

王力伟, 王小娜, 吴国瑞, 等. 2018 年 3 月 20 日阳江新湖水库 M_L 4.2 级震群发震机理分析[J]. 华南地震, 2018, 38(S1): 1-8. [WANG Liwei, WANG Xiaona, WU Guorui, et al. Seismological Mechanism Analysis of M_L 4.2 Earthquake Swarm on March 20th in Xihu Reservoir, Yangjiang [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(S1): 1-8]

2018 年 3 月 20 日阳江新湖水库 M_L 4.2 级震群发震机理分析

王力伟^{1,2}, 王小娜², 吴国瑞², 黄柳芳²

(1. 中国地震局地球物理研究所中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081;

2. 广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 2018 年 3 月 20 日, 阳江新湖水库发生了 M_L 4.2 级震群活动。为研究该次震群的发震构造及机理, 采用 CAP、初动及振幅比方法反演了 3 次 M_L 3.0 级以上地震的震源机制, 采用双差定位方法对震群序列进行了重新定位, 并计算了这 3 次地震之间的静态库仑应力触发效应。结果表明: 主震震源机制为走向 311°、倾角 65°、滑动角 -61°, 破裂性质为正断兼左旋走滑, 震源破裂类型与余震空间展布符合较好, 且与 NW 向左旋正断型的洋边海断裂相吻合。该次震群活动是洋边海断裂北延线在区域构造应力场作用下破裂的结果。静态库仑应力计算结果显示: 3 次地震之间应力触发效应明显, 2018 年 2 月 18 日 M_L 3.2 级地震触发了 2018 年 3 月 17 日 M_L 3.5 级地震, 这两次地震又联合显著触发了 2018 年 3 月 20 日 M_L 4.2 级地震。

关键词: 新湖震群; 震源机制; 双差定位; 库仑应力

中图分类号: P315.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)S1-001-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.S1.001

Seismological Mechanism Analysis of M_L 4.2 Earthquake Swarm on March 20th in Xihu Reservoir, Yangjiang

WANG Liwei^{1,2}, WANG Xiaona², WU Guorui², HUANG Liufang²

(1. Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

2. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: On the March 20th, 2018, a significant M_L 4.2 earthquake swarm occurred in Xihu reservoir, Yangjiang. To systematically analyze the seismological mechanism of this swarm, the paper firstly inversed the focal mechanisms of three earthquakes with $M_L \geq 3.0$ by using CAP method and polarity and SV/P amplitude ratio method. Secondly, the paper relocated the sequence by using HypoDD method. At last, in order to study earthquake triggering effect in this swarm, the paper calculated static coulomb stress triggering effect between

收稿日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41604055、41474114)

作者简介: 王力伟(1985-), 男, 工程师, 主要从事介质结构和波速变化研究。

E-mail: wlw032@163.com.

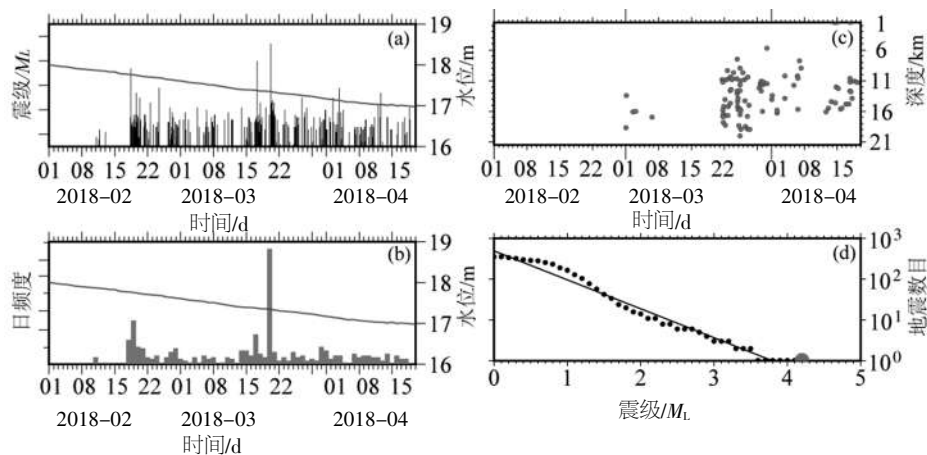
these three earthquakes with $M_L \geq 3.0$. The result shows: the M_L 4.2 main shock is a significant normal fault with small left lateral components, which has a strike 311° , dip 65° and rake -61° . Considering the well agreement of this focal mechanism among with the relocated earthquake distribution and the Yangbian sea active fault, the paper suggests that this M_L 4.2 earthquake swarm is fractured on northwest extension of Yangbian sea active fault guided by regional tectonic stress. The static coulomb stress change among these three earthquakes show that these three earthquakes have been triggered by each other. The M_L 3.5 earthquake on March 17th, 2018 has been triggered by the M_L 3.2 earthquake on February 18th by 0.016 Bar, and The M_L 4.2 earthquake on March 20th has been significantly triggered by the two former events by 0.119 Bar.

Keywords: XinHu earthquake swarm; Focal mechanism; Double difference relocation; Coulomb stress change

0 引言

2018年2月11日开始,阳江新湖水库开始出现震群活动,截止到2018年4月18日,共发生 $M_L \geq 0.0$ 级地震357次,其中, M_L 0.0~0.9级190次, M_L 1.0~1.9级153次, M_L 2.0~2.9级11次, M_L 3.0~3.9级2次, M_L 4.0~4.9级1次,最大地震为3月20日发生在库区中部的 M_L 4.2级地震(图1)。由序列 $M-T$ 、日频次 $N-T$ 、 $\lg N-M$ 图及深度分布图可见显示(图1),0级以上余震最大日频次出现在3月20日,达66次,其后地震频次逐步衰减,至4月18日左右,日频次衰减至3次左右,但仍持续。

阳江地区构造活动强烈,1969年7月26日曾发生 M_s 6.4级地震^[1]。因该本次震群发生在背景地震活动较弱的新湖水库,且打破了阳江地区长达10年的 $M_L \geq 4.0$ 级地震平静已经平静超过10年未发生,远超历史平静最大时间间隔5.5年。因此,研判该本次震群发震机理,对震情研判具有重要意义。为分析该震群的发震机理,本文采用CAP方法、初动和振幅比方法计算了3次 M_L 3.0级以上地震的震源机制解,并采用双差定位方法对序列进行了精定位研究,最后,通过计算3次 M_L 3.0级以上地震的静态库仑应力触发效应,讨论了3次地震之间的应力触发效应。



(a) 新湖水库震群序列震级-时间图; (b) 日频次-时间图; (c) 震源深度-时间图; (d) 最小完整震级 $\lg N-M$ 图。地震目录为2018年2月1日至4月18日新湖库区 M_L 0.0级以上地震。

图1 新湖水库 M_L 4.2级震群时间序列和最小完备震级图示

Fig.1 Time sequence of Xinhu M_L 4.2 earthquake swarms and the M_C magnitude

1 研究方法

1.1 震源机制解反演方法

中小地震的震源机制解是判断其破裂类型、发震构造和区域应力场的重要参考^[2-3], 常见的反

演方法有P波初动法^[4], P、SV和SH初动和振幅比法^[5], 以及波形反演方法(如面波反演方法^[6], 体波反演方法^[7], 面波和体波联合反演方法^[8-9])。每种各方法各有优缺点, 如初动方法依赖需要台站的方位角和震中距分布良好的台站, 且无法对震

级和震源深度进行反演,但能反演 M_L 3.5 级以下的小地震。采用波形方法能全面的利用波形信息,且能对震级和震源深度进一步反演,但仅适用于 M_L 4 级以上的较大地震^[10]。本文对 M_L 3.5 级以上地震采用 CAP 方法^[9,11],并同时对其震级和震源深度进一步反演^[12-13]。 M_L 3.5 级以下地震采用基于初动和振幅比的 Snoke 方法^[5,14]。

CAP 方法将近震和区域地震波形(震中距 300 km 左右)波形按照体波和面波分为垂向 Pnlz、径向 Pnlr(P 波及其后续震相)和垂向 SVz、径向 SVr 和切向 SH 面波部分,分别将不同窗口的观测波形与理论计算波形进行比较,通过建立误差函数,并在相关参数空间内进行搜索得出最优解。该方法允许波形拟合时有不同的时移,可减少地下速度结构对结果的影响。同时,可对 Pnl 和面波赋予不同权重,通过给 Pnl 部分赋更大的权重来避免面波在反演过程中权重过大的影响。并在误差函数中引入距离影响因子,以校正衰减对波形的影响。

Snoke 方法^[5]利用双力偶点源模型,采用格点尝试法求取所有满足小于所设定的矛盾数上限的机制解。对求得的这些机制解,通过比较理论计算与实际观测得到的 P 波、SV 波、SH 波初动符号和振幅比,选择其中拥有矛盾符号数最少和振幅比残差最小的机制解,作为最佳震源机制解。

1.2 精定位方法

地震精定位是指准确确定震源的位置及发震时刻,精定位结果对认识地震的发震构造、判断余震趋势和时空演化具有重要的参考价值^[15]。双差定位方法是一种相对定位方法^[16],它的前提假设是,其基于如果两个地震事件之间的距离远小于其到地震台站之间的距离和介质速度变化的不均匀尺度,则认为这两个地震到台站的路径效应是相同的。因此,两地震之间同一震相的走时差便是两事件之间空间位置的差异。由于减小了速度模型对定位结果的影响,提高了定位精度,因此被广泛应用于地震定位研究^[17]。本文利用观测报告,仅使用震相数据对新湖水库 M_L 4.2 级震群序列进行了重新定位。

1.3 静态库仑应力计算方法

静态库仑应力变化利用地震位错产生的应力场投影到接收断层的剪应力和正应力来综合描述断层的破裂状态,其计算公式为: $\delta\sigma_{\text{CRS}} = \delta\tau + \mu\delta\sigma_n$, 其中 $\delta\tau$ 为剪切应力变化(与滑动方向同向为正),

$\delta\sigma_n$ 为正应力变化(张开为正),其中 $\mu' = (1-B)$, B 为 Skempton 系数,理论范围为 $[0,1]$ ^[18]。库仑应力增加,则促进断层破裂,使下次地震发生时间提前,反之,则抑制断层破裂,使下次地震发生时间延后。由于其物理意义明确,因此被广泛应用于大地震之间的应力触发效应研究^[19],以及主震对余震的触发效应研究^[20-21]。

目前,地震位错产生的位移场和应变场计算方法有两种,一种是 Okada 给出均匀弹性半空间中任意位错点源和有限断层面源在介质内部产生的位移场和应变场的解析表达式^[22]。另一种是 Wang 发展的自重多层粘弹性介质中任意位错产生应力场的格林函数求解方法^[23],本文利用第一种方法,利用 Coulomb3.3 软件^[20-21]计算 3 次 M_L 3.0 级以上地震之间的静态应力触发效应。

2 数据选取与处理

2.1 区域构造背景

新湖水库 M_L 4.2 级震群位于阳江地区,该区位于南海北部陆缘滨海断裂带与珠江口外拗陷带交接地段的中段^[1],区内构造差异运动强烈,广布夷平面和阶地。该区构造以北东向断裂为主,北西向次之^[1,24-25]。北东向断裂主要有织箕断裂、吴川—四会断裂、广州—阳江断裂、平冈断裂及发育于海域的滨海断裂等,其中织箕断裂东北端起至阳春,向西南方向延伸至织箕入海,长约 50 km,总体走向 N30°走向,倾向 SE,倾角 60°~80°,具有压性活动特征^[1,24-25]。平冈断裂起至埗场,向西南经平冈、石鼓庙并延伸入洋边海,断裂总体走向 N70°E,倾向 SE,倾角 60°~70°,具有右旋正断活动特征^[1,24-25]。北西向断裂主要有洋边海断裂,其控制着洋边海断陷的形成,具有左旋正断活动特征^[1],活动性较强,且是 1969 年 7 月 26 日阳江 M_s 6.4 级地震的震中区。阳江地区 1970 年以来已发生 3 次 5 级左右地震,如 1986 年 1 月 28 日 5 级、1987 年 2 月 25 日 4.8 级、2004 年 9 月 17 日 4.9 级(图 2),为我省地震最活跃的地区之一。

图中蓝色区域为新湖水库水域,实心圆点为新湖震群 2018 年 2 月 11 日至 2018 年 4 月 18 日 M_L 0.0 级以上地震,黑色沙滩球为 3 个 M_L 3.0 级以上地震的 CMT 解,灰色线条为区域活动断裂^[1,26],灰色圆圈为地名。左下图插图,灰色实心圆点为 1970 年以来 M_L 1.0 级以上地震,黑色矩形框为新

湖库区范围,黑色线条^[26]和灰色线条^[1]为区域活动断裂^[26],灰色线条为区域活动断裂^[1];黑色五角星

为阳江地区 4 次 M_L 4 级以上地震,黑色沙滩球是其 CMT 解。

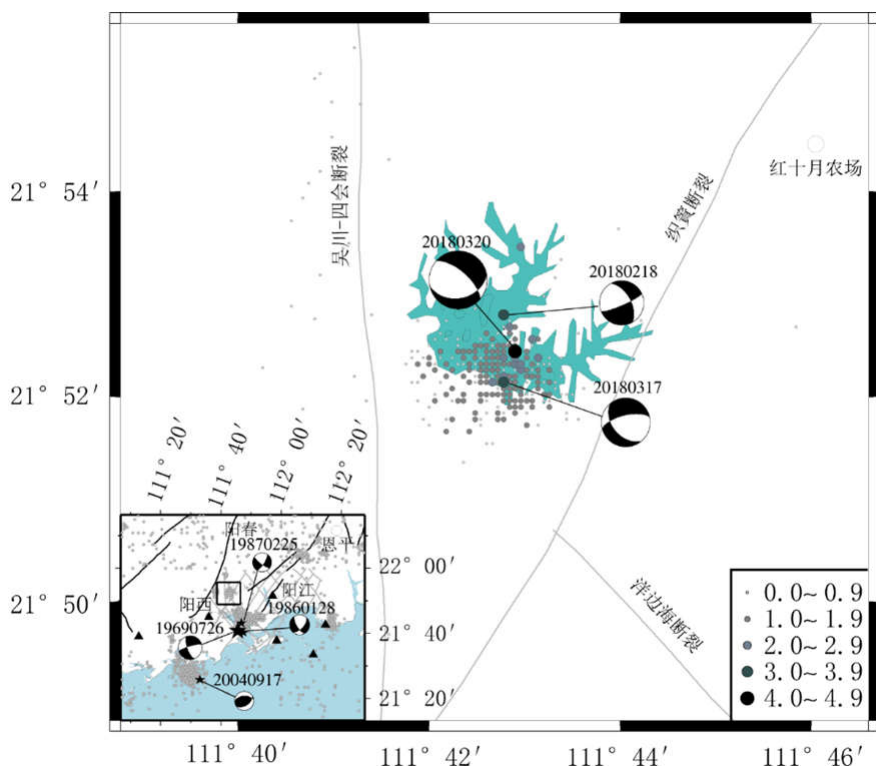


图 2 新湖水库 M_L 4.2 级震群活动分布及区域构造图示

Fig.2 Distribution of regional active faults and M_L 4.2 earthquake swarms of Xinhu reservoir

2.2 震源机制解反演

本文使用 CAP 方法反演了 M_L 4.2 级主震的震源机制解和震源深度,使用初动和振幅比方法反演了 M_L 3.0 级以上的其它 2 个地震的震源机制解。地震目录和事件波形均来自广东省数字地震台网,选取震中距在 300 km 以内,信噪比较高的台站进行计算。CAP 方法计算时,首先剔除 50 km 以内和 300 km 以外以及波形较差的台站,然后仅选取宽频带记录波形进行反演。数据预处理包括去均值、去倾斜、水平分量旋转到径向和切向、手动拾取 P 波和面波震相到时、截取 P 波长度 35 s,滤波范围 0.02~0.15 Hz,面波长度 70 s,滤波范围 0.02~0.1 Hz。然后采用频率-波数法计算理论地震图^[27],一维速度模型采用 2015 年珠江口人工地震探测实验西侧 L1 测线的人工爆破反演结果(图 3a)^[28],并采用与观测波形相同的截取窗长和滤波参数进行预处理。我们没有去除仪器响应,而直接采用观测的速度记录与 FK 计算的速度记录进行比较拟合,波形拟合时允许 P 波有 5 s, S 波有 10 s 的时间移

动, P 波权重为 1.0, 面波权重为 0.5。最终选取 13 个台站,反演了 2018 年 3 月 20 日 M_L 4.2 级主震的震源机制解。

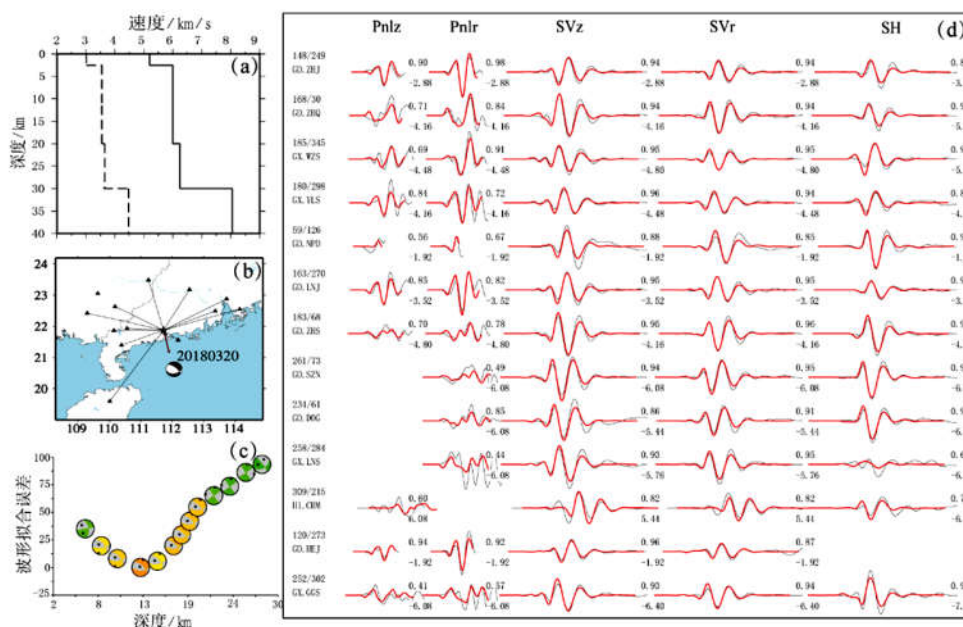
初动和振幅比反演时,选用信噪比较高的波形数据,手动标注信噪比较高的 Pg、Pn 初动极性和部分 SH 和 SV 的极性,并直接在速度记录上,震相到时前 3 个周期内量取 P 波和 S 波的最大振幅。2018 年 2 月 18 日 M_L 3.2 地震共有 15 个 P, 3 个 SV 和 8 个 SH 极性和 26 个振幅比数据参与反演。2018 年 3 月 17 日 M_L 3.5 地震共有 15 个 P, 2 个 SV 和 7 个 SH 极性和 24 个振幅比数据参与反演,结果见图 4a。

2.3 地震精定位

本文利用双差定位方法,对 2018 年 2 月 11 日~2018 年 4 月 24 日记录到的 359 个 M_L 0.0 级以上地震进行重新定位,得到了 230 个事件的精定位结果。双差数据挑选条件为:事件对之间最大距离设置为 2 km,事件对至台站最远距离为 300 km,邻居间最小震相对数目为 8 个。共挑选出

6156 个 P 波走时差和 10 912 个 S 波走时双差数据, 并设 P 波震相权重系数为 1.0, S 波震相权重系数为 0.75, 选取阻尼最小二乘进行反演。介质一维速度模型采用珠江口人工结构探测实验 L1 测

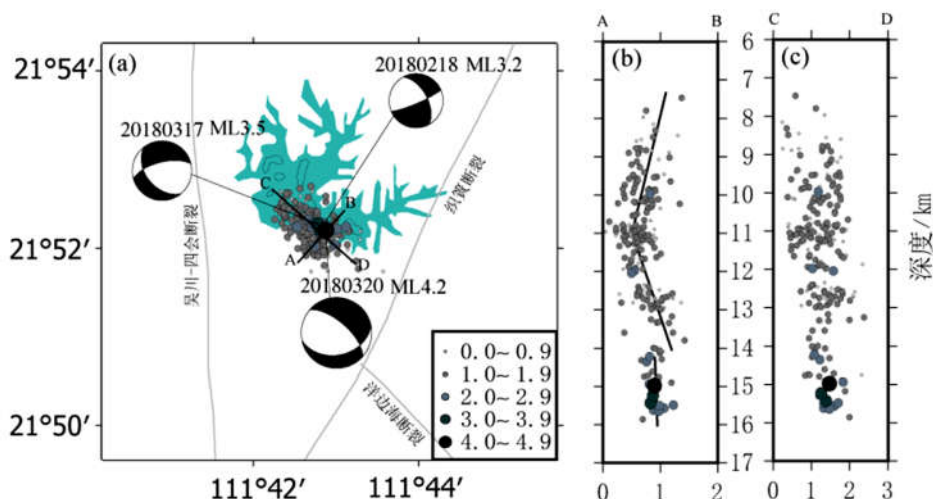
线反演的结果^[28]。精定位结果见图 4, 精定位后, 绝对走时残差由 399 ms 降到 5.9 ms, x 、 y 、 z 三分向 2 倍均方根偏差由分别由 821 m、982 m 和 1 429 m 分别降到 14 m、16 m 和 22 m。



(a) 理论地震图计算采用的一维速度模型; (b) CAP 反演过程所使用的台站分布; (c) 波形拟合误差随深度分布图, 在深度空间搜索误差最小的 CMT 解, 当震源深度为 13.05 km 时, 误差最小, 为最优解; (d) 最优 13.05 km 深度理论计算波形和实际观测波形拟合效果图示。其中, 红线代表理论波形, 黑线代表实际观测波形, 波形右上角标注了理论波形和观测波形的相关系数, 右下角标注了相应震相的时间移动, 每行最左边标注了台站的台网标识和台站名, 以及震中距和方位角。

图 3 2018 年 3 月 20 日新湖 M_L 4.2 级地震的震源机制解反演实例

Fig.3 Focal mechanism inversion of Xinhu M_L 4.2 main earthquake on March 20th, 2018



(a) 新湖 M_L 4.2 级震群双差定位结果, 蓝色区域为新湖库区, 沙滩球为 3 次 M_L 3.0 级以上震源机制解, 其中 2018-03-20 M_L 4.2 采用 CAP 方法反演, 其它两个采用初动和振幅比方法反演, A-B 和 C-D 为深度剖面起止位置; (b) 深度剖面 CA-DB, 图例同图 (a), 不同颜色代表不同大小的地震; (c) 深度剖面 AC-BD, 图例同图 (a), 不同颜色代表不同大小的地震。

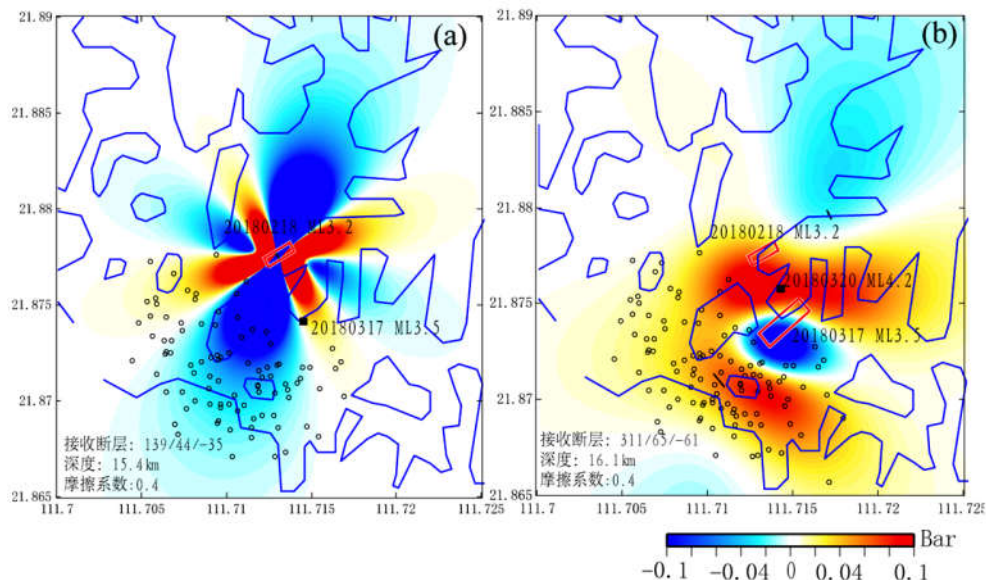
图 4 2018 年 3 月 20 日新湖 M_L 4.2 级震群序列精定位结果

Fig.4 Relocation of Xinhu M_L 4.2 earthquake sequence

2.4 静态库仑应力变化计算

我们利用基于均匀弹性半空间位错理论的 *coulomb3.3* 软件^[20-21], 分别计算了 3 次 M_L 3.0 级地震之间的静态库仑应力触发效应。即源断层选择已发生的地震, 接收断层选择即将发生的地震的节平面上, 真实发震断层面根据区域活动断裂展

布和余震精定位结果, 均选择 NW 走向的节平面为真实破裂面。源断层的破裂面尺度和位错量根据 Wells & Coppersmith 经验关系计算^[29], 地震位置采用精定位后的结果, 其中 3 月 20 日 M_L 4.2 级地震的震源深度采用 CAP 波形拟合结果, 有效摩擦系数为 0.4。计算结果见图 5。



(a) 2018-02-18 M_L 3.2 级对 2018-03-17 M_L 3.5 级地震的静态库仑应力触发图示, 蓝色线条代表新湖水库水域, 黑色圆圈代表 2018 年 2 月 18 日至 2018 年 3 月 17 日期间精定位后的地震, 黑色实心矩形为 M_L 3.5 地震位置; 红色矩形框为源断层在地表的投影, 选择 NW 走向的节平面为真实破裂面, 注意因是正断层, 因此断层面沿走向的长度小于沿倾向的长度。

(b) 2018-02-18 M_L 3.2 和 2018-03-17 M_L 3.5 级地震联合对 2018-03-20 M_L 4.2 级地震的静态库仑应力触发结果, 黑色圆圈代表 2018 年 2 月 18 日至 2018 年 03 月 20 日期间精定位后的地震分布。

图 5 新湖库区 3 次 M_L 3.0 级以上地震之间的静态库仑应力触发

Fig.5 Static coulomb stress triggering effect between 3 earthquakes with $M_L \geq 3.0$ in Xinhui earthquake sequence

3 结果与分析

由图 3 可见, CAP 方法反演的 2018 年 3 月 20 日 M_L 4.2 级地震最佳震源深度为 13.05 km, 节面 1: 311° 、 65° 、 -61° , 走向 NW, 倾向 NE, 节面 2: 78° 、 37° 、 -136° , 走向 NE, 倾向 SE, P 轴方位角 263° , 倾角 59° , 与阳江地区近 NW 向的主压应力场方向吻合^[25,30], 最佳拟合震级 M_w 3.89, 破裂性质为正断兼左旋走滑; 由图 4 可见, 初动和振幅比方法反演的 2018 年 3 月 17 日 M_L 3.5 级地震节面 1: 139° 、 44° 、 -35° , 走向 NW, 倾向 SE, 节面 2: 256° 、 65° 、 -128° , 走向 NE, 倾向 NW, P 轴方位角 119° , 倾角 52° , 破裂类型为左旋走滑兼正断; 2018 年 2 月 18 日 M_L 3.2 级地震节

面 1: 330° 、 56° 、 -10° , 走向 NW, 倾向 NE, 节面 2: 66° 、 81° 、 -145° , 走向 NE, 倾向 SE, P 轴方位角 294° , 倾角 29° , 破裂类型为左旋走滑兼正断。由三次地震的震源机制解可见, 三次地震均受该区北西向区域应力场调制, 且新湖库区水位并没明显变化(变化少于 1xxx m, 图 1a 和 1b), 且精定位后的震源深度分别为 13.05 km、15.58 km 和 15.41 km, 已至中地壳, 因此, 三次地震均为构造地震事件。我们根据区域活动构造展布和余震精定位结果, 认为 NW 向的节面 1 为真实破裂断面, 并选择它用于静态库仑应力场的计算。

图 4 给出了 2018 年 2 月 11 日至 2018 年 4 月 24 日, 新湖 M_L 4.2 震群序列的双差定位结果, 从图 4a 可见, 整个余震序列位于近 NS 向的吴川—

四会断裂东侧, NE 向的织箕断裂西侧, 和 NW 向洋边海断裂北延线的北侧, 序列震中集中在新湖水库南侧, 呈 NW 向展布特征。从平行于序列展布的 C-D 深度剖面可见, 序列震中深度在 9~16 km 之间, 且集中在 11 km 和 13 km 深度处, 序列沿深度方向无明显倾向。从垂直于序列展布的 A-B 深度剖面看, 11 km 以上的(即上地壳内)地震沿深度方向总体倾向 SWS, 倾角约 75° , 11~14 km 之间的(中地壳浅部)的地震总体倾向 NE, 倾角约 78° , 14~16 km 之间的(中地壳深部)地震近直立。其中 M_L 4.2 级主震破裂断面(节面 1)的走向 NW、倾向 NE, 倾角 65° 与该深度的余震空间展布相一致, 震源机制解显示的正断兼左旋走滑破裂类型与 NW 向的洋边海断裂左旋正断的活动特征相吻合。但该位置没有已知的断层, 因此, 我们认为该次新湖 M_L 4.2 级震群活动是 NW 走向的洋边海断裂北延线在构造应力场作用下活动的结果。

图 5 显示了该震群 3 次 M_L 3.0 级以上地震静态库仑应力触发结果。从计算结果可见, 2018 年 2 月 18 日 M_L 3.2 级对 2018 年 3 月 17 日 M_L 3.5 级地震的静态库仑应力增加 0.016 Bar, 2018 年 2 月 18 日 M_L 3.2 和 2018 年 3 月 17 日 M_L 3.5 级地震联合对 2018 年 3 月 20 日 M_L 4.2 级地震的静态库仑应力增加 0.119 Bar。一般认为静态库仑应力大于 0.1 Bar 即认为显著触发^[9], 因此, 我们认为, 2018 年 2 月 18 日 M_L 3.2 级地震触发了 2018 年 3 月 17 日 M_L 3.5 级地震, 这两次地震又联合显著触发了 2018 年 3 月 20 日 M_L 4.2 级地震。

4 结语

本文利用 CAP 方法和初动及振幅比方法计算了 2018 年 3 月 20 日新湖 M_L 4.2 级震群 3 次 M_L 3.0 级以上地震的震源机制解, 并对该震群序列进行了精定位研究。震源机制解显示 M_L 4.2 级主震的走向、倾角、滑动角分别为 311° 、 65° 、 -61° , 破裂性质为正断兼左旋走滑, 震源深度为 13.05 km。但是, 新湖水库已有资料并没有发现与该地震走向和活动性质相近的已知断裂。因该地震发生在新湖水库库区, 对其发震机理的认识变得更加复杂, 台网观测目录震群空间呈近 EW 向展布, 与该地震的震源机制和区域断裂的活动性质不吻合。为进一步认识此次震群的发震机理, 本文对此次震群序列进行了精定位研究, 精定位后的地震空间呈 NW 向展布, 且 M_L 4.2 级主震所在的深度

附近, 11~14 km 之间的地震总体倾向 NE、倾角约 78° , 与该次地震的震源机制解节面 1 相吻合, 震源机制解显示的正断兼左旋走滑破裂类型也与 NW 向的洋边海断裂左旋正断的活动特征相吻合。因此, 我们认为本次该次新湖 M_L 4.2 级震群活动是 NW 走向的洋边海断裂北延线在构造应力场作用下破裂的结果。

为进一步研究 3 次 M_L 3.0 级地震之间的应力触发现象, 我们计算了 3 次地震之间的静态库仑应力。计算结果表明, 2018 年 3 月 17 日 M_L 3.5 级地震被 2 月 18 日地震触发了 0.016 Bar, 2018 年 3 月 20 日 M_L 4.2 地震被前两次地震触发了 0.119 Bar。我们认为, 3 次地震之间的应力触发效应明显, 2018 年 2 月 18 日 M_L 3.2 级地震触发了 2018 年 3 月 17 日 M_L 3.5 级地震, 这两次地震又联合显著触发了 2018 年 3 月 20 日 M_L 4.2 级地震。

致谢: 本文事件波形和观测报告来至广东省数字地震台网, 新湖水库水位数据来至阳江市地震局, CAP 方法采用 GeotaoS 软件包, SNOKE 方法采用 FOCMEC 交互式程序包, 精定位采用 HypoDD, 库仑应力采用 Coulomb3.34, 在此一并表示感谢。感谢评审专家和期刊编辑对文稿的修改完善建议。

参考文献:

- [1] 钟贻军, 任镇寰. 1969 年阳江 6.4 级地震发震构造研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(4): 92-98.
- [2] 陈颢. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数 [J]. 地球物理学报, 1978, 21(2): 142-159.
- [3] Uski M, Hyvönen T, Korja A, et al. Focal mechanisms of three earthquakes in Finland and their relation to surface faults [J]. Tectonophysics, 2003, 363(1-2): 141-157.
- [4] Hardebeck J L, Shearer P M. A new method for determining first -Motion focal mechanisms [J]. Bull.seism.soc.am, 2002, 92(6): 2264-2276.
- [5] Snoke J A, Munsey J W, Teague A G, et al. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data [J]. Earthquake Notes, 1984, 55(3): 15-40.
- [6] Patton H J, Zandt G. Seismic moment tensors of western U. S. earthquakes and implications for the tectonic stress field [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1991, 96 (B11): 18245-18259.
- [7] Dreger D S, Helmberger D V. Determination of source parameters at regional distances with three -component sparse network data [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1993, 98(B5): 8107-8125.

- [8] Ritsema J, Lay T. Rapid source Mechanism Determination of Large (M_w -Greater-Than-or-Equal-to-5) Earthquakes in the Western United States [J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(15): 1611-1614.
- [9] Zhu L, 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.
- [10] Tan Y, Helmberger D. A new method for determining small earthquake source parameters using short-period P waves [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(4): 1176-1195.
- [11] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bull. seismol. soc. am, 1994, 84(1): 91-104.
- [12] Lei X, Xie C, Fu B. Remotely triggered seismicity in Yunnan, southwestern China, following the 2004 M_w 9.3 Sumatra earthquake [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2011, 116(B8).
- [13] Lei X, Yu G, Ma S, et al. Earthquakes induced by water injection at 3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2008, 113(B10).
- [14] 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.
- [15] Aki K, Lee W H K. Determination of three - dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1. A homogeneous initial model [J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81(23): 4381-4399.
- [16] 敬少群, 王佳卫. 常德及邻区小震重新定位与速度结构的联合反演 [J]. 华南地震, 2016, 36(2): 13-19.
- [17] 黄媛, 吴建平, 张天中, 等. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2008(10): 1242-1249.
- [18] Cocco M., Rice J. R. Pore pressure and poroelasticity effects in coulomb stress analysis of earthquake interactions [J]. J. Geophys. Res., 2002, 108 (B2): ESE. 2.1-ESE.2.17.
- [19] 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响 [J]. 地震学报, 2007, 29(1): 115-129.
- [20] Toda S, Stein R S, Richards - Dinger K, et al. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2005, 110(B5).
- [21] Lin J, Stein R S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike - slip faults [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2004, 109(B2): 16-32.
- [22] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1992, 82: 1018-1040.
- [23] Wang R J. A Simple orthonormalization method for stable and efficient computation of green's functions [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1999, 89(3): 733-741.
- [24] 魏柏林, 何晓灵. 1584 年肇庆 5.0 级双震的发震构造讨论 [J]. 华南地震, 2002, 22(2): 59-63.
- [25] 魏柏林, 薛佳谋, 秦乃岗, 等. 阳江地区的震源机制解、发震构造与应力场 [J]. 华南地震, 1988, 8(1): 5-15.
- [26] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 2002, 32(12): 1020-1030.
- [27] Zhu L, Rivera L A. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2002, 148(3): 619-627.
- [28] Zhang X, Ye X, Lv J, et al. Crustal structure revealed by a deep seismic sounding profile of Baijing-Gaoming-Jinwan in the Pearl River Delta [J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17(1): 186-194.
- [29] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. Bull. seism. soc. am, 1994, 84(4): 974-1002.
- [30] 康英, 杨选, 吕金水, 等. 广东及邻区地震的震源机制特征 [J]. 中国地震, 2005, 21(3): 320-331.