

# 丽江—小金河断裂带现今闭锁程度 与地震危险性分析<sup>\*</sup>

李 宁, 朱良玉, 刘 雷

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 基于2009—2015年中国大陆GPS水平速度场数据, 采用DEFNODE负位错反演程序计算了丽江—小金河断裂带的断层闭锁程度和滑动亏损速率特征, 并结合小震精定位结果分析了该断裂带的强震危险性。结果表明, GPS水平观测值与模型值的拟合结果较好, 小震分布与闭锁程度结果存在一定的相关性, 丽江—小金河断裂的南段—中段南部(丽江—宁蒗)除最南端外基本完全闭锁, 断层的滑动亏损速率也相对较大, 该段落具有发生较大地震的潜在危险性; 而中段中北部—北段闭锁程度要弱得多, 尤其在断裂带的北段, 闭锁程度很弱, 除了南部有部分闭锁, 其余地方无强闭锁状态, 且在5 km左右深度处断裂基本由闭锁状态转化为蠕滑状态特征, 断层的滑动亏损速率也相应很小, 该段发生较大地震的可能性较小。

**关键词:** 丽江—小金河断裂; DEFNODE负位错反演; 断层闭锁; 滑动亏损速率; 小震活动

**中图分类号:** P315.725

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2018)02-0244-07

## 0 引言

丽江—小金河断裂带是川滇菱形块体内部的一条NE向活动构造带, 断裂全长360 km, 它将川滇菱形块体斜切为川西北和滇中2个次级块体, 是龙门山—锦屏山—玉龙雪山中新生代推覆构造带西南段基础上形成的一条活动断裂带(邓起东等, 2002; 向宏发等, 2002), 对川滇菱形块体区域地壳运动的作用至关重要, 从全新世至今一直具有较强的活动性(徐锡伟等, 2003; 季灵运等, 2015)。据资料记载, 丽江—小金河断裂带发生过多次6级以上地震, 最大地震为1976年盐源—宁蒗M6.7地震(李乐等, 2008)。近年来, 已有大量学者通过形变观测手段对该断裂带的活动情况进行了分析研究, 基本证实该断裂目前仍处于活动状态, 如Shen等(2005)利用GPS资料分析认为丽江—小金河断裂带左旋走滑速率为3 mm/a; 王阎昭等(2008)以GPS观测为约束, 利用最小二乘方法反演得到丽江—小金河断裂的分段活动结果: 北东段左旋走滑速率为 $(0.8 \pm 1.5)$  mm/a, 拉

张速率为 $(2.4 \pm 1.7)$  mm/a; 中段以左旋走滑为主, 速率为 $(5.4 \pm 1.2)$  mm/a; 南西段以挤压为主, 速率为 $(2.3 \pm 1.8)$  mm/a。另外, 水准和GPS观测垂直分量均表明现今丽江—小金河断裂带两侧地壳垂向运动存在较大差异(王庆良等, 2008; Liang *et al.*, 2013)。综上所述, 丽江—小金河断裂带现今仍在活动, 且发生在其南段的1976年盐源—宁蒗M6.7、6.4震群破裂区和1996年丽江M7.0地震破裂区之间存在50 km左右的破裂空区。综合构造规模、断层活动性与地震活动强度等方面, 认为丽江—小金河断裂带区域地质背景复杂、构造活动强烈。

地震的孕育和发生与断层活动密切相关, 断层强震危险性和紧迫性是地震中长期预测中的基础科学问题, 而大地形变测量在捕捉地震前兆异常、预测地震危险性方面起着非常重要的作用。目前, 通过借助已有形变资料, 如GPS、大面积水准等大地测量形变资料反演震间断层闭锁程度和滑动位移亏损情况已成为研究现今断层运动与孕震能力的一个重要手段。王阎昭等(2008)以川滇地区GPS速度场为约束, 依据研究区已知断

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-12-26.

**基金项目:** 国家自然科学基金—基于三维地壳形变研究黄河断裂灵武段现今活动状态(41604015)和中国地震局地震科技星火计划—基于InSAR的东昆仑断裂玛沁玛曲段地震危险性分析(XH17059)联合资助。

裂分布情况建立连接断层元模型, 用最小二乘法反演了该地区主要活动断层的现今错动速率; 张希等 (2014) 利用 2009—2011 年全国 GPS 水平运动速度场资料, 借助负位错反演研究了新疆、青藏块体东北缘、川滇、华北地区主要活动断裂能量积累闭锁段、闭锁深度、分区分段差异性及其与强震孕育 - 发生的可能关系; 赵静等 (2015) 利用 1999—2007 期和 2009—2013 期中国大陆 GPS 速度场数据, 采用 DEFNODE 负位错反演程序估算了川滇菱形块体东边界——鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂带在汶川地震前后的断层闭锁程度和滑动亏损空间分布动态变化特征; 申重阳和王琪 (2002) 利用川滇地区 1991—1999 年的高精度 GPS 观测处理结果, 采用稳健 - 贝叶斯最小二乘算法与多断裂位错模型, 分析研究了川滇菱形块体主要边界运动的定量模型。综上, 本文将基于 2009—2015 年中国大陆 GPS 速度形变场资料, 采用 DEFNODE 反演程序计算丽江—小金河断裂带的断层闭锁程度和滑动亏损速率, 分析该断裂不同段落的活动性。

## 1 反演方法介绍

自 McCaffrey (2002) 提出 DEFNODE 负位错反演程序以来, 该程序已被很多学者应用和研究。假定震间期块体内部点的运动为块体旋转、块体内部整体均匀应变及块体边界由于断层闭锁产生的滑动亏损而引起的弹性变形积累总和, 当块体内部不存在整体均匀应变时, 其理论公式如下:

$$V_i(X) = \sum_{b=1}^B H(X \in \Delta_b) [\mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\Omega}_b \times X] \cdot \mathbf{i} - \sum_{k=1}^F \sum_{n=1}^{N_k} \sum_{j=1}^2 \varphi_{nk} G_{ij}(X, X_{nk}) [\mathbf{h} \cdot \boldsymbol{\Omega}_f \times X_{nk}] \cdot \mathbf{j} \quad (1)$$

式中: 第一部分为块体整体运动速度; 第二部分为块体边界断裂闭锁而产生的同震亏损滑动速率, 各参数的定义参见相关文献 (McCaffrey, 2002; 赵静等, 2015)。

利用 GPS 水平速度场数据反演块体旋转、块体内部均匀应变和断层闭锁程度等参数的过程中, 参数拟合的不符值可由式 (2) 表示, 其中各参数含义参考相关文献 (McCaffrey, 2002; 赵静等, 2015):

$$\chi_n^2 = \left[ \sum_{i=1}^n (r_i / f \sigma_i)^2 \right] / \text{dof} \quad (2)$$

为得到使  $\chi_n^2$  达到最小的一组最佳参数值, 本反演程序使用网格搜索和模拟退火算法求解, 并且对每个块体内部是否存在整体均匀应变进行检验; 检验完成后, 通过不断改变  $f$  值大小进行逐步择优, 以寻求最满意的  $f$  值, 保证  $\chi_n^2$  最大程度接近于 1, 此时模型能够最佳地解释观测数据。

## 2 计算分析

本文在 GPS 数据处理时, 数据资料主要来自《中国地壳运动观测网络》和《中国构造环境监测网络》项目在研究地区观测的 GPS 连续站和流动站数据, 流动站点共进行了 2009、2011、2013、2015 年 4 期观测, 每期观测时采用 30 s 采样间隔, 连续观测 4 d, 每天 24 h。数据采集使用双差模式, 处理由 GAMIT/GLOBK 软件完成。首先由 GAMIT 获得 GPS 台站位置参数及其方差 - 协方差矩阵的单日松弛解。数据处理中考虑并消除了电离层、对流层、海洋潮汐、大气潮汐对台站的影响。单日解中包括测站坐标、极移、卫星轨道和对流层天顶延迟等参数的初值及方差 - 协方差矩阵。然后用 GLOBK 将区域站和全球 ITRF 站的所有单日松弛解组合在一起, 估算出区域站在 ITRF2008 参考框架下的速率及误差。反演前, 对方向、大小明显偏离区域运动背景的 GPS 测站进行剔除, 其中流动 GPS 测站水平方向平均误差小于 1 mm/a, 连续运行的 GPS 测站水平向平均误差小于 0.5 mm/a。

研究区域以丽江—小金河断裂带为中心, 包含川西北块体、滇中块体、华南块体 (图 1), 图中震源机制信息来自 GCMT 提供的 1976—2017 年的地震信息; GPS 速度场约束方面, 2009—2015 年有 188 个 GPS 测点参与反演。反演过程中, 沿丽江—小金河断裂带走向共有 7 条等深线, 深度依次为 0.1、5、10、15、20、25、30 km。断层结构设置如下: 丽江—小金河断裂每条等深线上有 22 个节点, 断层倾角为 70° (刘耀辉, 2016)。通过多次反演计算, GPS 水平速度场数据误差权重因子  $f=2.4$ ,  $\chi_n^2=1.0137$ , 得到丽江—小金河断裂带周边区域 GPS 速度场及其模拟结果 (图 2) 和断裂带闭锁程度的空间变化分布结果 (图 3)。

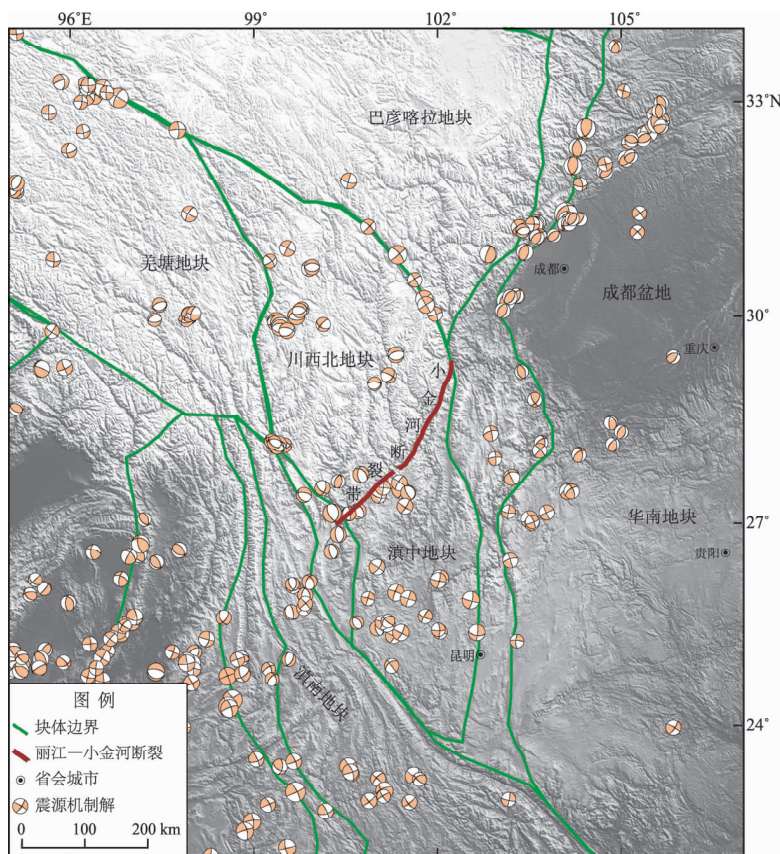


图1 川滇地区地质构造和震中空间分布图

Fig. 1 Tectonic setting and seismicity distribution map in the Sichuan - Yunnan region

从图2可知, 2009—2015年GPS水平观测值与模型值的剖面拟合结果较好, 而图3a显示: 丽江—小金河断裂带南段基本处于强闭锁状态, 闭锁比例达0.99, 闭锁深度约为25 km, 而其南段的最南端闭锁程度有所降低, 闭锁比例基本在0.77; 丽江—小金河断裂中段北部闭锁程度较弱, 闭锁深度在6~19 km, 其往南至中段的中北部, 0~5 km深度的闭锁比例为0.52, 6~30 km逐渐过渡为蠕滑状态, 中段其它位置闭锁较强; 小金河断裂北段的南端闭锁深度在4~15 km, 其它位置30 km深度以内基本无强闭锁状态。北段相对于中南段同一深度的闭锁程度要弱很多, 在5 km左右深度处断裂基本由闭锁状态转化为蠕滑状态特征。

断层的闭锁程度在一定程度上反映了断层应变积累的情况, 断层闭锁程度越强, 越容易产生应变积累, 反之亦然。而断层滑动亏损速率用来表示断层应变积累的速度大小, 其大小用断层长期滑动速率与表示断层闭锁程度的系数乘积得到。图3b为计算出的丽江—小金河断裂带滑动亏损速率, 结果显示, 断层滑动亏损速率与断层闭锁

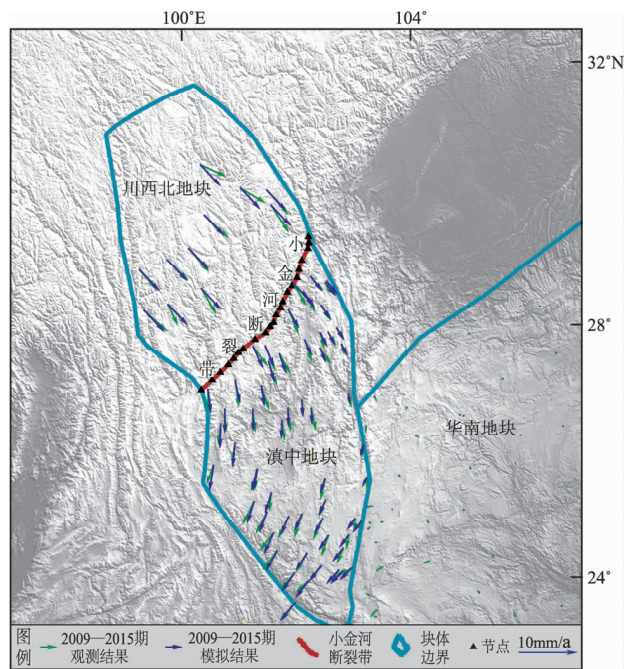


图2 丽江—小金河断裂带周边区域GPS速度场及其模拟结果

Fig. 2 The observation and simulation results of GPS velocity field around the Lijiang - Xiaojinhe fault zone and its surrounding areas



程度的分布是基本一致的, 丽江—小金河断裂南段南部在深度 5 ~ 25 km 处滑动亏损速率最大, 约为 6.5 mm/a, 25 km 以下深度逐渐降低为 2.0 mm/a; 往北到丽江—小金河断裂中段的中南部, 从地表到 25 km 深度处, 断层的滑动亏损速率较北段偏低, 约为 5.0 mm/a; 再往北至断裂中段

北部, 断层在同样深度处的滑动亏损速率越来越小, 并逐渐转变为蠕滑状态; 丽江—小金河断裂北段滑动亏损速率逐渐降低到近 0 mm/a, 基本无滑动亏损积累。可见, 丽江—小金河断层的中南段可能为地震危险段, 而其北段则基本处于蠕滑状态。

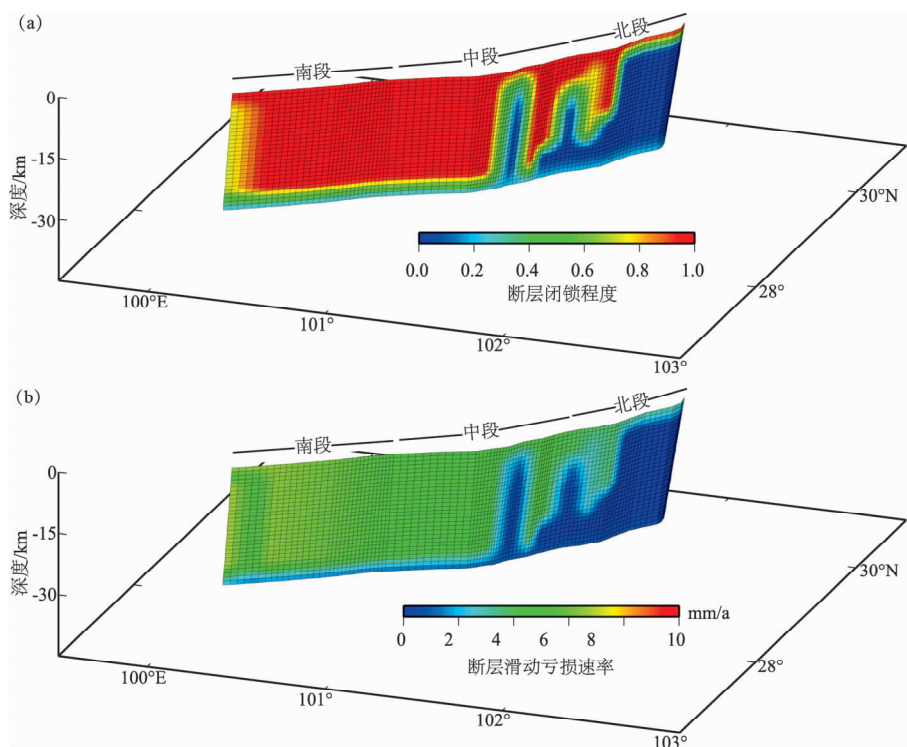


图3 2009—2015年丽江—小金河断裂带断层闭锁分布 (a) 以及断层滑动亏损分布 (b)

Fig. 3 Distribution of locking degree (a) and sliding loss (b) of the Lijiang - Xiaojinhe fault zone during 2009 and 2015

### 3 小震精定位结果分析

为研究丽江—小金河断裂带的小震活动性, 笔者收集了中国地震局地球物理研究所房立华研究员提供的小震精定位目录, 并选取了 1970—2012 年分布在丽江—小金河断裂两侧 20 km 内  $M \geq 1.0$  震源深度大于 1 km 的地震来分析。同时为了进一步了解该断裂带上小震分布的空间特征, 我们同样将其分为北段、中段、南段, 具体范围见图 4 中黑色虚线框。

首先, 从丽江—小金河断裂带的小震分布平面图 (图 4) 可知, 小震分布与断裂具有较好的一致性, 但在每一段的活动性是不同的, 在北段冕

宁县—石棉县小震分布最为密集, 中南段宁蒗彝族自治县—木里藏族自治县次之, 其它段落小震分布均较少。

其次绘制所选地震的震源深度剖面图 (图 5)。由图 5 可知, 在该断裂北段、中段和南段的小震活动性并不均匀, 但小震的震源深度都基本在 35 km 范围内。具体来说, 在丽江—小金河断裂带北段的北部, 小震活动最为密集, 震源深度主要分布在 10 ~ 27 km; 位于断裂中段南部的木里藏族自治县以南小震分布也稍多, 震源深度主要分布在 5 ~ 27 km; 位于断裂带南段北部的宁蒗彝族自治县以北的小震活动也相对密集, 震源深度主要分布在 5 ~ 32 km 范围内, 而在丽江—宁蒗段的强震空区段也存在明显的小震活动空区。

通过对丽江—小金河断裂带不同段落的小震分布情况的研究可知,该断裂北段、中段和南段的小震活动性并不一致,但小震的分布受断层很好地控制,丽江—宁蒗段的小震活动明显较弱,

可能意味着断层主要处于应力积累的状态;宁蒗—盐源段的小震活动稍强,与 1976 年盐源—宁蒗  $M_{6.7}$ 、6.4 震群可能有关;石棉段现今小震活动性最强,断层应力释放最为集中。

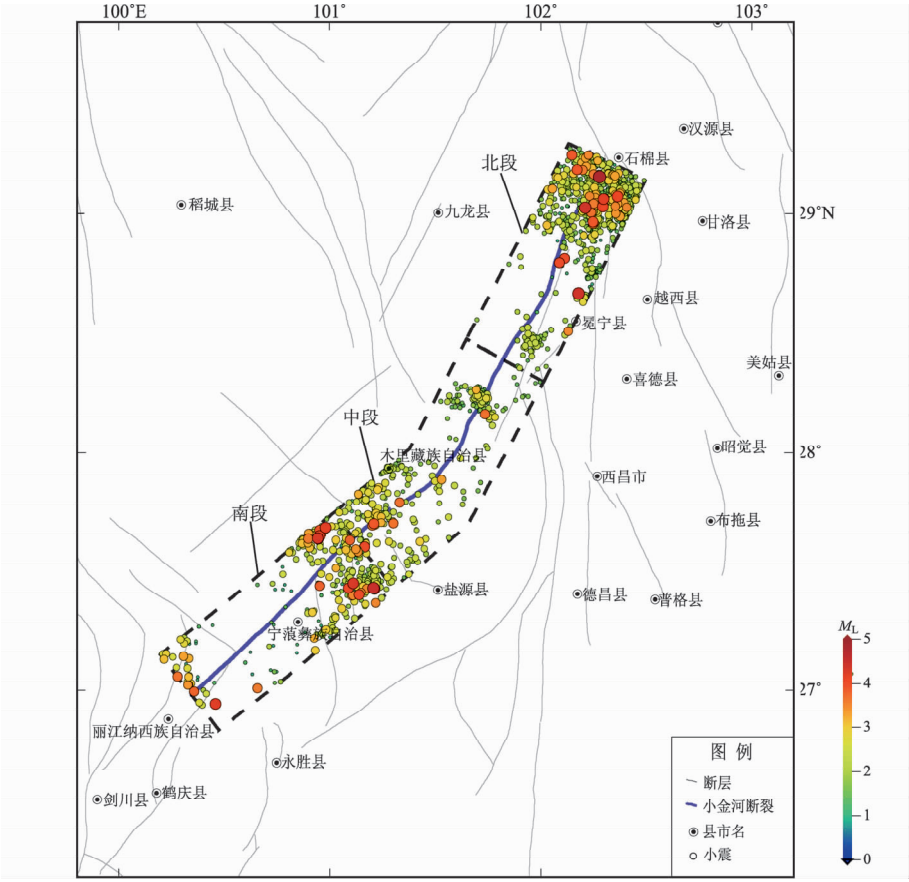


图 4 1970—2012 年丽江—小金河断裂带的小震分布平面图

Fig. 4 The distribution map of minor earthquakes around the Lijiang - Xiaojinhe fault zone during 1970 and 2012

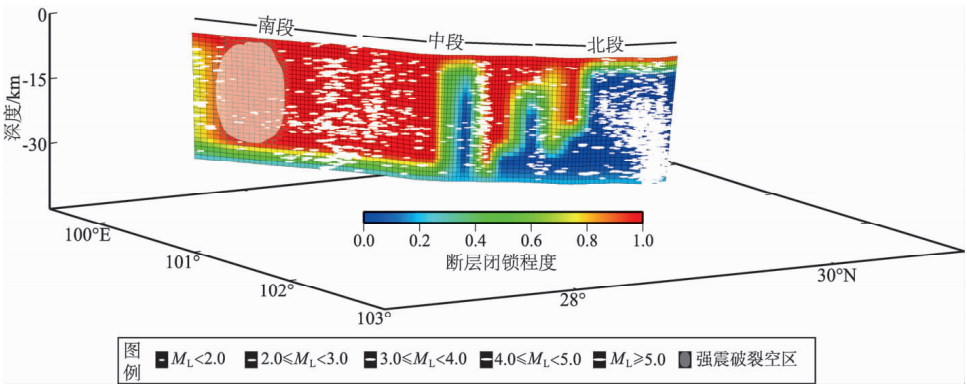


图 5 1970—2012 年丽江—小金河断裂带的小震分布剖面图

Fig. 5 The profile distribution map of minor earthquakes around the Lijiang - Xiaojinhe fault zone during 1970 and 2012

## 4 讨论与结论

目前利用 DEFNODE 负位错反演方法研究断层闭锁程度已在国外广泛应用, 而利用该方法对丽江—小金河断裂带断层的闭锁程度的相关研究程度还相对较低, 近几十年来, 丽江—小金河断裂仍在活动, 且发生在其南段的 1976 年盐源—宁蒗  $M_{6.7}$ 、6.4 震群破裂区和 1996 年丽江  $M_{7.0}$  地震破裂区之间存在明显的破裂空区 (图 5), 本文基于 2009—2015 年中国大陆 GPS 速度形变场资料, 采用 DEFNODE 反演程序计算分析了丽江—小金河断裂带的运动特征和不同段落的活动性, 得到以下结论:

(1) 地震实际上是在区域构造应力作用下, 应变在活动断裂带上不断积累并达到极限状态后而突发失稳破裂的结果 (Scholz, 1998; 张培震等, 2013)。而断层闭锁程度越强, 越容易产生应变积累, 当能量积累到一定程度, 则需要通过蠕滑运动或地震进行释放。若断层闭锁程度很高, 而且没有蠕滑运动, 那么断层的滑动亏损速率也就越大, 断层发生中强以上地震的可能性也相应增大。通过对比丽江—小金河断裂带的地震分布图 (图 4, 5) 与闭锁程度结果 (图 3), 发现二者存在一定程度的相关性。①在丽江—小金河断裂南段, 断层闭锁程度整体较高, 闭锁深度达到 25 km, 而该段的小震活动除了在北部宁蒗—盐源段稍密集外, 其余段落小震活动均较少, 而宁蒗—盐源段的小震活动密集则主要由 1976 年盐源—宁蒗  $M_{6.7}$ 、6.4 震群的余震影响所致, 所以其南段整体呈现明显的能量集中状态, 而能量释放却很少, 断层的闭锁程度也很高; ②丽江—小金河断裂中段南部的闭锁深度达 25 km, 小震活动相对较集中, 这同样是因为 1976 年盐源—宁蒗  $M_{6.7}$ 、6.4 震群的余震影响, 中段的中北部闭锁深度在 5 km 左右, 且闭锁强度较南部要弱, 而小震活动在中北部也有相对集中的态势, 说明中北部在一定程度上通过小震活动来释放能量; ③在丽江—小金河断裂北段南端闭锁深度在 4 ~ 15 km, 其它位置 30 km 深度以内基本无强闭锁状态, 而小震活动在南端小范围内也存在一定程度的集中, 但是活动较弱, 而中北部的小震活动则非常强烈。自

1976 年以来, 该段并未发生  $M_s \geq 6.0$  地震, 可见丽江—小金河断裂北段中北部大范围剧烈的小震活动基本缓解了该段的能量积累, 这与该段断层的闭锁程度结果也是一致的。

(2) 根据历史地震记载及有关学者的研究, 丽江—小金河断裂中段至南段全新世以来均发生过古地震, 其中中段至少发生过 3 次, 南段至少发生过 2 次 (李安等, 2016; 任俊杰等, 2015)。1970 年以来, 发生在丽江—小金河断裂的  $M_s \geq 6.0$  地震基本都发生在其中段南部—南段, 可见丽江—小金河断裂的南段相对于北段应变积累更快, 这与南段比北段滑动亏损速率大的结果也是相一致的。

(3) 2009—2015 年 GPS 水平观测值与模型值的剖面拟合结果较好, 反演计算结果也揭示了丽江—小金河断裂的南段—中段南部 (丽江—宁蒗) 的强震破裂空区段闭锁程度很高, 断层的滑动亏损速率也相对较大, 认为该段落具有发生较大地震的潜在危险性, 而中段中北部—北段闭锁程度要弱得多, 尤其北段闭锁程度很弱, 除了南部有部分闭锁, 其余地方无强闭锁状态, 且在 5 km 左右深度处断裂基本由闭锁状态转化为蠕滑状态特征, 断层的滑动亏损速率也相应很小, 该段发生较大地震的可能性较小。

## 参考文献:

- 邓起东, 张培震, 冉永康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: 地球科学, 32(12): 1020–1030.
- 季灵运, 刘立炜, 郝明. 2015. 利用 InSAR 技术研究滇西南镇康—永德地区现今地壳形变特征[J]. 地震研究, 38(1): 84–89.
- 李安, 张世民, 丁锐, 等. 2016. 丽江—小金河断裂南段全新世古地震研究[C]//地壳构造与地壳应力文集. 北京: 中国地震局地壳应力研究所, 1–9.
- 李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等. 2008. 利用“重复地震”估算丽江—宁蒗断裂带的深部滑动速率[J]. 科学通报, 53(23): 2925–2932.
- 刘耀辉. 2016. 基于 GPS 数据的滇中地区及邻区断裂带形变特征及地震危险性研究[D]. 昆明: 云南师范大学.
- 任俊杰, 张世民, 丁锐, 等. 2015. 丽江—小金河断裂晚第四纪滑动速率和古地震研究[C]//中国地球科学联合学术年会. 北京: 中国地球物理学学会, 534–535.
- 申重阳, 王琪. 2002. 川滇菱形块体主要边界运动模型的 GPS 数据反演分析[J]. 地球物理学报, 45(3): 352–361.
- 王庆良, 崔笃信, 王文萍, 等. 2008. 川西地区现今垂直地壳运动研究[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 598–610.
- 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.
- 向宏发,徐锡伟,虢顺民,等. 2002. 丽江—小金河断裂第四纪以来的左旋逆推运动及其构造地质意义——陆内活动地块横向构造的屏蔽作用[J]. 地震地质,24(2):188-198.
- 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.
- 张培震,邓启东,张竹琪,等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学,43(10):1607-1620.
- 张希,崔笃信,郝明,等. 2014. 全国主要构造区近期应变积累动态演化研究[J]. 地震工程学报,36(1):61-68.
- 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亏损动态特征研究[J]. 地球物理学报,58(3):872-885.
- Liang S M, Gan W J, Shen Z K, *et al.* 2013. Three-dimensional Velocity Field of Present-day Crustal Motion of the Tibetan Plateau Derived from GPS Measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 118(10):5722-5732.
- McCaffrey R. 2002. Crustal block rotations and plate coupling[J]//Stein S, Freymueller J T. Plate boundary zones: geodynamics Series. Washington DC:AGU:101-122.
- Scholz C H. 1998. Earthquakes and friction laws. Nature, 391(6662):37-42.
- Shen Z K, Lü J, Wang M. 2005. Contemporary Crustal Deformation around the Southeast Borderland of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 110(B11).

## Study on Present-day Locking Degree and Seismic Hazard of the Lijiang-Xiaojinhe Fault Zone

LI Ning, ZHU Liangyu, LIU Lei

(The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

### Abstract

Based on the GPS horizontal velocity field of 2009-2015 and the back-slip dislocation model of DEFNODE, we inverted for fault locking degree and fault slip deficit of the Lijiang-Xiaojinhe fault zone, and analyzed the potential seismic danger combining with the results of relocated small earthquakes. The results show that the fit results of GPS horizontal observation value and the simulated value are consistent, and there is also a certain correlation between the distribution of minor earthquakes and the degree of fault locking. The inversion results show that the southern part of the Lijiang-Xiaojinhe fault zone is basically completely locked except the southernmost, and the fault slip deficit rate is relatively large, which has the potential danger of a large earthquake. The middle section of the Lijiang-Xiaojinhe fault is different from the south to north, and the southern is locked seriously, which is also almost completely locked, and the degree of locking of the northern fault is much weaker. And for the northern part of the Lijiang-Xiaojinhe fault zone, the locking degree is very weak. Besides the partial locked in the south, there is no strong locking state in other parts, and the fracture is basically transformed from the locking state to the creep state at a 5 km depth, and the fault slip deficit rate is relatively small, while the possibility of larger earthquakes in this section is much smaller.

**Keywords:** Lijiang-Xiaojinhe fault zone; back-slip dislocation inversion of DEFNODE; fault locking degree; slip deficit rate; minor earthquakes