

安宁河—则木河地震带震源参数及应力状态的研究

阮祥, 程万正, 乔惠珍, 张永久, 张致伟

(四川省地震局, 四川 成都 610041)

摘要:利用2001—2008年安宁河—则木河地震带100次3级以上中小地震波形资料计算了地震震源机制解。采用力轴张量法计算给出安宁河—则木河地震带平均主应力方向为NW—SE, 与历史中强地震震源机制解结果一致;走滑错动占的比例较大,且分布集中。由小震的震源波谱参数绘制出视应力平面分布和深度分布剖面图,显示在安宁河—则木河地震带及其附近区域相对高视应力区出现在石棉附近地下5 km和15 km两个不连通区域,西昌以南的则木河断裂带地下5 km左右区域,以及西昌以北地下10~20 km区域。若将相对高视应力分布区作为未来强震危险性的估计指标,则安宁河断裂带北段及则木河断裂带中北段未来存在潜在的强震危险性,而在这些地段近8年也有小震活动的密度和强度的显现。

关键词:震源机制解;视应力分布;地震危险性;安宁河—则木河地震带

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)01-0046-05

Research on Source Parameters and Stress State in Anninghe—Zemuhe Earthquake Belt

RUAN Xiang¹, CHENG Wan-zheng¹, QIAO Hui-zhen¹, ZHANG Yong-jiu¹, ZHANG Zhi-wei¹

(Earthquake Administration of Sichuan, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the middle-small earthquake data from 2001 to 2008 in Anninghe—Zemuhe earthquake belt, 100 focal mechanisms of $M_L \geq 3.0$ earthquakes are calculated. Using mechanical axis tensor method the direction of mean stress field of Anninghe—Zemuhe earthquake belt is given, with direction of NW—SE, which is in accord with the results given by historical moderate-strong earthquakes in the area. The strike-slip earthquakes account for large proportion in all earthquakes and located in narrow areas. The plane and section of apparent stress are plotted after calculating parameters of source spectrum of small earthquakes, it shows that the high value areas are two underground disconnected regions at depths of 5 km and 15 km near Shimian county, at depth of 5 km on Zemuhe fault at south of Xichang city, and at depths of 10 km to 20 km at north of Xichang city, respectively. If relative high value area of apparent stress is thought as indicant of future strong earthquake risk, north segment of Anninghe fault and mid-north segment of Zemuhe fault are the potential strong earthquake risk area. In these areas density and intensity of small earthquakes have increased in recent 8 years.

Key words: Focal mechanism solution; Apparent stress; Earthquake risk; Anninghe—Zemuhe earthquake belt

0 引言

中国大陆现代构造应力场具有明显的分区性,

收稿日期:2009-10-14

基金项目:行业专项课题(200808053);国家十一五科技支撑计划子课题(2006BA01B02-01-01)

作者简介:阮祥(1981—),男(汉族),云南人,助理工程师,现主要从事地震学和地震预报方面的研究。

表现在不同地区应力作用方向和应力结构的不同,我国川滇地区构造应力场的这种空间非均匀特征尤为明显^[1-2]。利用数字地震记录资料针对一些潜在地震危险性较高的地震带进行研究,给出构造带震源破裂参数及应力场非均匀分布特征的分析结果有实际的参考价值。

安宁河—则木河地震带是历史强震发生最频繁的主要地震活动地区之一,带内 NS 向的安宁河断裂及 NNW 向的则木河断裂年平均滑动速率分别为 5.1 ± 2.5 和 2.8 ± 2.3 mm/a^[3]。该区域历史上曾发生多次强震^[4]:1327~1536 年由北向南依次发生 3 次 $M7\frac{1}{2}$ 地震,分别为 1327 年康定石棉间 $M7\frac{1}{2}$,石棉冕宁间 $M7\frac{1}{2}$,及冕宁西昌间 $M7\frac{1}{2}$;此后该断裂带平静,直至 1732 年西昌 $M6\frac{3}{4}$ 发生,其间间隔 250 年,7 级地震的平静更是持续近 400 年,至 1850 年西昌以南则木河断裂的 $M7\frac{1}{2}$ 地震发生;1952 年冕宁发生的 $M6\frac{3}{4}$ 地震是该断裂带上距今最近的一次强震。

针对安宁河—则木河地震带的强震背景,且已接近强震复发周期,地震危险性日益增强,本文利用多年来中小地震震源机制解研究了该地震带区域应力场特征,以期对未来强震发生地区的判断提供有益的参考。

1 资料和研究方法

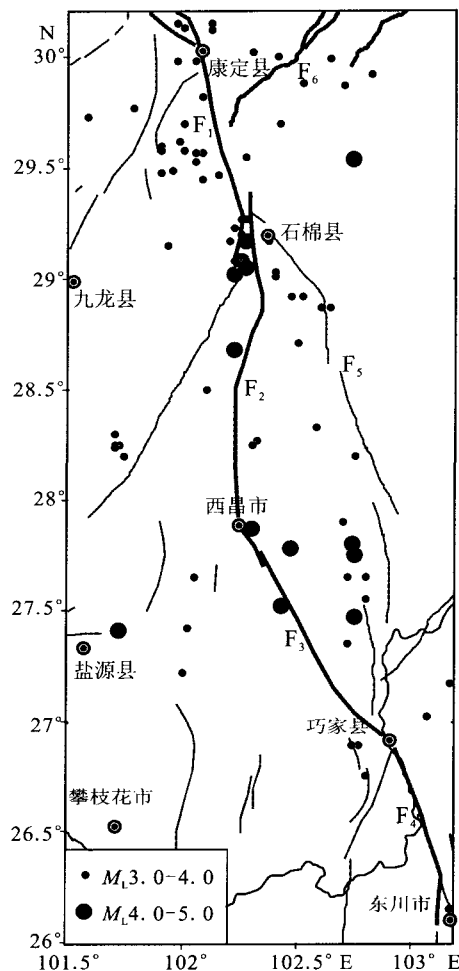
1.1 资料

本文选取了北至四川康定,南至云南东川的研究区域($26.00^{\circ} \sim 30.20^{\circ} \text{N}$; $101.50^{\circ} \sim 103.20^{\circ} \text{E}$)。2000 年后川滇数字地震台网正式投入运行,本文选用该区域内数字地震波观测资料从 2000 年到 2008 年汶川 8.0 级地震前,具有清晰波形记录的 100 个 3 级以上地震,地震波形资料取自成都遥测台网,部分取自昆明遥测台网。图 1 显示研究区域内 2000 年到 2008 年 3 级以上中小地震也有丛集发生的特征,且 4 级以上的地震丛集与历史中强地震形成了有规律的间隔,与历史强震震源区重合。鲜水河断裂与龙门山断裂交汇地区则较大面积的分布着 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震。

1.2 震源机制解及应力场

选取 $M_L \geq 3.0$ 以上地震进行震源机制解反演时以层状介质中一点源位错震源模型,采用广义透射系数的快速算法和理论地震图拟合直达波最大振幅比的方法,反演小震震源机制^[5-6]。

震源机制解包括可能是震源断层的 2 个节面的



F₁:鲜水河断裂; F₂:安宁河断裂; F₃:则木河断裂;
F₄:小江断裂; F₅:大凉山断裂; F₆:龙门山断裂

图 1 安宁河—则木河地震带 $M_L 3.0$ 以上地震震中分布(2000—2008)

Fig. 1 Distribution of $M_L \geq 3.0$ earthquakes in Anninghe-Zemuhe earthquake belt (2000—2008).

参数,滑动角 λ 是断层的运动参数,可描述断层的各种运动类型。例如: $\lambda \approx 0^{\circ}$ 表示左旋走滑断层, $\lambda \approx \pm 180^{\circ}$ 表示右旋走滑断层, $\lambda \approx +90^{\circ}$ 表示逆断层, $\lambda \approx -90^{\circ}$ 表示正断层。分别对节面 1 和节面 2 统计,使用滑动角 λ 来确定断层的错动性质,并约定数值区间^[7]。

除节面参数外,震源机制解也包括了三个应力轴的方位角和仰角,基于此震源断层面解的空间取向及参数,即力轴张量在地理坐标系中的表达式,采用计算平均力轴张量及主值的方法^[7-8],求解相应的本征方程,可以求得构造区段的应力场方向。

1.3 视应力分布

视应力与引起地震滑动的平均应力水平之间通过地震波辐射效率联系在一起。对一个地区中引起

地震滑动的平均应力水平进行区域平均,则可以作为当地的绝对应力水平的一个间接的估计^[9]。视应力被定义为地震效率和平均应力的乘积:

$$\sigma_{app} = \eta \bar{\sigma} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (1)$$

式中地震波辐射能量由下式求得

$$E_s = 4\pi\rho\beta S_v \quad (2)$$

式中, ρ 为介质密度, S_v 为速度的功率谱积分:

$$S_v = 2 \int V(f)^2 df$$

相应的位移功率谱积分

$$S_D = 2 \int D(f)^2 df \quad (3)$$

于是,

$$\Omega_0^2 = 4S_D \sqrt{\frac{S_D}{S_v}} \quad (4)$$

地震矩可由下式求得

$$M_0 = 4 \sqrt{\frac{5}{2}} \pi \rho \beta^3 \Omega_0 \quad (5)$$

根据视应力定义式(1)取 $\mu = 3.5 \times 10^{11}$ dyn/cm², 求得视应力值^[7]。

2 震源机制确定的应力状态

2.1 构造主应力场方向

研究给出的 2000—2008 年安宁河—则木河地震带 3 级以上 100 次地震及震源机制解分布见图 2。

基于研究区内 100 次中小地震震源机制解的力轴空间方位参数, 计算平均应力张量, 进而得到平均应力场的主值及方位^[8]。根据整个研究区域内 100 次中小地震震源机制解得到的平均主压应力方位角为 308.3°, 即主压应力方位呈现为 NW—SE 方向。

2.2 震源错动类型

根据安宁河—则木河地震带 100 次地震震源机制解 2 个节面得到的滑动角, 由于研究区内安宁河—则木河断裂及鲜水河断裂南段走向近 NS 或 NNW, 我们将节面走向近 NS 向的统一为节面 1, 将走向近 EW 向的节面统一为节面 2, 在此基础上把震源机制分为 8 个错动类型, 即: 1 逆倾滑动, 2 左旋逆倾滑动, 3 左旋走向滑动, 4 左旋正倾滑动, 5 正倾滑动, 6 右旋正倾滑动, 7 右旋走向滑动, 8 右旋逆倾滑动^[7]。由图 3 可看出节面 1 的地震震源机制解多为走向滑动和正倾滑动类型。尤为显著的是错动类型 3、7 的地震, 即左旋和右旋的纯走向滑动类型占了 44% 的比例, 接近一半; 另外是错动类型 5、错动

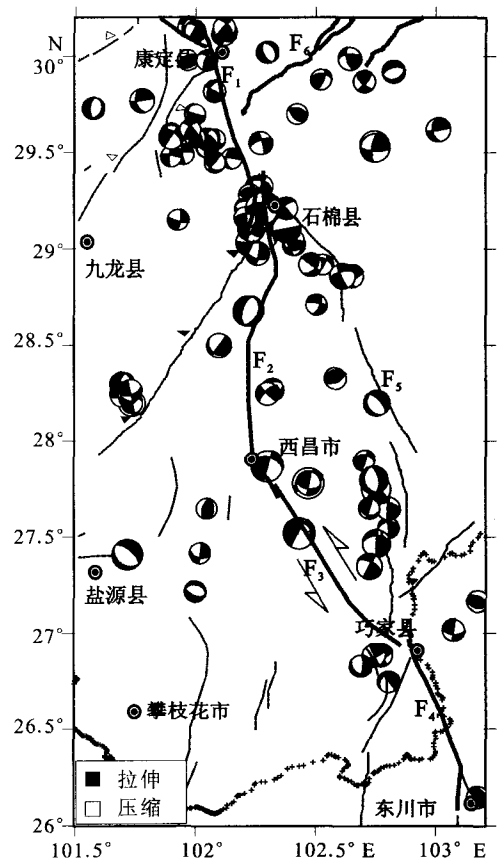


图 2 安宁河—则木河地震带 3 级以上地震震源机制解分布图(断裂编号同图 1)

Fig. 2 Distribution of focal mechanism solution of $M_L \geq 3.0$ earthquakes in Anninghe-Zemuhe earthquake belt.

类型 1, 即正倾滑动和逆倾滑动也占了一定比例, 分别为 16% 和 14%。图 4 则显示了节面 1 的错动类型分布, 可以看出倾滑型地震在整个研究区域内零星分布, 表明该型地震属于局部偶发事件, 相反走滑型地震分布则较为丛集, 表明了明显的断层的走滑属性。

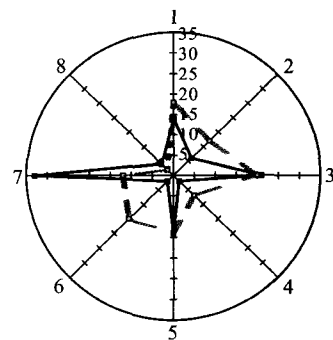


图 3 地震震源错动类型统计

Fig. 3 Statistics of source dislocation types.

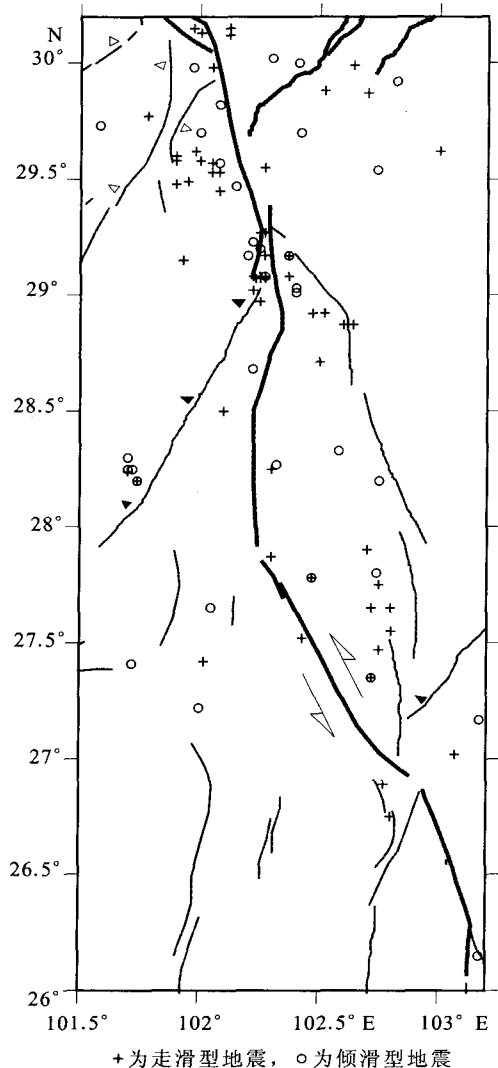


图4 地震震源错动类型的分布

Fig. 4 Distribution of different dislocation sources.

2.3 视应力分布状况

根据区内100次中小地震波形资料计算了每个地震的视应力值,经kriging插值后在平面上绘制等值线图5。研究区内有多个明显的视应力相对高值区,但总体强度并不大,最高值为9.2 bar。相对高值区出现在安宁河断裂北段石棉至冕宁段及则木河断裂普格段。根据历史地震震源分布,距第一个高值区即安宁河断裂石棉至冕宁段最近的一次大震为1480年7½级,距今已500多年,易桂喜等^[10]的 b 值研究结果也显示该地区处于低 b 值区,闻学泽^[11]认为该区在2015年前7级地震发震概率超过60%,高视应力的结果也进一步显示该区处于强震发生的高危险性区域。而另外一个高值区则是1850年7½级地震的震源区^[4],作为有大震背景的高视应力区,虽未达到7级地震的复发周期,但高视

应力的现象依然需要注意区内中等强震的发生。其他视应力有所显示的区域还包括龙门山断裂南段的部分区域。

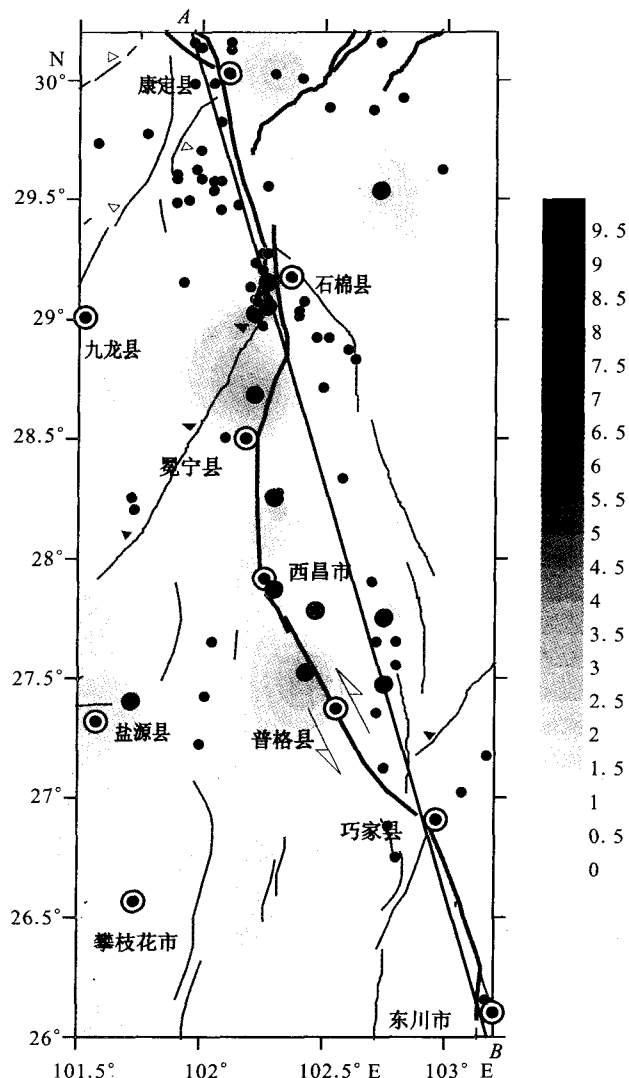


图5 视应力值在平面上的分布(AB为剖面位置)

Fig. 5 Plane distribution of apparent stress (AB is the location of section).

鉴于地震带内断裂基本均呈NNW—SSE走向,我们沿断裂带取了NNW—SSE走向的剖面,如图5中AB所示,将研究区内地震投影到剖面上后插值形成剖面的视应力分布见图6。可以看到区内地震集中分布在5~15 km深度范围内。看出几个视应力相对高值区的深度分布,其中最高值出现在石棉附近鲜水河断裂与安宁河断裂交汇处,靠南一侧即安宁河断裂一侧高视应力区在5 km以上的区域,而靠北一侧即鲜水河断裂一侧高值区则在10 km以下,两个相对高值区并不连通,形成犬牙交错的形态。此外石棉至西昌段内还有两个相对高值

区,其视应力值相对前述的高值区较弱,其中剖面 170 km 附近的高值区深度在 5 km 附近,而剖面 230 km 附近的高值区则在 15 km 左右。西昌以南

剖面 300 km 左右有两个深度较浅的相对高值区,深度在 5 km 以上。

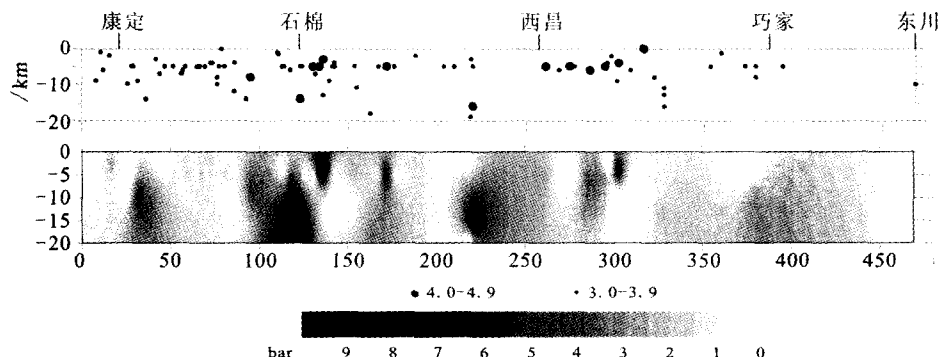


图6 震源深度及视应力深度剖面图

Fig. 6 Section of source depth and apparent stress.

3 分析和讨论

安宁河—则木河地震带历史强震有震源机制解结果是稀少的。仅有 1952 年 9 月 30 日冕宁 $6\frac{3}{4}$ 级地震的解,主压应力方向为 128° ,力轴仰角 21° ;还有 1 次是 1989 年 6 月 9 日石棉 5.3 级地震的解,主压应力方向为 342° ,力轴仰角 18° 。这两次中强震的震源断层的错动类型呈近走滑兼具斜滑分量的特征。本文给出地震带内大量最新的震源机制解,并利用力轴张量方法给出安宁河—则木河地震带平均主应力方向为 NW—SE。这与历史上该带内大地震求出的中强地震震源机制解得到的主应力方向的结果是大体一致的。

根据近 8 年地震带内地震的数字波形记录,本文求取大量小震的震源波谱参数,根据这些资料研究绘出视应力平面分布和深度分布剖面图,探索用于地震危险性估计。研究区域内视应力分布是不均匀的,高值出现在石棉附近地下 5 km 和 15 km 两个不连通区域,西昌以南的则木河断裂带地下 5 km 左右区域,以及西昌以北地下 10~20 km 区域,而小江断裂带北段及则木河断裂带南段地区视应力值相对较低。若将相对高视应力分布区作为未来强震危险性的估计指标之一,则安宁河断裂带北段及则木河断裂带中北段未来存在潜在的强震危险性。虽然地震危险性估计方法较多,如根据地质构造的分段破裂特征,活动速率估计,地震活动性等,目前仍属于探索中的问题。但可以结合分析的是,在这些相对高视应力分布区近 8 年小震活动的密度和强度显现,即在康定附近 $M_L 3.0\sim 3.9$ 地震活动较频繁,

石棉附近 $M_L 4.0\sim 4.9$ 地震出现丛集,沿安宁河断裂小震活动较少,西昌以南的则木河断裂带与大凉山断裂带之间的区域,如普格、布拖一带出现多次 $M_L 4.0\sim 4.9$ 地震。这些地段中小地震明显活跃是一佐证。

[参考文献]

- [1] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 654-662.
- [2] 崔效锋,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[J]. 地震学报, 2006, 28(5): 451-461.
- [3] 王阎昭,王恩宇,沈正康,等. 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, 2008, 38(5): 582-597.
- [4] Wen X Z, Ma S L, Xu X W, et al. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan Yunan faulted-block, southwestern China[J]. Phys Earth Planet Int, 2008, 168: 16-36.
- [5] 梁尚鸿,李幼铭,束沛镛,等. 利用区域地震台网波振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, 1984, 27(3): 249-257.
- [6] 刁桂苓,于利明,宁杰远,等. 1989 年大同震群的破裂特征[J]. 地球物理学报, 1993, 36(3): 360-368.
- [7] 程万正,阮祥,张永久. 川滇次级地块震源机制解类型与一致性参数[J]. 地震学报, 2006, 28(5): 561-573.
- [8] 钟继茂,程万正. 由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场[J]. 地震学报, 2006, 28(4): 337-346.
- [9] 吴忠良,黄静,林碧荃. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报, 2002, 24(3): 293-301.
- [10] 易桂喜,闻学泽,苏有锦. 川滇活动地块东边界强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1719-1725.
- [11] 闻学泽. 活动断裂地震潜势的定量评估[M]. 北京: 地震出版社, 1995: 1-150.