

郭培兰, 龙政强, 何嘉幸, 等. 2013年6月广西平果3级震群地震活动特征分析[J]. 华南地震, 2016, 36(1): 87-96. [GUO Peilan, LONG Zhengqiang, HE Jiaying, et al. Analysis on Seismic Activity Characteristics of Pingguo M_3 Earthquake Swarm in June, 2013 in Guangxi[J]. South china journal of seismology, 2016, 36(1): 87-96.]

2013年6月广西平果3级震群地震活动特征分析

郭培兰, 龙政强, 何嘉幸, 黄惠宁, 谢夜玉, 徐 宁

(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

摘要: 通2013年6月16日至7月25日, 在广西平果持续发生了高密度、高集中、高频次、低震级、震害大的震群活动, 共记录地震1131次, 其中2~2.9级25次, 3级以上地震2次, 最大为6月21日3.0级及7月3日3.0级地震。对此次震群的地质构造位置、空间分布范围、2级以上地震震源机制解、 P 轴优势方向、 b 值特征、震源参数、记录波形等进行分析研究, 结果表明: 此次震群具有构造位置特殊、震中集中及深度较浅、震源机制解 P 轴没有形成优势分布、序列参数 b 值较高约为1.029 3, 应力降低、拐角频率低、震源尺度大、波形记录特殊等特征, 认为广西平果3级震群是属于低应力背景下的浅层地震活动, 不具有前兆震群和前震序列的性质。分析结果对正确了解此次震群的特征、震群成因、正确判断地震趋势具有较高的帮助作用。

关键词: 震源机制解; 广西平果; 震群; 应力降; 震源深度

中图分类号: P315.724 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2016) 01-0087-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.01.013

Analysis on Seismic Activity Characteristics of Pingguo M_3 Earthquake Swarm in June, 2013 in Guangxi

GUO Peilan, LONG Zhengqiang, HE Jiaying,

HUANG Huining, XIE Yeyu, XU Ning

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

Abstract: From June 16th, 2013 to July 25th, high concentration, high frequency, low magnitude, and large earthquake swarm occurred in Pingguo of Guangxi. The paper analyzes the geological tectonic location of the earthquake swarm, spatial distribution range, focal mechanism solutions of earthquakes with $M \geq 2$, advantage direction of P axis, b value feature, hypocenter parameter, recording waveform, etc. Results show that the earthquake swarm has the characteristics of the special tectonic location, shallow concentration and depth of the epicenter, focal mechanism solution P axis has without dominant distribution, the b value of the sequence parameter of 1.029 3, stress reduction, low corner frequency, the characteristics of large scale and special waveform record; Pingguo M_3 earthquake group in Guangxi is shallow seismic activity under low stress background without characteristics of the precursory earthquake swarm and foreshock sequence. Analysis results

收稿日期: 2015-03-16

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 12426001)

作者简介: 郭培兰 (1974-), 女, 高级工程师, 主要从事地震编目及地震活动性分析工作。

E-mail: gxgpl@126.com.

is helpful to correct understanding of the results the characteristics of the earthquake swarm, the cause of the earthquake swarm, the correct judgment of earthquake tendency.

Keywords: Focal mechanism solution; Pingguo; Earthquake swarm; Stress drop; Focal depth

0 引言

2013 年 6 至 7 月, 广西平果发生一起小震群, 这次震群活动从 6 月 16 日开始, 至 7 月 25 日结束, 共发生 1131 次地震, 其中 0.0~0.9 级地震 865 次, 1.0~1.9 级地震 239 次, 2.0~2.9 级地震 25 次, 3.0~3.9 级地震 2 次, 最大为 6 月 21 日 3.0 级及 7 月 3 日 3.0 地震。释放的总能量为 10.33×10^8 焦耳, 6 月 16 日起, 到 7 月 4 日期间, 震群的发生次数连续起伏, 没有明显衰减特征, 2013 年 6 月 21 日 13 时 28 分发生一次最大震级的 3.0 级地震(2013 年 7 月 3 日 8 时 45 分再次发生一次 3.0 级地震), 到 2013 年 7 月 5 日后频次和能量出现明显衰减特征, 图 1 是广西平果 3 级震群震中分布图。据史料记载^[1], 震区周围 200 km 范围(北纬 $22.4^{\circ} \sim 24.2^{\circ}$, 东经 $106.7^{\circ} \sim 108.7^{\circ}$)共发生 M_s 5 级以上破坏性地震 2 次, 6 月 21 日 3.0 级主震 30 km 周围共发生 M_s 4.0 级以上地震 4 次, 2 次 M_s 4.8 级、2 次 M_s 4.0 级。1970 年至此次 3 级地震群发生前, 主震 30 公里范围内 3 级以上地震也仅记录到 16 次, 最大为 1977 年 10 月 19 日 M_s 5.0 级地震, 1985 年、1986 年在震区也曾发生过小震群活动, 震区地震活动水平较高。类似这样的小震群活动, 在广西的地震观测史上发生过 2 次高频次震群活动, 在

1977 年冬天发生的广西陆川小震群, 其地震频次约 900 次^[2], 在 2010 年 6 月^[3]发生了广西凌云-凤山交界 3 级震群, 地震频次高达 3 071 次。震群发生后, 震区架设了 L4502、L4503、L4501 三个流动地震台(图 1), 地震信号通过 GPRS 实时传输至位于南宁的广西区域地震台网中心, 三个流动台分别于 6 月 17 日 13 时 27 分、6 月 25 日 19 时 3 分及 7 月 2 日 22 时 00 分开始记录, 包括原有的平果县固定数字测震台, 已较好地对震中形成一个三角形的地震监测网, 取得了这次震群的比较完整的微震记录, 为我们分析小震群活动提供了难得的观测数据。了解平果 3 级震群震区地质构造背景, 利用流动台和固定台站的观测记录, 分析 3 级震群的震源范围、震中分布、深度特征、震源机制解 P 轴走向、震群参数、震源参数及波形记录等特征, 可以更好地了解平果 3 级震群所处应力水平, 对于判断震群的成因机制、震群特征、震群类型、震后趋势判断、提高地震应急响应能力、正确决策具有较好的帮助作用。

1 震害情况及宏观现象

2013 年 6 月平果 3 级震群距离平果县城约 12 km、距中铝广西分公司平果铝业公司(以下简称平

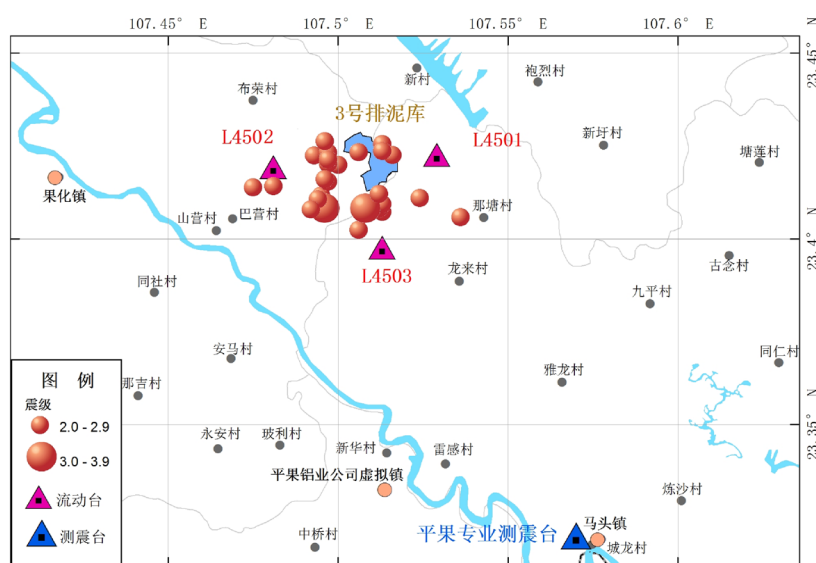


图 1 广西平果 3 级震群震中分布图

Fig.1 Epicenter distribution of $M_{3.0}$ earthquakes in Pingguo of Guangxi

果铝业公司)约6 km。据百色市地震局灾情速报,6月17日1时00分2.3级地震发生时,果化镇果化村、那吉村、马安村少数人有轻微震感,经现场调查,2.3级地震前,震区也有震感,之前最大地震仅1.8级。6月17日龙来村上来屯一个干枯的井冒水,另一个地方冒岩浆,位于平果县马头镇龙来村板下屯的平果铝业公司3号排泥库(图1)发生泥浆泄漏,养蜂蜜的老乡发现有水柱喷出并伴有巨响;18日凌晨有个别群众在废弃矿坑附近看到地光现象,可能与岩石坍塌造成瓦斯爆炸有关。6月21日3.0级地震时,水面有漩涡,据广西地震局现场调查^①,果化镇的3个村即那荣村、布荣村、山营村,马头镇的2个村即那塘村、龙来村有明显震感,平果铝业公司及县城一带有震感,部分群众听到地声,有些地震伴随冒气现象,而且一村民反映3.0级地震前一两分钟前有震感,经联系广西地震台网中心,确实曾发生1次0.8级地震。以上宏观现象说明震群震源深度很浅。

2 平果震区地质构造背景

2013年6月平果3级震群位于广西桂西北地区,桂西北历经多次的构造运动,形成以NW褶皱及其平行断裂为基本特点。断裂构造以平行褶皱轴向的右江大断裂为主,并发育有一系列与之平行的次一级断裂,性质以逆断层为主,倾向多

为SW,倾角较陡,并伴生NE-SW及NW-SE向延伸的次级断裂构造。岩溶十分发育,表现为垂直向与水平向发育岩溶形态随地势呈交替集中发育的特点。受地下水“径流-排泄”基准面控制,浅部垂直向岩溶形态(如落水洞、垂直发育的溶蚀裂隙等)相当发育,深部岩溶发育主要表现为水平向“管道流”(俗称暗河)形式^②。平果3级震群发生在平果铝业公司的3号排泥库附近(图1),3号排泥库位于平果果化镇,总库容4 437 万方 m³,有效库容4 126 万方 m³,含泥度28%^③,库面标高394 m,2012年12月投入运行。3#排泥库位于那豆背斜北东翼,紧邻背斜轴部,岩石张性节理裂隙发育,走向与背斜轴部走向一致,局部偶见方解石脉充填于张性裂隙中。场地内地质构造主要表现为断层、节理裂隙等。库区内各岩体未发现软弱夹层,虽发育有5条断层,但对库区各现体整体稳定性影响不大,场地裸露型岩溶发育强烈,图2是断层发育位置、性质、规模分布图。受区域构造应力作用,主要发育的节理裂隙有三组,第一组为走向NW;第二组走向为N;第三组走向为NE,倾角陆缓不一,其中以第一组最为发育,图3是库区节理裂隙走向玫瑰图。3#排泥库位受构造影响,张性节理裂隙发育。各坝体均为碳酸盐类岩石,岩溶裂隙发育,以溶蚀裂隙为主,但不均匀。近地表岩溶、裂隙多被泥砂及碎石充填,充填程度不等,呈未充填-全充填状;在深部,除

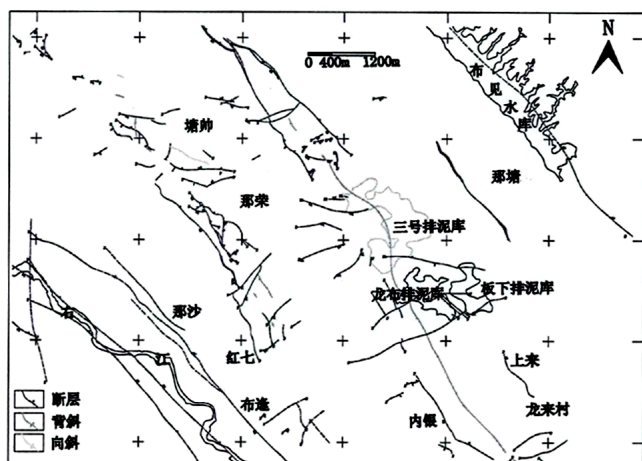


图2 区域断层分布图

Fig.2 Distribution map of regional fault

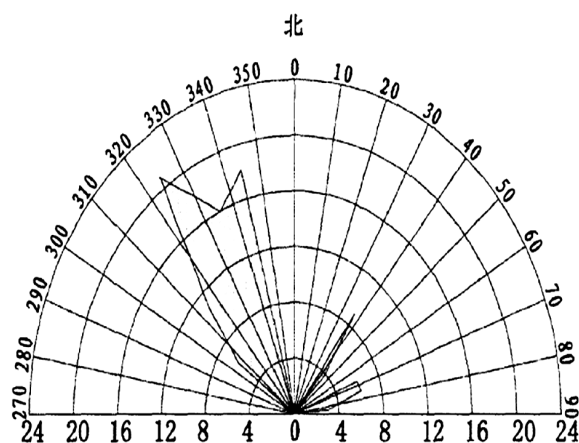


图3 库区节理裂隙走向玫瑰图

Fig.3 Rose diagram of jointing crevice in reservoir

① 广西地震局. 平果3级震群现场工作汇报, 2013.

② 广西工程防震研究院. 平果县那劳大桥工程场地地震安全性评价报告, 2011.

③ 广西地震台网中心. 2013年平果3级震群地震趋势分析报告, 2013.

早期裂隙被方解石充填形成方解石脉外，后期裂隙充填物则很少。场地地下水以构造裂隙水和岩溶裂隙水类型赋存于灰岩中，洼地中第四系覆盖层地段，少量以上层滞水类型赋存于第四系土层中。它们主要受大气降水的补给和控制。大气降水通过裸露的落水洞、溶洞及溶蚀裂隙等直接快速地流入地下，汇成地下水。地下水主体由库区向北、东及东南、西及西南方向水力联系更密切，呈现快流速或中流速的状态。库区地下水向西北方向主体呈现溶质弥散状态。因此，排泥库的矿泥渗漏,其影响范围主要向北至安马、南至安宁、西南至那豆、东至那塘、南至内银。向西北部方向主要呈溶质弥散，其影响强度相对较小。

3 地震活动特征分析

3.1 震源分布情况

赵根模^[4]认为前震和前兆震群比普通震群要深得多，可能达到中下地壳，差别显著。震源越浅，

地震活动越可能是处于浅层低应力状态下的地表活动，所以分析震源深度也可以很好的了解震群所处的应力状态。平果 3 级震群 0 级以上地震初始定位结果分布，形成震中长轴 36 km、短轴 30 公里的空间展布现象，2.0 级以上地震初始定位结果空间分布明显缩小，约分布在 4 km 范围内，而且没有形成明显的优势分布方向(图 1)，大部分 1.0 级以下地震由单台测定，定位结果不太准确，所以造成 0 级以上地震展布范围较大。距离平果震群最近的固定台站平果地震台距震中约 12 km，岩溶区地形起伏剧烈，地震波速度纵横向变化、速度结构复杂，虽然增加了三个流动台，但是深度定位结果并不理想。所以根据流动台记录到的到时差对震源的深度和尺度进行一定程度的估计。L4502 流动台记录的 19 次 $M_L \geq 2.0$ 地震的 $s-p$ 均分布在 0.3 至 0.65(表 1)，依据华南近震走时表地壳模型^[9]，直达 p 波和 s 波波速分别为 6.01 km/s 和 3.55 km/s，虚波速度 $V_\varphi=8.3$ km/s，若以震源深度为 0 km 计算，19 次地震集中分布在起于 $s-p$ 为

表 1 L4502 流动台记录到的 19 次 $M_L \geq 2.0$ 地震的 $s-p$
Table 1 The $s-p$ of 19 earthquakes with $M_L \geq 2.0$ recorded by L4502 flowing station

序号	日期/年-月-日 h:min:s	P 波到时/ h:min:s	S 波到时/ h:min:s	$s-p$ /s	M_L
1	2013-06-17 14:40:36.1	14:40:35.89	14:40:36.35	0.46	2.0
2	2013-06-17 20:43:44.9	20:43:44.83	20:43:45.32	0.49	2.6
3	2013-06-17 21:10:25.1	21:10:25.05	21:10:25.40	0.35	2.1
4	2013-06-17 23:36:39.3	23:36:38.82	23:36:39.22	0.40	2.4
5	2013-06-18 00:09:18.8	00:09:18.71	00:09:19.14	0.43	2.3
6	2013-06-18 07:40:30.3	07:40:30.18	07:40:30.59	0.41	2.7
7	2013-06-18 07:48:05.1	07:48:04.53	07:48:04.95	0.42	2.2
8	2013-06-21 13:28:05.1	13:28:05.00	13:28:05.57	0.57	3.0
9	2013-06-22 09:04:53.6	09:04:52.90	09:04:53.20	0.30	2.3
10	2013-06-23 13:31:49.9	13:31:49.13	13:31:49.54	0.41	2.2
11	2013-06-23 21:29:19.0	21:29:18.79	21:29:19.24	0.45	2.8
12	2013-06-24 08:16:28.0	08:16:28.40	08:16:29.01	0.61	2.2
13	2013-07-01 20:37:28.6	20:37:28.85	20:37:29.48	0.63	2.7
14	2013-07-03 08:45:57.7	08:45:58.07	08:45:58.69	0.62	3.0
15	2013-07-03 23:46:59.5	23:46:59.90	23:47:00.48	0.58	2.1
16	2013-07-04 14:21:23.7	14:21:23.59	14:21:23.94	0.35	2.7
17	2013-07-06 07:05:29.5	07:05:29.24	07:05:29.84	0.6	2.1
18	2013-07-06 17:04:29.8	17:04:30.13	17:04:30.78	0.65	2.5
19	2013-07-11 18:30:24.6	18:30:24.79	18:30:25.15	0.36	2.8

0.3 s 及止于 $s-p$ 为 0.65 s 地震之间，约 2.9 km 的范围内；若假定在 $s-p$ 为 0.3 s 的地震正下方发生，震源深度也不会超过 2.9 km，与台网关于 2.0 级以上地震的定位结果比较接近。L4502 流动台记录的

751 次地震的 $s-p$ 及相应的地震数如表 2 所列，682 次(占地震总数的 90.812 2 %) 地震 $s-p$ 分布在 0.30~0.69 s，约 3.237 km 的范围内。若假定在 $s-p$ 为 0.3 s 的地震正下方发生，震源深度也不会

表 2 L4502 流动台 $s-p$ 统计
Table 2 The $s-p$ statistics of L4502 flowing station

$s-p$ 到时差	频次	百分比/%
0.10~0.19	2	0.266 312
0.20~0.29	8	1.065 246
0.30~0.39	67	8.921 438
0.40~0.49	161	21.438 08
0.50~0.59	292	38.881 49
0.60~0.69	162	21.571 24
0.70~0.79	28	3.728 362
0.80~0.89	22	2.929 427
0.90~0.99	1	0.133 156
1.0~2.9	8	1.065 246

超过 3.237 km, 以上数据表明平果震群震中集中, 震源深度较浅, 震源体小, 不足以孕育强震。

3.2 震源机制分析

国内公开文献中, 已有很多关于震源机制方法在地震短期(中短期)预报中的研究应用^[6-8]。震源机制是指震源区在地震发生时的力学过程, 通过测定震源机制解参数可以了解地震发生的力学机制和震源断层的运动类型。此外, 利用 P 波初动解的 P 轴取向、转向和初动符号矛盾比亦可用于震情监视和震情判断。P 轴取向由紊乱趋于一致, 属于中期异常, 由此也可以判断震区的应力状态。为了保证震源机制解的稳定性, 参与计算的台站数目一般要求 6 个以上并有一个清晰的波初动方向, 而且在震中周围均匀分布, 震中距控

制在 150 km 之内, 避免出现 Pn 和 P11 混淆的情况, 记录振幅要求大于 0.5 mm 而且不能限幅。基于以上条件, 震中 200 km 范围内选取了 20 个台站, 离震中最近的平果台和南圩台约 20 km, 相邻的台站张角在 30°~70°, 台站分布较合理^[9]。利用 20 个台站记录资料, 采用 P 波初动和振幅比方法求解了 11 次 M_L 2.0 级地震的震源机制(图 4、表 3)。从计算结果来看, 节面 I 以北西向为主, 仅有一个接近南北向, 节面 II 为北东向的 3 次, 近南北向的 4 次, 北西向的 4 次, 其中 7 次地震错动方式为走滑, 2 次为逆冲, 2 次为俯冲。P 轴方位主要为北西向 270°~350°、仰角较小^[10], 与广西西北部构造应力场^[11]方向及震源应力场方向相一致, 但最大的 2 次 3.0 级地震 P 轴为北东向。震源机制解的 P 轴走向没有形成优势分布, 表明震区没有

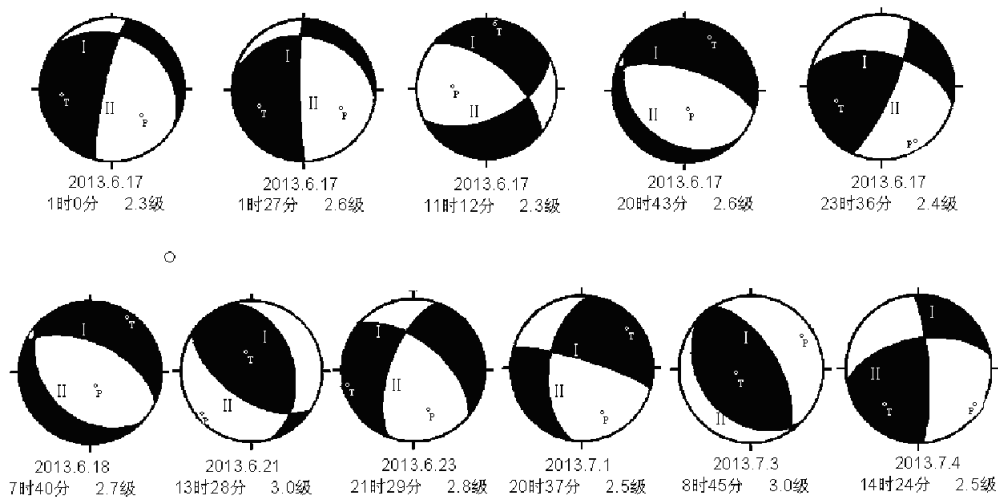


图 4 平果震群地震震源机制
Fig.4 Earthquake focus mechanism of earthquake swarm in Pingguo of Guangxi

表 3 平果 $M_L2.0$ 地震震源机制
Table 3 Focus mechanism of earthquakes with $M_L \geq 2.0$ in Pingguo of Guangxi

序号	时间/年-月-日 h:min:s	纬度/°	经度/°	M _L	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		备注
					走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	俯角			
1	2013-06-17 01:00:42	23.42	107.50	2.3	12.57	80.95	-64.66	120.94	26.81	-159.59	129.42	47.93	262	31.32	右旋正倾滑
2	2013-06-17 01:27:46	23.40	107.52	2.6	359.35	85.47	-64.92	98.93	25.46	-169.41	113.96	43.97	248	35.63	右旋正倾滑
3	2013-06-17 11:12:43	23.42	107.52	2.3	129.8	60.5	-42.39	244.00	54.07	-142.55	273.71	49.74	8.24	3.83	右旋走滑
4	2013-06-17 20:43:44	23.42	107.50	2.6	311.97	26.81	-67.35	106.91	65.40	-101.01	176.03	67.73	25.2	19.68	正倾滑
5	2013-06-17 23:36:39	23.42	107.50	2.4	203.55	77.3	38.26	103.71	52.84	163.99	148.78	15.77	250	35.63	右旋走滑
6	2013-06-18 07:40:30	23.42	107.50	2.7	315.62	36.22	-72.91	114.76	55.61	-102.15	167.14	75.89	33.4	9.85	正倾滑
7	2013-06-21 13:28:05	23.40	107.50	3.0	304.18	57.39	66.04	163.69	39.67	122.41	231.1	9.39	345	67.73	逆倾滑
8	2013-06-23 21:29:19	23.42	107.05	2.8	20.09	62.97	-37.45	129.28	57.20	-147.27	162.35	44.78	256	3.53	右旋正倾滑
9	2013-07-01 20:37:28	23.42	107.49	2.6	8.11	51.62	-12.25	105.79	80.43	-140.98	154.39	33.82	51.3	18.75	右旋走滑
10	2013-07-03 08:45:57	23.41	107.50	3.0	316.42	30.38	80.08	147.88	60.12	95.77	53.66	14.94	253	73.02	逆倾滑
11	2013-07-04 14:21:23	23.60	107.50	2.7	176.57	78.69	33.34	79.22	57.39	166.54	124.08	14.03	223	31.32	右旋走滑

处于统一的应力场控制下，应力水平不高，后续发生大震的可能性不大。北西向的节面 I 与图 2 中号排泥库北西走向的断层比较吻合，震区的震源机制解主要为北西向，处于区域应力场的控制之下，分析认为震群中有些地震应是由构造活动引起。

3.3 序列参数特征分析

地震序列的 b 值^[12-13]可以综合反映震源区的介质特性、应力场状态及应变能积累与释放情况，因此计算此次 3 级震群的 b 值，可以了解序列的应力状态。由于平果 3 级震群地震序列目录时空上相当集中，0.6 级以上地震数目较多，且完整可靠，因此序列参数的计算误差较小，可信度高，说明计算此次震群的参数时间变化特征是很有意义的。6 月 16 日至 6 月 18 日，3 级震群中的 $u > 0.5$ 、 $k > 0.7$ 、 $\rho > 0.55$ ，分析认为不是 UKp 型前兆震群。序列 b 值^[14]很高，表明序列中较强地震较少，6 月 21 日 13 时 28 分发生震群的最大地震 3.0 级，表 4 是平果 3 级震群地震序列参数表，图 5 是平果震群参数时序曲线。至 7 月 20 日， u 值、 F 值、 ρ 值有起伏的衰减， K 值、 b 值逐渐趋于稳定， K 值约为 0.93、 b 值约为 1.02、 H 值 1.0 左右^[15]，表明该震群正常衰减，发生大震的可能性不大。1970 至 2005 年广西及邻区正常 b 值为 0.71^[16]，在每年度地震趋势研究报告中广西及邻区正常 b 值为 0.72，相比之下，平果 3 级震群 b 值相对较高，与大多数水库诱发地震序列的 b 值类似^[17]，高 b 值表明震区处于低应力状态。

3.4 震源参数

对水库诱发地震研究发现^[18-19]，水库诱发地震的震源参数明显低于同震级的构造地震的震源参数，这是由于水沿着断裂带下渗，使介质强度降低和非均匀性程度变大，致使岩石破裂错动的速度变大，岩石错动辐射的地震波的高频成分减少，从而使拐角频率变小，震源破裂半径偏大，应力降较小，水库诱发地震与构造地震的应力降差别较大^[20-21]。在地球动力学研究中，应力是一个关键性的概念。在线性本构关系的理论框架下，通常难于、甚至不可能测得绝对应力，而只能得到应力的相对变化。应力降就是地震前后应力的相对变化。对于接近地表的地方，可以通过一些观测手段来直接测量应力或应力降，然而对于比较深的地方，通过地震来进行应力降的推算则几乎是唯一的方法。根据广西数字地震台网记录的数字

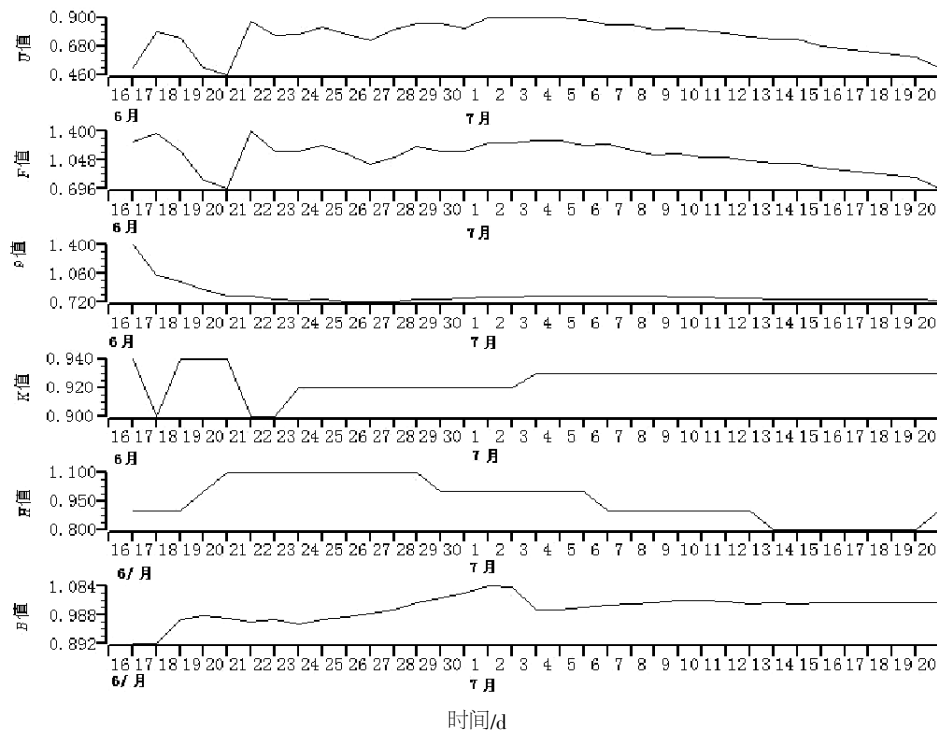


图 5 2013 年 6 月平果震群参数时序曲线

Fig.5 Time series curve of earthquake sequence parameters in June 2013 in Pingguo of Guangxi

表 4 2013 年 6 月平果 3 级震群地震序列参数

Table 4 Earthquake sequence parameters in June 2013 in Pingguo of Guangxi

资料时段	u	F	ρ	k	h	b
06-16~06-16	0.51	1.263 4	1.4	0.94		0.892
06-16~06-17	0.79	1.38	1.04	0.9	0.9	0.892
06-16~06-18	0.74	1.145 8	0.97	0.94	0.9	0.974 5
06-16~06-19	0.51	0.802	0.87	0.94	1.0	0.984 2
06-16~06-20	0.46	0.695 8	0.8	0.94	1.1	0.975 9
06-16~06-21	0.87	1.399 1	0.8	0.9	1.1	0.966 3
06-16~06-22	0.76	1.150 8	0.76	0.9	1.1	0.971 5
06-16~06-23	0.77	1.153 1	0.74	0.92	1.1	0.957 6
06-16~06-24	0.83	1.223 8	0.75	0.92	1.1	0.972 4
06-16~06-25	0.77	1.125	0.73	0.92	1.1	0.982 4
06-16~06-26	0.72	0.991 6	0.72	0.92	1.1	0.990 9
06-16~06-27	0.81	1.086 1	0.73	0.92	1.1	1.005
06-16~06-28	0.85	1.208 1	0.75	0.92	1.1	1.029 5
06-16~06-29	0.85	1.155 9	0.76	0.92	1.0	1.046
06-16~06-30	0.82	1.145 7	0.77	0.92	1.0	1.061 9
06-16~07-01	0.9	1.26	0.78	0.92	1.0	1.083 8
06-16~07-02	0.9	1.249 4	0.78	0.92	1.0	1.081 9
06-16~07-03	0.9	1.282 1	0.79	0.93	1.0	1.005
06-16~07-04	0.9	1.281 1	0.79	0.93	1.0	1.003 5
06-16~07-05	0.88	1.222 7	0.79	0.93	1.0	1.011 6
06-16~07-06	0.84	1.234 9	0.8	0.93	0.9	1.019 8
06-16~07-07	0.84	1.166 7	0.79	0.93	0.9	1.024 2
06-16~07-08	0.81	1.114 5	0.79	0.93	0.9	1.029 6

(转下表)

(接表 4)

资料时段	u	F	ρ	k	h	b
06-16-07-09	0.82	1.117 5	0.78	0.93	0.9	1.037 3
06-16-07-10	0.8	1.083 4	0.78	0.93	0.9	1.038 4
06-16-07-11	0.78	1.078 4	0.77	0.93	0.9	1.030 9
06-16-07-12	0.75	1.035 3	0.77	0.93	0.9	1.024
06-16-07-13	0.73	1.006 7	0.76	0.93	0.8	1.027 1
06-16-07-14	0.73	1.006 7	0.76	0.93	0.8	1.026 2
06-16-07-15	0.68	0.946	0.76	0.93	0.8	1.027 4
06-16-07-19	0.6	0.833 4	0.76	0.93	0.8	1.027 6
06-16-07-25	0.51	0.703 4	0.74	0.93	0.9	1.029 3

地震波形资料, 计算了分布在桂西的龙滩库区震群(2007 年 6 月 1 日至 2007 年 10 月 30 日)、凌云凤山震群(2010 年 6 月 28 日至 2010 年 8 月 15 日)、靖西震群(2010 年 7 月 25 日至 2010 年 8 月 5 日)、此次平果震群的地震和桂东南地区构造地震的震源参数, 按各震级档即 2.0~2.9、3.0~3.9 进行分档, 分别取五个区域的拐角频率、应力降、震源尺度的平均值(表 5)。在不同的震级档, 龙滩库区震群、凌云凤山震群、靖西震群、平果震群的震源尺度相当, 它们明显大于桂东南地区的构造地震, 拐角频率及应力降明显小于桂东南地区的构造地震。龙滩库区、凌云-凤山交界 3 级震群、靖西震群的发生主要与水的参与有关, 所以拐角频率、应力降较低、震源尺度较大。平果震群首次地震发生于 6 月 16 日 19 时 20 分, 震级 0.8, 据百色市人民政府文件称, 6 月 17 日 16 时许中铝广西分公司位于平果县马头镇龙来村板下屯境内 3# 排泥库发生泄漏, 6 月 21 日中午 13 时 28 分, 平果县再次发生 2.3 级地震, 使泄漏量增大。平果震群又位于 3 号排泥库附近, 震源参数与前 3 次震群的比较相似, 与构造地震的震源参数差别较大, 由此判断平果震群的发生与流体的参与有关, 应与 3 号排泥库泄漏存在关联性。求

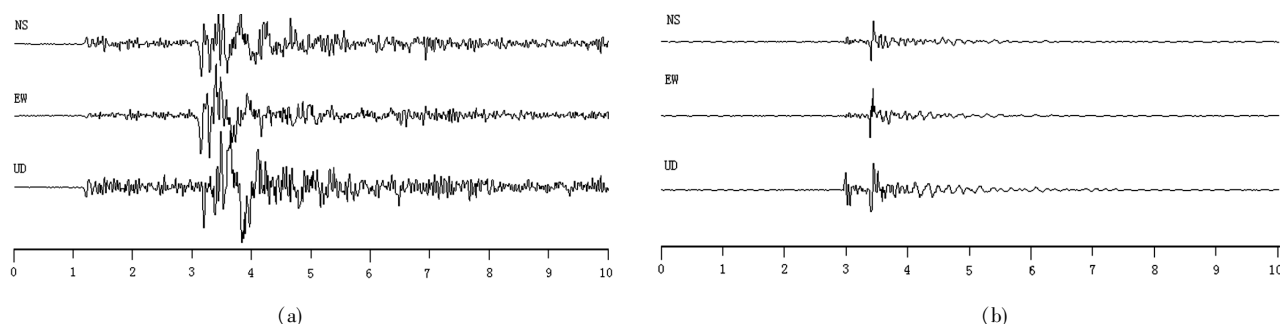
得的广西构造地震资料小震应力降分布在 2.0~23 Mpa, 龙滩库区、凌云-凤山交界 3 级震群、靖西震群、平果震群的应力降分别分布在 0.14~2.0 Mpa、0.13~1.4 Mpa、0.15~1.4 Mpa、0.25~3.0 Mpa, 比广西构造地震应力降低一个数量级。平果震群应力降明显小于桂东南地区的构造地震的应力降, 说明此次 3 级震群属于低应力背景下的地震活动。

3.5 记录波形特征分析

震源既产生纵波(P 波), 也产生横波(S 波), 震源辐射的波在地球内传播, 其传播特征受介质特征的制约。但如果把地震波近似为完全弹性波, 即以它在弹性介质中的传播则符合波动方程。断层的震源发生两种形变-体积形变和剪切形变, 前者产生纵波, 后者产生横波。地震波从震源辐射出来, 经过地球介质传到地震台, 在地震图或数字记录屏幕显示的地震波, 是来自震源, 经过地球介质到仪器记录下来, 它是震源, 中途介质和仪器三者特性的综合体现^[22-23]。所以, 每一个地区的地震震波都带有其地域地质结构的特征。平果震群震区地下暗河与裂隙非常发育, 震群的发生与流体参与也有关系, 成因非常复杂, 因此, 震

表 5 不同震级档震源参数平均值
Table 5 Average value of focus's parameter in different earthquake magnitude grade

震源参数	震级分档	龙滩库区	凌云凤山	靖西	平果	桂东南
拐角频率	2.0~2.9	5.9	5.7	4.4	8.1	10.2
	3.0~3.9	3.6	3.3	4.2	7.6	11.3
应力降	2.0~2.9	0.94	0.54	0.35	0.84	3.42
	3.0~3.9	1.20	0.48	1.37	2.74	13.78
震源尺度	2.0~2.9	249	241	299	173	132
	3.0~3.9	416	426	309	171	128



(a)2013年6月17日1时00分平果2.3级地震平果台记录 (b) 2013年6月30日15时30分平果1.9级L4502流动台记录

图6 平果震群典型震相记录

Fig.6 Typical phases record of Pingguo swarm

群有着显著的记录波形形态和特征。具有陷落地震波形特征,如2013年6月17日1时00分平果2.3级地震(图6a),共22个台站记录到此次地震,各台的PG和SG波,既没有明确的周期也没有固定的衰减模式,SG波的初至时间模糊不定,最大振幅也不确定^[24-25],说明该区地质结构分层复杂,地震波经过的媒介性质变化巨大。具有爆破特征的震例,如2013年6月30日15时30分3秒1.9级地震(图6b),L4502及L4503流动台垂直分向初动向上有较明显的导波,波列衰减较快。具有力偶作用特征的震例,如2013年7月4日14时21分23秒2.7级地震,PG波初动有明显四项限分布,震源深度较深,AS/AP>4,PGSG波的衰减近似指数衰减且持续时间较长。地震波共性特征为无论在P波还是S波段都有较大周期的波,表明发震体整合性不好或有流体参与地震过程(水、泥浆等),而且震源非常浅;近台P、S波既有导波亦有谐波,说明震区存在垂直向空洞结构;远台在S波后有较长的波列,说明震区浅层有横向不整合结构;无论哪种机制的地震波都受到塌方的影响,表明该地区可能构造松散并有较多空洞结构。从地震记录波形特征也可分析得到震源深度从几百(十)米到约3 km,与从L4502流动台分析得到的震源深度一致。地震震源具有不同的力学性质,而不同机制的地震深度不同,因此平果震群存在多种类型的地震。

3 结语

(1) 平果3级震群具有高密度、高集中、高频次、低震级、震害大的特点,持续时间较长,超1个月,6月16日至7月25日共记录地震1131次,其中2~2.9级25次,3级以上地震2次,最大为6

月21日3.0级及7月3日3.0级地震。6月16日起,到7月4日期间,震群的发生次数连续起伏,没有明显衰减特征,2013年6月21日13时28分发生一次最大震级的3.0级地震(2013年7月3日8时45分再次发生一次最大震级的3.0级地震),到2013年7月5日后频次和能量出现明显衰减特征。

(2) 从地层岩性看,平果3级震群震区附近广泛分布石灰岩地层、裂隙发育、稳定性差,加之在地下水作用下浅层岩溶极为发育,具备发生岩溶塌陷地震的水文地质环境条件,平果震群波形特征反映震区特殊的地形地貌特点。此次震群发生在桂西北地区北西向百色-合浦断裂带南、北两支主干断裂交汇处的一个局部背斜构造单元上,是区域应力场作用下最容易造成应力集中的部位。

(3) 平果3级震群主要分布在3.237 km的范围内,震源深度也不超过3.237 km,表明此次震群震中集中,深度较浅,震源体小,不足以孕育强震。震源机制解主压应力轴没有形成优势分布,序列参数 b 值较高,约为1.21,应力降主要分布在0.25~3.0 Mpa之间,从波形特征上,表明震源非常浅;震区存在垂直向空洞结构;震区浅层有横向不整合结构。这些数据说明平果3级震群是属于低应力背景下的浅层地震活动,不具有前兆震群和前震序列的性质。正确了解地震震群的特征,对于地震趋势的正确判断有一定的帮助作用。

(4) 震群的发生与3号排泥库泥浆泄漏具有明显的相关性。与龙滩库区地震、凌云凤山震群、靖西震群和桂东南地区地震的拐角频率、应力降等震源参数的对比分析,平果震群、凌云凤山震群、靖西震群、龙滩库区地震的拐角频率和应力降均明显的相似性,并均低于桂东南地区的构造地震,表明震源环境有流体参与,此次震群又发

生在3号排泥库附近,因此表明震群的发生与3号排泥库泥浆泄漏相关。

(5) 平果震群成因复杂,存在多种类型的地震。因为从地震记录波形特征也可分析得到震源深度从几百(十)米到约3 km,与从L4502流动台分析得到的震源深度一致。地震震源具有不同的力学性质,而不同机制的地震深度不同,因此平果震群存在多种类型的地震。

(6) 平果震群的第一个地震发生于6月16日19时20分,震级为0.8,6月17日,位于平果县马头镇龙来村板下屯的中铝广西分公司3号排泥库发生泥浆泄漏被发现,那么究竟是先发生地震,然后引起排泥库泄漏,还是由于排泥库先泄漏,诱发震群活动,还需要进一步分析研究。

感谢中国地震台网中心赵永老师的指导与帮助。

参考文献:

- [1] 莫敬业,游象照,吴时平,等.广西通志·地震志[M].南宁:广西人民出版社,1990.
- [2] 李家发,吴时平,莫敬业,等.广西陆川小震群特征的初步研究[J].西北地震学报,1982,4(2):10-17
- [3] 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].地球物理学报,2011,54(10):2607-2619
- [4] 赵根模.前震和普通震群震源深分布的比较[J].中国地震,1990,6(4):57-65
- [5] 范玉兰,林纪曾,胡瑞贺,等.华南地区近震走时表的研制[J].华南地震,1990,10(2):3-18.
- [6] 王伟,庄昆元,宋俊高等.测震学分析预报方法[M].北京:地震出版社,1997.
- [7] 付虹,王绍晋,李丽,等.滇中地区震源机制一致性参数时空分布与强震活动[J].地震研究,2011,32(2):113-118.
- [8] 莘海亮,方盛明,樊计昌,等.豫北及邻区中小地震震源机制解及应力场反演[J].地震研究,2012,35(2):184-189.
- [9] 陈翰林,赵翠萍,修济刚,等.龙滩库区水库地震震源机制及应力场特征[J].地震地质,2009,31(4):686-698.
- [10] 胡聿明,时振梁,张裕明等.地震安全性评价技术教程[M].北京:地震出版社,1999.
- [11] 李细光,史水平,梁结,等.广西及其邻区现今构造应力场研究[J].地震研究,2007,30(3):235-240.
- [12] 许绍燮,陆远忠,朱传镇等.地震预报方法实用化研究文集-地震学专辑[M].北京:学术书刊出版社,1989.
- [13] 王俊,阮祥,郑江蓉,等.汶川地震序列 b 值的分析研究[J].地震地磁观测与研究,2009,30(2):15-20
- [14] 林邦惠,李大鹏,刘杰,等.前震和前震序列的研究[J].地震学报,1994,16(增刊):24-38
- [15] 蒋海昆,傅征祥,刘杰,等.中国大陆地震序列研究[M].北京:地震出版社,2007.
- [16] 郭培兰.广西及邻区中等地震前地震活动性参数时间扫描异常特征[J].地震地磁观测与研究,2006,27(1):2-7.
- [17] 蒋海昆,张晓东,单新建,等.中国大陆水库地震统计特征及预测方法研究[M].北京:地震出版社,2014.
- [18] 钟羽云,朱新运,张震峰.温州珊溪水库 $M_L3.9$ 震群震源参数特征[J].地震,2004,24(3):107-114
- [19] 华卫,陈章立,郑斯华,等.水库诱发地震与构造地震震源参数特征差异性研究-以龙滩水库为例[J].地球物理学进展,2012,27(3):924-935.
- [20] 王培铃,马玉虎,姚家骏,等.玉树7.1级地震震情跟踪工作的总结分析[J].高原地震,2012,24(2):20-22.
- [21] 周昕,杨福平,钟羽云,等.浙江地区水库地震与构造地震应力参数特征研究[J].华南地震,2012,32(1):52-63.
- [22] 张杰,张振红,辛红刚,等.地震相分析技术在马岭油田储层预测中的应用[J].天然气地球科学,2012,23(3):590-595.
- [23] 陆丽娟,郭培兰,牟剑英.1972年5月7日广西邕宁4.5级地震活动特征分析[J].华南地震,2015,35(1):107-111.
- [24] 朱元清,佟玉霞,于海英,等.数字化台网的近震震相自动识别[J].西北地震学报,2002,24(1):5-12.
- [25] 郭永霞,黄媛,张天中等.华北地区天然地震震相特征研究[J].中国地震,2010,26(1):112-122.