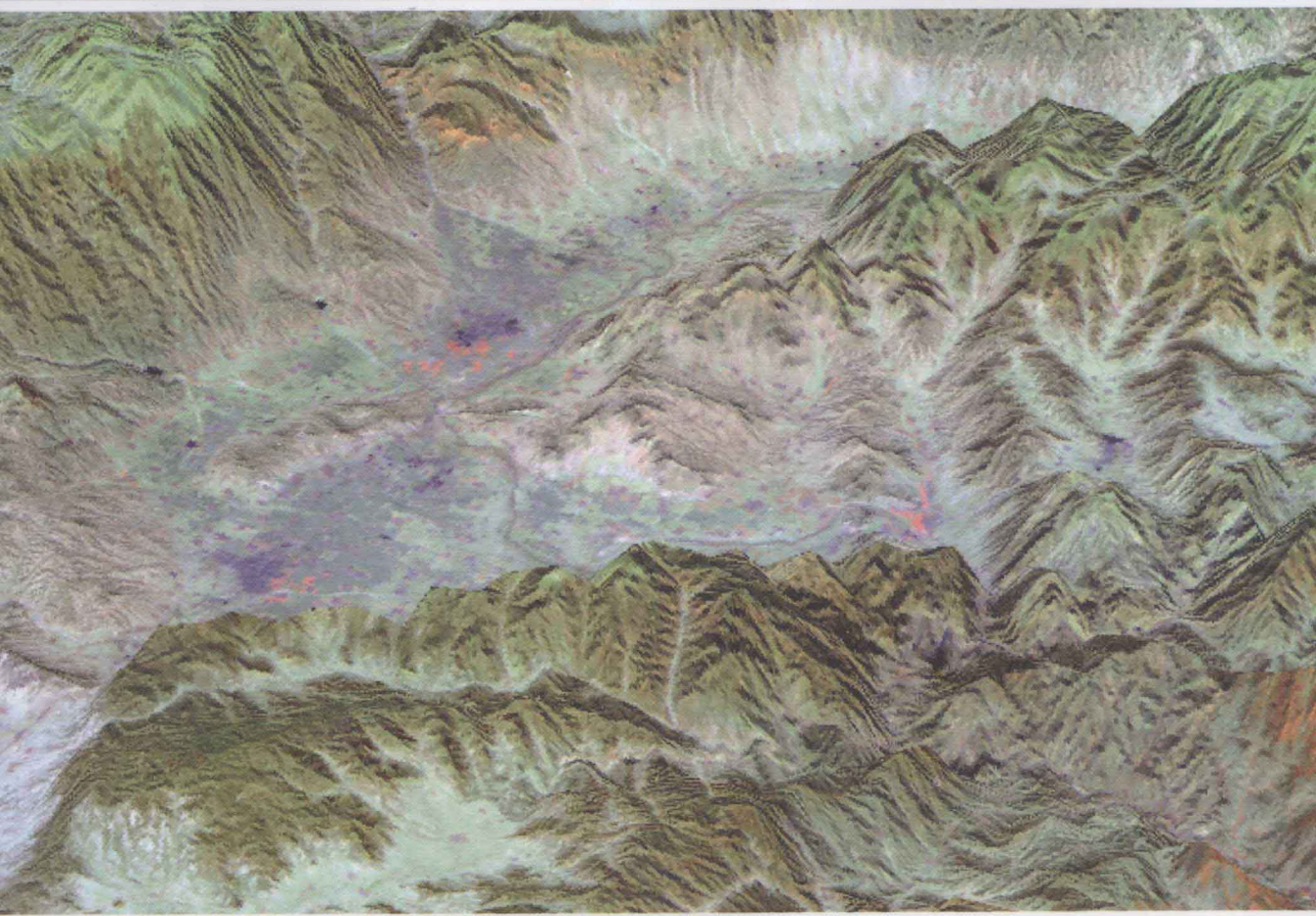


地壳构造与地壳应力文集

中国地震局地壳应力研究所 编



地震出版社

地壳构造与地壳应力文集(23)

中国地震局地壳应力研究所 编

地震出版社

2011

图书在版编目(CIP)数据

地壳构造与地壳应力文集(23)/中国地震局地壳应力研究所编.

—北京:地震出版社,2011.12

ISBN 978-7-5028-3961-1

I. ①地… II. ①中… III. ①地壳构造—文集 ②构造地应力—文集

IV. ①P313.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 247486 号

地震版 XM2180

内 容 提 要

本书为中国地震局地壳应力研究所连续性学术论文集的第 23 集。全书包括地震地质、工程地震、地下流体和钻孔应力应变前兆观测等方面的内容。

本书可供地震地质、工程地质、地应力测量技术与应用、地震监测预报和地震救援等领域的人员及有关大专院校的师生阅读。

地壳构造与地壳应力文集(23)

中国地震局地壳应力研究所 编

责任编辑:刘晶海

特邀编辑:张宝红

责任校对:庞亚萍

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:88421706

门市部:68467991

传真:68467991

总编室:68462709 68423029

传真:68455221

专业图书部:68467982 68721991

网址: <http://www.dzpress.com.cn>

经销:全国各地新华书店

印刷:北京鑫丰华彩印有限公司

版(印)次:2011 年 12 月一版 2011 年 12 月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:256 千字

印张:10

印数:001~500

书号:ISBN 978-7-5028-3961-1/P(4632)

定价:20.00 元

版权所有,翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

目 录

各向异性 ATI 介质地震矩张量研究	蔡晓刚 (1)
各向异性介质断层震源等效体力	蔡晓刚 (15)
流体饱和多孔介质中弹性波传播问题的研究进展	王华青等 (28)
北京昌平地区小震活动的孔隙压力扩散特征	许丽卿等 (35)
基于极值理论对华北地区的地震危险性的估计	王玉婷等 (43)
华北地区第四纪逆冲断层及构造运动和构造应力场的演变	王 瑛 (49)
北京地区晚第三纪活动的北东向走滑大断裂带的初步研究	
——根据人工地震资料中的花状构造的解译	杨承先等 (68)
汉中盆地第四纪地质地貌初步研究	扈桂让等 (77)
青藏高原隆升及构造变形模式的数值模拟研究综述	叶际阳等 (86)
锦州台体应变观测受钻孔条件影响的分析	马京杰等 (106)
钻孔四分量应变仪观测的汶川地震的同震应变阶	唐 磊等 (114)
昌平台站一次“不寻常”的水位干扰异常落实	宋朝忠等 (125)
地壳所三马坊水温前兆映震效能和异常机制初步研究	张 彬等 (133)
重庆无人值守钻孔应变观测台站运行实践	陈 敏等 (139)
大震能够成功监测预报理论基础与前兆论据	陈学波等 (145)

Content

An introduction to seismic moment tensor research in ATI	
anisotropic media	Cai Xiaogang (14)
Equivalent body-forces and static deformation of fault sources for	
anisotropic medium	Cai Xiaogang (27)
Review of the investigation of elastic-wave propagation in a	
fluid-saturated porous solid	Wang Huaqing, Tian Jia-yong (34)
Analysis of pore pressure diffusion characteristics of microseismicity in	
Changping, Beijing	Xu Liqing Liu Yaowei (42)
Seismic hazard estimation in North China based on the extreme value theory	
.....	Wang Yuting Lv Yuejun Fang Yi Xu Dandan (48)
The Quaternary reverse faults, tectonic movement, and evolution of	
tectonic stress field in the North China region	Wang Ying (67)
A preliminary study on the great late tertiary NE-trending strike-slipping faults	
in Beijing area-Interpretation of the flower structures from seismic sounding	
data equivalent body-forces and static deformation	
.....	Yang Chengxian Yu Shene Zhao Junxiang (76)
A preliminary Quaternary geological and geomorphic study of Hanzhong Basin	(85)
Review of numerical simulation on the uplift and tectonic deformation pattern of Tibetan	
plateau	Ye Jiyang Chen Lianwang Li Yujiang Zhan Zimin Li Yan (105)
Analysis of volume strain observations affected by drilling conditions at Jinzhou	
station	Ma Jingjie Li Hailiang Li Zhe Ma Xiangbo (113)
Coseismic strain steps of the Wenchuan earthquake observed with YRY-4	
4-component borehole strainmeters	(124)
Investigation into an unusual water level anomaly at the Changping station	
.....	Song Chaozong Liu Fusheng Zhang Guohong Yang Xuanhui Liu Yanzhi (131)
A preliminary study on the prediction capability of groundwater temperature precursor	
and the mechanism of anomalous phenomena at San Mafang Station, Institute of	
Crustal Dynamics	Zhang Bin Yang Xuanhui Liu Yaowei Liu Yongming (138)
Operation of the unmanned Chongqing borehole strain observation stations	
.....	Chen Min Guo Weiyong Tang Xiaoyong Li Guangke Tan Jun (144)
The theoretical basis and precursor evidence for the success of monitoring and prediction	
of great earthquakes	Chen Xuebo Zhang Guanwei Chen Xugeng (155)

各向异性 ATI 介质地震矩张量研究*

蔡晓刚

(中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

摘 要 回顾了地震矩张量研究的意义、国内外研究历史和发展动态,在此基础上,介绍了各向异性 ATI 介质地震矩张量的研究意义、思路和应用前景。初步研究显示各向异性地震矩张量能提供震源区各向异性的信息,将各向同性介质地震矩张量拓展到各向异性介质地震矩张量具有较为重要的价值。

一、各向异性 ATI 介质的基本概念和研究基础

横向各向同性介质(transversely isotropic media)的基本特征是具有一个对称轴,在地理坐标系下,依据其对称轴的不同取向,可以分为 VTI 介质(transversely isotropic media with the vertical axis of symmetry)、HTI 介质(transversely isotropic media with the horizontal axis of symmetry)、TTI 介质(transversely isotropic media with the titled axis of symmetry)和 ATI 介质(transversely isotropic media with the arbitrary orientation axis of symmetry)。在这几种分类中,VTI 的对称轴沿着空间地理坐标系下的 Z 轴,HTI 介质的对称轴位于水平的 XOY 平面内;TTI 介质是一种特殊的倾斜 TI 介质,其对称轴位于路径面;ATI 介质是最一般的 TI 介质,在空间地理坐标系下其对称轴是任意倾斜的。图 1 给出了空间地理坐标系下 ATI 介质的基本模型,其中 $n(\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta)$ 为 ATI 介质对称轴的方向余弦, θ 和 φ 分别是对称轴的极角和方位角; $n_c(\sin\theta_c\cos\varphi_c, \sin\theta_c\sin\varphi_c, \cos\theta_c)$ 为相传播矢量的方向余弦, θ_c 和 φ_c 分别是相传播矢量的极角和方位角。为了研究问题的方便,取路径坐标系为空间地理坐标系下的 XOZ 平面,于是有:

$$n_1 = \sin\theta\cos\varphi$$

$$n_2 = \sin\theta\sin\varphi$$

$$n_3 = \cos\theta$$

针对 TI 介质,有下面不同的特殊形式:

(1)VTI: $\theta=0, \varphi=0, n=(0, 0, 1)$, 对称轴是 Z 轴;

(2)HTI: $\theta=\frac{\pi}{2}, \varphi=0, n=(1, 0, 0)$, 对称轴是 X 轴;

(3)HTI: $\theta=\frac{\pi}{2}, \varphi=\frac{\pi}{2}, n=(0, 1, 0)$, 对称轴是 Y 轴;

* 基金项目: 中国地震局地壳应力研究所中央公益性基本科研业务专项 ZDJ2010-01 资助。

- (4) HTI: $\theta = \frac{\pi}{2}$, φ 任意值, $n = (\cos\varphi, \sin\varphi, 0)$, 对称轴位于 XOY 平面内;
- (5) TTI: θ 任意值, $\varphi = 0$, $n = (\sin\theta, 0, \cos\theta)$, 倾斜对称轴位于 XOZ 平面内;
- (6) ATI: θ 任意值, φ 任意值, $n = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta)$, 任意倾斜 TI 介质。

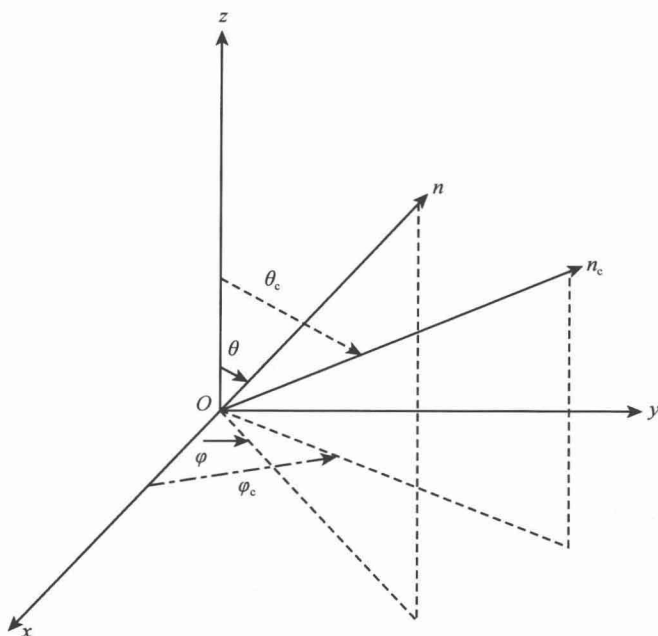


图 1 ATI 介质基本模型

从上面可以看到, ATI 介质是最一般的 TI 介质。中国地震局地质研究所姚陈较早提出此模型, 并针对此模型作了大量的工作, 其涉及弹性常数(姚陈等, 2009)、速度特征描述、偏振解析解和理论地震图的计算等(姚陈等, 2004)。而下文提出的各向异性 ATI 介质地震矩张量正是建立在姚陈上述工作基础之上的。

本文首先叙述了地震矩张量的研究意义, 然后回顾了地震矩张量研究历程以及非双力偶机制研究, 引出了各向异性震源和各向异性 ATI 介质地震矩张量, 阐明了研究意义, 最后讨论了研究中所面临的问题以及下一步的工作。

二、地震矩张量研究的意义

地震学的中心任务是通过地表观测的地震数据去探测地球的内部结构和震源区的物理过程。一般而言, 地表记录的地震图是震源、传播介质的共同响应(忽略观测仪器的影响), 从实际地震图上区分震源效应和传播介质效应是一件很困难的事情, 特别是当传播介质和震源都很复杂时, 震源和传播介质的效应更难区分。为了研究问题的方便, 地震学

家们提出了两个重要物理概念, 其一是描述传播介质弹性动力学响应的格林函数; 其二就是描述地震点源的地震矩张量, 于是地表位移可以表示为 6 个矩张量元素、10 个基本格林函数以及接收方位三角函数之间的线性关系(Jost et al., 1989; Minson et al., 2007)。

如果所观测的地震波波长远远大于震源所涉及的尺度, 则该震源可以看成地震点源(Aki et al., 1980, 2002), 利用点源的叠加可合成有限尺度的运动源(Olson et al., 1982; 姚振兴等, 1984; 盖增喜等, 2007), 因此地震点源是震源研究的基础, 其最一般的表述是地震矩张量(本文地震矩张量均是指二阶张量, 不涉及高阶矩张量)。除了少数震源(Kanamori et al., 1981), 大部分震源无论是剪切位错源、张裂源还是体积分源均可以用地震矩张量来表达(Aki et al., 2002; 陈运泰等, 2000), 其并不预先假定断层是否存在, 因此地震矩张量可用来表示许多类型的震源, 如天然地震、火山地震、矿震、声发射源、地下核爆破源和水力压裂源等。大体上讲, 地震矩张量的研究主要涉及下面的课题:

(1)快速确定天然地震的震源机制(Gilbert et al., 1975; Dziewonski et al., 1981; Sipkin, 1982; 1994; Dreger et al., 1993; Kawakatsu, 1991; 陈运泰等, 1992; 郑天愉等, 1994; 刘瑞丰等, 2000; 许力生等, 1999; 陈运泰等, 2008; 王卫民等, 2008)。例如汶川地震后, 中国地震局地球所陈运泰领导的研究小组、美国哈佛大学和美国地质调查局等国内外机构在较短的时间内通过地震矩张量反演的方法快速确定了震源机制, 为后续余震预测、地震危险性评估和防震救灾提供了第一手资料。

(2)研究火山地震的机理(Julian, 1983; Chouet, 1986; 1996; Dreger et al., 2000)。火山地震与地热、岩浆活动以及液体填充的裂缝密切相关, 通过地震矩张量反演有助于探索火山地震的机制。

(3)研究爆炸震源的特征(倪江川等, 1991; Richards et al., 2005; Minson et al., 2008)。如何判断一个事件是核爆破还是天然地震, 利用地震矩张量反演可以给出震源的基本特征, 再结合其他方法, 如地震定位(Waldhauser et al., 2002)、谱比法和 Mb: Ms(Kim, 1998), 大致可判定事件的基本性质(Kim, 1998)。

(4)研究矿山地震的形成机理, 运用地震矩张量的方法来辨别矿震震源的类别以及通过波形连续性观测来给出预警信号(Ford, et al., 2008)。

(5)声发射动态裂纹监测(Ohtsu, 1991), 即通过接收的声发射信号反演裂纹的动态变化, 目前此项技术已运用到美国物理声学公司(PAC)开发的无损检测软件。

(6)水压致裂诱发的微地震研究(Dahm et al., 1998; Ohtsu, 1991)。勘探上对水力压裂过程中诱发的小地震之破裂性质感兴趣(Block et al., 1994), 利用地震矩张量反演可给出微破裂的基本性质。

(7)非双力偶机制的研究。地震的非双力偶机制一直是地震学家关心的问题(Julian, 1983; 1998; Kawakatsu, 1991; 1996; Dreger et al., 2000)。

(8)近场强地面运动模拟和破裂过程反演。对于有限尺度的运动源不能看成点源, 但可以划分成若干子断层, 每个子单元可看成点源即用地震矩张量表达。于是就可以用各个子断层位移叠加的方法来模拟强地面运动以及根据波形资料反演震源破裂过程(Olson et al., 1982)。

(9)在矩张量解并结合其它资料的基础上, 反演区域和全球应力场(Gephart et al.,

1984,; Zoback et al. , 1980; 1989; 许忠淮, 2001)。

地震矩张量的研究还涉及全球地震活动性、深源地震(Kawakatsu, 1991)和视应力等方面的研究。

综上所述,地震矩张量的研究事关防震救灾(含天然地震、火山地震和矿震)、核侦查、材料裂纹动态无损检测以及油气和地热资源开采,涉及地震学基础研究、产品质量检测、国防安全和国家能源战略等多个方面,因此在前人工作基础上继续拓展矩张量方面的研究具有重要的意义。

三、地震矩张量研究历程、非双力偶和各向异性震源

1. 地震矩张量的研究历史

Gilbert(1971)首先将地震矩张量的概念引入到地震学中并用它来计算地震所激发的简正模式(Normal mode),他将地表的位移表示矩张量和格林函数的线性乘积,并给出了由低频位移谱反演地震矩张量的方法(Gilbert, 1973, 1980); Gilbert 和 Dziewonski (1975)利用简正模式理论反演了地震矩张量,并奠定了后来哈佛大学矩心矩张量解(CMT)的重要理论基础; McCowan(1976)利用地震矩张量来表达面波位移; Kanamori 和 Given(1981)、Patton 和 Aki(1979)利用长周期面波资料反演了地震矩张量;此外, Dziewonski 等(1981)用长周期的体波和地幔面波资料反演了地震矩张量;值得指出的是 Dziewonski 等(1981)是地震矩张量反演的最重要的参考文献,在其计算理论地震图中,利用简正模叠加的方法获得合成波形,在其 CMT(Centroid-moment-tensor solution)解中,假设了地震矩张量的迹等于 0 作为约束(Ekstrom, et al. , 2005);此外, NEIC 的 Sipkin (1982, 1994)用 WKB 方法模拟观测波形,用长周期 P 波资料并根据 optimal filter design 的理论实时反演了地震矩张量; Dreger 和 Helmberger (1993)最初利用广义射线方法,后来使用频率慢度积分方法来拟合波形,并使用区域波形数据反演了震源参数,推动了加州大学矩张量反演的工作; Jost 和 Hermann(1989)针对地震矩张量理论和应用作了很全面的综述。

在国内,陈运泰、姚振兴等领导的研究小组一直从事地震矩张量的研究,其中倪江川等(1991)介绍了地震矩张量的基本理论和反演方法,陈运泰等(1992)对地震矩张量的基本概念、分解、基本坐标系变化和反演方法作了详细的讨论;郑斯华和铃木次郎(1992)反演了西藏高原及其周围地区地震的地震矩张量,并发现有些地震的地震矩张量明显地偏离双力偶机制;郑天愉和姚振兴(1994)对中国台湾省以东地区地震矩张量作了研究,发现两次大地震系列中首发事件的地震矩张量都存在明显的体积收缩分量;Chen 等(1996)利用数字化宽频带波形资料反演了青海共和地震的震源过程;陈培善(1995)对地震矩张量作了综述;刘瑞丰等(1997)利用广义射线理论反演了一般震源的地震矩张量并发现:新疆若羌、滇缅边境和台湾海峡 3 次地震均存在不同程度的非双力偶分量;许力生和陈运泰(1999)研究了西藏玛尼地震的时间—空间过程;刘瑞丰等(2000)用高阶地震矩张量反演了西藏玛尼地震;陈运泰等(2000)在《数字地震学》中详细介绍了地震矩张量;纵观上述,在 20 世

纪 70 年代早期和中期,地震学家主要是奠定了地震矩张量的基本概念,而在 70 年代末和 80 年代,主要是通过地震的实际波形数据(体波、面波和自由振荡)反演地震矩张量,以致成为一种确定震源机制的常规方法(Kawakatsu, 1996)。在众多地震矩张量反演工作中,一般都假定地震矩张量的各向同性分量为 0,即假定地震矩张量的迹为 0(Dziewonski et al., 1981; Ekstrom et al., 2005),这种预先假设了各向同性分量为 0(即只含有偏量部分)的做法,在反演上可以提高效率(反演的矩张量元素减少为 5 个,如果假设为双力偶机制,则只有 4 个独立的元素)。然而,对于深源地震,由于快速的相变导致可能本身存在各向同性分量(Kawakatsu, 1991, 1996),尽管深源地震的机制目前存在许多争议,但深源地震机制确实与浅源地震不太一样(Knopoff et al., 1971),如果仍然假设地震矩张量的迹为 0 可能会造成错误的认识;此外,在火山和地热地区,震源机制和本身以剪切错动为主的浅源天然地震不一样(Julian et al., 1998),火山地震机制更类似于张裂震源,其涉及岩浆岩的侵入(Julian, 1983; Chouet, 1986, 1996)和热运动;更需要指出:在地下核爆破地震矩张量反演中,如果仍然假定地震矩张量的迹为 0 从理论上讲就存在错误,因为对一个爆破型的地震,各向同性分量本身不为 0。于是,为了适应更一般震源机制的反演,有些地震矩张量反演程序对迹不做限制,即完全地震矩张量反演(陈运泰等, 1992; Minson et al., 2008)。

2. 非双力偶分量和各向异性震源问题

一般而言,地震矩张量在主坐标系下有很多分解方法(Julian et al., 1998; 陈运泰等, 1992),但国际上比较常见的是分解成三个部分,即各向同性部分(ISO, Isotropic component)、双力偶部分(DC, Double-couple component)和补偿线性偶极子部分(CLVD, Compensated linear vector dipole component)。一般称含有 ISO 或 CLVD 的地震为非双力偶地震。迄今为止,非双力偶机制的定量解释仍然是一个难点。传统的地震矩张量理论认为,如果天然地震是由一个剪切位错产生的,那么该机制就称为双力偶机制,这种说法首先隐含了一个预先假设,即震源断层区为各向同性介质(蔡晓刚, 2009),在此假设下才有纯剪切错动等价于双力偶机制的结论,于是,非双力偶机制的解释主要集中于含非剪切滑动分量(Julian, 1983)、多破裂事件的作用(Frohlich, 1994)、断层区的不均匀性(Woodhouse, 1981)、断层面的粗糙和不规则、快速的相变(Kawakatsu, 1991; 1996)和震源深度对格林函数的影响(许力生等, 1997)。理论上,造成非双力偶机制主要来源于两个部分,其一震源本身的特性,比如火山或地热环境(Chouet, 1986; 1996)、深源地震以及核爆破(Dreger et al., 2002; Richards et al., 2005);其二是传播介质的影响,比如格林函数计算的不准确和定位误差等。但实际上,即使在非火山和地热发育的地区发生在浅源的构造地震仍然含有较大的 ISO 和 CLVD 分量,例如 2008 年 5 月 12 日的汶川 8.0 级大地震的各向同性分量达 39%、补偿线性偶极子分量达一 35%,而双力偶分量只有 25%(利用陈运泰研究组的矩张量反演结果计算百分含量),这些非双力偶分量该如何解释呢?

诚然,造成天然地震的非双力偶机制的原因很多(Julian et al., 1998),但为了从一个方面把问题说清楚,下面从震源区各向异性来思考该问题。

现代地震学一个重要的进展是横波分裂现象被广泛观测到(Crampin et al., 2008),

横波分裂现象是因地壳和上地幔存在着对应力变化敏感且广泛分布的微裂隙、裂缝和孔隙, 这些结构等效成各向异性介质, 当横波穿越这些裂缝时, 会分裂成快横波 qS_1 和慢横波 qS_2 (Crampin, 1981), 如果是直立的单组裂缝, 则其中快横波的水平偏振方向沿着裂隙的走向, 慢横波的水平偏振近似垂直于裂隙的走向。在此结论的基础上, 地震学家通过对快波偏振方向和快慢波到时差的测量来了解横波穿越区各向异性的情况, 据此就可了解地区构造应力场和地幔对流的情况, 随着数字地震技术的发展, 横波分裂越来越成为了解地球结构的一个重要工具(陈运泰等, 2000)。

考虑到既然地壳和上地幔广泛存在着各向异性现象, 且各向异性与应力变化较为敏感, 那么作为地震孕育的断层区, 该地区应力集中, 极有可能存在着各向异性, 实际上, 美国南加州大学 Aki 教授生前领导的研究小组对断层区的物理特征进行广泛的研究。传统上把断层面看成一个薄面, 不考虑断层面的厚度, 但大量地质证据表明, 断层区是有一定厚度的(Aki et al., 2002)。酆永刚教授近 20 多年断层导波的工作表明, 美国兰德斯断层厚度大约 100~200 m, 地震波速是断层带外岩石的 40%~50%, Q 值为 10~50, 即断裂带上存在着严重破裂的岩石和低速高衰减带(Li et al., 2001), 而这些断层带内具有优势取向的裂隙会导致横波分裂(Peng et al., 2005), 酆永刚还发现 1992 年兰德斯地震后断层愈合与含水的裂隙重新闭合相关(Li et al., 2001), 因此把震源区介质等效为各向异性是合理的, 于是涉及到复杂的各向异性源的问题, 在国际上, 这个方面的研究一直很困难。较早研究各向异性震源机制的是日本地震学家 Kawasaki, 他研究了剪切位错源下的辐射花样(Kawasaki et al., 1981), 在他们的工作中, 震源球两节线并不相交; 著名理论地震学家 Ben-Menahem 多年来一直从事各向异性震源的理论研究, Ben-Menahem 等(1990)研究了各向异性介质 SH 波的辐射问题; Ben-Menahem 等(1991)还研究了全空间各向异性介质下的格林函数和点源辐射, 但他们的工作重心放在了各向异性格林函数和辐射的计算上, 而对各向异性地震点源的表述即地震矩张量的表达仍然沿用各向同性下的地震矩张量, 如 Ben-Menahem 等(1991)在计算各向异性爆炸震源下的辐射时, 爆炸源的矩张量用的是各向同性介质下的结果; 类似的情况出现在 Gajewski(1993)的工作中, 不过在他的计算中, 剪切位错源辐射的四花瓣并不对称, 但这种不对称恰好是各向异性格林函数造成的, 而不是源本身造成的; 中国地震局地质研究所姚陈研究员利用反射率方法计算了各向异性介质下点位错源辐射(Yao et al., 1993), 在其计算中, 地震矩张量使用了各向同性介质下的情形。英国爱丁堡各向异性研究组(EAP)开发的各向异性理论地震图计算软件 ANSEIS 也假设了震源处于各向同性层(Booth et al., 1983)而不考虑各向异性点源, 其主要原因在于各向异性地震矩张量很难解析表达。Julian 等(1998)指出了震源区的各向异性会造成非双力偶机制, 但未给出数学物理上的解释, 主要原因是很难给出矩张量的解析表达式。近年来, 捷克人 Vavrycuk 及其研究团队研究了各向异性介质下的地震矩张量(Vavrycuk, 2004; 2005; 2006; 2008), 并首次确认了各向异性是造成非双力偶机制的一个重要原因, 但他们仅给出了几个特殊断层面取向下的剪切位错震源地震矩张量表达以及各向同性分量表达式, 对于任意断层面取向和任意类型震源地震矩张量及其各向同性分量解析表达仍然没有给出, 因此在前人工作基础上继承和发展各向异性地震矩张量理论具有重要的意义。

四、各向异性 ATI 介质地震矩张量

断层区(fault Zone)作为裂隙较为发育的地震破碎带,其整体上等效为各向异性介质是合理的。美国南加州大学的 Ben-Zion 带领的研究团队发现横波通过兰德斯和北安纳托利亚断层区时会有明显的横波分裂现象(Peng et al., 2005),这一观测证据表明将震源等效为各向异性是可行的;另外,从汶川科学钻探(许志琴等, 2008)的结果显示,在 585m 之下发现几十米厚的由黑色的断层泥、碎裂岩和断层角砾岩组成的北川—映秀地震断裂带,李海兵^①认为这些破碎岩石显示各向异性是合理的;而且从理论上讲,地震矩密度张量表示为 $m_{ij} = c_{ijkl} \bar{u}_k v_l$, 显示将震源考虑为各向异性也是有理论上的证据。尽管断层区存在一定的厚度且不均匀,但是在点源假设下,震源区介质可等效为一个四阶弹性张量(Aki et al., 2002),因此,在矩张量研究上,将震源等效为各向异性介质从理论、观测到科学钻探都有一定的根据。

正如第一节所述,ATI 介质(Transversely isotropic media with arbitrary orientation axis of symmetry)是具有任意空间取向的横观各向同性介质,其对称轴在空间地理坐标系下可任意取向。姚陈带领的研究团队对此模型做了大量艰苦的工作,其内容主要涉及 ATI 介质弹性常数表述(姚陈等, 2009)、相速度、群速度(郝重涛, 2007)和动校正速度解析表述、偏振解析表述(姚陈等, 2004)、反透射系数(蔡晓刚等, 2009)以及反射率法合成理论地震图(Yao et al., 1993),这些研究为提出各向异性 ATI 介质地震矩张量的理论奠定了坚实的理论基础。

姚陈和蔡明刚(2009)给出了任意空间取向 TI 介质(ATI)四阶弹性张量解析表达式,该表达式具有唯一性、完备性(无需添加任何其它的量来表述)、简洁性和物理意义明确的特点。尽管在此之前,德国学者 Spies(1994)已给出类似的表达式,但不便于运用到矩张量的研究。受姚陈和蔡明刚(2009)工作的启发,我们将 ATI 介质弹性张量解析表达式运用到各向异性地震矩张量的研究,从而解决了 ATI 介质地震矩张量解析表达的问题,其内容包含剪切位错源、张裂源和爆炸震源(蔡晓刚, 2009; 蔡晓刚等, 2011)。式(1)给出了各向异性 ATI 介质剪切位错源地震矩张量:

$$\begin{aligned} m_{kl} = & c_{1212}(\bar{u}_k v_l + \bar{u}_l v_k) + (c_{3333} - c_{1111})n_i n_j n_k n_l \bar{u}_i v_j \\ & + (c_{1133} - c_{1122})(n_k n_l \bar{u}_j v_j + \delta_{kl} n_i n_j \bar{u}_i v_j - 2n_i n_j n_k n_l \bar{u}_i v_j) \\ & + (c_{1313} - c_{1212})(n_i n_j \bar{u}_k v_j + n_k n_j \bar{u}_l v_j + n_l n_i \bar{u}_k v_k + n_k n_i \bar{u}_l v_l - 4n_i n_j n_k n_l \bar{u}_i v_j) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 c_{1122} , c_{1212} , c_{3333} , c_{1111} , c_{1133} 是 TI 介质固有的 5 个弹性常数,并且 $c_{1122} = c_{1111} - 2c_{1212}$ 。 $n = (n_1, n_2, n_3)$ 代表 ATI 对称轴 n 在空间地理坐标系下的方向余弦。

在笛卡尔空间地理坐标系下,断层面法线及其滑动矢量如图 2 所示,假设震源区的各向异性对称轴为 $n = (1, 0, 0)$,断层区的各向异性参数 μ_w 、 η_w 、 γ_w 和 χ_w 分别定义为

$$\mu_w = c_{1212}, \quad \eta_w = [(c_{3333} - c_{1111}) - 2(c_{1133} - c_{1122}) - 4(c_{1313} - c_{1212})], \quad \gamma_w = (c_{1133} - c_{1122}),$$

^① 李海兵, 2009, 中国地震局汶川地震高级研修班学术报告及其讨论。

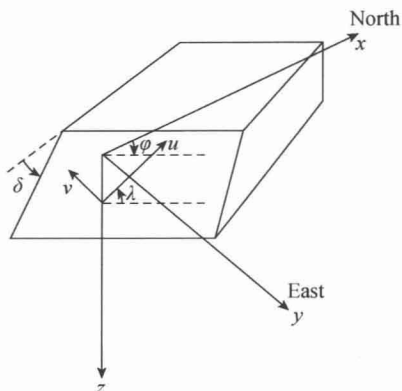


图2 断层面与相关参数定义示意图(据 Jost et al., 1989)

$\chi_w = (c_{1313} - c_{1212})$ 。

是笛卡尔坐标系下各向异性地震矩张量的分量解析表达式为

$$\begin{aligned}
 M_{xx} &= - \left[1 + \frac{(\eta_w + \gamma_w + 4\chi_w)}{2\mu_w} \right] M_0 (\sin\delta \cos\lambda \sin 2\varphi_s + \sin 2\delta \sin\lambda \sin^2 \varphi_s) \\
 M_{xy} &= + \left(1 + \frac{\chi_w}{\mu_w} \right) M_0 (\sin\delta \cos\lambda \cos 2\varphi_s + \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin\lambda \sin 2\varphi_s) \\
 M_{xz} &= - \left(1 + \frac{\chi_w}{\mu_w} \right) M_0 (\cos\delta \cos\lambda \cos \varphi_s + \cos 2\delta \sin\lambda \sin \varphi_s) \\
 M_{yy} &= \left(1 - \frac{\gamma_w}{2\mu_w} \right) M_0 \sin\delta \cos\lambda \sin 2\varphi_s - \left(1 + \frac{\gamma_w}{2\mu_w} \right) M_0 \sin 2\delta \sin\lambda \cos^2 \varphi_s \\
 M_{yz} &= - M_0 (\cos\delta \cos\lambda \sin \varphi_s - \cos 2\delta \sin\lambda \cos \varphi_s) \\
 M_{zz} &= + M_0 \sin 2\delta \sin\lambda - \frac{\gamma_w}{2\mu_w} M_0 (\sin\delta \cos\lambda \sin 2\varphi_s + \sin 2\delta \sin\lambda \sin^2 \varphi_s)
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中 $M_0 = \mu_w u A$, u 为滑动大小, A 为滑动面积, δ 、 λ 和 φ_s 分别代表断层面的倾角、滑动角和方位角。式(2)表明, 如果反演得到了矩张量 6 个独立元素的情况下, 有可能继续获得震源区各向异性参数。

由式(2)还可以看到: $M_{xx} + M_{yy} + M_{zz} \neq 0$, 显示各向同性分量与震源区的各向异性存在定量的关系, 因此从理论上证实非双力偶机制一个重要的因素是各向异性造成的。

五、各向异性 ATI 介质地震矩张量的研究意义

蔡晓刚等(2011)已给出各向异性 ATI 介质剪切位错源地震矩张量, 讨论了震源区各向异性对非双力偶机制的影响。结合前期工作(蔡晓刚, 2009; 蔡晓刚等, 2011), 认为 ATI 介质矩张量的研究意义有如下几点:

(1) 提供监测地震的新手段。式(2)显示通过各向异性 ATI 介质剪切位错源地震矩张

量的反演,不仅能给出断层面解,而且能给出震源区的各向异性参数,其与震源区含液体的微观裂隙孔隙相关,因此有可能通过矩张量反演方法给出震源区各向异性的信息,如果在断裂带周围一定距离内架设台站对余震进行连续波形反演,则有可能跟踪和监测震后震源区各向异性参数的动态变化,而这些参数对震源区应力变化很敏感(Crampin et al., 2008)。

(2)天然地震理论、观测和解释。各向异性剪切位错源对地震波的传播有什么影响?在引入各向剪切位错源的情况下,结合理论地震图的方法来解释实际观测是一个很重要的问题,也是实现各向异性矩张量反演最重要的前提。

(3)解释浅源天然地震的非双力偶机制。浅源天然地震一般认为是沿着断层的剪切错动所产生的能量释放,各向同性介质剪切位错源地震矩张量是不产生各向同性分量(ISO)和补偿线性偶极子分量(CLVD)的。但研究显示:剪切位错源也能激发非双力偶分量,其中各向同性分量与断层区(Fault Zone)各向异性参数、断层区各向异性对称轴、断层面法向矢量和断层滑动方向之间存在着简单线性的乘积关系(蔡晓刚, 2009; 蔡晓刚等, 2011),因此各向异性矩张量提供了从各向异性角度解释剪切位错源激发非双力偶分量的思路。

(4)有助于更精细给出应力场。初步研究显示:在考虑断层区各向异性的情况下,利用地震矩张量分解方法给出的最佳断层面解和实际真实解之间存在着误差,在弱各向异性的情形下,误差在 5° 以内;在强各向异性时,断层面解的误差最大能达到 10° 。因此,在利用震源机制解来反演区域和全球应力场时(Gephart et al., 1984),各向异性会对应力场的结果产生一定的影响,因此开展各向异性矩张量方面的研究有助于更精细地给出地应力场。

(5)解释爆炸源激发横波和面波的问题。初步结果显示,各向异性 ATI 介质爆炸源矩张量在主坐标系下可分解为球形分量和由各向异性参数控制的 CLVD 分量,而 CLVD 分量能激发横波,其强弱决定于震源区的各向异性强弱(蔡晓刚, 2009),此外我们初步模拟结果显示爆炸源三分量理论地震图切向分量与震源区各向异性强弱、对称轴倾角和方位角以及地表接收方位之间存在着一定的对应关系。各向异性 ATI 介质爆炸源地震矩张量为解释区域性震相 Lg 波的切向能量以及核侦查方面的研究(何永峰等, 2005)提供了新机遇。

(6)复合材料的动态无损检测。工业上许多材料是复合材料,显示较强的各向异性,而复合材料声发射检测方面的研究一直很困难,通过各向异性矩张量反演可提供这个方面的研究思路。

此外,各向异性 ATI 介质地震矩张量及其反演研究还涉及到各向异性源的强地面运动模拟、标量地震矩(蔡晓刚, 2009)的重新认识、利用水压致裂诱发声发射信号进行裂纹成像等地震学和石油勘探中若干值得研究的问题。

六、问题和结论

目前,各向异性地震矩张量的研究刚刚起步,理论和实践还不够深入,它的研究主要涉及到3个方面的困难:

第一,波形拟合的问题。在考虑各向异性源的情形下,如何拟合实际地震观测是一个重要的问题,涉及各向异性理论地震图的计算这一较为复杂的课题。

第二,各向异性参数的反演。得到断层面解的同时,如何同时得到震源区各向异性参数,反演方法上有待进一步研究。

第三,各向异性震源和传播介质模型的选取。选择恰当的模型会大大降低正演和反演的难度。

上述三点是有待思考的问题。

尽管存在许多的困难,但相比于其它探测各向异性的方法,通过各向异性矩张量方法直接提供的是震源区各向异性的信息。就监测地震而言,提取震源区更多的信息可能更有利于了解地震是如何成核、破裂和扩展的,因此研究各向异性地震矩张量具有潜在的价值。目前国际上关于各向异性地震矩张量的研究刚刚萌芽,如此难得的历史机遇是推动各向异性震源研究的重要动力。

参 考 文 献

- 蔡晓刚,姚陈,陈晓非.2011.各向异性ATI介质剪切位错源地震矩张量.地球物理学报,54(7): 1772~1782。
- 蔡晓刚,陈晓非.2009.倾斜裂隙反透射系数研究.地球物理学报,52(5): 1253~1262。
- 蔡晓刚.2009.各向异性ATI介质地震矩张量理论研究[博士论文].北京:北京大学地球物理系博士论文。
- 陈培善.1995.地震矩张量及其反演.地震地磁观测与研究,16(5): 19~53。
- 陈运泰,王培德,吴忠良.1992.地震矩张量及其反演.北京:国家地震局地球物理研究所。
- 陈运泰,吴忠良,王培德等.2000.数字地震学.北京:地震出版社。
- 陈运泰,许力生,张勇等.2008.2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告.互联网(<http://www.csi.ac.cn/sichuan>)。
- 盖增喜,陈晓非.2007.利用点源叠加合成有限尺度运动源的理论地震图.北京大学学报(自然科学版),2(4): 1~6。
- 郝重涛.2007.水平界面任意空间取向TI同类反射非双曲时距研究[博士论文].北京:中国地震局地质研究所博士论文。
- 刘瑞丰,陈运泰, Frank Krueger 等.2000.用远场资料反演西藏玛尼地震的高阶地震矩张量.地震学报,22(3): 225~232。
- 刘瑞丰,党京平,方韶东等.1997.用广义射线理论线性反演一般地震点源的地震矩张量.地震学报,19(2): 202~207。
- 倪江川,陈运泰,陈祥熊.1991.地震矩张量及其反演.地震地磁观测与研究,12(5): 1~17。
- 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。

- 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.
- 许志琴, 李海兵, 吴忠良. 2008. 汶川地震和科学钻探. 地质学报, 82(12): 1613~1622.
- 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.
- 姚陈, 蔡明刚. 2009. TI 任意空间取向弹性常数解析表述. 地球物理学报, 52(9): 2345~2348.
- 姚陈, 郝重涛, 王迅. 2004. 任意空间取向介质三类体波速度和偏振解析解, 国际地球物理会议论文集, 591~594.
- 姚振兴, 郑天愉. 1984. 计算综合地震图的广义反射、透射系数矩阵和离散波数方法(二)——对不同深度点源的算法. 地球物理学报, 27(4): 338~347.
- 郑斯华, 铃木次郎. 1992. 西藏高原及其周围地区地震的地震矩张量及震源参数的尺度关系. 地震学报, 14(4): 423~434.
- 郑天愉, 姚振兴. 1994. 中国台湾以东地区地震矩张量研究及其构造意义. 地球物理学报, 37(4): 478~486.
- Aki, k. Richards, P. G. 1980. Quantitative Seismology: theory and methods, W. H. Freeman, San Francisco, CA, USA.
- Aki, k., & Richards, P. G. 2002. Quantitative Seismology, University Science Books, Sausalito, CA, USA.
- Ben-Menahem, A., Sena A. G. 1990. The elastodynamic Green's tensor in anisotropic half-space. *Geophys. J. Int.*, 102: 421~444.
- Ben-Menahem, A., Sena A. G. 1991. Green's tensor and Radiation pattern of point sources in general anisotropic inhomogeneous elastic media. *Geophys. J. Int.*: 107, 297~308.
- Block, L. V., Cheng, C. H. 1994. Seismic imaging using micro earthquakes induced by hydraulic fracturing. *Geophysics* 59: 102~112.
- Booth, D. C., Crampin, S. 1983. The anisotropic reflectivity technique: theory. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 72: 755~766.
- 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 Qinhai-Xizang plateau. *Pure. Appl. Geophys.*, 146: 449~459.
- Chouet, B. 1986. Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method. *J. Geophys. Res.*, 91: 13967~13992.
- Chouet, B. 1996. New methods and future trends in seismological volcano monitoring. in monitoring and mitigation of volcano hazards, pp. 23~97, New York: Springer.
- Crampin, S. 1981. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media. *wave motion*, 3: 343~391.
- Crampin S., Peacock, S. 2008. A review of the current understanding of seismic shear-wave splitting in the earth's crust and common fallacies interpretation. *Wave motion*, 45: 675~722.
- Dahm, T., Manthel, G., Eisenblatter, J. 1998. Relative moment tensors of thermally induced microcracks in salt rock. *Tectonophysics*, 289: 61~74.
- Dreger, D. S., Tkalcsis, H., Johnston M. 2000. Dilatational processes accompanying earthquakes in the Long Valley Caldera. *Science*, 288: 122~125.
- Dreger, D. S., Helmberger, D. V. 1993. Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data. *J. Geophys. Res.*, 98: 8107~8125.

- Dreger, D. S., Woods, B. 2002. Regional distance seismic moment tensors of nuclear explosions. *Tectonophysics*, 356: 139~156.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., Woodhouse, J. H. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and region seismicity. *J. Geophys. Res.*, 86: 2825~2852.
- Ekstrom, G., Dziewonski, A. M., Maternovskaya, et al. 2005. Global seismicity of 2002: Centroid-moment-tensor solutions for 1034 earthquakes. *Phys. Earth. Planet. Interiors.*, 148: 303~326.
- Ford, R., Dreger, D. S., Walter, W. R. 2008. Source characterization of the 6 August 2007 crandall canyon mine seismic event in central Utah. *Seismological Research Letter*, 79: 637~644.
- Frohlich, C. 1994. Earthquakes with non-double-couple mechanisms. *Science*, 264: 804~809.
- Gajewski, D. 1993. Radiation from point sources in general anisotropic media. *Geophys. J. Int.*, 113: 299~317.
- Gephart, J. W., D. W. Forsyth. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence. *J. Geophys. Res.*, 89 (B11): 9305~9320.
- Gilbert, F. 1971. Excitation of the normal modes of the earth by earthquake source. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 22: 223~226.
- Gilbert, F. 1973. Derivation of source parameters from low-frequency spectra. *Trans. R. Soc., Ser. A.*, 274: 369~371.
- Gilbert, F. 1980. An introduction to low frequency seismology, in: Dziewonski and Boschi (eds.). *Physics of the earth's interior, Proc. 'Enrico Fermi' international school of physics*, vol. LXXVIII, pp. 41~81. Amsterdam: North Holland Publ. Co.
- Gilbert, F., Dziewonski, A. M. 1975. Application of normal mode theory to retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra. *Philos. Trans. R. Soc., Ser. A.*, 278: 187~269.
- Jost, M. L., R. B. Hermann. 1989. A student's guide to and review of moment tensors. *Seism. Res. Letters* (60): 37~57.
- Julian, B. R. 1983. Evidence for dyke intrusion earthquake mechanisms near Long Valley Caldera, California. *Nature*, 303: 323~325.
- Julian, B. R., A. D., Miller, G. R. Foulger. 1998. Non-double-earthquakes, 1: theory. *Reviews of geophysics*, 36: 525~549.
- Kanamori, H., Given, J. W. 1981. Use of long-period surface waves for rapid determination of earthquake-source parameters. *Phys. Earth. Planet. Interiors.*, 27: 8~31.
- Kawasaki, I., Tanimoto, T. 1981. Radiation patterns of body waves due to the seismic dislocation occurring in anisotropic source medium. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 71: 37~50.
- Kawakatsu, H. 1991. Insignificant isotropic component in the moment tensor of deep earthquakes. *Nature*, 351: 50~53.
- Kawakatsu, H. 1996. On the observability of the isotropic component of a moment tensor. *Geophys. J. Int.*, 126: 525~544.
- Kim, W. Y. 1998. The ML scale in Eastern North America. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88: 935~951.
- Li, Y. G., Vidale, J. E. 2001. Healing of shallow fault zone from 1994~1998 after the 1992 M7.5 Landers, California, earthquake. *Geophys. res. Lett.*, 28: 2999~3002.