

龙政强, 姚宏, 阎春恒, 等. 2013年6月广西平果震群特征及成因[J]. 华南地震, 2015, 35(2): 89-95. LONG Zhengqiang, YAO Hong, YAN Chunheng, et al. Primary Study of Genesis and Characteristics of Pingguo Earthquake Swarm in June, 2013 in Guangxi[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(2): 89-95.]

2013年6月广西平果震群特征及成因分析

龙政强, 姚宏, 阎春恒, 徐宁, 何嘉幸, 牟剑英

(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

摘要: 2013年6月16日至7月底广西平果县果化镇附近发生密集、震感明显的震群活动。结合震中区地震地质背景、震群序列及震群深度等方面特征, 利用广西数字地震台网的波形记录, 计算并分析 M_L 2.0级以上地震的拐角频率、应力降。研究表明: 平果震群是一组由天然地震、水库地震、塌陷地震等多种类型地震交叉叠加的震群活动, 其频度高、震源浅、震感明显; 在震级相同情况下, 其拐角频率和应力降均比本区域构造地震的拐角频率和应力降小, 其中应力降小约1个量级; 附近的排泥库随着排入泥浆增加, 加之库区地质条件复杂, 岩溶裂隙发育, 应注意“水库诱发型”地震的发生。

关键词: 震群; 震相特征; 震源参数; 拐角频率; 应力降

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2015) 02-0089-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.02.014

Primary Study of Genesis and Characteristics of Pingguo Earthquake Swarm in June, 2013 in Guangxi

LONG Zhengqiang, YAO Hong, YAN Chunheng, XU Ning,

HE Jiaxing, MOU Jianying

(Earthquake Administration of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China)

Abstract: From June 16th, 2013 to the end of July, near the Guohua town in Pingguo country of Guangxi, dense earthquake swarm activity is obviously felt. Combined with the geological background of the epicentral region, the earthquake swarm sequence and swarm depth characteristics, the waveforms recorded by Guangxi digital seismic network, the paper calculated and analyzed the corner frequency, stress drop of M_L 2.0 earthquakes. The results show that: Pingguo earthquake swarm with high frequency, light source, obviously feel is a group of natural earthquakes, reservoirs earthquakes, the collapse earthquakes and other types earthquakes of seismic cross superposition of the earthquake swarm activity; under the same magnitude, the corner frequency and stress drop are lower than that of regional tectonic earthquakes, the stress drop is about 1 order lower; with the increase of mud in the mud pool, and coupled with the complex geological conditions of reservoir, karst fractured, “reservoir induced earthquake” should be pay attention to.

Key words: Earthquake swarm; Characteristics of seismic phase; Source parameters; Corner frequency; Stress drop

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 广西地震局三结合项目(GXJ2011002)和中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20140318、20142018)共同资助

作者简介: 龙政强 (1974-), 男, 工程师, 主要地震监测与研究等工作。

E-mail: longzhengqiang@126.com.

0 引言

2013年6月16日至7月底广西平果县果化镇附近发生密集、震感明显的震群活动。广西地震台网共记录到1 149次地震,其中 M_L 0.0~0.9级857次, M_L 1.0~1.9级263次, M_L 2.0~2.9级27次, M_L 3.0~3.9级2次,最大震级为 M_L 3.0级,为6月21日13时28分果化镇 M_L 3.0级和7月3日8时45分果化镇 M_L 3.0级地震。震中距离平果县城约12 km,尽管震群震级不大,但震群附近的果化镇那荣村、布荣村、山营村,马头镇那塘村、龙来村有明显震感,还听到较明显地声。在震群活动期间,位于震区附近的中铝广西分公司3号排泥库局部防渗层发生坍塌,导致泥浆沿着地下暗河溶洞、管道裂隙泄漏,给当地社会生产生活产生一定的影响。震群发生后,当地政府有关部门及时启动应急响应,积极应对并成功处置。

本文采用广西数字地震台网记录的波形资料,深入分析震群序列、波形记录及震群深度等方面特征,计算并分析 M_L 2.0级以上地震的拐角频率、应力降,同时结合震中区地震地质情况对震群成因进行初步分析探讨。

1 震中区概况

据现场调查,震中区东北方向约3 km处是中铝广西分公司3号排泥库。该排泥库位于果化镇那荣村东侧约3 km处,在果化镇那塘村板下屯西北面、九区采选场地的西部,与九区采选场地一山之隔,与板下屯之间以板兄1号洼地相隔,整个库区大致呈“U”型,库址为已开采结束的平果铝土矿九区41号矿体所在洼地。库区底部地势较平坦,四周为岩溶山峰,并由岩溶山峰隔成的狭口将该库分为三个岩溶洼地。库区地质条件复杂,岩溶裂隙发育,库区汇水面积3.08 km²,总库容8010万m³,有效库容6 969万m³,最终堆积标高为420 m,其矿泥最大堆深为100 m,库等级为二级库。排泥库附近主要发育有北西向的果化-新安断裂(F_1)、濂劳-龙庄断裂(F_2)、龙拉-那艾断裂(F_3)、岑鲁断裂(F_4)和下来断裂(F_6),北东向的板下断裂(F_7)、大路断裂(F_8)和那唐断裂(F_9),北北东向的内银断裂(F_5)以及南北向的那荣断裂(F_{10})。 F_1 、 F_2 、 F_3 为晚第四纪断裂,其他为早第四纪断裂。 F_6 、 F_7 、 F_8 及 F_{10} 在库区交汇(图1)。定位结果显示,平果震群震中主要位于中铝广西分公司3

号排泥库西北角及邻近区域,集中在半径为4.1 km的圆形范围内,2级以上地震集中在半径为0.9 km的范围内。

2 震群特征

2.1 震群序列特征

据广西地震台网记录,平果震群第一个地震为6月16日19时20分果化镇那荣 M_L 0.8级(平果台 $\Delta=10$ km)。据现场工作队到那荣村巴独屯调查了解,该屯村民反映16日19时左右有震感,与台网记录时间相吻合。从7月25日起,台网记录到该区域的地震数量锐减,故认为平果震群活动始于16日19时左右,截止7月25日左右。广西数字地震台网对平果震群活动过程有完整记录,其序列和频度如图2。

从平果震群 $M-T$ 图(图2a)可以看出,其活动过程为:一开始就达到密集→持续密集(约20 d)→衰减,这样的震群活动过程在广西地区属于罕见。从频度图(图2b)可见,6月16日至7月7日震群活动持续密集期间,虽然有较明显的连续波浪式起伏,但没有明显衰减特征。频次最高的一天为6月17日,共发生 M_L 0.0级以地震130次,也就是这天16时许中铝广西分公司3号排泥库底部发生岩溶塌陷导致泥浆泄漏,6月21日13时28分再次发生 M_L 3.0级地震,使泄漏量增大。从7月7日后才出现频次和能量衰减特征。从能量衰减图(图2c)上看,它还是符合古登堡-里克特震级频度关系。

为提高定位精度,我们采用双差定位方法对1.0级以上地震共292个进行重新定位。经过筛选,最终满足条件的地震为220个,P波震相为7 003个(占63%),S波震相7 460个(占67%),1 543个事件对,考虑到目录数据S波震相的读取精度相对较低,将P波震相的权重设为1.0,S波震相权重设为0.5,最终获得204个地震精定位结果(图3)。结果显示震群位于排泥库西北角及附近,大体呈北西向展布,分布在半径为4.1 km的范围内。定位结果水平向最大误差为800 m,东西向平均误差为228 m,南北向平均误差为223 m,定位误差较广西台网定位的小,定位结果得到较大改善。

2.2 波形记录特征

平果震群发生后,广西地震局工作队在震中区及时架设了3个流动台站,这3个流动台与平

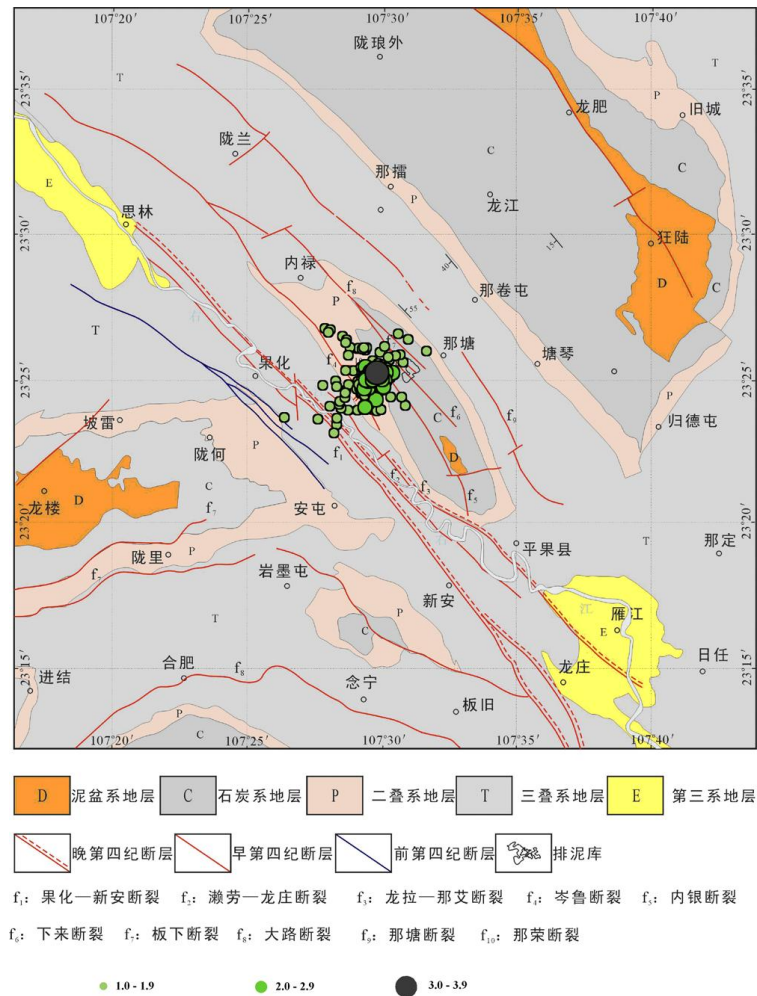


图 1 排泥库附近地震地质及震群分布图

Fig.1 The map of seismic geology and earthquake swarm distribution near the mud pool

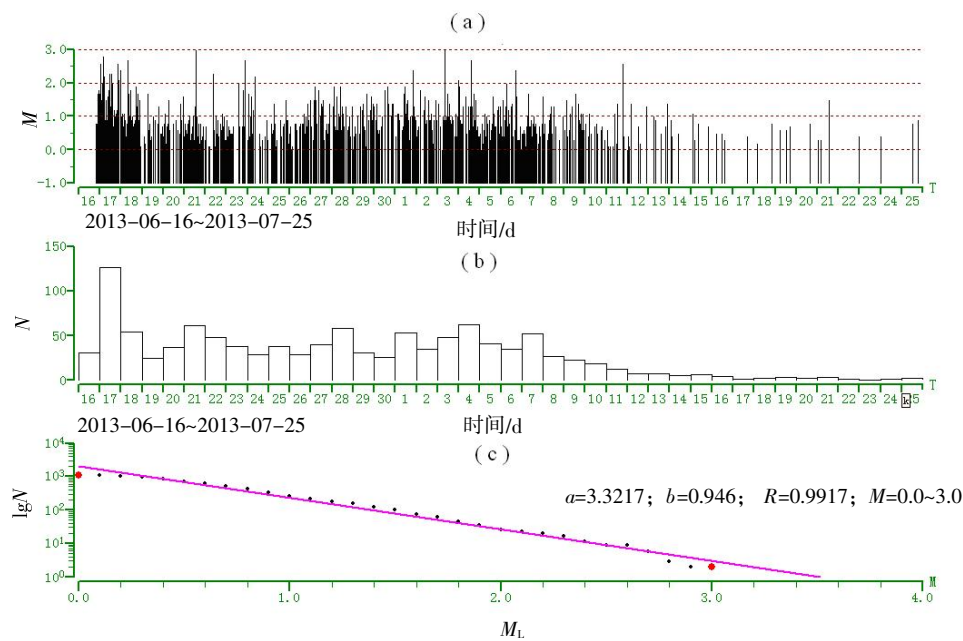


图 2 平果震群 M - T 图(a)、频度图(b)、古登堡-里克特震级频度(c)

Fig.2 The map of M - T (a), frequentness (b), Gutenberg Richter magnitude frequency (c) of Pingguo earthquake swarm

果台等固有台站形成了对震中区的包围,提高了对微小地震的监测能力。我们对平果震群事件波形逐个整理分析发现,从波形记录上分析,除了天然地震事件外,还有水库地震类型事件和塌陷地震类型事件。其中平果震群中天然地震波形记录,其震相单一、清晰,波列清楚,纵波与横波振幅相差明显,高频波十分发育;通常水库地震波形记录中 PG 波、SG 波很清楚,在 SG 波的尾部有瑞利型面波^[1]。闫俊岗等^[2]小浪底水库地震波形记录特征表现为,具有清晰的 PG、SG 波,周期小、持续时间短。在平果震群中,水库地震类型地震波形记录的震相简单、周期小、频谱单一,持续时间短,尾部有面波。在平果震群中,水库地震类型事件多见于 6 月 17 日中铝广西分公司 3 号排泥库发生泄漏之后;通常坍塌地震记录的周期较小,频谱较单一,纵波振幅较强,有面波且较发育^[3]。在平果震群中,6 月 17 日 3 号排泥库发

生泄漏的当天有坍塌地震类型地震事件,其波形记录特征为 PG 波头较大,纵波和横波幅度相差不明显,波列不清晰,面波发育且周期大。由于篇幅所限,波形记录图不再一一列举。

2.3 深度特征

利用广西数字地震台网固定台站数据,采用目前国内通用的 MSDP 软件中的单纯法进行定位,得到的震源深度多数在 3~10 km 之间。据经验,MSDP 单纯法测定深度误差较大。为进一步研究震群深度,我们采用双差定位法进行定位。按时间进程作深度分布(图 4),震群发生的首日(即 16 日)部分地震深度较深,这可能由于流动台架设前震中区近台太少造成深度定位误差大。17 日架设流动台以后地震活动深度基本在 7 km 以内,其中 6 月 25 日至 29 日有小部分地震深度达 8 km 左右,但 7 月 10 日后小震深度基本在 5 km 范围内,从

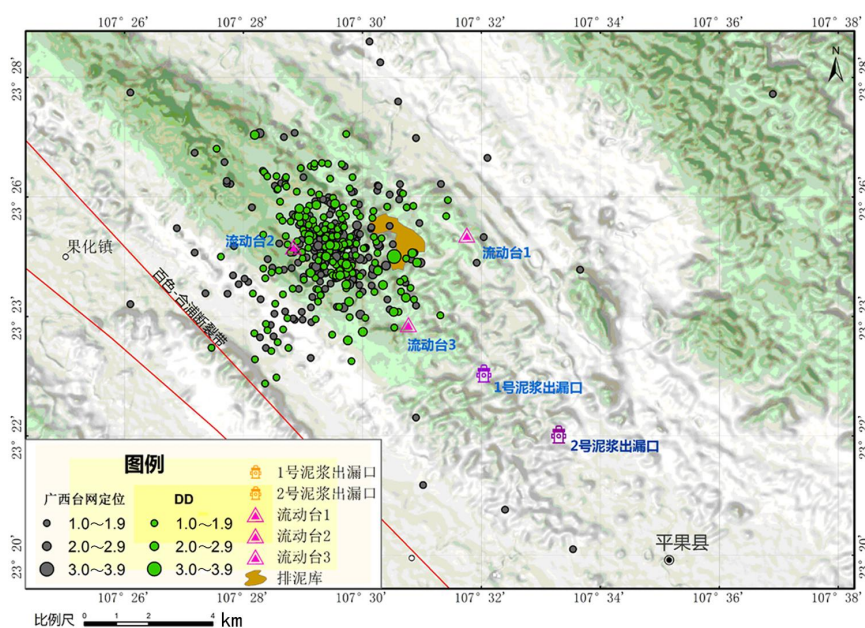


图 3 平果震群精定位结果分布图

Fig.3 Distribution map of P precise positioning results of ingguo earthquake swarm

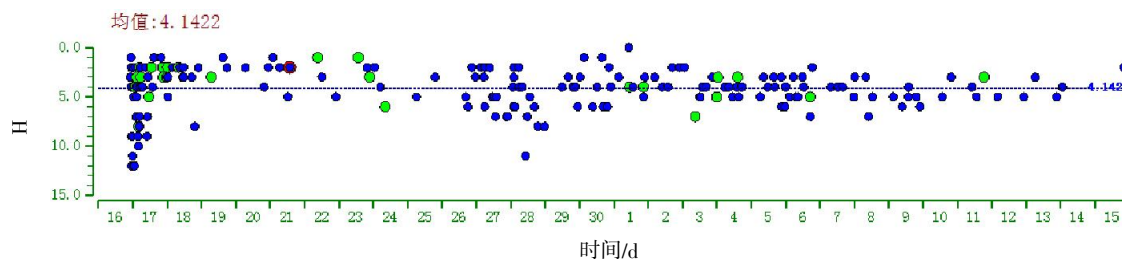
整个震群活动进程看,其深度起伏不大,平均深度为 4.14 km,深度最大误差为 1 010 m,平均误差为 240 m。此外,我们又选取 7 月 4 日至 5 日的 67 个地震作为样本,利用 3 个流动台和距离震区最近的固定台站平果台($\Delta=13$ km)共 4 个台站的数据,采用 LOCSAT 定位方法,选择华南地震走时表,用反演方法(迭代次数为 40)得到 67 个地震的震源深度(图 5),由图 5 看出,绝大部分地震震源深度集中在 1~4 km。两种定位结果表明,平果

震群平均深度在 1~4 km 左右,震源很浅。这与现场调查结果在震中附近仅 1 级左右的地震,震感也较为明显,部分群众听到地声,说明震源很浅的情况基本相符。

3 震群震源参数分析

3.1 震源参数的确定

在平果震群震源参数研究中,利用龙政强等^[4]



蓝色: $M_L 1.0 \sim 1.9$; 绿色: $M_L 2.0 \sim 2.9$; 红色: $M_L 3.0 \sim 3.9$

图4 平果震群深度分布图(双差定位)

Fig.4 The depth distribution map of Pingguo earthquake swarm (double difference location)

计算得到的广西地区 Q 和台站场地响应, 其中 Q 值与频率的关系式为 $Q(f) = 366.3 f^{0.47}$, 采用 Atkinson 方法^[5]得到观测位谱, 并从观测谱中扣除传播路径效应和场地响应等因素的影响得到地震

位移谱, 再利用遗传算法对震源位移谱进行拟合得到震源谱参数 Ω_0 和 f_c , 最后根据 Brune 震源模型^[6]求得地震矩 M_0 、应力降 $\Delta\sigma$ 、震源半径 r 等震源参数, 公式如下:

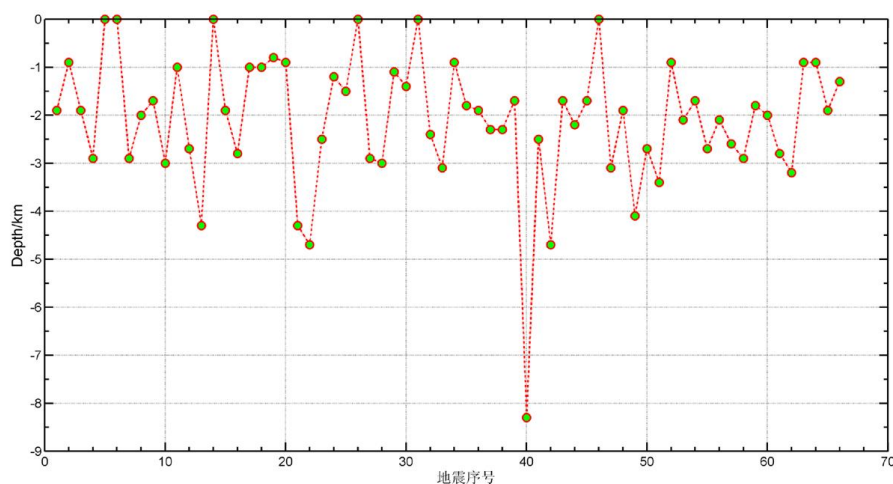


图5 平果震群深度分布(07-04~07-05)

Fig.5 The depth distribution of Pingguo earthquake swarm (From July 4th to July 5th)

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta\Omega_0}{R_{\theta\varphi}} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = \frac{7M}{16r^3} \quad (2)$$

$$r = \frac{2.34\beta}{2\pi f_c} \quad (3)$$

式中, ρ 为介质密度, β 为 S 波的速度, $R_{\theta\varphi}$ 为辐射因子。本文中 ρ 为 2.9 g/cm^3 , β 为 3.5 km/s 。辐射因子 $R_{\theta\varphi}$, 对于 SH 波, 取全震源球上的平均值, 即 $R_{\theta\varphi} = 0.41$ 。

我们按地震波形信噪比大于 2 倍脉动噪声、每个地震须被 3 个以上台站记录到的原则进行挑选, 最后计算得到平果震群 $M_L 2.0 \sim 3.0$ 共 21 个地震震源参数, 它们的地震矩在 $2.98 \times 10^{12} \sim 3.25 \times 10^{13} \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间, 平均 $1.13 \times 10^{13} \text{ N}\cdot\text{m}$ 。应力降在 $0.258 \sim 2.975 \text{ Mpa}$ 之间, 平均 1.018 Mpa 。震源半径在

108~344 m 之间, 平均 173 m。

震源参数误差是理论震源谱和实际各台平均震源谱之间的差, 也是考察地震参数计算能否应用、合理与否的重要参数之一。本文分析所用到的平果震群、龙滩库区地震、凌云凤山震群、桂东南地区地震共 76 个震源参数, 最小误差为 0.29, 最大误差为 1.9。误差在 1.0 以内 62 个, 占比的 82%, 另 14 个地震震源参数误差较大, 在 1.0~1.9 之间, 占地震总数的 18%。

3.2 拐角频率分析

据 2009 年史水平等^[7]对龙滩水库地震研究, 2006 年 9 月蓄水后出现的地震活动具有明显的水库诱发性, 属水库诱发地震。据 2011 年蒋海昆等^[8]研究, 凌云凤山震群活动与暴雨过程具有明显的时空相关性, 在时间上略有滞后, 基于传染

型余震序列模型的定量检测结果显示, 流体对凌云凤山震群的触发作用非常强烈。平果震群震中区位于平果铝矿山三号排泥库附近, 存在流体作用的可能, 尤其是6月17日3号排泥库发生泄漏后的密集微震活动受流体(泥浆)影响的可能性更大。我们将平果震群、龙滩库区地震、凌云凤山震群与桂东南地区构造地震的拐角频率进行对比分析, 选取它们共同都有的 M_L 2.0~3.9地震对比分析, 以震级为横轴, 以拐角频率为纵轴作散点图(图6), 从图6可以看出, 平果震群拐角频率与龙滩库区地震、凌云凤山震群拐角频率很接近, 但明显低于桂东南地区构造地震的拐角频率。据2004年钟羽云等^[9]研究认为水库诱发地震拐角频率明显小于同震级的构造地震。这说明平果震群与凌云凤山震群、龙滩库区地震可能一样, 存在流体触发作用, 有别于构造地震。

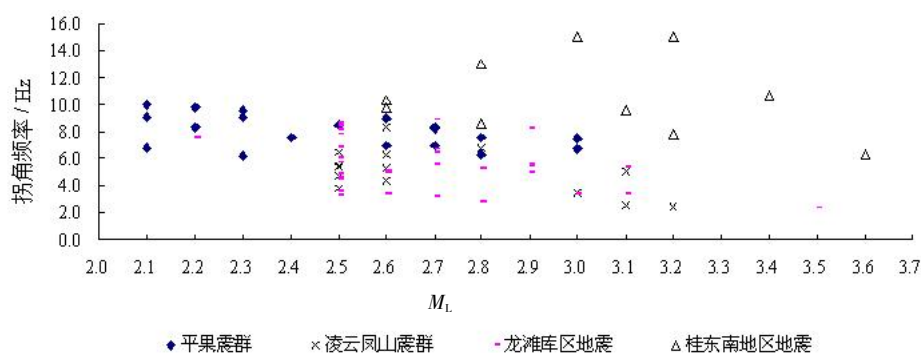


图6 平果震群与其它震群拐角频率对比

Fig.6 Comparison of corner frequency between Pingguo earthquake swarm and other earthquake swarm

相比, 水库地震的应力降值比前者明显偏低, 约10倍。从平果震群的应力降方面来说, 平果震群类似于水库地震。

4 讨论与结论

4.1 震群成因初探

平果震群震中位于百色-合浦断裂带西北段的中部附近, 在震中区附近广泛分布石灰岩地层, 裂隙发育。中铝广西分公司3号排泥库区洼地的基岩内有石牙、溶沟、溶洞、落水洞、溶蚀裂隙、溶蚀塌陷、溶蚀漏斗和土洞等岩溶形态发育。随着含水丰富的矿泥排入排泥库的增加, 在地表水及矿泥等荷重的作用下, 洼地底部的隐伏岩溶地段因上部外力的增加及地下水位的变化超过其所能承受能力而产生陷落或塌陷。从前述震群波形记录特征分析中, 此类岩溶塌陷地震事件也存在。

3.3 应力降分析

平果震群 M_L 2.0~3.0级共21个地震的应力降值分布在0.258~2.975 Mpa之间, 平均1.018 Mpa。最大应力降地震为7月3日 M_L 3.0级地震, 其应力降为2.975 Mpa。通常认为应力降 $\Delta\sigma < 1.0$ Mpa为低应力降, 应力降 $\Delta\sigma \geq 10$ Mpa为高应力降^[10], 据此认为平果震群属于低应力降震群, 表明平果震群发生时震中区应力水平不高。我们将平果震群与龙滩库区地震、凌云凤山震群及桂东南地区构造地震的应力降进行对比分析。选取它们共同都有的 M_L 2.0~3.9地震进行对比, 以震级为横轴, 以应力降为纵轴作散点图(图7), 从图7可以看出, 平果震群与龙滩库区地震、凌云凤山震群的应力降很接近, 但它们均明显低于桂东南地区构造地震, 约小1个量级。据2010年华卫等^[11]对三峡库区地震参数研究表明, 与同震级的构造地震

另外, 3号排泥库为二级库。据广西壮族自治区与当地市、县三级水利部门组成的联合专家组现场调查, 在震群发生时, 现场淤泥约800多万 m^3 , 水深约3 m, 泥浆深10 m。在一定程度上库区附近的应力比以前有所增大, 加之库区地质条件复杂, 岩溶裂隙发育, 具有诱发类似水库地震的可能。尤其是6月17日3号排泥库底部发生岩溶塌陷所致泥浆泄漏后, 库水及泥浆沿地下岩溶管道迅速下渗, 在矿泥、水等荷载作用下, 地下孔隙压力剧增, 打破震中附近局部应力场的平衡, 加之流体的润滑和对介质的弱化作用, 从而触发了密集的小震活动。从前述震群波形记录特征分析显示, 此类水库地震事件也存在, 且平果震群拐角频率和应力降与有流体作用的龙滩水库地震、凌云凤山震群十分相近, 与广西桂东南地区构造地震的明显差别。

综上所述, 初步认为平果震群震中区地质复

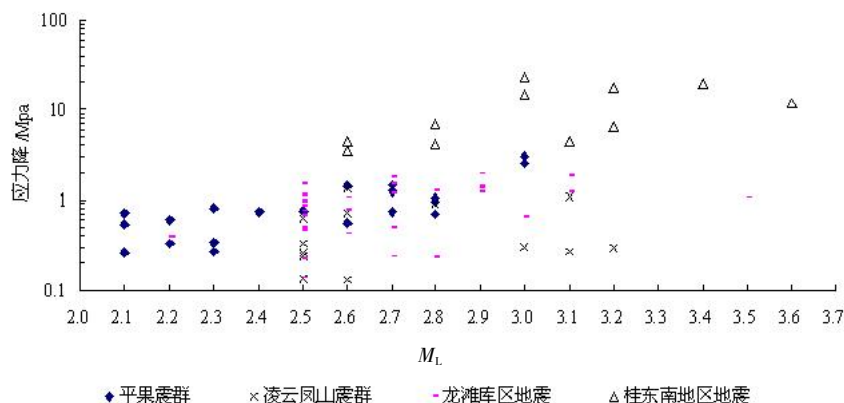


图7 平果震群与其它震群应力降对比

Fig.7 Comparison of stress drop between Pingguo earthquake swarm and other earthquake swarm

杂、岩溶裂隙发育,在局部应力增加产生陷落或塌陷,以及在流体(水、泥浆等)渗透作用下触发了密集的小震活动。平果震群是一次由天然地震、水库地震和岩溶坍塌地震等类型地震交叉、叠加的震群活动。鉴于所用资料和分析方法的局限性,平果震群性质还有待收集更多资料,从不同角度进行分析研究及论证。

4.2 结论

(1) 平果震群序列特征显示,震群活动为一开始就达到密集、持续密集(约20 d)、逐渐衰减的发展过程,其频度高、震源浅、震感明显,在广西地区属于罕见。

(2) 平果震群 M_L 2.0级以上地震的地震矩在 $2.98 \times 10^{12} \sim 3.25 \times 10^{13}$ N.m 之间,平均 1.13×10^{13} N.m。应力降在 0.258~2.975 Mpa 之间,平均 1.018 Mpa。震源半径在 108~344 m 之间,平均 173 m。在震级相同情况下,其拐角频率和应力降均比本区域构造地震的拐角频率和应力降小,其中应力降小约1个量级。

(3) 震中附近的平果铝3号排泥库库容较大,随着排入库内泥浆增加,在一定程度上使得库区附近场区应力增大,加之库区地质条件复杂,岩溶裂隙发育,具有诱发类似水库地震的可能,应加以重视和防范。

参考文献:

- [1] 中国地震局监测预报司.实用数字地震分析[M].北京:地震出版社,2009.
- [2] 闫俊岗,宋书克,李守勇,等.地震波形记录特征分析[J].地震地磁观测与研究,2011,32(1):48-53.
- [3] 中国地震局监测预报司.地震学与地震观测(试用

本)[M].北京:地震出版社,2007.

- [4] 龙政强,孙学军,姚宏,等.广西地区地震动衰减 Q 值和场地响应研究[J].地震地磁观测与研究,2014,37(3):23-29.
- [5] Atkinson G M, Mereu R F. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada [J]. BSSA, 1992, 82 (5): 2 014-2 031.
- [6] Brune J N. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes [J]. J Geophys Res, 1970, 75 (26): 4 997-5 009.
- [7] 史水平,于学庆,龙政强,等.龙滩库区蓄水后地震性质分析[J].地震地磁观测与研究,2010,31(3):40-45.
- [8] 蒋海昆,杨马陵,孙学军,等.暴雨触发局部地震活动的一个典型例子:2010年6月广西凌云-凤山交界3级震群活动[J].地震学报,2011,54(10):2 606-2 619.
- [9] 钟羽云,朱新运,张震峰,等.温州珊溪水库 M_L 3.9 震群震源参数特征[J].地震,2004,24(3):107-114.
- [10] 刘丽芳,苏有锦,刘杰,等.云南和四川中小地震应力降时空特征研究[J].地震研究,2010,33(3):314-319.
- [11] 华卫,陈章立,郑斯华,等.三峡水库地区震源参数特征研究[J].地震地质,2010,32(4):533-541.