

2011年云南盈江5.8级地震及震前短临跟踪预测*

钱晓东, 苏有锦, 付虹, 李琼

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 系统收集了2011年云南盈江5.8级地震前后的地震学基础资料, 对盈江地震的地震地质背景、地震序列基本特征、地震烈度、发震断裂和区域应力场进行了详细分析。在此次盈江地震发生前, 运用地震力标度、环境剪应力、地震序列 h 值、破裂时间法、能量释放方法, 对该地震做了短临跟踪和预测。结果显示, 盈江5.8级地震的发震断裂很可能是NE向的大盈江左旋走滑断裂, 盈江地震前出现了诸多地震学参数异常, 这些异常对未来强震发生的时间和地点均有短临指示意义。

关键词: 盈江地震; 震源机制; 地震学参数; 短临预测

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)04-0403-11

0 前言

云南省盈江县位于云南西部, 属于德宏州下辖的一个县, 德宏与周边的保山、六库统称为小滇西地区(23.8°~25.6°N, 97.3°~99.7°E)。盈江县境内历史上共发生5级以上地震7次, 2011年3月10日, 盈江县发生 M_s 5.8地震。2008年连续发生了3次5级以上地震, 即3月21日5.0级, 8月20、21日5.0、5.9级, 其中5.9级地震是历史上的最大地震。另外3次地震是1933年11月5.5级、1981年7、8月5.4、5.1级。其中, 2008年3月5.0级地震发生于盈江县城以西, 其余地震均发生在县城以北。本次5.8级地震是该地区5.0级以上地震中较强的一次, 距离县城仅3 km, 为城市直下型地震, 震源较浅, 对人民群众财产和人员造成的损失比2008年5.9级地震大得多。因此, 有必要对本次地震的发震机理、地震地质构造、地震序列特征等进行认真研究。另外, 从地震预测预报的角度出发, 该次地震前, 地震学参数是否出现异常变化? 哪些异常对该次地震的发生具有指示作用? 如何把握这些异常现象并做出正确决断? 在地震预测预报仍处探索阶段的今天, 对这些异常进行总结和研究, 具有较大的意义。笔者将以在震前做出过预测的2011年盈江5.8级

地震为例, 重点探讨该地震短临跟踪阶段地震学指标的异常变化过程。

1 盈江5.8级地震基本特征分析

1.1 地震基本参数和地震地质背景

2011年盈江5.8级地震的基本参数如表1所示。该地震震中周围200 km范围内有13个数字测震台, 100 km范围内有9个, 101~200 km有4个。其中7个固定台, 3个腾冲火山台(包括箐口台、热海台和新华台), 3个流动台(铜壁关台、平原台和勐弄台)。由于震中以西地区无地震台站, 震后地震应急人员在震中周围架设了铜壁关台和勐弄台2个流动台站, 使得云南省测震台网基本能监控震区 M_L 1.3以上地震(图1a)。

在区域构造上, 盈江位于三江褶皱带西部, 出露的主要地层是新元古界高黎贡群变质石英砂岩, 局部出露古生界奥陶系、志留系、泥盆系和石炭系地层(云南省地质矿产局, 1990), 大盈江及其支流两岸还广泛发育有第四纪冲积物和冲洪积物。盈江县东北边, 紧邻腾冲现代火山群。通过对2008年3月21日、8月20~21日几次5级以上地震实地考察, 并结合有关研究成果分析得知, 这几次地震的宏观震中均位于岩浆岩区(张加桂等, 2009), 其中3月21日5.0级地震震中位于

* 收稿日期: 2011-06-06.

基金项目: 中国地震局2011年度震情跟踪合同制工作项目“全国地震重点危险区强震趋势与短临危险强化跟踪研究”资助。

震后第 1 天发生 5 次 4 级以上地震（2 次 4.5 级，1 次 4.7 级），可见地震第 1 天能量有较大释放。主震前震区 3~4 级地震活动频繁：2011 年 1~2 月，震区发生了 1 183 次 1 级以上地震，其中 1 月 1、2 日分别发生了 4.6、4.8 级地震，2 月 1 日又发生了 4.8 级地震（图 2a）。

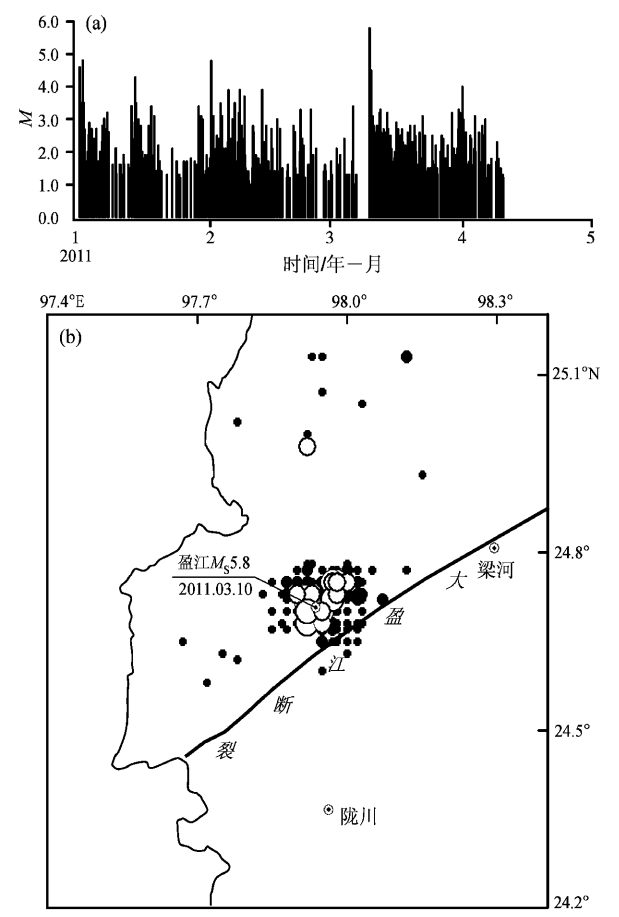


图 2 盈江 $M_s5.8$ 级地震序列时空分布图
(a) 震区 $M-t$ 图 (2011-01-01~2011-04-10)；
(b) 震中分布 (黑色圆圈表示 $M_L \geq 1.0$ 地震，白色圆圈表示 $M_L \geq 3.0$ 地震)

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of the Yingjiang $M_s5.8$ earthquake sequence
(a) $M-t$ diagram (2011-01-01~2011-04-10)；
(b) Distribution of the epicenters

云南台网记录到的盈江 5.8 级地震序列最小控制震级为 1.3 级，因此笔者选取 1.3 级以上地震计算地震系列参数。地震序列释放的总能量为 3.36×10^{13} J，其中主震能量为 3.16×10^{13} J，约占整个序列总能量的 94%。地震序列的日频度衰减很快，序列的 b 值为 0.75，高于震区周围的背景 b 值 (0.71)， h 值为 1.1，大于 1， P 值为 1.2，都显示了该序列具有主震—余震型特征。

从图 2b 给出的盈江 5.8 级地震序列空间分布可以看到，1 级以上地震（图 2b 中黑色圆圈）集中分布在半径约 14 km 的近似圆形的区域内，方向性不明显。但 3 级以上较大地震（图 2b 中白色圆圈）则集中在长约 13 km、宽约 8 km 的 NE 向。此外，从研究地震序列震源深度可知，5.8 级主震深度为 10 km，震源深度未随时间推移加深，反而在震后 23 天以后出现变浅现象。笔者对震源深度统计后发现，84% 的地震发生于 7~13 km 的深度，其中 7~9 km 的震源深度占整个序列震源深度的 51%。

1.2.2 前震序列和主震序列空间分布特征

图 3a 给出了盈江 5.8 级主震序列和 4.6、4.8、4.8 级前震序列的空间分布，可以看到，前震和主震序列几乎重叠，图 3a 中矩形框为震区局部放大图。从图 3a 中可以看到，2011 年 1 月 1 日 4.6 级地震、1 月 2 日 4.8 级地震与 5.8 级主震发生在同一位置，均位于盈江县城西北 2 km 处，而 2 月 1 日 4.8 级地震则发生在县城东北 3 km 处，二者仅相距 3 km，余震区重叠在一起。从震源深度随时间的分布来看（图 3b），主震前，震源深度小于 10 km 的地震少，大于 10 km 的地震多，主震后则相反。进一步统计得知（表 2），前震序列优势震源分布深度为 11~13 km，占总数的 74%，而主震序列震源深度为 7~9 km，占总数的 50%，前震序列震源深度大于 13 km 的比例为 15%，而主震序列仅为 8%，可见虽然前震序列和主震序列在地表上的分布上无明显差别，但前震序列震源深度较深。

表 2 前震、主震序列震源深度 h 统计百分比

Tab. 2 Percentage of the focal depth h of the foreshocks and the main shock							
深度/ h	$5 \leq h < 7$	$7 \leq h < 9$	$9 \leq h < 11$	$11 \leq h < 13$	$13 \leq h < 15$	$15 \leq h < 17$	$h \geq 17$
前震	2%	4%	6%	74%	9%	3%	3%
主震	4%	50%	19%	20%	5%	2%	1%

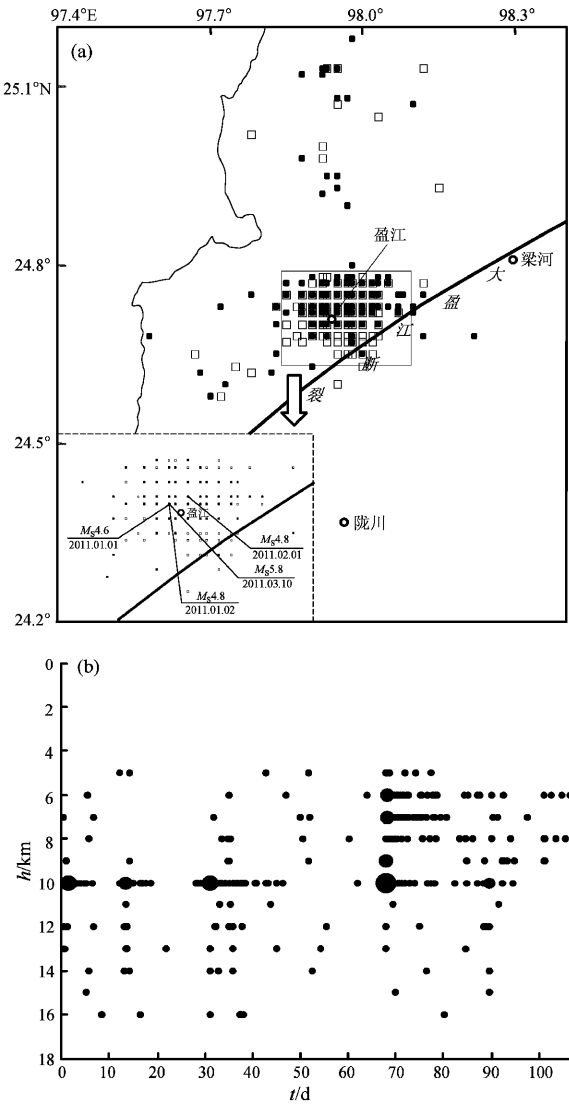


图3 盈江地震序列空间分布

(a) 前震和主震序列空间分布 ($M_L \geq 2.0$) (实心圆: 前震序列; 空心方框: 主震序列; 左下方框为震区局部放大图);
(b) 震源深度随时间分布 ($M_L \geq 2.0$)
(实心大圆: 4级以上地震)

Fig. 3 Spatial distribution of the

Yingjiang $M_s5.8$ earthquake sequence

(a) Distribution of the fore - shocks and the main shock;
(b) Epicenters ($M_L \geq 2.0$)

1.3 发震机制分析

图4为中国地震局震灾应急救援司(2011)公布的云南省地震局的专家对灾区进行灾害调查后绘制的地震烈度分布图。盈江5.8级地震宏观震中位于盈江县城—盈江农场一带,极震区烈度为Ⅷ度,等震线形状呈椭圆形,长轴走向为北东向。

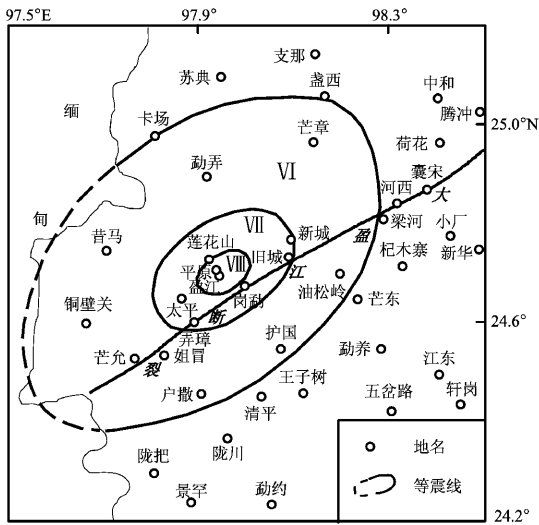


图4 盈江 $M_s5.8$ 级地震烈度等震线图

Fig. 4 Isoseism of the intensity of the Yingjiang $M_s5.8$ earthquake

地震造成25人死亡,134人重伤,180人轻伤,直接经济总损失236 680万元。

盈江5.8级地震发生后,中国地震局地球物理研究所(中国地震网,2011)、美国USGS(2011)第一时间各自发布了相关信息和研究结果。笔者也利用云南区域数字化地震台网记录,用P波初动符号图解断层面法求得该地震的震源机制解,得到矛盾比为0.045(表3,图5)。从表3和图5可看到,本文结果与地球所的结果较为一致。这次地震的等震线长轴方向为近NE向,与节面I走向一致。断层倾角 76° ,近似直立,上盘位于断层面的NW方向。从地震序列3级以上地震震中分布也能看到近NE向带状分布较为明显,与节面I走向一致。距离本次5.8级地震最近的大盈江断裂走向为NE向,因此大盈江断裂是5.8级地震的发震断裂的可能性较大。笔者认为,此次5.8级地震是大盈江断裂在水平NNE向压应力作用下,破裂面产生直立走滑左旋错动的结果。

笔者利用秦嘉政等(2005)根据地震标定律给出的快速测定震源参数公式,计算了此次5.8级地震的震源参数,得到地震矩 $M_0 = 1.99 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$,矩震级 $M_w = 5.5$,美国USGS得出 $M_0 = 1.96 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_w = 5.5$,二者计算结果较为接近;断层破裂面积 $S = 23 \text{ km}^2$;断层错距 $D = 32 \text{ cm}$;断层破裂长度 $L = 8.3 \text{ km}$ 。

表 3 震源机制解

Tab. 3 Focal mechanism solution

震级	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴		结果来源
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角	
	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)	
$M_s5.8$	249	76	16	155	74	165	22	1	112	22	286	68	本文
$M_s5.8$	250	82	11	158	79	172	24	2	114	13	286	76	中国地震局地球物理研究所
$M_w5.5$	245	87	1	155	89	177	200	2	110	3	321	87	美国 USGS

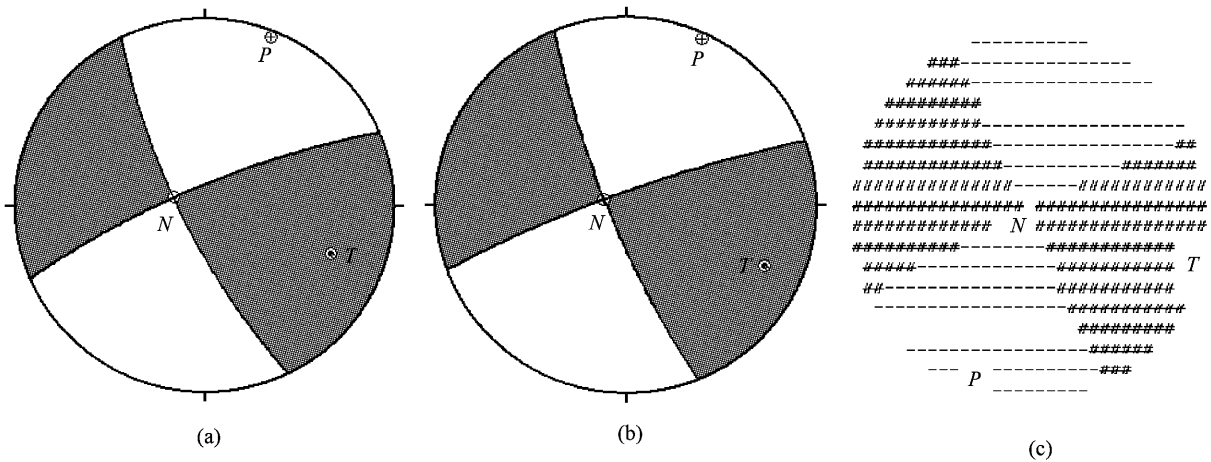


图 5 盈江 $M_s5.8$ 级地震震源机制解

(a) 本文的结果; (b) 中国地震局地球物理研究所的结果; (c) 美国 USGS 的结果

Fig. 5 Focal mechanism solution of the Yingjiang $M_s5.8$ earthquake

(a) Got by author; (b) Referred from the institute of Geophysics, CEA; (c) Referred from USGS

从上述分析可以得知，盈江 5.8 级地震微观震中距离县城仅 3 km，震源较浅。震源破裂沿断层向两侧扩展（图 2），瞬间错动约 30 cm，使得断层破裂达 8 km 左右，几乎贯穿整个盈江县城，可见地震对县城造成的破坏是较大的。

1.4 区域应力场分析

笔者利用美国 USGS（2011）给出的全球震源机制资料，获得了盈江及其周边地区（23.4° ~ 27.2° N，96° ~ 99.5° E） $M_w \geq 4.0$ 共 30 次地震的震源机制解，其中 $M_w 6.0 \sim 6.9$ 地震 4 次，最大地震为 1991 年 1 月 5 日缅甸 $M_w 6.9$ （云南地震台网测定为 $M_s 7.2$ ），其它较大地震分别为 1992 年 6 月 15 日缅甸 $M_w 6.3$ （云南地震台网测定为 $M_s 6.9$ ）、1994 年 1 月 11 日缅甸 $M_w 6.1$ （云南地震台网测定为 $M_s 6.7$ ）、2000 年 6 月 7 日缅甸 $M_w 6.3$ （云南地震台网测定为 $M_s 7.0$ ）。图 6、图 7a 显示，盈江地区主要受来自于缅甸 NE 向应力的作用，其根源在

于印度板块向东对缅甸造成强烈的侧向挤压，应力经缅甸传至云南，盈江地区的地震受缅甸弧强震影响较大（钱晓东等，2011）。从图 7a 可以看到，盈江地区主压应力方向与周边的缅甸地区较为接近，NE 向优势方向较为明显。而地震类型则相对复杂（图 7b），在缅甸北部，多以逆断层型地震为主，如 2000 年 6 月 7 日缅甸 $M_w 6.3$ 地震，其震源深度达 37 km，T 轴仰角达 57°，逆冲现象明显。这一地区靠近“阿萨姆角”，发生过大量中、深源地震，是印度板块在安达曼弧俯冲的结果。在缅甸中部（盈江以西），则存在大量走滑型地震。盈江及边境一带，则容易发生正断层型地震，如 1994 年 1 月 11 日缅甸 $M_w 6.1$ 地震，震源深度为 15 km，P 轴仰角达到 70°，拉张垂直作用明显。再如 2008 年 8 月 20 日盈江 5.0 级地震，P 轴仰角也达到 71°。盈江附近存在较多正断型地震，这可能与盈江、腾冲一带地下介质与周边地区介质存

在差异有关。在腾冲、盈江一带，分布有近 70 座火山（姜朝松，1998），还分布有大大小小的高温热泉，有些热泉温度达 100 ℃ 以上。

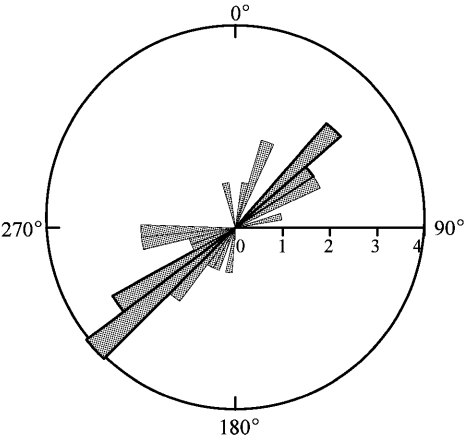


图 6 盈江震区周边地区 P 轴方位角
Fig. 6 Azimuth of P-axis in Yingjiang and its surrounding area

很早就有学者研究和探讨过由于火山地壳内部岩浆活动引起的岩浆冲击型地震。1961 年 6 月 12 日腾冲玉壁山 5.8 级地震，在震前几个月直到震后，极震区附近居民都能听到来自地下的“咚咚”地声，声音清晰，用 P 波初动符号求解的震源机制结果分析，初动分布不具备正交节面分布，地震可能属于地壳内部岩浆冲击型地震（阚荣举等，1979）。1976 年 7 月 21 日腾冲东南发生 5.1 级地震，该地震的直达 P 波全部为正，而 Pn 波全部为负，属于岩浆冲击型地震（晏凤桐等，1978）。钱晓东和秦嘉政（2000）对腾冲及周边地震类型作总结后也发现该区较容易发生以垂直作用为主的地震。

虽然上述分析认为小滇西地区较容易出现倾滑类断层，但并不意味着该区倾滑类断层占多数，小滇西地区地震类型仍以走滑型地震为主。据统计，该区 1965 年来 4.8 级以上地震走滑型地震所占比率为 76%，倾滑型则占 24%，高于全省 18% 的水平。本次盈江 5.8 级地震为走滑型，与该区走滑型地震所占比例较高相一致。此外，从盈江地区 2008 年以来显著地震的震源机制解可以得知，2008 年 3 月 21 日盈江 5.0 级地震发生于盈江县城以西，距离最近的断裂为大盈江断裂，其震源机

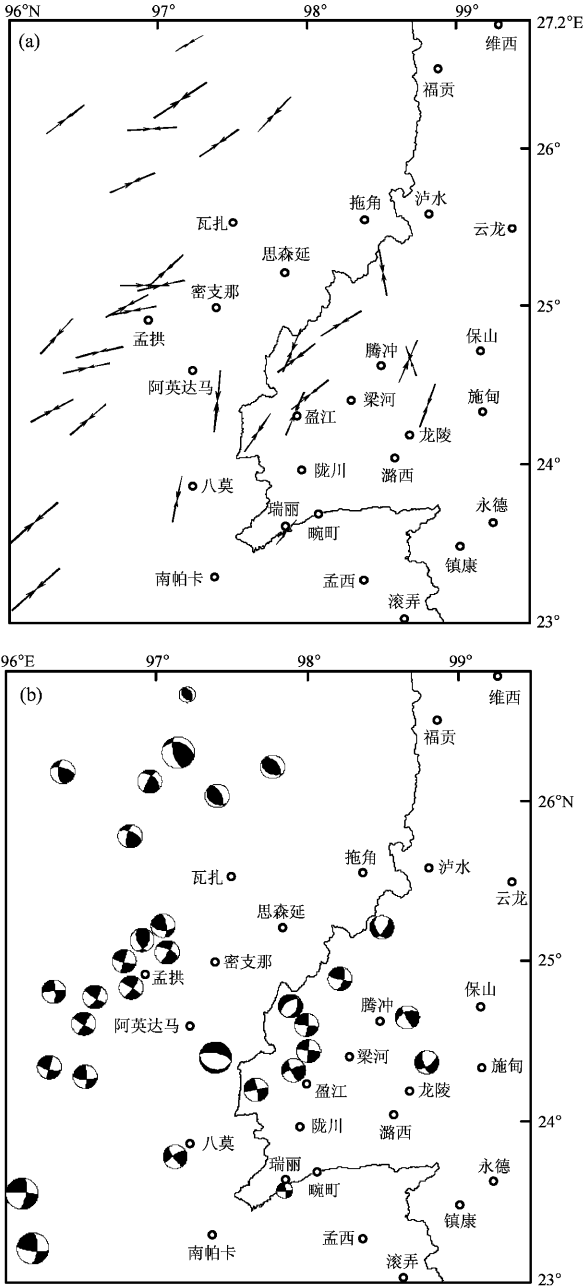


图 7 盈江震区周边地区压应力 (a)
及震源机制解 (b)

Fig. 7 Compressive stress (a) and mechanism (b) in Yingjiang and its surrounding area

制解与 2011 年 1 月 1 日盈江 4.6 级地震震源机制解相似，为走滑型；2008 年 8 月 21 日盈江 5.9 级地震前一天发生 1 次 5.0 级前震，断层错动类型为正断型，5.9 级主震就在 NS 向的苏典断裂上（图 1b），与震源机制解的一条节面相吻合，地震类型为走滑型，本次 5.8 级地震的 3 次 4 级前震均为走滑型，与主震一致。

2 盈江5.8级地震前短临跟踪和预测

盈江5.8级地震发生前, 云南地区主要的地震活动异常是5级以上地震平静而3、4级地震活跃, 平静至何时会发生地震? 活跃到何种程度将发生较大地震? 这是非常难以把握的尺度。2011年1月13日, 我们果断地对盈江地区作出了3个月地震短临预测。我们当时是如何考虑的、发现了什么异常? 为了尽量还原当时的真实情况, 我们资料选至2011年1月12日, 而不是像常规震例总结那样选用至3月10日地震发生及其以后的资料, 这样就能有效避免实际预测时间之后的地震活动异常波动对研究人员的判断带来的干扰。此外, 我们还增加了盈江5.8级地震的2次前震序列 h 值异常, 此异常当时未能看到, 但由于异常较为显著故作为经验总结列出。

2.1 云南地区5级地震平静时间长

截至2011年1月12日, 云南及周边地区($21^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$, $97^{\circ} \sim 106^{\circ} \text{E}$) 5级以上地震发生的时间间隔已达321天(图7a)。1925年以来云南发生5.0级以上地震347次(去除余震), 时间间隔大于320天的地震仅15次, 占总数的4%, 近96%的地震是在平静时间小于320天的时间内发生的。云南地区5级以上地震平静时间较长的2组地震是: 1955年9月23日永仁6.8级和1957年6月22日勐海5.5级地震, 中间平静637天; 2001年10月27日永胜6.0级和2003年7月21日大姚6.2级地震, 中间平静632天。

统计时间间隔大于320天的地震所占的百分比, 按30天进行统计。若进行90天预测(则平静时间将达410天), 发生地震的比例在这15次平静时间大于320天的地震中达40%。从图8a中还可以看到, 在5级以上地震出现长时间的平静后, 较容易发震的时间段为350~380天、440~470天、620~650天, 比例合计接近80%。

2.2 云南地区3、4级地震能量

取云南及附近地区($20^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$, $96^{\circ} \sim 107^{\circ} \text{E}$) 3.0~4.9级地震, 去除5级以上地震的余震, 以10天为窗长、5天为步长做滑动, 采用G-R能量公式(1956)计算地震能量 E :

$$\lg E = 1.5M + 4.8. \quad (1)$$

式中, M 为震级, 能量 E 的单位为焦耳(J)或牛顿·米($\text{N} \cdot \text{m}$)。图8b给出云南地区3、4级地震的能量释放情况, 可以看到, 若以能量为 $1\,600 \times 10^{19} \text{J}$ 为异常值, 只要能量大于此异常值, 云南地区3、4级地震后较短时间内将发生5、6级地震。

2.3 地震力标度 σ 值

为了能较好地统一地震频度和能量, 钱晓东和秦嘉政(2010)提出一个具有明确物理含意、表示地震时震源处断层平均驱动力、适用于云南地区中小地震的地震力标度 σ 值指标

$$\lg \sigma = 0.98M_L + 6.93. \quad (2)$$

由于要进行5级以上地震的短期预测(3个月以内), 笔者利用云南省正式地震目录, 取云南地区($21^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$, $97^{\circ} \sim 106^{\circ} \text{E}$) $M_L 2.5 \sim 4.9$ 地震, 窗长1个月、步长7天进行滑动, 求得地震力标度 σ 的原始值, 由于 σ 曲线中包含有大量高频成份, 仅从原始曲线是很难区分地震活动强弱变化的, 必须对曲线进行处理, 去除高频成份突出低频部份。

根据地震力标度 σ 功率谱, 可以确定信号的中低频优势成份, 去除幅值较小、较平缓的高频噪声和干扰。图8c给出经滤波处理后的地震力标度 σ 曲线, 上部短竖线代表云南地区5级以上地震, 与原始曲线相比, 由于滤除了高频成份, 曲线变得更加光滑, 地震活动的平静—活跃交替出现的现象较为明显。一般如果地震力标度 σ 曲线超过均值则认为地震活动处于较高活动状态, 若在均值的下方则认为地震活动处于较低活动状态。根据我们对该指标的震例总结, 发生于波峰附近的强震绝大多数以连发的形式发生, 而波谷附近则以发生单个地震为主。若以 σ 值曲线从谷底上升1.5个月为起报时间点, 则3个月及其以内发生强震的可能性为78%。从图8c中可看到, 至2011年1月12日, σ 值曲线已处于较高水平。

2.4 环境剪应力 τ_0 值

钱晓东等(2006)利用1999年以来云南地区发生的1 000多次中小地震约4 000条数字化波

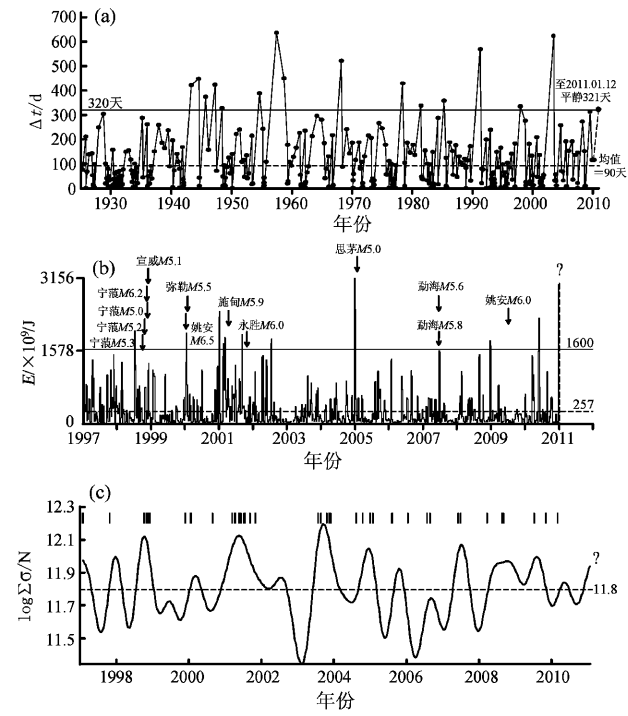


图8 盈江地震前地震学参数时间异常指标
(a) 时间间隔 Δt ($M \geq 5$); (b) 能量释放 E ($M3.0 \sim 4.9$);
(c) 地震力标度 σ ($M2.5 \sim 4.9$)
Fig. 8 Anomalous indexes of time the seismological parameters before Yingjiang $M_s5.8$ earthquake
(a) Interval: Δt ($M \geq 5$); (b) Energy release: E ($M3.0 \sim 4.9$);
(c) Seismic force scale σ ($M2.5 \sim 4.9$)

形记录资料, 导出了用峰值速度、地震矩求环境剪应力 τ_0 的关系

$$\lg(rv) = -7.24 + \frac{1}{2} \lg M_0 + \lg \tau_0. \quad (3)$$

式中, 震源处峰值速度 v 的单位为 m/s , 地震矩 M_0 的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$, r 为震源距。

在日常地震预测预报短临跟踪工作中, 我们以周为单位实时监测云南各个区域地壳应力状态。笔者对小滇西地区, 包括保山、腾冲、盈江、芒市一带, 选取震级 2.5 级以上地震求出 τ_0 值。图 9 给出了该区环境剪应力 τ_0 值的时间变化。从图 9 中可以看到, 每次高值过程都与小滇西地区 5.0 级以上地震对应, 地震发生在环境剪应力 τ_0 值出现高值的开始或结尾, 高值过程持续时间在 1 年以内。至 2011 年 1 月 12 日, 小滇西地区环境剪应力 τ_0 高值已持续 1 年, 仍然无 5.0 级以上地震发生, 故该区短期内发生 5.0 级以上地震的危险性较大。

2.5 盈江 2 次 4.8 序列 h 值

继 2011 年 1 月 2 日盈江发生 4.8 级地震后, 2 月 1 日又发生 4.8 级地震。图 10 给出了 2 次 4.8 级地震后频度衰减 h 值图, 纵坐标 N_c 为归一化累积频度, 为某日的累积频度除以第 1 天的频度。取控制震级 1.3, 从图 10 中可以看到, 2 次地震序列频度都出现明显增加, 而且无回落迹象, 以第 2 次 4.8 级序列为例, 计算的 h 值为 0.9, 这是典型的前震型或震群型序列, 但目前还未发现区分地震类型的有效方法。若序列为前震型, 意味着今后还有更大地震发生, 若序列为震群型, 则后续地震的震级在 4.8 ± 0.5 范围内 (钱晓东, 秦嘉政, 2008), 即后续地震可达 5.3 级。

2.6 破裂时间法地点搜索

Bufe 和 Varnes (1993) 提出了破裂时间方程

$$\sum \sqrt{E} = A + B(t_f - t)^m. \quad (4)$$

式中, t 是某次地震的时间; t_f 为破裂时间或主震发生时间; $\sum \sqrt{E}$ 是 t 时刻在某一选定区域内地震释放的能量平方根的累积值; A 、 B 为常数; m 为标度常数, $m < 1$ 表示能量加速释放, m 越小, 加速特征越明显, 但 $m \rightarrow -\infty$ 会导致 (4) 式出现物理上的不合理结果; $m = 1$ 表示能量均匀释放; $m > 1$ 表示能量减速释放。使用非线性最小二乘法可以拟合出这些常数 (蒋海昆等, 2009)。

将整个研究区域划分为 n 个网格, 对于每一个网格线相交点, 利用一系列不同的搜索半径 R 挑选地震前兆事件, 构建每一个加速序列, 确定它们的最小 (R_{\min}) 和最大 (R_{\max}) 搜索半径值。定义

$$\text{NSR} = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}}. \quad (5)$$

NSR 称为归一化搜索半径。NSR 越大, 能量加速曲线越明显; NSR 区域越大, 能量加速系列曲线越多, 最大的 NSR 即确定了即将发生主震的位置。

对于云南地区 ($21^\circ \sim 29^\circ \text{N}$, $97^\circ \sim 106^\circ \text{E}$), 以 1.0° 为单位将研究区划分为 $9 \times 10 = 90$ 个节点, 以每一个节点为圆心, 取一系列不同搜索半径, 根据 (5) 式求出最大归一化搜索半径 NSR, 就可

得到 90 个 NSR 值，再根据节点坐标可得到 NSR 等值线图。在计算能量加速曲线时，假设主震破裂时间为 2011 年 1 月 12 日以后 3 个月，即 2011.4 年（十进制），未来主震震级为 6 级，这样，在不知道主震发生的时间、震级和位置时，就可以根据现有资料对未来一定时间（3 个月）发生一定强度地震（6 级）的危险地点进行估计。

图 11 为云南地区 NSR 等值线影像图。可以看到高 NSR 值主要集中在 2 个地区，一个为小滇西地区，另一个为滇西南至中缅交界一带，盈江 5.8 级地震发生于小滇西地区。滇西南以南的缅甸地区也出现高值异常区，这可能与 2011 年 3 月 24 日缅甸 7.2 级地震有关，该地震发生于缅甸 NSR 高值区以西边缘。

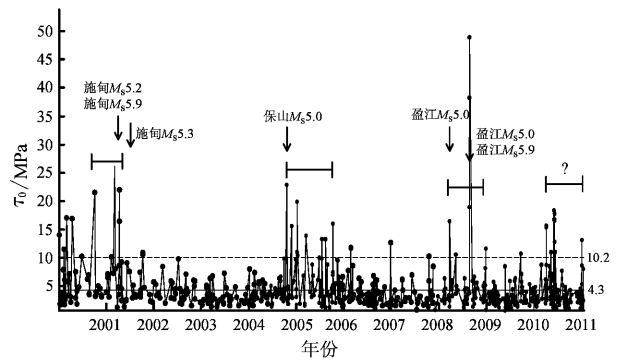


图 9 盈江地震前小滇西剪应力 τ_0 值
Fig. 9 τ_0 -value in Xiaodianxi region before the Yingjiang $M_5.8$ earthquake

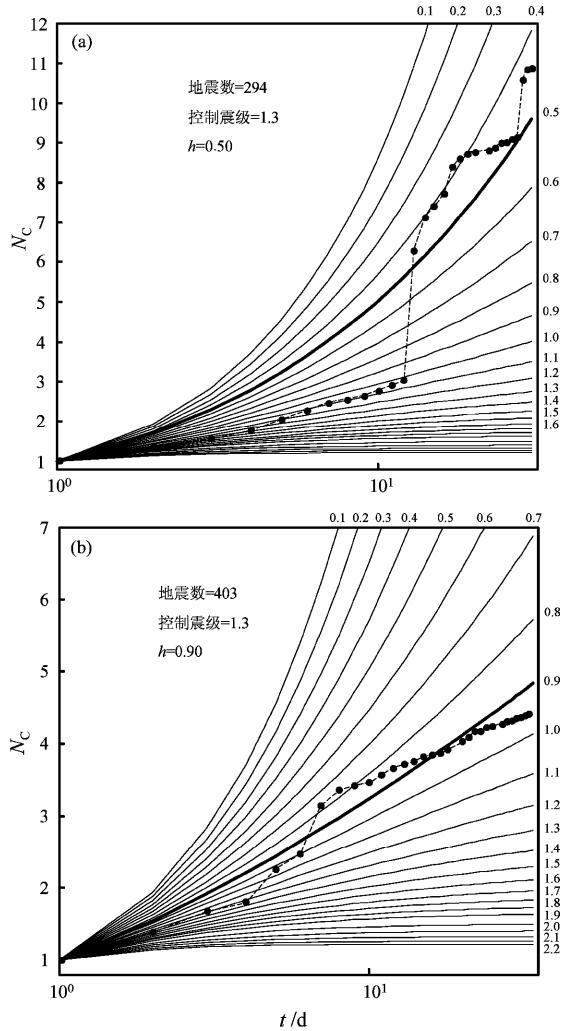


图 10 1月2日(a)和2月1日(b)盈江 4.8 级地震序列 h 值
Fig. 10 h_0 -value of the Yingjiang $M_4.8$ earthquake sequence on Jan. 2 (a) and the one on Feb. 1 (b)

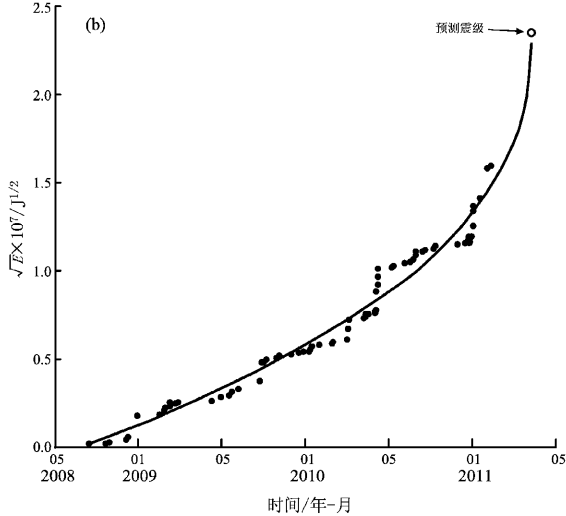
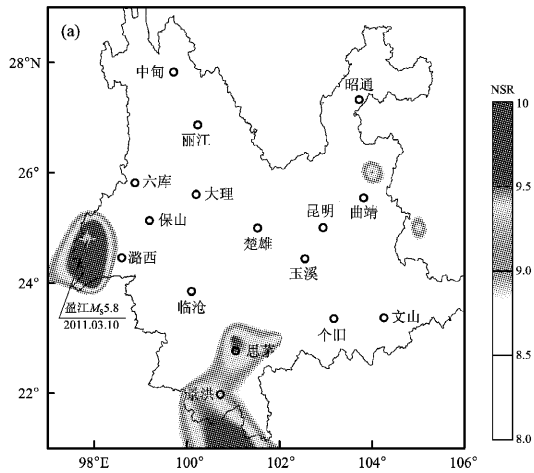


图 11 NSR 等值线影像图
Fig. 11 Isolines of NSR

3 讨论和结论

3.1 讨论

盈江 5.8 级地震是近年来云南地区发生的较为显著和重要的一次地震事件。首先,它是在云南地区乃至中国大陆 5 级以上地震经历了较长时间平静的背景下发生的。事实上,自 2011 年 1 月 8 日吉林珲春发生 5.6 级深源地震后(震源深度达 560 km),中国大陆就处于 5 级地震平静,61 天后发生盈江地震,2 个月的平静时间是较长的。据统计,中国大陆近 91% 的 5 级以上地震在平静时间不足 60 天时就已经发生。长期平静后发生的地震对社会公众来说比同样大小的地震连发时所造成的影响要大。其次,在一些地处大盈江冲积平原区的地区,如盈江县城东南边的弄璋镇飞勒村,由于地下沉积有较多的冲积砂层,地下水位浅,会产生地裂缝、沙土液化、喷砂冒水和地面沉降现象。第三,地震对当地公众心理造成较大影响。在盈江县及附近,发生 1 次 3.0 级地震也能使人们感觉到地面和建筑物的激烈摇动,并且在震前非常短的时间还伴随有较强的“隆隆声”、“嗡嗡声”、甚至爆裂声,这样的地声在 1、2 月份出现得多且声音大,盈江 5.8 级地震后相对较少。从 2011 年 1 月初至 3 月底,盈江震区共发生 3 级以上地震 75 次,其中 4 级以上地震多达 13 次,如此多的地震在短短 90 多天在人口密集的县城发生,对公众心理的影响是较大的。

通过对盈江 5.8 级地震进行系统总结和梳理,我们对盈江地区的地震地质构造、地震发震机理、火山地区地震类型特征、小滇西地区构造应力场特点、城市直下型地震以及地震序列等方面都有了较为深刻的认识,尤其是对盈江 5.8 级地震孕震过程中所表现出来的地震学异常进行总结,对今后地震预测预报工作具有较大现实意义。在我们提出的震前地震学指标异常研究的方法中,有些是近年来才发展起来的新方法和新手段。例如,为了寻找强震危险地点,笔者使用了破裂时间法,它对地点具有较好的指示意义,国内相关研究成果也在逐渐增多(秦嘉政,钱晓东,2004;蒋长胜等,2004;杨文政,马丽,1999)。为了解决中小地震频度和释放能量之间存在的矛盾,我们提出地震力标度新指标,并且对地震力标度参数原

始值采用滤波方法进行加工和处理,结果对未来强震具有明确预测指示意义,这种思路可能是今后地震预测指标研究的发展方向。为了探索一定区域的地壳应力状态,我们利用陈培善和 Duda (1993) 提出的地震矩与环境剪应力的基本关系,得到用地面运动峰值速度和地震矩求解剪应力方法,并对环境剪应力与强震的相关性进行认真总结,才能真正认识到该参数在哪些地区达到多少才是异常,为地震应力预测预报打下一定基础。此外,笔者研究异常指标的截止时间统一到盈江 5.8 级地震前 2 个月,这一时间点是我們进行正式预测的起始时间,随着时间向主震发震时间推移,可能已有的异常会发生变化,也可能出现一些新异常,但是为了还原当时的真实情况,笔者对起报时间后的异常变化没有讨论,这种方式也许更加科学合理。

3.2 结论

(1) 2011 年 3 月 10 日盈江发生 5.8 级地震,是该地区历史上较为强烈的地震,该地震是走滑型,发生于腾冲、盈江火山构造区,属城市直下型地震,发震断裂为北东向的大盈江左旋走滑断裂,破裂沿北东方向向主震两侧扩展,地震是在北东向接近水平的主压应力作用下,大盈江断裂内部应力积累到一定程度引发破裂使断层两侧产生左旋错动的结果。根据地震定标律估算的主震断层破裂参数为:地震矩 $M_0 = 1.99 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$, 矩震级 $M_w = 5.5$, 断层破裂面积 $S = 23 \text{ km}^2$, 断层错距 $D = 32 \text{ cm}$, 断层破裂长度 $L = 8.3 \text{ km}$ 。

(2) 震前发现 6 项地学参数异常,其中对未来强震时间和地点具有指示意义的异常有 3 项,时间方面的异常有云南地区 5 级地震平静时间异常、云南地区 3、4 级地震能量异常和地震力标度 σ 值异常;对地点有指示作用的异常指标有:小滇西地区剪应力 τ_0 值异常、2 次 4.8 级前震序列 h 值异常和破裂时间法归一化地点搜索半径 NSR 值异常。

(3) 震后, $M \geq 3.0$ 序列余震沿 NE 向带状分布,长轴约 13 km、短轴约 8 km,84% 的地震发生于 7~13 km 的深度,其中 7~9 km 深度的地震占整个序列的 51%,整个余震区几乎覆盖盈江县城。主震能量约占整个序列总能量的 94%, b 值为 0.75, h 值为 1.1, p 值为 1.2。主震序列震源深度比前震序列深。

参考文献:

- 安晓文,常祖峰,石静芳. 2009. 大盈江断裂西南段晚第四纪活动研究[J]. 地震研究, 32(2): 194-197.
- 陈培善, Duda S J. 1993. 峰值速度和加速度对环境剪应力的依赖性[J]. 地球物理学报, 36(2): 185-194.
- 姜朝松. 1998. 腾冲地区新生代火山活动分期[J]. 地震研究, 21(4): 320-329.
- 蒋长胜, 吴忠良, 史勇军. 2004. 中强震前地震活动矩释放加速现象(AMR)的普遍性问题[J]. 中国地震, 20(2): 119-125.
- 蒋海昆, 苗青壮, 董祥, 等. 2009. 中国大陆7级强震前中小地震应变释放特征[J]. 地震, 29(3): 1-11.
- 阚荣举, 王绍晋, 刘祖荫. 1979. 龙陵地震序列的震源机制特征[J]. 地震研究, 2(4): 10-21.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2000. 云南腾冲火山地区的地震类型[J]. 四川地震, (2): 43-48.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2007. 滇缅弧板缘地震及其与云南地震活动关系[J]. 云南大学学报, 30(S1): 467-475.
- 钱晓东, 秦嘉政, 叶建庆. 2006. 云南地区的环境应力参数及其在地震短临预报中的应用[J]. 地震研究, 29(1): 7-12.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2010. 地震力标度 σ 值及其在地震短期预测中的应用[J]. 地震, 30(3): 97-107.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2008. 用 b 值截距估算汶川8.0级地震序列最大余震[J]. 地震研究, 31(增刊): 436-441.
- 钱晓东, 秦嘉政, 刘丽芳. 2011. 云南地区现代构造应力场研究[J]. 地震地质, 33(1): 91-106.
- 秦嘉政, 皇甫岗, 钱晓东. 2005. 云南强震活动与预测方法研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 秦嘉政, 钱晓东. 2004. 利用前兆事件对云南地区地震进行中短期预测[J]. 地震学报, 26(2): 140-150.
- 晏凤桐, 宋文, 王兴辉, 等. 1978. 龙陵地震的震源机制[J]. 地震研究, 1(11): 1-13.
- 杨文政, 马丽. 1999. 地震活动加速模型及其在中国的应用[J]. 地震学报, 21(1): 32-41.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 张加桂, 黄体庄, 雷伟志, 等. 2009. 2008年云南盈江地震震害特点及抗震防灾启示[J]. 地质通报, 28(8): 1077-1084.
- 中国地震局. 1998. 地震序列的类型判别和震后趋势估计. 地震现场工作大纲和技术指南[S]. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局应急救援司. 2011年3月10日云南盈江5.8级地震烈度分布图[EB/OL]. (2011-03-17) [2011-06-06]. <http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/-content/11-03/17/1300339047620.html>.
- 中国地震网. 云南省德宏傣族景颇族自治州盈江5.8级地震. 震源机制[EB/OL]. (2011-03-11) [2011-06-06]. http://www.ceic.ac.cn/subjects/20110310125812/20110310125812_CMT.jsp?id=109148.
- Bufe C G, Varnes D J. 1993. Predictive modeling of the seismic cycle of the greater San Francisco Bay region[J]. J Geophys Res, 98(B6): 9871-9883.
- Gutenberg R, Richter C F. 1956. Magnitude and energy of earthquakes[J]. Ann Geofis, 9: 1-15.
- USGS. Global CMT Project Moment Tensor Solution [EB/OL]. (2011-03-10) [2011-06-06]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001wnu/>.

Short-term and Impending Prediction of the Mar. 10, 2011, M_s 5.8, Yingjiang, Yunnan Earthquake

QIAN Xiao-dong, SU You-jin, FU Hong, LI Qiong

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Collecting the firsthand seismic data before and after the M_s 5.8 Yingjiang earthquake in Yunnan Province in 2010, we systematically analyze the seismo-geological background, the main characteristics of the sequence, the seismic intensity, the seismogenic fault of the Yingjiang earthquake as well as the regional stress field in the earthquake-stricken area. Particularly, by tracking the earthquake force scale, shear stress, h -value of earthquake sequence, time-to-failure and seismic energy, we conduct a short-term and impending earthquake and prediction 3 months before Yingjiang earthquake. The Dayingjiang fault, which is NE-trending, left-lateral and strike-slip, is most likely the seismogenic fault of this earthquake. There appeared a lot of anomalous seismic parameters before the earthquake, which significant to the short-term and impending prediction for the time and location of the future earthquakes in this area.

Key words: Yingjiang M_s 5.8 earthquake; focal mechanism; seismic parameters; short-term and impending prediction