

莫佩婵, 李莎, 郭培兰, 等. 2016年7月31日广西苍梧5.4级地震测震学异常研究[J]. 华南地震, 2018, 38(2): 47-56. [MO Peichan, LI Sha, GUO Peilan, et al. Research on Seismological Anomaly of the Cangwu M_s 5.4 Earthquake in Guangxi, on July 31st, 2016 [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2): 47-56]

2016年7月31日广西苍梧5.4级地震 测震学异常研究

莫佩婵, 李莎, 郭培兰, 向巍, 阎春恒
(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

摘要: 2016年7月31日广西苍梧县发生5.4级地震, 震源深度10 km, 宏观震中位于苍梧县沙头镇。此次地震发生在地震监测能力较好的中等地震活动区, 打破了东南沿海地震带长达17年5级地震平静, 对东南沿海地震带地震活动具有重要指示意义。在收集苍梧地震前广西及邻区地震地质和地震活动资料基础上, 较系统分析了此次地震序列和测震学指标异常的特征, 结果显示: 苍梧5.4级地震属孤立型地震序列, 震前3年广西及邻区出现小震活动增强、小震群活跃、“平果地震窗”开窗及地震活动性参数时间扫描等中期异常, 短临异常不明显。

关键词: 苍梧5.4级地震; 地震序列; 测震学; 小震活动增强; 震情窗口

中图分类号: P315.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)02-0047-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.008

Research on Seismological Anomaly of the Cangwu M_s 5.4 Earthquake in Guangxi, on July 31st, 2016

MO Peichan, LI Sha, GUO Peilan, XIANG Wei, YAN Chunheng
(Guangxi Earthquake Agency, Nanning 530022, China)

Abstract: On July 31st, 2016, an M_s 5.4 earthquake occurred in Cangwu county, Guangxi province, with the focal depth of 10 km, and the macro epicenter was located in Shatou town, Cangwu county. The earthquake occurred in a moderate seismic activity area with relatively good seismic monitoring capability. For the Cangwu M_s 5.4 Earthquake has broken the calmness of the southeast coastal earthquake belt for 17 years, it is of great significance to study the seismic activity of the earthquake. Based on the seismic geological and seismic activity data of Guangxi and adjacent areas, this paper systematically analyzed the characteristics of the earthquake sequence and seismograph anomalies before the earthquake. The results shows that: the Cangwu M_s 5.4 Earthquake sequence belongs to isolated earthquake sequence, there had been such medium-term anomalies as

收稿日期: 2017-12-25

基金项目: 广西科技攻关计划(1377002、14124004-4-8); 广西科技计划项目合同(桂科 AB17195022)项目联合资助

作者简介: 莫佩婵(1967-), 女, 本科, 工程师, 主要从事地震监测预报工作。

E-mail: rose.mpc@163.com.

表 1 地震基本参数
Table 1 Basic parameters of the earthquake

编号	发震日期/ 年-月-日	发震时刻/ h:min:s	震中位置		震级		震源深度 /km	震中地名	结果来源
			φ_N	λ_E	M_S	M_L			
1	2016-07-31	17:18:11	24.09°	111.55°	5.4	5.8	9	苍梧	广西台网修订
2	2016-07-31	17:18:11	24.08°	111.56°	5.4		10	苍梧	CENC
3	2016-07-31	09:18:14	24.134°	111.478°	4.9	24.5		Babu, China	USGS
4	2016-07-31	09:18:12	24.12°	111.39°	4.8	10		Southeastern, China	GFZ

注: CENC-中国地震台网中心; USGS-美国地质调查局(世界时); GFZ-德国波茨坦地球科学研究中心(世界时)。

2 地震序列特征

2.1 余震空间分布及衰减情况

苍梧 5.4 级地震发生于 2016 年 7 月 31 日, 余震序列历时 34 天, 至 9 月 3 日结束。广西地震台网共记录 M_L 0.0 以上余震 11 次, 其中 M_L 0.0~0.9 级 6 次, M_L 1.0~1.9 级 4 次, M_L 2.0~2.9 级 1 次, 最大余震 M_L 2.1。尽管此次地震的余震数量有限,

但空间上仍呈现出近NW 向优势分布的特征, 余震的震源深度基本小于 10 km(图 2)。序列 $M-t$ 图显示, 7 月 31 日发生余震 8 次, 8 月 2 日发生余震 2 次, 余震频次少、强度低, 9 月 3 日发生最大余震, 此后未记录到余震(图 3)。随着时间流逝, 地震序列的发震频度衰减形态明显。由于受地震样本数的限制, 未能计算出地震序列的 h 值和 b 值。

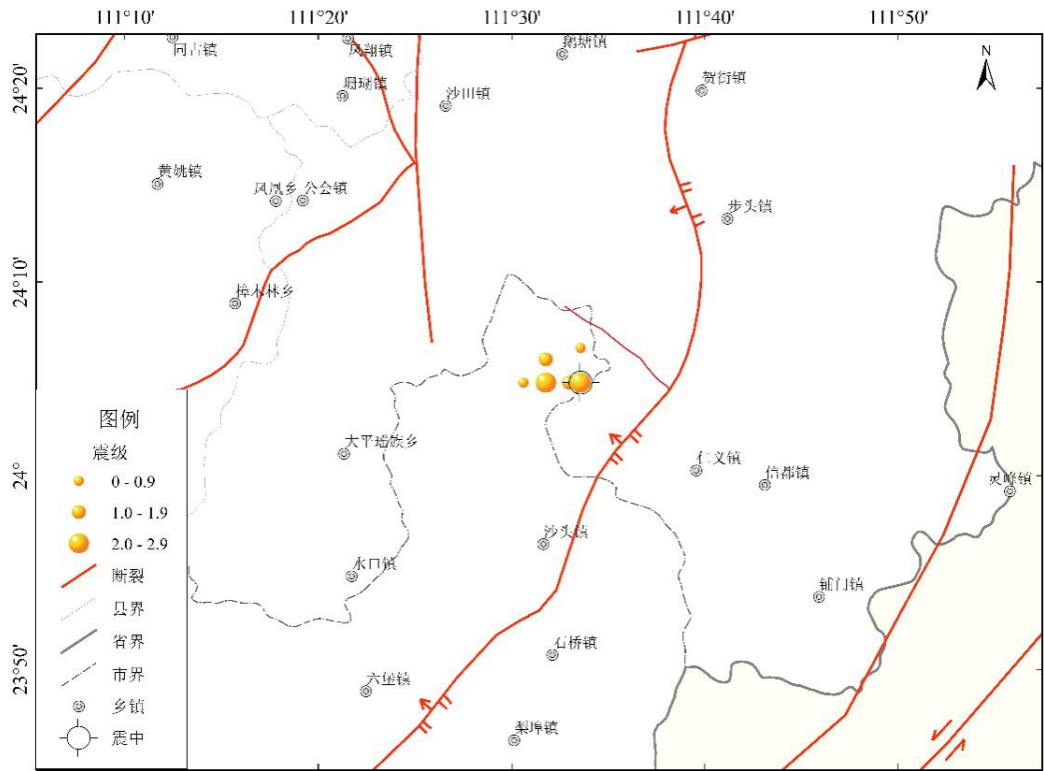


图 2 苍梧 5.4 级地震序列分布图

Fig.2 Distribution map of Cangwu M_s 5.4 earthquake sequence

2.2 地震序列类型分析

苍梧 5.4 级地震为孤立型序列, 序列主震释放的能量为 7.94×10^{12} J, 占整个地震序列总能量的 99.99% 以上, 序列最大余震 M_L 2.1, 与最大地震的震级差 $\Delta M=3.7$ 。历史上震中附近 200 km 范围

内共记载 M_L 4.0 级以上地震 7 次, 震级为 M_L 4.0~4.9 级, 其中 6 次为孤立型地震, 1 次为双震型。序列类型空间分布与区域地震地质构造及深部介质环境有一定的关系。从区域构造运动形式角度来说, 主-余型序列能够在各类形式的构造运

动中产生，特别是先存断裂内部闭锁单元或障碍体的破裂、或新生的相互分离的断裂段的破裂，大多产生主-余型地震序列；多震型序列往往与共轭构造或多组构造交汇相联系；简单断层端部的进一步扩展则一般产生孤立型地震。从深部介质

环境角度来讲，主-余型地震序列大多发生在上地壳高速区或高低速过渡带内；多震型序列较多发生在上地壳低速区内；孤立型地震一般不会发生在重、磁异常高梯度带附近，且 80% 以上的主震震级小于 6 级^[9]。

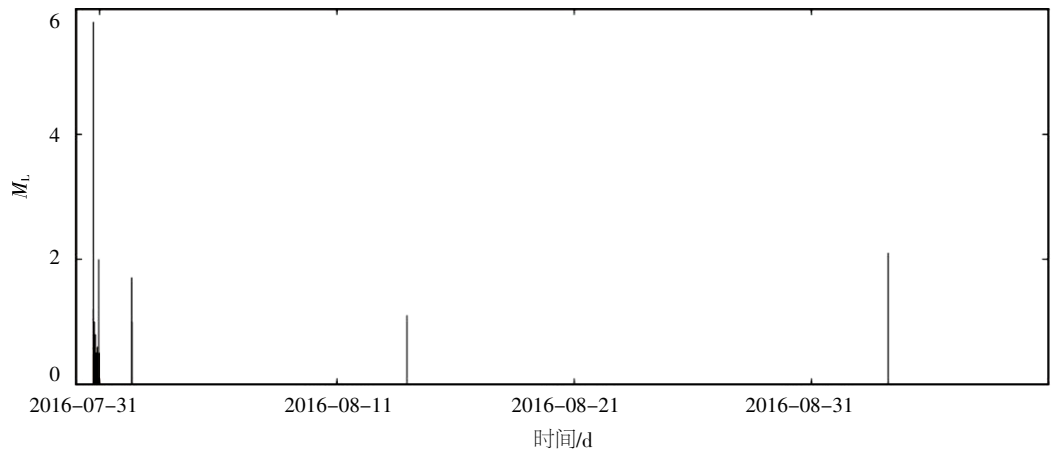


图 3 苍梧 5.4 级地震序列 $M-t$ 图
Fig.3 $M-t$ map of Cangwu M_s 5.4 earthquake sequence

苍梧 5.4 级地震发生在华南褶皱系的二级地质构造单元湘桂褶皱带的南部，震中位于 NNE 向贺街-夏郢断裂西侧约 6 km 处。该断裂总长约 110 km，断裂带宽十余米至数十米，最新活动时代上新世-早更新世，有记载以来沿断裂未发生过 5 级以上地震。从 1:20 万区域地质图来看^[7]，此次地震震中北侧发育有一条规模较小、长度较短、呈 NNW 向展布的分支断层，该分支断层左旋错断了贺街-夏郢断裂的主干断层，表明其活动时代更新（图 2）。苍梧地震发生后，不同机构和个人反演了此次地震的震源机制，得到大体一

致的结果（表 2），主压应力方向为 NW 向，节面 I 走向 NNW、节面 II 走向 NEE，两组节面与贺街-夏郢断裂走向均不一致。综合分析认为，苍梧 5.4 级地震的发生可能与 NNW 向分支断层有关，节面 I 为主破裂面，由于该分支断层结构相对简单，其端部扩展破裂一次性释放掉绝大部分的累计应变能，产生孤立型地震。此外，在 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的布格重力异常图上，此次地震震中附近的布格重力异常值为 -35 mGal，附近区域没有出现剧变、宽大的重力异常梯度带^[8]，这也有利于孤立型地震的发生。

表 2 苍梧 5.4 级地震震源机制解
Table 2 Focal mechanism solutions of the Cangwu M_s 5.4 earthquak

编号	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		方法	结果来源
	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	方位/ (°)	倾角/ (°)	方位/ (°)	倾角/ (°)	方位/ (°)	倾角/ (°)		
1	324	38	-20	71	78	-126	305	45	188	24	79	35	FOCMEC	①
2	330	42	-18	74	78	-131	305	42	193	22	84	40	CAP	②
3	326	38	-36	86	69	-122							FOCMEC	③
4	338	49	-6	72	85	-139							CAP	④
5	341	49	-22	85.8	73.6	-137							CAP	⑤
6	252	90	-143	162	53	0							CAP	⑥
7	336	55	-24	80	71	-142								⑦

① 广西壮族自治区地震局，郭培兰；② 广西壮族自治区地震局，向巍；③ 天津市地震局，刘双庆；④ 中国地震台网中心；⑤ 中国地震局第二监测中心，李君；⑥ 中国地震局地球物理研究所，韩立波；⑦ <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>，哈佛大学。

3 测震学异常分析

3.1 小震活动增强分析

茂木清夫^[9]指出,在浅源大震发生前的一段时间内,震源区周围广大区域的地震活动显著增强,此区域的半径比震源区大2~3倍。众多震例研究表明,在较大地震前,未来震中周围200~300 km范围内地震活动出现增强是一种具有普适性的震兆^[8-11]。郭培兰^[12]研究认为小震活动增强对广西未来中强地震趋势分析有指示意义,1970年至2009年广西及邻区13次 M_L 4.5级以上震例中,12次震例前存在 M_L 3级小震活动明显增强现象。

2014年上半年,广西及邻区仅发生1次 M_L 3.0级以上地震,而下半年共发生了8次 M_L 3.0级以上地震,最大为10月24日广东怀集 M_L 4.0级,地震频次明显升高,强度开始增强。2015年1月至2016年3月,地震活动继续异常增强,2016年4月至7月,地震活动出现短暂平静,然后发生苍梧5.4级地震(图4)。表现出“地震活动逐渐增强-短期平静-发震”的特征。与此同时,2016年3月7日地震活动相对较弱的桂北地区也发生了平乐 M_L 3.0级地震,打破了该地区长达3年的 M_L 2.8级以上地震平静。因此,2014年以来广西地区显著地震活跃具有区域应力场增强的指示意义。

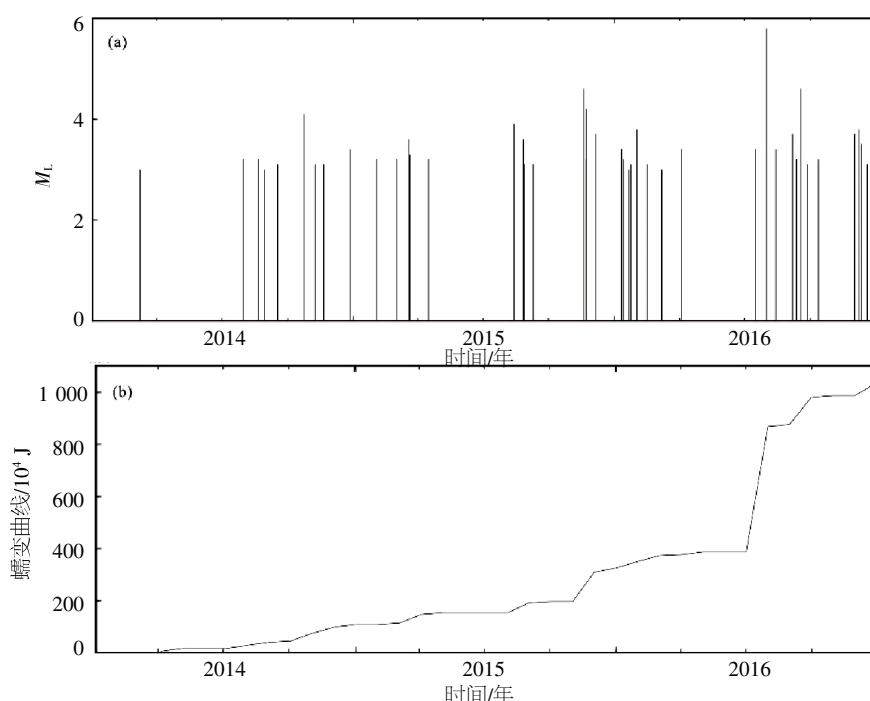


图4 广西及邻区 $M-t$ 图(a)和蠕变曲线(b)(2014-01-2016-12)

Fig.4 $M-t$ Figure(a)and seismic creep curve(b)of the Guangxi Province and its adjacent region(2014.1-2016.12)

3.2 地震活动性参数时间扫描分析

地震活动性参数可用于描述区域地震活动性特征。吴时平等^[13]研究认为,地震活动时间扫描分析方法对东南沿海地震带西段4.8级以上地震的发震时间具有一定的预测能力。郭培兰^[14]研究发现, b 值、 $A(b)$ 值、缺震、等效震级、地震强度熵 Q_e 值、地震活动度 S 值及地震算法复杂性 A_c 值等时间扫描参数,对广西及邻区中强地震具有较好的映震能力。广西中强地震震例总结统计结果将活动性参数异常判定标准设置为:地震频次和断层总面积分别高于10和13, b 值、地震强度熵 Q_e 值及地震算法复杂性 A_c 值高于1倍均方差。对苍梧

地震前地震活动性参数进行时间扫描,样本空间范围和扫描参数设置见表3。扫描结果显示,2014年以来地震频次、断层总面积、 b 值、地震强度熵、地震算法复杂性等参数陆续出现不同幅度的异常,异常持续时间均超过1年,具有较好的同步性(表3、图5~图9)。

3.3 平果地震窗的指示意义

地震窗是指某些能以弱震活动形式灵敏反映区域应力场变化与震源应力场变动效应的特殊构造部位。虽然在判断中强震发生地点上有其局限性,但对判断中强震发生时间有一定短期指示意义^[12-15]。如安徽的霍山窗、甘肃的古浪窗、广东的

恩平窗、阳江窗、河源窗，河北的唐山窗、山东的长岛窗、四川的长宁窗等均对目标区地震具有较好预测效果。

平果震区是广西陆地地震最活跃的地区之一，先后发生了 1925 年 5 月 4.8 级、1930 年 6 月 4.8 级、1977 年 10 月 5.0 级、2005 年 10 月 4.4 级、2013 年 2 月 4.5 级地震等显著地震。统计平果震区 M_L 2.5 以上地震与其周边 140 km 范围的中强地震的对应关系，发现除 1971 年田东 M_L 3.2 和 1971 年 M_L 2.6 地震后 2 年内周边 140 km 范围内无 M_L 4.5 级以上地震发生外，其余平果震区 M_L

2.5 以上地震发生后 2 年内其周边 140 km 范围均有 M_L 4.5 以上地震发生(图 10)。表明“平果地震窗” M_L 2.5 级以上小震活动可反映区域构造应力场变化，与广西中强地震活动具有较好的对应关系。窗内 M_L 2.5 以上地震发生后，可做为 2 年尺度的中短期预测指标。2016 年以来，“平果地震窗” M_L 2.5 地震活跃，发生了 2016 年 1 月 21 日 M_L 3.0、1 月 29 日 M_L 2.8 地震、1 月 31 日 M_L 2.9 及 7 月 16 日 M_L 3.4 地震，表明广西区域应力水平增强，在此背景下发生了 2016 年 7 月 31 日苍梧 5.4 级地震。

表 3 异常情况统计表
Table 3 Statistical table of abnormal conditions

序号	异常项目	台站或观测区	分析办法	异常判据及观测误差	震前异常起止时间	震后变化	异常类别	异常特点及备注
1	地震活动增强	广西及邻区	$M_L \geq 3.0$ 时间扫描	密集	2014-07~2016-04	正常	M_2	地震相对密集、频度增强、发震时间间隔较短
2	频次	广西及邻区	$M_L \geq 3.0$ 时间扫描, 12 个月窗长, 1 个月步长滑动	≥ 10	2015-02~	未恢复	M_2	地震频次逐渐升高, 表明地震活动增强, 随后发震
3	断层总面积	广西及邻区	$M_L \geq 3.0$ 时间扫描, 12 个月窗长, 1 个月步长滑动	≥ 13	2014-10~	未恢复	M_2	
4	b 值	东南沿海地震带西段	$M_L \geq 2.7$ 时间扫描, 窗长 1 月, 滑动步长 1 月	>1.07	2014-12~2015-10	正常	M_2	参数值出现高值异常, 随后发震, 震后异常消失
5	地震强度熵 Q_e 值	东南沿海地震带西段	$M_L \geq 2.7$ 时间扫描, 窗长 1 月, 滑动步长 1 月	>0.554	2014-12~2016-04	正常	M_2	
6	地震演化指数 A_c 值	东南沿海地震带西段	$M_L \geq 2.7$ 时间扫描, 窗长 1 月, 滑动步长 1 月	>2.48	2014-03~2015-10	正常	M_2	
7	地震窗	平果窗	$M_L \geq 2.5$	打破平静	2016-01~	正常	M_1	平果窗被 2016 年 1 月 21 日平果 M_L 3.0 级地震打破
8	震群活跃	广西及邻区	地震活动图像		2013-06~2016-07	正常	M_1	震前 1 年广西地区发生 9 次震群, 震后震群减少

备注： M_1 表示可靠的中期异常， M_2 表示较可靠的中期异常。

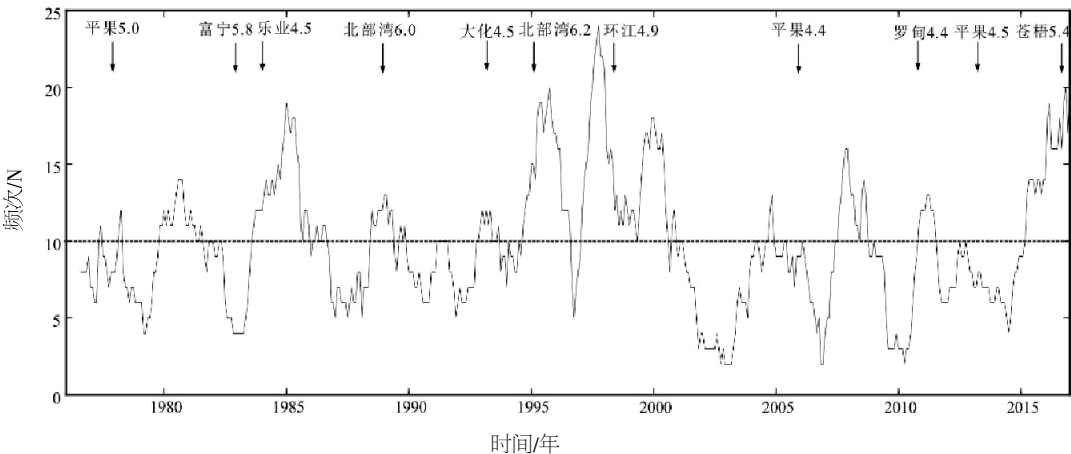


图 5 频次曲线(1975-01~2016-12)

Fig.5 Variation curve of seismic frequency

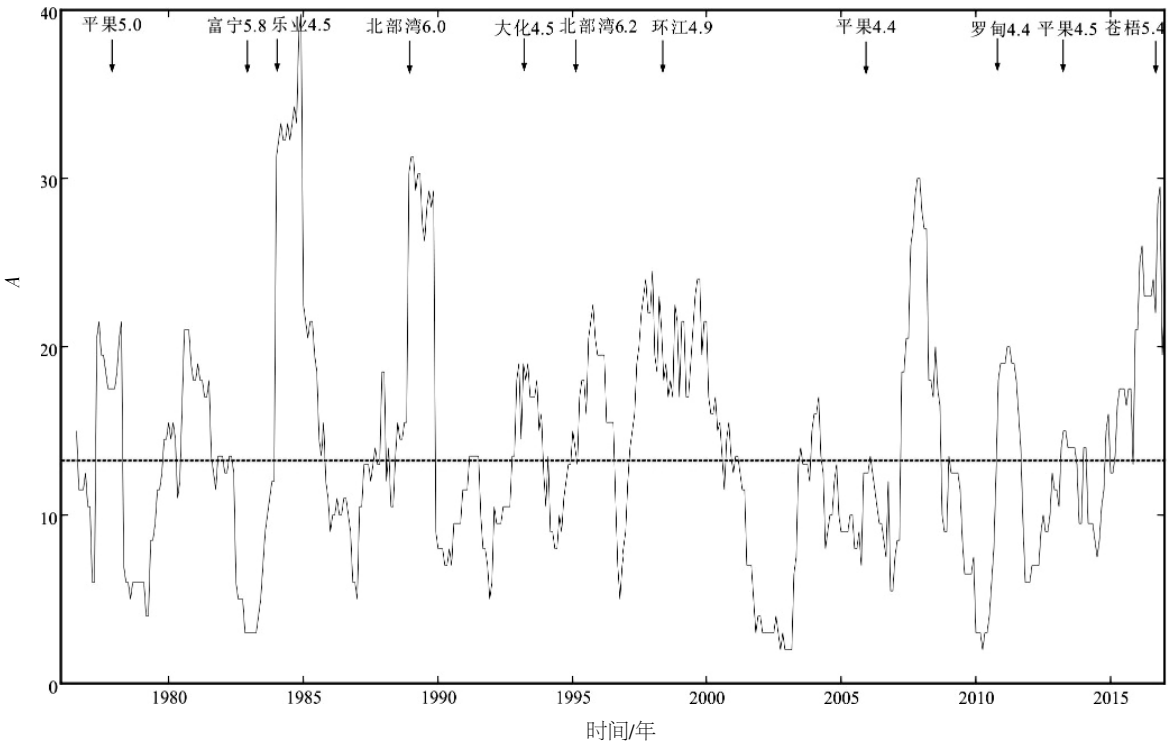


图 6 断层总面积曲线(1975-01~2016-12)

Fig.6 Variation curve of total fault area

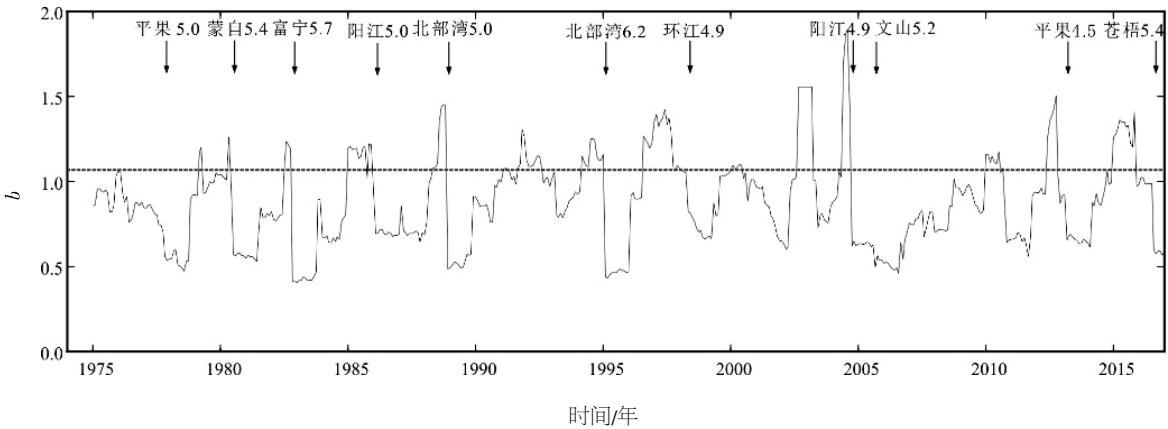


图 7 b 值曲线 (1975-01~2016-12)

Fig.7 Variation curve of b -value

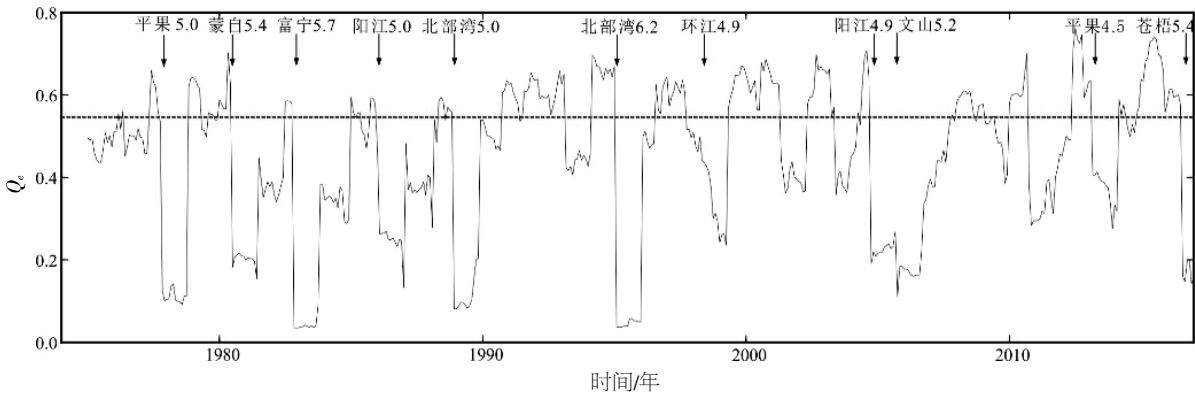
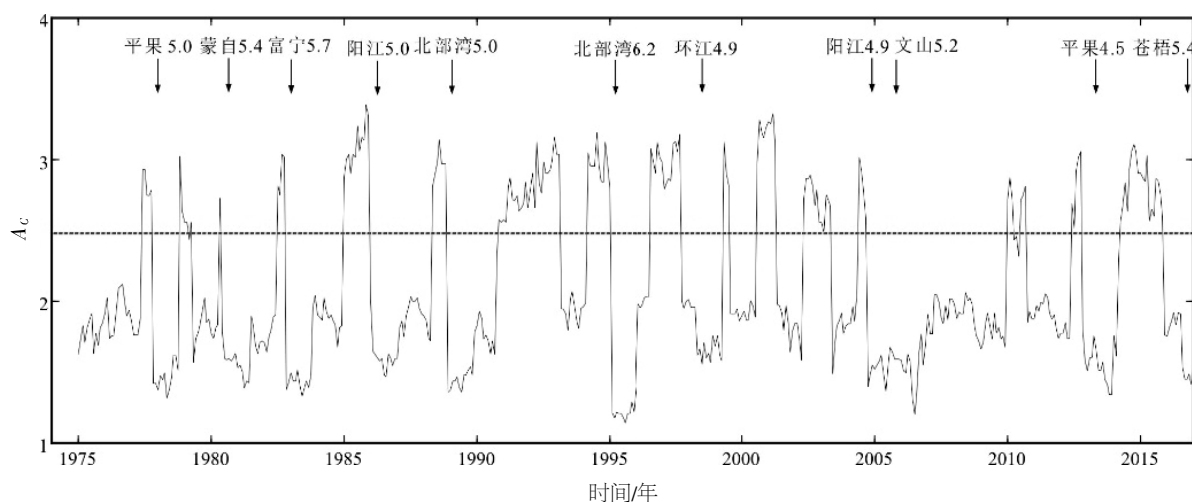
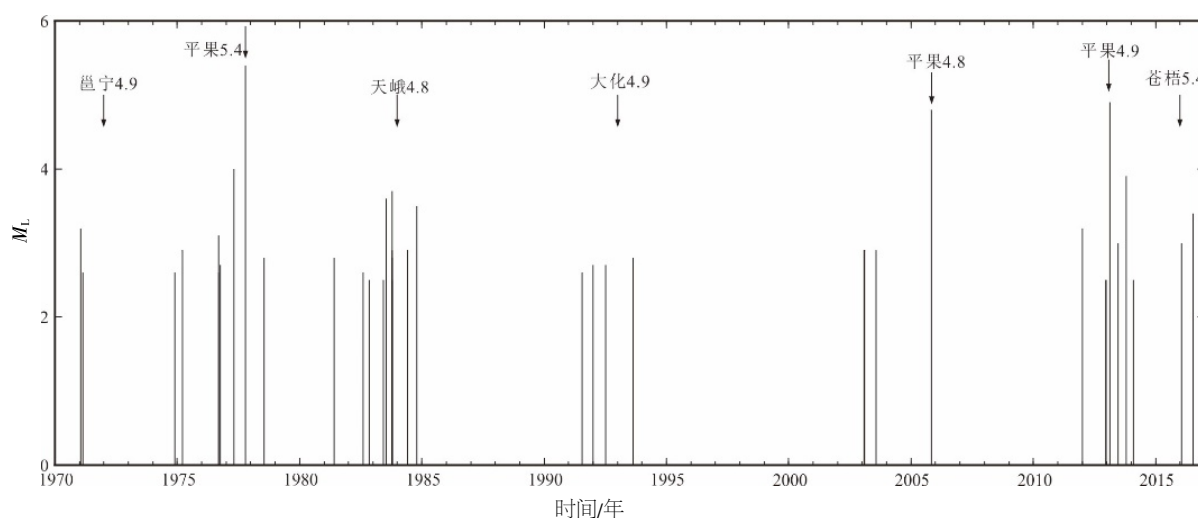


图 8 地震强度熵 Q_e 值曲线 (1975-01~2016-12)

Fig.8 Variation curve of seismic intensity entropy Q_e

图9 地震算法复杂性 A_c 值曲线 (1975-01-2016012)Fig.9 Variation curve of seismic evolution index A_c 图 10 平果窗 M_L 2.5 级以上地震 $M-t$ 图Fig.10 $M-t$ map of earthquakes with $M_L \geq 2.5$ in Pingguo region of Guangxi

3.4 广西地区小震群活跃分析

震群是地震活动的一种形式,被认为由一组相当震级的地震组成,在时间和空间上聚集,缺乏一个明显的主震^[16-17]。震群可能是由流体(岩浆或水库蓄水)侵入引起,也可能是因为区域构造应力的增强导致。Toda 等^[18]认为震群可作为判断区域应力变化的一个重要指标,即利用震群活动来预测未来发生地震危险性升高。一些震群发生后,在短时间、近距离内往往有中强以上地震发生^[19-22]。2013 年 6 月平果震群后至 2015 年 5 月,2 年内广西地区无震群活动,但从 2015 年 6 月至苍梧地震前,广西境内共发生 9 次震群,位于桂西和桂北地区,呈东北向带状分布(图 11 和表 4)。9 次震群基本发生在非水库地区,因此对苍梧地震前广西地区构造应力显著增强有指示意义。

综上所述,苍梧 5.4 级地震前,广西及邻区共出现 10 项地震学异常,平果地震窗和广西及邻区震群活跃为可靠中期异常,其余 8 项均为较可靠中期异常(表 4)。7 项地震活动性参数异常为时间扫描异常,不支持地点的判定。震群活动主要集中在桂西地区,地震活动增强和地震窗以往主要对应桂东南和桂西北中强地震震例。依据测震学异常指标,我们将 2016 年度广西地区年度地震危险区划在桂东南地区,而苍梧地震发生在桂东北地区,表明以上测震学异常指标对广西地震活动强度具有较好指示,但对发震地点的判定比较困难。

4 结语

(1) 苍梧 5.4 级地震发生在地震活动水平相对较弱的桂东北地区,最大余震为 $M_L 2.3$ 级,余震频

次少、强度低,属孤立型地震序列。此次地震序列之所以是孤立型,可能与区域地震地质构造及深部介质环境有关。

(2) 苍梧地震前3年,广西及邻区出现 M_L 3.0级以上地震活动异常增强,时间上总体呈现“地震活动逐渐增强-短期平静-发震”的特征,空间上主要集中在桂西和桂北地区,呈北东向带状分布。小震活跃现象反映了广西区域应力水平增强。“平果地震窗”在苍梧地震前发生了4次“窗口”地震,表明该窗对区域应力场变化较敏感。活动性参数时间扫描显示,存在频次、断层总面积、 b 值、地震强度熵、地震算法复杂性共5项参数异常,异常持续时间均超过1年。以上异常均属于中期异常,可作为年尺度地震活动强度预测的依据,但对发震地点的预测效果并不明显。广西地区的预测实践分析表明,在中强地震发生前往往出现中期尺度的前兆及测震学异常变化,可做出一定程度的预测,但是震级和地点可能出现偏差。因此,应在全面掌握分析资料的基础上,不断加强未来发震主体区域危险性的研究,利用“长中短临”渐进式物理思路,综合分析“场源震兆带”

异常的发展和演化,系统开展各类异常的信度分析和预测方法的检验,不断提高预测水平。

(3) b 值反应了介质所受应力的状态和介质的均匀程度,通过 b 值的变化可以了解地震孕育过程中的应力变化和介质的破裂过程,从而预测未来较强地震的发生地点和时间。理论研究和一些震例的研究结果证实,未来大震发生前,震源区附近震前较短时间(中期或中短期)内往往表现为低 b 值异常。对于广西地区而言,在 M_L 5.0级左右中强地震发生前往往会出现 M_L 3.0级左右地震活动异常增强、小震群活动增强等现象,由于受计算样本量的限制, b 值时空扫描时要使用主震前较大范围和较长时间(中期或更长,可达几年)的样本,加之样本震级不够大,所以会出现高 b 值时空扫描异常。是否高 b 值时空扫描异常指标也适用于其它中等地震活动区,值得进一步研究。

(4) 苍梧地震发生在中国大陆东部6级以上地震超长平静和东南沿海地震带5.5级以上地震长期平静的背景下,苍梧5.4级地震的发生是否预示东南沿海地震带将进入新一轮地震活跃幕,对大陆东部强震活动有何指示意义,需进一步深入研究。

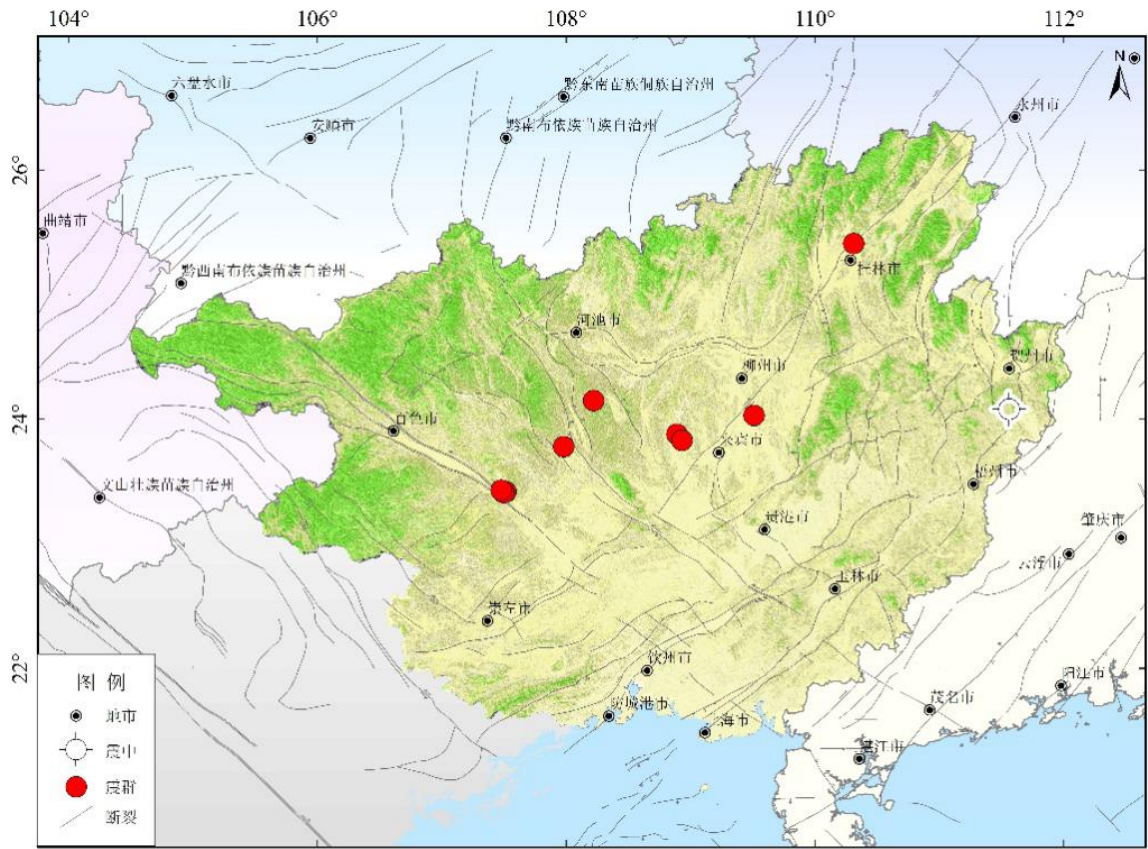


图 11 广西地区震群分布图

Fig.11 Earthquake swarms distribution in Guangxi region

表 4 广西地区 9 次震群信息

Table 4 Information of nine earthquake swarms in Guangxi region

地震序列	主震时间及震级/ M_L	次大地震时间震级/ M_L	起止时间
2013-06 广西平果	2013-06-21/3.0	2013-06-17/2.8	2013-06-16~2013-07-25
2015-06 广西象州	2015-06-23/2.7	2015-06-24/2.6	2013-06-23~2013-06-25
2015-6 广西大化	2015-06-14/2.8	2015-06-14/2.6	2015-06-11~2015-06-17
2015-08 广西都安	2015-08-18/2.6	2015-08-21/2.5	2015-08-16~2015-08-21
2015-09 广西合山	2015-09-08/2.4	2015-09-28/2.2	2015-09-08~2015-10-07
2015-12 广西合山	2016-07-19/2.2	2016-06-06/2.1	2015-12-18~2016-07-19
2016-01 广西灵川	2016-01-06/2.7	2016-01-06/2.1	2016-01-06~2016-05-08
2016-01 广西平果	2016-01-21/3.0	2016-01-31/2.9	2016-01-15~2016-03-07
2016-07 广西平果	2016-07-16/3.4	2016-07-16/3.2	2016-07-16~2016-07-17

致谢：感谢广东省地震局提供地震波形资料；感谢评审专家为本文提出的宝贵意见。

参考文献：

[1] 周军学, 聂高众, 谭劲先, 等. 2016 年 7 月 31 日广西苍梧 5.4 级地震灾害特征分析[J]. 地震地质, 2017, 39(4): 780-792.

[2] 郭培兰. 广西中等地震前地震活动性增强特征分析[J]. 华南地震, 2011, 31(1): 29-36.

[3] 吴时平, 郭培兰. 运用地震活动时间扫描分析方法的综合预测信度预测地震时间的研究 [J]. 华南地震, 2005, 25(2): 1-12.

[4] 郭培兰. 广西及邻区中等地震前地震活动参数时间扫描异常特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(1): 1-7.

[5] Mogi K. Some Features of Recent Seismic Activity in and near Japan[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo, 1969, 46.

[6] 中国地震局监测预报司. 中国大陆地震序列研究[M]. 地震出版社, 2007.

[7] 广西壮族自治区地质局. 贺县幅地质图[M]. 北京: 地质出版社, 1965.

[8] 莫敬业, 游象照, 兰建才, 等. 广西通志-地震志[M]. 广西人民出版社, 1990.

[9] 焦远碧, 刘特培. 中等地震对华南中强地震的指示意义 [J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(3): 42-47.

[10] 易桂喜, 韩渭宾. 四川及邻区强震前地震活动频度的变化特征[J]. 地震研究, 2004, 27(1): 8-13.

[11] 赵小艳, 付虹. 2013 年洱源 M_s 5.5 和 M_s 5.0 地震发震构造识别[J]. 地震学报, 2014, 36(4): 640-650.

[12] 聂晓红, 高朝军, 史新娣. 新疆尼勒克、巩留交界 M_s 6.0 地震前部分地震学异常及序列特征[J]. 内陆地震, 2012, 26(3): 193-202.

[13] 张琳琳, 敖雪明, 聂晓红. 2017 年精河 6.6 级、库车 5.7 级地震前“库米什地震窗”异常特征 [J]. 中国地震, 2017, 33(4): 721-727.

[14] 洪德全, 王行舟, 程鑫, 等. 安徽霍山窗重复地震尾波 Q_e 值变化研究 [J]. 地球物理学报, 2013, 56 (10): 3 416-3 424.

[15] 易桂喜, 龙锋, 张致伟, 等. 长宁窗地震与四川及邻区 $M \geq 5.5$ 地震的对应关系 [J]. 地震研究, 2013, 36(4): 427-432.

[16] Mogi K. Some discussions on aftershocks, foreshocks, and earthquakeswarms: The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena [J]. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Unit, 1963, 41: 615-658.

[17] Hill D P. A model for earthquake swarms [J]. J. Geophys. Res. 1977, 82: 1347-1352.

[18] Toda S, Stein R S, Sagiya T. Evidence from the AD 2000 Izu islands earthquakeswarm that stressing rate governs seismicity[J]. Nature, 2002, 419(6902): 58-61..

[19] 姜秀娥, 陈非比. 区域震群与唐山大震[J]. 地震学报, 1983, 5(2): 146-156.

[20] 李兴才, 冯树文. 震群活动的一种可能触发机制[J]. 地震学报, 1983, 5(3): 297-303.

[21] 陆远忠, 宋俊高, 戴维乐. 一个判断震情的指标——震群的 U 值[J]. 地震学报, 1984, 6(增刊): 495-508.

[22] 任雪梅, 盛菊琴, 蔡新华. 宁夏及邻区震群的前兆性分析[J]. 中国地震, 2016, 32(4): 738-746.