

# 安宁河—则木河断裂带及周边地区断层 交会部位的应力分布特征<sup>\*</sup>

吴微微

(四川省地震局, 四川 成都 610000)

**摘要:** 根据构造活动特性对安宁河—则木河断裂带及周边地区进行分段, 利用多地震的断层面解和中小地震的震源参数结果分析不同断层交会区的局部应力场和地震活动特征。结果表明: 研究区北段的断裂呈“入”字形交会, 具备应力高度集中的局部条件, 地震活动频度高、震级偏大, 震源应力降普遍较高; 中段上, 安宁河空区内部的断裂呈“钝角”形交会, 地震活动稀疏, 震源应力降偏低, 而空区东侧的断裂呈“Y”字形交会, 中小地震比较活跃, 震源应力降值总体居中; 在研究区南段, 多条断裂呈“Y”字形交会, 可能不具备应力高度集中的构造条件, 虽然地震活动频度高、震级偏大, 但震源应力降值总体居中。研究区地震活动和应力分布的分段差异, 与断裂间的相互作用形式有关, 交叉断层间的变形不协调对局部应力场和地震危险性有较大影响。

**关键词:** 安宁河—则木河断裂带; 断层交会; 应力降; 地震活动

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2020)04-0601-09

## 0 引言

断层交会, 即两条或两条以上断层相交。在大型断裂带上, 主干和次级断裂交叉错切、相互作用, 形成不均匀的介质环境和复杂的动力学背景。在构造的变形局部区, 断层交会的地方往往是断层相互作用表现最明显的部位, 断层的交会为应力集中提供焦点并形成不同的应力分配模式 (Talwani, 1988, 1999), 导致地震成核、扩展以及终止过程的复杂多变。

2008年、2014年新疆于田2次7.3级地震均发生在阿尔金断裂、康西瓦断裂和玛尔盖茶卡断裂的交会部位, 虽然2次地震震中仅相距96 km, 但一次为正断型地震、一次为走滑型地震, 反映出不同交会部位上应力-应变环境的差异 (万永革等, 2010; 徐锡伟等, 2011; 程惠红等, 2014)。2014年云南鲁甸6.5级地震发生在左旋走滑断层包谷垭断裂和小河断裂的联接处附近, 震源区受控于NW-SE向压应力场和NE-SW向张应力场的共同作用, 是一次共轭破裂的复杂地震事件

(王未来等, 2014; 张勇等, 2015)。2017年四川九寨沟7.0级地震发生在2008年汶川8.0级地震产生的应力增强区内, 震中地处塔藏断裂、岷江断裂和虎牙断裂的交会区, 同时也是东昆仑断裂带东端的构造转换部位 (Toda *et al.*, 2008; 徐锡伟等, 2017)。显然, 作为断裂之间强烈挤压、变形协调的过渡带或调整带, 断层交会影响着区域的地震活动和局部的应力场特征。

安宁河—则木河断裂带是南北地震带的主干断裂之一, 是川滇地区目前应变积累的主要地段 (江在森等, 2005; 朱良玉, 蒋锋云, 2018; 刘昌伟等, 2019)。震源参数的研究指出安宁河—则木河断裂带及周边地区的中小地震震源应力降值明显高于川西平均水平 (吴微微等, 2017)。随着石棉、九龙、普格、宁南、昭觉和会东相继发生4~5级地震, 区域中强地震的频度和强度逐渐增大, 2018年10月31日的西昌5.1级地震是近年来在该断裂带上发生的最大地震。该断裂带上还存在一些小震活动的空缺段或稀疏段 (闻学泽等, 2008; 易桂喜等, 2008), 其中、长期强震或大地震潜势需要关注。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-05-06.

基金项目: 中国地震科学实验场项目 (2018CSES0209) 和地震科技星火计划 (XH202302) 联合资助。

安宁河—则木河断裂带及周边地区的北段是鲜水河、安宁河以及大凉山断裂带等多条活动断裂的交会区,中段是安宁河与则木河断裂带的交会区,南段是则木河、大凉山和小江断裂带的交会区,在这些交会区上构造变形和地震活动特征并不相同。为了进一步了解该区域现今的应力分布特征,识别正处于相对高应力积累的段落,本文进行了如下工作:①根据构造活动特性对断裂进行分段,分析不同断层交会区的构造特点;②联合多地震的断层面解,分析局部应力方向特征;③计算中小地震的震源参数,绘制沿断裂的应力分布图;④结合区域不同段落的几何结构、活动习性及其现代地震活动的时-空分布,讨论断裂交会与地震活动、震源特性和应力分布的关系,从而更好地认识交叉断层的相互作用和变形协调对局部应力分布和强震危险性的影响。

## 1 构造背景

安宁河—则木河断裂带是川滇活动地块东边界的主要活动断裂。在印度板块与欧亚板块碰撞、印度板块北移引起板块边缘或内部强烈隆起、青藏高原物质向东逃逸受阻等深部动力过程的共同作用下 (Wang *et al.*, 1998), 在鲜水河断裂带、安宁河—则木河断裂带和小江断裂带附近形成大的剪切位移和变形带,控制着川滇地区的构造格局 (图 1)。

安宁河断裂带位于康滇地轴的轴部,北起石棉、经西昌一直延伸到会理一带,整体呈 NS 走向,以左旋走滑运动为主,新生代以来最大左旋走滑速率约为  $6.2 \text{ mm/a}$  (何宏林, 池田安隆, 2007), 最大挤压速率约为  $1.4 \text{ mm/a}$  (冉勇康等, 2008)。其北段的石棉附近是巴颜喀拉块体、川滇块体和华南块体的交会处,在这里鲜水河断裂带的左旋走滑运动被分解到了安宁河断裂带、大凉山断裂带上,它们以左旋剪切方式调节青藏高原地壳物质向东的运动,同时兼具少量的挤压缩短分量 (杜平山, 2000; 冉勇康等, 2008; 张培震, 2008), 历史上该区域可能孕育了公元 1470 年  $7\frac{1}{2}$  级地震。安宁河断裂带南段的冕宁—西昌地区是 1536 年  $7\frac{1}{2}$  级地震的主要破裂部位,但自 1952 年冕宁以南发生 1 次  $6\frac{3}{4}$  级地震后,安宁河断裂带没

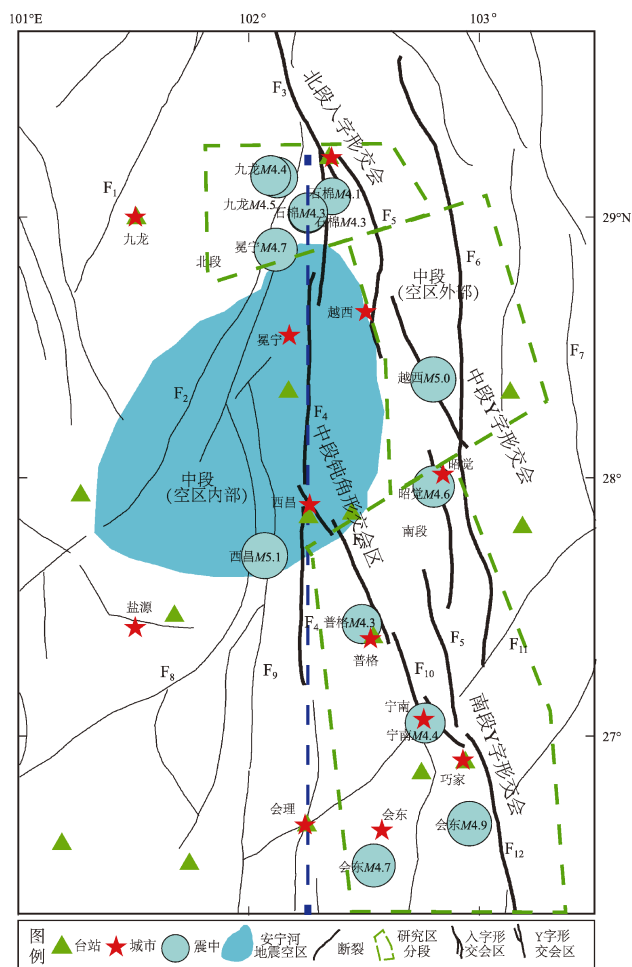


图 1 研究区中强地震分布及构造分段图

Fig. 1 Distribution of medium and strong earthquakes and structural segmentations in the study area

有更大的地震发生,同时以李子坪—西昌段为核心逐渐形成一个现代地震空区 (图 1),具有第一类地震空区的背景 (以下简称“安宁河空区”) (闻学泽等, 2008)。

则木河断裂带北端与安宁河断裂带相连,其南端与小江断裂相连,自西昌经普格、宁南一直延伸到云南巧家一带,总体走向  $330^\circ$ ,历史上曾发生公元 814 年西昌 7 级地震和 1850 年西昌大箐梁子  $7\frac{1}{2}$  级地震,最近一次中强地震是 2018 年 10 月 31 日的西昌 5.1 级地震。则木河断裂带以左旋走滑运动为主,全新世左旋走滑速率约为  $(6.4 \pm 0.6) \text{ mm/a}$  (闻学泽等, 2008),在西昌至普格间伴有正断倾滑

分量(任金卫, 1994)。在巧家西南, 则木河断裂带最南端的断裂走向朝 S-SSW 偏转。

基于多期 InSAR 和 GPS 速度场数据的研究表明, 安宁河断裂带中北段、则木河断裂带中北段和小江断裂带南段等均是低  $b$  值和高应力异常段, 目前均处于闭锁状态, 闭锁深度为 10~20 km, 亏损速率分别为 7~9 mm/a, 1~3 mm/a 和 2~4 mm/a (赵静等, 2015)。安宁河断裂带上冕宁至西昌附近完全闭锁, 具有随时发生高震级地震的可能性 (Jiang *et al.*, 2015)。

## 2 区域应力场

### 2.1 研究方法

本文采用 CAP 方法 (McKenzie, 1969; Zhu, Helmberger, 1996) 反演中强地震震源机制解, 联合多地震的断层面解, 利用主压应力  $P$  轴和张应力  $T$  轴的水平投影分析研究区震源应力场的方向特征; 再采用  $\omega^2$  模型拟合震源谱, 利用 Brune (1970) 圆盘模型计算安宁河—则木河断裂带及周边地区中小地震的震源应力降  $\Delta\sigma$ , 获得关于地震过程中构造应力场大小和释放水平的信息; 最后结合研究区不同断裂段落的几何结构、活动习性 & 现代小震活动的时空分布, 绘制沿断裂的震源应力降平面分布和深度分布图。

### 2.2 震源机制解

选取安宁河—则木河断裂带及周边地区 (26.3°~29.23°N, 101°~103.5°E) 作为研究区, 采用 CAP 方法反演 2000—2018 年 63 次  $3.6 \leq M \leq 5.1$  地震的震源机制解 (图 2)。图 2 显示, 研究区的地震多为走滑型或正走滑型地震 (2018 年西昌 5.1 级地震为正走滑型地震) (Zoback, 1992), 这种整体的走滑特征与该区以左旋走滑运动为主的构造变形背景较一致。几次正断层型地震主要分布在则木河断裂带南段、大凉山断裂带南段和小江断裂带北段交会的普格—巧家地区。地质资料显示 (闻学泽, 2000), 在则木河与小江断裂带之间、宽约 20 km 的宁南—巧家拉分区上分布着 NE 向次级张性断裂和 NW 向正—倾滑活动断裂。从图 3 可以看出, 沿安宁河—则木河断裂带的主压应力  $P$  轴方向多数近于 NW 向, 主张应力  $T$  轴方向多数近于 NE 向。

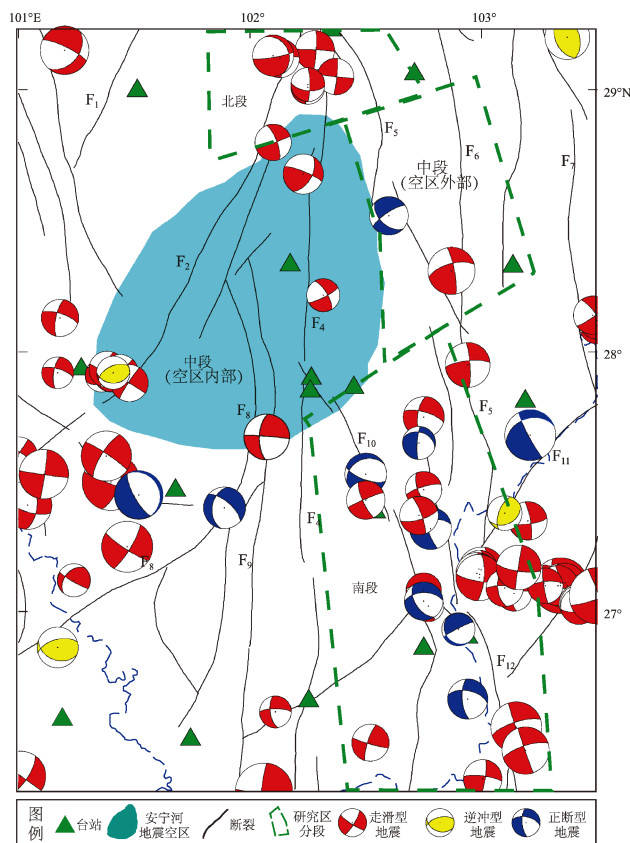


图2 研究区中强地震震源机制解空间分布 (断裂同图1)  
Fig. 2 Spatial distribution of focal mechanism solutions for moderate and strong earthquakes in the study area (the faults is the same as in Fig. 1)

### 2.3 震源应力降

在震源参数的计算过程中, 采用 Atkinson 和 Mereu 的方法 (Atkinson, Mereu, 1992) 拟合出安宁河—则木河断裂带及周边地区的介质品质因子  $Q(f) = 101.9f^{0.6663}$  (吴微微等, 2016), 参照 Moya 方法联合多台地震数据获得安宁河—则木河断裂带上地震观测台站的场地响应 (Moya *et al.*, 2000; 黄玉龙等, 2003; 刘杰等, 2003; Allmann, Shearer, 2009; 赵翠萍等, 2011)。再对 0.1~20 Hz 的 SH 观测波形数据逐步消除仪器响应、噪声、几何扩散、传播路径的介质衰减和场地响应的影响, 得到 2009—2018 年研究区 612 次  $2.0 \leq M_L \leq 5.6$  地震的震源谱, 采用  $\omega^2$  模型拟合震源谱计算它们的震源参数, 分别绘制应力降空间分布图 (图 4)、十年尺度的应力降—震级图 ( $\lg \Delta\sigma - M$ ) (图 5)、年尺度的应力降—时间序列图 ( $\lg \Delta\sigma - T$ ) (图 6) 以及

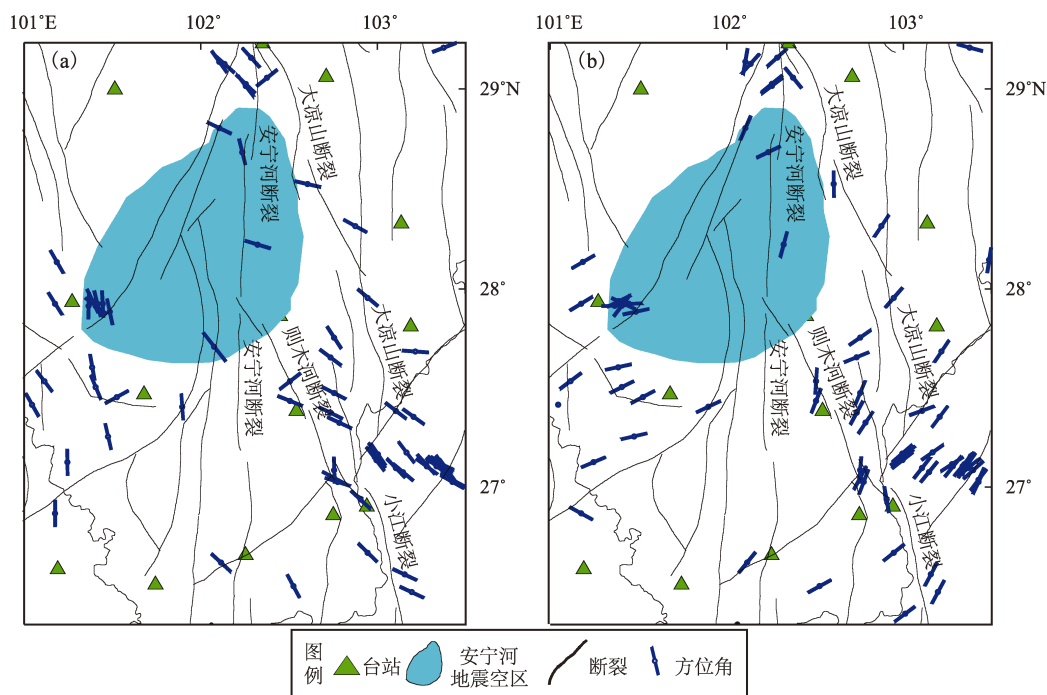


图3 研究区震源机制解  $P$  轴 (a)、 $T$  轴 (b) 水平投影

Fig. 3 Horizontal projection of the  $P$ -axis (a) and  $T$ -axis (b) of focal mechanisms in the study area

沿断裂的应力降 - 深度分布图 ( $\lg \Delta \sigma - h$ ) (图7)。为了有效解决数据取值范围过大导致的配色问题, 本文统一将应力降数据取对数后再绘图。

图4显示: 2009—2018年研究区的地震应力降为0.026~27.1 MPa。其中, 研究区北段的石棉地区中等地震活动频度高、震源应力降大 ( $\lg \Delta \sigma \geq 0.4$ ), 相同震级的地震应力降表现出沿鲜水河断裂带向安宁河断裂带逐渐增大的趋势 (吴微微等, 2017)。中段安宁河空区 (闻学泽等, 2008) 内地震活动水平低、震源应力降偏小 ( $\lg \Delta \sigma \leq -0.4$ ), 在研究时段内发生的最大的高应力降事件是2018年西昌5.1级地震 (应力降值为4.741 MPa); 在安宁河空区的外部, 即其东侧的大凉山断裂北段汇集了较多的中等应力降事件 ( $-0.4 \leq \lg \Delta \sigma \leq 0.4$ ), 在研究时段内曾发生2014年10月1日越西5.0级地震 (应力降值为2.437 MPa)。研究区南段中小地震活动频度高、震源应力降的释放水平中一偏低 ( $-1.6 \leq \lg \Delta \sigma \leq 0.4$ )。从图5可以看出:  $2.0 \leq M_L \leq 2.5$  地震的  $\lg \Delta \sigma$  为  $-1.0 \sim 0.7$ ,  $2.5 < M_L < 3.0$  地震的  $\lg \Delta \sigma$  为  $-0.9 \sim 0.9$ ,  $3.0 \leq M_L < 4.0$  地震的  $\lg \Delta \sigma$  为  $-0.6 \sim 1.1$ ,  $4.0 \leq M < 6.0$  地震的  $\lg \Delta \sigma$  为  $0 \sim 1.4$ 。综上, 震源应力降 ( $\lg \Delta \sigma$ ) 的区间值随地震震级增加而增大。

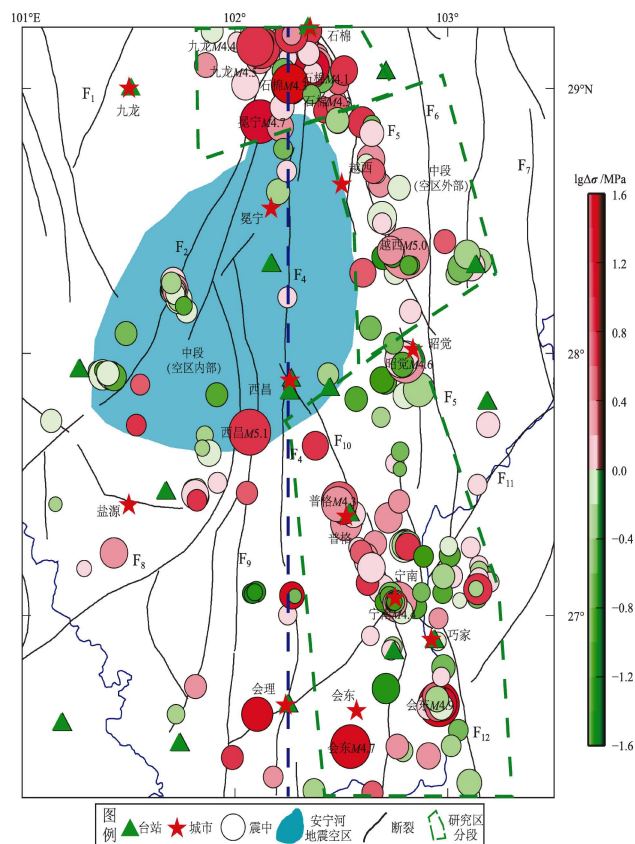
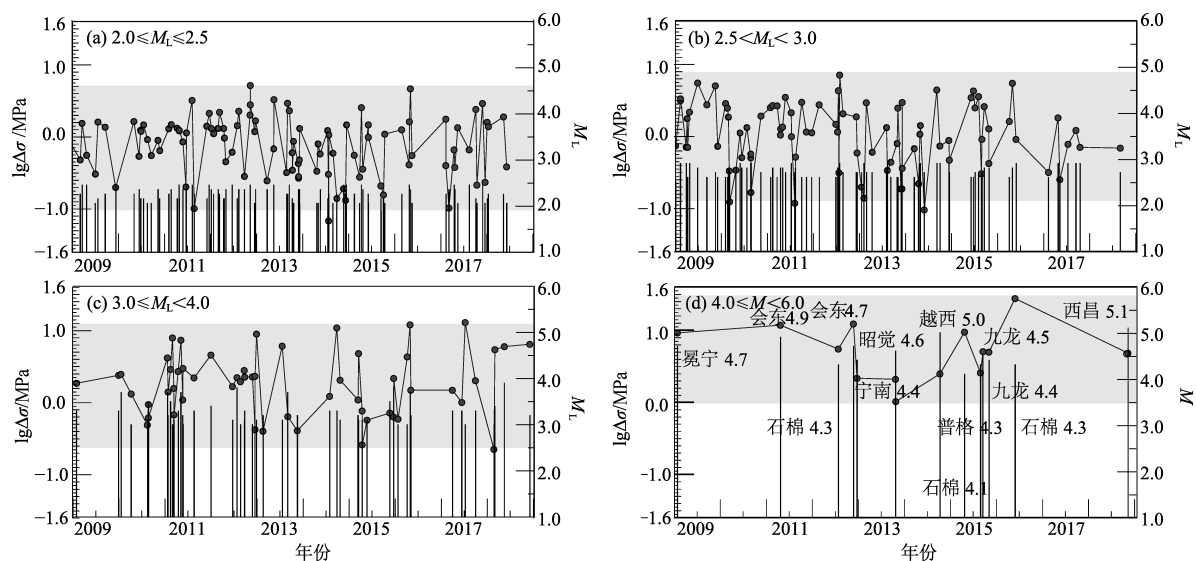


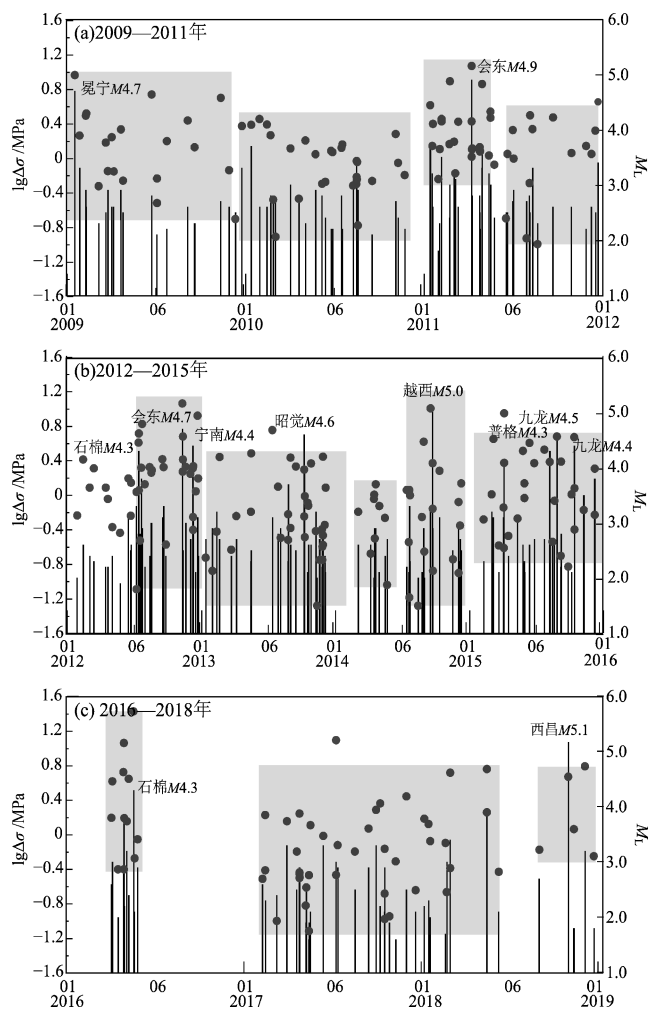
图4 研究区应力降空间分布图 (断裂同图1)

Fig. 4 Spatial distribution of stress drops in the study area (the fault is same as in Fig. 1)

图5 十年尺度应力降-震级图 ( $\lg\Delta\sigma - M$ )Fig. 5 Stress drop and magnitude diagram in ten year scale ( $\lg\Delta\sigma - M$ )

从图6可以看出, 应力降的变化与区域地震活动有关。2009—2018年共发生13次  $4.0 \leq M \leq 5.1$  的中等强度地震, 这些地震发生前、后震源应力降均表现出较为明显的变化, 反映了区域应力水平的动态改变。2009, 2011年, 仅发生冕宁4.7级和会东4.9级中等强度地震。冕宁4.7级地震发生后10个月左右, 区域应力水平明显下降; 会东4.9级地震发生前3个月, 区域应力水平开始上升, 相同震级的地震释放的应力降明显升高, 地震后, 随着研究区地震活动的减弱, 应力水平再次下降(图6a)。2012—2016年上半年, 研究区发生了多次4~5级地震(图6b, c), 是地震活动十分活跃的时段。石棉4.3级、会东4.7级和宁南4.4级地震期间, 应力水平出现半年左右的高值现象, 随后开始下降; 2013年昭觉4.6级地震发生前后, 区域应力没有明显变化; 2014年越西5.0级地震后, 应力水平持续上升, 至2016年石棉4.3级地震前, 出现较多的高应力降地震事件。2016年下半年至2018年, 地震活动减弱, 西昌5.1级地震前、后应力状态没有明显变化(图6c)。总之, 高应力降地震事件的出现和突增与区域地震活动的强度和频度比较对应, 相同震级下, 地震活跃期的震源应力降值常高于地震平静期。

以西昌为原点 ( $27.85^{\circ}\text{N}$ ,  $102.26^{\circ}\text{E}$ ), 沿近NS向的安宁河断裂带为投影轴, 绘制沿断裂的应力降-深度分布图 ( $\lg\Delta\sigma - h$ ) (图7)。图7显

图6 年尺度的应力降-时间序列图 ( $\lg\Delta\sigma - T$ )Fig. 6 Stress drop and time diagram in one year scale ( $\lg\Delta\sigma - T$ )

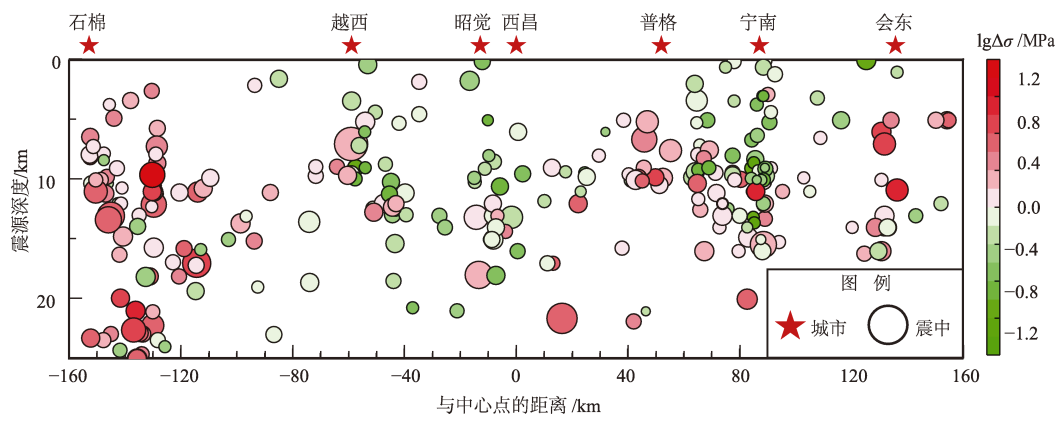


图 7 沿断裂的应力降-深度分布图

Fig. 7 Distribution diagram of stress drop and depth along the fault

示，高应力降地震事件的优势深度在 5 ~ 18 km。其中，石棉附近的高应力降地震事件在 3 ~ 24 km 均有分布；沿则木河断裂带自普格向宁南，高应力降事件深度从 5 ~ 10 km 向 10 ~ 15 km 发展；会东附近的地震应力降值普遍偏高，且在 5 ~ 20 km 的深度上均有分布。

3 讨论

3.1 断层交会与地震活动

断层活动不是孤立运动，它必然与附近断层产生相互作用。实例表明，断层交会地带通常也是断层相互作用最剧烈的地区。岩石力学实验揭示了断层相互作用的现象，并将其宏观划分为 4 种

类型，其中静态促震或减震型影响强震复发间隔，动态触发型意味着双震或多震的发生，动态加载-松弛型增加短期内中小地震的活动水平，蠕动触发型意味着一些异常现象可能出于蠕动断层上（马瑾等，2002）。

为了研究安宁河—则木河断裂带上不同类型的断层交会段与地震活动的关联，结合区域构造背景和现代地震活动的时-空分布将研究区分为 3 段，北段是“入”字形交会区，南段是“Y”字形交会，中段空区内是“钝角”形交会、空区东侧是“Y”字形交会（表 1、图 1）。其中，北段和南段的地震活动频度比较高、中小地震平均震级也偏大；中段的空区内部地震活动稀疏，空区东侧中小地震比较活跃。

表 1 断层交会与地震活动、应力降

Tab. 1 Faults intersection, seismic activities and stress drops

| 分段 | 交会断裂                | 交会特征    | 地震活动     | 应力降                                  |
|----|---------------------|---------|----------|--------------------------------------|
| 北段 | 鲜水河断裂、安宁河断裂、大凉山断裂等  | “入”字形交会 | 频度高，震级偏大 | $\lg\Delta\sigma \geq 0.4$           |
| 中段 | 安宁河断裂带、则木河断裂（空区内）   | “钝”角形交会 | 地震活动稀疏   | $\lg\Delta\sigma \leq -0.4$          |
|    | 大凉山断裂、甘洛—竹核断裂（空区东侧） | “Y”字形交会 | 中小地震比较活跃 | $-0.4 \leq \lg\Delta\sigma \leq 0.4$ |
| 南段 | 则木河断裂、大凉山断裂、小江断裂等   | “Y”字形交会 | 频度高，震级偏大 | $-1.6 \leq \lg\Delta\sigma \leq 0.4$ |

3.2 断层交会与应力降

在北段“入”字形交会区上（图 1），鲜水河断裂带向南延伸至安宁河断裂带、大凉山断裂带，走向从 NNW 转向 SN 向，纯左旋走滑作用转变为左旋走滑作用和挤压（程佳等，2014），在这个过程中，走滑速率减慢、收缩速率加快（田雯等，2016）。在石棉附近，安宁河断裂带旁侧次级断裂

强力挤入并错断安宁河主断裂带，形成“构造楔形体”（黄润秋，2005），导致应力高度集中，产生大量震源深度相对较深的地震事件（蒋长胜等，2015），相同震级的地震应力降具有沿鲜水河断裂带向安宁河断裂带逐渐增大的特征（吴微微等，2017）。

在南段“Y”字形交会区上（图 1），NNW 向

则木河断裂带南段和近 SN 向大凉山断裂带南段在巧家附近并入小江断裂带, 左旋走滑速率加快(徐锡伟等, 2003; Shen *et al.*, 2005; 王阎昭等, 2008), 同时存在约 0.6 mm/a 的横向拉伸, 表现出略显张性的左旋走滑特征, 研究区的正断型地震主要分布在这里。在多组断裂的相互作用下, 该区域具有较高的应力背景值。另一方面, 地质资料显示: 则木河断裂带结构相对简单, 组成断裂带的次级断层具有一致的左旋走滑位移, 它们的走向与断裂带整体走向的夹角 $\leq 20^\circ$ (杜平山, 2000)。在巧家附近, 小江断裂带北段沿金沙江及小江河谷展布, 结构较单一, 地貌上显示为河流沿断裂破碎带侵蚀而成的大型断层槽谷(裴向军等, 2019)。即相较于北段“入”字形交会区, 南段“Y”字形交会区可能不具备应力高度集中的局部条件, 应力水平总体居中。

研究区中段包含安宁河空区内、外 2 个区域, 高应力降地震主要分布在空区东侧的大凉山断裂带北段上, 空区内部鲜有地震发生、应力降值也偏低。大凉山断裂带的左旋走滑速率为 3 mm/a 左右, 曾发生多次 7 级古地震事件(宋方敏等, 2002; 何宏林等, 2008)。一些研究认为, 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 6.5 级地震对同年 10 月 1 日的四川越西 5.0 级地震有促进作用, 同时对大凉山断裂带北段、则木河断裂带南段有一定的库伦应力增强作用(程佳等, 2014)。

### 3.3 断层交会与变形运动的不协调

安宁河—则木河断裂带上不同规模的断裂带交叉错切、相互作用, 一些强烈挤压的段落形成闭锁, 导致应力集中, 地震成核并孕育。受控于川滇活动块体东边界总的动力学背景, 断裂带上不同段落的几何结构、活动习性也有差异, 相互作用的形式并不同, 反映到构造单元上即为变形运动的不协调, 这种不协调性很可能是影响地震类型和规模以及局部应力分配模式的主要原因。在讨论安宁河—则木河断裂带这种多交叉断层区域的地震活动和应力分布特征时, 需要考虑交叉断层的相互作用对局部应力场和地震危险性的影响。

## 4 结论

安宁河—则木河断裂带及周边地区的地震多

为走滑型, 符合区域以左旋走滑运动为主的构造变形特征。该研究区上不同规模的断裂交叉错切、相互作用, 不同的断层交会区的局部应力场和地震活动具有差异:

(1) 北段的鲜水河断裂带、安宁河断裂带以及大凉山断裂等呈“入”字形交会, 具备应力高度集中的局部条件, 地震活动频度高、震级偏大, 震源应力降普遍较高。

(2) 中段安宁河空区内的安宁河断裂带、则木河断裂带呈“钝角”形交会, 地震活动稀疏, 震源应力降偏低。空区东侧的大凉山断裂带、甘洛—竹核断裂呈“Y”字形交会, 中小地震比较活跃, 震源应力降值总体居中。

(3) 南段的则木河断裂带、大凉山断裂带、小江断裂带等呈“Y”字形交会, 可能不具备应力高度集中的构造条件, 虽然地震活动频度高、震级偏大, 但震源应力降值总体居中。安宁河—则木河断裂带上地震活动和应力分布的这种分段差异, 与断裂间的相互作用形式有关, 交叉断层间的变形不协调对局部应力场和地震危险性有较大影响。

### 参考文献:

- 程惠红, 庞亚瑾, 董培育, 等. 2014. 于田 2008 年和 2014 年两次  $M_s 7.3$  地震孕育的应力环境[J]. 地球物理学报, 57(10): 3238–3246.
- 程佳, 刘杰, 徐锡伟, 等. 2014. 大凉山次级块体内强震发生的构造特征与 2014 年鲁甸 6.5 级地震对周边断层的影响[J]. 地震地质, 36(4): 1228–1243.
- 杜平山. 2000. 则木河断裂带的走滑位移及滑动速率[J]. 四川地震, (1–2): 50–64.
- 何宏林, 池田安隆, 何玉林, 等. 2008. 新生的大凉山断裂带—鲜水河—小江断裂系中段的裁弯取直[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 564–574.
- 何宏林, 池田安隆. 2007. 安宁河断裂带晚第四纪运动特征及模式的讨论[J]. 地震学报, 29(5): 537–548.
- 黄润秋. 2005. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 20(3): 292–297.
- 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 2003. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 46(1): 54–61.
- 江在森, 牛安福, 王敏, 等. 2005. 活动断裂带构造变形定量分析[J]. 地震学报, 27(6): 610–619.
- 蒋长胜, 房立华, 韩立波, 等. 2015. 利用 PMC 方法评估地震台阵的地震检测能力——以西昌流动地震台阵为例[J]. 地球物理学报, 58(3): 832–843.
- 刘杰, 郑斯华, 黄玉龙. 2003. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震

- 源参数和场地响应[J]. 地震学报, 25(2): 211–218.
- 刘昌伟, 常祖峰, 李春光, 等. 2019. GPS 约束下川滇地区下地壳拖曳作用及断裂活动性有限元模拟[J]. 地震研究, 42(3): 385–392.
- 马瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 2002. 断层相互作用型式的实验研究[J]. 自然科学进展, 12(5): 503–508.
- 裴向军, 李天涛, 黄润秋, 等. 2019. 巧家拉分盆地结构特征及其形成演化过程分析[J]. 西南交通大学学报, 54(2): 278–286.
- 冉勇康, 陈立春, 程建武, 等. 2008. 安宁河断裂冕宁以北晚第四纪地表变形与强震破裂行为[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 543–554.
- 任金卫. 1994. 则木河断裂晚第四纪位移及滑动速率[J]. 地震地质, 16(2): 146.
- 宋方敏, 李如成, 徐锡伟. 2002. 四川大凉山断裂带古地震研究初步结果[J]. 地震地质, 24(1): 27–34.
- 田雯, 郑勇, 刁法启. 2016. 断层闭锁区的形变过程模拟[C]//2016 中国地球科学联合学术年会议文集(二十二)——专题 45: 川滇国家地震监测预报实验场.
- 王永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2010. 2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释[J]. 地球物理学报, 53(2): 280–289.
- 王未来, 吴建平, 房立华, 等. 2014. 2014 年云南鲁甸  $M_s 6.5$  地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报, 57(9): 3042–3051.
- 王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 等. 2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 582–597.
- 闻学泽, 范军, 易桂喜, 等. 2008. 川西安宁河断裂上的地震空区[J]. 中国科学: 地球科学, 38(7): 797–807.
- 闻学泽. 2000. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征[J]. 地震地质, 22(3): 239–249.
- 吴微微, 苏金蓉, 魏娅玲, 等. 2016. 四川地区介质衰减、场地响应与震级测定的讨论[J]. 地震地质, 38(4): 1005–1018.
- 吴微微, 吴朋, 魏娅玲, 等. 2017. 川滇活动块体中—北部主要活动断裂带现今应力状态的分区特征[J]. 地球物理学报, 60(5): 1735–1745.
- 徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 等. 2017. 九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论[J]. 地球物理学报, 60(10): 4018–4026.
- 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋, 等. 2011. 2008 年于田  $M_s 7.3$  地震地表破裂带特征及其构造属性讨论[J]. 地震地质, 33(2): 462–471.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学: 地球科学, 33(增刊 1): 151–162.
- 易桂喜, 闻学泽, 苏有锦. 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 51(6): 1719–1725.
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形, 应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 38(9): 1041–1056.
- 张勇, 陈运泰, 许力生, 等. 2015. 2014 年云南鲁甸  $M_w 6.1$  地震: 一次共轭破裂地震[J]. 地球物理学报, 58(1): 153–162.
- 赵翠萍, 陈章立, 华卫, 等. 2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究[J]. 地球物理学报, 54(6): 1478–1489.
- 赵静, 江在森, 牛安福, 等. 2015. 川滇菱形块体东边界断层闭锁程度与滑动方损动态特征研究[J]. 地球物理学报, 58(3): 872–885.
- 朱良玉, 蒋锋云. 2018. 利用 GPS 资料研究安宁河—则木河断裂震间期断层面滑动分布[J]. 地震研究, 41(3): 354–360.
- Allmann B P, Shearer P M. 2009. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 114(B1): 219–246.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada[J]. Bull Seism Soc Am, 82(5): 2014–2031.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 75(26): 4997–5009.
- Jiang G Y, Xu X W, Chen G H, et al. 2015. Geodetic imaging of potential seismogenic asperities on the Xianshuihe – Anninghe – Zemuhe fault system, Southwest China, with a new 3-D viscoelastic interseismic coupling model[J]. Journal of Geophysical Research, 120(3): 1855–1873.
- McKenzie D P. 1969. The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses[J]. Bull Seism Soc Am, 59(2): 591–601.
- Moya C A, Aguirre J, Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. Bull Seism Soc Am, 90(4): 977–992.
- Shen Z, Lü J, Wang M, et al. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110: B11409.
- Talwani P. 1988. The intersection model for intraplate earthquakes[J]. Seismological Research Letters, 59(4): 305–310.
- Talwani P. 1999. Fault geometry and earthquakes in continental interiors[J]. Tectonophysics, 305(1–3): 371–379.
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 2008. 12 May 2008  $M7.9$  Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems[J]. Geophys Res Lett, 35(17): L17305.
- Wang E C, Burchfiel B C, Royden L H, et al. 1998. Late cenozoic Xianshuihe – Xiaojiang, Red River, and Dali Fault systems of Southwestern Sichuan and Central Yunnan, China[J]. The Geological Society of America, 327: 1–108.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. Bull Seism Soc Am, 86(5): 1634–1641.
- Zoback M L. 1992. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project[J]. Journal of Geophysical Research, 97(B8): 11703–11728.

## Stress Distribution Characteristics of Faults Intersection in Anninghe – Zemuhe Fault Zone and Its Adjacent Area

WU Weiwei

(*Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610000, Sichuan, China*)

### Abstract

According to the characteristics of tectonic activity, we divided the Anninghe-Zemuhe fault zone and its adjacent areas into three sections, and analyzed the local stress field and seismicity characteristics in different fault intersection areas by using the fault plane solutions of multi-earthquakes and the focal parameter results of medium and small earthquakes. The results show that the faults in the northern section of the study area intersect show an “λ” shape, with high stress concentration, high frequency of seismicity, large magnitude, and high stress drops. In the middle section, the faults in Anninghe seismic gap show an “obtuse angle” intersection, with low frequency of seismicity and low stress drops. While the faults on the east side of the seismic gap show a “Y” shape intersection, with high frequency of small and medium earthquakes and middle stress drops. In the south section, faults intersect is in a “Y” shape, which do not have the structural conditions of high stress concentration. Although the seismic activity in this intersect area is high and the magnitudes of the earthquakes are large, the stress drops are generally in the middle. We obtained that the segmental difference in seismic activity and stress distribution in the study area is related to the form of interaction between faults, and the deformation inconsistency between cross faults has a great influence on local stress fields and seismic risk.

**Keywords:** Anninghe – Zemuhe fault zone; faults intersection; stress drop; seismic activity