

徐嘉谦, 杨晓琳. 2015 年云南沧源 5.5 级地震前兆异常的研究 [J]. 华南地震, 2017, 37 (2):39-47. [XU Jiaqian, YANG Xiaolin. Precursory Anomaly and Analysis of Cangyuan 5.5 Earthquake in Yunnan in 2015[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2):39-47.]

## 2015 年云南沧源 5.5 级地震前兆异常的研究

徐嘉谦, 杨晓琳

(临沧市地震局, 云南 临沧 677099)

**摘要:** 对 2015 年 3 月 1 日沧源 5.5 级地震的震源机制解、余震区走向综合分析认为南汀河断裂西支为此次地震的发震构造; 通过对前震活动时空动态演变的研究进行分析, 震前震中 150 km 左右范围, 小震活动在主震 8 个月前开始出现增频现象, 震前 3 个月地震活动积累频度进一步加速发展, 震前 13 天达到最大值, 随后进入震前临震的高度平静阶段; 墨江作为滇西南显著的地震窗口, 曾在沧源 5.5 级地震前 8 天发生 4.4 级地震; 震前存在可识别的孕震区, 并根据该孕震区的最大尺度和最大前震对未来主震震级作定量计算, 所预测震级与实际发生震级基本符合; 在前兆观测项目上, 耿马、云县洞体应变北东向和水管倾斜北东向均出现破年变异常。通过该次地震孕震过程分析认为: 沧源 5.5 级地震孕震过程的中、短、临前兆阶段是可跟踪、可计算的, 研究分析结果可为今后本区内破坏性地震的监测提供参考。

**关键词:** 沧源  $M_s$  5.5 地震; 前兆异常; 异常特征; 南汀河断裂

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 02-0039-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.007

## Precursory Anomaly and Analysis of Cangyuan $M_s$ 5.5 Earthquake in Yunnan in 2015

XU Jiaqian, YANG Xiaolin

(Lincang Earthquake Agency, Lincang 677099, China)

**Abstract:** Based on a comprehensive analysis of the focal mechanism solution, isoseismal line distribution of intensity and the trend of aftershock zones of Cangyuan  $M$  5.5 earthquake on March 1<sup>st</sup>, 2015, it is believed that the west branch of Nanting River fault is the seismogenic structure of this earthquake. The study of spatiotemporal dynamics evolution of foreshock activities before earthquake shows that before earthquake the epicenter's range is about 150 km, small earthquake activities begin to increase and appear abnormal phenomena eight months before the principal earthquake, and the accumulative frequency of earthquake activities further accelerates development 3 months before earthquake, and reaches its maximum 13 days before earthquake, then enters the highly calm phase of the imminent earthquake before earthquake. There existed an identifiable

收稿日期: 2017-01-20

作者简介: 徐嘉谦 (1975-), 男, 工程师, 主要从事地震监测预报、震情跟踪分析和防震减灾综合管理工作。

E-mail: xjqlwy@foxmail.com.

seismogenic zones before earthquake, and according to the largest scale and the largest foreshock of this seismogenic zone, the future main shock magnitude can be quantitatively calculated. At the same time, the north east component of cave strain and water pipe tilted in Gengma county and Yun county appeared the annual variation; through the seismogenic process analysis of this earthquake, it is considered that the middle phase, short phase and temporary phase of the preparation of Cangyuan  $M$  5.5 earthquake, are all trackable and computable, which provides a reference for the monitoring of destructive earthquakes in this area in the future.

**Keywords:** Cangyuan  $M_s$  5.5 earthquake; Precursory anomaly; Anomaly characteristic; Nantinghe fault zone

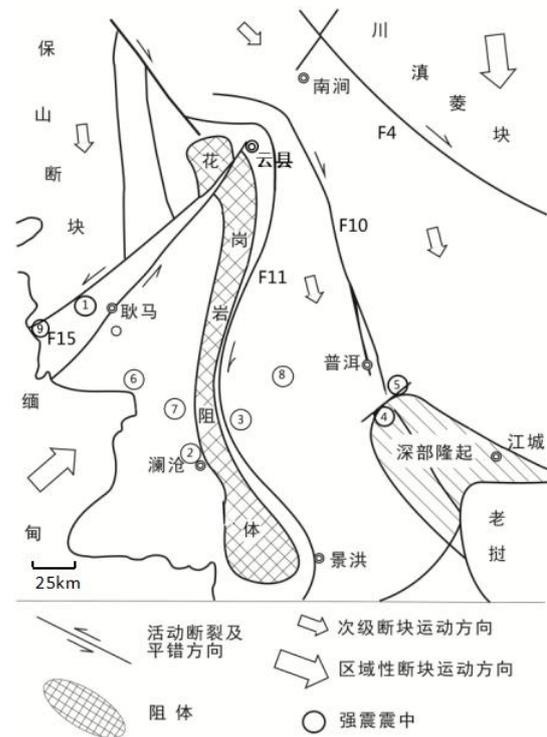
## 0 前言

据中国地震台网测定, 2015年3月1日18时24分, 云南省沧源佤族自治县(23.5°N, 98.9°E)发生5.5级地震。该地震的发生符合滇西南地震预报协作区2014年震情会商会议结论, 预测2015年沧源、耿马等地区存在发生5~6级地震的中期预测意见。本文旨在对震前的异常进行回溯性分析, 为今后本区内破坏性地震的监测预报提供参考。

## 1 区域内断裂及历史地震概况

图1显示出滇西南地区构造活动模式<sup>[1]</sup>, 反映了滇西南地区间接受到来自两个方向的板块运动的应力作用, 一方面川滇菱形块体向南东的运动和三江南北向构造区域的一系列断块向南滑动; 另一方面, 印度板块向北的运动和印度洋中脊的侧向扩张, 向本区西侧施加北东向的水平侧压应力。而在整个过程中, 临沧花岗岩体, 由于规模巨大和所在断块向北东运动的性质, 阻碍了从北边沿三江南北断块顺弧滑动而来的构造应力, 给澜沧江中游地区新生代以来的构造格局的形成施加了强大影响。

南汀河断裂是一条燕山期以来活动强烈的断裂<sup>[1]</sup>。总体呈北东向延伸, 走向NE30°, 区内断裂长约150 km, 宽达25 km。北东端起自云县, 向南西延至路边田分成东西两支, 顺云县盆地的东西边缘发展。东、西两支断裂共同控制了向北东方向逐渐尖灭的楔形断块<sup>[1]</sup>。从图1中可以看出, 南汀河断裂在云县以南先后错断了南北向的昌宁断裂, 柯街断裂。北东端延生至澜沧江断裂弧顶内侧, 消失于花岗岩基部, 斜向左旋剪切断错了花岗岩体, 一定程度地破坏了岩体的完整性。南汀河断裂附近地壳二维P波速度结构横向非均匀性自基底向下一直延伸至上地幔顶部, 该区域可能存在有延伸至莫霍面的地壳深断裂。



断裂带: F4: 红河断裂; F10: 无量山断裂; F11: 澜沧江断裂; F15: 南汀河断裂。

历史地震: 1. 1941-05-16 耿马 7.0 级; 2. 1941-12-26 澜沧 7.0 级; 3. 1942-02-01 思茅(今景谷县内) 6.7 级; 4. 1971-04-28 普洱 6.7 级; 5. 1979-03-15 普洱 6.8 级; 6. 1988-11-06 耿马 7.2 级; 7. 1988-11-6 澜沧 7.4 级; 8. 2014-10-07 景谷 6.6 级; 9. 2015-03-01 沧源 5.5 级。

图1 滇西南地区断层活动示意图<sup>[1]</sup>

Fig.1 The map of fault activity in southwest of Yunnan

滇西南地区历史上地震活动强度大且频度高, 有很强的孕震能力, 尤其是澜沧江断裂以西地区(包括接壤的境外缅甸地区)历史上发生过多次7级以上地震, 该区发生过7级以上强震的断裂包括南汀河断裂、汉姆坝断裂、打洛-景洪断裂、木嘎断裂和澜沧-勐海断裂。而澜沧江以东普洱-思茅地区有北东向、北北西向断裂类棋盘式断裂交错分布, 是5~6级地震频发区, 2014年10月7日

该区内景谷县曾发生 6.6 级地震, 12 月 6 日发生了 5.8、5.9 级强余震。截止 2015 年 3 月 1 日, 5 个月的时间发生多次 5 级以上破坏性地震, 说明滇西南地区近期处于地震活跃期。

1941 年 5 月 16 日在耿马县发生 7 级地震, 宏观震中位于南汀河断裂带西支断裂的强烈活动地段。宏观调查证实, 极震区(9 度)呈长椭圆形, 跨过主干断裂与分支断裂相交地带, 轴向与两条断裂平行<sup>[1]</sup>。地震时于大寨北端的挤压破碎带中产生了一条长 5 km 的张扭性地震断层<sup>[2]</sup>, 由此确定这次强震是南汀河断裂西支活动的结果。1923 年在南汀河东支延长线的缅甸境内(东经 98.75°, 北纬 22.75°) 发生过 7.3 级地震。1988 年耿马 7.2 级地震发生在与南汀河断裂垂直的汉姆坝断裂上, 其地震形变带北端终止于南汀河断裂东支<sup>[3-4]</sup>, 南汀河断裂对区域内的地震有很好的限制作用。

南汀河断裂西支断裂北东段长期以来地震的活动微弱, 历史上没有破坏性地震记载。滇西及滇西南几个地震活跃期内, 北东段的小震活动水平也较低, 对于这样一个强震构造来说, 地震活动偏弱。

与南汀河断裂相交的北北西向盈江-澜沧断裂带是第四纪新生断裂带, 曾发生过多次 7 级以上强震, 目前该断裂带在永德县境内无明显地震活动, 地表还未有明显断层出露, 而根据有关研究, 该区域的运动处于快速隆起的状态<sup>[5-7]</sup>。2000、2011、2012 年缅甸分别发生 6.9、7.2、7.0 级地震, 滇西南地区活动断层库伦应力变化主要为负值, 即受到应力卸载作用的断裂包括大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂、南汀河断裂、孟连-澜沧断裂、打洛-景洪断裂和怒江断裂; 而受到应力加载作用的断裂包括木嘎断裂和龙陵-澜沧断裂<sup>[8-9]</sup>。地壳快速隆起及应力加载作用说明该区处于地震应力积累的区域, 未来一段时期, 该区域是一个中强地震危险区域。以上几方面因素都预示着南汀河断裂及周边断裂的不稳定性, 在这一背景下, 发生了沧源 5.5 级地震。

## 2 5.5 级地震序列

### 2.1 基本参数

#### 2.1.1 地震三要素

2015 年 3 月 1 日 18 时 24 分, 云南省临沧市沧源佤族自治县(北纬 23.5°, 东经 98.9°)发生 5.5 级地震, 震源深度 11 km。

根据矩张量反演结果, 此次地震为走滑型, 地震断层界面 I: 走向 69°, 倾角 67°, 滑动角 15°; 界面 II: 走向 333°, 倾角 76°, 滑动角 156°。

### 2.2 余震空间分布

图 2 是沧源 5.5 级地震 3 月 1 日至 6 月 30 日的余震分布图。从图中可以看出, 主震与余震之间存在空段, 余震的分布基本上是沿着南汀河断裂西支断裂展布, 均分布于震中的北东方向上, 在主震的西南方向上没有余震分布。

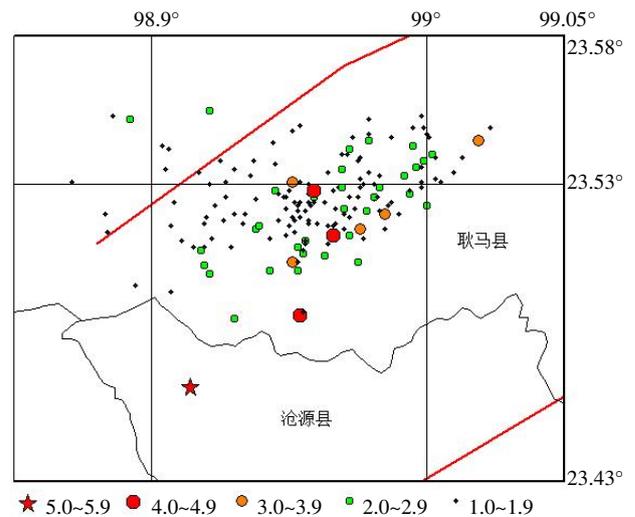


图 2 沧源 5.5 级地震余震分布图

Fig.2 The distribution map of aftershocks of Cangyuan M5.5 earthquake

### 2.3 余震衰减状态

利用 3 月 1 日至 8 月 1 日主余震做  $M-T$  图, 从图 3 中可以看出, 最大余震为 3 月 3 日发生的  $M_s$  4.6 级, 余震衰减大致可分为早期应力快速下降段、起伏衰减段和晚期余震活动段。地震序列为 5.0~5.9 级 1 次、4.0~4.9 级 2 次、3.0~3.9 级 1 次, 2.0~2.9 级 39 次, 余震整体偏少, 且衰减过程存在空段和震级起伏现象。

从地震前后对比来看(图 4), 在南汀河断裂东支及汉姆坝断裂上小震密集, 呈片状分布。沧源 5.5 级地震发生后东支上小震仍频繁发生, 小震震源深度平均值 11.8 km, 说明南汀河断裂东支附近地震活动存在异常。

## 3 孕震过程分析

### 3.1 长期地震危险性探讨

澜沧江断裂以西的滇西南地区, 从较大范围

看，遭受到来自印度板块侧向挤压、川滇块体楔入和华南地块向北的联合作用。区内主要分布着南北向、北东和北西向的3组活动断裂带，其中

SN向断裂带主要为澜沧江断裂带，NE向包括大盈江断裂、龙陵瑞丽断裂、南汀河断裂、孟连-澜沧断裂，以NW向为龙陵澜沧断裂带<sup>[10-12]</sup>。

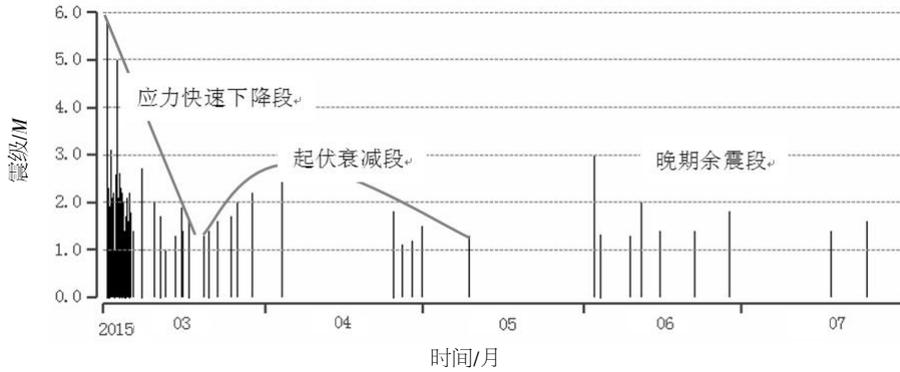


图3 沧源地震 M-T 图

Fig.3 The M-T diagram of Cangyuan earthquake

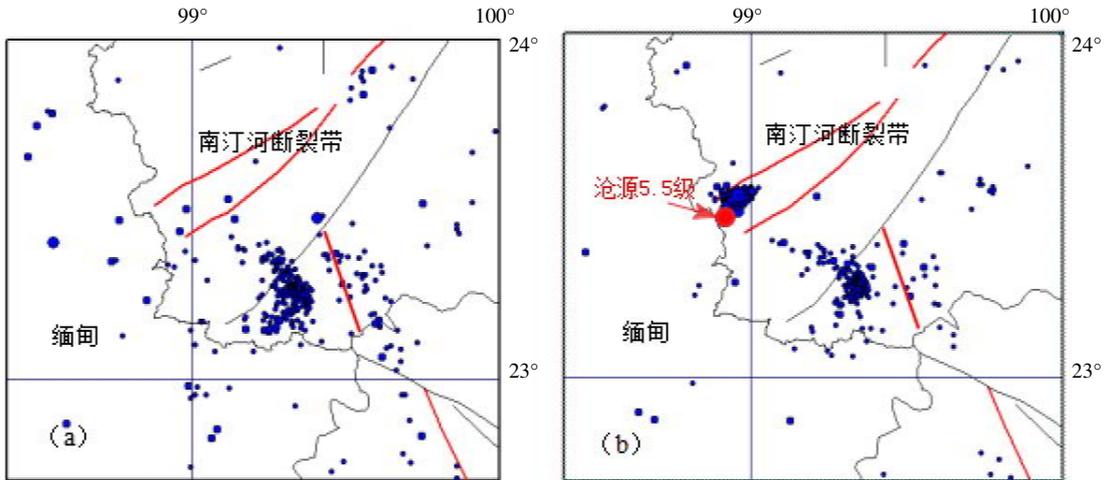


图4 沧源 5.5 级地震前后震中分布图

Fig.4 The distribution map of epicenters before and after the Cangyuan M 5.5 earthquake

滇西南地区一条 NW 向的新生代断裂龙陵-澜沧断裂活动剧烈，为左旋走滑运动，并与 NE 向断裂组成共轭剪切破裂带。位于该断裂带上的永德县是一个中强震长期危险区域。

**3.2 沧源 5.5 级地震处于滇西南强震活跃期之中**

滇西南及其附近地区从 1923 年以来，强震、大震频发，但在时间分布上无明显规律。在过去的 92 年中，该区域发生强震大致可分为 5 组，每组持续时间均大于 11 年，最近一组开始于 2007 年，据估计该强震活跃期至少要持续到 2018 年，2015 年沧源 5.5 级地震就处于该活跃期之中，如图 5。

**3.3 墨江震兆窗**

总结滇西南破坏性地震孕震过程中发现，当墨江境内发生 3.0 级以上地震后一年左右的时间，滇西南地区均有 5 级以上地震发生，见表 1。

从表 1 可看出，墨江地震窗口从 2004 年到 2015 年 2 月共出现 9 组 14 次 3.0 级以上地震，对应了滇西南 8 次破坏性地震，其对应率为 80%，窗口地震与未来主震间隔时间平均为 283 天，可作为滇西南中短期预报指标。

**3.4 前震活动增强**

通过对滇西南数十次破坏性地震孕震过程进行研究发现滇西南地震孕育过程显著短于云南东

部地区的同级别地震,一般 5.0~5.9 级地震孕震过程显著增强在半年左右时间尺度,孕震区一般在 100~150 km 范围,云南地震台网对沧源地震附近

2013 年以来地震监控下限为 1.4 级。

根据上述中强地震孕育时空范围,我们把沧源 5.5 级地震孕震研究范围选定如图 6 所示。

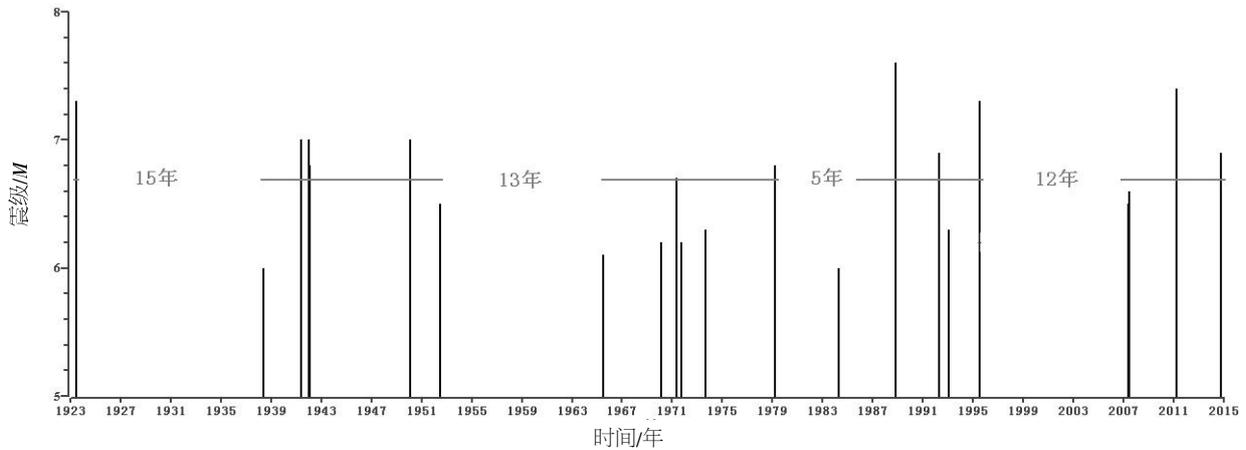


图 5 滇西南 6.0 级以上强震 M-T 图

Fig.5 The M-T diagram of earthquakes with  $M \geq 6.0$  in southwest of Yunnan

表 1 墨江窗口与滇西南地区  $M \geq 5$  地震对应关系

Table 1 The relationship of earthquakes with  $M \geq 5$  in Mojiang and southwest of Yunnan

序号	窗口地震	对应地震	时间间隔/d
1	2004-03-11 $M$ 3.5	2005-01-26 思茅区 5.0	318
2	2005-02-11 $M$ 3.2	2006-01-12 墨江县 5.0	258
	2005-04-29 $M$ 3.1		
3	2006-01-12 $M$ 5.0	2007-06-03 宁洱县 6.4	535
4	2009-04-05 $M$ 4.5	2010-03-20 缅甸 5.3	349
5	2010-03-23 $M$ 3.2	2011-03-24 缅甸 7.2	366
6	2011-01-23 $M$ 4.0	2013-02-20 墨江县 5.0	69
	2012-02-26 $M$ 3.4		
	2012-04-20 $M$ 3.1		
	2012-05-26 $M$ 3.0		
7	2012-12-13 $M$ 3.1	2014-10-07 景谷县 6.6	357
	2013-04-21 $M$ 4.1		
	2013-10-15 $M$ 4.3		
8	2015-02-21 $M$ 4.4	2015-03-01 沧源县 5.5	8

选震除了前述 100~150 km 范围外,图中也显示了该范围与西北、东面和南面是相对独立的,而且与本次地震发震构造密切相关。显然选取的前震研究选样范围是合理的。

从图 7 和图 8 中可以看到孕震区范围小震 2013 年 1 月到 2014 年 6 月在强度和频度 2 个方面均相对随机,而从 2014 年 7 月以后地震频度显著增加,尤其是从 10 月开始不仅频度增加,强震也出现有序增强的明显变化。2015 年 2 月 18 日后,研究范围出现了高度平静的临震异常。

图 8 是研究范围内 1.4 级以上地震以 3 个月为时窗,1 天为步长进行滑动计算得到的孕震过程

图,从图中我们通过定量计算得到近 2 年多,研究范围 1.4 级以上地震 3 个月积累平均值为 52 次,1 倍均方差值为 38,在 2014 年 6 月前研究范围内小震积累频度在均值加 1 倍均方差 90 次范围内波动,而从 2014 年 7 月开始该积累频度迅速增加,到临震 12 天前增加到 210 次超过均值 4.2 倍均方差,地震活动异常增加十分显著。

这一定量计算最清楚地显示了沧源 5.5 级地震孕震过程始于 2014 年 7 月,并在同年 12 月即震前 2~3 个月进入加速阶段,震前 12 天进入高度平静临震阶段。

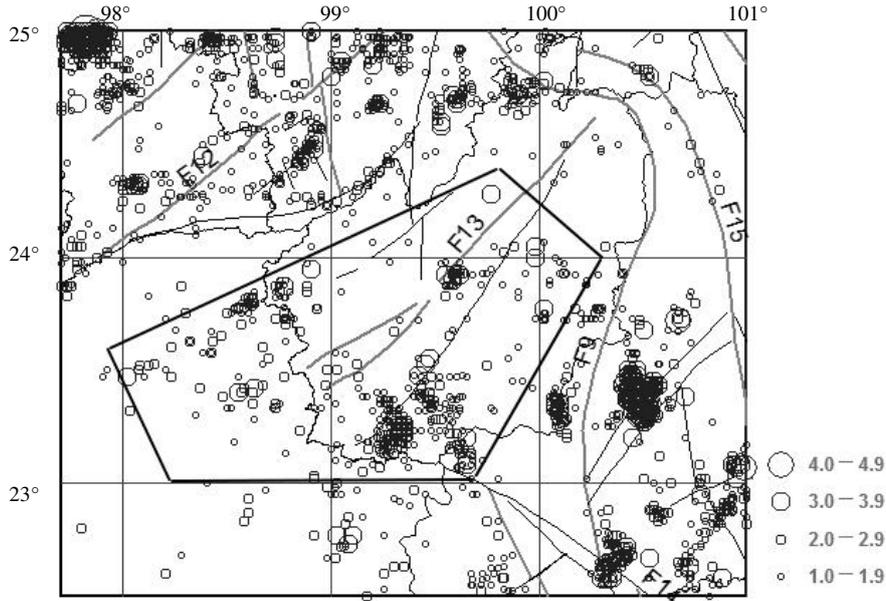


图 6 沧源 5.5 级地震孕震研究选样范围

Fig.6 The sample area of seismic study of the Cangyuan M5.5 earthquake

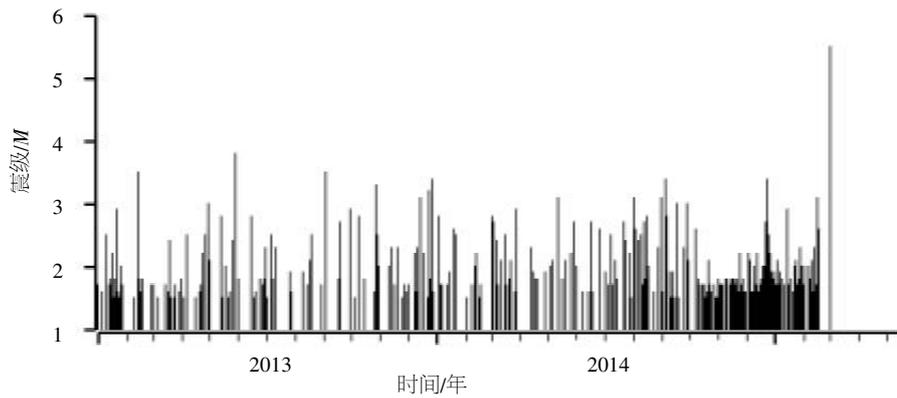


图 7 研究范围内 1.4 级以上地震 M-T 图

Fig.7 The M-T diagram of earthquakes with  $M_l \geq 1.4$  in sample area

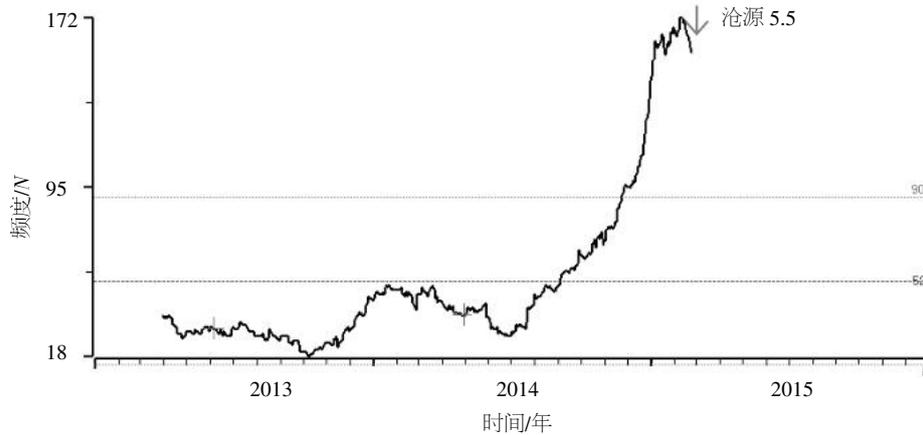


图 8 研究范围内 1.4 级以上地震 3 个月累积频度

Fig.8 The accumulate frequency of earthquakes with  $M_l \geq 1.4$  in 3 month

### 3.5 短临阶段出现 $M \geq 3.0$ 级地震围空区

为进一步研究震源区小震空间演变过程的变化细节,我们选用主震 150 km 范围内 3.0 级以上地震

作震中分布图(图 9)。地震发生前在震中 50~150 km 范围形成了  $M \geq 3$  级地震的围空,该孕震区最大前震震级为 4.3 级,孕震区最大尺度为 120 km。

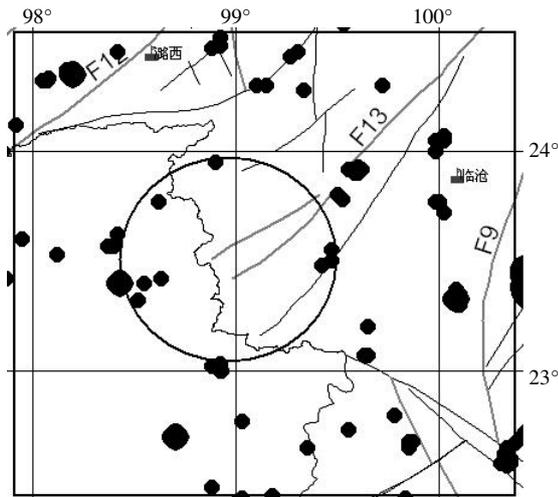


图 9 2011-01~2015-02 震中 150 km 范围内  $M \geq 3.0$  地震分布  
Fig.9 The distribution map of earthquakes with  $M \geq 3$  in 150 km distance from epicenter

### 3.6 根据孕震区的最大尺度和最大前震震级对主震震级的计算

利用文献[10]滇西南孕震区最大前震震级与未来主震震级之间存在近于线性关系式:

$$M_{主} = 0.95 + 1.05 M_{前} (\pm 0.15) \quad (1)$$

代入最大前震震级 4.3 级, 可拟合计算出主震震级为  $5.465 \sim 5.5$  级。

同样利用文献[10]滇西南孕震区最大尺度与主震震级关系式

$$M_{主} = 2.625 \lg(L) + 0.35 (\pm 0.14) \quad (2)$$

利用这一关系式, 代入孕震区最大尺度 120 km, 并拟合计算出主震震级为  $5.457 \sim 5.5$  级。

### 3.7 形变测项异常及水化测项异常

沧源地震前临沧市内投入运行的测项有地下流体 10 项, 形变观测 12 项。其中 3 个测项出现明显破年变异常, 分别是云县地震台洞体应变北东向分量、耿马县地下流体观测站。使用的前兆资料截止时间为 2015 年 5 月 30 日。

#### 3.7.1 云县台地形变异常

如图 10, 云县台洞体应变北东向的年变规律非常稳定, 在被研究的北东向可以看到每年年初归零后, 基本上是以匀速向下变化, 在研究的前 5 年即 2010—2014 年北东向多年年变形态幅度变化均很稳定。但是从 2015 年的资料可以看出年变形态和日变幅度均出现了非常显著变化, 且这一变化不能用降雨影响来完全解释, 同时已排除有其他显著干扰因素的可能。

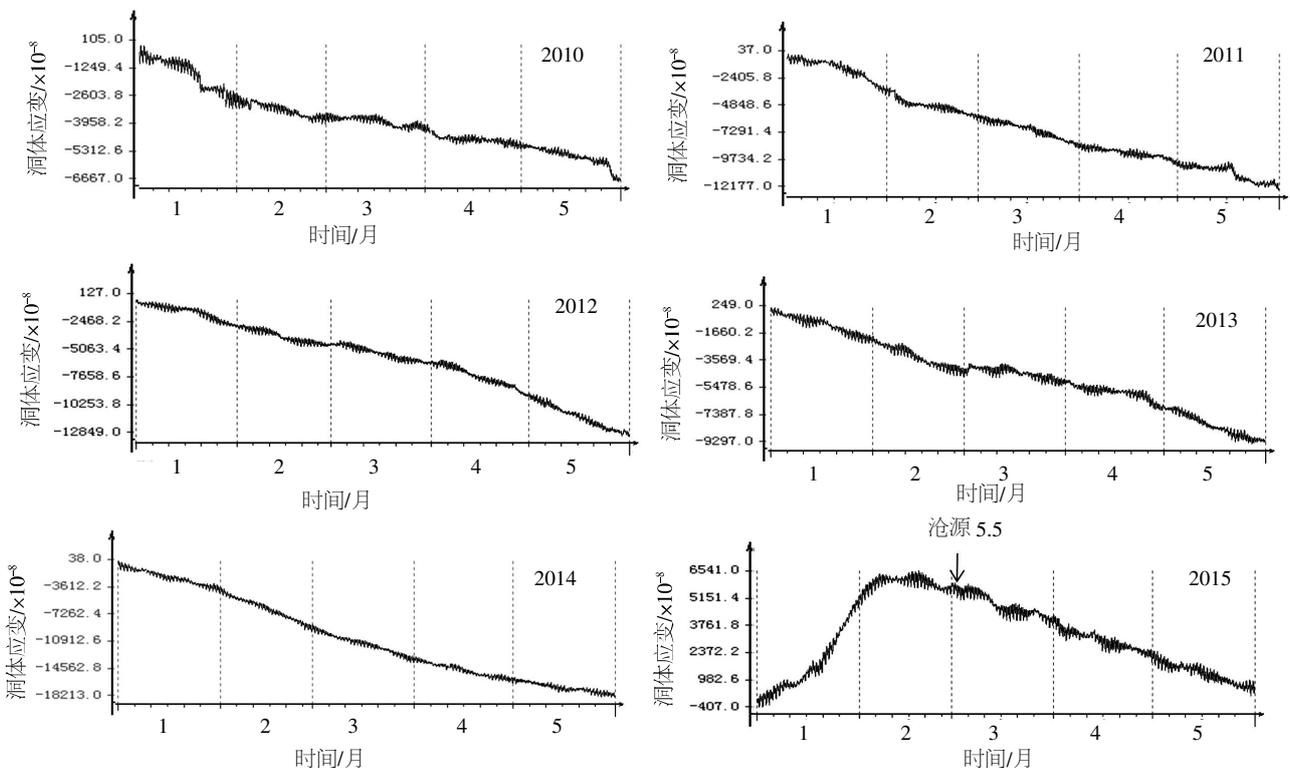


图 10 云县台洞体应变北东向分量同时段对比图(1 月 1 日~5 月 31 日)

Fig.10 The comparison of northward component of hole strain in Yun country station at the same time (from January 1st to May 31st)

如图 11, 云县台水管倾斜北东向分量同样有稳定的年变规律, 即年初归零后, 匀速下降。2013 年距离云县台约 160 km 的洱源 3 月 3 日发生 5.5 级地震及 4 月 17 日发生 5.0 级地震, 所以该测项发生了典型的地形变异异常。

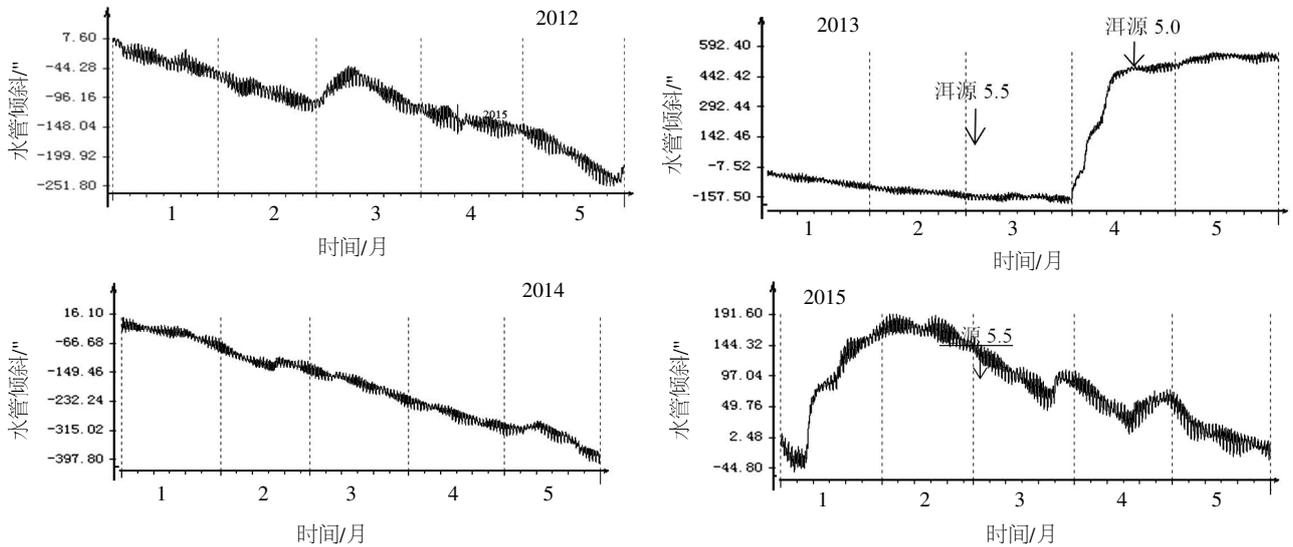


图 11 云县台水管倾斜北东向分量同时段对比图(1 月 1 日~5 月 31 日)

Fig.11 The comparison of northeast component of water pipe inclination in Yun country station at the same time (from January 1st to May 31<sup>st</sup>)

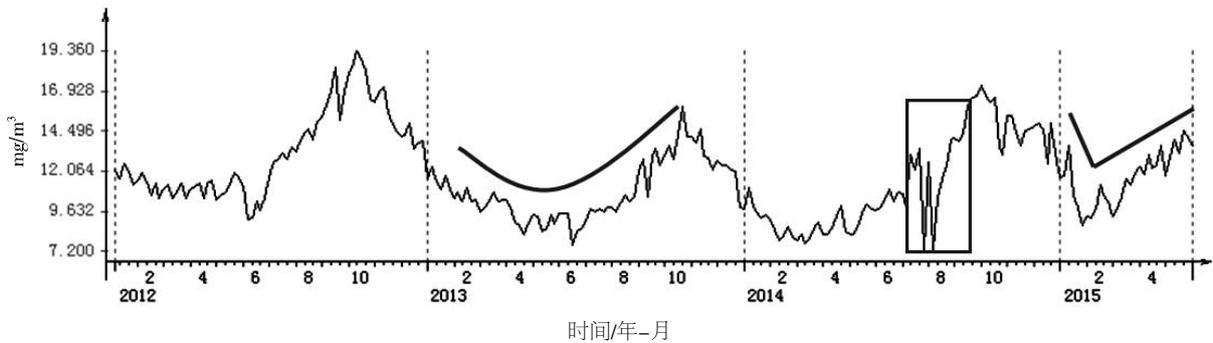


图 13 耿马 前兆观测

Fig.13 The observation item of carbon dioxide in Gengma county

临沧市内 3 个地震前兆的异常时间基本上都出现在震前 1~3 个月之内, 属于短临前兆异常。

沧源 5.5 级地震前, 滇西南地区的前兆异常并未表现出群体性同步异常。因为一般情况下, 准同步异常和同步异常时群体异常的极端形式, 只有在大震或成组强震孕育才可能同时涉及多个地块和多个活动构造, 使得多个构造活动增强进而造成多个测点出现同步异常变化<sup>9</sup>。

#### 4 结语

沧源 5.5 级地震的较大余震震中分布为北东

#### 3.7.2 地下流体异常

如图 12, 耿马 2012 年之后数据年变规律较明显, 按往年规律 1~4 月缓慢下降, 5~6 月从低值开始上升, 但是 2015 年数据从 2 月初即开始上升, 出现了破年变异常。

向、地震烈度等震线长轴为北东向、震源机制解中节面 I 走向为 690, 均与南汀河断裂的西支断裂走向一致, 这表明该断裂就是沧源 5.5 级地震的发震构造。

近几十年来南汀河断裂西支地震活动相对较弱, 震前 8 个月震中 150 km 范围内 1.4 级以上小震 3 个月积累频度显著增加, 最大变幅超过均值 4.2 倍均方差;  $M \geq 3.0$  前震活动在空间分布上呈现出围空特征, 其长轴为 120 km, 最大前震震级为 4.3 级。

根据文献[10]研究孕震区最大尺度、最大前震

震级与未来主震震级关系式作定量计算,主震震级应为5.5级,这与沧源主震完全一致。

通过本文研究初步认为沧源5.5级地震孕震过程始于2014年7月,并在同年12月即震前2~3个月进入加速阶段,震前12天进入高度平静临震阶段。震前出现了可跟踪和识别的孕震区,主震震级的可计算,这都可以为未来本区破坏性地震短临阶段跟踪提供一个非常有参考价值的震例。

目前从余震精定位上看出,一是主震与余震空间分布上存在空段;二是在整个地震条带中主震位于端点,沿南汀河断裂西支主震另一侧没有余震分布;而从主震后的衰减过程来看,4级余震发生2次,而3级余震只有1次,余震明显偏少,存在时间空段和震级起伏的现象;南汀河东支上从2014年10月开始1级小震频发,且沿北东向和北西向垂直分布,十分密集,沧源地震后仍小震不断。以上四个方面震后趋势的异常都表明该次地震及该区域仍值得继续关注。

#### 参考文献:

- [1] 何希虎. 澜沧江中游地区地震的地质条件和稳定性讨论[J]. 地震地质, 1982 (2): 39-87.
- [2] 朱玉新. 滇西南地区的地震活动与断块结构 [C] //1994年中国地球物理学会第十届学术年会论文集. 北京: 中国地球物理学会, 1994.
- [3] 胡 斌, 戴塔根, 胡瑞忠, 等. 滇西地区壳体大地构造单元的划分及其演化与运动特征[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29 (4): 537-544.
- [4] 毛玉平, 张俊昌. 澜沧-耿马地震发震构造初步研究[J]. 地震研究, 1991, 14 (1): 9-15.
- [5] 毛玉平, 李盛德. 澜沧-耿马地震序列图像与发震构造讨论[J]. 西北地震学报, 1991, 13 (1): 57-62.
- [6] 王晋南, 王洋龙, 安晓文, 等. 南汀河西支断裂北东段最新活动性分析[J]. 地震研究, 2006, 29 (3): 264-268.
- [7] 郝 明. 基于精密水准数据的青藏高原东缘现今地壳垂直运动与典型地震同震及震后垂直形变研究[J]. 国际地震动态, 2013 (07): 40-42.
- [8] 季灵运, 刘立伟, 郝 明. 利用 InSAR 技术研究滇西南镇康-永德地区先进地壳形变特征[J]. 地震研究, 2015. 38 (1): 84-89.
- [9] 孟令媛, 史海霞, 周龙泉. 喜马拉雅东构造结附近强震对滇西南地区断层的影响研究[J]. 地震研究, 2015. 38 (1): 58-65.
- [10] 石绍先. 云南强震孕震区的识别和应用[M]. 北京: 地震出版社, 2012.
- [11] 石绍先, 程方正. 川滇前兆群体异常与成组强震[J]. 中国地震, 2004, 19 (02): 52-60.
- [12] 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等. 中国西南地区现代构造应力场基本特征 [J]. 地震学报, 1993, 14 (04): 408-418+521.