

邵延秀, 袁道阳, 梁明剑. 2015. 滇西南地区龙陵—澜沧断裂带地震危险性评价. 地震学报, 37(6): 1011–1023. doi: 10.11939/jass.2015.06.011.

Shao Y X, Yuan D Y, Liang M J. 2015. Seismic risk assessment of Longling-Lancang fault zone, southwestern Yunnan. *Acta Seismologica Sinica*, 37(6): 1011–1023. doi:10.11939/jass.2015.06.011.

滇西南地区龙陵—澜沧断裂带 地震危险性评价^{*}

邵延秀^{1,2),*} 袁道阳^{1,2)} 梁明剑³⁾

1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

2) 中国兰州 730000 兰州地球物理国家野外科学观测研究站

3) 中国成都 610041 四川省地震局

摘要 龙陵—澜沧新生地震断裂带位于地震活动强烈的滇西南地区, 该地区历史上曾发生多次 $M_s \geq 7.0$ 大地震, 已知的历史地震破裂几乎覆盖了整条断裂带. 本文首先对滇西南地区主要断裂的最新构造活动特征进行分析; 然后通过该区域地震活动 b 值图像的空间扫描计算, 圈定出高应力集中区, 并结合历史地震和现今小震的分布情况以及晚第四纪以来断裂的活动强度、古地震最晚离逝时间等定量参数, 综合分析龙陵—澜沧断裂带的未来大震危险性; 最后基于地震空区理论, 识别该断裂带存在的地震空区. 研究结果表明, 龙陵—澜沧断裂带内的龙陵、永德、沧源、澜沧及孟连断裂中东段在未来 10 年内均存在发生中强以上地震的危险性, 应引起关注.

关键词 龙陵—澜沧断裂带 b 值 地震空区 地震危险性

doi:10.11939/jass.2015.06.011 中图分类号: P315.75 文献标志码: A

Seismic risk assessment of Longling-Lancang fault zone, southwestern Yunnan

Shao Yanxiu^{1,2),*} Yuan Daoyang^{1,2)} Liang Mingjian³⁾

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2) Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, China

3) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract: Longling-Lancang fault zone in southwestern Yunnan is an area with strong seismicity. Multi strong earthquakes with $M_s \geq 7.0$ hit the area and nearly ruptured the whole fault zone during last 100 years. This paper summarized characteristics of recent tectonic activities and calculated b value of the studied area first of all, and then combined with the distribution of historical strong earthquakes and modern small ones, the fault activity since Late Quaternary and elapse time to analyze the potential seismic risk in the future syntheti-

* 基金项目 地震预测研究所基本科研业务专项(2012IESLZ08)和公益性行业科研专项“中国地震活断层探索——南北地震带中南段”(201108001)共同资助.

收稿日期 2015-03-11 收到初稿, 2015-07-20 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: shaoyx@geoidea.org

cally. Finally, based on the seismic gap theory, the seismic gaps in the fault zone are identified. The results show that the Longling, Yongde, Cangyuan, Lancang along the fault zone and middle-east segment of Menglian fault have a potential of moderate-strong earthquake occurrence in the future ten years.

Key words: Longling-Lancang fault zone; b value; seismic gap; seismic risk

引言

龙陵—澜沧断裂带是位于滇西南地区的一条第四纪新生地震断裂带(徐锡伟, 何昌荣, 1996; 虢顺民等, 1999), 是构成青藏高原东南缘滇缅活动地块的重要边界断裂. 该断裂带将滇缅活动地块分割为滇西和滇南两个次级活动地块(张培震等, 2003). 该断裂带地震活动非常活跃, 20 世纪以来先后发生了 1941 年 5 月耿马 $M_s7.0$ 、1941 年 12 月勐遮 $M_s7.0$ 、1950 年 2 月打洛 $M_s7.0$ 、1976 年 5 月龙陵 $M_s7.3$ 和 $M_s7.4$ 、1988 年 11 月耿马 $M_s7.2$ 和澜沧 $M_s7.6$ 等地震(俞维贤等, 1991; 周瑞琦等, 1998). 自 1988 年以来, 该断裂带总体处于大震平静期, 仅发生过 10 余次中强地震. 但是, 近几年该区域周围接连发生了 2008 年盈江 $M_s5.9$ 、2011 年盈江 $M_s5.8$ 、2014 年盈江 $M_s5.6$ 和 $M_s6.1$ 以及景谷 $M_s6.6$ 等中强地震, 地震活动呈明显增强趋势(房立华等, 2011; 邓菲, 刘杰, 2014; 赵旭等, 2014), 因此该断裂带未来 10 年时间尺度的地震危险性值得关注.

作为一条活动地块的边界断裂带, 龙陵—澜沧断裂带具有控制强震孕育和发生的构造条件(张培震等, 2003; 张国民等, 2005), 是研究大陆强震活动规律的天然场所(马宏生等, 2006), 也是未来地震危险性需要着重关注的地区. 石绍先等(1999)利用自相关函数方法, 发现澜沧—耿马地震带存在 47 年的大震复发周期; 虢顺民等(2002)根据历史地震、古地震、断裂几何形态等参数, 预测龙陵—澜沧断裂带存在 9 个地震危险区. 但由于受当时活动断裂定量参数和相关观测数据不完备和不确定性等因素的影响, 上述研究结果的可靠性较低, 亟需对其进行修订和补充.

随着近年来对龙陵—澜沧断裂带新活动性特征的深入研究(杜义等, 2012; 刘兴旺等, 2013; 方良好等, 2013, 2015a, b; 何文贵等, 2015), 研究人员获得了该断裂带较为可靠的几何展布、破裂分段、滑动速率、大震离逝时间等活动性参数.

本文将基于龙陵—澜沧断裂带的最新研究成果, 采用震级-频度关系(Gutenberg, Richter, 1945)中的 b 值图像扫描方法(Wiemer, Wyss, 1997), 计算 1988 年以来该断裂带上的 b 值空间分布图像, 圈划出高应力累积区; 并结合该地区构造活动特征以及历史大震和现今小震的时空分布等, 判别可能存在的地震空区、空段, 从而综合分析判定该断裂带上的地震危险区, 为确定未来大震重点监测区提供参考.

1 主要活动断裂的晚第四纪活动特征

龙陵—澜沧断裂带沿腾冲、龙陵、耿马、澜沧、勐海一线展布, 长约 500 km, 总体走向为 $NW20^\circ-25^\circ$. 该地震断裂带由多条不连续的活动断裂组成, 其中新生的 NNW 向右旋走滑断裂切割了先期的 NE 向左旋走滑断裂, 形成一组共轭剪切构造带, 运动性质为右旋拉张. 该地区主要断裂和地震分布如图 1 所示.

近年来研究人员对滇西南龙陵—澜沧断裂带的主干活动断裂展开了新的研究工作, 得

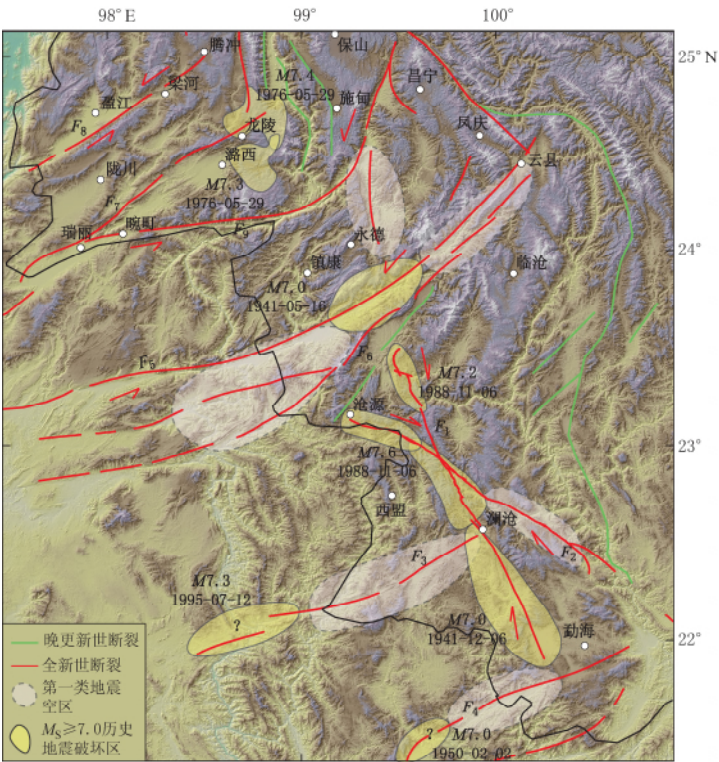


图 1 龙陵—澜沧断裂带地区的主要历史大震、断裂分布及第一类地震空区识别图
历史地震资料主要参考陈立德和赵维城(1979)、俞维贤等(1991)、周瑞琦等(1998)、M7 专项工作组(2012)及谢虹等(2014)等文献。F₁: 汗母坝—澜沧断裂; F₂: 黑河断裂; F₃: 孟连断裂; F₄: 打洛断裂; F₅: 南汀河断裂西支; F₆: 南汀河断裂东支; F₇: 龙陵—瑞丽断裂; F₈: 大盈江断裂; F₉: 畹町—安定断裂

Fig. 1 Distribution of historical strong earthquakes, tectonic settings and the first type of seismic gaps along Longling-Lancang fault zone
Historical earthquakes are referred to Chen and Zhao (1979), Yu *et al* (1991), Zhou *et al* (1998), Working Group of M7 (2012), and Xie *et al* (2014). F₁: Hanmuba-Lancang fault; F₂: Heihe fault; F₃: Menglian fault; F₄: Daluo fault; F₅: Western Nantinghe fault; F₆: Eastern Nantinghe fault; F₇: Longling-Ruili fault; F₈: Dayingjiang fault; F₉: Wanding-Anding fault

到了各断裂的基本特征和活动性参数，现分述如下：

汗母坝—澜沧断裂(F₁)。该断裂北起耿马一带，向南经澜沧延伸至西双版纳一带，长约 180 km，走向为 NNW。已有研究(王辉等，1991；俞维贤等，1991；周瑞琦等，1998)认为，该断裂最新活动性较为强烈，以右旋走滑为主，其晚第四纪以来的右旋走滑速率约为 5 mm/a(闻学泽，易桂喜，2003，刘兴旺等，2013)，其北段(汗母坝段)为 1988 年耿马 M_s7.2 地震的发震断裂，南段(澜沧段)为 1988 年澜沧 M_s7.6 地震的发震断裂之一。

黑河断裂(F₂)。该断裂西起沧源附近，向 SE 经过木戛、战马坡、三道河一线，东南端止于澜沧江断裂附近，全长约 168 km，以右旋走滑为主，走向为 280°—310°，倾向为 SW 或 NE，倾角为 60°—75°。方良好等(2013)认为，该断裂具有分段活动特征，可划分为西、中、东等 3 段，全新世以来其右旋走滑速率为 3.6—4.0 mm/a。其中，断裂西段保存了一条长约 12 km、距今(1400±30)—(1714±49) a 的古地震形变带，主要为低矮的断层陡坎和纹沟等，右旋 0.5—2 m(方良好等，2015a)；断裂中段为 1988 年澜沧 M_s7.6 地震的发震

断裂之一,部分地带仍有地震破裂带形迹;断裂东段在全新世晚期有过活动,最晚离逝时间介于距今 (1290 ± 30) a 与 (550 ± 30) a 之间(方良好等,2015b)。

孟连断裂(F_3)。该断裂从缅甸境内延伸至我国境内,穿过孟连,止于澜沧一带,长约 100 km,走向为 ENE。该断裂晚第四纪活动较强烈,以左旋走滑为主,兼具倾滑特征,1995 年该断裂在缅甸境内发生 $M_s 7.3$ 地震(图 1)。断层活动的地貌特征以线性断层谷地、断层沟槽和断层垭口地貌为主,冲沟和阶地的水平位移明显。最新古地震研究(何文贵等,2015)显示该断裂自晚第四纪以来活动较为强烈,距今 5000 年内在孟连附近发生过 3 次古地震事件,最近一次古地震事件发生在距今 (1860 ± 30) — (1090 ± 30) a。

打洛断裂(F_4)。该断裂在卫星影像上的线性特征非常清楚。与孟连断裂一样,其西南端也起始于缅甸境内,向 NE 方向延伸至景洪止,全长约 150 km(李志祥等,2008)。中国地壳运动观测网络的 GPS 数据显示,该断裂现今左旋走滑速率约为 (7.3 ± 2.6) mm/a(王阎昭等,2008)。1950 年在中缅边境处曾发生 $M 7.0$ 地震(图 1)。

南汀河断裂(F_5, F_6)。该断裂分为东、西两支,走向约为 $NE 40^\circ$,西支断裂较东支断裂活动强烈,且西支断裂是 1941 年耿马 $M_s 7.0$ 地震的发震断裂,在地表产生了长约 5—6 km、宽约 0.1—0.2 km 的地震破裂带。该断裂以左旋走滑为主,晚第四纪以来的走滑速率约为 2.7 mm/a(徐锡伟等,2003),而现今 GPS 速度场显示其左旋走滑速率约为 (4.3 ± 1.6) mm/a(王阎昭等,2008)。

龙陵—瑞丽断裂(F_7)。该断裂呈 SW—NE 向展布,倾向沿走向有变化,向 NE 方向经遮放、芒市盆地、龙陵盆地,止于镇安盆地,在我国境内延伸约 170 km(杜义等,2012)。该断裂具有多期活动,早期以挤压为主,现今以水平左旋运动为主,是一条继承性活动断裂。该断裂可能是 1976 年 $M_s 7.3$ 地震的发震断裂(陈立德,赵维城,1979)。黄学猛等(2010)和杜义等(2012)研究表明,该断裂全新世以来的水平走滑速率为 1.8—3.0 mm/a,垂直滑动速率为 0.5 mm/a,古地震探槽也揭示其全新世以来有过活动。

大盈江断裂(F_8)。该断裂位于中缅交界处,北自梁河以北,向 SW 方向至缅甸八莫附近,全长约 135 km。该断裂总体走向为 $NE 50^\circ$,倾向为 NW,倾角约为 70° 。该断裂控制盈江、梁河断陷盆地的发育,断裂沿线河流阶地被左旋位错,伴随着一系列断层崖、断层三角面和断层沟槽,以左旋走滑运动为主,晚第四纪以来的滑动速率为 1.2—2.5 mm/a(安晓文等,2009;常祖峰等,2011)。古地震探槽结果显示,该断裂晚更新世以来有过活动,大盈江段距今 2 千年左右和 7 千年左右发生过地震(谢冰晶,2014)。近年来曾发生多次中强地震,如 2008 年盈江 $M_s 5.9$,2011 年盈江 $M_s 5.8$,2014 年盈江 $M_s 5.6$ 和 $M_s 6.1$ 等地震(房立华等,2011;邓菲,刘杰,2014;赵旭等,2014)。

畹町断裂(F_9)。该断裂西起瑞丽盆地东北缘,空间上向东沿畹町河呈弧形展布,走向发生变化,全长约 170 km。常祖峰等(2012)根据被畹町断裂断错的地貌面和相关地貌变形特征发现,该断裂在晚更新世以来有过活动,并以左旋走滑为主,晚第四纪滑动速率为 1.7—2.2 mm/a。

2 方法与数据处理

2.1 b 值计算方法

相关实验和震例研究结果表明,震级-频度关系(Gutenberg, Richter, 1945)中的 b 值

与岩石应力积累水平成反比关系,是用于圈定高应力区的一个重要参数(Wiemer, Wyss, 1997; 易桂喜等, 2004a, b, 2005, 2006, 2008, 2013, 2014; 易桂喜, 闻学泽, 2007; Görgün, 2013), 而且活动构造区的应力水平又直接与未来的地震危险性息息相关. 因此, 利用 b 值评估活动构造区的地震危险性具有良好的理论基础和成功的实践经验.

$$\lg N = a - bM, \quad (1)$$

式中, M 为震级, N 为一定时间段内发生 $M \geq M_c$ (最小完整性震级) 的地震次数, a 和 b 为经验常数.

b 值计算通常有两种方法, 即最小二乘法 and 最大似然法 (Aki, 1965; Utsu, 1965; Bender, 1983; Woessner, Wiemer, 2005). 基于对比研究, 采用最大似然法得出的结果较最小二乘法更为可信 (Bender, 1983). 因此, 本文采用最大似然法计算研究区的 b 值, 其表达式为

$$b = \frac{\lg e}{\bar{M} - M_{\min}}, \quad (2)$$

式中: \bar{M} 为平均震级; $M_{\min} = M_c - 0.05$, M_c 为最小完整性震级.

为评估 b 值分析结果的可靠性, 须计算 b 值的误差. 此处采用 Shi 和 Bolt (1982) 给出的 b 值误差估计方法, 其表达式为

$$\delta b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N M_i - \bar{M}}{N(N-1)}}, \quad (3)$$

式中, M_i 为第 i 次地震的震级, N 为地震总数.

本文首先以 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间间隔对研究区进行网格划分, 以网格节点为圆心、20 km 为半径的圆进行地震样本扫描, 统计每个圆内的样本量并利用其进行 b 值计算. 若样本量不满足要求, 则将圆半径增加为 30 km, 再次进行样本扫描, 若样本量仍然达不到要求, 则此节点的 b 值无法计算. 然后对所有节点的 b 值数据进行空间插值, 绘成沿断裂空间分布的 b 值等值线图.

计算 b 值所需的地震样本量最低不应少于 50 个 (Wiemer, Wyss, 2002). 而最小完整性震级 M_c 是拟合震级-频度曲线的最小震级, 限于地震台站的监测能力, 震级-频度关系往往出现拐点现象, 而拐点通常被作为最小完整性震级. 在计算 b 值之前, 需对每个节点的最小完整性震级进行统计. 本文采用最大曲率法 (Wiemer, Wyss, 2000; Woessner, Wiemer, 2005) 统计最小完整性震级 M_c (邵延秀等, 2011).

2.2 地震空区理论

为了更合理地限定未来的地震危险区, 本文采用地震空区理论 (Inouye, 1965; Mogi, 1979) 识别大震空区. 地震空区分为两类: 第一类为地震带或大型活动构造带上已较长时间未发生大地震的段落, 积累了相对高的应力应变, 可能是未来大地震发生的危险段落; 第二类为大地震发生之前, 潜在发震区及其周围的小地震活动相对平静区域, 而其外围的地震活动可能会呈增加趋势 (Mogi, 1979). 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震、2010 年 4 月 14 日青海玉树 $M_s 7.1$ 地震和 2014 年 4 月 1 日的智利 $M_s 8.2$ 地震等均发生在地震空区中 (M7 专项工作组, 2012; Witze, 2014). Wen 等 (2008) 根据地震空区理论识别出川西地区安宁河第一类和第二类空区范围, 并将其作为中长期强震或大地震潜势的主要

判据.

2.3 小震数据选取

为避免 1988 年澜沧-耿马两次 $M_S \geq 7.0$ 地震及余震的影响, 本文计算中剔除了 1988 年 11 月前后一年内的地震目录, 另外还去除了 $M_S \geq 5.0$ 地震, 以消除高震级对 b 值计算的影响(易桂喜等, 2008). 因此, 本文计算 b 值所选取的地震资料为 1990 年 1 月—2010 年 12 月 $M_S < 5.0$ 的小震数据, 之后采用双差定位方法对地震进行重定位. 对于部分地震限于震相资料不足, 不能对其进行双差定位, 则采用原始目录进行 b 值计算. 图 2 给出了重定位小震的震中和第二类地震空区的分布.

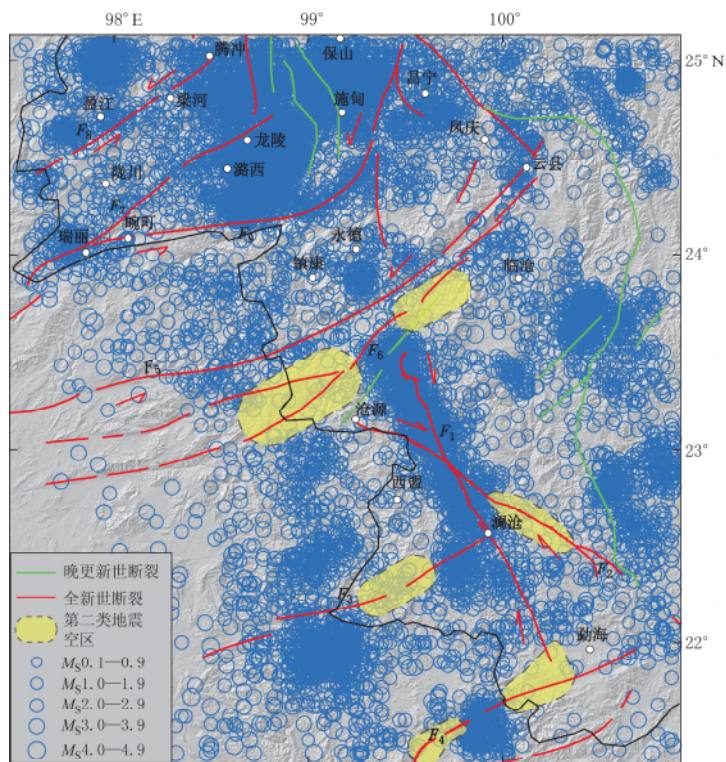


图 2 龙陵—澜沧地震带 1990—2010 年精定位小震($M_S < 5.0$)的震中分布
和第二类地震空区识别图(断裂名称同图 1)

Fig. 2 Relocation of small earthquakes ($M_S < 5.0$) along Longling-Lancang fault zone from 1990 to 2010, and the second type of seismic gaps. Faults name is as same as Fig. 1

3 结果

研究区的 b 值空间图像与地震空区分布具有较好的一致性. 通过对研究区地震目录的扫描计算, 得到研究区最小完整性震级 M_c 的分布, 如图 3a 所示. 可以看出, M_c 平均值为 2.3. 该值与苏有锦等(2003)给出的滇西南自 1982 年以来的最小完整性震级 2.5 存在 0.2 的差值, 这与所采用的方法不同有关, 且 0.2 的差值对 b 值结果影响不大. 研究区整体的 b 值平均值为 0.9, 误差为 0.09, 说明龙陵—澜沧断裂带整体活动水平较高. 另外根据地震空区的定义, 本文在滇西南地区识别出 6 处第一类地震空区和 6 处第二类地震空区, 分别如图 1 和图 2 所示.

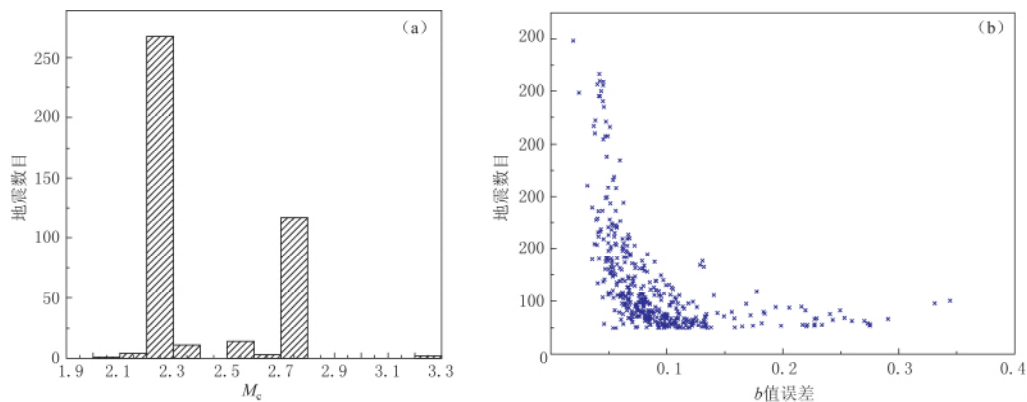


图3 龙陵—澜沧地震带最小完整性震级 M_c 统计(a)和 b 值误差与地震数目的关系(b)

Fig.3 (a) Statistic result of minimum completeness magnitude M_c along Longling-Lancang fault zone;
(b) The relationship between errors of b value and the number of earthquakes

图 4a 和 4b 分别给出了龙陵—澜沧地震带 b 值空间扫描结果和 b 值误差估计结果. 可以看出, 对部分地区而言, 越靠近 b 值图像的边缘, b 值误差越大. 虽然 b 值扫描过程中边缘区的地震次数会相对较少, 但上述现象说明 b 值误差并不与地震次数成直接的线性关系. 图 3b 的统计结果也反映了这一点, 即地震数目大于 100 时, b 值误差基本落在 0.1 以内.

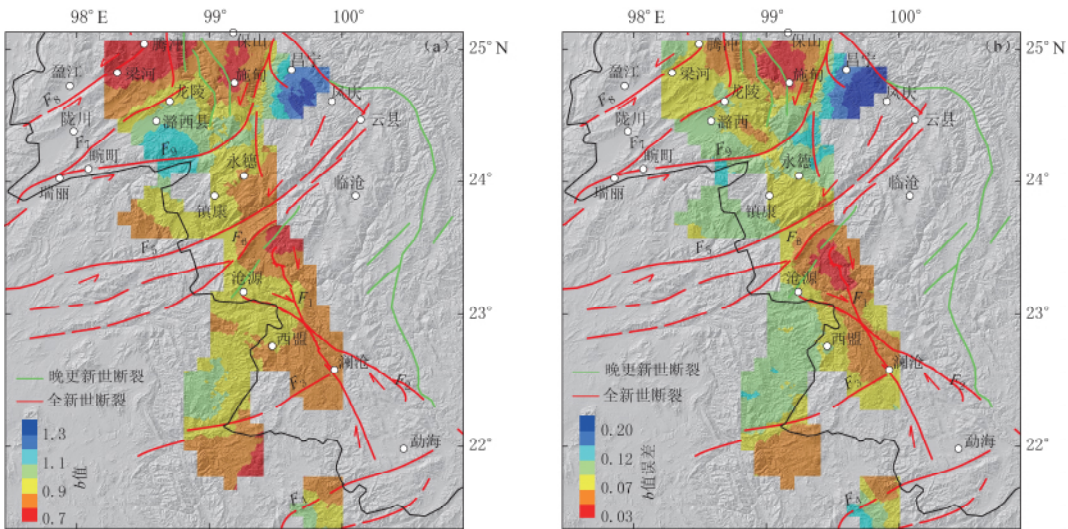


图4 龙陵—澜沧断裂带 b 值空间扫描结果(a)和 b 值误差估计结果(b)(断裂名称同图 1)

Fig. 4 b value (a) and its standard error estimation (b) along Longling-Lancang fault zone. Faults name is as same as Fig. 1

从图 4a 可以看出, 较低 b 值区($b=0.7-0.9$)主要集中在龙陵—瑞丽断裂和汗母坝—澜沧断裂上, 其中汗母坝—澜沧断裂与条带状分布的低 b 值和 b 值误差在走向上或空间位置上符合得很好, 表明该断裂的活动水平在空间上较为均匀.

龙陵—瑞丽断裂位于滇西地震区(闻学泽, 易桂喜, 2003), 其全新世以来的滑动速率(黄学猛等, 2010)及现今 GPS 速率(王阎昭等, 2008)研究表明, 该断裂全新世较为活跃,

且其最新活动导致了 1976 年龙陵两次 $M_s > 7.0$ 地震。杜义等(2012)通过震级-破裂长度关系和概率模型,估算龙陵—瑞丽断裂未来 50 年时间尺度上发震概率仅为 1.82%,发生 $M7.0$ 以上地震似乎不太可能,但该研究仅讨论了龙陵—瑞丽断裂,并未涉及其周围的其它断裂。实际上,龙陵—瑞丽断裂及其附近的断裂应作为一个断裂系统来看待,它们共同构成滇西地震区的发震构造。某一条断裂的活动性参数并不能完全满足对整个地震区未来地震危险性评估的要求,而且单个断裂的活动性参数并不完整,可靠性也不高。另外,自 1976 年龙陵两次 $M_s > 7.0$ 地震发生距今已近 40 年,低 b 值标示该地区应力已积累到一定程度。因此,该断裂带在未来 10 年时间尺度上很有可能会发生中强地震。

右旋走滑的汗母坝—澜沧断裂、黑河断裂与左旋走滑的南汀河断裂、孟连断裂和打洛断裂组成了滇西南地震区(闻学泽,易桂喜,2003)。自 1941 年以来,该地震区已发生 4 次 $M_s > 7.0$ 及 5 次 $M_s = 6.0 - 7.0$ 地震。近年来对该地震区内活动断裂的研究显示,晚第四纪以来汗母坝—澜沧断裂的走滑速率、全新世以来黑河断裂的滑动速率以及南汀河断裂和打洛断裂现今 GPS 速率均较高,约为 4—7 mm/a(闻学泽,易桂喜,2003;王阎昭等,2008;方良好等,2013)。这些研究结果均表明滇西南地震区的地震活动较为强烈,该地区广泛分布的低 b 值区(图 4)也印证了这一点。

如上所述,永德—澜沧带状 b 值区与汗母坝—澜沧断裂基本重合,且在不同走向断裂的交汇区,低 b 值范围增大。这似乎暗示着断裂交汇区更易于应力积累。值得注意的是,滇西南地震区内发生的 1941 年耿马 $M_s 7.0$ 地震和 1988 年澜沧两次 $M_s > 7.0$ 地震基本上都落在断裂交汇区范围内(图 1)。虢顺民等(2002)根据破裂分段的障碍物、历史地震和古地震资料及构造能释放值等分析也认为,永德地区和澜沧地区分别位于未来的大震和中强震危险区;郝明等(2013)根据近年来多期精密水准观测数据给出的地壳垂直运动速度场指出,永德地区正处于快速隆升状态,可能是未来强震危险区。本文给出的 b 值图像与上述两种研究结果基本一致。

对于孟连断裂,其西段在 1995 年曾发生 $M_s 7.3$ 地震,其东段与汗母坝—澜沧断裂相接,并受该断裂上曾发生的 1941 年和 1988 年强震的影响(图 1),在断裂中东部形成第一类大震空区; b 值图像(图 4a)也显示该断裂的中西部存在较低 b 值区,而中东部近年来的小震分布较为稀疏,其两侧却非常密集(图 2),意味着可能该区域正孕育着第二类大震空区。另外,在孟连附近的古地震研究表明,该断裂中东段最近一次地震事件距今 $(1860 \pm 30) - (1090 \pm 30)$ a,其离逝时间已接近大震复发间隔(何文贵等,2015)。上述证据均表明孟连断裂中东段存在着高应变积累区。

带状低 b 值区说明自 1988 年以来,在滇西南地震区,尤其是汗母坝—澜沧断裂,其应力积累已达到较高水平。刘方斌等(2015)根据黏弹性松弛效应(万永革等,2008)通过计算 1976 年龙陵两次 $M_s > 7.0$ 地震和 1988 年澜沧—耿马两次 $M_s > 7.0$ 地震的黏弹性库仑应力变化,给出了滇西南地区现今的库仑应力调整图像。由该图像可以看出,龙陵、镇安、瑞丽、永德—耿马、澜沧—勐海以及孟连西南地区的库仑应力均呈增加趋势,也就是说,1988 年以来,该地区的构造应力一直在不断地累积,这与本文 b 值图像(图 4)给出的结果基本一致。

综上,本文认为在未来 10 年尺度范围内,在龙陵—澜沧断裂带上,特别是在其与南汀河断裂、孟连断裂、黑河断裂交汇的永德、沧源、澜沧等地区,以及孟连断裂的中东段是未

来中强地震最可能发生的地段。

4 讨论与结论

本文首次通过 b 值图像扫描方法,对龙陵—澜沧断裂带上精定位的地震目录进行扫描计算,得出该断裂带上的 b 值空间分布图像。在此基础上,结合近年来该地区的地震地质资料,识别出多处地震空区,并与滇西南地区现今黏弹性库仑应力变化图像比对,认为龙陵、永德、沧源、澜沧以及孟连断裂的中东段发生中、强地震的可能性很大。

本文的研究结果虽与前人的相关研究结果具有一定差异,但是我们结合了现今的地震活动性、晚第四纪以来活动断裂的活动强度和古地震的最新研究成果,从不同时间尺度综合分析了龙陵—澜沧断裂带整体的未来危险水平,故更具有可信性。

由于本文所使用的精定位地震目录未能涵盖整个研究区,在部分地区分布较为稀疏,使得这些地区未能得到有效的 b 值,在一定程度上影响了地震危险性评价的准确性。在今后的进一步研究中,有必要搜集更多的地震数据,采用其它更为有效的方法,对该地区的地震危险性给出更为合理的评价。

感谢云南省地震局付虹研究员提供研究区的精定位地震目录,以及四川省地震局易桂喜研究员对本文提出宝贵的修改意见。

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): 193–197.
- An X W, Chang Z F, Shi J F. 2009. Investigation of Late Quaternary activity along the southwestern segment of the Dayingjiang fault[J]. *Journal of Seismological Research*, 32(2): 193–197 (in Chinese).
- 常祖峰,陈刚,余建强. 2011. 大盈江断裂晚更新世以来活动的地质证据[J]. 地震地质, 33(4): 877–888.
- Chang Z F, Chen G, Yu J Q. 2011. Geological evidence of activity along the Dayingjiang fault since Late Pleistocene[J]. *Seismology and Geology*, 33(4): 877–888 (in Chinese).
- 常祖峰,安晓文,张艳凤. 2012. 畹町断裂晚第四纪活动与水系构造变形[J]. 地震地质, 34(2): 228–239.
- Chang Z F, An X W, Zhang Y F. 2012. Study on Late-Quaternary activity and displacement of drainage systems along the Wanding fault[J]. *Seismology and Geology*, 34(2): 228–239 (in Chinese).
- 陈立德,赵维城. 1979. 1976 年龙陵地震[M]. 北京:地震出版社: 1–119.
- Chen L D, Zhao W C. 1979. *Longling Earthquake in 1976*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–119 (in Chinese).
- 邓菲,刘杰. 2014. 2008 年盈江地震序列的震源参数和震源机制相关系数研究[J]. 地震, 34(2): 22–34.
- Deng F, Liu J. 2014. Source parameters and correlation coefficients of focal mechanisms for the 2008 Yingjiang earthquake sequence[J]. *Earthquake*, 34(2): 22–34 (in Chinese).
- 杜义,张效亮,黄学猛,杜宇本,谢富仁. 2012. 龙陵—瑞丽断裂北段晚第四纪活动性特征及强震复发间隔[J]. 震灾防御技术, 7(3): 215–226.
- Du Y, Zhang X L, Huang X M, Du Y B, Xie F R. 2012. Strong earthquake occurrence interval along the northern segment of Longling-Ruili fault and its Late Quaternary activity[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 7(3): 215–226 (in Chinese).
- 房立华,吴建平,张天中,黄静,王长在,杨婷. 2011. 2011 年云南盈江 $M_s 5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. 地震学报, 33(2): 262–267.
- Fang L H, Wu J P, Zhang T Z, Huang J, Wang C Z, Yang T. 2011. Relocation of mainshock and aftershocks of the 2011 Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake in Yunnan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 33(2): 262–267 (in Chinese).
- 方良好,袁道阳,邵延秀,何文贵,刘兴旺,张波. 2013. 滇西南地区黑河断裂中西段晚第四纪构造活动特征[J]. 地震

- 工程学报, **35**(2): 342–353.
- Fang L H, Yuan D Y, Shao Y X, He W G, Liu X W, Zhang B. 2013. Characteristics of Late Quaternary tectonic activity of middle-western segment of Heihe fault in southwestern part of Yunnan Province[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(2): 342–353 (in Chinese).
- 方良好, 袁道阳, 邵延秀, 王爱国, 何文贵, 刘方斌. 2015a. 滇西南地区黑河断裂西段古地震形变带特征[J]. 震灾防御技术, **10**(2): 271–280.
- Fang L H, Yuan D Y, Shao Y X, Wang A G, He W G, Liu F B. 2015a. The features of earthquake surface rupture zone on the western segment of Heihe fault in southwestern Yunnan Province[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **10**(2): 271–280 (in Chinese).
- 方良好, 袁道阳, 邵延秀, 何文贵, 刘兴旺, 王爱国. 2015b. 云南西南部黑河断裂晚第四纪分段活动特征[J]. 地震研究, **38**(4): 558–567.
- Fang L H, Yuan D Y, Shao Y X, He W G, Liu X W, Wang A G. 2015b. Late Quaternary active characteristic of segmentation of the Heihe fault in southwest Yunnan[J]. *Journal of Seismological Research*, **38**(4): 558–567 (in Chinese).
- 虢顺民, 向宏发, 周瑞琦, 徐锡伟, 董兴权, 张晚霞. 1999. 滇西南龙陵—澜沧断裂带: 大陆地壳上一条新生的破裂带[J]. 科学通报, **44**(19): 2118–2121.
- Guo S M, Xiang H F, Zhou R Q, Xu X W, Dong X Q, Zhang W X. 1999. Longling-Lancang fault zone in southwest Yunnan, China: A newly-generated rupture zone in continental crust[J]. *Chinese Science Bulletin*, **45**(4): 376–379.
- 虢顺民, 徐锡伟, 向宏发, 周瑞琦, 董兴权, 张晚霞. 2002. 龙陵—澜沧新生断裂带地震破裂分段与地震预测研究[J]. 地震地质, **24**(2): 133–144.
- Guo S M, Xu X W, Xiang H F, Zhou R Q, Dong X Q, Zhang W X. 2002. Segmentation of earthquake rupture and earthquake prediction along the Longling-Lancang fault zone in the southwestern Yunnan Province[J]. *Seismology and Geology*, **24**(2): 133–144 (in Chinese).
- 郝明, 王庆良, 崔笃信, 秦姝兰. 2013. 滇西南龙陵—澜沧断裂带现今地壳垂直运动研究[J]. 地震研究, **36**(3): 281–285.
- Hao M, Wang Q L, Cui D X, Qin S L. 2013. Present crustal vertical movement of Longling-Lancang fault in southeast of Yunnan Province[J]. *Journal of Seismological Research*, **36**(3): 281–285 (in Chinese).
- 何文贵, 刘兴旺, 袁道阳. 2015. 滇西南地区孟连断裂晚第四纪新活动特征[J]. 地震工程学报(待发表).
- He W G, Liu X W, Yuan D Y. 2015. Late Quaternary activity of Menglian fault in southwestern Yunnan Province[J]. *China Earthquake Engineering Journal* (in press) (in Chinese).
- 黄学猛, 杜义, 舒赛兵, 谢富仁. 2010. 龙陵—瑞丽断裂(南支)北段晚第四纪活动性特征[J]. 地震地质, **32**(2): 222–232.
- Huang X M, Du Y, Shu S B, Xie F R. 2010. Study of the Late Quaternary slip rate along the northern segment on the south branch of Longling-Ruili fault[J]. *Seismology and Geology*, **32**(2): 222–232 (in Chinese).
- 李志祥, 毛玉平, 谢建斌, 肖海滨, 李茂仙. 2008. 云南景洪电站水库库区断层与地震危险性分析[J]. 地震研究, **31**(2): 174–179.
- Li Z X, Mao Y P, Xie J B, Xiao H B, Li M X. 2008. Faults in the reservoir area of Jinghong, Yunnan, hydropower station and the risk of reservoir-induced seismicity[J]. *Journal of Seismological Research*, **31**(2): 174–179 (in Chinese).
- 刘方斌, 袁道阳, 王爱国. 2015. 滇西南地区双震序列应力触发及地震活动性研究[J]. 中国地震(待发表).
- Liu F B, Yuan D Y, Wang A G. 2015. Comparative analysis on stress triggering of double earthquakes sequence and seismicity in southwest part of Yunnan Province[J]. *Earthquake Research in China* (in press) (in Chinese).
- 刘兴旺, 袁道阳, 张波, 方良好, 邵延秀. 2013. 滇西南地区汉毋坝—澜沧断裂晚第四纪构造活动的地质地貌证据[J]. 西北地震学报, **35**(S): 108–115.
- Liu X W, Yuan D Y, Zhang B, Fang L H, Shao Y X. 2013. Geological and geomorphological evidence of tectonic activity of Hanmuba-Lancang fault at southwestern Yunnan in Late Quaternary[J]. *Northwestern Seismological Journal*,

- 35(S): 108–115 (in Chinese).
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究[M]. 北京: 地震出版社: 36–236.
- Working Group of M7. 2012. *Study on the Mid-to-Long-Term Potential of Large Earthquakes on the Chinese Continent* [M]. Beijing: Seismological Press: 36–236 (in Chinese).
- 马宏生, 张国民, 刘杰, 王辉. 2006. 中国大陆活动地块边界带强震活动特征的研究[J]. 地震地质, 28(1): 48–60.
- Ma H S, Zhang G M, Liu J, Wang H. 2006. Research on the characteristics of large earthquake activity on the active tectonic boundaries in Chinese mainland[J]. *Seismology and Geology*, 28(1): 48–60 (in Chinese).
- 邵延秀, 袁道阳, 曹娜, 梁明剑. 2011. 北祁连山—河西走廊大震危险区预测[J]. 地震地质, 33(4): 865–876.
- Shao Y X, Yuan D Y, Cao N, Liang M J. 2011. Seismic risk analysis for northern Qilianshan-Hexi Corridor[J]. *Seismology and Geology*, 33(4): 865–876 (in Chinese).
- 石绍先, 曹刻, 李光泉, 黄泰春. 1999. 澜沧—耿马地震带大震 47 年复发周期及其科学意义[J]. 地震研究, 22(2): 116–121.
- Shi S X, Cao K, Li G Q, Huang T C. 1999. Recurrence period of 47 years and its scientific significance in Lancang-Gengma seismic fault[J]. *Journal of Seismological Research*, 22(2): 116–121.
- 苏有锦, 李永莉, 李忠华, 易桂喜, 刘丽芳. 2003. 川滇地区区域地震目录完整性最小震级分析[J]. 地震研究, 26(S1): 10–16.
- Su Y J, Li Y L, Li Z H, Yi G X, Liu L F. 2003. Analysis of minimum complete magnitude of earthquake catalog in Sichuan-Yunnan region[J]. *Journal of Seismological Research*, 26(S1): 10–16 (in Chinese).
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 盛书中, 徐晓枫. 2008. 唐山地震序列应力触发的粘弹性力学模型研究[J]. 地震学报, 30(6): 581–593.
- Wan Y G, Shen Z K, Zeng Y H, Sheng S Z, Xu X F. 2008. Study on visco-elastic stress triggering model of the 1976 Tangshan earthquake sequence[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 30(6): 581–593 (in Chinese).
- 王辉, 强祖基, 袁著忠, 王洋龙, 张华, 赵翔, 谷一山. 1991. 1988 年云南澜沧—耿马地震的烈度分布及地表破裂[J]. 地震学报, 13(3): 344–353.
- Wang H, Qiang Z J, Yuan Z Z, Wang Y L, Zhang H, Zhao X, Gu Y S. 1991. The distribution of seismic intensities and surface rupture in the Lancang-Gengma (Yunnan Province, China) earthquakes of November 6, 1988[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 13(3): 344–353 (in Chinese).
- 王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 王敏, 甘卫军, 乔学军, 孟国杰, 李铁明, 陶玮, 杨永林, 程佳, 李鹏. 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: D 辑, 38(5): 582–597.
- Wang Y Z, Wang E N, Shen Z K, Wang M, Gan W J, Qiao X J, Meng G J, Li T M, Tao W, Yang Y L, Cheng J, Li P. 2008. GPS-constrained inversion of present-day slip rates along major faults of the Sichuan-Yunnan region, China [J]. *Science in China: Series D*, 51(9): 1267–1283.
- 闻学泽, 易桂喜. 2003. 川滇地区地震活动统计单元的新划分[J]. 地震研究, 26(S1): 1–9.
- Wen X Z, Yi G X. 2003. Re-zoning of statistic units of seismicity in Sichuan-Yunnan region[J]. *Journal of Seismological Research*, 26(S1): 1–9 (in Chinese).
- 谢冰晶. 2014. 滇西南大盈江流域梁河、盈江盆地第四纪地层及活动构造特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 107–165.
- Xie B J. 2014. *Research of Quaternary Strata and Active Fault in Lianghe and Yingjiang Basin of Dayingjiang Valley, Southwest Yunnan*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 107–165 (in Chinese).
- 谢虹, 雷中生, 袁道阳, 苏琦. 2014. 1884 年云南宁洱 6 $\frac{3}{4}$ 级地震补充考证与发震构造讨论[J]. 地震工程学报, 36(3): 663–673.
- Xie H, Lei Z S, Yuan D Y, Su Q. 2014. Supplement textual research on historical data of the 1884 Ning'er earthquake in Yunnan Province and discussion on its seismogenic structure[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 36(3): 663–673 (in Chinese).
- 徐锡伟, 何昌荣. 1996. 新生断层的形成及其前震活动性研究[G]//国家地震局地质研究所编. 活动断裂研究(5). 北京: 地震出版社: 197–209.

- Xu X W, He C R. 1996. The research on formation and foreshock activity of the new generation faults[G]//Institute of Geology, China Earthquake Administration ed. *Research on Active Fault* (5). Beijing: Seismological Press: 197–209 (in Chinese).
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 马文涛, 宋方敏, 于贵华. 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: D 辑, **33**(S): 151–162.
- Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, Ma W T, Song F M, Yu G H. 2003. The newest way and force source of active block in Sichuan-Yunnan area[J]. *Science in China: Series D*, **33**(S): 151–162 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽, 范军, 王思维. 2004a. 由地震活动参数分析安宁河—则木河断裂带的现今活动习性 & 地震危险性[J]. 地震学报, **26**(3): 294–303.
- Yi G X, Wen X Z, Fan J, Wang S W. 2004a. Assessing current faulting behaviors and seismic risk of the Anninghe-Zemuhe fault zone from seismicity parameters[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(3): 294–303 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽, 徐锡伟. 2004b. 山西断陷带太原—临汾部分的强地震平均复发间隔与未来危险段落研究[J]. 地震学报, **26**(4): 387–395.
- Yi G X, Wen X Z, Xu X W. 2004b. Average recurrence intervals of strong earthquakes and potential risky segments along the Taiyuan-Linfen portion of the Shanxi graben system[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(4): 387–395 (in Chinese).
- 易桂喜, 范军, 闻学泽. 2005. 由现今地震活动分析鲜水河断裂带中南段活动习性与强震危险地段[J]. 地震, **25**(1): 58–66.
- Yi G X, Fan J, Wen X Z. 2005. Study on faulting behavior and fault-segments for potential strong earthquake risk along the central-southern segment of Xianshuihe fault zone based on current seismicity[J]. *Earthquake*, **25**(1): 58–66 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽, 王思维, 龙锋, 范军. 2006. 由地震活动参数分析龙门山—岷山断裂带的现今活动习性与强震危险性[J]. 中国地震, **22**(2): 117–125.
- Yi G X, Wen X Z, Wang S W, Long F, Fan J. 2006. Study on fault sliding behaviors and strong-earthquake risk of the Longmenshan-Minshan fault zones from current seismicity parameters[J]. *Earthquake Research in China*, **22**(2): 117–125 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽. 2007. 多地震活动性参数在断裂带现今活动习性与地震危险性评价中的应用与问题[J]. 地震地质, **29**(2): 254–271.
- Yi G X, Wen X Z. 2007. The application and limitation of multiple seismicity parameters to assessing current faulting behavior and seismic potential of active fault zones[J]. *Seismology and Geology*, **29**(2): 254–271 (in Chinese).
- 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.
- Yi G X, Wen X Z, Su Y J. 2008. Study on the potential strong-earthquake risk for the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan active faulted-block, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(6): 1719–1725 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 乔慧珍, 王思维, 宫悦. 2013. 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究[J]. 地球物理学报, **56**(4): 1112–1120.
- Yi G X, Wen X Z, Xin H, Qiao H Z, Wang S W, Gong Y. 2013. Stress state and major-earthquake risk on the southern segment of the Longmen Shan fault zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(4): 1112–1120 (in Chinese).
- 易桂喜, 付虹, 王思维, 闻学泽, 龙峰. 2014. 1988 年澜沧—耿马地震前震源区应力状态分析[J]. 地震研究, **37**(3): 332–338.
- Yi G X, Fu H, Wang S W, Wen X Z, Long F. 2014. Analysis on stress state in the seismogenic area before Lancang-Gengma M7.6 and M7.2 earthquakes in 1988[J]. *Journal of Seismological Research*, **37**(3): 332–338 (in Chinese).
- 俞维贤, 柴天俊, 侯学英. 1991. 澜沧 7.6 级地震形变带[J]. 地震地质, **13**(4): 343–352.
- Yu W X, Chai T J, Hou X Y. 1991. Deformation zone of $M=7.6$ Lancang earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **13**(4): 343–352 (in Chinese).
- 张国民, 马宏生, 王辉, 王新岭. 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. 地球物理学报, **48**(3): 602–610.

- Zhang G M, Ma H S, Wang H, Wang X L. 2005. Boundaries between active-tectonic blocks and strong earthquakes in the China mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(3): 602–610 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. *中国科学: D 辑*, **33**(S): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. Active tectonics blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China: Series D*, **46**(S2): 13–24.
- 赵旭, 黄志斌, 房立华. 2014. 2014 年云南盈江 $M_s6.1$ 地震震源机制研究[J]. *中国地震*, **30**(3): 462–473.
- Zhao X, Huang Z B, Fang L H. 2014. The study on focal mechanism of the $M_s6.1$ Yingjiang, Yunnan earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, **30**(3): 462–473 (in Chinese).
- 周瑞琦, 毓顺民, 何蔚. 1998. 龙陵—澜沧断裂带双震型强震活动破裂模型讨论[J]. *地震地质*, **20**(3): 261–268.
- Zhou R Q, Guo S M, He W. 1998. A study on the rupturing model of the double main shocks in the Longling-Lancang fault zone, Yunnan[J]. *Seismology and Geology*, **20**(3): 261–268 (in Chinese).
- Aki K. 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits[J]. *Bull Earthq Res*, **43**(2): 237–239.
- Bender B. 1983. Maximum likelihood estimation of b value for magnitude grouped data[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(3): 831–851.
- Görgün E. 2013. Analysis of the b -values before and after the 23 October 2011 $M_w7.2$ Van-Ercis, Turkey earthquake [J]. *Tectonophysics*, **603**: 213–221.
- Gutenberg B, Richter C F. 1945. Seismicity of the earth[J]. *Geolog Soc Am Bull*, **56**(6): 603–667.
- Inouye K. 1965. On the seismicity in the epicentral region and its neighborhood before the Niigata earthquake[J]. *Quarterly J Seism*, **29**: 31–36.
- Mogi K. 1979. Two kinds of seismic gaps[J]. *Pure Appl Geophys*, **117**(6): 1172–1186.
- Shi Y, Bolt B A. 1982. The standard error of the magnitude frequency b -value[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **72**(5): 1677–1687.
- Utsu T. 1965. A method for determining the value of b in formula $\log N = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes[J]. *Geophys Bull*, **13**: 99–103.
- Wen X Z, Fan J, Yi G X, Deng Y W, Long F. 2008. A seismic gap on the Anninghe fault in western Sichuan, China[J]. *Science in China: Series D*, **51**(10): 1375–1387.
- Wiemer S, Wyss M. 1997. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times[J]. *J Geophys Res*, **102**(B7): 15115–15128.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(4): 859–869.
- Wiemer S, Wyss M. 2002. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes[J]. *Adv Geophys*, **45**: 259–302.
- Witze A. 2014. Chile quake defies expectations[J]. *Nature*, **508**(7497): 440–441.
- Woessner J, Wiemer S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(2): 684–698.



李媛 中国地震局第一监测中心助理工程师, 2012年山东师范大学生物科学专业毕业, 获理学学士学位; 2015年中国地震局地震预测研究所地球物理学专业毕业, 获理学硕士学位, 现主要从事重力反演、地壳形变机制和跨断层形变方面的研究工作。



李昌琰 中国地震局地球物理研究所在读博士研究生, 2010年西安交通大学自动化专业毕业, 获工学学士学位; 2013年中国地震局地震研究所防灾减灾工程及防护工程专业毕业, 获工学硕士学位, 曾从事地震观测技术的研究工作, 现主要从事地震活动性和地震危险性方面的研究工作。



邵延秀 中国地震局兰州地震研究所助理研究员, 2007年兰州大学地质工程专业毕业, 获工学学士学位; 2010年中国地震局兰州地震研究所构造地质学专业毕业, 获理学硕士学位, 现主要从事活动构造方面的研究工作。



白泉 沈阳工业大学建筑与土木工程学院副教授, 1997年东北大学矿山建设(工业与民用建筑)专业毕业, 获工学学士学位; 2009年东北大学结构工程专业毕业, 获工学博士学位, 现主要从事随机荷载模拟及结构动力反应分析等方面的研究工作, 辽宁省土木建筑学会会员。

注: 何现启、梁建宏、冯丽丽、张红才的简介分别见本刊 Vol. 36, No. 3; Vol. 37, No. 1; Vol. 37, No. 4; Vol. 36, No. 4.