(单位: s), 波形下方的两行数字分别为理论波形(红色)相对于实际波形(黑色)的移动时间(单位: s)和二者的相关系数, 下同

Fig. 4 Testing of the effect of uneven station azimuthal distribution on the inversion of focal mechanism solutions by the CAP method

(c) The theoretical (red) and observed (black) waveform fitting diagram corresponding to the optimal focal depth. The capital letters on the left side of the waveforms denote seismic stations. Below the letters are the epicenters (in kilometers) and the relative offset times (in seconds) respectively. The two rows of numbers below the waveforms denote the time movement (in seconds) of the theoretical waveform (in red) relative to the actual waveform (in black) and their correlation coefficients, respectively. The same below

源于全球地壳模型 CRUST1.0 (记为模型 A, Laske et al, 2013) 以及中国科学技术大学姚华建课题组与中国地震局地球物理研究所王伟涛课题组合作提出的川滇地区速度模型 2.0 版 SWChinaCVM-2.0 (记为模型 B, Liu et al, 2023), 采用 f - κ 方法 (Zhu, Rivera, 2002) 分别计算两种速度模型下不同震中距 (5—300 km) 和不同震源深度 (2—20 km) 的格林函数库, 以用于后续 CAP 反演.

考虑到此次地震记录台站的分布情况, 在正式反演前, 本文首先测试现有台站空间分布 (图 1) 对 CAP 方法反演震源机制解的影响. 采用控制变量法的思路, 预先设定震源机制解 (89°/78°/-20°)、震源深度 (7 km) 和震级 ($M_w 5.3$) 参数, 基于震区一维速度模型 (图 4a 中模型

B), 利用 $f\text{-}\kappa$ 方法计算格林函数并合成各个台站(图 1)的“观测波形”; 然后基于速度模型 A 计算不同震中距、震源深度的格林函数库, 利用 CAP 方法对“观测波形”和理论波形进行拟合反演. 通过对比反演得到的震源参数与设定的震源参数是否一致, 来判断台站方位分布是否影响 CAP 方法反演震源参数的准确性. 从反演结果(图 4b, c)可知, 反演得到的震源机制解与设定的震源机制解差异较小($<4^\circ$), 震源深度差小于 1 km, 说明当台站分布不均匀时, CAP 方法反演得到的震源参数依然是准确可靠的.

在利用 CAP 方法测试及实际反演过程中, 本文将 Pnl 波和面波的截取窗长分别设为 30 s 和 70 s, 反演权重分别设为 1 和 0.5. 为了提高波形信噪比, 本文对 Pnl 波部分以 0.05—0.15 Hz、面波部分以 0.05—0.10 Hz 进行 4 阶巴特沃斯(Butterworth)带通滤波, 最后在断层走向($0^\circ\text{—}360^\circ$)、倾角($0^\circ\text{—}90^\circ$)、滑动角($-180^\circ\text{—}180^\circ$)和震源深度(2—15 km)空间范围内搜索最佳的震源机制解和震源矩心深度.

经过多轮反演, 本研究得到了芒市地震序列主震和 4 次 $M_L\geq 3.5$ 余震的震源机制解和震源深度(表 2), 芒市 $M_5.0$ 主震(事件编号 202312020136)是一个以走滑为主兼具正断分量的地震, 最佳双力偶机制解为节面 I: 走向 89° , 倾角 78° , 滑动角 -20° ; 节面 II: 走向 183° , 倾角 70° , 滑动角 -167° , 最佳矩心深度为 7 km, 矩震级为 $M_w 4.9$ (图 5). 该结果与中国地震局地球物理研究所(2023)利用 P 波初动计算结果(节面 I: 走向 87° , 倾角 79° , 滑动角 -12° ; 节面 II: 走向 181° , 倾角 69° , 滑动角 -168°)和防灾科技学院 Seismology 小组(2023)综合不同机构的震源机制解(节面 I: 走向 85° , 倾角 72° , 滑动角 -27° ; 节面 II: 走向 184° , 倾角 65° , 滑动角 -161°)结果相比, 震源机制解的走向、倾角和滑动角差异均小于 8° . 虽然国内各个机构采用的方法、模型和数据不同, 但本文计算结果与这些震源机制解计算结果非常接近, 说明利用本文所采用的区域一维速度模型和更加密集的近震波形数据反演获得了较为可靠的震源机制解. 但与美国地质调查局(USGS, 2023)的反演结果(节面 I: 走向 264° , 倾角 51° , 滑动角 -22° ; 节面 II: 走向 8° , 倾角 73° , 滑动角 -139°)差异较大, 断层节面的走向相差约 180° 且倾角相差约 20° , 究其原因可能是发震断层倾角陡直(约 80°)以及 USGS 利用长周期 W 震相和全球平均速度模型导致的反演误差.

震区内的 4 次 $M_L\geq 3.5$ 余震事件由于其震级较小, 国内外相关研究机构并未给出相应地

表 2 利用 CAP 方法反演所得 2023 年芒市地震序列中 $M_L\geq 3.5$ 地震的震源机制解
Table 2 Focal mechanism solutions of Mangshi $M_L\geq 3.5$ earthquakes inverted by using CAP method

事件编号	震级	速度模型	震源深度/km	节面 I			节面 II		
				走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$
202312020136	$M_5.0$	模型A	7	89	79	-18	183	72	-168
		模型B	7	89	78	-20	183	70	-167
202312020214	$M_L 3.5$	模型A	5	250	60	5	157	86	150
		模型B	7	250	60	5	157	86	150
202312020216	$M_L 3.9$	模型A	6	242	71	30	141	62	158
		模型B	6	242	69	32	139	60	156
202312020224	$M_L 4.2$	模型A	5	240	80	14	148	76	170
		模型B	5	241	80	13	149	77	170
202312031514	$M_L 3.6$	模型A	6	254	52	49	129	54	130
		模型B	5	257	51	53	127	52	127

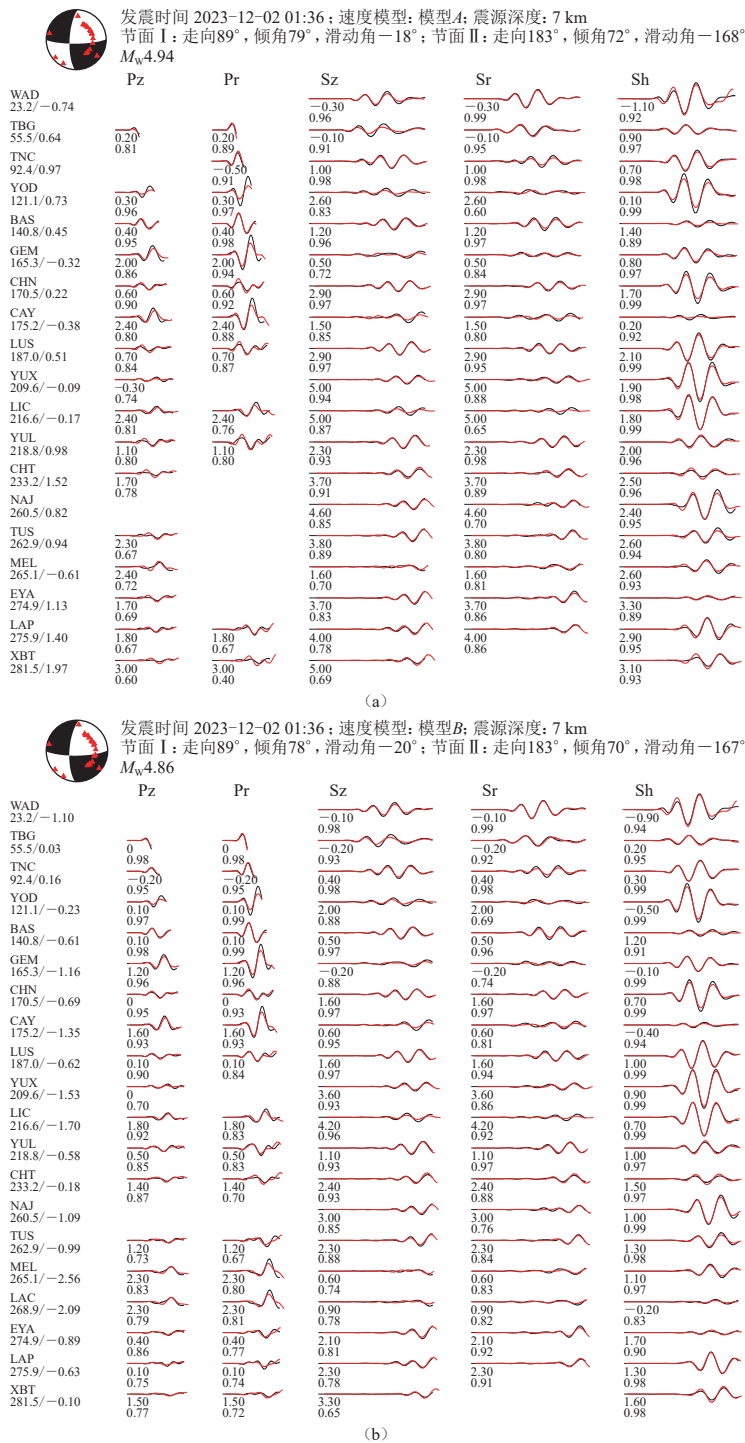


图 5 利用速度模型 A (a)和 B (b)反演得到的芒市 $M_S 5.0$ 地震在震源深度 7 km 处的理论波形(红线)与观测波形(黑线)的对比图

Fig. 5 Comparison between synthetic (red line) and observed (black line) seismograms of the Mangshi $M_S 5.0$ earthquake at a source depth of 7 km based on velocity models A (a) and B (b)

震的震源机制解,而本文利用两种速度模型反演同一地震的震源机制解较为一致(见附录),且80%以上的理论波形与实际波形的互相关系数大于0.7,表明本研究的反演结果稳定可靠.芒市 $M_5.0$ 主震与4次余震的震源机制解差异较大(表2):主震的震源机制表现为走滑型地震兼具正断分量,走向近NS或EW向;芒市4次 $M_L \geq 3.5$ 余震震源机制表现为走滑兼逆冲型或逆冲型地震,走向近NE或SE向.此外,主震与4次 $M_L \geq 3.5$ 余震的震源机制 P 轴和 T 轴的分布较为复杂,主震的 P 轴走向为NE向、 T 轴走向为SE向,而4次余震的 P 轴走向主要呈NNE向、 T 轴方向为ESE向,说明震源区内存在较为复杂的应力背景,故推测 $M_5.0$ 主震破裂后导致附近断层因区域应力调整而产生破裂,使得4次 $M_L \geq 3.5$ 余震与主震震源机制类型差异较大.

此外,本研究利用全波形反演方法得到的 $M_5.0$ 主震和 $M_L \geq 3.5$ 余震的震源深度主要集中在5—7 km范围(图6),与中国地震台网正式目录(10 km)和USGS(17.5 km)基于震相走时和远震波形数据发布的震源深度存在明显差别,因此本文采用sPL深度震相进一步验证CAP方法反演得到5次地震的震源深度的可靠性.

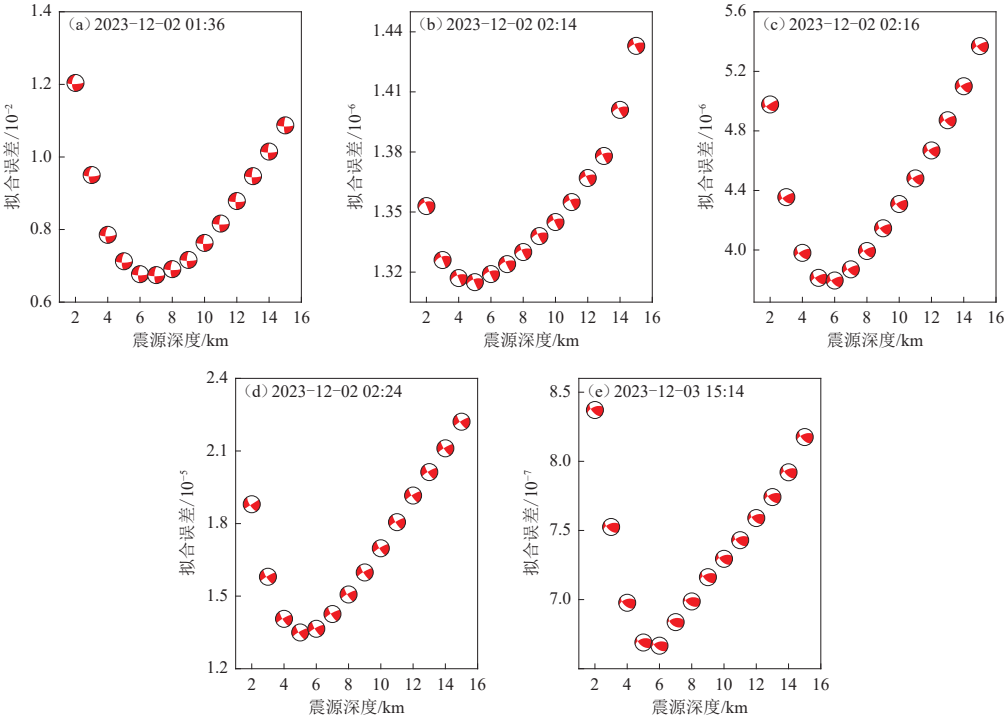


图6 利用速度模型A反演所得芒市 $M_L \geq 3.5$ 地震震源深度拟合误差图

Fig. 6 Focal depths fitting errors of the Mangshi $M_L \geq 3.5$ earthquakes inverted by using velocity model A

3 利用 sPL 深度震相确定震源深度

此次芒市 $M_5.0$ 地震震中附近的固定台站相对稀疏,在sPL震相出现的震中距范围内,距离震中最近(约53 km)且波形数据质量较好的台站为铜壁关台(TBG).因此,本研究选择铜壁关台记录到的宽频带波形数据,对其进行去均值、线性趋势和仪器响应等预处理后,将

波形从 NS-EW-UD 分量旋转至 R - T - Z 并对其进行低通滤波($<1\text{ Hz}$), 即可在径向分量上观察到较为清晰的 sPL 震相(图 2b). 然后参照崇加军等(2010)利用 sPL 震相测定震源深度的方法, 基于速度模型 A , 使用 CAP 方法反演得到震源机制解(表 2)并利用 f - κ 方法合成铜壁关台记录到的 $M_{\text{S}}5.0$ 主震和 $M_{\text{L}}\geq 3.5$ 余震在不同震源深度处的径向、切向和垂向的理论地震图(图 7), 最后将实际观测波形与在不同震源深度计算得到的理论波形进行对比分析, 通过波形相似度找出 sPL 震相与直达 P 波的到时并确定震源深度.

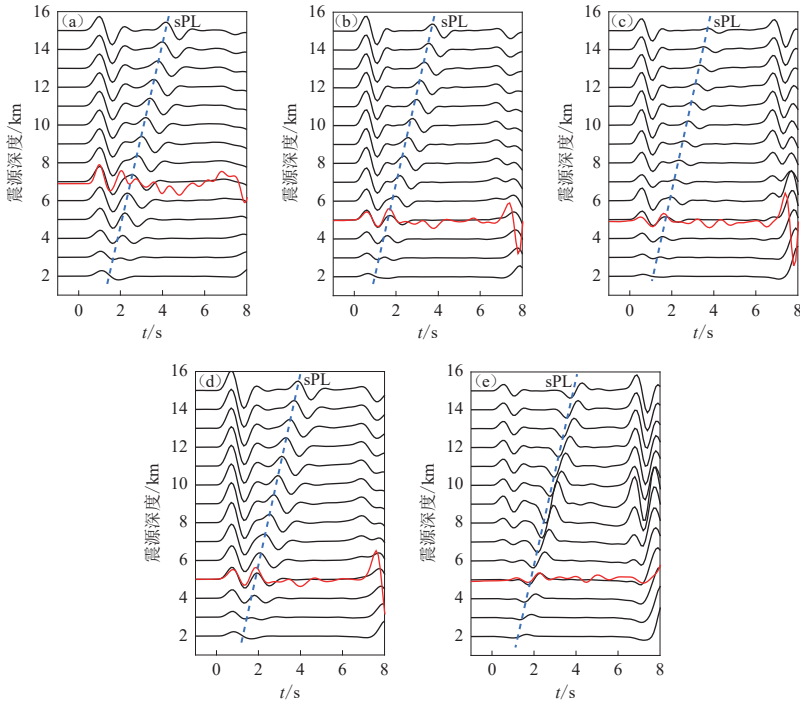


图 7 观测(红色)与理论(黑色) sPL 震相波形对比(径向分量)

(a) 地震事件 202312020136; (b) 地震事件 202312020214; (c) 地震事件 202312020216;
(d) 地震事件 202312020224; (e) 地震事件 202312031514

Fig. 7 Comparison of observed (red) and theoretical (black) sPL depth phase waveforms (radial component)

(a) Seismic event 202312020136; (b) Seismic event 202312020214; (c) Seismic event 202312020216;
(d) Seismic event 202312020224; (e) Seismic event 202312031514

从芒市 $M_{\text{S}}5.0$ 地震在不同震源深度上的理论波形与实际观测波形对比图(图 7a)可知, 实际观测波形(红色)的 sPL 震相到时与震源深度为 7 km 时理论波形(黑色)的 sPL 震相到时接近, 而芒市 4 次 $M_{\text{L}}\geq 3.5$ 余震在震源深度为 5 km 时的观测波形(红色)与理论波形(黑色)的 sPL 震相到时接近且波形相似度较好(图 7b-e). 值得注意的是, 主震和余震的观测波形与理论波形(尤其是 sPL 震相之后的波段)并未完全吻合, 分析其原因可能是更加复杂的真实地下速度结构和震源参数反演的不确定性导致了波形差异, 但本研究中径向分量的 sPL 震相与 P 波初至之间的波形吻合得较好且波形相似度较高(图 7), 表明利用 sPL 震相较为准确地测定了震源深度, 基本可确定芒市 $M_{\text{S}}5.0$ 地震及余震的震源深度为 5—7 km, 与 CAP 方法反演得到的震源深度较为一致(表 3).

表 3 2023 年芒市地震序列 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源深度测定结果

Table 3 Focal depth determination results of $M_L \geq 3.5$ earthquakes in 2023 Mangshi earthquake sequence

事件编号	震中位置		M_L	震源深度/km			
	北纬/ $^{\circ}$	东经/ $^{\circ}$		CAP (模型A)	CAP (模型B)	sPL	中国地震台网
202312020136	24.29	98.09	5.3	7.0	7.0	7.0	10
202312020214	24.28	98.11	3.5	5.0	7.0	5.0	10
202312020216	24.28	98.10	3.9	6.0	6.0	5.0	10
202312020224	24.29	98.07	4.2	5.0	5.0	5.0	10
202312031514	24.27	98.11	3.6	6.0	5.0	5.0	10

4 讨论

利用 sPL 深度震相测定震源深度的误差主要来源于震相拾取准确性和真实地下速度结构与一维速度模型的差异。其中 sPL 震相的准确拾取可以通过以下性质区分：① sPL 震相出现在 P 波后、S 波前；② 在大陆地区 sPL 震相一般出现在震中距 30—50 km 范围内；③ sPL 震相的径向分量 R 振幅最大，垂向分量 Z 次之，切向分量 T 振幅最小。研究表明，速度模型误差对 sPL 震源深度测定结果影响较小：对于震源深度为 10 km 的地震，当速度模型分别增减 10% 时，深度误差约为 1 km (崇加军等, 2010; Luo *et al.*, 2010)，因此利用 sPL 震相测定震源深度具有较高的准确性和可靠性。

对于此次芒市 $M_55.0$ 主震的震源深度，USGS 利用长周期 W 震相和全球平均速度模型反演所得的震源深度为 17.5 km，本文利用近震全波形和 sPL 深度震相测定的 7 km 与其存在较大差异。USGS 针对远震震源参数的波形反演广泛使用长周期波形，Chen 等(2013)的研究发现长周期波形对震源深度的分辨率不高。李志伟等(2015)和赵韬等(2019)的研究也表明，USGS 全球地震目录给出的部分地震震源深度存在明显误差(最大约 20 km)，因此在使用 USGS 全球地震目录进行相关研究时需考虑震源深度测定误差带来的影响。

本文利用 CAP 方法和 sPL 近震深度震相来测定中小地震震源深度，测定结果表明芒市 $M_55.0$ 主震与 4 次 $M_L \geq 3.5$ 余震的震源深度均在 5—7 km 范围内，说明震区内地震主要发生在上地壳相当浅的部位，已有的研究结果表明该地区的地震震源深度主要集中在 2—10 km 范围内，最深不超过 15 km (房立华等, 2011; Xu *et al.*, 2015)，这与我们的研究结果一致。此外，考虑到芒市地震序列发生在龙江水库库区内，而震源深度作为定性判断水库触发地震的重要参数之一，有必要探讨此次芒市地震与水库地震之间的联系。大量观测研究显示，水库建成蓄水后，在库区近岸 10 km 范围内通常会伴随相当数量的中小地震发生，震源深度一般不超过 10 km (姜金钟等, 2016; Zhang *et al.*, 2021)，如紫坪铺水库地震的平均震源深度约为 5 km，81% 以上地震的震源深度小于 10 km (杜苛等, 2023)，白鹤滩水库蓄水后震源深度优势分布在 10 km 以内 (郭伟等, 2022)。本文测定芒市 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源深度不仅与水库诱发地震优势分布范围一致，还与该区域构造地震的震源深度优势分布范围一致，因此仅通过震源深度不足以探讨芒市地震与水库地震之间的联系。

叶庆东等(2023)的研究表明，水库库区地震活动性与水库水位变化密切相关。芒市地震震中位于龙江水库库区内，而该水库 2010 年投入运行，至此次地震发生时已持续运行 13 年。为分析龙江水库蓄水后库区内的地震活动特征，本文统计分析了 2010—2024 年龙江水库库区内 $M_L \geq 1.0$ 地震事件与水位变化的关系，其地震震级时序($M-t$)和地震频次时序

($N-t$)分布见图 8. 可见: 库区内 $M_L3.0$ 以上地震与水库水位关系密切, 除 2013 年 6 月 8 日发生的 $M_L3.1$ 地震处于年度低水位时期, 库区内其余 $M_L3.0$ 以上地震均发生在当年度高水位时期, 其中 2011 年 9 月 24 日水库蓄水高位时期发生最大地震为 $M_L4.2$ 地震(图 8a). 库区内的地震活动特征可分为 4 个阶段(图 8b): 第一阶段为 2010 年 1 月至 2016 年 2 月, 期间 $M_L1.0$ 以上地震活动较为平静(月频次小于 10 次), 平静期约为 6 年; 第二阶段为 2016 年 3 月至 2017 年 12 月, 该时段内水库水位变化较为剧烈、地震活动相对活跃, $M_L1.0$ 以上地震活动月频次为十几次至三十几次; 第三阶段为 2018 年 1 月至 2023 年 9 月, 期间 $M_L1.0$ 以上地震活动较为平静(月频次小于 10 次), 平静期接近 6 年; 第四阶段为 2023 年 10 月至 2023 年 12 月, 该时段内水库处于高水位且水位变化剧烈, 并于 12 月 2 日在库区内发生 $M_S5.0$ 地震, 暗示着龙江水库水位变化可能与此次地震的发生具有一定的关联性.

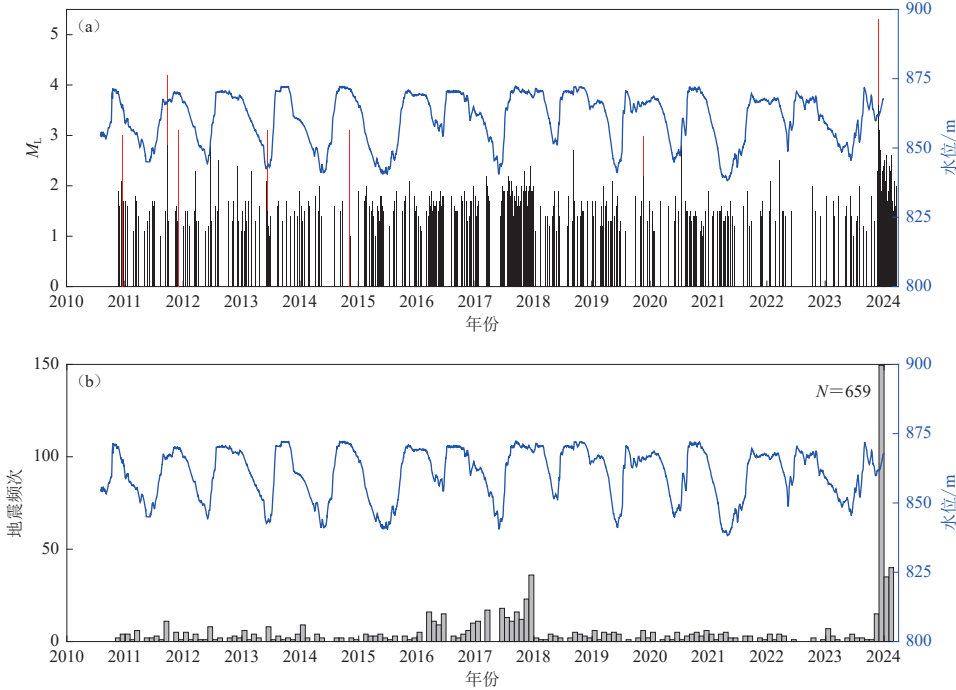


图 8 2010—2024 年龙江水库库区内地震震级与水库水位时序图(a)和地震频次与水库水位时序图(b)

图(a)中红色竖线为库区内 $M_L3.0$ 以上地震

Fig. 8 Earthquake magnitude *versus* reservoir level time series (a) and frequency of earthquakes *versus* reservoir level time series (b) in Longjiang Reservoir area during 2010–2024

The red vertical lines in Fig. (a) represent earthquakes above $M_L3.0$ within the reservoir area

芒市 $M_S5.0$ 主震以走滑破裂为主兼具正断分量, 但在主震破裂后破裂方式发生了明显变化, 4 次 $M_L \geq 3.5$ 余震的破裂方式主要表现为以走滑为主兼具逆冲分量或逆冲型破裂, 表明主震与余震的震源机制明显不同. 此外, $M_S5.0$ 主震的地震烈度图长轴分布以及针对该地震序列在 2023 年 12 月 2 日至 12 月 8 日期间发生的所有地震基于波形互相关的双差地震定位 (Waldhauser, Ellsworth, 2000) 结果也显示: 此次地震序列的震源位置位于龙江电站水库库区, 震源深度非常浅且余震明显呈非条带状分布于多条断层上(图 9), 表明此次地震序列的

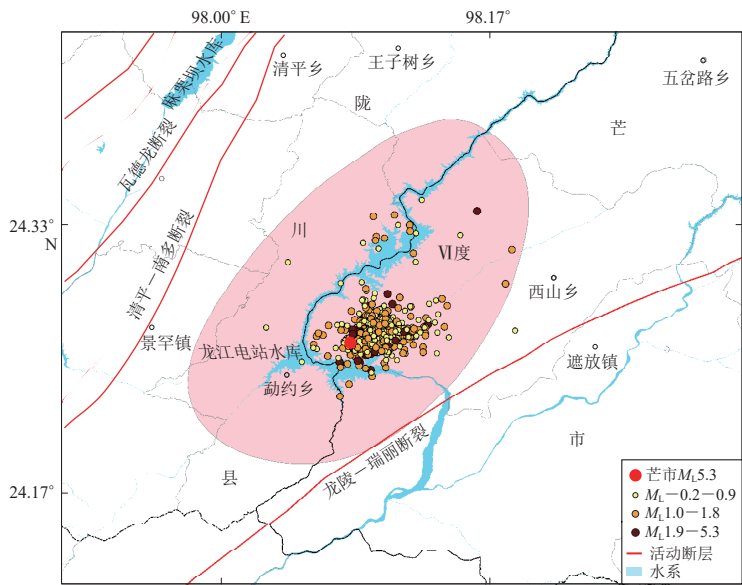


图9 芒市 $M_S5.0$ ($M_L5.3$)地震烈度图及双差重定位后的震中分布

Fig. 9 Intensity map and DD-relocated epicentral distribution of the $M_S5.0$ ($M_L5.3$) Mangshi earthquake

主要发震构造可能为至少两条空间位置邻近、几何性质不同且孕震环境相对复杂的断层。

当前地震学界对于水库库区及周边地区发生的地震属于构造地震还是水库触发(诱发)地震的准确判定还存在较大困难,但相关研究表明库区流体的重力加载作用以及流体沿着断层裂隙扩散渗透可能会改变孕震深度处介质强度或断层摩擦阻力,从而有可能加速断层的滑动或岩体破裂而导致地震的发生(王妙月等, 1976; Lei, 2011; 刁桂苓等, 2014; Yao *et al.*, 2017; 胡锦涛等, 2023; 叶庆东等, 2023)。考虑到此次芒市地震位于水库库区且震源深度很浅(5—7 km)、相对复杂的发震断层构造系统有利于库水沿断层裂隙向下渗透运移等因素,本研究初步推测库区流体在原有具备发生中强地震潜力的断层裂隙中的渗透作用可能促进了此次芒市地震的发生,主震破裂导致的局部应力变化扰动又引起了邻近的其它断层运动发生优势分布方向不同的余震事件,而关于此次地震更为确切的发震机理还有待利用更加丰富的数据和方法进一步开展综合研究。

5 结论

本文基于云南地震台网宽频带地震波形资料和两种不同的区域速度模型,利用CAP方法对2023年芒市 $M_S5.0$ 地震序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解及震源深度进行反演,并结合sPL深度震相进一步测定其震源深度,最后综合震源机制解、震源深度、地震烈度和地震重定位等研究结果分析探讨了此次芒市地震的发震机理,得出以下主要结论:

1) 震源机制解反演结果表明主震与余震的震源机制解有明显差异:芒市 $M_S5.0$ 地震为走滑型地震兼具正断分量,最佳双力偶机制解为节面I走向 89° , 倾角 78° , 滑动角 -20° ; 节面II走向 183° , 倾角 70° , 滑动角 -167° , 矩震级为 $M_w4.9$; 而4次 $M_L \geq 3.5$ 余震为走滑兼逆冲型地震,震源机制解均存在NE走向节面,走向、倾角、滑动角分别平均为 207° 、 65° 和 26° 左右,该节面走向与芒市地震烈度图长轴走向较为一致。

2) CAP 方法反演得到芒市 $M_s 5.0$ 地震最佳矩心深度为 7 km, 4 次 $M_L \geq 3.5$ 余震矩心深度为 5—7 km; 利用 sPL 深度震相法测定主震的震源深度为 7 km, 4 次 $M_L \geq 3.5$ 余震的震源深度均为 5 km, 两种方法测定的震源深度差小于 2 km. 主震与 4 次 $M_L \geq 3.5$ 余震震源深度均在 5—7 km 范围内, 说明此次地震序列主要发生在上地壳浅部.

3) 鉴于此次地震发生在水库库区且地震时库区处于高水位、震源分布很浅且主余震震源机制解明显不一致等因素, 本研究初步推测: 库区流体在原有具备发生中强地震潜力的断层裂隙中的渗透作用可能促进了此次地震的发生, 且主震破裂引发局部应力调整使得邻近的 NE 向断层滑动, 导致本次地震序列的余震呈现 NE 方向的优势分布.

本文图件主要用 GMT6 (Wessel *et al.*, 2019) 软件绘制完成, 地震波形数据由 Seismic Analysis Code (SAC) 软件包完成, CAP 程序包由美国圣路易斯大学朱露培教授提供, 云南地震台数据产品部提供了芒市地震波形数据及震相观测报告, 云南省地震局白仙富高级工程师提供了地震烈度分布图底图, 云南省地震局李智蓉高级工程师提供了龙江水库水位信息, 两位审稿人对本文提出了宝贵意见, 作者在此一并表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 包丰, 倪四道, 赵建和, 谢军, 陈伟文, 曾祥方. 2013. 时钟不准情形地震精确定位研究: 以 2011 年 1 月 19 日安庆地震序列为例[J]. *地震学报*, **35**(2): 160–172.
- Bao F, Ni S D, Zhao J H, Xie J, Chen W Y, Zeng X F. 2013. Accurate earthquake location with instrumental clock error: A case study for the 19 January 2011 Anqing earthquake sequence[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(2): 160–172 (in Chinese).
- 崇加军, 倪四道, 曾祥方. 2010. sPL, 一个近距离确定震源深度的震相[J]. *地球物理学报*, **53**(11): 2620–2630.
- Chong J J, Ni S D, Zeng X F. 2010. sPL, an effective seismic phase for determining focal depth at near distance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(11): 2620–2630 (in Chinese).
- 刁桂苓, 王曰风, 冯向东, 王晓山, 冯志仁, 张洪智, 程方正, 李悦, 王利兵. 2014. 溪洛渡库首区蓄水后震源机制分析[J]. *地震地质*, **36**(3): 644–657.
- Diao G L, Wang Y F, Feng X D, Wang X S, Feng Z R, Zhang H Z, Cheng W Z, Li Y, Wang L B. 2014. Analysis of characteristics of focal mechanism in reservoir head region of Xiluodu Reservoir after impoundment[J]. *Seismology and Geology*, **36**(3): 644–657 (in Chinese).
- 董彦君, 王秋良, 申学林, 魏贵春. 2018. sPL 震相在巴东 $M_{4.3}$ 地震序列震源深度测定中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, **38**(3): 221–224.
- Dong Y J, Wang Q L, Shen X L, Wei G C. 2018. Application of sPL phase in focal depth determination of the Badong $M_{4.3}$ earthquake sequence[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **38**(3): 221–224 (in Chinese).
- 杜苛, 李红谊, 李炎臻, 黄雅芬. 2023. 紫坪铺水库及邻区的微震检测与定位[J]. *地震学报*, **45**(6): 970–984.
- Du K, Li H Y, Li Y Z, Huang Y F. 2023. Microseismic detection and location around the Zipingpu reservoir and its adjacent areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **45**(6): 970–984 (in Chinese).
- 段刚. 2019. 利用 sPL 震相测定福建仙游 $M_{4.6}$ 地震震源深度[J]. *地球物理学进展*, **34**(2): 417–422.
- Duan G. 2019. Determination of focal depth of the Xianyou $M_{4.6}$ earthquake in Fujian application of sPL phase[J]. *Progress in Geophysics*, **34**(2): 417–422 (in Chinese).
- 房立华, 吴建平, 张天中, 黄静, 王长在, 杨婷. 2011. 2011 年云南盈江 $M_s 5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. *地震学报*, **33**(2): 262–267.
- Fang L H, Wu J P, Zhang T Z, Huang J, Wang C Z, Yang T. 2011. Relocation of mainshock and aftershocks of the 2011 Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake in Yunnan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(2): 262–267 (in Chinese).

- 防灾科技学院 Seismology 小组. 2023. 2023 年 12 月 2 日云南芒市 5.0 级地震的震源机制中心解及在周边产生变形场 [EB/OL]. [2023-12-05]. <https://ses-kled.cidp.edu.cn/info/1084/1486.html>.
- Seismology Group, Institute of Disaster Prevention. 2023. The central focal mechanism solution of the $M_s5.0$ earthquake in Mangshi, Yunnan Province on December 2, 2023 and the deformation field in the surrounding area [EB/OL]. [2023-12-05]. <https://ses-kled.cidp.edu.cn/info/1084/1486.html> (in Chinese).
- 郭伟, 赵翠萍, 左可桢, 赵策. 2022. 金沙江下游白鹤滩水库蓄水前后地震活动特征 [J]. *地球物理学报*, **65**(12): 4659–4671.
- Guo W, Zhao C P, Zuo K Z, Zhao C. 2022. Characteristics of seismicity before and after impoundment of Baihetan dam in the lower reaches of Jinsha River [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **65**(12): 4659–4671 (in Chinese).
- 胡锦涛, 谢军, 危自根, 金超. 2023. 三峡库区秭归段浅层速度结构及孕震环境 [J]. *地震学报*, **45**(2): 223–233.
- Hu J T, Xie J, Wei Z G, Jin C. 2023. Shallow velocity structure and seismogenic environment in the Zigui section of the Three Gorges Reservoir region of China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, **45**(2): 223–233 (in Chinese).
- 姜金钟, 付虹, 陈棋福. 2016. 位于构造活跃区的小湾水库地震活动特征: 基于地震精定位的分析 [J]. *地球物理学报*, **59**(7): 2468–2485.
- Jiang J Z, Fu H, Chen Q F. 2016. Characteristics of seismicity of the Xiaowan reservoir in an area of active tectonics from double-difference relocation analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(7): 2468–2485 (in Chinese).
- 姜金钟, 付虹, 李涛. 2021. 2021 年云南漾濞 $M_s6.4$ 地震序列重定位及发震构造探讨 [J]. *地震研究*, **44**(3): 320–329.
- Jiang J Z, Fu H, Li T. 2021. Relocation of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ earthquake sequence and discussion of its seismogenic fault [J]. *Journal of Seismological Research*, **44**(3): 320–329 (in Chinese).
- 李姣, 姜金钟, 王光明, 付虹. 2021. 2018 年云南通海 2 次 $M_s5.0$ 地震震源机制解及深度测定 [J]. *地震研究*, **44**(2): 133–144.
- Li J, Jiang J Z, Wang G M, Fu H. 2021. Focal mechanism and focal depth determination of the two Tonghai, Yunnan, $M_s5.0$ earthquakes in 2018 [J]. *Journal of Seismological Research*, **44**(2): 133–144 (in Chinese).
- 李志伟, 黄志斌, 王晓欣, 韩立波, 陈伟文, 包丰. 2015. USGS 地震目录中 4—5 级震源深度异常地震可靠性初步研究: 以南北地震带若干地震为例 [J]. *地球物理学报*, **58**(4): 1236–1250.
- Li Z W, Huang Z B, Wang X X, Han L B, Chen W W, Bao F. 2015. A study on the reliability of $M4-5$ earthquakes with anomalous focal depth in the USGS earthquake catalog: Several earthquakes in the North-South Seismic Belt [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(4): 1236–1250 (in Chinese).
- 龙锋, 张永久, 闻学泽, 倪四道, 张致伟. 2010. 2008 年 8 月 30 日攀枝花—会理 6.1 级地震序列 $M_L \geq 4.0$ 事件的震源机制解 [J]. *地球物理学报*, **53**(12): 2852–2860.
- Long F, Zhang Y J, Wen X Z, Ni S D, Zhang Z W. 2010. Focal mechanism solutions of $M_L \geq 4.0$ events in the $M_s6.1$ Panzhihua-Huili earthquake sequence of Aug 30, 2008 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(12): 2852–2860 (in Chinese).
- 罗艳, 曾祥方, 倪四道. 2013. 震源深度测定方法研究进展 [J]. *地球物理学进展*, **28**(5): 2309–2321.
- Luo Y, Zeng X F, Ni S D. 2013. Progress on the determination of focal depth [J]. *Progress in Geophysics*, **28**(5): 2309–2321 (in Chinese).
- 罗艳, 赵里, 田建慧. 2020. 2008 年 8 月 30 日攀枝花 $M_s6.1$ 地震序列深度及震源区应力特征 [J]. *中国科学: 地球科学*, **50**(3): 404–417.
- Luo Y, Zhao L, Tian J H. 2020. The focal depths of the 2008 Panzhihua earthquake sequence and the stress field in the source region [J]. *Science China Earth Sciences*, **50**(3): 404–417 (in Chinese).
- 潘睿, 姜金钟, 付虹, 李姣. 2019. 2017 年云南漾濞 $M_s5.1$ 及 $M_s4.8$ 地震震源机制解和震源深度测定 [J]. *地震研究*, **42**(3): 338–348.
- Pan R, Jiang J Z, Fu H, Li J. 2019. Focal mechanism and focal determination of Yunnan Yangbi $M_s5.1$ and $M_s4.8$ earthquakes in 2017 [J]. *Journal of Seismological Research*, **42**(3): 338–348 (in Chinese).
- 王妙月, 杨懋源, 胡毓良, 李自强, 陈运泰, 金严, 冯锐. 1976. 新丰江水库地震的震源机制及其成因初步探讨 [J]. *地球物理学报*, **19**(1): 1–17.
- Wang M Y, Yang M Y, Hu Y L, Li Z Q, Chen Y T, Jin Y, Feng R. 1976. Mechanism of the reservoir impounding earth-

- quakes at Xinfengjiang and a preliminary endeavour to discuss their cause[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **19**(1): 1–17 (in Chinese).
- 叶庆东, 余大新, 王凯明, 毛远凤, 阎春恒. 2023. 龙滩水库库区地震活动与水位的互相关分析及孔隙压力扩散系数估算[J]. *地震学报*, **45**(6): 1068–1078.
- Ye Q D, Yu D X, Wang K M, Mao Y F, Yan C H. 2023. Analysis of the cross-correlation between seismicity and water level and estimation of the hydraulic diffusivity in the Longtan reservoir area[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **45**(6): 1068–1078 (in Chinese).
- 张国民, 汪素云, 李丽, 张晓东, 马宏生. 2002. 中国大陆地震震源深度及其构造含义[J]. *科学通报*, **47**(9): 663–668.
- Zhang G M, Wang S Y, Li L, Zhang X D, Ma H S. 2002. Focal depth research of earthquakes in mainland China and implication for tectonics[J]. *Chinese Science Bulletin*, **47**(9): 663–668 (in Chinese).
- 张瑞青, 吴庆举. 2008. 四川攀枝花 2008 年 8 月 31 日 $M_{\text{S}}5.6$ 地震震源深度的确定[J]. *国际地震动态*, (12): 1–5.
- Zhang R Q, Wu Q J. 2008. Focal depth for an earthquake ($M_{\text{S}}5.6$) on August 31, 2008 in Panzhihua of Sichuan Province[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (12): 1–5 (in Chinese).
- 赵韬, 储日升, 倪四道, 王莹, 周勇, 曾祥方. 2019. 广西苍梧 $M_{\text{S}}5.4$ 地震震源深度[J]. *地震地质*, **41**(3): 619–632.
- Zhao T, Chu R S, Ni S D, Wang Y, Zhou Y, Zeng X F. 2019. Study on focal depth of the $M_{\text{S}}5.4$ Cangwu earthquake in Guangxi[J]. *Seismology and Geology*, **41**(3): 619–632 (in Chinese).
- 中国地震局地球物理研究所. 2023. 2023 年 12 月 2 日云南德宏州芒市 5.0 级地震科技支撑简报[EB/OL]. [2023–12–04]. <https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280396.html>.
- Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. 2023. Science and technology support for the $M5.0$ earthquake in Mangshi, Dehong Prefecture, Yunnan Province on December 2, 2023[EB/OL]. [2023–12–04]. <https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280396.html> (in Chinese).
- 中国地震台网中心. 2023. 云南德宏州芒市 5.0 级地震[EB/OL]. [2023–12–02]. <https://news.ceic.ac.cn/CC20231202013633.html>.
- China Earthquake Networks Center. 2023. $M5.0$ earthquake in Mangshi, Dehong Prefecture, Yunnan Province[EB/OL]. [2023–12–02]. <https://news.ceic.ac.cn/CC20231202013633.html> (in Chinese).
- Chen W W, Wang D C, Wei S J. 2013. A study on the uncertainties of the centroid depth of the 2013 Lushan earthquake from teleseismic body wave data[J]. *Earthquake Science*, **26**(3/4): 161–168.
- Fox B D, Selby N D, Heyburn R, Woodhouse J H. 2012. Shallow seismic source parameter determination using intermediate-period surface wave amplitude spectra[J]. *Geophys J Int*, **191**(2): 601–615.
- Helmberger D V, Stead R, Liu P H, Dreger D. 1992. Broadband modeling of regional seismograms: Imperial Valley to Pasadena[J]. *Geophys J Int*, **110**(1): 42–54.
- Laske G, Ma Z T, Masters G, Pasyanos M. 2013. A new global crustal model at 1×1 degrees[EB/OL]. [2024–02–12]. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>.
- Lei X L. 2011. Possible roles of the Zipingpu Reservoir in triggering the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *J Asian Earth Sci*, **40**(4): 844–854.
- Liu Y, Yu Z Y, Zhang Z Q, Yao H J, Wang W T, Zhang H J, Fang H J, Fang L H. 2023. The high-resolution community velocity model V2.0 of southwest China, constructed by joint body and surface wave tomography of data recorded at temporary dense arrays[J]. *Science China Earth Sciences*, **66**(10): 2368–2385.
- Luo Y, Ni S D, Zeng X F, Zheng Y, Chen Q F, Chen Y. 2010. A shallow aftershock sequence in the north-eastern end of the Wenchuan earthquake aftershock zone[J]. *Science China Earth Sciences*, **53**(11): 1655–1664.
- Ma S T. 2010. Focal depth determination for moderate and small earthquakes by modeling regional depth phases sPg, sPmP, and sPn[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(3): 1073–1088.
- Rajkumar, Prajapati S K, Pal S K, Srivastava H N. 2022. Determination of focal depths of moderate earthquakes in Northeast Indian region using depth phase sPn[J]. *Nat Hazards*, **114**: 427–455.
- USGS. 2023. $M5.0$: 13 km W of Zhefang, China[EB/OL]. [2024–02–06]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000lf6x/moment-tensor>.

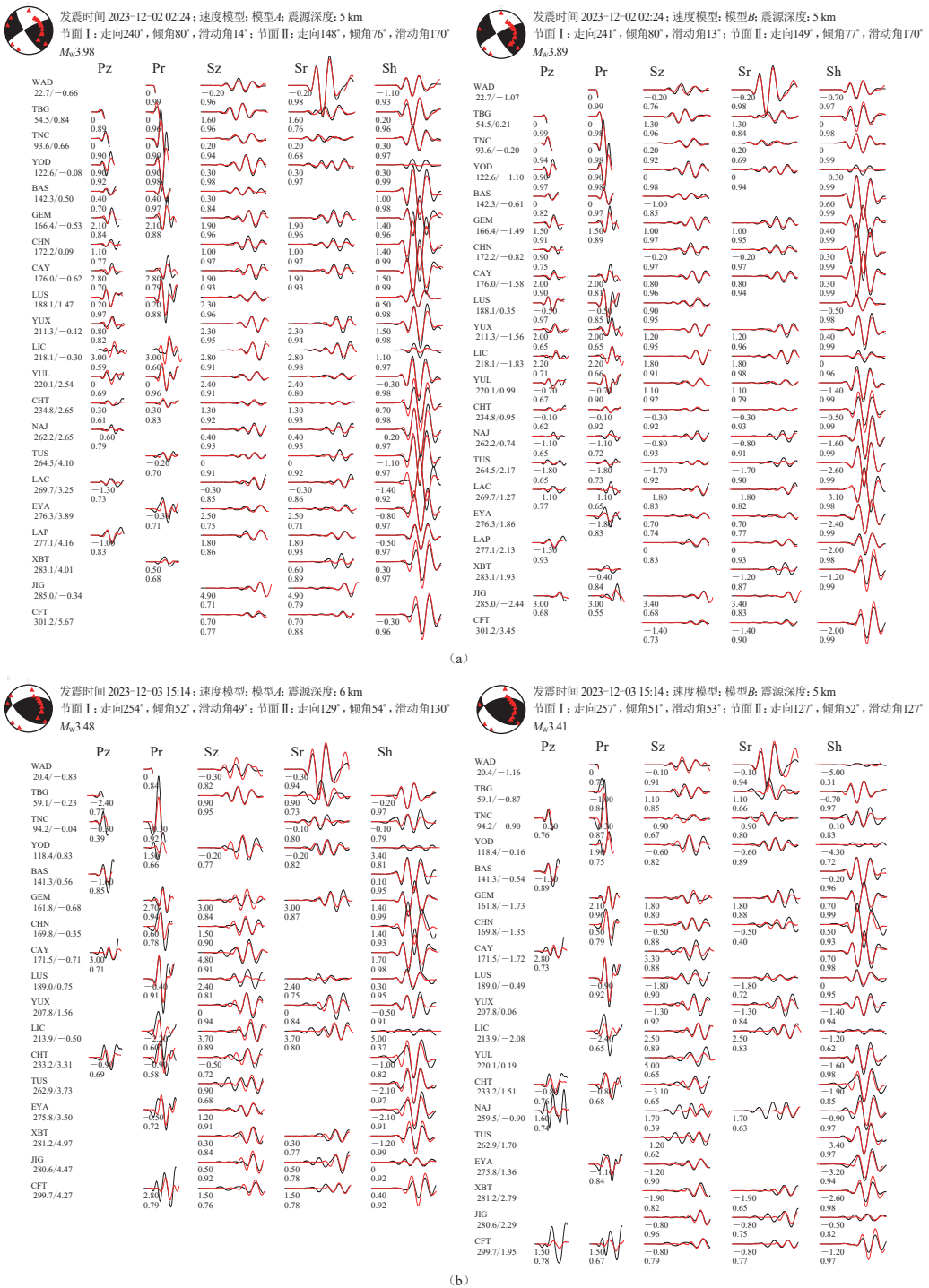
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6): 1353–1368.
- Wang Z J, Chong J J, Ni S D, Romanowicz B. 2011. Determination of focal depth by two waveform based methods: A case study for the 2008 Panzihua earthquake[J]. *Earthquake Science*, **24**(4): 321–328.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, Scharroo R, Wobbe F, Smith W H F, Tian D. 2019. The Generic Mapping Tools version 6[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **20**(11): 5556–5564.
- Xu Y, Li D N, Gao Y, He J B. 2015. Relocations of five Yingjiang sequences (China-Myanmar border): Details of seismogenic faults[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **105**(1): 314–329.
- Yao Y S, Wang Q L, Liao W L, Zhang L F. 2017. Influences of the Three Gorges Project on seismic activities in the reservoir area[J]. *Science Bulletin*, **62**(15): 1089–1098.
- Zhang M, Ge S M, Yang Q, Ma X D. 2021. Impoundment-associated hydro-mechanical changes and regional seismicity near the Xiluodu reservoir, Southwestern China[J]. *J Geophys Res*, **126**(9): e2020JB021590.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(1): 91–104.
- Zhao M, Long F, Yi G X, Liang M J, Xie J T, Wang S W. 2021. Focal mechanism and seismogenic structure of the $M_S5.1$ Qingbaijiang earthquake on February 3, 2020, southwestern China[J]. *Frontiers of Earth Science*, **9**: 644142.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1634–1641.
- Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media[J]. *Geophys J Int*, **148**(3): 619–627.

附录



附图 1 事件 202312020214 (a)和 202312020216 (b)基于速度模型 A (左)和 B (右)在最佳震源深度的理论波形(红线)与观测波形(黑线)的对比图

Fig. S1 Comparison of theoretical (red line) and observed (black line) waveforms using velocity model A (left) and B (right) for event 202312020214 (a) and 202312020216 (b) at the optimal source depth



附图 2 事件 202312020224 (a) 和 202312031514 (b) 基于速度模型 A (左) 和 B (右) 在最佳震源深度的理论波形(红线)与观测波形(黑线)的对比图

Fig. S2 Comparison of theoretical (red line) and observed (black line) waveforms using velocity model A (left) and B (right) for event 202312020224 (a) and 202312031514 (b) at the optimal source depth