

刘宁、陈棋福、韦生吉 2011,地震震源运动学参数获取方法研究进展,中国地震 27(1) 29~38。

# 地震震源运动学参数获取方法研究进展

刘宁<sup>1 2)</sup> 陈棋福<sup>2)</sup> 韦生吉<sup>3)</sup>

1) 中国地震局地球物理研究所,北京市海淀区民族学院南路 5 号 100081

2) 中国地震局地震预测研究所,北京市复兴路 63 号 100036

3) Seismological Laboratory of California Institute of Technology, Pasadena CA91125 USA

**摘要** 本文基于从简单到复杂的各向同性点源模型、质心矩张量模型、有限矩张量模型和有限震源滑动分布模型 4 种震源运动学模型,概述了相应的研究进展。

**关键词:** 震源 运动学 CAP FMT 有限震源滑动分布模型 体波反演

[文章编号] 1001-4683(2011)01-029-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震震源模型、震源破裂过程以及描述震源特性的各种参数已经越来越受到国际地震学界的重视。地震震源运动学研究的目的是通过研究地震参数,即地震规模、发震位置、震源时间函数、震源破裂模式(破裂方向、速度、时间、位错量等)、断层面参数、地震矩等参数,更好地认识和了解地震发生时的特有行为、构造区域地震活动性的差异以及大、小地震之间的关系。

用震源运动学原理研究震源的运动学参数,必须对实际地球介质、震源运动学模型和地震破裂过程的复杂性做相应的简化和近似。在地震学的发展历程中,震源的运动学模型从简单到复杂历经了各向同性点源(IPS 即 Isotropic Point Source)模型、质心矩张量(CMT 即 Centroid Moment Tensor,国内又称矩心矩张量)模型、有限矩张量(FMT 即 Finite Moment Tensor)模型、有限震源滑动分布(FSD 即 Fault Slip Distribution)模型的 4 个阶段(Chen et al, 2005)(图 1)。IPS 模型一般用于描述小地震和人工爆破,表征该模型的震源参数包括发震时间  $t_0$ 、震源  $r_0$  和震级  $M_L$ 。在天然地震学中,最常用的震源模型是 CMT 模型,该模型是在 IPS 的基础上引用矩张量  $M$  来描述包括地震矩张量  $M$ 、震源质心的破裂时间  $t_1$  和位置  $r_1$  等 10 个震源运动学参数(Dziewonski et al, 1981)。在纯双力偶模型下,震源参数减少为 8 个。在 CMT 的基础上,也可以将震源视为空间和时间上的应力过剩张量(Backus et al, 1976a, 1976b)  $\Gamma(r, t) = Mf(r, t)$ ,即矩张量  $M$  和时间空间函数  $f(r, t)$  的组合。该函数的 0 阶矩代表震源的标量地震矩;1 阶矩表征一个有限震源质心从震中的位移矢量;2 阶矩描述

[收稿日期] 2010-05-12; [修定日期] 2010-09-29

[项目类别] 国家地震行业专项项目(批准号:CEA200708008)资助

[作者简介] 刘宁,女,1981 年生,博士研究生,主要从事震源研究, E-mail: ningliu\_cea@hotmail.com

通讯作者: 陈棋福,研究员, E-mail: chenqf@seis.ac.cn

震源的时间空间特征。Chen 等(2005)将这种 2 阶矩的震源称之为 FMT,包含 20 个参数,其中 10 个为 CMT 参数,10 个为 2 阶矩参数。把中小地震破裂面近似视为单平面,FMT 参数减少为 14 个,即 8 个 CMT 参数和断层长度  $L_c$ 、宽度  $W_c$  和持续时间  $T_c$ ,以及断层滑动的方向性矢量  $v_d$ 。有限震源滑动分布模型(FSD)是对震源运动学特征更全面的描述,在用空间和时间的上二阶应力过剩张量  $\Gamma(r,t)$  来描述震源的基础上,包含了更多的震源运动学参数,如震源时间函数上升时间、地震矩、平均位错量等。对于 FSD 模型,因为对震源体的每一个点都要用一个随时间变化的函数来描述其滑动情况,这就需要数目众多的参数来约束震源,大量中小地震因传播距离有限以及高频情况下地球的三维结构影响而无法提供足够的观测约束,故 FSD 模型通常只用于大地震( $M > 7$ )的震源破裂过程反演(Chen et al, 1996; 姚振兴等,1997; 许力生等,1999; Ji et al, 2002a、2002b、2003、2004; 张勇等,2008; 张勇,2008; 王卫民等,2008)。

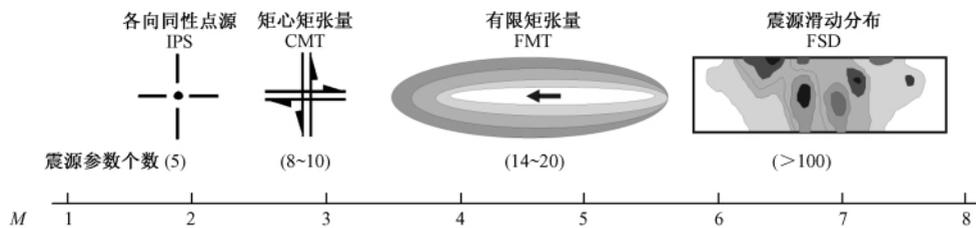


图 1 4 种震源模型以及相对应的南加利福尼亚州地震震级和震源参数个数(Chen et al, 2005)

对人类生命和生存环境构成极大威胁的大地震一直以来都是地震震源运动学研究的重点。浅源大地震的发生时常伴随明显的地表形变,以及远场地震记录波形或频谱的变化。由于大地震破裂的有限性,震源运动学参数的研究多以有限移动震源理论为基础(Ben-Menahem, 1961; Aki et al, 1980)。解析大地震的破裂方向得到破裂长度、破裂时间和破裂速度的方法主要有基于有限震源滑动分布模型(FSD, Fault Slip Distribution)反演方法(Ji et al, 2002a、2002b)、基于直达 P 波的反向投影方法(Ishii et al, 2005、2007; Krüger et al, 2005; Larmat et al, 2006; Walker et al, 2005)、高频 P 波辐射能量分析法(Ni et al, 2005)、P 波反卷积法(Ruff et al, 1983)、面波反卷积法(Ammon et al, 1993、2005、2006)、面波相延迟时间(phase-delay time)分析(Hwang et al, 2001)等。其中,P 波反卷积、面波反卷积或者相延迟时间分析等方法都要通过提取经验格林函数得到相对震源时间函数来完成。尽管经验格林函数可以在一定程度上去除地球结构的影响,反映震源特性,能够有效地评估大地震破裂的方向性参数,但它的约束性则体现在必须选取与主震震源机制和震源深度一致的余震作为经验格林函数。

对于发生频率较高的中小地震( $M < 5.0$ ),其震源时间函数通常小于 1s,要研究此类地震的有限破裂过程必须使用相对高频的地震波( $> 1\text{Hz}$ ),而在如此高频条件下,地球介质的三维结构已不能忽略,简单一维模型所计算的格林函数已不再适用,因此在没有适合的经验格林函数的情况下要得到此类地震的有限破裂模型相当困难。此时,需要借助 IPS 模型、CMT 模型或 FMT 模型来描述震源模型(Chen et al, 2005)。震源运动学参数的研究重点倾向于震源机制、震源深度、实际断层面和破裂方向(Chen et al, 2005、2010; Tan et al, 2007、

2010)。中小地震的震源机制通常用来推断断层结构 (Shearer, 1998) 和约束区域构造应力 (Chen et al, 2010; 许忠淮等, 1983; 许忠淮, 2001; 谢富仁等, 2004)。而真实断层面面对减少区域构造应力反演过程中的不确定性 (Gephart, 1985、1990; Michael, 1987; Yin, 1996)、计算地震造成的库仑应力变化以及基于应力转换模式对地震危险性的评价 (Harris, 1998; McCloskey et al, 2003; Parsons, 2005; Steacy et al, 2005) 都具有重要意义。经过重新定位后的微震震源参数和震源机制解, 可以用来确定主要断层和次要断层的方位特征 (走向和倾向) (Kilb et al, 2006)。

## 1 强震震源运动学参数

地震达到一定规模之后, 一般的点源模型已不适用, 必须以有限破裂模型来呈现其整个断层的震源面貌。有限震源滑动分布模型 (FSD) 是将震源描述为分布在震源体积内随时间空间变化的滑动矢量的集合体。这种方法综合利用多种观测资料, 在具有一系列代表自己特征的震源机制、地震矩、震源位置、破裂起始时间和上升时间等参数的断层面上对地震的破裂过程进行反演和模拟。反演方法可以分为时间域反演 (Hartzell et al, 1983; Langston et al, 1975; 姚振兴等, 1997) 和频率域反演 (Brune, 1970; Chen et al, 1996; 许力生, 1999), 也可以根据格林函数的不同, 分为理论格林函数反演方法 (Kikuchi et al, 1982、1986、1991) 和经验格林函数反演方法 (Hartzell, 1978)。

由于地震矩张量在一级近似下能够完整地描述地震震源的等效力 (Langston, 1981; Langston et al, 1982), 因此强震震源破裂过程多采用基于地震矩张量的波形拟合反演方法 (Chen et al, 1996; 许力生, 1999; 张勇等, 2008; Langston, 1981; Langston et al, 1982; Kikuchi et al, 1982、1986、1991)。虽然该方法较多地运用远场地震记录分析, 但对于性质为倾滑断层的地震, 远场体波波几乎不随方位角变化 (姚振兴等, 1994)。为此, 姚振兴等提出了综合利用不同震中距范围的体波 ( $3 \sim 12^\circ$  区域地震的 Pn1 波,  $15 \sim 30^\circ$  上地幔范围和  $30 \sim 90^\circ$  远场范围的体波) 来测定地震断层面解的线性反演方法 (姚振兴等, 1994)。有限断层反演方法中, 纪晨等人提出了模拟退火法的非线性反演方法 (Ji et al, 2002a、2002b、2003、2004; 王卫民等, 2008; 周仕勇等, 2003)。其中, 基于小波变化的模拟退火反演方法 (Ji et al, 2002a、2002b、2003、2004), 充分利用地震波的到时信息和频率成分, 通过寻找小波域中定义的失配函数最小值的过程来获取最佳子断层参数, 例如滑移幅度、滑动角、震源函数上升时间及该子断层对应的平均破裂速度。该方法在分析远震记录的基础上引入近场强地面振动记录, 更好地获取了有限震源滑动分布的细节。除此之外, 该方法还可以综合利用各种测地学资料, 如 GPS、InSAR、光学测量等静态观测资料。多种资料的综合利用无疑对了解地震的运动学过程提供了更多约束和新的视角, 但在使用这些静态观测数据的同时需要仔细区分数据中的同震形变和震后形变, 以免引入额外的误差。

近年来, 地震学家发展了一系列基于地震波形解析大地震运动学参数的方法。其中, Ni 等 (Ni et al, 2005) 分析了 2004 年 Sumatra-Andaman 大地震远震高频 P 波在各个方位角上的能量分布, 很快得到了这次大地震大致的破裂长度、破裂速度及破裂时间。Ishii 等 (2005) 基于日本高灵敏地震台阵 (Hi-Net) 中井下 100m 短周期记录的高频 P 波, 用反向投影方法直接对 2004 年 Sumatra-Adaman 地震破裂过程成像。随后这种在大震的发震平面上, 对每

个可能的瞬时点源叠加地震台站记录波形计算震源辐射能量值的反向投影方法被用来分析许多大震破裂过程 (Ishii et al, 2007; Krüger et al, 2005; Larmat et al, 2006; Walker et al, 2005)。该方法的优点是可以在震后相对较短的时间内得到震源的大致破裂过程,没有考虑到后续震相(如自由表面反射)和震源辐射花样等因素的影响,此类方法的精度相对有限,更精确的地震破裂过程需要更完整的格林函数。Kao 和 Shan (Kao et al, 2007) 运用相类似的 SSA (Source-Scanning Algorithm) 震源扫描算法给出了 2003 年和 2004 年发生在加利福尼亚中部的 San Simeon 和 Parkfield 地震的真实破裂面。相比远震体波,长周期面波对大地震破裂的方向性、破裂持续时间和地震矩更加敏感 (Ammon et al, 2005)。Ammon 等 (2005、2006) 利用主震的面波与点震源理论格林函数的反卷积得到不同方位角上相对震源时间函数,进而分析 2004 年 Sumatra-Andaman 地震的断层参数。鉴于大地震破裂的方向性会造成面波相速度延迟 (Ben-Menahem, 1961; Ammon et al, 2005), Hwang 等 (2001) 利用大地震与无破裂方向性小地震的相速度延迟差求取相对震源时间函数来评估大地震断层参数。

## 2 中小地震震源运动学参数

### 2.1 求解中小地震的震源机制

小地震震源机制解的研究方法主要包括运用经典的 P 波初动法 (Balakina et al, 1961; 俞春泉, 2009; 胡幸平, 2008)、P 波和 S 波初动 (Nakamura, 2002)、S 波和 P 波的振幅比方法 (Kisslinger, 1980; 梁尚鸿, 1984; 胡新亮, 2004; 张永久, 2007; Hardebeck et al, 2002、2003), 以及波形反演法 (Dreger et al, 1993; Zhu et al, 1996)。其中, 利用 P 波初动极性方法是最简便和快捷的方法, 但是波形信噪比、初动复杂性、仪器极性、3D 波速变化和初动极性的人为判断等因素极大地影响了该方法的可靠性。而且, 利用 P 波初动极性方法需要较好的台站方位角覆盖。对位于 P 波初动节面方向的台站, 其 P 波记录往往不易辨认; 但 SH 波的辐射花样与 P 波的相反, 并且在 P 波节面附近最大, 因此充分利用三分量资料能够更好地解析震源机制。

CMT 模型是在 IPS 基础上加一个矩张量  $M$  来描述地震运动学参数, 在过去的 20 年里, CMT 在方法上已经有了比较完整的发展 (刘瑞丰等, 1999), 许多地震台网也已经将 CMT 的计算引入日常的资料分析处理工作 (徐志国等, 2007)。Harvard 大学的地震研究机构在日常工作中就实时对全球范围内  $M_w \geq 5.5$  的地震求解质心地震矩张量 (Dziewonski et al, 1981)。反演过程中通过对全球范围内周期大于 45s 的体波和周期大于 135s 的面波, 在最小二乘法的原则下, 通过迭代求解拟合波形, 给出地震矩张量  $M$ , 质心发震时间  $t_1$  和位置  $r_1$  等震源运动学参数。

结合近震和区域地震记录的 CAP (Cut and Paste) 方法 (Zhao et al, 1994; Zhu et al, 1996; 韦生吉等, 2009; 黄建平等, 2009), 主要是通过分别拟合体波 (Pnl) 和面波波形的的方法, 在相关参数中求解  $M > 3.5$  地震的双力偶震源机制最佳解。这种利用地震波形获取震源参数的优点在于分别对 Pnl 波和面波用不同的时移进行拟合, 降低了反演对波速模型的依赖性, 并且由于地震波形相对于初动含有更多的震源信息, 因此得到的结果更为可靠。利用波形反演震源参数的关键在于理论地震图的计算, 而计算理论地震图的方法主要分为建立在高频近似基础上和渐进基础上的射线理论方法 (Cerveny et al, 1977; Cormier et al,

1977; Helmberger 1968) ,离散化的数值方法 (Kelly et al ,1976; Smith 1975) 以及解析或半解析方法 (Zhu et al ,2002; Fuchs et al ,1971) 。其中 ,基于 Haskell 传播矩阵 (Harkrider ,1964; Haskell ,1963、1964) 的频率波数域积分法 (F-K) (Zhu et al ,2002) 特别适用于计算水平分层模型中的全波场格林函数 ,它通过快速傅里叶变换实现频率域上的积分 ,而波数积分则近似为离散波数域上的求和。通常 ,对特定的震源深度和波速模型 ,计算得到 3 种基本断层模型 (90° 倾角纯走滑断层 ,90° 倾角纯倾滑断层和 45° 倾角纯倾滑断层) 的响应 ,即格林函数。然后对格林函数做加权线性组合 ,其中权重因子为辐射花样 ,即可得到任意双力偶机制震源在该台站的理论地震图。

Kawakatsu (1998) 提出了实时网格搜索确定震源机制方法 ,经 Tajima 等 (2002) 、Ito 等 (2006) 和 Auger 等 (2006) 对理论的不完善 ,确立了基于长周期的地震波记录网格搜索确定震源机制的途径。之后 ,Tsuruoka 等 (2009) 开发了利用长周期 (20s ~ 50s) 地震波记录实时监测确定地震发生时间和地震矩张量等参数的 GRiDMT (grid-based real-time determination of moment tensors) 系统 ,极大缩短了日本东北部太平洋海域 5 级以上地震后确定震源机制的时间 ,震后 3min 内即可发布分析结果。目前 ,美国伯克利地震研究实验室 (Tajima et al ,2002) 和台湾地区也将近实时震源机制解的确定纳入了地震台网的日常工作。

震源的 CMT 系统分析结果 ,为人们理解区域应力场的特征提供了有益的帮助 ,但对进一步了解此类中小型地震的震源特征目前仍十分困难 ,尤其对于台站稀疏地区的地震 ,如确定两个震源共轭面中实际的发震面以及震源的破裂传播方向。这些重要的信息对了解和研究区域应力分布、区域地震活动的可能孕震环境与发震机理、地震可能造成的应力迁移 ,以及震源破裂的物理机制等具有重要的意义。

## 2.2 中小地震的破裂面及破裂方向的确定

近年来 ,地震学者在中小地震有限破裂面和破裂方向确定等研究领域取得了显著进展 (Tan et al 2007、2010; Chen et al 2005) 。

其中 ,Tan 等 (2007) 利用震源机制解较为确定的中等地震 ( $M = 3.5 \sim 5.0$ ) 对小震 ( $M < 3.5$ ) 高频信号的振幅进行矫正 ,得到南加州 Big Bear 小地震序列中部分 2.5 级地震的最佳双力偶解;随后 ,作者又以这些小地震作为经验格林函数 ,通过正演获取不同方位角的最佳视时源函数 (Apparent Source Time Function) ,从而进一步确定了中小型地震的破裂长度、破裂速度及破裂方向 (Tan et al ,2010) 。

Chen 等 (2005、2010) 引入地震矩的二阶矩 ,即 FMT ,相对于 CMT ,增加了断层破裂面长度、宽度、破裂速度以及破裂方向等震源参数 ,以解析主震 ( $4.0 \leq M_w \leq 5.0$ ) 震源方向性和破裂细节。运用 GSDF (Generalized Seismological Data Functional) 方法 (Gee et al ,1992) ,借助不同频率地震波的震相延迟 (phase delay) 和振幅衰减时间 (amplitude-reduction time) (McGuire et al ,2001) 拟合理论和观测地震图。用一维理论格林函数给出主震 CMT 解和真实断面 ,然后引入主震 FMT 解和余震 CMT 解 ,用经验格林函数的方法 ,得到震源的有限破裂参数。结果表明 ,在三维波速结构的影响下 ,有必要将余震数据作为经验格林函数来解析主震的有限性破裂参数和破裂细节;尽管如此 ,即使不引入余震数据 ,仅借助一维理论格林函数对判断主震的真实断面仍有意义。随着计算机水平的发展和数值计算方法的提高 ,运用有限差分 (Graves ,1996) 、有限元 (Smith ,1975) 或者谱元法 (Komatitsch et al ,

2004)等数值计算方法能够得到三维波速结构模型精确的理论格林函数。对于没有显著方向性的有限震源,Chen等(2010)基于三维区域速度结构和有限差分格林函数,给出了中小地震( $2.5 \leq M_L \leq 5.0$ )真实断层面;尽管三维速度结构下的有限差分格林函数不能精确地确定FMT解,但是它能够给出任何不受破裂方向性约束的中小地震真实的断层面。

### 3 结论

运用地震学的方法定量分析地震震源运动学参数对深入剖析地震本身、区域构造,以及评估地震危险性都具有重要意义。随着全世界范围内地震台站数量的快速增加,对地震震源机制的了解也向更细致和更深入的方向发展。特别是近年发展起来的新技术和新方法,无论是对强震的破裂方向和破裂过程的研究(Ishii et al, 2005; Ji et al, 2003, 2004),还是对获取中小地震点源机制解到有限破裂参数(Chen et al, 2010; Tan et al, 2007; Zhu et al, 1996)等方面都取得了显著进展。

对于破裂尺度在百千米以上量级的大地震,研究破裂在有限尺度的断层面上的传播过程能够增进对震源区应力状态及介质非均匀性的了解。1983年Hartzell等地震学家(1983)开始研究如1979年发生在美国加利福尼亚州的Imperial Valley这种中强以上地震的有限滑动分布。之后近30年,又从单独采用地震观测资料发展到结合GPS、InSAR或光学数据用于有限断层滑动分布研究中。除此之外,基于高频地震波辐射能量的反向投影法和SSA方法也取得了很大进展,用这些方法曾快速而有效地评估出了几次大地震的破裂特性。

相比大地震,对于中小地震,研究其有限震源破裂过程就要困难得多,震源运动学研究侧重于对震源机制的研究。对于小地震,从利用P波初动确定震源机制发展到采用网格搜索的方法,将理论计算和实际观测P波、SV波、SH波的初动和振幅比矛盾最小化的同时求解震源的辐射花样;中小地震破裂方向的判定则基于经验格林函数方法,反卷积求取方位角上震源的时间函数;CAP方法也在处理近震和区域地震波形的基础上扩展到基于远震体波的方法,以及近震波形和远震波形联合反演的CAPjoint方法。

总而言之,震源运动学参数的获取取决于地球内部三维波速结构、建模方法、数据覆盖以及噪声水平(Hjörleifsdottir et al, 2010)。震源参数系统性误差会使通过层析成像所得到的地球内部结构严重地偏离由初始震源参数决定的地球模型。因此,地震学家有必要同时进行反演地震震源参数和地球内部结构研究(Valentine et al, 2010)。地震图携带着来自震源和地球介质的大量信息,是认识地球内部结构的重要途径,在多大程度上有效地从地震波中提取尽量多的信息并加以利用,决定了我们认识震源和地球介质的能力。

### 参考文献

- 黄建平、倪四道、傅容珊等,2009,综合近震及远震波形反演2006汶川地震( $M5.1$ )的震源机制解,地球物理学报,52(1),120~130。
- 胡幸平、俞春泉、陶开等,2008,利用P波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解,地球物理学报,51(6),1711~1718。
- 胡新亮、刁桂苓、马瑾等,2004,利用数字地震记录的P、S波振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性分析,地震地质,26(2),347~354。
- 梁尚鸿、李幼铭、束沛镒等,1984,利用区域地震台网P、S波振幅比资料测定小震震源参数,地球物理学报,27(3),247

~257。

- 刘瑞丰、陈运泰、周公威等,1999,地震矩反演在地震快速反应中的应用,地震学报,21(2),115~122。
- 韦生吉、倪四道、崇加军等,2009,2003年8月16日赤峰地震:一个可能发生在下地壳的地震?地球物理学报,52(1),111~119。
- 王卫民、赵连锋、李娟等,2008,四川汶川8.0级地震震源过程,地球物理学报,51(5),1403~1410。
- 谢富仁、崔效锋、赵建涛等,2004,中国大陆及邻区现代构造应力场分区,地球物理学报,47(4),654~662。
- 许力生、陈运泰,1999,1997年中国西藏玛尼 $M_s$ 7.9地震的时空破裂过程,地震学报,21(5),449~459。
- 许忠淮、阎明、赵仲和,1983,由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向,地震学报,5(3),268~279。
- 许忠淮,2001,东亚地区现今构造应力图的编制,地震学报,23(5),492~501。
- 徐志国、刘瑞丰、任泉等,2007,中国地震台网中心与美国哈佛大学快速震源机制解的对比,地震地磁观测与研究,28(4),1~6。
- 姚振兴、郑天愉,1994,地震波传播理论和应用研究,地球物理学报,37(A01):160~171。
- 姚振兴、郑天愉、温联星,1994,用P波波形资料反演中强地震地震矩张量的方法,37(1):37~44。
- 姚振兴、纪晨,1997,时间域内有限地震断层的反演方法,地球物理学报,40(5),691~701。
- 俞春泉、陶开、崔效锋等,2009,用格点尝试法求解P波初动震源机制解及解的质量评价,地球物理学报,52(5),1402~1411。
- 张勇、冯万鹏、许力生、周成虎等,2008,2008年汶川大地震的时空破裂过程,中国科学(D),38(10),1186~1194。
- 张勇,2008,震源破裂过程反演方法研究[博士论文],北京大学,地球物理系,1~158。
- 张永久、程万正,2007,用 $\bar{P}$ - $\bar{S}$ 波速度振幅比求小震机制解的可行性研究,中国地震,23(4),366~374。
- 周仕勇、陈晓非、刘金朝等,2003,近震源破裂过程反演研究-I.方法与数字试验,中国科学(D),33,482~495。
- Aki K, Richards P G, 1980, Quantitative seismology: theory and methods, W. H. Freeman, San Francisco, 932 pp.
- Ammon C J, Velasco A A, Lay T, 1993, Rapid estimation of rupture directivity: Application to the 1992 Landers ( $M_s = 7.4$ ) and Cape Mendocino ( $M_s = 7.2$ ), California earthquake, Geophys Res Lett, 20(2), 97~100.
- Ammon C J, Velasco A A, Lay T, 2006, Rapid estimation of first-order rupture characteristics for large earthquakes using surface waves: 2004 Sumatra-Andaman earthquake, Geophys Res Lett, 33(14), L14314.
- Ammon C J, Ji C, Thio H K et al, 2005, Rupture Process of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake, Science, 308(5725), 1133~1139.
- Auger E, D'Auria L, Martini M et al, 2006, Real-time monitoring and massive inversion of source parameters of very long period seismic signals: an application to Stromboli Volcano, Italy, Geophys Res Lett, 33(4), L04301.
- Backus G E, Mulcahy M, 1976a, Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources-I. Continuous displacements, Geophys J Int, 47(2), 301~329.
- Backus G E, Mulcahy M, 1976b, Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources-I. Continuous displacements, Geophys J Int, 46(2), 341~361.
- Balakina L M, Savarensky E F, Vvedenskaya A V, 1961, On determination of earthquake mechanism, Physics and Chemistry of The Earth, 4, 211~216.
- Ben-Menahem A, 1961, Radiation of seismic surface-waves from finite moving sources, Bull Seism Soc Am, 51(3), 401~435.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, J Geophys Res, 75(26), 4997~5002.
- Cerveny V, Molotkov I A, Psencik I, 1977, Ray method in seismology, University of Karlova, Prague.
- Chen P, Jordan T H, Zhao L, 2005, Finite-moment tensor of the 3 September 2002 Yorba Linda earthquake, Bull Seism Soc Am, 95(3), 1170~1180.
- Chen P, Jordan T H, Zhao L, 2010, Resolving fault plane ambiguity for small earthquakes, Geophys J Int, 181(1), 493~501.
- Chen Y T, Xu L S, Li X et al, 1996, Source process of the 1990 Gonghe, China, earthquake and tectonic stress field in the northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau, Pure Appl Geophys, 146(3/4), 697~715.
- Cormier V F, Richards P G, 1977, Full wave theory applied to a discontinuous velocity increase: the inner core boundary, J Geophys, 43, 3~31.

- Dreger D S , Helmberger D V , 1993 , Determination of source parameters at regional distances with 3-component sparse network data , *J Geophys Res* , **98**( B5 ) , 8107 ~ 8125.
- Dziewonski A M , Chou T A , Woodhouse J H , 1981 , Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity , *J Geophys Res* , **86**( B4 ) , 2825 ~ 2852.
- Fuchs K , Muller G , 1971 , Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations , *Geophys J Int* , **23**( 4 ) , 417 ~ 433.
- Gee L S , Jordan T H , 1992 , Generalized seismological data functionals , *Geophys J Int* , **111**( 2 ) , 363 ~ 390.
- Gephart J W , 1990 , Stress and the direction of slip on fault planes , *Tectonics* , **9**( 4 ) , 845 ~ 858.
- Gephart J W , 1985 , Principal stress directions and the ambiguity in fault plane identification from focal mechanism , *Bull Seism Soc Am* , **75**( 2 ) , 621 ~ 625.
- Graves R W , 1996 , Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences , *Bull Seism Soc Am* , **86**( 4 ) , 1091 ~ 1106.
- Hardebeck J L , Shearer P M , 2002 , A new method for determining first-motion focal mechanisms , *Bull Seism Soc Am* , **92** , 2264 ~ 2276.
- Hardebeck J L , Shearer P M , 2003 , Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquake , *Bull Seism Soc Am* , **93** , 2434 ~ 2444.
- Harkrider D G , 1964 , Surface waves in multilayered elastic media I. Rayleigh and Love from buried sources in a multilayered elastic half-space , *Bull Seism Soc Am* , **54**( 2 ) , 627 ~ 679.
- Hartzell S H , Heaton T H , 1983 , Inversion of strong-motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley , California , earthquake , *Bull Seism Soc Am* , **73**( 6 ) , 1553 ~ 1583.
- Hartzell S H , 1978 , Earthquake aftershocks as Green's functions , *Geophys Res Lett* , **5**( 1 ) , 1 ~ 4.
- Harris R A , 1998 , Introduction to special session: stress triggers , stress shadows , and implications for seismic hazard , *J Geophys Res* , **103**( B10 ) , 24347 ~ 24358.
- Haskell N A , 1963 , Radiation pattern of Rayleigh waves from a fault of arbitrary dip and direction of motion in a homogeneous medium , *Bull Seism Soc Am* , **53**( 3 ) , 619 ~ 642.
- Haskell N A , 1964 , Radiation pattern of surface waves from point sources in a multi-layered medium , *Bull Seism Soc Am* , **54**( 1 ) , 377 ~ 393.
- Helmberger D V , 1968 , The crust-mantle transition in the Bering Sea , *Bull Seism Soc Am* , **58**( 1 ) , 179 ~ 214.
- Hjörleifsdóttir V , Ekström G , 2010 , Effects of the three-dimensional Earth structure on CMT earthquake parameters , *Physics of the Earth and Planetary Interiors* , **179**( 3 ~ 4 ) , 178 ~ 190.
- Hwang R D , Yu G K , Wang J H , 2001 , Rupture directivity and source-process time of the September 20 , 1999 Chi-Chi , Taiwan , earthquake estimated from Rayleigh-wave phase velocity , *Earth Planets Space* , **53**( 12 ) , 1171 ~ 1176.
- Ishii M , Shearer P M , Houston H et al , 2007 , Teleseismic P wave imaging of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman and 28 March 2005 Sumatra earthquake ruptures using the Hi-net array , *J Geophys Res* , **112**( B11 ) , B11307.
- Ishii M , Shearer P M , Houston H et al , 2005 , Extant , duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array , *Nature* , **435**( 7044 ) , 933 ~ 936.
- Ito Y , Sekiguchi S , Okada T et al , 2006 , Performance of regional distance centroid moment tensor inversion applied to the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake , Japan , *Geophys J Int* , **167**( 3 ) , 1317 ~ 1331.
- Ji C , Helmberger D V , Wald D J , 2004 , A teleseismic study of the 2002 Denali fault , Alaska , earthquake and implications for rapid strong-motion estimation , *Earthquake Spectra* , **20**( 3 ) , 617 ~ 637.
- Ji C , Wald D J , Helmberger D V , 2002b , Source description of the 1999 Hector Mine , California , earthquake , part II: Complexity of slip history , *Bull Seism Soc Am* , **92**( 4 ) , 1208 ~ 1226.
- Ji C , Wald D J , Helmberger D V , 2002a , Source description of the 1999 Hector Mine , California , earthquake , part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis , *Bull Seism Soc Am* , **92**( 4 ) , 1192 ~ 1207.
- Ji C , Helmberger D V , Wald D J et al , 2003 , Slip history and dynamic implications of the 1999 Chi-Chi , Taiwan , earthquake ,

- J Geophys Res , **108** (B9) , 2412.
- Kao H , Shan S , 2007 , Rapid identification of earthquake rupture plane using Source-Scanning Algorithm , *Geophys J Int* , **168** (3) , 1011 ~ 1020.
- Kawakatsu H , 1998 , On the realtime monitoring of the long-period seismic wavefield , *Bull Earthquake Res Inst* , **73** (3 ~ 4) , 267 ~ 274.
- Kelly K R , Ward R , Treitel S et al , 1976 , Synthetic seismograms: a finite difference approach , *Geophysics* , **41** (1) , 2 ~ 27.
- Kikuchi M , Kanamori H , 1982 , Inversion of complex body waves I , *Bull Seism Soc Am* , **72** (2) , 491 ~ 506.
- Kikuchi M , Kanamori H , 1986 , Inversion of complex body waves II , *Phys Earth Planet Interiors* , **43** (3) , 205 ~ 222.
- Kikuchi M , Kanamori H , 1991 , Inversion of complex body waves III , *Bull Seism Soc Am* , **81** (6) , 2335 ~ 2350.
- Kilb D , Hardebeck J L , 2006 , Fault parameter constraints using relocated earthquakes: A validation of first-motion focal-mechanism data , *Bull Seism Soc Am* , **96** (3) , 1140 ~ 1158.
- Kisslinger C , 1980 , Evaluation of S to P amplitude ratios for determining focal mechanisms from regional network observations , *Bull Seism Soc Am* , **70** (4) , 999 ~ 1014.
- Komatitsch D , Liu Q , Tromp J et al , 2004 , Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon spectral-element method , *Bull Seism Soc Am* , **94** (1) , 187 ~ 206.
- Krüger F , Ohrnberger M , 2005 , Tracking the rupture of the  $M_w = 9.3$  Sumatra earthquake over 1150 km at teleseismic distance , *Nature* , **435** (7044) , 937 ~ 939.
- Langston C A , Helmberger D V , 1975 , A procedure for modeling shallow dislocation sources , *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* , **42** (1) , 117 ~ 130.
- Langston C A , 1981 , Source Inversion of seismic waveforms: The Koyna , India , earthquakes of 13/09/1967 , *Bull Seism Soc Am* , **71** (1) , 1 ~ 24.
- Langston C A , Barker J , Pavlin G , 1982 , Point-source inversion techniques , *Phys Earth Plane Inter* , **30** (2) , 228 ~ 241.
- Larmat C , Montagner J P , Fink M et al , 2006 , Time-reversal imaging of seismic sources and application to the great Sumatra earthquake , *Geophys Res Lett* , **33** (19) , L19312.
- McCloskey J , Nalbant S S , Steacy S et al , 2003 , Structural constraints on the spatial distribution of aftershocks , *Geophys Res Lett* , **30** (12) , 1610.
- McGuire J J , Zhao L , Jordan T H , 2001 , Teleseismic inversion for the second-degree moments of earthquakes , *Geophys J Int* , **145** (3) , 661 ~ 678.
- Michael A J , 1987 , Use of focal mechanisms to determine stress: a control study , *J Geophys Res* , **92** , 357 ~ 368.
- Nakamura M , 2002 , Determination of focal mechanism solution using initial motion polarity of P and S waves , *Phys Earth Planet Inter* , **130** (1 ~ 2) , 17 ~ 29.
- Ni S , Kanamori H , Helmberger D , 2005 , Energy radiation from the Sumatra earthquake , *Nature* , **434** (7033) , 582.
- Parsons T , 2005 , Significance of stress transfer in time-dependent earthquake probability calculations , *J Geophys Res* , **110** (B5) , B05S02.
- Ruff L , Kanamori H , 1983 , The rupture process and asperity distribution of three great earthquakes from long-period diffracted P-wave , *Phys Earth Planet Inter* , **31** (3) , 202 ~ 230.
- Shearer P M , 1998 , Evidence from a cluster of small earthquakes for a fault at 18 km depth beneath Oak Ridge , southern California , *Bull Seism Soc Am* , **88** (6) , 1327 ~ 1336.
- Smith W D , 1975 , The application of finite element analysis to body wave propagation problems , *Geophys J Int* , **42** (2) , 747 ~ 768.
- Steacy S , Nalbant S S , McCloskey J et al , 2005 , Onto what planes should Coulomb stress perturbations be resolved? *J Geophys Res* , **110** (B5) , B05S15.
- Tajima F , Megnin C , Dreger D S et al , 2002 , Feasibility of real-time broadband waveform inversions for simultaneous moment tensor and centroid location determination , *Bull Seism Soc Am* , **92** (2) , 739 ~ 750.
- Tan Y , Helmberger D , 2007 , A new method for determining small earthquake source parameters using short-period P waves , *Bull*

- Seism Soc Am , **97**(4) , 1176 ~ 1195.
- Tan Y , Helmberger D , 2010 , Directivity of Big Sequence , Bull Seism Soc Am , accepted.
- Tsuokuoka H , Kawakatsu H , Urabe T , 2009 , GRiD MT ( Grid-based Realtime Determination of Moment Tensors ) monitoring the long-period seismic wavefield , Phys Earth Planet Int , **175**(1 ~ 2) , 8 ~ 16.
- Valentine A , Woodhouse J H , 2010 , Reducing errors in seismic tomography: combined inversion for source and structure , Geophys J Int , **180**(2) , 847 ~ 857.
- Walker K T , Ishii M , Shearer P M , 2005 , Rupture details of the 28 March 2005 Sumatra  $M_w$  8.6 earthquake imaged with teleseismic P waves , Geophys Res Lett , **32**(24) , L24303.
- Yin Z M , 1996 , An improved method for the determination of the tectonic stress field from focal mechanism data , Geophys J Int , **125**(3) 841 ~ 849.
- Zhao L S , Helmberger D V , 1994 , Source Estimation from Broad-Band Regional Seismograms , Bull Seism Soc Am , **84**(1) , 91 ~ 104.
- Zhu L , Rivera L A , 2002 , A note on the dynamic and static displacements from a point source in multi-layered media , Geophys J Int , **148**(3) , 619 ~ 627.
- Zhu L , Helmberger D V , 1996 , Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms , Bull Seism Soc Am , **86**(5) , 1634 ~ 1641.

## Advances in study of seismic source kinematics

*Liu Ning*<sup>1 2)</sup> *Chen Qifu*<sup>2)</sup> *Wei Shengji*<sup>3)</sup> *Chen Yong*<sup>2)</sup>

1) Institute of Geophysics , China Earthquake Administration , Beijing 100081 , China

2) Institute of Earthquake Science , China Earthquake Administration , Beijing 100036 , China

3) California Institute of Technology , Pasadena CA91125 , USA

**Abstract** Based on the four models of isotropic point source , centroid moment tensor , finite moment tensor and fault slip distribution from simplicity to complexity , this paper summarizes different methods in study of seismic source kinematics.

**Key words:** Seismic Source Kinematics CAP FMT Fault Slip Distribution Body-wave Inversion