

张永庆, 谢富仁, Susanna J Gross. 利用 1996 年丽江地震序列反演震区应力状态. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1025~1032, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.019

Zhang Y Q, Xie F R, Susanna J Gross. Background stress state estimated from 1996 Lijiang earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(4): 1025~1032, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.019

利用 1996 年丽江地震序列反演震区应力状态

张永庆^{1,2}, 谢富仁¹, Susanna J. Gross³

1 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2 中国地震局地质研究所, 北京 100029

3 Cooperative Institute for Research in the Environmental Sciences, University of Colorado,
Boulder, Colorado 80309, USA

摘 要 本文以 1996 年丽江 $M_s 7.0$ 地震为例, 以地震目录和强震震源模型为输入参数, 将力学计算与统计分析相结合, 反演计算了 1986~1996 年间丽江震区 $2.5^\circ \times 3.0^\circ$ 空间范围内的地壳应力状态. 结果表明, 丽江地区应力场最大主应力为近南北向, 方位角为 355° , 最小主应力方位角为 241° , 二者倾角为近水平, 应力形因子为 0.398, 最大主应力大小约为 53 MPa, 远小于完整岩石的强度. 该方法可获得地壳深部绝对应力大小、有效摩擦系数, 反演获得的震区地壳深部应力状态的方向性特征与震源机制解结果基本一致; 该研究表明地震活动的空间分布可以为我们提供有关强震孕震的地壳深部应力状态信息. 这些结果对了解震区应力场具有理论上和实践上的意义.

关键词 丽江地震, 地震序列, 反演, 震区, 构造应力状态

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.019

中图分类号 P541

收稿日期 2008-05-20, 2009-03-24 收修定稿

Background stress state estimated from 1996 Lijiang earthquake sequence

ZHANG Yong-Qing^{1,2}, XIE Fu-Ren¹, Susanna J. Gross³

1 Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2 Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

3 Cooperative Institute for Research in the Environmental Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309, USA

Abstract Estimates of the tectonic stress state including direction and magnitude of principal stress are derived from the regional seismicity before and after 1996, $M_s 7.0$ Lijiang earthquake. This technique was originally applied to the Landers aftershock sequence (Gross and Kisslinger, 1997). Two kinds of input include a combined catalogue of events before and after the Lijiang earthquake, and a source model derived from the inversion of body wave. The stress field in source region was calculated using a 3-D dislocation model, and the best stress state is statistically determined by evaluating the relativity between stress change and seismicity change. The result shows that the azimuth of maximum principal stress in 10 km depth is 355 degree, and the magnitude of maximum principal stress is 53MPa, which is much smaller than the value estimated from the intact rock at that depth. Inversions for the best fitting background stress state are consistent with focal mechanism solution (with a 12 degree difference). This study shows that the spatial distribution of seismicity can present stress state information of source area. Although the estimations of the magnitude of background stress, gradient of stress with

基金项目 中国地震局地壳应力研究所基本科研专项(ZDJ2007-10)和国家科技支撑计划(2006BAC13B01-0303)资助.

作者简介 张永庆, 男, 1972 年生, 助理研究员, 中国地震局地质研究所在读博士研究生. 现从事构造应力场和地震危险性研究工作.
E-mail: whyzyq@yahoo.com.cn

depth and effective coefficient of friction are quite uncertain, and need further research to confirm, the result provides the dynamic information of stress loading on the faults, which is useful for the further research on stress environment of seismogenic area.

Keywords Lijiang earthquake, Earthquake sequence, Inversion, Source area, Tectonic stress state

1 引言

构造应力是我们赖以研究大地震发生规律的重要依据之一,目前我们获取地壳应力信息的主要途径有震源机制解分析^[1~5]、活动构造分析^[6~9]、原地应力测量^[10]等三种方法.震源机制反映了地壳应力与构造环境的综合效应,其参数主要反映了地壳深部应力信息:如主应力方向和中等主应力相对大小,不能获得绝对应力大小;活动构造应力分析则提供了一定空间范围和时间阶段内地壳上部造成岩石脆性变形的构造应力作用特征,可获得应力状态参数中的主应力的方向和应力形因子;原地应力测量获得的主要是地壳浅部的地应力状态(有大小和方向).至于地壳深部的应力量值的获取,人们一般通过浅部的应力测量结果根据某种函数关系来推测^[11],或者通过大陆或海洋深钻计划所得数据来获得^[12,13].但这些方法也存在着理论上的困难或投资巨大等因素的约束,不能大范围地使用.因此,地壳应力状态、尤其是地壳深部应力量值的获取仍是一个亟待解决的科学问题.

近年来,一些学者从应力场主应力方向在地震前后的变化和应力变化这个角度出发探索应力量值的估计方法.万永革等^[14]根据走滑大地震大量前震和余震的震源机制求得的应力方向变化和地震应力降,给出了在二维应力状态下构造偏应力量值的解析表达式,依此方法得到了 Landers 地震的 Homestead Valley 震源破裂处的构造偏应力量值;Wesson and Boyd^[15]根据主应力方向及与地震相关的应力变化提出了确定绝对偏应力张量的新方法,并采用该方法得到了 2002 年 Denali 地震前后空间上平均的绝对偏应力张量.上面这些方法无疑给应力量值的研究提供了新的思路.

前人的研究^[16~19]已经表明,大地震产生的破裂应力变化在时间和空间上对后续地震的发生有着较为显著的影响.这种影响体现在大震应力变化与后续地震数量的对应关系以及应力变化与地震活动变化的空间相关性上. Dieterich^[20]从理论上分析了应

力变化、地震数量和构造应力加载之间的内在联系.对于后者,则有许多研究支持表明“应力影响地震活动”理论的合理性.例如,美国南加州 1812~1995 年间中强地震产生的积累破裂应力变化图像显示^[19],95%的 $M \geq 6$ 地震发生在破裂应力增加区;对有仪器记录的 1932~1995 年时段内地震发生和破裂应力变化的研究表明,85%的 $M \geq 5$ 地震发生在应力增加区,Marsan^[21]的研究表明小地震对地壳应力的重新分布也具有同样不可忽视的影响;Reasenber and Simpson^[22]和 King et al.^[23]以及万永革等^[17]通过比较库仑破裂应力变化图和地震活动变化图发现,强震的余震活动和对应的应力变化在空间上的分布表现出了较强的相关性:主震之后应力增加的地方余震数量比较大,而应力减小的地方余震数量则要少得多.另外,区域地震活动和余震活动在许多方面,尤其是它们的分布图像特征方面就有很多的相似性,背景地震活动较为强烈的地方余震也较多^[24],而且余震分布区范围相对稳定^[25],在主震发生一定的时间后,余震区地震活动将逐渐恢复到背景地震活动的水平,地震断层周围二者的空间分布图像的相似程度将越来越高.这种相似性表明除了有构造约束以外^[26],力学背景约束也是控制地震活动分布图像的一个极其重要的因素.因此,我们可以通过应力-地震的相互关系来研究其背后地壳深部的力学特征,籍此分析大震孕育力学机制.

基于上述认识,根据应力变化与地震活动的相关性,Gross and Kisslinger^[27]提出了根据地震位置信息获取震区应力状态信息的方法,并以 Landers 地震为例^[28],以该区域地震目录和余震序列以及强震地震过程数据为输入,反演计算了 1934~1994 年间 Landers 地区的构造应力状态,获得了该地区地壳深部应力状态的 8 个参量,包括最大、最小主应力的大小和方向、应力形因子、有效摩擦系数、中等主应力和最小主应力大小之比,并根据应力变化和地震活动性的相关性计算了区域应力累积速率.反演结果分析表明,该方法反演获得的应力场方向性参数以及应力形因子与震源机制解方法所得结果具有很好的一致性,主应力大小的绝对值和应力累计速

率等虽然有不不确定性,但为分析区域力学环境提供了可供借鉴的参数。

1996 年 2 月 3 日在云南丽江发生 $M_s 7.0$ 地震,许多研究者针对这次地震进行了大量深入的研究,探讨了其发生的构造背景和应力环境^[29,30]. 本文将在上述研究的基础上,以丽江地震前后 1996~1999 年间的地震序列和丽江地震震源参数为输入数据,反演确定丽江震区的应力状态,分析参数的合理性,并对主震应力变化对丽江及周边地区近年来地震活动的影响进行了分析。

2 方 法

根据地震目录和强震震源参数反演震区应力状态的方法是由 Gross^[27] 发展起来的,其基本思路是:以地震目录和强震震源几何学与运动学参数为基础数据,背景地震活动和余震活动用来对应力场进行采样,采用三维完全弹性各向同性半空间应力模型计算主震前后每个地震震源处的破裂应力变化,然后用统计学方法对震源处破裂应力变化与地震活动性空间变化的空间相关性进行检验,以寻找一个背景应力状态模型,使得破裂应力变化的空间分布图像与地震活动图像的相似程度最高. 该法实质上是确定一个应力状态模型使得余震震中位于最可能出现破裂应力增加的地方,同时,破裂应力正变化最大的地方地震最多。

2.1 应力模型

应力模型用来根据输入参数计算破裂应力变化. 该模型计算的地震应力场类似于 Okada^[31] 程序计算的结果,二者计算的原理相同. 地震断层是通过分布在断层面上的大量点源双力偶来模拟的,具体点源双力偶的数量因震源模型的不同而会有差别. 破裂应力可通过式(1)计算(推导过程见文献[32]附录),该式与我们常见的库仑应力的最大区别在于,在确定优势断层面上的破裂函数的时候考虑了倾向滑动:

$$\sigma_F = \sqrt{\mu'^2 + 1}(\sigma_1 - \sigma_3)/2 - \mu'(\sigma_1 + \sigma_3)/2, \quad (1)$$

其中 μ' 是有效摩擦系数,它包含了孔隙压力的影响,通常写为

$$\mu' = \mu(1 - B), \quad (2)$$

其中 B 是 Skempton 系数,它是一个与孔隙压力、应力历史、断层几何参数和闭合情况有关的参数。

主震前后每个地震(背景地震和余震)震源处的破裂应力的变化 $\Delta\sigma_F$ 可通过下式计算:

$$\Delta\sigma_F = \sigma_F^{\text{total}} - \sigma_F^{\text{background}}, \quad (3)$$

其含义是叠加了地震应力场的构造应力场(σ_F^{total})与未叠加地震应力场($\sigma_F^{\text{background}}$)的构造应力场的破裂应力之差。

2.2 统计分析方法

为了量化分析破裂应力变化与地震活动变化二者空间分布图像的相似程度,我们利用 t 统计来比较各个应力模型, t 统计值采用下式计算:

$$t = \frac{\overline{\Delta\sigma_F^{\text{before}}} - \overline{\Delta\sigma_F^{\text{after}}}}{\sqrt{s_{\text{before}}^2/N_{\text{before}} + s_{\text{after}}^2/N_{\text{after}}}}, \quad (4)$$

其中 s 为一组 $\Delta\sigma_F$ 值的标准偏差, N 为该组数据的地震事件的个数, $\overline{\Delta\sigma_F^{\text{before}}}$ 是背景地震事件震源处破裂应力变化量的平均值, $\overline{\Delta\sigma_F^{\text{after}}}$ 为余震事件震源处破裂应力变化的平均值. 由于破裂应力的大小与计算点和主震震源的距离有关,为了平衡余震活动区域不同部分对反演结果的影响,余震活动图像以最后一次主震的震源为中心分为数个同轴壳体(半径差为 20 km,为等差数列). 统计每个同轴壳体上的 t_i ,然后再将各个同轴壳体上的 t_i 相加, $|\sum_{i=1}^n t_i|$ 越大表明应力变化和地震活动空间分布的一致性越好,应力变化与地震活动之间的显著性和相关程度越高,从而应力状态模型也越接近理想模型。

综合上面的叙述,可用图 1 说明应力场反演方法的流程。

应力状态模型参数的比较和筛选是在计算 $|\sum_{i=1}^n t_i|$ 、逐步缩小选择参数范围、逼近最大 $|\sum t_i|$ 的

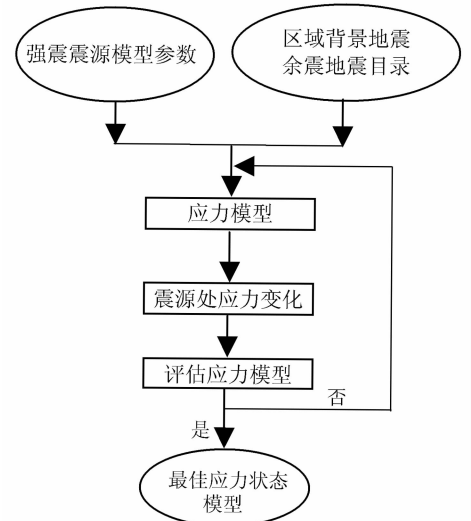


图 1 利用地震目录和震源参数反演构造应力场的流程图
Fig. 1 Flowchart illustrated model parameters and analysis procedures involved in the stress state modeling

过程中进行的. 为了减少反演计算的时间, 在正式反演进行前首先进行模型参数预采样, 对主应力大小(值的范围 1 MPa~1 GPa), 主应力方向(从 $-120^\circ \sim 120^\circ$), 摩擦系数(从 0~1)等参数赋初值后参加初步反演计算, 首先确定与最佳模型相差不太大的约 1000 个应力状态模型, 接着在这 1000 个模型的基础上进行最佳模型的精细筛选. 确定最佳应力状态模型的条件是在对地震活动和应力变化的显著性检验中 $|\Sigma t|$ 最高. 至于反演结果的稳定性, 我们可以通过多次反演计算, 然后对这些反演结果进行统计检验.

3 震区构造特征

丽江 $M_s 7.0$ 级地震区位于青藏高原隆起的东南隅, 红河断裂和金沙江断裂东侧, 丽江—剑川断裂以北的三角形块体内, 三角形的三条边是该区域内的主要三条地震构造带, 它们是近南北向的龙幡—乔后断裂, 北西向的中甸—永胜断裂, 北东向的剑川—丽江断裂^[33,34]. 这三条大断裂历史上发生过多次强烈地震, 是控制该地区地震活动构造的主要断裂带(图 2). 在三角形区域内, 共生发育了许多大大小小纵横交错的次生断裂带, 其中近南北向的玉龙雪山山前断裂是规模较大的断裂带, 丽江主震及余震绝大多数就分布在这条断裂带上.

4 数据

4.1 地震目录

地震目录选取了 1986~1999 年, 以 1996 年丽江地震震中为中心 $2.5^\circ \times 3.0^\circ$ 范围内的地震事件. 其中包括 1986 年 1 月 1 日到 1996 年 2 月 3 日丽江地震前的 54142 个地震, 我们称之为背景地震(Background Earthquakes), 此目录对余震事件未作删除, 震级范围 $M \geq 1.5$, 以及 1996-2-3~1999-12-31 之间的 22135 个余震, 震级范围 $M \geq 1.5$. 为了提高反演可靠性, 删除了一些定位精度在 2 以下的数据, 合并了重新定位后的数据(朱艾澜, 2005)^[35], 最后的地震目录总数为 76277.

4.2 震源参数

震源模型参数是反演中一项重要的输入, 主要由断层面上滑动量的分布、震源机制解和地震断层的运动学特征三者确定. 但对丽江地震来说, 较详细

的参数, 如断层面上滑动量分布已无法获得, 具体的震源参数只能从文献中推断.

苏有锦等^[36]、刘祖荫等^[37]的研究结果表明, 丽江地震的破裂主要由两个次级破裂过程构成, 初始破裂点(27.3°N , 100.217°E)开始沿 NWW 方向破裂, 6.0 s 后从转折点(27.19°N , 100.31°E)以近南北方向开始向南破裂, 终止点为 6.0 级余震的震中(26.97°N , 100.28°E), 这反映的是一个比较复杂的力学过程. 许力生等^[38]和徐扬^[39]的体波反演结果也与此类似.

根据上述研究结果, 参考震源机制解, 确定了丽江地震的两次破裂过程的基本参数, 经过必要的简化, 将震源模拟成两段断层面: 一个走向 157° , 倾向 SWW, 倾角 48° (长约 15 km) 以及走向 185° , 倾向 NWW, 倾角 48° , 长约 25 km, 深 10 km, 总长约 40 km, 宽 9~13 km 的矩形面, 位错量为 50 cm, 滑动角为 -102° . 图 2 中的阴影区为这个组合的断层破裂面地表投影.

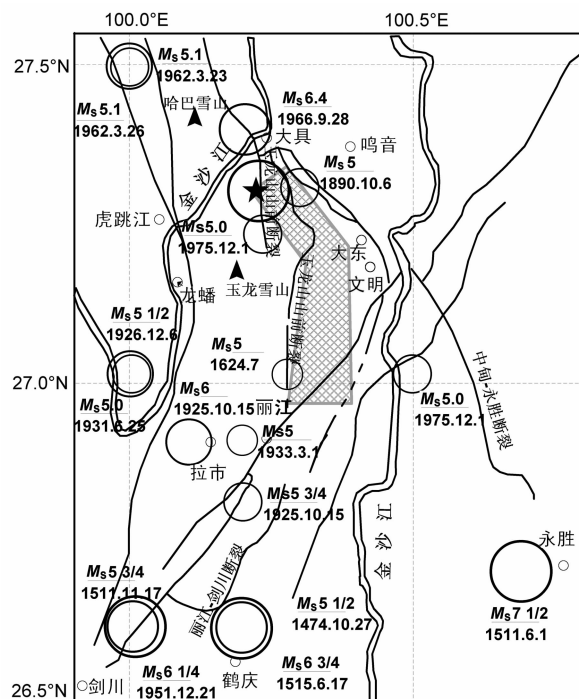


图 2 丽江地震区域地震构造和历史地震
灰色网格状区域为本研究丽江地震断层破裂面的地表投影, 五角星代表丽江地震震中.

Fig. 2 Seismotectonic and historical earthquakes of Lijiang and adjacent area
Region with grey grid pattern represents the surface projection of Lijiang earthquake rupture plane; star refers to the focus of Lijiang earthquake.

5 计算结果

5.1 应力状态

通过对 1000 个应力状态模型的计算,比较分析了各个应力模型参数下的 Σt 值,确定了该值最大 ($|-48.9|$) 的一组应力状态参数值,也就是最优化结果,如表 1. 根据地震目录反演的丽江地区的背景应力状态和有效摩擦系数,震源机制结果源自崔效峰^[1]的结果.

其中方位角的定义是以 N 顺时针旋转为正,逆时针旋转为负,倾伏角向下为正. 于是 σ_1 的方位角为 354.7° . 上表列出了这几个参量,其余的应力分量可以通过张量计算和矩阵变换获得.

通过对参与计算的地震目录震源深度的统计,

丽江地震的余震平均震源深度约为 10 km,对地震目录进行的统计表明,震源区地震的深度为 10~15 km,因此上述应力状态反映的是 10~15 km 深度上的平均应力状态.

图 3 展示了丽江地震区背景地震和余震破裂应力变化的空间分布(等值线图),为了简单起见,每幅图应力变化的等值线,负值只选一种颜色,正值则选用多种颜色来表示它们的大小,可以看出,从空间分布形态上看,二者具有明显的相似性.

图 3a 和图 3b 是部分地震事件震源处破裂应力变化空间分布图像在地表的投影,若将姚安地震(2000)和大姚地震(2003)以及宁洱地震(2007)地震震中标在图 3b 中(图幅所限,未作标记),可知这几处地震位于丽江震区的应力增加区上. 上述现象表明,强烈地震会对区域构造应力场造成扰动,局部应

表 1 丽江震区应力状态反演结果

Table 1 Inverted stress state of Lijiang area

参数	σ_1			σ_3			μ'	σ_3/σ_2	ϕ
	方位角($^\circ$)	倾角($^\circ$)	σ_1/MPa	方位角($^\circ$)	倾角($^\circ$)	σ_3/MPa			
地震序列反演	354.7	1.3	53.2	240.9	12.2	21.4	0.91	0.69	0.398
震源机制反演	343.0	5.0	—	252.0	4.0	—	—	—	0.460

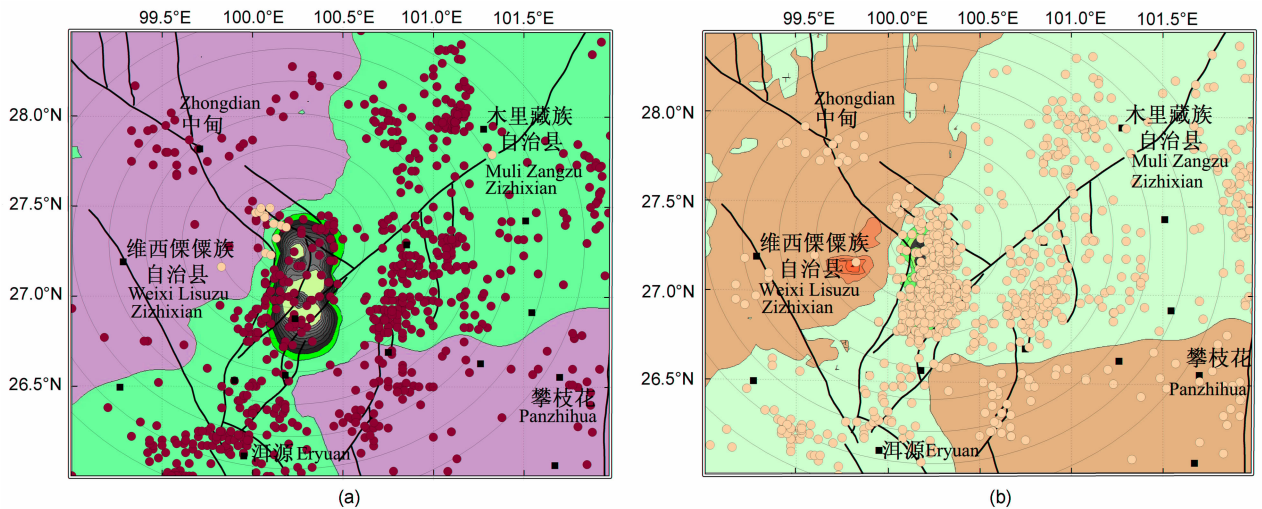


图 3 丽江地震区地震破裂应力变化等值线图及地震活动空间分布图

(a)背景地震破裂应力变化等值线图及地震活动空间分布图,背景地震目录时间 1994~1995;(b)余震破裂应力变化等值线图和余震活动空间分布图,余震目录时间 1996~1999. 震中附近 ($26^\circ00' \sim 28^\circ30' \text{N}, 99^\circ00' \sim 102^\circ \text{E}$).

图中暖色调(棕、红、粉和黑色)代表破裂应力变化为正,蓝色代表破裂应力变化为负,黑色线条为全新世活动断裂.

Fig. 3 Spatial distribution of failure stress change in Lijiang and adjacent area

(a) Contour map of failure stress change before Lijiang earthquake and the spatial distribution of background earthquakes, timescale is 1994~1995; (b) Contour map of failure stress change after Lijiang earthquake and the spatial distribution of aftershock sequences, time scale is 1996~1999. Spatial constrain between $26^\circ00' \sim 28^\circ30' \text{N}$ and $99^\circ00' \sim 102^\circ \text{E}$.

Warm tune colors (red, black, pink and brown) represent the positive failure stress change, cold tune colors means that the failure stress change is negative. Black lines represent Holocene faults.

力的变化和调整对应着局部地震活动的变化,粗略地认为,这几个后续的强地震有可能是丽江地震触发的。

5.2 结果分析

本文所用方法在计算中并未用到震源机制解,所以二者的结果可以进行比较,若二者相差不大,那么反演结果就相对比较可信。本文的反演结果给出了区域地壳应力状态的应力形因子为 0.398,与崔效峰等^[1]的反演结果相近,表明研究区范围内的应力结构为走滑型。根据云南省地震局^[30]的研究,丽江地震区位于西南地区现代构造应力场空间分布两个不同主压应力优势方向的转换地带,东侧为康滇菱形断块内部,主压应力优势方向为 ESS,西侧的主压应力优势方向为 ENN-EN,是应力结构区的过渡带,这就决定了该区应力场分布的复杂性。苏生瑞等^[40]的研究结果认为,丽江地震是由近南北向现今应力场作用下,玉龙雪山东麓断裂与中甸—永胜断裂复合部位拉张应力的强烈集中造成的,震源机制解的类型比例也说明了这一点。

反演计算获得的最大主应力方位角基本上是近南北,倾角近水平,这与王绍晋等^[41]和苏生瑞等^[40]分析结果一致。另外,这一结果也与崔效峰^[1]有关本地区应力状态的分析结果一致。

为了考察地震目录空间和时间范围对结果的影响,我们选择了空间范围 $2.5^{\circ} \times 3.0^{\circ}$ 和 $2.0^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、时间范围 1980~1997 年、1986~1999 年和 1991~1999 年所限定的 6 个地震目录数据集进行了计算。结果表明,在空间范围一定的情况下,地震目录——尤其是余震目录,时间间隔越长反演结果越稳定;空间范围越大反演结果越稳定。这其中的原因可能在于,本方法是基于地震目录进行的地震-应力空间相关性分析,因此样本的数量,尤其是余震数量会对反演结果有明显的影响,而时间的影响则次之。考虑到丽江地震的震级大小及强地面震动的影响范围^[33],我们最终以丽江地震震中为中心、 $2.5^{\circ} \times 3.0^{\circ}$ 为空间范围、1986~1999 年为时间范围重构了地震事件目录。从应力变化的空间分布以及该空间边缘处应力变化的大小来看,这一时空限定基本覆盖了 $M_s 7.0$ 地震的应力扰动范围。

此外,本研究还得到了有效摩擦系数 μ' ,其量值和我们通常使用的值相差较大,这可能反映了地壳介质复杂的受力特点。然而,有效摩擦系数 μ' 的准确确定究竟还需要结合哪些因素,有待我们更深入的研究。

6 讨论与结论

以地震目录和强震震源模型为输入参数,将力学计算与统计分析相结合,反演计算了 1986~1996 年间丽江震区 $2.5^{\circ} \times 3.0^{\circ}$ 空间范围内的地壳应力状态。结果表明,丽江地区应力场最大主应力为近南北向,方位角为 355° ,最小主应力方位角为 241° ,二者倾角为近水平,应力形因子为 0.398,最大主应力大小约为 53 MPa,远小于完整岩石的强度。利用地震目录反演构造应力状态的方法可获得地壳深部绝对应力大小、有效摩擦系数。多次反演后进行的稳定性分析表明,各个参数的不确定性大约是 10% 左右,绝对应力大小的不确定性为 21%。

计算结果的稳定性与地震目录的时间段、空间范围、震级以及定位精度有直接关系。此外,主震前后地震事件的数量之比也对结果有着明显的影响,其原因可能在于:由于应力变化和地震活动的空间相关性分析需要大量样本数据,因此统计结果的可靠性将取决于总体样本量的大小和数据质量,余震删除对结果的影响所作的分析也印证了这一推断。考察应用不同余震删除方法后的数据集的反演计算结果,不论哪种删除方法,结果的稳定性都不如未删除前,这从另一方面说明地震目录的样本数量对反演结果的稳定性的确有着显著的影响。本研究对地震目录不作余震删除,以保证样本量,对地震目录的完整性不作特殊要求。另一方面,本研究所用的地震目录指的是研究区范围内一定时间内发生的所有地震事件。因此余震数据范围不能局限于通常我们对余震空间范围的定义,除了要包含地震断层附近的地震事件外,还应当包括受强震影响的邻近区域范围内的地震事件。简单地说,反演所需的地震目录数据包括强震前后该地区的所有地震事件。

反演结果代表着地震目录起始时间到强震开始前这一段时间内的平均应力状态。理由如下:一个地区的应力场变化主要有两方面的贡献:背景的构造应力作用和本地地震活动。一般地,背景的构造应力变化在时间和空间上都是十分缓慢的,因此,对于时间不长、空间不大的反演,可以用一个均匀的应力变化来近似代表。另一方面,由于我们所用的地震目录时间跨度仅有短短数年,远远小于一次大震的孕育时间,此时间段内区域应力状态变化很小,因此,假定计算地震目录时间范围内的应力状态保持不变是合适的。

从地震的空间分布特征获得了区域构造应力状态信息为我们进一步研究大地震的孕震力学环境提供了有效途径。

致 谢 中国地震局地壳应力研究所的刘东英副研究员提供了地震目录数据;云南地震局秦嘉政研究员和刘丽芳助理研究员提供了丽江地区的相关地震地质资料;与陈连旺研究员和刘耀伟研究员在成文过程中进行了多次有益的讨论,在此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] 崔效峰, 谢富仁, 张红艳. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义. 地震学报, 2006, **28**(5):451~461
Cui X F, Xie F R, Zhang H Y. Recent tectonic stress field zoning in Sichuan-Yunnan region and its dynamic interest. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2006, **28**(5):451~461
- [2] 刁桂苓, 王海涛, 高国英等. 伽师强震系列应力场的转向过程. 地球物理学报, 2005, **48**(5):1062~1068
Diao G L, Wang H T, Gao G Y, et al. A deflection process for the stress field of the Jiashi strong earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(5):1062~1068
- [3] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊等. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征. 地球物理学报, 1987, **30**(5):476~486
Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. Directions of mean stress axes in southwestern China deduced from microearthquake data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1987, **30**(5):476~486
- [4] Yukutake Y, Iio Y, Katao H, et al. Estimation of the stress field in the region of the 2000 Western Tottori Earthquake: Using numerous aftershock focal mechanisms. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, B09306, doi:10.1029/2005JB004250
- [5] Zoback M L. Stress field constraints on intraplate seismicity in eastern north America. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:11761~11782
- [6] 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. 地震学报, 1993, **15**(4):407~417
Xie F R, Zhu J Z, Liang H Q, et al. Characteristics of modern tectonic stress field in southwestern China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1993, **15**(4):407~417
- [7] 许忠淮. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场. 地震学报, 1985, **7**(4):349~361
Xu Z H. Mean stress field in Tangshan aftershock area obtained from focal mechanism data by fitting slip directions. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1985, **7**(4):349~361
- [8] Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(B7):5836~5848
- [9] Etchcopar A, Vasseur G, Daignieres M. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Struct.*, 1981, **3**(1):51~55
- [10] 李方全. 套芯法、水压致裂法原地应力测量、钻孔崩落及震源机制解分析所得结果的比较. 地震学报, 1992, **14**(2):149~155
Li F Q. A comparison of crustal stress measurement result with overcoring method, hydraulic fracturing technique, borehole breakout and focal mechanism solutions analysis. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1992, **14**(2):149~155
- [11] 赵建涛, 崔效峰, 谢富仁. 唐山地震震源区构造应力场强度的初步分析. 地震学报, 2002, **24**(3):268~276
Zhao J T, Cui X F, Xie F R. Preliminary analysis of the tectonic stress intensity in the source region of Tangshan earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, **24**(3):268~276
- [12] 徐纪人, 赵志新. 深井地震:地球物理长期观测与研究——现代地球科学的新进展. 地质论评, 2004, **50**(5):537~553
Xu J R, Zhao Z X. Seismic: Geophysic long-term observe and study on deep drills: advances of modern geosciences. *Geological Review* (in Chinese), 2004, **50**(5):537~553
- [13] Zoback M D, Apel R, Eamgartner J, et al. Upper-crustal strength inferred from stress measurements to 6 km depth in the KTB borehole. *Nature*, 1993, **365**:633~635
- [14] 万永革. 根据大地震前后应力轴偏转和应力降求取应力量值的研究. 地震学报, 2006, **28**(5):472~477
Wan Y G. Study on determination of stress level by seismic stress drops and the stress axis deflections before and after large earthquakes. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2006, **28**(5):472~477
- [15] Wesson R L, Boyd O S. Stress before and after the 2002 Denali fault earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**:L07303, doi:10.1029/2007GL029189
- [16] 万永革, 沈正康, 曾跃华等. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响. 地震学报, 2007, **29**(2):115~129
Wan Y G, Shen Z K, Zeng Y H, et al. Evolution of cumulative coulomb failure stress in northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its effect on large earthquake occurrence. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2007, **29**(2):115~129
- [17] 万永革, 沈正康, 尚丹. 2005 年 10 月巴基斯坦 $M_w 7.6$ 地震对余震的触发研究. 中国地震, 2006, **22**(3):277~286
Wan Y G, Shen Z K, Shang D. Study on triggering effect of the October, 2005 Pakistan $M_w 7.6$ earthquake on its aftershocks. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2006, **22**(3):277~286
- [18] Deng J, Sykes L R. Stress evolution in southern California and triggering of moderate-, small-, and micro-size earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:2441~2443
- [19] Kagan Y Y, Jackson D D, Liu Z. Stress and earthquakes in southern California, 1850~2004. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**:B05S14, doi:10.1029/2004JB003313
- [20] Dieterich J H. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(B2):2601~2618

- [21] Marsan D. The role of small earthquakes in redistributing crustal elastic stress. *Geophys. J. Int.*, 2005, **163**:141~151
- [22] Reasenber P A, Simpson R W. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, 1992, **255**:1687~1690
- [23] King G C, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, **84**:935~953
- [24] Engdahl E R, Billington S, Kisslinger C. Teleseismically recorded seismicity before and after the May 7, 1986, Andreanof Islands, Alaska, earthquake. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:15481~15498
- [25] Tajima, Kanamori H. Global survey of aftershock area expansion patterns. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1985, **40**:77~134
- [26] McCloskey J, Nalbant S S, Steacy S, et al. Structural constraints on the spatial distribution of aftershocks. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (12): 1610, doi: 10. 1029/2003GL017225
- [27] Gross S J, Kisslinger C. Stress and the spatial distribution of seismicity in the central Aleutians. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(B8):15291~15303
- [28] Gross S J, Kisslinger C. Estimating tectonic stress rate and state with Landers aftershocks. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:7603~7612
- [29] 韩竹军, 魏顺民. 1996年2月3日云南丽江7.0级地震发生的构造环境. *地震学报*, 2004, **26**(4):410~418
Han Z J, Guo S M. Seismotectonic environment of occurring the February 3, 1996 Lijiang M7. 0 earthquake, Yunnan Province. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2004, **26** (4):410~418
- [30] 云南省地震局. 一九九六年丽江地震—滇西地震预报实验场. 北京:地震出版社, 1998
Earthquake Administration of Yunnan Province. Lijiang Earthquake, Feb. 3rd, 1996(in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1998
- [31] Okada Y. Internal deformation due to shear faults and tensile in a half space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, **82**:1018~1040
- [32] Gross S J. A model of tectonic stress state and rate using the 1994 northridge earthquake sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**(2):263~275
- [33] 陈棋福. 中国震例(1995~1996). 北京:地震出版社, 2002
Chen Q F. Earthquake Cases in China, 1995~1996 (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2002
- [34] 国家地震局地质研究所、云南省地震局. 滇西北地区活动断裂. 北京:地震出版社, 1986
Institute of Geology, CEA, Earthquake Administration of Yunnan Province. Active Faults in Northwestern Yunnan (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1986
- [35] 朱艾斓, 徐锡伟, 周永胜等. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义. *地球物理学报*, 2005, **48**(3):629~636
Zhu A L, Xu X W, Zhou Y S, et al. Relocation of small earthquakes in western Sichuan, China and its implications for active tectonics. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48** (3):629~636
- [36] 苏有锦, 刘祖荫. 丽江7.0级地震震源环境及其破裂过程讨论. *地震研究*, 1997, **20**(1):66~71
Su Y J, Liu Z Y. Discussion on the source environment and rupture process of the M7. 0 Lijiang earthquake. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 1997, **20**(1):66~71
- [37] 刘祖荫, 苏有锦, 秦嘉政等. 20世纪云南地震活动. 北京:地震出版社, 2002
Liu Z Y, Su Y J, Qin J Z, et al. Study on Seismicity in Yunnan in the 20th Century (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2002
- [38] 许力生, 陈运泰, S. Fasthof. 1996年2月3日云南丽江7.0地震震源过程时空复杂性-中国地震学研究进展. 北京:地震出版社, 1997. 91~105
Xu L S, Chen Y T, Fasrhof S. The Temporal and Spatial Complexity of Source Process of Ms7. 0 Earthquake, Feb. 3rd, 1996, Lijiang, Yunnan; *Advances of Seismology Research in China*(in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1997. 91~105
- [39] 徐扬. 1996年2月3日云南丽江地震震源过程的体波反演. *地震学报*, 1998, **20**(2):113~117
Xu Y. Bodywave inversion of source process for Feb. 3rd, 1996, Lijiang earthquake, Yunnan. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1998, **20**(2):113~117
- [40] 苏生瑞, 王运生. 丽江地震区应力场研究. *地质论评*, 2004, **50**(1):57~64
Su S R, Wang Y S. A study on the stress field in the region of the Lijiang earthquake. *Geological Review* (in Chinese), 2004, **50**(1):57~64
- [41] 王绍晋, 龙晓帆, 罗淑进. 丽江地震序列的震源机制、发震应力场和破裂特征. *地震研究*, 1997, **20**(1):26~34
Wang S J, Long X F, Lou S J. The focal mechanism, seismogenic stress field and rupture characteristics of the Lijiang earthquake sequence. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 1997, **20**(1):26~34

(本文编辑 汪海英)