

姜喜姣, 林庆西, 陈修吾, 等. 2023年广东河源4.3级和东源4.5级地震余震分布及震源机制解特征[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 126–135. [JIANG Xijiao, LIN Qingxi, CHEN Xiuwu, et al. The Aftershock Distribution and Focal Mechanism Solutions Characteristics of the Heyuan $M_s4.3$ and Dongyuan $M_s4.5$ Earthquakes in Guangdong in 2023 [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 126–135]

2023年广东河源4.3级和东源4.5级地震 余震分布及震源机制解特征

姜喜姣^{1,2,3}, 林庆西^{1,2,3}, 陈修吾^{1,2,3}, 朱腾^{1,2,3}, 梁明^{1,2,3}

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070; 3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070)

摘要: 2023年2月11日, 广东省河源市源城区发生4.3级地震, 短短25天之后, 东源县又发生4.5级地震。两次地震均位于新丰江库区, 为了深入研究主震震源特性、余震序列空间分布以及水库诱发地震的特点和成因机理, 文中分析了两次地震的余震分布特征, 并利用gCAP方法和FOCMEC方法反演了主震的震源机制解。结果显示: 河源4.3级地震是一次正走滑型地震事件, 余震分布呈椭圆形, P 轴方位为NW向, 倾伏角较为直立, 与峡谷及大坝区的应力场特征一致, 判断其可能受控于多条断裂, 并受水体重力影响, 是一次正常的应力释放过程。东源4.5级地震发震于库盆西侧区域, 是一次左旋走滑型地震, 结合余震序列NNW—SSE向的线性展布特征, 判断其发震断层走向为SSE向, 倾角近直立; P 轴方位为NWW向, 倾伏角近水平, 这和锡场区西侧应力场特征一致。库盆西侧是自2019年以来发生显著地震活动的新震区, 和相邻的锡场区具有众多相似性, 判断两个区域可能存在同一条隐伏的“北45°西向的顺河断裂”, 由于库水渗透活动自北向南延伸, 从而诱发锡场区和库盆西侧接连发生较强的地震活动。两个区域均处于早期孕震阶段, 结合峡谷及大坝区的老震区特点, 需重点关注两个新震区未来的应力场变化特征以及强震活动。

关键词: 河源4.3级地震; 东源4.5级地震; 余震分布; 震源机制解; FOCMEC方法; gCAP方法

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0126-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.16

The Aftershock Distribution and Focal Mechanism Solutions Characteristics of the Heyuan $M_s4.3$ and Dongyuan $M_s4.5$ Earthquakes in Guangdong in 2023

JIANG Xijiao^{1,2,3}, LIN Qingxi^{1,2,3}, CHEN Xiuwu^{1,2,3}, ZHU Teng^{1,2,3}, LIANG Ming^{1,2,3}

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Project, Guangzhou 510070, China)

收稿日期: 2023-04-27

基金项目: 地震监测、预测、科研三结合课题(3JH-202301026); 震情跟踪定向工作任务(2023010108); 广东省地震局青年地震科研基金(重点实验室开放基金)(GDDZZ202306)共同资助。

作者简介: 姜喜姣(1989-), 女, 工程师, 主要从事震源机制和应力场反演研究。

E-mail: 530365163@qq.com

通信作者: 林庆西(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事震源机制和应力场反演研究、相关软件研发等。

E-mail: forkiter@163.com

Abstract: On February 11th, 2023, an $M_s4.3$ earthquake occurred in Yuancheng District, Heyuan City, Guangdong Province. Just 25 days later, an $M_s4.5$ earthquake occurred in Dongyuan County. The two earthquakes were both located in the Xinfengjiang reservoir area. In order to study the source characteristics of the main shock, the spatial distribution of aftershock sequences, and the characteristics and mechanism of reservoir-induced earthquakes, this paper analyzes the distribution characteristics of the aftershocks of the two earthquakes, and uses the gCAP and FOCMEC methods to invert the focal mechanism solution of main shocks. The results show that Heyuan $M_s4.3$ earthquake is a positive strike-slip earthquake event, and the distribution of aftershocks is elliptical. The orientation of the P-axis is NW direction, and the pitch angle is relatively vertical, which is consistent with the stress field characteristics of the canyon and dam area. It is judged that Heyuan earthquake may be controlled by multiple fractures and affected by water gravity, which is a normal stress release process. The Dongyuan $M_s4.5$ earthquake occurred in the western area of the reservoir basin, which is a left-lateral strike-slip earthquake. Combined with the linear distribution of the aftershock sequence in NNW-SSE direction, it is judged that the strike of the seismogenic fault is SSE direction, and the dip angle is nearly vertical. The orientation of the P-axis is NWW direction, and the pitch angle is nearly horizontal, which is consistent with the characteristics of the stress field on the west side of the Xichang area. The west side of reservoir basin is a new seismic area with significant seismic activity since 2019, and has many similarities with the adjacent Xichang area. It is judged that there may be the same concealed "North 45° westward trending along the river fault" in the two regions. As the seepage activity of reservoir water extends from north to south, it induces a series of strong seismic activities in the Xichang area and the west side of the reservoir basin. Both areas are in the early seismogenic stage. Combining the characteristics of the old earthquake areas in the canyon and dam areas, it is necessary to focus on the characteristics of the stress field changes and strong earthquakes in the two new earthquake areas in the future.

Keywords: Heyuan $M_s4.3$ earthquake; Dongyuan $M_s4.5$ earthquake; Aftershock distribution; Focal mechanism solutions; FOCMEC method; gCAP method

0 引言

据中国地震台网中心测定:北京时间2023年2月11日10时41分,广东河源市源城区(23.76°N, 114.64°E)发生4.3级地震,震源深度11 km。同年3月8日5时15分,广东河源市东源县(23.83°N, 114.52°E)发生4.5级地震,震源深度10 km。两次地震仅相隔25天,是新丰江库区自2014年7月11日4.0级地震以来发生的又一显著地震事件,打破了新丰江库区长达9年的4级地震平静期。

新丰江水库自1959年截流蓄水后,大小地震频繁发生,至今已记录地震10万余次,其中最大的是1962年3月19日在新丰江库首峡谷及大坝附近发生的6.1级地震,这也是世界上为数不多的水库诱发6级以上地震的震例之一。多年来,众多研究人员对新丰江库区的震源机制进行了大量的研究,并取得一系列重要成果^[1-5]。本文研究的4.3级和4.5级地震均发生在新丰江库区,准确认识震中附近区域构造环境和发震机制对深入研究新丰江水库诱发地震的机理和水库区地震动力学变化特

征具有重要意义。

为了更好地开展新丰江库区地震动力学机制的研究,本文采用gCAP和FOCMEC反演方法,计算了新丰江库区两次主震的震源机制解,同时根据余震分布,初步分析了两次地震序列的震源特性,地震活动与构造特征的关系等,以期获得新丰江库区现今的孕震环境。

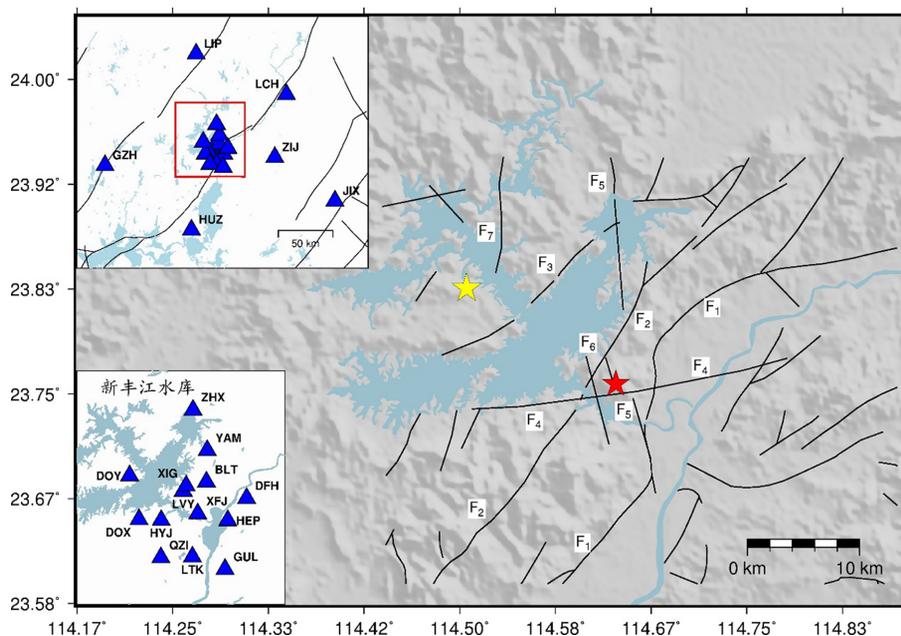
1 发震区域构造背景

新丰江水库主体位于燕山期东西向延展的巨大花岗岩岩体上,区内地质构造以NNE、NNW和NEE向断裂构成的网格状格局为主要特征^[6](图1)。NE-NNE向断裂在地表发育明显,代表性的有河源断裂、人字石断裂和大坪—岩前断裂^[7],以逆断层或逆掩断层为主要特征;NNW向断裂分布于水库东侧以及峡谷区,由一系列陡倾角的小型平推断层组成;NEE向断裂地表不出露,只能见到断续分布的挤压带或剪切带,据航空磁测和重力异常资料显示该断裂存在于深部区域,并在水库峡谷区两侧发育^[8]。

河源4.3级地震发震于新丰江峡谷区,位于南山—坳头断裂和石角—新港—白田断裂的交汇处。石角—新港—白田是库区内最主要的NNW向断裂,其南段新活动性表现最为强烈,新丰江水库诱发地震活动与此断裂有关^[1],而南山—坳头断裂存在于地壳深部,未出露地表。东源4.5级地震发震于库盆区西侧侧翼位置,东距兰屋—太和洞断裂约2.5 km,该断裂南北长约17 km,东西宽约6~10 km;南距大坪—岩前断裂约5 km。

2 数据选取和方法

本次研究选取的地震目录来源于广东省地震台网,数据时间范围为发震时刻至4月15日0时,包含河源4.3级地震余震序列中的432个地震事件,以及东源4.5级地震余震序列中的188个地震事件。由于新丰江库区台站分布密集,且距离震中很近,有利于震源位置的精确测定,刘特培通过对比绝对定位和双差定位,发现绝对定位的精度和可靠性均高于双差定位^[9]。因此本文研究余震分布采用hyposat绝对定位结果。



图中红色五角星表示河源4.3级地震发生位置,黄色五角星表示东源4.5级地震发生位置;黑色实线为断裂, F_1 为河源断裂, F_2 为人字石断裂, F_3 为大坪—岩前断裂, F_4 为南山—坳头断裂, F_5 为石角—新港—白田断裂, F_6 为帽峰—公白地推断层, F_7 为兰屋—太和洞断裂;左上角插图红色矩形框表示研究区域;左下角插图为新丰江水库密集台站分布图

图1 新丰江库区构造及主震分布

Fig.1 Structure and main earthquake distribution in the Xinfengjiang reservoir area

gCAP是一种基于波形的震源机制反演方法,主要是将近震波形分为体波部分(Pnl)和面波部分(Surf),分别计算拟合波形和实际波形的误差函数,搜索出最佳震源深度和震源机制解^[10-11]。该方法具有计算台站较少,对速度模型和地壳横向变化依赖性较小的特点,在我国一些重要构造区得到了普遍的应用,计算结果可靠稳定^[12-13]。

本文拟采用gCAP方法反演两个主震的震源机制解。为了确保震源机制反演结果的可靠性,选取主震震中距80~200 km、信噪比较高、方位覆盖均匀的台站波形数据。Wei等的研究认为参与反演的台站数在5~10之间能得到理想的求解结果,因此将台站数量限制在10以内^[14]。反演前,对观测

波形进行了去除仪器响应、旋转三分量、重采样处理。Pnl波滤波频段为0.05~0.2 Hz,面波部分滤波频段为0.05~0.1 Hz。利用F-K方法计算格林函数,采用的速度模型为新丰江库区人工地震探测剖面结果,并参考华南一维速度模型和Crust2.0模型对速度结构进行了部分修正^[13]。

FOCMEC方法是通过P波、SV波和SH波的初动方向和振幅比联合测定地震震源机制解^[15-16]。由于计算采用的参数较多,该方法可以有效约束震源机制的反演结果,获得较高的反演精度^[17]。本文同样使用FOCMEC方法计算两个主震的震源机制解。为保证反演精度,在求解震源机制时规定每个地震事件至少有20个P波初动记录,至少有5

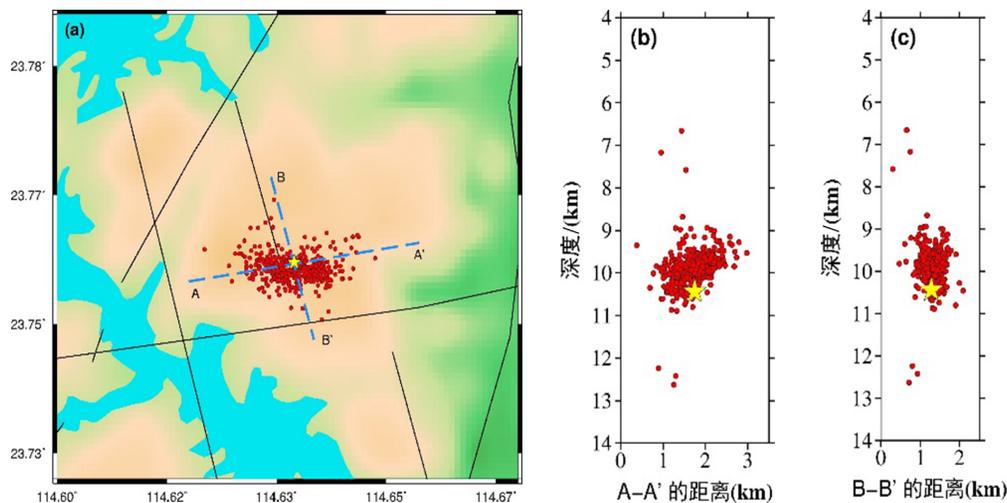
个S波初动和振幅比被量取。在反演时，P波初动矛盾数控制在2以内，振幅比矛盾数控制在3以内。

利用gCAP和FOCMEC两种方法获得的P轴或T轴进行矢量合成，计算得到两个结果的平均解，作为震源机制最终结果^[18-19]。

3 余震序列分布特征

河源4.3级地震余震分布和沿不同剖面的震源深度分布如图2所示。可以看到，余震基本集中于主震附近，呈椭圆状分布；NW—SE为椭圆的

长轴方向，长约2 km，NNE—SSW为椭圆的短轴方向，长约1.5 km；主震略靠近椭圆质心的北部，其NNW、NEE和SE方位有稀疏的余震分布。为进一步分析余震序列和断裂构造的关系，沿南山一坳头断裂和石角一新港—白田断裂的走向选取两条震源深度剖面，剖面宽度在5 km内。AA'剖面显示(图2b)，序列西侧的地震深度明显大于东侧的地震，深差约2 km，可能受南山一坳头断裂切割深度的影响，也可能受石角一新港—白田断裂倾向特征的影响；BB'剖面显示(图2c)，余震集中分布在断层面附近，断层倾角较陡，近乎直立，倾向特征不明显。



图(a)中黄色三角形为河源4.3级主震震中,图(b)和图(c)分别为沿AA'剖面和BB'剖面的地震深度分布

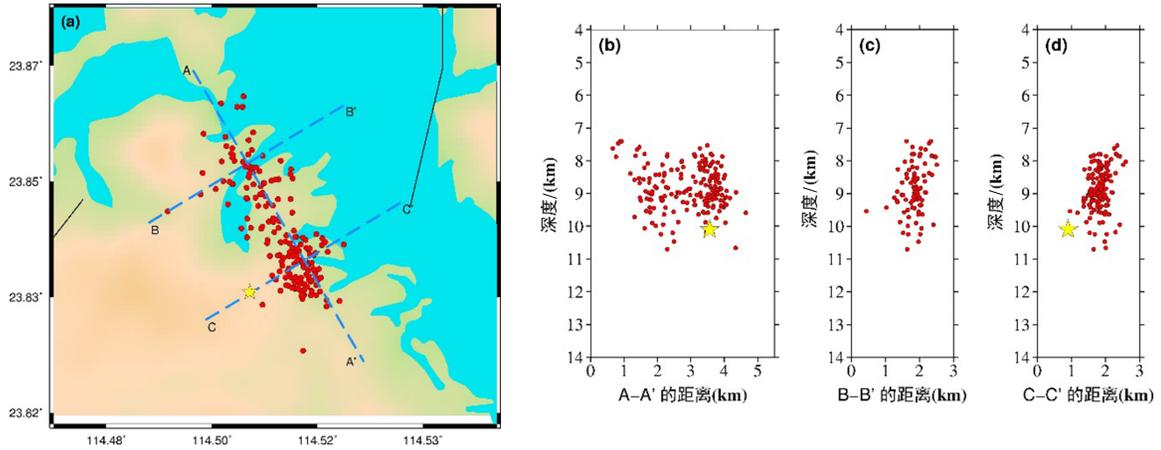
图2 河源4.3级地震余震序列分布和沿不同剖面的震源深度分布图

Fig.2 The aftershocks sequence distribution and the focal depth distribution along different cross sections of Heyuan M_s 4.3 earthquake

东源4.5级地震余震分布和沿不同剖面的震源深度分布如图3所示。可以明显看到，余震沿NW向线性展布，长约4 km；主震位于序列的西南侧，远离余震分布区；序列西北段余震分布较为零散，而靠近余震的东南段分布较为密集。选取3条宽度为3 km内的震源深度剖面，可以看到，绝大多数地震浅于主震。沿AA'的震源深度集中于7~11 km范围内，且多发震于SE侧。垂直于长轴的两个深度剖面BB'和CC'可以反映沿断层倾向的震源深度分布特征。BB'剖面显示，断层倾向SW，倾角陡立，近乎直立。东南段的CC'剖面显示，震源深度分布更为集中，断层倾向仍为SW，较西北段倾角变缓，但变化不大。总体上看，东源4.5级地震余震分布线性展布特征明显，走向为NW向，倾向为SW向，倾角较陡，西北段和东南段断层差异不明显。

4 震源机制解特征

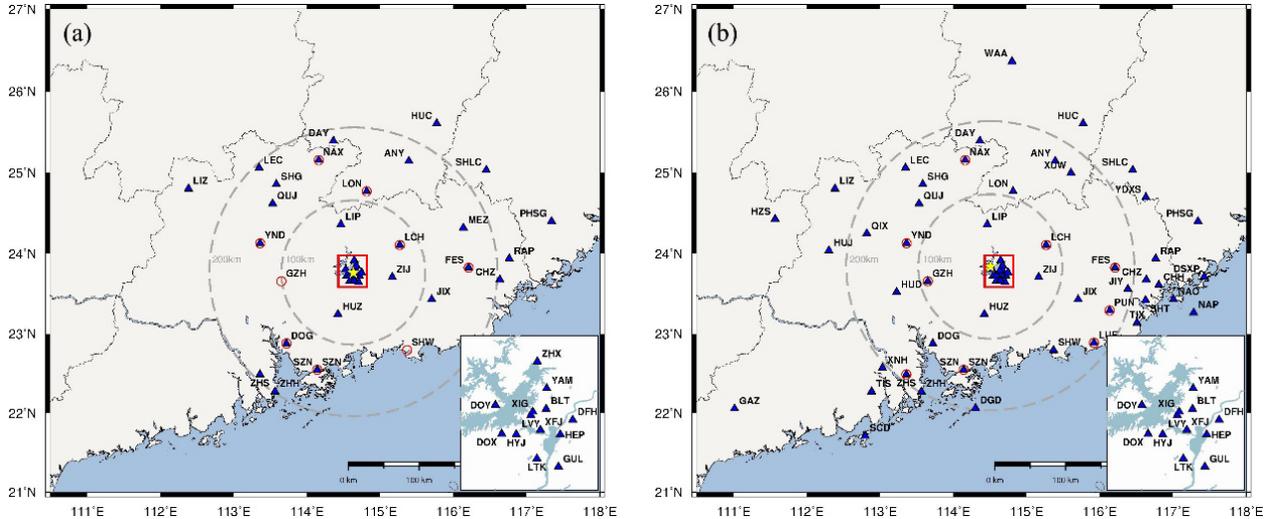
首先利用FOCMEC方法和gCAP方法反演河源4.3级地震的震源机制。在使用FOCMEC方法时，量取了39个P波初动和7个S波初动及振幅比，P波、SH波和SV波的初动矛盾数分别为1、2、2，振幅比矛盾数为1，符合约束条件，结果可信(图4a、5a)。使用gCAP方法时，对参与台站多次校验，最终选取了9个方位角分布和拟合较好的台站(图4a)。图5b为河源4.3级地震的波形拟合误差(RMS)和震源机制解随深度变化情况，结果显示深度为9 km时RMS值最小。图5c为深度9 km时对应的波形拟合图，可以看到，方差缩减量(variance reduction)达到85.3，且绝大多数波形拟合度均达到85%以上，拟合结果较好，反演结果可信。



图(a)中黄色三角形为东源4.5级主震震中,图(b)、(c)和(d)分别为沿AA'、BB'和CC'剖面的地震深度分布

图3 东源4.5级地震余震序列分布和沿不同剖面的震源深度分布图

Fig.3 The aftershocks sequence distribution and the focal depth distributions along different cross sections of Dongyuan $M_s4.5$ earthquake



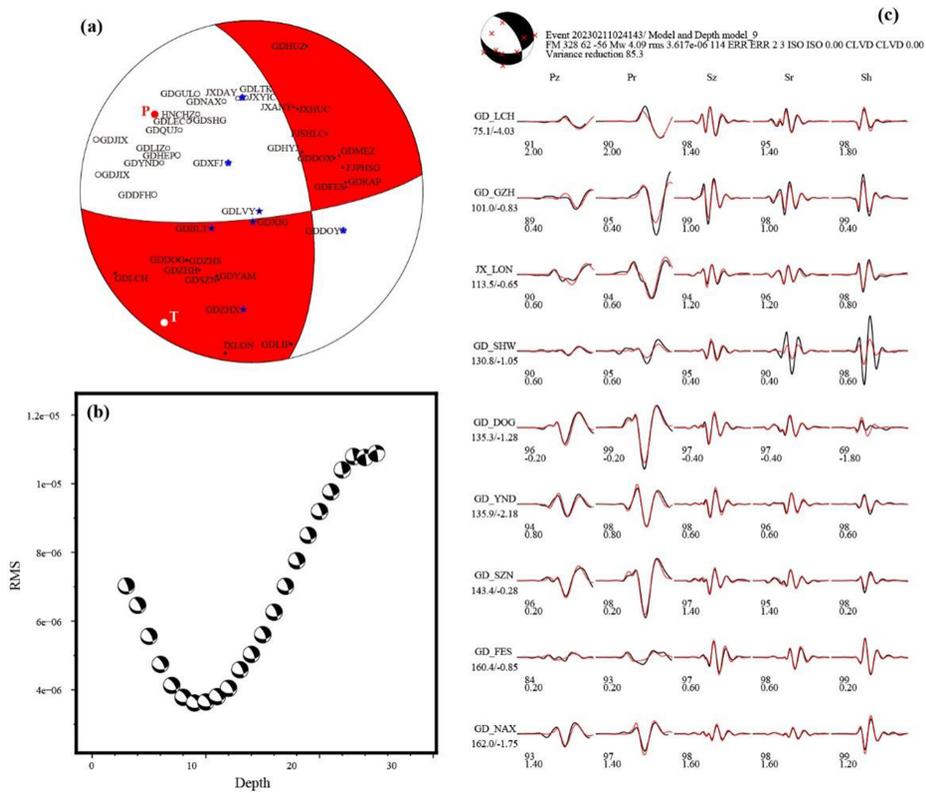
图中蓝色三角形表示 FOCMEC 方法使用的台站;红色圆圈表示 gCAP 方法使用的台站,灰色虚线圆圈表示震中距半径范围。

图4 河源4.3级地震(a)和东源4.5级地震(b)反演震源机制时使用的台站分布

Fig.4 Distribution of stations used in the inversion of focal mechanism of Heyuan $M_s4.3$ (a) and Dongyuan $M_s4.5$ (b) earthquakes

两种方法反演得到的震源机制解结果如表1所示,利用Kagan三维旋转方法计算两个震源机制解的距离,两者相差 36° ,有一定的差异^[19-20]。根据Zoback类型划分标准^[21],FOCMEC方法计算得到的震源机制为走滑型(SS),而gCAP方法计算得到的震源机制为正断型(NF)。造成这一结果的原因是利用FOCMEC计算时,LVY和XIG两个台站初动方向约束了反演结果,但计算时可明显看到两个台站记录初动具有一定的矛盾性,可能是仪器类型更改导致的初动方向错误,也可能是波形记录信噪比问题导致方向的不确定性,需要在以后的计算过程中予以确认。但总体上看,两个结果相差不大,仍在可接受范围内。

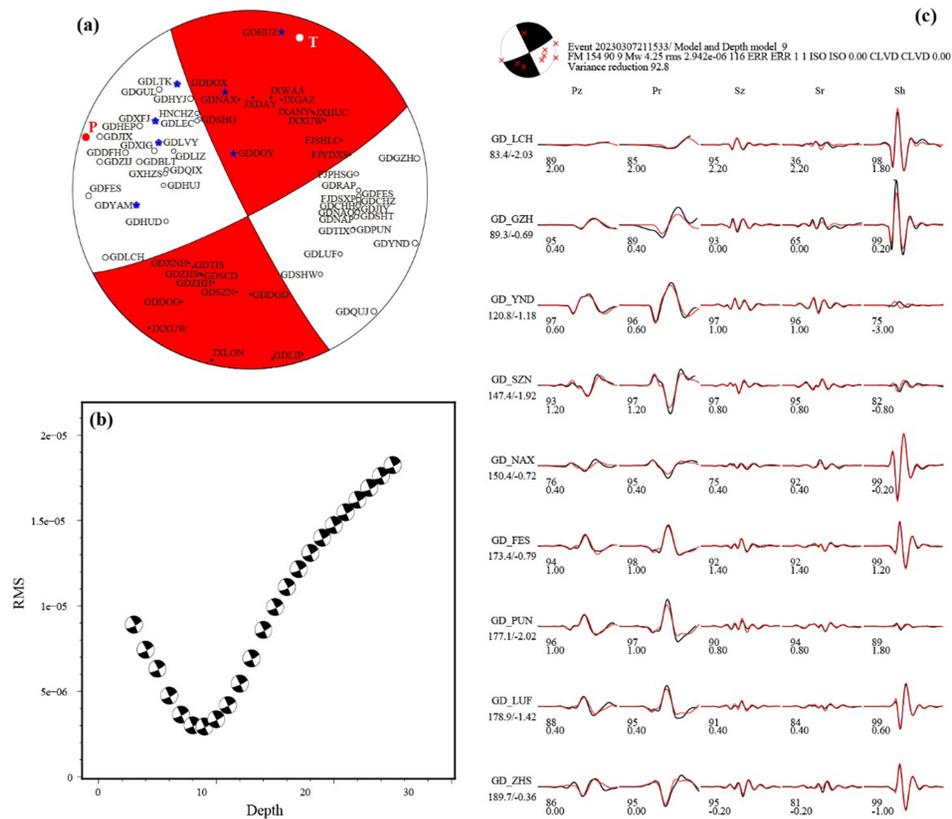
采用同样的计算方式反演东源4.5级地震的震源机制。FOCMEC方法使用了60个P波初动和7个S波初动及振幅比结果,P波、SH波和SV波的初动矛盾数分别为0、3、1,振幅比矛盾数为2,符合约束条件(图4b和图6a)。gCAP方法使用了9个台站波形(图4b),波形拟合误差和震源机制解随深度变化情况如图6b所示,结果显示最佳反演深度为9 km;其波形拟合图如图6c所示,方差缩减量为92.8,拟合结果较好。表1给出了两种方法反演得到的震源机制解。两种方法反演得到的震源机制类型均为走滑性(SS),旋转距离仅相差 6° ,两个结果基本一致。



图(a)为FOCMEC方法计算结果,黑色实心圆点表示P波初动方向向上,黑色空心圆圈表示P波初动方向向下,蓝色五角星表示该台站在反演过程中使用了振幅比;图(b)为利用gCAP方法得到的波形拟合误差随深度变化图;图(c)为最佳拟合深度9 km时,gCAP计算的理论与实际波形的拟合图。

图5 利用FOCMEC方法和gCAP方法反演河源4.3级地震的震源机制解结果

Fig.5 The focal mechanism solution of Heyuan $M_{5.4.3}$ earthquake inverted by FOCMEC and gCAP method



图(a)为FOCMEC方法计算结果;图(b)为利用gCAP方法得到的波形拟合误差随深度变化图;图(c)为最佳拟合深度9 km时,gCAP计算的理论与实际波形的拟合图。

图6 利用FOCMEC方法和gCAP方法反演东源4.5级地震的震源机制解结果

Fig.6 The focal mechanism solution of Dongyuan $M_{5.4.5}$ earthquake inverted by FOCMEC and gCAP method

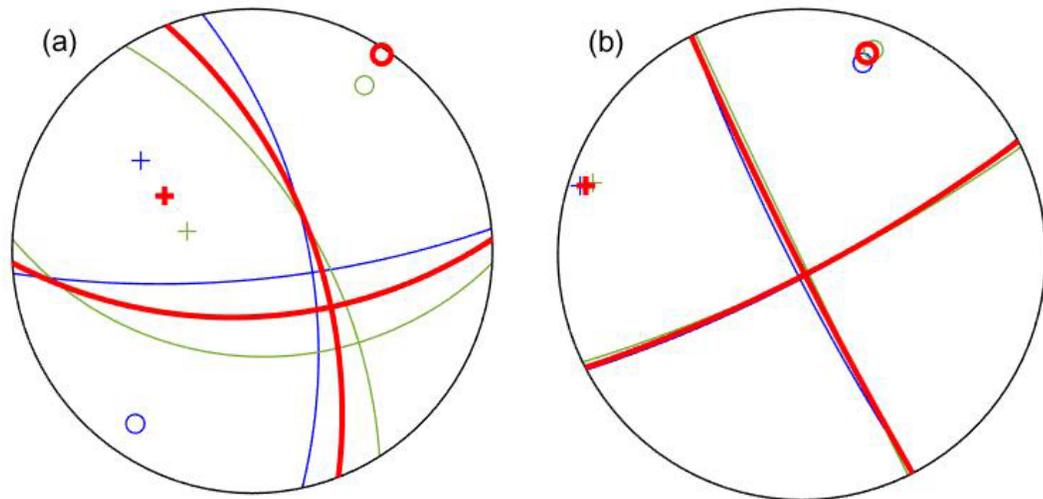
表1 河源4.3级地震和东源4.5级地震震源机制解结果

Table 1 The focal mechanism solutions of Heyuan $M_s4.3$ and Dongyuan $M_s4.5$ earthquakes

主震	节面1			节面2			P轴		T轴		结果来源
	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	方位角/ (°)	倾伏角/ (°)	方位角/ (°)	倾伏角/ (°)	
河源4.3级 地震	348	64	-15	84	77	-153	309	28	214	8	FOCMEC
	328	62	-56	93	43	-136	287	58	34	11	gCAP
	339	62	-35	87	59	-147	302	44	34	2	平均解
东源4.5级 地震	153	84	10	62	80	174	287	3	18	11	FOCMEC
	154	90	9	64	81	180	289	6	19	6	gCAP
	153	87	9	63	81	177	288	5	19	9	平均解

对于两种方法得到的震源机制解结果,可以通过矢量合成 P 、 T 轴,获取平均解结果,如表1和图7所示。结果显示,河源4.3级地震平均解的 P 轴方位为 302° ,倾伏角为 44° , T 轴的方位为 34° ,倾伏角为 2° ,震源机制类型为正走滑型(NS)。 P 轴较陡, T 轴较为水平,显示该地震不仅受到水平方向的拉张应力作用,还受到水库重力的挤压应力影响,与峡谷及大坝区应力场特征基本一致^[22]。两个节面走向均和断裂走向保持一致,而余震分

布又呈椭圆分布,因此无法判断哪个节面为发震断层面。东源4.5级地震平均解的 P 轴方位为 288° ,倾伏角为 5° , T 轴方位为 19° ,倾伏角为 9° ,震源机制类型为走滑型(SS)。 P 轴和 T 轴接近水平,显示该地震主要受水平构造运动影响,基本不受水体重力影响,这与新丰江库区的锡场西侧区域应力特征较为一致^[22]。根据余震分布情况,基本可以判断SSE向为东源4.5级地震发震断层面的走向。



图中蓝色实线表示 FOCMEC 反演结果;绿色实线表示 gCAP 反演结果;红色粗实线为平均解结果;“+”表示 P 轴,“o”表示 T 轴。

图7 河源4.3级地震(a)和东源4.5级地震(b)震源机制平均解结果

Fig.7 The average solutions of focal mechanism of Heyuan $M_s4.3$ (a) and Dongyuan $M_s4.5$ (b) earthquakes

5 结果分析

5.1 河源4.3级地震结果分析

河源4.3级地震发震于峡谷及大坝区,该区域是新丰江库区的传统老震区,自1959年蓄水至今,

地震活动不断。早期该区域地震破裂以走滑型为主,主压应力轴 P 轴为NNW向,之后受水库水体重力作用的显著影响,并经过长时间的应力调整,倾滑正断层错动为主要运动特征的地震占据优势,压应力轴 P 轴转为NW向,且更加直立,张应力轴 T 轴近乎水平^[23]。这与本次河源4.3级地震的应力

轴特征基本一致。

作者通过分析峡谷及大坝区震源机制解特征,发现该区域主要发育走滑型和正断型地震^[22]。其中,正断型震源机制显示的走向为NW—SE向,且具有一定的左旋倾滑分量,和附近的石角—新港—白田断裂带的运动特征相符,也符合本次地震的震源机制特征。石角—新港—白田断裂带目前新活动性较为强烈,因此推测本次河源4.3级地震主要是受该断裂作用的影响。分析余震序列的椭圆形分布特征,发现除NW—SE向分布外,W—E向的展布特征也很明显,因此判断本次地震可能还受南山—坳头断裂影响。两条断裂的同时作用使得本次地震余震分布呈椭圆形态。

另外,作者研究发现峡谷及大坝区长期受水体重力影响,最大主应力轴倾角大于西北端锡场等区域,印证了水扩散对应力状态的影响,即水扩散引

起的孔隙压力变化改变了该区域局部构造应力^[22, 24]。本次地震 P 轴倾伏角为 44° , T 轴近乎水平,和上述研究基本一致。因此分析本次地震不仅受该区域构造应力场控制,同时受到水体长期重力作用的影响,且该作用模式在近几年未发生显著变化。

5.2 东源4.5级地震结果分析

东源4.5级地震发震于库盆区西侧侧翼位置,该区域在2019年之前地震活动性较小,未发生显著性地震。2019年4月21日,该区域首次发生3.0级以上地震,之后,该地区地震活动性显著增强,在2021年和2022年连续发生2次 $M_L 4.0$ 以上地震(图8)。东源4.5级地震是该区域目前发生的最大地震,未来应重点关注该区域的地震活动情况。

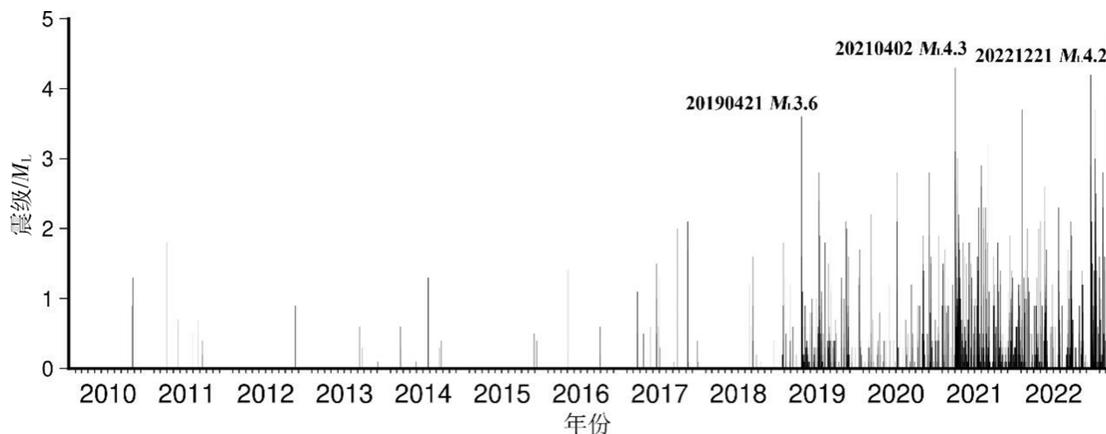


图8 库盆西侧区域地震震级—时间图

Fig.8 The M - T diagram for earthquakes in the western region of the reservoir basin

现阶段库盆区西侧区域的断裂构造研究较少,现有资料也缺乏相应的记载。距离最近的兰屋—太和洞断裂其走向特征和本次反演的震源机制解节面走向不符。而本次地震是典型的走滑型地震, P 轴和 T 轴倾伏角都较小,近乎水平,说明该地震基本不受水体重力作用的影响,可能受控于某条隐伏断裂。通过节面解和余震分布可以判断SSE向为该地震发震断层面的走向,因此判断可能存在的隐伏断裂走向为SSE向,并沿库盆区河道位置延展。

作为2019年以来的新震区,库盆西侧区域地震震源机制特征和北侧锡场区具有一定的相似性。锡场区自2012年以来地震活动显著频发,位于锡场西侧区域发育大量走滑型地震,最大主应力呈NWW向,倾角近水平,这和库盆西侧区域 P 轴特

征相似。库盆西侧区域和锡场西侧区域在空间上是相近的,震源机制解特征相似,可能受控于同一条隐伏的“北 45° 西向的顺河断裂”,而顺河向的断层或裂隙带有利于库水进入深部,这种库水渗透活动向南延伸,从而诱发库盆西侧区域的地震活动^[25]。

库盆区和锡场区西侧主要受构造背景活动影响,受库水重力作用较小,和峡谷大坝区早期地震活动基本一致。而峡谷大坝区是经过长时间的水体侧压作用,使该区域应力场发生偏转,最大主应力愈发垂直^[22, 26]。种种相似性表明,峡谷及大坝区,锡场区,以及本文研究的库盆西侧在早期孕震过程中,主要受构造活动作用,以走滑型地震发育为主。之后随着水体重力作用加剧,峡谷及大坝区应力场发生一定偏转,主压应力轴趋向

垂直,正断型地震开始大量发育。目前,库盆西侧和锡场区仍处于早期孕震阶段,未来该区域的应力场变化及强震活动仍是需要关注的重点。

6 结论

(1)河源4.3级地震余震序列在空间上呈椭圆分布,长轴优势方向为NW—SEE向,短轴为NNE—SSW,序列西侧的震源深度大于东侧的地震,深差约2 km。东源4.5级地震的余震序列空间线性展布特征明显,总体方位为NNW—SSE向,倾向为SW向,倾角较陡,由NNW端至SSE端倾角变化不明显。

(2)震源机制反演结果表明,河源4.3级地震矩震级为4.09,矩心深度为9 km,平均解的节面I走向为339°,倾角为62°,滑动角为-15°,为正走滑型地震事件。东源4.5级地震矩震级为4.25,矩心深度为9 km,平均解的节面I走向为153°,倾角为87°,滑动角为9°,为左旋走滑型地震事件,根据节面走向和余震线性展布特征,推断SSE走向的节面I为东源4.5级地震的发震断层面。

(3)河源4.3级地震P轴为NW向,较为直立,T轴接近水平,和峡谷及大坝区当前的应力场特征基本一致,表明目前峡谷及大坝区的应力场没有发生明显变化,本次地震属于正常的应力释放过程。分析节面走向、附近断裂走向以及余震分布,发现本次地震可能受石角—新港—白田断裂和南山—坳头断裂的共同影响;另外,P轴倾伏角较陡,表明本次地震还受到水体重力作用的影响。受构造和水重力的共同作用是峡谷及大坝区主要的地震发生方式,且该模式在近几年未发生显著变化。

(4)库盆西侧侧翼区域是目前新丰江库区的新震区,自2019年以来,该区域地震活动性显著增强,而东源4.5级地震是该区域发生的最大地震。震源机制结果显示,P轴和T轴倾伏角都较小,近乎水平,表明该地震主要受水平挤压应力场的控制,基本不受水体重力影响,而其走滑型的特征和锡场区西侧的震源机制特征基本一致。两个区域均为新震区,虽然发震时间相隔7年,但由于两个区域空间相近,震源机制特征又相似,可以合理推断存在一条“北45°西向的顺河断裂”贯穿两个区域。该隐伏的断裂有利于库水进入深部并自北向南延伸,从而诱发库盆西侧区域的地震活动。

(5)库盆西侧区域和锡场区均处于早期孕震阶段,主要受控于构造活动背景影响,受库水重力作

用较小,和峡谷及大坝区早期地震活动一致。而峡谷及大坝区经过长时间的水体侧压作用,应力场已发生一定的偏转,最大主应力已趋于垂直。因此,两个新震区应力场的变化特征以及强震活动是未来需要关注的重点。

致谢:本文F-K理论地震图和gCAP波形反演计算程序来源于美国圣路易斯大学的朱露培教授,Focmec_GUI反演程序来源于广东省地震局的杨选高工,图形绘制采用了GMT绘图软件,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 王妙月,杨懋源,胡毓良,等.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,1976,19(1):1-17.
- [2] 陈益明.新丰江水库地震及其小震震源机制的研究[J].华南地震,1982,2(3):64-71.
- [3] 丁原章,曾宪译,陈益明.新丰江水库区诱发地震的余震活动[J].地震地质,1982,4(1):23-30.
- [4] 潘建雄,肖安予.新丰江水库区地震构造及其活动特征的初步研究[J].地震地质,1982,4(2):53-58.
- [5] 魏柏林,陈庞龙,李富光,等.新丰江地震震源机制解及构造应力场[J].地震学报,1991,13(4):462-470.
- [6] 丁原章.水库诱发地震[M].北京:地震出版社,1989.
- [7] 丁原章,潘建雄,肖安予,等.新丰江水库诱发地震的构造条件[J].地震地质,1983,5(3):63-74.
- [8] 万永芳,叶东华,陈大庆.广东新丰江地区地震研究[J].华南地震,2008,28(2):59-66.
- [9] 刘特培,邵叶,杨选,等.利用高精度小震资料确定新丰江水库大坝区北西向发震断层[J].地震学报,2017,39(1):23-33.
- [10] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(5):1634-1641.
- [11] Zhu L P, Ben-zion Y. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data[J]. Geophysical Journal International, 2013, 194(2):839-843.
- [12] 王亮,薛霆斌,季海磊.集集强余震震源机制解分析[J].地球物理学进展,2016,31(5):1998-2004.
- [13] 王力伟,吴国瑞,黄柳芳.CAP方法反演新丰江锡场地区 M_L 4.0级以上地震震源机制解[J].华南地震,2018,38(3):1-8.
- [14] Wei S J, Zhan Z W, Tan Y, et al. Locating earthquakes with surface waves and centroid moment tensor estimation[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2012, 117(b04):309.

- [15] Snoke J A, Munsey J W, Teague A C, et al. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data[J]. *Earthquakes Notes*, 1984, 55(3):15-20.
- [16] Snoke J A. Earthquake mechanisms[M]. Boston MA: Encyclopedia of Earth Science, Geophysics, 1989.
- [17] 刘泽民,倪红玉,张炳,等. 基于FOCMEC方法反演震源机制解的交互式程序研制与使用[J]. *华北地震科学*, 2015, 33(1):19-24.
- [18] 刁桂苓,于利民,李钦祖. 震源机制解的系统聚类分析——以海城地震序列为例[J]. *中国地震*, 1992, 8(3):86-92.
- [19] 林庆西,姜喜姣. 震源机制解谱聚类方法的研究及应用[J]. *中国地震*, 2023, 39(1):79-92.
- [20] Kagan Y Y. 3-D rotation of double-couple earthquake sources[J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 106(3):709-716.
- [21] Zoback M L. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1992, 97(B8):11703-11728.
- [22] 姜喜姣,林庆西,龚萱,等. 2012年以来新丰江水库区地震震源机制解及构造应力场时空变化特征[J]. *地震*, 2022, 42(3):64-80.
- [23] 赵翠萍,罗钧,周连庆. 新丰江水库应力场及2012年2月16日4.8级地震震源特征研究[J]. *国际地震动态*, 2012, 2012(6):250-250.
- [24] He L P, Sun X L, Yang H F, et al. Upper crustal structure and earthquake mechanism in the Xinfengjiang water reservoir, Guangdong, China[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2017, 123(5):3799-3813.
- [25] 杨卓欣,刘宝峰,王勤彩,等. 新丰江库区上地壳三维细结构层析成像[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4):1177-1189.
- [26] 林庆西,姜喜姣,梁明. 利用谱聚类方法研究新丰江库区的震源机制解[J]. *中国地震*, 2023, 39(3):502-515.