

新疆柯坪块体震源参数的初步研究与应用

潘振生, 刘 辉, 谷美菊, 李晓东, 沈 琦

(新疆维吾尔自治区地震局阿克苏中心地震台, 新疆 阿克苏 843000)

摘要:采用多台多地震联合反演的方法得到了新疆柯坪块体 2006—2008 年 53 次 $M_s \geq 3.0$ 中小地震的震源谱, 进而计算了 103 次 $M_s \geq 2.5$ 地震的应力降、地震矩、震源破裂半径、视应力等震源参数, 并讨论了它们与震级之间的关系。在此基础上分析了 2006 年以来柯坪块体上普昌断裂两侧区域及整个块体上应力降和地震视应力空间演化特征, 并结合柯坪 5.2 级地震对研究结果应用于地震趋势预测和短临跟踪的可行性进行了探讨。

关键词:震源参数; 联合反演; 柯坪块体; 应力降; 视应力

中图分类号: P315.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)04-0357-06

Preliminary Study on Source Parameters of Earthquakes Occurred in Keping Block, Xinjiang

PAN Zhen-sheng, LUI Hui, GU Mei-ju, LI Xiao-dong, SHEN Qi

(Central Seismic Station of Akesu, Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang, Akesu 843000, China)

Abstract: Using the joint inversion method, we obtain the source spectrums of 53 $M_s \geq 3.0$ earthquakes in Keping block, Xinjiang Uygur Autonomous Region, form 2006 to 2008, calculate the source parameters of 103 $M_s \geq 2.5$ earthquakes such as seismic moments, stress drops, apparent stress, corner frequencies, and discuss the relationships between these parameters and magnitude. Based on this work, the spatial-temporal evolution patterns of stress fall, apparent stress in Keping block and on both sides of Puchang fault are separately analyzed. The possibility for applying the results to earthquake tendency forecast and short-term seismic activity tracing is also discussed with the case of Keping $M_s 5.2$ earthquake in 2009.

Key words: Source parameters; Joint inversion; Keping block; Stress fall; apparent stress

0 前言

随着数字观测技术及数字地震学的迅速发展, 应用数字地震波进行震源参数的计算和研究, 并将研究成果应用于地震预报及大震后地震趋势的快速判定, 已经取得了大量的研究成果和较好的地震预报效果^[1-8]。目前中国地震局和许多省局已开展了新参数地震目录的研究工作, 此项工作将对地震预报的效能和水平产生深远的影响。本文选取新疆境内具有相对独立构造单元的柯坪块体 ($N39.5^\circ - 41.8^\circ, E75.1^\circ - 80.0^\circ$) 作为研究区, 采用多台多地震联合反演震源参数(包括震源尺度、拐角频率、应

力降和视应力等)的方法, 计算柯坪块体 2006—2008 年中小地震的震源参数, 初步求得应力降、视应力等震源参数的背景值, 为今后柯坪块体及其周边地区中强以上地震的分析预报提供基础性的研究资料, 以期对柯坪块体未来的地震趋势做出一定程度的预测。

1 方法简介及资料处理

影响震源参数计算结果的主要因素有两个: 第一个为传播路径、场地响应、仪器响应和震源效应

收稿日期: 2009-04-29

基金项目: 新疆地震科学基金(200804)

作者简介: 潘振生(1976—), 男(汉族), 甘肃武威人, 工程师, 主要从事地震监测工作。

等;第二个主要是从位移谱中读取低频水平和拐角频率是否具有一定的合理性和客观性^[9]。本文采用多台地震联合反演法:先将各台得到的记录观测谱归算到震源谱,理论上由各台归算得到的震源谱应该是相同的,因此可将各台得到的震源谱进行叠加,得到多台合成的平均震源谱;再由多台合成的平均震源谱求取一个低频幅值和一个拐角频率;最后求出各震源参数。具体方法为:(1)采用 Atkinson 提出的方法计算非弹性衰减系数 Q 值:首先在某个频率上设定区域的品质因子 Q 值,对台站记录进行几何扩散和非弹性衰减校正,得到相应地震的谱振幅;对同一地震的谱振幅求平均,利用各台站与平均振幅之间的差异确定台站的场地响应;再考虑各台站场地响应,重新计算各台站经过校正后的平均谱振幅,调整 Q 值反复计算,使各台站得到的上述谱振幅的残差最小,最终得到该区域的非弹性衰减系数 $c(f)$,介质的品质因子 $Q(f)$ 以及品质因子 $Q(f)$ 与频率的关系 $D(f) = Q_0 f^\gamma$ 。(2)采用 Moya 方法确定每个地震的震源谱参数和台站的场地响应。(3)将转换后的场地响应代入 Atkinson 方法,进行 Q 值、几何衰减和非弹性校正。(4)应用程序得到研究区每个地震的平均震源谱,然后在 ω 平方震源模型约束下用遗传算法搜索得到每个地震震源谱的零频谱值和拐角频率,最后根据 Brune 的圆盘震源模型计算各震源参数。

柯坪块体位于南天山地震带西段,是一个相对独立的构造单元,主要由柯坪、托特拱拜孜、阔克萨勒、哈尔克、普昌断裂构成^[10]。上述断裂均为深达岩石圈的大断裂^[11]。其中柯坪、阔克萨勒、哈尔克断裂的走向为 NEE,托特拱拜孜断裂呈近 EW 向展布。NNW 走向的普昌断裂斜切柯坪断裂和托特拱拜孜断裂,将柯坪块体分为东、西两部分。普昌断裂东侧构造性质简单,西侧断裂分布及断裂性质较为复杂。柯坪块体是新疆乃至全国 6 级地震活动的主体区域,破坏性地震沿柯坪断裂频频发生^[12],发生在柯坪块体西部的 1902 年阿图什地震是有记录以来南天山地震带的最大地震,其发震构造为有走滑分量的 NEE 向托特拱拜孜断裂^[13]。研究区内中小地震频发,2006 年 1 月至 2008 年 12 月共发生 100 多次 2.5 级以上地震。

研究区内的阿图什、西克尔等 8 个数字地震台,基本上沿断裂的走向分布,东西跨度约 420 km,南北跨度约 200 km,组成了一个相对独立的数字地震观测台网(图 1)。8 个台站的台基均为基岩,使用

的仪器为 16 位数据采集器的 CMG-3ESPC 型、BBVS-60 型数字地震计和 24 位数据采集器的 CTS-1 型数字地震计,2007 年 4 月数据采集器的采样率为由 50 Hz 升级为 100 Hz。因仪器架设的时间不同(阿克苏、阿合奇、巴楚、乌什、八盘水磨台 2006 年 1 月之前架设,其余 3 个台架设于 2006 年 1 月之后),所选的资料的时段也不同。研究时段内的每个地震都至少被 4 个以上的台记录到,每个台环境噪声水平都在 II 级以上。所选地震和台站基本覆盖了该研究区,基本能够满足多台地震联合反演法所需条件,具体分布见图 1。本文计算了柯坪块体 103 次 $M_S \geq 2.5$ 地震的应力降、地震矩、震源破裂半径、震源破裂面积等震源参数,考虑到柯坪块体上普昌断裂两侧区域构造性质的不同,对这两个区域的震源参数进行了对比分析。

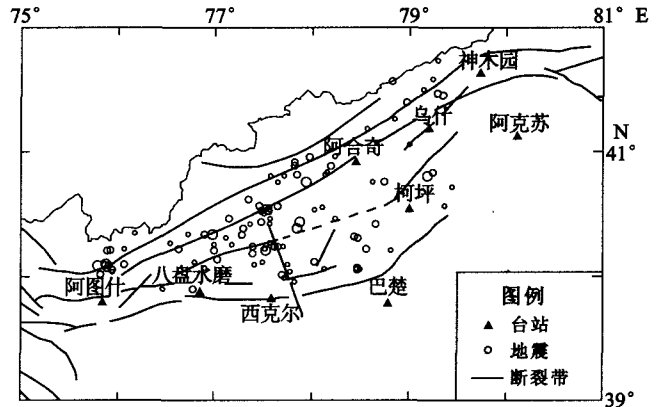


图 1 柯坪块体台站及所选地震分布图

Fig. 1 Distribution of seismic stations and choosed earthquakes in Keping block.

2 柯坪块体介质品质因子 Q 的计算结果

非弹性衰减系数与频率有明显的依赖关系,在考虑频率依赖的 Q 模型时,通常用频率的幂函数,即 $Q(f) = Q_0 f^\gamma$ 的形式来拟合 Q 与频率的关系,参数 γ 反映了 Q 对频率的依赖程度^[14]。本文挑选出柯坪块体 2006 年 1 月至 2008 年 12 月,8 个台站记录较好,拟合效果好的 $M_S 3.0$ 以上的 53 个地震反复反演计算介质品质因子 $Q(f)$ 与频率的关系为: $Q = 298.1 * f^{0.453}$ (图 2)。从图 2 可以看出, Q 值与频率变化的线性关系较好,27 个频点基本上在一条直线附近上下波动。

3 各种震源参数结果及其相互关系分析

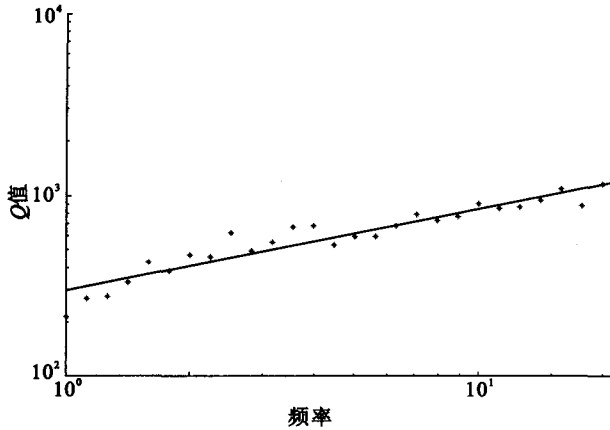


图 2 柯坪块体介质品质因子与频率关系图
Fig. 2 Relationship between the medium quality factors and frequencies in Keping block.

3.1 地震矩、矩震级与震级之间的关系

地震矩 M_0 是对断层滑动引起的地震强度的直接测量,地震波振幅低频成分越大周期越长。研究中选用了研究时段内柯坪块体上震级为 $M_L 3.2 \sim 4.7$ 的 103 次地震,计算得到的标量地震矩介于 $10^{20} \sim 10^{21}$ dyn · cm 之间。在单对数坐标下 M_0 与 M_L 震级呈现出很好的相关性(图 3),用最小二乘法拟合其相关系数为 97.4%,拟合得到二者的关系为

$$\lg M_0 = 0.905 M_L + 17.67$$

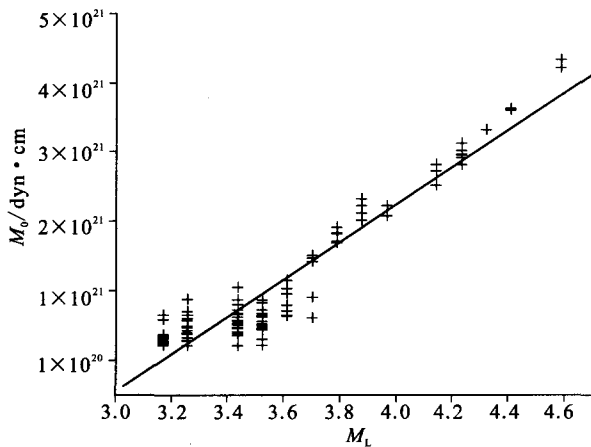


图 3 柯坪块体地震矩与震级关系图

Fig. 3 Relationship between the seismic moments and magnitudes in Keping block.

矩震级反映了形变规模的大小,是目前量度地震大小的最好物理量,也是一个描述地震大小的绝对力学标度,不会产生饱和问题。研究中反演计算了 $M_L \geq 3.2$ ($M_s 2.5$) 的 103 次地震矩震级,统计后发现, M_L 震级均大于矩震级 M_w , 此结论与夏爱国等用联合反演法计算得出的天山中东段 $M_L > 3$ 时,

$M_L > M_w$ 的结论基本一致^[1]。

3.2 震级与应力降及视应力之间的关系

应力降是表征地震瞬间错动时位错面上的应力变化。中强地震前应力降有明显的升高,尤其是 S 波段计算得到的应力降震前升高的趋势更加明显^[15],因此跟踪研究应力降值的变化可作为未来大地震发生的依据。研究区内中小地震的应力降与震级的关系见图 4(a)。可以看出应力降随震级变化基本呈离散状态。但从应力降随震级变化的优势分布上大致可看出有两段变化趋势: $M_L < 4.2$ 的地震应力降值变化范围较大,应力降随震级增大有着某种增大的趋势(图 4(a)中的两条虚线区域); $M_L > 4.2$ 的地震的应力降随震级变化不明显,其中大部分地震的应力降处在 100 ~ 220 bar 之间,变化范围较小。由此可以得出如下结论:联合反演计算出的 $M_L > 4.2$ ($M_s 3.7$) 的地震的应力降可以直接应用于地震预报和日常短临跟踪工作中。

地震视应力是地震效率和震源平均应力的乘积,可以通过平均应力反映震源平均的强弱,在地震学中可以用视应力描述区域应力的水平。Pulido 和 Irikura(2000)根据震源破裂过程的数字地震成像的结果,通过地震能量和视应力的时间变化,估计决定地震破裂性质的动力学参数。因此地震视应力可能具有大震前的某种前兆信息。Choy 和 Boatwright(1995)根据美国国家地震信息中心(NEIC)的宽频带辐射能量测定结果和哈佛矩心矩张量(CMT)测定结果,讨论了全球地震视应力的分布,得到全球地震视应力的平均值为 0.5 MPa。吴忠良等用类似的方法和资料计算了中国大陆地震的视应力分布,发现中国大陆地震的视应力略高于全球平均水平^[16]。将地震视应力的定义为^[4]

$$\sigma_{app} = \tau = \mu \frac{E_s}{M_0}$$

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3\Omega_0}{R_{\phi p}}$$

$$\sigma_n = \frac{2\mu R_{\phi p}\Omega_0(\pi f_c)^3}{\beta^2}$$

式中, σ_{app} 为地震视应力; β 为 S 波速度,根据王盛泽等(1988)在新疆分区地壳模型中对柯坪块体极其附近地区地壳中上部横波速度结构的研究结果,本文取 $\beta = 3.397$ km/s; μ 为震源区介质剪切模量,计算时取 $\mu = 3.0 \times 10$ MPa(Choy, Boatwright, 1995); ρ 为介质密度,本文取 $\rho = 2.7 \times 10$ kg/m³; $R_{\phi p}$ 为 S 波的辐射图型因子,取 $R_{\phi p} = \sqrt{2/5}$ (Andrews, 1986)。

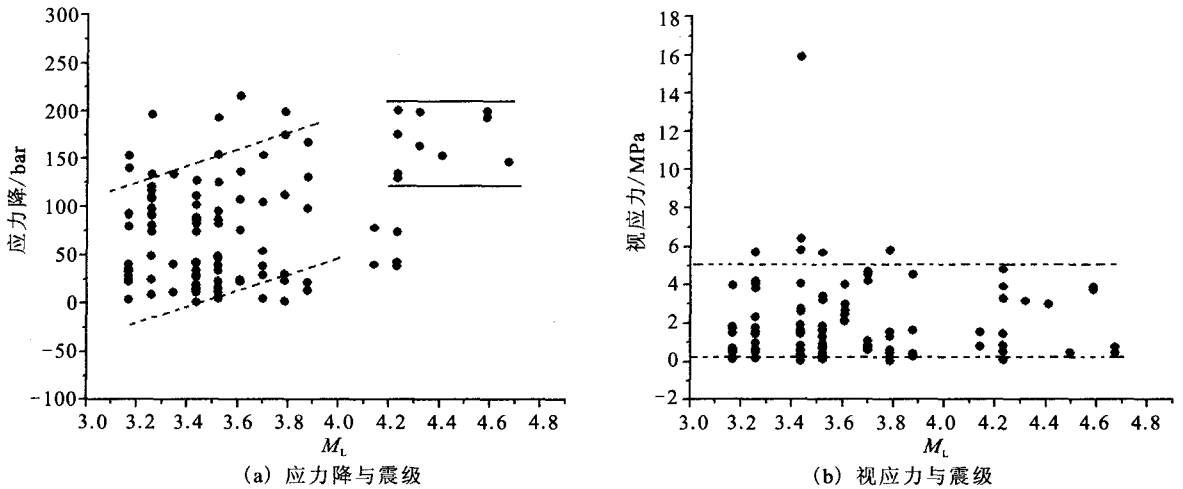


图 4 柯坪块体应力降、视应力与震级关系图

Fig. 4 Relationships between the stress drop, apparent stress and magnitudes in Keping block.

本研究中根据柯坪块体中小地震反演得出的地震距 M_0 和 f 计算出该区域中小地震的平均视应力 1.76 MPa, 是全球平均值的 3 倍多。图 4(b) 给出了视应力与震级之间的关系, 可以看出视应力随震级的变化不明显。因此由联合反演结果计算出的视应力可以直接应用于地震预报和日常短临跟踪工作中。

4 柯坪块体震源参数计算结果的初步应用

4.1 应力降、视应力时序变化分析

为从应力降的时空演化特征中寻找中强震前后震源区应力状态和孕震状态变化信息, 在一定程度上扣除震级大小对应力降值的影响, 定义某区域的应力降值相对于长期平均值(即本底值)的增长幅度为

$$D = (\Delta\sigma - \text{本底值}) / \text{本底值}$$

若 $D \leq 0$, 表示该区的应力降值处于长期本底值之下; 若 $D > 0$, 表示该区的应力降值比长期本底值高, D 值越大则该区的地震危险性越大。

斜切柯坪块体北西走向的普昌断裂对该区域中强地震活动起到了一定的调整作用^[17], 其两侧的地震构造各不相同。本研究将柯坪块体以普昌断裂为界分为东西两个区进行研究, 计算出东区应力降平均值为 76.5 bar, 西区应力降平均值高于东区。计算结果显示, 2007 年 8 月至 2009 年 2 月柯坪块体应力降增长幅度 D 值总体上呈增大的趋势, 这可能表明该区域的应力释放水平逐渐升高, 处于高应力状态。从东区的应力降增长幅度 D 值时序曲线(图

5(a))可以看出, 2008 年 4 月以来 D 值在高于本底值的范围变化, 且呈逐步上升的趋势, 2009 年 2 月 20 日发生了柯坪 5.2 级地震; 根据上文公式计算了柯坪块体的中小地震的视应力(图 5(b)), 可以看出总体上视应力值变化不稳定, 大部分中小地震的视应力在 1 MPa 左右, 一部分地震的视应力较高, 但 2007 年 10 月至 2009 年 2 月视应力整体上高于之前的水平, 这可能表明 2007 年 10 月至 2009 年 2 月 20 日柯坪 5.2 级地震发生前该区域的应力水平较高。

4.2 应力降、视应力空间演化分析

为在空间上表现出区域应力的释放程度和区域应力空间分布随时间的演化情况, 分别对柯坪块体 2006 年 1—12 月, 2007 年 1—12 月(图略)和 2008 年 1—12 月应力降 D 值进行了空间扫描(图 6(a)、(b))。2006 年整个研究区处在低 D 值状态, 且分布较为均匀, 仅在普昌断裂以东的阿合奇西南和普昌断裂西北附近的小区域内应力释放程度较高; 2007 年在阿合奇东南、柯坪附近区域和普昌断裂西侧及北端附近区域形成了 D 值高值区, 分布较为分散; 2008 年 D 值高值集中分布在普昌断裂附近区域。2006 年至 2008 年, 柯坪块体应力降 D 值高值分布经历了由普昌断裂两侧向其附近集中的过程, 且 2008 年高值区梯度变化大于前两年。2009 年 2 月 20 日在 2008 年 D 值梯度变化较大的高值区的边缘发生了柯坪 5.2 级地震。2003 年 2 月 14 日新疆石河子 5.4 级地震前天山中东段的应力降 D 值也曾出现类似的空间变化过程^[11]。

地震视应力方法将中等强度以上地震的时空演

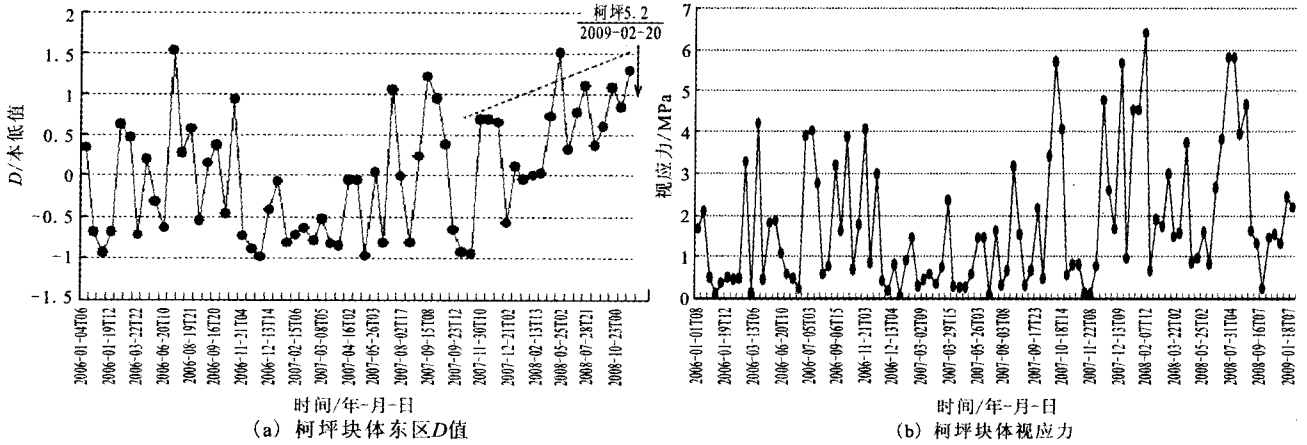


图 5 柯坪块体应力降 D 值、视应力时序曲线
 Fig. 5 Curves of apparent stress and stress drop D in Keping block.

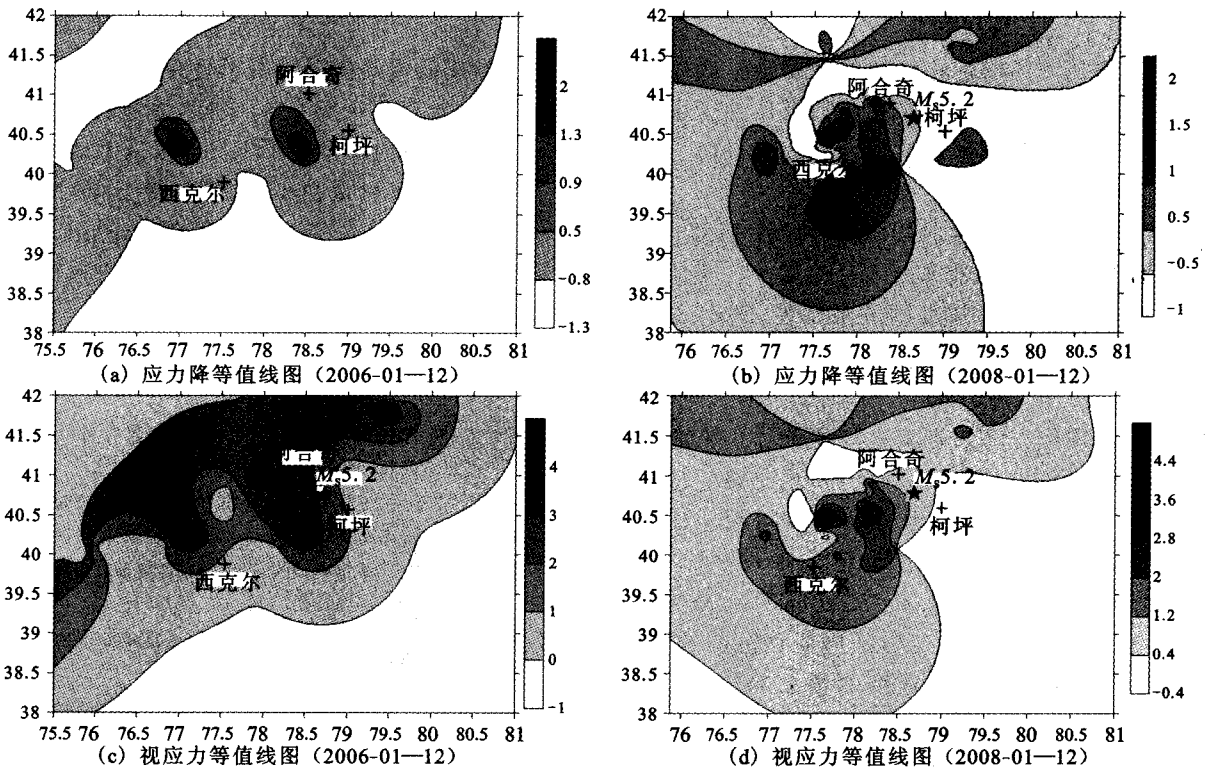


图 6 柯坪块体应力降、视应力 D 值等值线演化图

Fig. 6 The isolines evolution diagrams of the apparent stress and stress drop D value in Keping block.

化图像转换成地震视应力异常区的时空演化图像,在寻找显著应力变化区、预测强震发震地区方面显示出图像清晰、量化、预测空间明确等优点^[5]。分别做了 2006 年 1—12 月、2007 年 1—12 月(图略)和 2008 年 1 月—12 月柯坪块体中小地震视应力等值线图(图 6 (c)、(d))。分析表明,2006 年在阿合奇以西、西克尔西北及乌什东北区域存在视应力高值区;2007 年的视应力高值区为阿合奇东北、西克尔以西区域;2008 年阿合奇与西克尔之间区域视应力

较高,这可能意味着此区域的应力水平较高。2009 年 2 月 20 日在视应力高值区域(阿合奇与西克尔之间区域)的边缘发生了柯坪 5.2 级地震。

5 结论与讨论

(1) 本文应用多台多地震联合反演的方法,根据 2006 年 1 月至 2008 年 12 月柯坪块体上 8 个台站记录全,拟合效果好的 $M_s 3.0$ 以上的 53 个地震,反复反演计算介质品质因子 $Q(f)$ 与频率的关系为

$Q=298.1 * f^{0.453}$ 。此结果与刘杰等^[7]计算的唐山地区的结果 $Q=214 * f^{0.55}$ 较为接近,但与郭晓等^[18]计算的祁连山中东段的结果 $Q=687.9 * f^{0.460}$ 相差较大,这可能是由于地震波在不同的地区衰减快慢程度不同造成的,也可能说明不同地区沉积层的薄、厚程度不同。由 Moya 方法得到台站的场地响应后,应用 Atkinson 方法进行 Q 值、几何衰减和非弹性校正,通过对每个地震的记录观测谱进行几何衰减、非弹性衰减、场地响应等的逐项扣除,反演计算了柯坪块体 2006 年 1 月至 2008 年 12 月发生的 103 次 2.5 级以上地震的震源参数。 Q 值是衡量地震波在地壳介质中衰减特性的主要物理量^[19],一般来说地震活动性强的地区岩石破碎程度较高, Q 值较小。赵翠萍等研究得出新疆北天山中东段地区介质品质因子 $Q(f)$ 与频率的关系为 $Q=344 * f^{0.55}$ ^[20],本文研究的柯坪块体地震活动水平高于北天山中东段地区,因此本区域的 Q 值低于北天山中东段地区,符合 Q 值与地震活动性强弱关系的一般规律。

(2) 本文计算了研究时段内柯坪块体上 $M_L 3.2-4.7$ 的 103 次地震的地震矩 M_0 ,用最小二乘法拟合出地震矩 M_0 与 M_L 震级的关系发现, $\lg M_0$ 与震级 M_L 存在着较好的线性关系,103 次 $M_L \geq 3.2$ ($M_S 2.5$) 地震的矩震级 M_w 均小于 M_L 震级。应力降的标度性,即应力降如何随地震强度大小而变化,是震源参数研究中广泛讨论的问题,也是将它应用于地震预报实践中首先要考虑的基本问题^[21]。本文研究了柯坪块体 103 次 $M_S 2.5$ 以上地震的应力降随震级变化的情况,结果表明二者间存在两段变化趋势: $M_L < 4.2$ 的地震应力降值变化范围较大,应力降随震级增大有一定程度的增大趋势; $M_L > 4.2$ 的地震的应力降随震级变化不明显。此结论与吴忠良等研究 1988 年澜沧—耿马地震部分余震得出的小地震的应力降随地震尺度而增加,大地震的应力降保持不变的结论基本一致^[21]。本文计算出柯坪块体中小地震的平均视应力 1.76 MPa,是全球平均值的 3 倍多,且视应力随震级的变化不明显,因此似乎可初步将 $M_S 2.5$ 以上地震的视应力值超过 1.76 MPa 作为判定本文区域应力水平高低的一个标度值。

(3) 本文反演得出普昌断裂东侧区域 $M_S 2.5$

以上地震的应力降平均值为 76.5 bar,西侧区域的应力降平均值高于东区。2009 年 2 月 20 日普昌断裂东侧区域发生了柯坪 5.2 级地震,震前普昌断裂东侧区域的应力降增长幅度 D 值自 2008 年 4 月以来在高于本底值的范围内变化,且呈逐步上升的趋势;柯坪块体中小地震的视应力值总体变化不稳定,2007 年 10 月至 2009 年 2 月视应力值整体上高于之前的水平,这可能表明柯坪 5.2 级地震发生前该区域的应力水平较高。

(4) 将联合反演得到的震源参数应用于地震预报是有一定依据的,一些中小地震的应力降明显超出一定震级范围内地震应力降的总体水平,可能显示出一定的地震前兆意义。地震视应力通过平均应力反映了震源平均的强弱,可以直接描述区域应力的水平,而区域应力水平的强弱是预测未来发生中强以上地震的重要依据。由于研究区的地震样本不足,台站分布存在一定的局限性,地震构造也较复杂,且研究时段内只发生了 1 次 5 级以上地震,因此本文的研究结果只是初步的,还有待于今后地震发生的实际来检验。笔者本着边研究、边应用、边预报的原则,将初步研究成果应用在实际地震预报中,以期取得一定的预报效果。

[参考文献]

- [1] 夏爱国,赵翠萍.天山中东段地区震源参数的初步应用研究[J].内陆地震,2006,20(3):245-251.
- [2] 陈学忠,王小平,王林瑛.地震视应力用于震后趋势快速判定的可能性[J].国际地震动态,2003,295(7):1-4.
- [3] 刘红桂,王培玲,杨彩霞.地震视应力在地震预测中的应用[J].地震学报,2007,29(4):437-445.
- [4] 刘红桂,刘杰,丁页岭.地震视应力在云南地震序列中的前兆特征[J].地震学报,2006,28(5):462-471.
- [5] 易志刚,宋荣,杨选辉.震视应力在中国大陆西部强震趋势预测中的应用[J].地震,2007,27(4):110-120.
- [6] 吴晶,顾瑾萍.甘肃景泰 $M_S 5.9$ 地震前后小地震视应力计算讨论[J].地震,2004,24(1):170-175.
- [7] 安张辉,吕子岚,杜学彬,等.甘肃省各数字地震台下方地壳速度结构研究[J].西北地震学报,2008,30(3):270-275.
- [8] 李英,许康生.2007 年甘肃部分地震的震源参数反演[J].西北地震学报,2009,31(4):353-362.
- [9] 刘杰,郑斯华,黄玉龙.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,2003,25(2):211-218.
- [10] 王筱荣.柯坪块体的地震活动特征[J].西北地震学报,2001,23(4):382-388.

- (3):227-231.
- [34] 何丽君,石玉成,杨惠林,等.地震动作用下黄土边坡稳定性分析[J].西北地震学报,2009,31(2):142-147.
- [35] 张怀,吴忠良,张东宁,等.虚拟川滇—基于千万网格并行有限元计算的区域强震演化过程数值模型设计和构建[J].中国科学(D辑),2009,39(3):260-270.
- [36] 刘启元,吴建春.论地震数值预报—关于我国地震预报研究发展战略的思考[J].地学前缘,2003,10(8):217-224.
- [37] Goodman R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[M]. Paul: West Publishing Co., 1976.

(上接 362 页)

- [11] 马杏恒.中国及临近海域岩石圈动力学图[Z].北京:地质出版社,1986.
- [12] 龙海英,高国英,聂晓红.1997—1998年伽师强震群震源区应力场特征[J].西北地震学报,2007,29(2):145-149.
- [13] 史丽艳,朱传庆,杨书江.新疆乌什地震带断裂研究的综合地球物理方法[J].西北地震学报,2007,29(2):156-160.
- [14] 兰从欣,刘杰,郑斯华.北京地区中小地震震源参数反演[J].地震学报,2005,27(5):498-507.
- [15] 李雪英,高景春.张北地震序列波谱分析[J].地震地磁观测与研究,2004,25(增刊):58-60.
- [16] 吴忠良,黄静,林碧苍.中国西部地震视应力的空间分布[J].地震学报,2002,24(3):293-301.
- [17] 高国英,李莹甄,王筱荣.不同构造环境中地震活动对新疆地震形势的影响[J].内陆地震,2006,20(2):102-108.
- [18] 郭晓,张元生,莘海亮.祁连山中东段地区非弹性衰减系数震源参数和场地响应研究[J].西北地震学报,2007,29(4):319-325.
- [19] 浩贝灿图.赤峰地区的尾波Q值研究[J].防灾技术高等专科学校学报,2005,7(2):60-65.
- [20] 赵翠萍,夏爱国,郑斯华.新疆北天山中东段地区震源参数研究[J].中国地震,2005,21(1):61-69.
- [21] 吴忠良,陈运泰,Mozafari P.应力降的标度性质与震源谱高频衰减常数[J].地震学报,1999,21(5):460-468.