

顾慧冬,姜金钟,李姣,等. 2024. 云南盐津2个地震序列震源参数测定及发震构造探讨[J]. 地震研究, 47(3): 391–404, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0040.

Gu H D, Jiang J Z, Li J, et al. 2024. Focal parameters and seismogenic structure of two earthquake sequences in Yanjin, Yunnan[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(3): 391–404, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0040.

云南盐津2个地震序列震源参数测定及发震构造探讨*

顾慧冬^{1,2}, 姜金钟^{1,2,3♣}, 李姣¹, 张演^{1,3}, 杨跃文¹, 王光明^{1,3}, 张帅^{1,3}, 姚远^{1,3}

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650504;

3. 中国地震局昆明地震预报研究所, 云南 昆明 650224)

摘要: 2021年1月23日云南盐津发生 $M_L 5.2$ 地震,在此次地震前后该区域已经发生了多次中小地震。为了更好地评估该地区的地震危险性并识别发震构造,利用云南和四川地震台网的近震波形资料,采用CAP方法和2种速度模型反演了盐津 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解和震源深度,结合sPn深度震相测定了盐津 $M_L 5.2$ 地震的震源深度,最后采用双差定位法对盐津地震序列进行重定位。结果表明:①最大震级为 $M_L 5.2$ 的“孤立型”地震序列发震断层为逆断层,走向近SN向、倾向东、倾角约 50° ,是一次沿断层面自下而上破裂较为充分的浅源地震;②最大震级为 $M_L 3.9$ 的“震群型”地震序列发震断层为走滑型断层,走向为NNW向、倾向北东、倾角约为 80° ,该序列内3次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解略有差异,可能是由于该区域复杂的断层结构和应力环境影响所致;③最大震级为 $M_L 3.9$ 的“震群型”地震序列的发震断层可能为盐津—筠连断裂,而最大震级为 $M_L 5.2$ 的“孤立型”地震序列的发震断层可能为华蓥山断裂与盐津—筠连断裂共同作用产生的一条未知隐伏断裂。

关键词: 盐津地震序列; 震源机制解; 重定位; sPn震相; 发震构造

中图分类号: P315.332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)03-0391-14

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0040

0 引言

印度板块与欧亚板块碰撞后持续的向北推挤和楔入作用使得青藏高原成为中国大陆岩石圈变形最为剧烈的区域(邓起东等, 2002; 徐锡伟等, 2003),而地处青藏高原东南缘的云南滇东北地区构造变形剧烈、地震活动频发,区域内发生了诸如1974年大关7.4级地震、2014年鲁甸6.5级地震等多次破坏性强震,并造成严重人员伤亡和财

产损失(刘正荣等, 1977; 徐锡伟等, 2014),使得该地区成为地震监测预报和国内外学者科学研究的重点区域。

高精度的地震定位结果不仅能够揭示地震的时空迁移活动,更有助于研究发震构造精细形态和地震成核过程,尤其在一些没有地表出露的盲断层和研究程度较低的次级断层相关研究中更能发挥作用(姜金钟等, 2021; 王光明等, 2021; 李姣等, 2020),此外,基于区域宽频带地震波形反演可提供相对全球台网更加准确可靠的中小地

* 收稿日期: 2023-09-07.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH212502Y); 云南省地震局科技专项(2021ZX04); 云南省地震局传帮带项目(CQ3-2021003); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH21039Y); 云南省地震局“地震机理与孕震环境研究”创新团队.

第一作者简介: 顾慧冬(1992-), 硕士研究生在读, 工程师, 主要从事震源机制和破裂方向性等方面研究.

E-mail: 1574354495@qq.com.

♣通信作者简介: 姜金钟(1987-), 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事地震学研究.

E-mail: jz_jiang@foxmail.com.

震震源机制解。考虑到 CAP 方法 (Zhao, Helmburger, 1994; Zhu, Helmburger, 1996) 对 $M_L \geq 3.5$ 地震可获得准确可靠的结果, 但对波形信号以高频为主的 $M_L < 3.5$ 小地震反演效果不好等因素, 本文基于云南和四川地震台网记录的震相和波形资料, 利用 CAP 方法在 2 种不同区域速度模型下分别反演研究时段内盐津地区 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解和最佳震源深度, 并利用 sPn 深度震相进一步确认 2021 年盐津 $M_L 5.2$ 地震的震源深度的可靠性, 然后利用 M&L 方法检测研究时段内的微小地震, 采用双差地震定位法 (Waldhauser, Ellsworth, 2000) 对这些地震事件进行重定位, 最后综合震源区 2 年多时间尺度的地震空间分布特征、 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解以及区域地质资料等讨论盐津地震序列的潜在发震构造。

1 研究数据和方法

1.1 地震概况及构造背景

根据云南地震台网提供的地震目录, 2019 年 7 月 1 日至 2022 年 2 月 28 日, 云南省昭通市盐津县 (28.180°N , 104.182°E) 共记录到地震 476 次, 其中 $M 0.0 \sim 1.9$ 地震 451 次, $M 2.0 \sim 2.9$ 地震 19 次, $M \geq 3.0$ 地震 6 次。其中, 2020 年 9 月 29 日至 10 月 21 日, 震区内发生 4 次 $M_L 3.0$ 以上地震 (表 1), 随后的 2021 年 1 月 23 日该区域又发生了 $M_L 5.2$ 地震, 震源深度 10 km。

为了研究盐津地区的地震活动性, 张演等 (2024) 利用模板匹配定位法获得了盐津地区 2020 年 1 月 1 日至 2021 年 2 月 7 日期间相对于云南地震台网目录更完备的地震目录, 并结合地震重定位结果分析讨论了地震序列类型及其可能的发震构造。其研究结果认为 2020 年 9 月 29 日至 10 月 21 日的 4 次 $M_L > 3.0$ 地震及后续事件所构成的地震序列 (后文称为 $M_L 3.9$ 地震序列) 和 2021 年 1 月 23 日的 $M_L 5.2$ 地震序列是发生在不同断层上的两种类型的地震序列。但张演等 (2024) 的研究时段截止时间为 $M_L 5.2$ 地震震后 15 天 (2021 年 2 月 7 日), 此时该区域余震活动尚未结束, 对序列类型的判定以及发震断层形态等研究仍存在一定的制约作用。因此, 本文选取的研究时段为 2019

年 7 月至 2022 年 2 月, 覆盖了 $M_L 3.9$ 地震前 1 年至 $M_L 5.2$ 地震后 1 年。

盐津地震序列发生在川滇块体东侧的凉山次级块体东南缘, 属于南北地震带中南段。震源区及附近地区地形地貌复杂、构造运动强烈, 地质构造形迹以褶皱和断裂为主。初步定位结果显示研究时段内的地震位于关村断裂、五莲峰断裂、华莹山断裂带和盐津—筠连断裂的交会处 (图 1a), 其中关村断裂 (F_1) 是马边—盐津断裂带的组成部分, 断层走向约 300° , 运动性质以走滑为主; 五莲峰断裂 (F_2) 是以右旋走滑兼逆冲、或以逆冲为主的区域性大断裂 (常祖峰等, 2014; 闻学泽等, 2013); 盐津—筠连断裂 (F_3) 是由一系列相互错断且规模较小的断裂组成, 整体呈近 EW 向分布, 断层延伸长度约 20 km, 断层附近岩石遭受挤压破碎较为严重 (向小龙等, 2015); 华莹山断裂 (F_4) 是一条切割基底的深大断裂, 总体走向 $N45^\circ\text{E}$, 倾向南东, 倾角 $30^\circ \sim 70^\circ$, 在地表表现为断褶带, 由一组沿一系列 NE 向背斜轴部延伸的数条呈羽状排列的压性或压扭性断层组成, 出露断续且规模不大, 长度多在几千米至几十千米 (周荣军等, 1997)。

1.2 台站分布和数据选取

由于盐津地震序列发生在滇东北地区, 云南及四川地震台网的部分台站记录到了震相清晰、信噪比高的地震波形, 为后续研究提供了有力的数据支持。本文采用的所有可用台站分布见图 1b, 这些固定台站方位角分布均匀, 形成较好的台站包围, 可以最大程度保证震源机制解、震源深度的准确性和可靠性。需要指出的是, 针对不同研究方法的基本原理和数据要求, 本文选取了不同的台站波形数据组合, 如 CAP 方法反演震源机制解选用 250 km 范围内的地震波形数据, 地震重定位选用 150 km 范围之内的波形数据, 基于深度震相的震源深度测定则选用 250 ~ 450 km 范围内的波形数据。为了更好地分析盐津地区地震活动特征, 本文延续张演等 (2024) 的区域划分方法, 将 2020 年 9 月 29 日至 10 月 21 日发生的 4 次 $M_L > 3.0$ 地震事件所在区域分为 A 区, 2021 年 1 月 23 日发生的 $M_L 5.2$ 地震所在区域分为 B 区 (图 1a 及图 2)。

表1 云南地震台网给出的2019年7月—2022年2月盐津 $M_L\geq 3.0$ 地震目录

Tab. 1 The catalogue of earthquakes ($M_L\geq 3.0$) in Yanjin area from the Yunnan Seismic Network (July 2019 – February 2022)

所在区域	事件	日期	时间	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	震级(M_L)
A 区	202009290822	2020-09-29	00:22:01.60	28.089	104.163	5.0	3.2
	202009291340	2020-09-29	05:40:43.60	28.062	104.150	7.0	3.5
	202009300249	2020-09-29	18:49:11.60	28.078	104.163	13.0	3.9
	202010211446	2020-10-21	06:46:09.00	28.098	104.153	8.0	3.5
	202103131911	2021-03-13	11:11:04.70	28.093	104.153	8.0	3.0
B 区	202101230959	2021-01-23	01:59:10.26	28.180	104.182	10.0	5.2

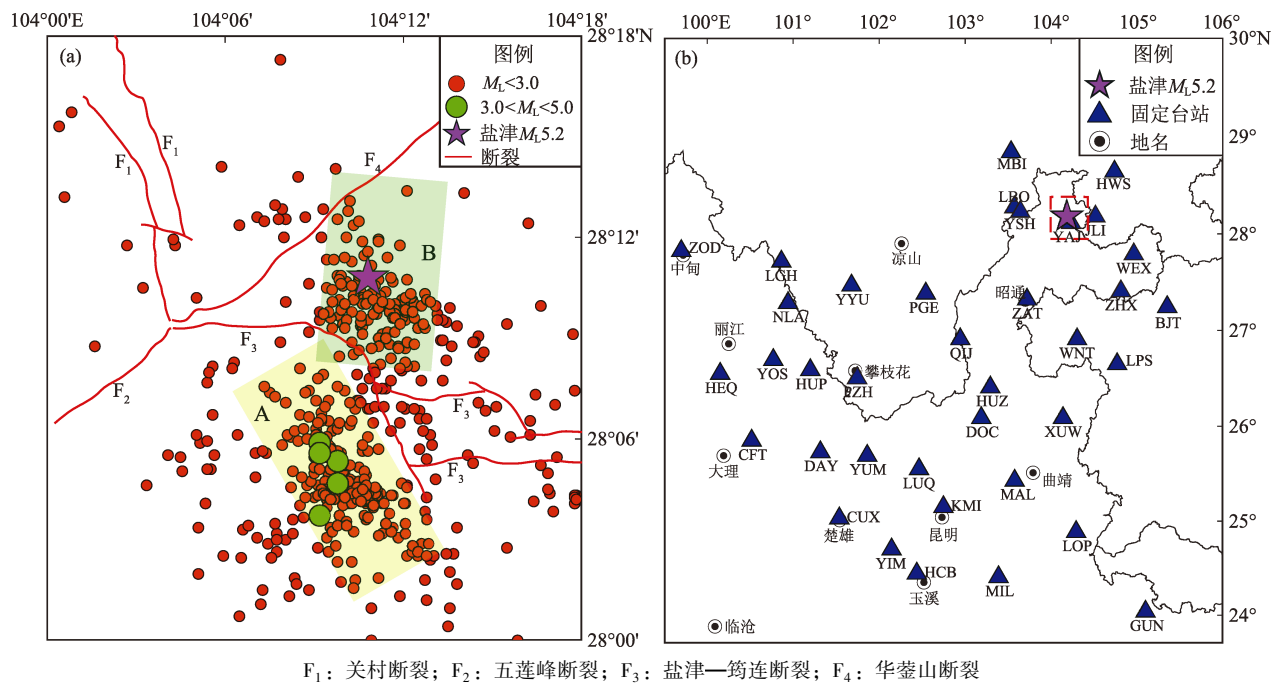


图1 盐津地区2019年7月—2022年2月地震震中位置 (a) 及周边台站分布 (b)

Fig. 1 Distribution of the faults, epicenters (a), and the surrounding stations (b) in Yanjin area during July 2019 – February 2022

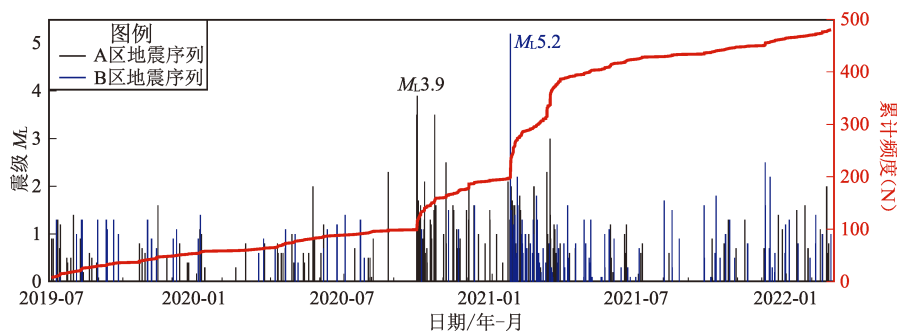


图2 盐津2个地震序列 $M-T$ 图

Fig. 2 The $M-T$ map of two earthquake sequences in Yanjin during July 2019 – February 2022

1.3 研究方法和速度模型

准确可靠的震源位置是研究地震序列发震构造、分析余震活动趋势的重要依据 (Hauksson,

Shearer, 2005; 房立华等, 2013; 付虹等, 2011)。地震定位的方法有很多种, 近年来应用最为广泛的双差定位法是一种相对定位法, 其基本原理是

对发生在同一区域的地震事件,选取满足一定条件的地震事件两两组对,利用地震对的 P、S 震相观测走时差与理论计算值的走时差的残差(即为“双差”)来确定地震事件对的相对位置,得到的地震位置可以很好地刻画发震断层形态(杨智娴等, 2003; 王未来等, 2014; Jiang *et al.*, 2019; 樊文杰等, 2023)。

震源机制解是研究地震发震断层运动学参数和区域构造应力的基础(崔效锋, 谢富仁, 1999; 郑勇等, 2009),常用的震源机制解反演方法有 P 波初动法、振幅比法和全波形反演方法,前两种方法受台站分布以及地壳速度结构的影响较大,对于台站分布相对稀疏或尚无精细区域速度模型的地区适用性较低。目前国内外学者大多采用 CAP 方法(Zhu, Helmberger, 1996)反演中小地震的震源机制解并获得了较为准确的结果(Zhao *et al.*, 2021; 张建勇等, 2022; Tan *et al.*, 2006)。CAP 方法充分利用区域宽频带地震波形所携带的震源信息,将地震波形分成较短周期的 Pnl 波和较长周期的 S 波或面波两部分,分别对其赋予不同的权重,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地震震源机制解和最佳矩心深度。

虽然 CAP 方法允许 Pnl 波、S 波或面波在拟合的时候存在一定量的时间滑移以降低因地壳速度模型精度不够引起的误差,但更加准确的区域速度结构模型在一定程度上可以有效提高反演结果的准确性,也有利于进一步的研究分析(如震源破裂方向性研究)。由于目前盐津地区尚无精细的区域速度模型,本文选用盐津附近区域的 2 个速度模型(图 3)进行反演:一是由易桂喜等(2019)基于“多阶段定位法”(Long *et al.*, 2015)获取的长宁地区一维速度模型(模型一);二是吕坚等(2013)反演昭通彝良 $M_s 5.7$ 地震震源机制解所用的一维速度模型(模型二),该模型来源于扬子地块地震测深剖面数据(朱介涛等, 2005)。

sPn 深度震相是测定近距离($\Delta < 1\ 000\ \text{km}$)浅源地震震源深度比较实用的震相之一(房明山等, 1995; 任克新等, 2004)。其基本原理是利用 sPn 震相与 Pn 震相走时差几乎不随震中距的

变化而变化这一特性来确定震源深度。sPn 震相与 Pn 震相在传播路径上的差异主要表现为 sPn 在震源上方上行 S 波、下行 P 波路径以及上地幔顶部很小的距离差,较小的路径差异使得相同台站记录的 sPn 与 Pn 震相走时差主要与震源深度有关,与震中距几乎无关(潘睿等, 2019)。根据这一特性通过准确拾取 Pn 和 sPn 震相,计算二者之间的走时差可以得到较为准确的地震源深度(Saikia *et al.*, 2001; Ma, 2010; Rajkumar *et al.*, 2022; 王瑶, 万永革, 2021)。

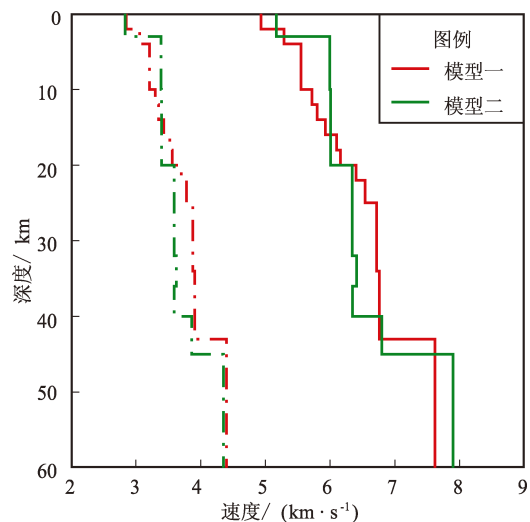


图 3 CAP 反演中用到的两种一维速度模型

Fig. 3 Two 1-D velocity models used in CAP inversions

2 CAP 方法反演震源机制解

针对盐津两个地震序列中 4 次 $M_L \geq 3.5$ 地震,本文选择云南和四川地震台网中震中距小于 250 km 且台站方位分布较均匀(图 1a)的宽频带地震波形数据,对其做去均值、去线性趋势、去除仪器响应等波形数据预处理后,将速度记录从南北(N)、东西(E)和垂直(Z)分量旋转到大圆弧路径上,从而获得径向(R)、切向(T)和垂直向(Z)分量的波形记录。基于选定的 2 种区域速度模型采用频率-波数(F-K)法(Zhu, Rivera, 2002),分别计算不同震中距(5~300 km)、不同震源深度(2~20 km)下的格林函数用于 CAP 反演。

反演过程中,滤波频段的设置是影响震源机制解反演结果的重要因素。首先将 Pnl 波窗长设为 30 s、S 波窗长设为 70 s,反演权重分别设为 1 和 0.5,然后对 Pnl 部分以 0.05 ~ 0.20 Hz、S 波部分以 0.05 ~ 0.10 Hz 进行 4 阶 Butterworth 带通滤波,所选滤波频段不仅可以过滤掉长周期脉动,还能有效降低地壳结构横向不均匀性所带来的影响,这也是大部分学者在 CAP 方法波形拟合中所采用的滤波频段(易桂喜等,2019;郑勇等,2009;姜金钟等,2021;洪德全等,2013),最后在断层走向($0^{\circ} \sim 360^{\circ}$)、倾角($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$)、滑动角($-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$)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深度。

本文基于 16 个台站的宽频带地震波形记录,利用 CAP 方法反演了 2 种速度模型下盐津 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解和震源深度(表 2)。由震源深度拟合误差图(图 4)可知,当 A 区的 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源深度在 7 ~ 8 km 时,波形拟合误差最小;当 $M_L 5.2$ 地震的震源深度为 7 km 时,波形拟合误差最小。此外,综合对比 4 次 $M_L \geq 3.5$ 地震最佳震源深度上的波形拟合误差值

以及不同台站观测波形与理论合成波形的平均互相关系数值,本文认为利用易桂喜等(2019)的速度模型(模型一)反演得到的震源机制解更为可靠,因此本文采用模型一用于后续的双差地震定位研究。

由震源机制解反演结果可知(表 2),利用 2 种速度模型反演得到同一地震的震源机制解基本一致,而利用同一种速度模型反演得到 A 区的 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震与 $M_L 5.2$ 地震的震源机制解差异较大:前者均为倾角约 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的走滑型地震,后者则为倾角约 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的逆冲型地震。由此表明发生在 A 区内 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震事件与发生在 B 区内的 $M_L 5.2$ 地震的孕震机理及发震构造不一致,与张演等(2024)基于两个序列的双差重定位结果得到的结论基本一致。

本文反演得到的盐津 $M_L 5.2$ 地震是一个逆冲型地震(图 5),最佳双力偶解节面 I: $340^{\circ}/44^{\circ}/70^{\circ}$;节面 II: $186^{\circ}/52^{\circ}/107^{\circ}$,与 GCMT 利用全球共享台站波形数据反演结果(节面 I: $339^{\circ}/45^{\circ}/67^{\circ}$;节面 II: $189^{\circ}/49^{\circ}/111^{\circ}$)基本一致。需要说明的是,发生在 A 区内的 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震事件

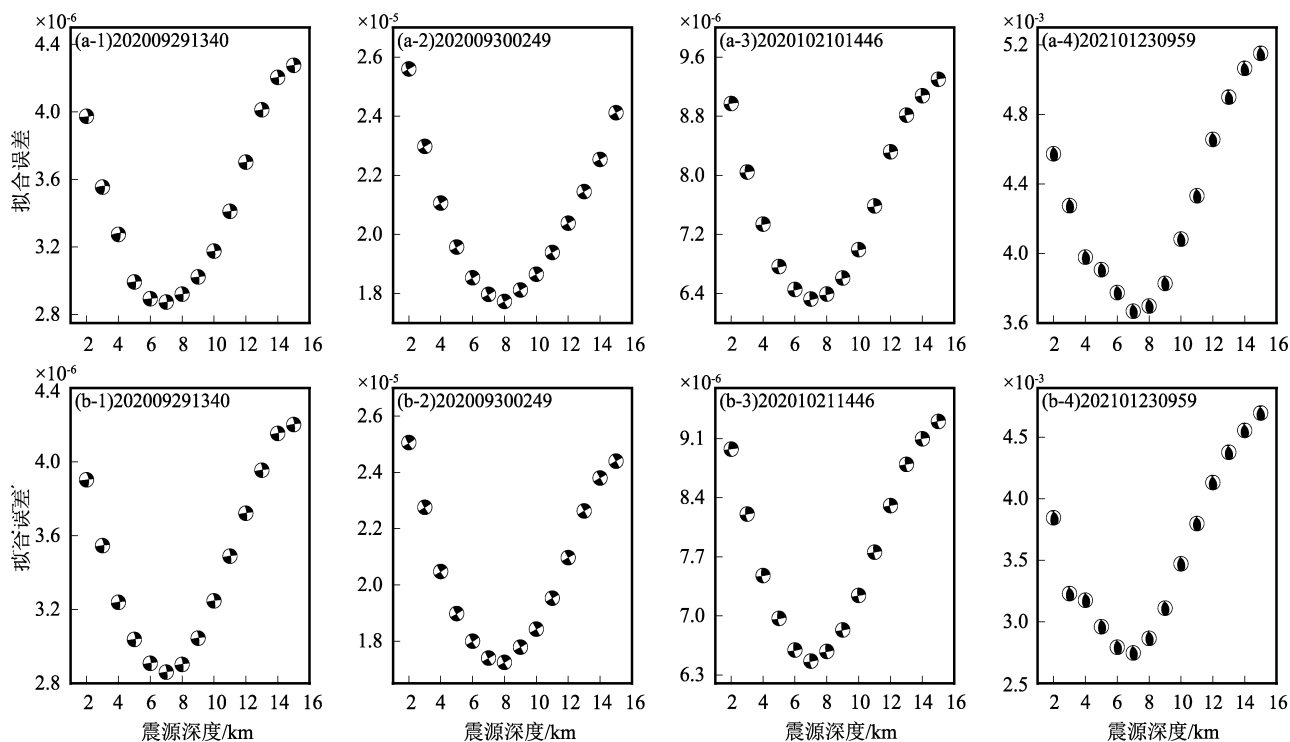


图 4 利用模型一 (a)、二 (b) 反演盐津 $M_L \geq 3.5$ 地震震源深度拟合误差图

Fig. 4 Fitting errors of the focal depths of the earthquakes ($M_L \geq 3.5$) in Yanjin inverted by using Model I (a) and Model II (b)

由于震级较小,国内外相关研究机构并未给出相应地震的震源机制解,而本文利用2种速度结构模型反演同一地震的震源机制解较为一致,且80%以上的理论波形与实际波形互相关系数大于0.7,表明本研究的反演结果较为稳定可靠。本文利用

CAP方法反演得到的盐津 $M_L5.2$ 地震震源深度为7 km,与云南地震台网正式目录给出的震源深度(10 km)以及GCMT给出的震源深度(12 km)均有一定差别,因此有必要采用其他方法进一步验证盐津 $M_L5.2$ 地震震源深度。

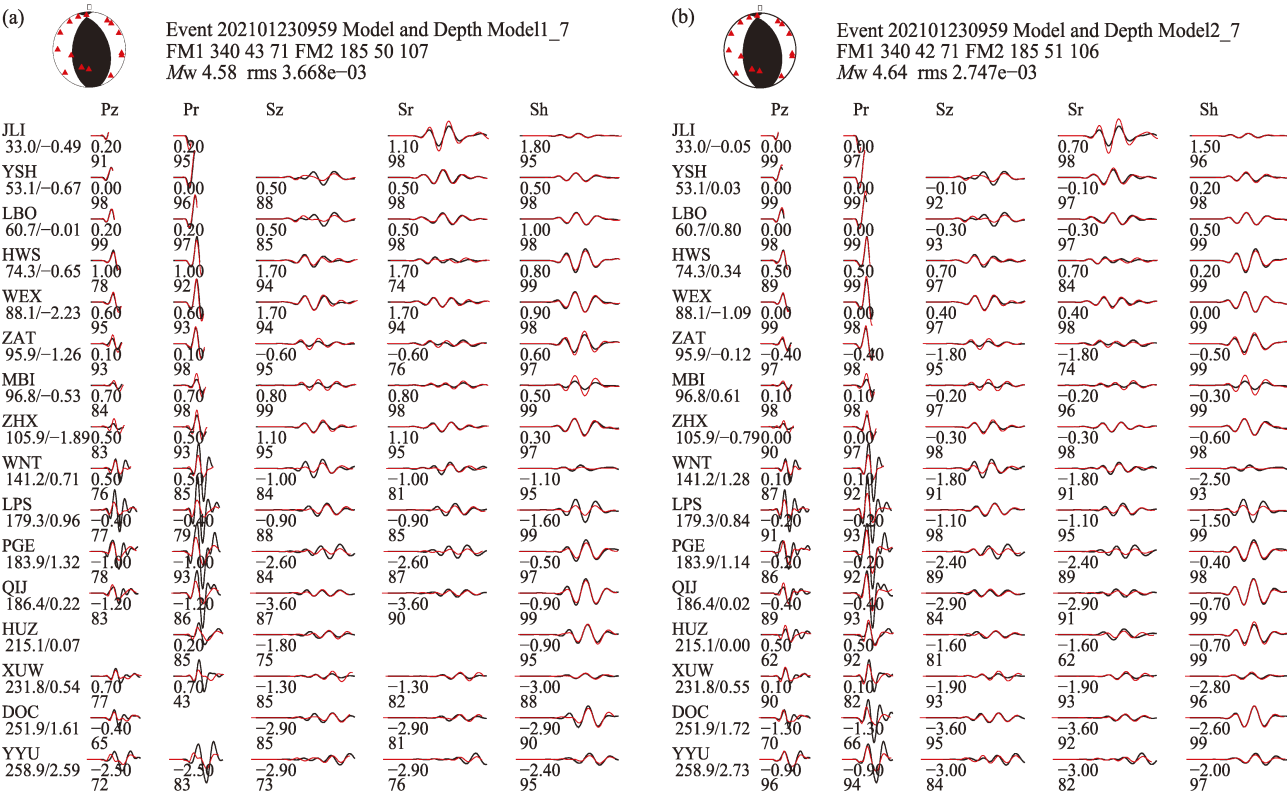


图5 利用模型一(a)、二(b)反演得到盐津 $M_L5.2$ 地震在震源深度7 km的理论波形(红线)和观测波形(黑线)对比图

Fig. 5 Comparison between the synthetic (red line) and the observed (black line) seismograms of the Yanjin $M_L5.2$ earthquake at a source depth of 7 km by inversion using Model I (a) and Model II (b)

表2 利用CAP方法反演盐津 $M_L\geq3.5$ 地震的震源机制解

Tab. 2 Focal mechanisms of the earthquakes ($M_L\geq3.5$) in Yanjin inverted by using CAP method

事件	地震	速度模型	震源深度/ km	节面 I / (°)			节面 II / (°)		
				走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
202009291340	$M_L3.5$	模型一	7	353	78	1	263	89	168
		模型二	7	352	80	3	261	87	170
202009300249	$M_L3.9$	模型一	8	152	84	1	62	89	174
		模型二	8	151	84	2	61	88	174
202010211446	$M_L3.5$	模型一	7	172	78	8	80	82	168
		模型二	7	172	77	5	81	85	167
202101230959	$M_L5.2$	模型一	7	340	43	71	185	50	107
		模型二	7	340	42	71	185	51	106

3 利用 sPn 深度震相测定盐津 $M_L 5.2$ 地震震源深度

基于射线理论和速度模型一，利用 TauP 程序 (Crotwell *et al.*, 1999) 计算得到的 sPn 与 Pn 震相理论到时表明：对于震源深度为 8 km 的地震事件，sPn 与 Pn 震相的理论走时随震中距的增加而线性增加，但定时差几乎不随震中距的变化而变化 (图 6a)；而当震源深度逐渐增加时，sPn 与 Pn 震相的到时差近似线性增加 (图 6b)。

鉴于 sPn 与 Pn 震相的走时差对震源深度的

变化较为敏感、但几乎不随震中距的变化而变化的特性，利用 sPn 深度震相不仅可以减小因台站分布稀疏导致的震源深度定位误差，还能有效克服发震时刻与震源深度的折中效应。如果能够准确拾取 Pn 和 sPn 震相，通过计算其走时差就可以得到较为准确的震源深度。为避免错误拾取 Pn 震相到时，由速度模型一计算各震相的理论走时可知，当台站震中距大于 220 km 时 Pn 波成为初至震相。因此，本文选取震中距在 250 ~ 450 km 范围内且记录质量较好的宽频带地震波形，通过人工拾取 sPn 与 Pn 震相到时来测定盐津 $M_L 5.2$ 地震震源深度。

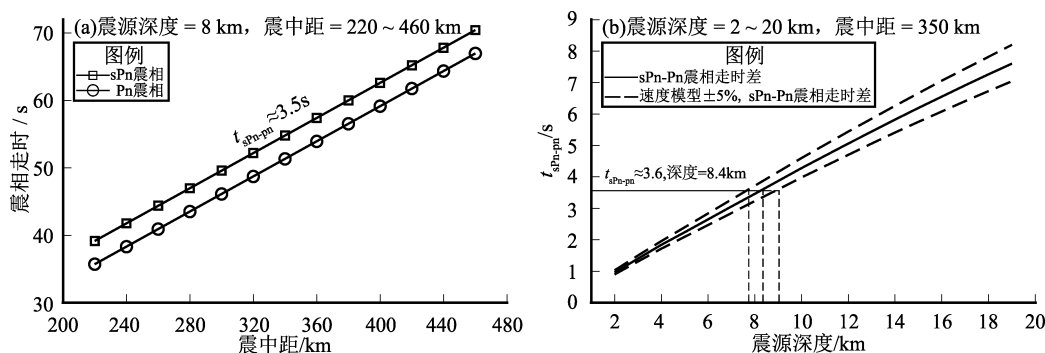


图6 利用速度模型一计算得到的不同震源深度和震中距的 sPn 及 Pn 震相理论走时 (a) 及理论走时差 (t_{sPn-Pn}) 变化 (b)

Fig. 6 The theoretical travel time of sPn and Pn phases (a) and their difference values t_{sPn-Pn} (b) calculated by using Model I

sPn 震相是由 S 波入射到地表反射转换形成的震相，其动力学特征保持横波性质，最终以纵波的形式出现在地震记录中，所以其垂直分量上 sPn 振幅明显大于 Pn 振幅 (吕俊强, 2013; 洪德全等, 2013)。然而，人工拾取 sPn 与 Pn 震相易受波形信噪比、拾取经验、地下介质横向不均匀性等因素影响，通常会造成 0.5 ~ 1 s 的拾取误差，对应的深度测量误差达 1.5 ~ 3 km (孙茁等, 2014)。一般情况下，区域地下介质的横向不均匀性会随震中距的变化而变化，可能会导致 sPn 震相的拾取误差甚至错误地拾取 sPn 震相，为此孙茁等 (2014) 和李姣等 (2021) 利用相近方位角的地震波形记录准确识别了 sPn 震相。考虑到盐津及周边地区复杂的速度结构，本文也采取类似的方法：首先对宽频带地震波形数据去除仪器响应并以

0.05 ~ 1 Hz 进行带通滤波，然后人工拾取并对齐每个台站垂直分量的 Pn 震相到时，最后根据波形数据质量及台站分布情况，选取方位角约为 250° 的 8 个台站波形记录 (表 3)，这些台站均较为清晰地记录到 Pn 和 sPn 震相 (图 7)。从图 7 中可知，当对齐 Pn 震相 (将 Pn 震相到时设置为 0 时刻) 时，在约 3.6 s 处出现了一个与震中距大小无关且振幅较 Pn 更大的震相 (虚线)，经过对比分析认为该震相为 sPn 震相。值得注意的是部分台站记录波形的 sPn 震相到时并不完全一致，这可能是由于地下介质不均匀性所导致的波形差异。经过震相识别可确定 sPn 与 Pn 震相的平均走时差约为 3.6 s (图 7)，对照该地区理论走时差线性图 (图 6b)，最终确定盐津 $M_L 5.2$ 地震的初始破裂深度约为 8.4 km。

表 3 利用 sPn 震相测定盐津 $M_L5.2$ 地震震源深度的
台站震中距和方位角

Tab. 3 Epicentral distances and azimuths of the seismic stations
determining the focal depth of the Yanjin $M_L5.2$
earthquake using sPn phase

台站代码	台站名称	震中距/km	方位角/(°)
YYU	盐源台	259	253
PZH	攀枝花台	304	233
LGH	泸沽湖台	331	261
NLA	烂泥坝台	334	254
HUP	华坪台	344	240
LJH	丽江台	415	251
HEQ	鹤庆台	437	247
ZOD	中甸台	442	266

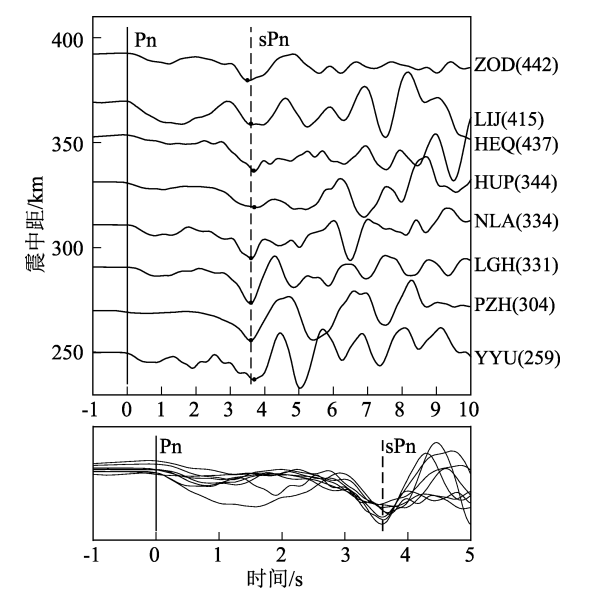


图 7 不同震中距的台站记录到的盐津
 $M_L5.2$ 地震 Pn 及 sPn 震相
Fig. 7 The Pn and sPn phases of the Yanjin
 $M_L5.2$ earthquake recorded by stations

4 盐津地震序列重定位

针对无法利用 CAP 方法反演震源机制的微小地震事件，在张演等（2024）研究的基础上，将盐津地区的研究时段扩大为 2019 年 7 月至 2022 年 2 月，采用 M&L 方法（Zhang, Wen, 2015）检测云南地震台网目录中未记录的微小地震，并利用双差地震定位方法（Waldhauser, Ellsworth, 2000）

对这些地震事件进行重定位，进一步分析研究该地区的地震序列类型及发震构造。选取 2019 年 7 月至 2022 年 2 月期间共 476 次地震作为模板事件，将模板事件的 P、S 震相波形与相同台站记录的连续波形进行检测与定位（张演等，2024），最终获得了 2 320 次地震的震源位置和震级等参数，使用 M&L 方法检测出的地震数量大约是云南地震台网目录中的 5 倍。

为了获得更加准确的震源位置，本文在 M&L 检测得到的地震目录的基础上通过人工复核、手动拾取 P、S 震相到时，总共得到了 13 924 条 P 波和 18 534 条 S 波的观测报告走时差数据，同时采用张演等（2024）得到的 2 299 条 P 波和 5 824 条 S 波互相关走时差数据用于后续的双差重定位。本文在重定位参数选取过程中，考虑到大部分地震事件仅被 3 个以下台站记录，选取当地震对的震相“链接”条数大于 4 条时才参与定位，然后利用 HypoDD 程序对地震丛集分析挑选出来的 541 个地震事件进行双差定位，定位过程中分别对 P、S 波数据赋予 1.0 和 0.5 的权重，经过 2 轮共 20 次迭代反演，最终得到了 494 次地震事件的震源位置，重定位的地震数量相对张演等（2024）的研究提升了约 40%。为了评估双差定位的不确定性，参照张演等（2024）的分析方法得到在 95% 置信水平下定位误差椭圆的 NS 向、EW 向和垂向误差均值分别约为 1.2、2.0、2.3 km，重定位后的震源位置分布特征与张演等（2024）的研究结果基本一致。震源空间分布显示两次地震序列的发震断层具有明显差异的走向和倾角（图 8）：发生在 A 区的地震发震断层走向为 NNW 方向，倾角约为 80°（图 8c）；发生在 B 区的地震发震断层走向近 SN 向，倾角约为 50°（图 8d），此外更长时间尺度的地震目录也表明 B 区西北方向似乎确实存在一条地震活动更弱的次级断层（图 8b）。

5 讨论

本文通过地震检测及重定位得到了更长时间尺度且更加精确的地震目录，并利用波形资料反演获得较大地震的震源机制解等参数，重定位后震区内绝大部分地震事件主要沿两条不同走向

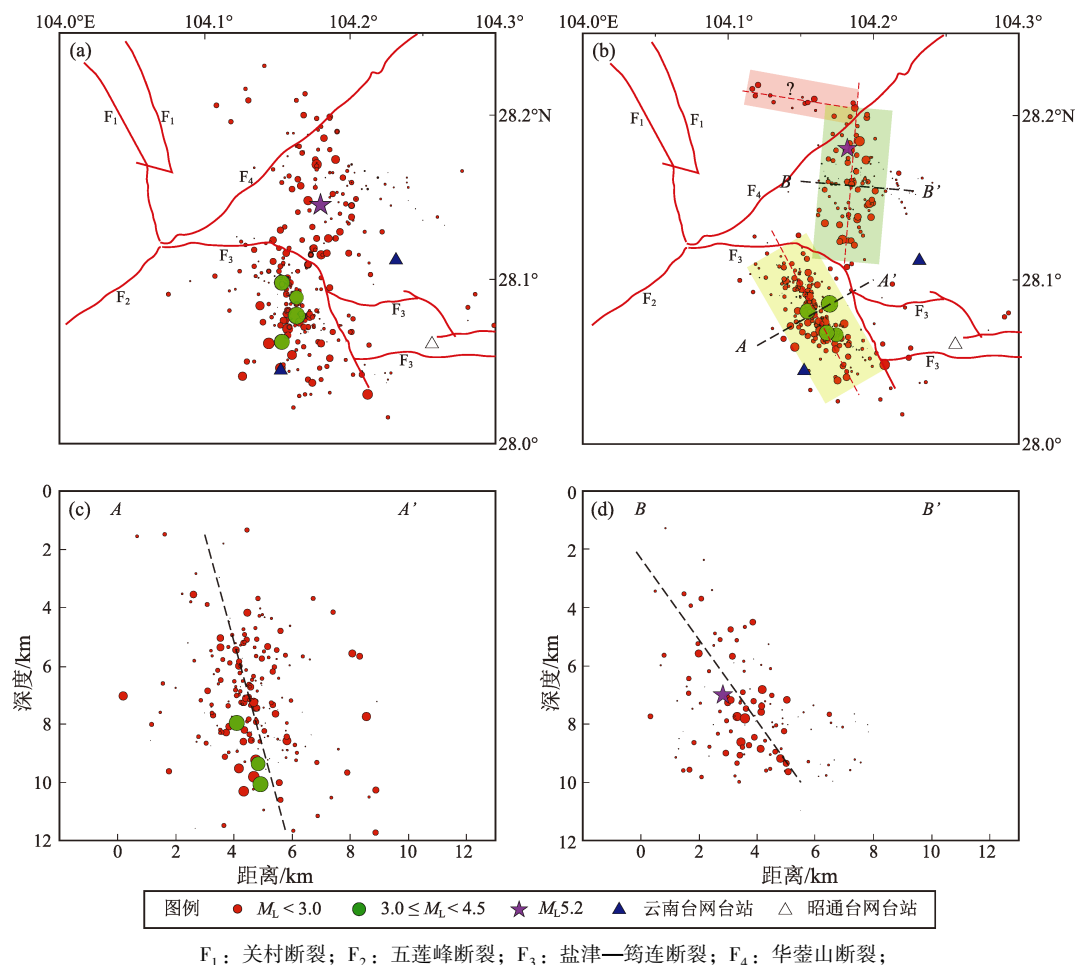


图8 2019年7月—2022年2月M&L检测后的地震目录在双差重定位前(a)、后(b)的震中分布及地震事件沿AA'(c)和BB'(d)剖面的震源深度分布

Fig. 8 Distribution of the epicenters of the earthquakes from July 2019 to February 2022 before (a) and after (b) DD relocation of the earthquake catalog through M&L detection, and the earthquakes' hypocenters along profile AA' (c) and BB' (d)

的地震条带分布：一条走向为NNW向，与附近的盐津—筠连断裂走向一致（A区）；另一条走向为近SN向，处在盐津—筠连断裂与华蓥山断裂的交会区域（B区）。研究时段内A区共发生5次 $M_L \geq 3.0$ 地震（最大震级为 $M_L 3.9$ ），其中3次 $M_L \geq 3.5$ 地震震源机制解反演结果表明这些地震均为左旋走滑地震；B区内最大地震震级为 $M_L 5.2$ （最大余震为 $M_L 2.5$ ），其震源机制解反演结果表明该地震为逆冲型地震。需要指出的是A区内3次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解反演结果又略有差异： $M_L 3.5$ 地震（202009291340）与 $M_L 3.5$ 地震（202010211446）走向相差 180° ， $M_L 3.9$ 地震（202009300249）与 $M_L 3.5$ 地震（202010211446）

走向相差 20° （表2），分析其原因一方面可能是这些地震震级较小且发震断层倾角陡直（约 80° ），导致CAP方法反演误差存在断层走向相差 180° （即断层倾向相反）或约 20° 的差异，另一方面是该地区可能确实存在较为复杂的断层构造系统，2021年漾濞地震序列也有类似的断层参数差异现象（姜金钟等，2021）。综合地震活动空间分布特征及震源机制解，依据地震序列类型判定标准（蒋海昆等，2015，2023）可以确定，盐津地区自2019年7月至2022年2月发生了2种不同类型的地震序列，即A区地震事件所构成的最大震级为 $M_L 3.9$ 的“震群型”地震序列，B区地震事件所构成的最大震级为 $M_L 5.2$ 的“孤立型”地震序列，

地震序列类型与张演等 (2024) 的研究结果一致。

利用 sPn 与 Pn 震相到时差测定盐津 $M_L5.2$ 地震初始破裂深度, 其误差主要来源于震相到时拾取误差和一维速度模型与地下真实速度结构的差异。孙苗等 (2014) 通过对比人工拾取与采用波形互相关方法拾取 Pn 震相到时发现人工拾取震相的平均误差约为 0.12 s, 对应的深度误差约为 0.3 km。本文对盐津地区的速度模型添加 $\pm 5\%$ 的误差, 利用 sPn 与 Pn 震相到时差计算得到的震源深度将会产生约 0.65 km 的误差 (图 6b)。综合震相拾取误差与速度模型差异, 本文认为利用 sPn 与 Pn 震相到时差测定盐津 $M_L5.2$ 地震初始破裂深度误差小于 1 km。同时, 利用 CAP 方法反演得到 $M_L5.2$ 地震的矩心深度为 7 km, 而利用 sPn 深度震相测定的初始破裂深度为 8.4 km, 即使考虑基于 sPn 震相的测定误差, 两种方法测定的震源深度也存在一定差异, 据此可以推断盐津 $M_L5.2$ 地震可能存在沿断层面自下而上的破裂过程。

大地震通常发生在大型断裂带上且破裂长度及延伸范围较大, 余震分布往往呈现出明显的条带状特征, 所以比较容易识别其发震断层面 (张勇等, 2014), 但对于发生在次级断裂或盲断层上的中小地震, 由于其发震断层容易受区域构造环境的影响, 当震源附近的构造背景较为复杂时, 很难准确识别出发震断层。此次盐津地震并未产生地表破裂且震区内断裂发育, 因此关于盐津地震序列的发震构造需要结合震源机制解、震源深度、地震重定位和区域地质构造等研究结果综合讨论。

对于盐津 $M_L5.2$ “孤立型”地震序列, 余震重定位空间展布显示该地震序列优势分布走向近 SN 向, 倾角相对较缓 (约 50°), 倾向为 E 向, 且震源机制解反演结果与余震重定位空间分布特征相吻合 (图 8d)。因此, 本文认为该序列发震断层为走向近 SN 向的逆冲型断层。重定位后的震中位置显示, 盐津 $M_L5.2$ “孤立型”地震序列处在华蓥山断裂和盐津—筠连断裂交会形成的楔形区, 与华蓥山断裂的走向呈约 45° 角度斜交。国内外许多震例也具有类似特征, 如 2014 年云南景谷 $M_s6.6$ 地震的余震主要呈 NW 向分布, 与 NS 向的永平盆地东缘断裂呈约 45° 斜交 (李丹宁等, 2017; 毛泽斌等, 2019)。毛泽斌等 (2019) 认为

景谷 $M_s6.6$ 地震是在区域构造应力的作用下由处在楔形区的 NS 向和 NE 向断裂共同作用孕育产生的新破裂, 岩石力学实验 (杜异军, 马瑾, 1986; 马瑾等, 2002) 也证实此类构造部位是易于积累应力的区域。综上分析, 本文初步推测认为盐津 $M_L5.2$ “孤立型”地震序列发震断层可能为 NE 向的华蓥山断裂与近 EW 向的盐津—筠连断裂共同作用产生的一条走向近 SN 向、倾角约为 50° 的逆冲型隐伏断裂。

对于最大震级为 $M_L3.9$ 的“震群型”地震序列, 余震重定位空间展布显示该序列的优势走向为 NNW 向, 与盐津—筠连断裂西段弧形构造走向基本一致, 呈高倾角形态 (约 80°)。震源机制解反演结果表明, 该序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震均为走滑型地震, 断层面解均存在一个节面走向为 NNW 向、倾角 $70^\circ \sim 80^\circ$, 这也与该地震序列空间分布特征相吻合 (图 8c)。综合地震重定位和震源机制解结果, 本文认为该序列的发震断层为 NNW 走向的高倾角左旋走滑型断层。结合震区现有断裂构造资料, 推测其北东侧的盐津—筠连断裂最有可能为此次 $M_L3.9$ “震群型”地震序列的发震断层。

需要指出的是, 由于地震台站分布不均匀和连续波形记录质量较差等原因, 本文获得的地震事件数量和用于重定位的地震数据较少, 因此发震断层的几何形态 (尤其是 B 区断层的倾角) 较差, 后续随着观测数据的积累, 我们将参考万永革等 (2023) 对多个发震断层的地震事件模糊聚类分析方法, 进一步聚类两条断裂对应的地震事件, 并通过小地震位置拟合断层面形状 (万永革, 2008), 同时收集断裂带附近及震区周边中强地震的震源机制解并反演该区域的构造应力场, 为研究盐津地区的断裂活动特性和动力学问题提供依据。

6 结论

本文基于云南及四川地震台网的部分宽频带地震波形资料, 利用 CAP 方法和 2 种不同的速度模型对 2019 年 7 月—2022 年 2 月盐津 2 个地震序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解及震源深度进行反演, 并结合 sPn 震相进一步测定了 $M_L5.2$ 地震的

震源深度,然后采用双差定位法对经过模板匹配定位检测得到的地震进行了重定位,最后综合震源机制解、震源深度、地震重定位和区域地质构造等研究结果分析探讨了盐津2个地震序列的潜在发震构造,得出以下主要结论:

(1) 盐津 $M_L 5.2$ 地震为逆冲型地震,最佳双力偶解节面 I 走向 341° ,倾角 44° ,滑动角 70° ;节面 II 走向 186° ,倾角 52° ,滑动角 107° ,矩震级为 $M_W 4.7$,与 GCMT 给出的反演结果基本一致。除 $M_L 5.2$ 地震外,该地震序列的余震数量较少且震级均小于 2.5 级,表明 $M_L 5.2$ 主震在破裂过程中能量释放较为充分。最大震级为 $M_L 3.9$ 的“震群型”地震序列中 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震均为走滑型地震,震源机制解均存在一个走向为 NNW 方向、倾角约为 80° 的节面,与余震重定位后的空间分布特征相吻合,但 3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解又略有差异,分析其原因除了反演误差的因素以外,可能由该区域复杂的断层结构和应力环境影响所致。

(2) CAP 方法反演盐津 $M_L 5.2$ 地震最佳矩心深度为 7 km,3 次 $M_L \geq 3.5$ 地震矩心深度为 7~8 km,余震重定位后 2 个序列的优势分布深度为 4~10 km,说明盐津 2 个地震序列均发生在上地壳浅部。利用 sPn 深度震相测定盐津 $M_L 5.2$ 地震的初始破裂深度为 8.4 km,与其矩心深度相差 1.4 km,推断盐津 $M_L 5.2$ 地震可能存在沿断面自下向上的破裂过程。

(3) 盐津 2 个地震序列应属于两个性质不同的发震构造,即最大震级为 $M_L 3.9$ 的“震群型”地震序列的发震断层可能为盐津—筠连断裂;最大震级为 $M_L 5.2$ 的“孤立型”地震序列的发震断层可能为华蓥山断裂与盐津—筠连断裂共同作用产生的一条走向近 SN 向、倾角约为 50° 的逆冲型隐伏断裂。

本文图件主要用 GMT6 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盐津地震波形数据及震相观测报告,云南省地震局常祖峰研究员提供了盐津地区断层数据,两位审稿人对本文提出了宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- 常祖峰,周荣军,安晓文,等. 2014. 昭通—鲁甸断裂晚第四纪活动及其构造意义[J]. 地震地质,36(4):1260–1279.
- Chang Z F, Zhou R J, An X W, *et al.* 2014. Late – Quaternary activity of the Zhaotong – Ludian Fault zone and its tectonic implication[J]. Seismology and Geology, 36(4):1260–1279. (in Chinese)
- 崔效锋,谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报,21(5):513–522.
- Cui X F, Xie F R. 1999. Preliminary research to determine stress districts from focal mechanism solutions in southwest China and its adjacent area[J]. Acta Seismologica Sinica, 21(5):513–522. (in Chinese)
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学,32(12):1020–1030.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, *et al.* 2002. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. Science China Earth Sciences, 32(12):1020–1030. (in Chinese)
- 杜异军,马瑾. 1986. “入”字式断层声发射 b 值及震级—频度关系的物理意义[J]. 地震地质,8(2):1–20,99.
- Du Y J, Ma J. 1986. The b – value of acoustic emission for the sample with “ λ ” – pattern cracks and the physical significance of the frequency – magnitude relation[J]. Seismology and Geology, 8(2):1–20,99. (in Chinese)
- 樊文杰,左可桢,赵翠萍,等. 2023. 2021 年 6 月 10 日云南双柏地震序列发震构造分析[J]. 地球物理学报,66(5):1991–2006.
- Fan W J, Zuo K Z, Zhao C P, *et al.* 2023. Analysis of seismogenic structure of Yunnan Shuangbai earthquake sequence on June 10, 2021 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(5):1991–2006. (in Chinese)
- 房立华,吴建平,王长在,等. 2013. 2012 年新疆新源 $M_S 6.6$ 地震余震序列精定位研究[J]. 中国科学:地球科学,43(12):1929–1933.
- Fang L H, Wu J P, Wang C Z, *et al.* 2013. Relocation of the 2012 $M_S 6.6$ Xinjiang Xinyuan earthquake sequence [J]. Science China Earth Sciences, 43(12):1929–1933. (in Chinese)
- 房明山,杜安陆,董孝平,等. 1995. 用 sPn 震相测定近震震源深度[J]. 地震地磁观测与研究,16(5):13–18.
- Fang M S, Du A L, Dong X P, *et al.* 1995. Determination of focal depth with the sPn phase[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 16(5):13–18. (in Chinese)
- 付虹,黄浩,李丽,等. 2011. 2011 年 3 月 10 日云南盈江 5.8 级地震序列研究[J]. 地震研究,34(4):414–419.
- Fu H, Huang H, Li L, *et al.* 2011. Research of the Mar. 10, 2011, $M_S 5.8$, Yingjiang, Yunnan Earthquake Sequence [J]. Journal of Seismological Research, 34(4):414–419. (in Chinese)
- 洪德全,王行舟,倪红玉,等. 2013. 多种方法研究 2012 年 7 月 20 日江苏高邮 $M_S 4.9$ 级地震震源机制解和震源深度[J]. 地球物理学进展,28(4):1757–1765.
- Hong D Q, Wang X Z, Ni H Y, *et al.* 2013. Focal mechanism and focal depth of July 20, 2012 Jiangsu Gaoyou $M_S 4.9$ earthquake [J]. Pro-

- gress in Geophysics, 28(4):1757–1765. (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)
- 蒋海昆, 杨马陵, 付虹, 等. 2015. 震后趋势判定参考指南[M]. 北京: 地震出版社.
- Jiang H K, Yang M L, Fu H, et al. 2015. Reference guide for estimating post-earthquake trend [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 蒋海昆, 王锦红. 2023. 适用于机器学习的地震序列类型判定特征重要性讨论[J]. 地震研究, 46(2):155–172.
- Jiang H K, Wang J H. 2023. Discussion on the importance of the features for the judgement of earthquake sequence types applicable to machine learning[J]. Journal of Seismological Earthquake, 46(2):155–172. (in Chinese)
- 李丹宁, 高洋, 朱慧宇, 等. 2017. 2014 年云南景谷 $M_s6.6$ 地震序列双差定位及震源机制解特征研究[J]. 地震研究, 40(3):465–473.
- Li D N, Gao Y, Zhu H Y, et al. 2017. Research on double-difference relocations and focal mechanism solutions of the 2014 Yunnan Jinggu $M_s6.6$ earthquake sequence[J]. Journal of Seismological Research, 40(3):465–473. (in Chinese)
- 李姣, 姜金钟, 王光明, 等. 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, et al. 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)
- 李姣, 姜金钟, 杨晶琼. 2020. 2017 年漾濞 $M_s4.8$ 和 $M_s5.1$ 地震序列的微震检测及重定位[J]. 地震学报, 42(5):527–542.
- Li J, Jiang J Z, Yang J Q. 2020. Microseismic detection and relocation of the 2017 $M_s4.8$ and $M_s5.1$ Yangbi earthquake sequence, Yunnan [J]. Acta Seismologica Sinica, 42(5):527–542. (in Chinese)
- 刘正荣, 雷素华, 胡素华. 1977. 1974 年 5 月 11 日云南省永善—大关地震[J]. 地球物理学报, 20(2):110–114.
- Liu Z R, Lei S H, Hu S H. 1977. The Yongshan–Daguan Earthquake ($M=7.1$) on May 11, 1974 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 20(2):110–114. (in Chinese)
- 吕坚, 郑秀芬, 肖健, 等. 2013. 2012 年 9 月 7 日云南彝良 $M_s5.7$ 、 $M_s5.6$ 地震震源破裂特征与发震构造研究[J]. 地球物理学报, 56(8):2645–2654.
- Lyu J, Zheng X F, Xiao J, et al. 2013. Rupture characteristics and seismogenic structures of the $M_s5.7$ and $M_s5.6$ Yiliang earthquake of Sep. 7, 2012 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(8):2645–2654. (in Chinese)
- 吕俊强. 2013. 利用 sPn 与 Pn 震相的到时差计算震源深度[J]. 大地测量与地球动力学, 33(S1):45–48.
- Lyu J Q. 2013. Analysis on seismic source depth determination using travel time difference of sPn and Pn phase[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 33(S1):45–48. (in Chinese)
- 马瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 2002. 断层相互作用型式的实验研究[J]. 自然科学进展, 12(5):57–62.
- Ma J, Ma S L, Liu L Q, et al. 2002. Experimental study on pattern fault interaction[J]. Progress in Natural Science, 12(5):57–62. (in Chinese)
- 毛泽斌, 常祖峰, 李鉴林, 等. 2019. 景谷 $M6.6$ 地震震中区断裂晚第四纪活动[J]. 地震地质, 41(4):821–836.
- Mao Z B, Chang Z F, Li J L, et al. 2019. Late Quaternary activity of faults in the epicenter area of Jinggu $M6.6$ Earthquake[J]. Seismology and Geology, 41(4):821–836. (in Chinese)
- 潘睿, 姜金钟, 付虹, 等. 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, et al. 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)
- 任克新, 邹立晔, 刘瑞丰, 等. 2004. 用 sPn 计算内蒙地震的震源深度[J]. 地震地磁观测与研究, 25(3):24–31.
- Ren K X, Zou L Y, Liu R F, et al. 2004. Application of sPn to focal depth determination in Inner Mongolia[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 25(3):24–31. (in Chinese)
- 孙苗, 吴建平, 房立华, 等. 2014. 利用 sPn 震相测定芦山 $M_s7.0$ 级地震余震的震源深度[J]. 地球物理学报, 57(2):430–440.
- Sun Z, Wu J P, Fang L H, et al. 2014. Focal depth determination of aftershocks of Lushan $M_s7.0$ earthquake from sPn phase [J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(2):430–440. (in Chinese)
- 王永革, 黄少华, 王福昌, 等. 2023. 2022 年门源地震序列揭示的断层几何形状及滑动特性[J]. 地球物理学报, 66(7):2796–2810.
- Wan Y G, Huang S H, Wang F C, et al. 2023. Fault geometry and slip characteristics revealed by the 2022 Menyuan earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(7):2796–2810. (in Chinese)
- 王永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报, 51(3):793–804.
- Wan Y G, Shen Z K, Diao G L, et al. 2008. An algorithm of fault parameter determination using distribution of small earthquakes and parameters of regional stress field and its application to Tangshan earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(3):793–804. (in Chinese)
- 王光明, 吴中海, 彭关灵, 等. 2021. 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s6.4$ 地震的发震断层及其破裂特征: 地震序列的重定位分析结果[J]. 地质力学学报, 27(4):662–678.
- Wang G M, Wu Z H, Peng G L, et al. 2021. Seismogenic fault and its rupture characteristics of the 21 May, 2021 Yangbi $M_s6.4$ earthquake;

- Analysis results from the relocation of the earthquake sequence[J]. Journal of Geomechanics, 27(4): 662–678. (in Chinese)
- 王未来, 吴建平, 房立华, 等. 2014. 2014年云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报, 57(9): 3042–3051.
- Wang W L, Wu J P, Fang L H, *et al.* 2014. Double difference location of the Ludian $M_s 6.5$ earthquake sequences in Yunnan province in 2014[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(9): 3042–3051. (in Chinese)
- 王瑶, 万永革. 2021. 多层介质中利用 sPn 与 Pn 到时差确定震源深度的研究[J]. 地震工程学报, 43(6): 1294–1302.
- Wang Y, Wan Y G. 2021. Determination of focal depth using the travel time difference of sPn and Pn waves in multilayer medium[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43(6): 1294–1302. (in Chinese)
- 闻学泽, 杜方, 易桂喜, 等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景[J]. 地球物理学报, 56(10): 3361–3372.
- Wen X Z, Du F, Yi G X, *et al.* 2013. Earthquake potential of the Zhaotong and Lianfeng fault zones of the eastern Sichuan–Yunnan border region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(10): 3361–3372. (in Chinese)
- 向小龙, 孙炜锋, 李国伟, 等. 2015. 云南盐津地区地质灾害发育特征及影响因素分析[J]. 地质力学学报, 21(1): 97–107.
- Xiang X L, Sun W F, Li G W, *et al.* 2015. Analysis on development characteristics and factors of geological disasters in Yanjin country, Yunnan Province[J]. Journal of Geomechanics, 21(1): 97–107 (in Chinese).
- 徐锡伟, 江国焰, 于贵华, 等. 2014. 鲁甸 6.5 级地震发震断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球物理学报, 57(9): 3060–3068.
- Xu X W, Jiang G Y, Yu G H, *et al.* 2014. Discussion on seismogenic fault of the Ludian $M_s 6.5$ earthquake and its tectonic attribution[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(9): 3060–3068. (in Chinese)
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 151–162.
- Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, *et al.* 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan Yunnan region, China[J]. Science China Earth Sciences, 33(S1): 151–162. (in Chinese)
- 杨智娴, 陈运泰, 郑月军, 等. 2003. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 129–134.
- Yang Z X, Chen Y T, Zheng Y J, *et al.* 2003. Accurate relocation of earthquakes in central–western China using the double–difference earthquake location algorithm[J]. Science China Earth Sciences, 33(S1): 129–134. (in Chinese)
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2019. 2019年6月17日四川长宁 $M_s 6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 62(9): 3432–3447.
- Yi G X, Long F, Liang M J, *et al.* 2019. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019 $M_s 6.0$ Sichuan Changning earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(9): 3432–3447. (in Chinese)
- 张建勇, 王新, 陈凌, 等. 2022. 基于余震重定位和震源机制解研究青海玛多 $M_s 7.4$ 地震序列的发震构造和断裂形态[J]. 地球物理学报, 65(2): 552–562.
- Zhang J Y, Wang X, Chen L, *et al.* 2022. Seismotectonics and fault geometries of the Qinghai Maduo $M_s 7.4$ earthquake sequence: Insight from aftershock relocations and focal mechanism solutions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(2): 552–562. (in Chinese)
- 张演, 姜金钟, 王光明, 等. 2024. 云南盐津地区两种地震序列的地震活动性研究[J]. 地震研究, 47(1): 78–90.
- Zhang Y, Jiang J Z, Wang G M, *et al.* 2024. Analysis of the seismicity of two types of earthquake sequences in Yanjin, Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 47(1): 78–90. (in Chinese)
- 张勇, 许力生, 陈运泰, 等. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_w 6.1$ ($M_s 6.5$) 地震破裂过程[J]. 地球物理学报, 57(9): 3052–3059.
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T, *et al.* 2014. Rupture process of the 3 August 2014 Ludian, Yunnan, $M_w 6.1$ ($M_s 6.5$) earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(9): 3052–3059. (in Chinese)
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 2009. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 39(4): 413–426.
- Zheng Y, Ma H S, Lyu J, *et al.* 2009. Source mechanism of strong aftershocks($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics[J]. Science China Earth Sciences, 39(4): 413–426. (in Chinese)
- 周荣军, 唐荣昌, 钱洪, 等. 1997. 地震构造类比法的应用——以川东地区华蓥山断裂带为例[J]. 地震研究, 20(3): 316–322.
- Zhou R J, Tang R C, Qian H, *et al.* 1997. An application of seismotectonic analogy to the Huayingshan fault zone in east Sichuan[J]. Journal of Seismological Research, 20(3): 316–322. (in Chinese)
- 朱介涛, 蔡学林, 曹家敏, 等. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社.
- Zhu J T, Cai X L, Cao J M, *et al.* The three–dimensional structure of lithosphere and its evolution in South China and East China Sea[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- Crotwell H P, Owens T J, Ritsema J. 1999. The TauP Toolkit: flexible seismic travel–time and ray–path utilities[J]. Seismological Research Letters, 70(2): 154–160.
- Hauksson E, Shearer P. 2005. Southern California hypocenter relocation with waveform cross–correlation, Part 1: results using the Double–Difference Method[J]. Bull Seismol Soc Am, 95(3): 896–903.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016 $M_s 5.0$ Yulong Earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications[J]. Pure Appl Geophys, 176(3): 1225–1241.
- Long F, Wen X Z, Ruan X, *et al.* 2015. A more accurate relocation of the 2013 $M_s 7.0$ Lushan, Sichuan, China, earthquake sequence, and the seismogenic structure analysis[J]. J Seismol, 19(3): 653–665.

- 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, *et al.* 2022. Determination of focal depths of moderate earthquakes in Northeast Indian region using depth phase sPn [J]. Nat Hazards, 114:427–455.
- Saikia C K, Woods B B, Thio H K. 2001. Calibration of the regional crustal waveguide and the retrieval of source parameters using waveform modeling [J]. Pure Appl Geophys, 158(7):1301–1338.
- Tan Y, Zhu L, Helmberger D V, *et al.* 2006. Locating and modeling regional earthquakes with two stations [J]. J Geophys Res, 111(B1):B01306.
- 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.
- Zhang M, Wen L X. 2015. An effective method for small event detection: Match and locate (M&L) [J]. Geophys J Int, 200(3):1523–1537.
- 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, *et al.* 2021. Focal mechanism and seismogenic structure of the $M_L 5.1$ Qingbaijiang Earthquake on February 3, 2020, Southwestern China. Front Earth Sci, 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.

Focal Parameters and Seismogenic Structure of Two Earthquake Sequences in Yanjin, Yunnan

GU Huidong^{1,2}, JIANG Jinzhong^{1,2,3}, LI Jiao¹, ZHANG Yan^{1,3}, YANG Yuewen¹,

WANG Guangming^{1,3}, ZHANG Shuai^{1,3}, YAO Yuan^{1,3}

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

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

(3. Kunming Institute of Prediction, China Earthquake Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Before and after the $M_L 5.2$ earthquake in Yanjin, Yunnan Province on 23 January 2021, several medium and small earthquakes occurred in this region. In order to better assess the seismic hazard and identify the seismogenic structures in this region, we use the waveform data of the near earthquakes from the Yunnan Seismic Network and the Sichuan Seismic Network to invert the focal mechanisms and the depths of the $M_L \geq 3.5$ earthquakes in Yanjin by the cut – and – paste (CAP) method and two different velocity models. Then, we determine the depth of the $M_L 5.2$ earthquake using the depth phase sPn. Finally, we employ the double – difference relocation method to relocate the earthquake sequences in Yanjin. We obtain that seismogenic fault of the isolated $M_L 5.2$ earthquake sequence belongs to the thrust type. It strikes near the N-S direction and dips eastward at 50° . The $M_L 5.2$ earthquake has a shallow source, the rupture occurred from the bottom to the top along the fault plane. The seismogenic fault of the swarm – type $M_L 3.9$ earthquake sequence belongs to the strike – slip type. It strikes from NNW and dips north-eastward at about 80° . The focal mechanisms of the three $M_L \geq 3.5$ earthquakes in this swarm – type sequence are slightly different, this may be due to the region's complex fault structure and stress environment. Based on this analysis, we believe that the seismogenic fault of the $M_L 3.9$ earthquake sequence is the Yanjin – Junlian fault. The seismogenic fault of the $M_L 5.2$ earthquake sequence is an unknown hidden fault in the near N-S direction and with a dip angle of about 50° , which is generated by the Huayingshan fault and the Yanjin – Junlian fault.

Keywords: the Yanjin earthquake sequence; focal mechanism; relocation; sPn phase; seismogenic structure