

世纪之交我国震源物理研究的进展与展望

陈运泰 吴忠良 李世愚

(国家地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘 要

从大陆地震震源的观测研究、震源力学的理论研究和震源物理实验三个方面, 评述了90年代以来中国震源物理研究的进展。这些进展包括: 大陆地震的震源参数测定; 利用数字地震资料进行的“现代”震源参数的反演; 地震断裂力学的应用和发展; 非线性物理学在震源研究中的应用; 岩石破裂实验的发展; 地震前兆的物理机制的实验研究等。指出了新技术的发展和现代物理科学的发展对90年代以来震源物理研究的重要影响。展望了跨世纪的我国震源物理研究的发展方向, 指出震源物理研究的进展必将在大陆地震预测和减轻地震灾害方面发挥积极的作用。

关键词 大陆地震, 震源物理, 中国, 90年代。

1 引 言

大陆地震是现代地壳运动最突出的一种表现。在中国, 大陆地震占全球大陆地震的三分之一, 大陆地震灾害是对我国经济、社会可持续发展威胁最大的自然灾害之一。长期以来, 特别是80年代以来, 我国在大陆地震的震源物理研究中积累了丰富的经验, 形成了坚实的基础。90年代以来, 大陆地震震源参数的测定, 地震断裂力学的应用和发展, 岩石破裂实验及其在地震预测研究中的应用, 仍是震源物理研究的主要内容; 与此同时, 随着高新技术和现代物理科学的发展, 从宽频带数字地震学的角度和非线性物理学的角度研究大陆地震震源的工作引起越来越多的注意。震源物理研究的进展深化了对大陆地震的复杂性的认识, 在地震预测和减轻地震灾害的研究和实践中发挥了积极的作用。本文对这一期间的有关进展加以评述和讨论, 涉及的文献资料起自1991年初, 迄至1996年底。

2 大陆地震震源的观测研究

使用地球物理观测资料(主要是地震资料)研究大陆地震震源的物理性质仍是90年代震源物理研究的一项重要内容。这些观测研究结果丰富了对大陆地震的物理性质的认识。

2.1 震源参数的测定

80年代末90年代初, 中国大陆进入新的地震活跃期, 此间发生在中国大陆及其周边

地区的中强地震为地震学家提供了研究大陆地震的机遇。对许多地震, 例如 1988 年澜沧-耿马 7.6, 7.2 级地震^[1,2], 1989 年巴塘 6.7 级震群^[3,4], 1990 年景泰 6.2 级地震^[5], 1990 年共和 6.9 级地震^[6,7], 1994 年台湾海峡南部 7.3 级地震^[8]等中强震的震源机制和发展构造都进行了细致的研究。对一些 80 年代以前发生的重要的地震, 也使用新的资料和新方法进行了更为深入的研究^[9-13]。对华北地区^[14,15]和青藏高原^[16]等重要的地区, 通过一系列中强震的震源机制的研究, 对强震的孕育、盆地的成因、高原物质东流等问题提出了富有启发性的见解。西北太平洋地区的深源地震的震源特征也引起我国地震学家的关注^[17,18], 这种研究一方面为大陆地震研究提供了有益的参照, 另一方面也有助于揭示中国大陆地震的动力来源。在震源机制的研究中, 体波和面波合成地震图方法开始在震源参数测定中得到应用^[10,11,13,15,17-19], 并且在理论上进行了一些探讨, 在技术上做了一些改进。例如李东升、周慧兰^[20]探讨了近源地壳构造对远场体波理论地震图计算的影响; 卓钰如^[21]研究了不同震源机制情况下 PP 波与 P 波振幅比的特征。

大量小地震的震源机制解可提供震源区构造应力场的信息, 因而引起地震学家的普遍关注。刁桂苓等^[22-25]给出了海城、唐山、澜沧、大同等地震序列的中小地震的震源机制, 得到了地壳应力场的信息。杜兴信、张春生^[26]给出了用小震资料确定的陕西地区的平均应力场的结果。林纪曾等^[27]研究了粤东、闽南沿海地区的小震震源参数。蒋维强等^[28]研究了华南地区的小震震源机制和构造应力场特征。孙勇等^[29]反演了唐山地震余震的震源参数和当地介质的衰减性质。阎明^[30]指出, 区域小震的平均节面解的变化与地震的孕育过程有关。魏柏林等^[31]研究了新丰江地震的震源机制解及构造应力场。对小震震源机制的研究并不限于中国的大陆地震, 傅征祥^[32]研究了 1983 年 11 月 16 日夏威夷 Kaoiki $M_S=6.6$ 地震前后的小震震源机制解; 通过对 1979 年加州凯奥蒂湖地震序列的震源机制的分析, 李钦祖和 Bolt^[33]给出了美国加州地震的破裂过程要比中国大陆地震的破裂过程简单的证据。

2.2 “现代”震源参数的反演

与定量地震学相联系的“现代”震源参数的测定是 90 年代以来震源物理研究的一项重要内容, 这方面的研究通常是以数字地震记录的使用为基础的。陈培善和 Duda^[34,35]讨论了峰值速度、峰值加速度、地震辐射能量对环境剪应力的依赖性, 并将由此得到的环境应力场应用于中国大陆地区的潜在震源区的确定^[36-38]。使用中国数字地震台网 (CDSN) 记录, 陈培善和 Duda^[39]计算了中强地震的谱震级和地震辐射能量。地震矩张量及其反演的理论和方法引起广泛的重视^[40-47], 并被应用于中强地震的震源参数的测定^[48-55]。研究得到, 在一些中强地震 (例如 1986 年 11 月 14 日台湾地震) 中存在明显的各向同性分量^[56]。理论研究结果表明, 对于诸如核爆炸源的双力偶成分并不占主导地位的特殊震源, 不宜简单地沿用适用于天然地震的矩张量分解方法^[57,58]。必须指出, 地震矩张量的研究和测定对我国地震学的发展和防震减灾工作具有重要的实际意义。目前, 国际上对矩心矩张量 (CMT) 解的常规测定, 主要是针对较大的地震 ($M_S \geq 5.5$) 使用远震资料进行的, 对于区域性地震, 其测定精度不如主要使用区域性地震资料得出的结果, 对于某些地区的某些类型的地震 (例如青藏高原附近以逆冲机制和正断层机制为主的地震), 常难以给出约束得比较好的解; 哈佛大学、美国地质调查局做出的矩心矩张量解通常在震后 8 小

时左右才能通过互连网络收到,在时间上显然无法满足地震趋势判断、快速反应的需求;此外,对于那些震级虽不大,但有重要的社会影响的有感地震(例如1996年11月9日南黄海6.1级地震),则只能依靠我国自己的数字地震台网的资料来进行矩张量等重要的物理参数的快速测定。

80年代以来,通过近震源距离的宽频带地震观测,获得了大量有价值的近震源强地面运动资料,对这些资料的分析解释得到许多有启发性的结果.由近震源宽频带观测给出的1989年和1991年山西大同—阳高地震余震的精确定位结果表明,1991年的5.8级地震恰好发生在由1989年6.1级地震的余震所围成的空区内^[59-61],从而给出了障碍体模式的直接的地震学的观测证据.王培德等^[62-64]系统地分析了1988年澜沧—耿马地震的强余震的近震源观测结果.吴忠良等^[45]用近震源宽频带记录反演了1985年云南禄劝6.1级地震的部分余震的地震矩张量.陈运泰等^[65]、周家玉等^[66]使用近震源宽频带记录用经验格林函数方法确定了一些中、小地震的震源时间函数.

宽频带数字地震学的发展,为深入研究震源过程的复杂性创造了条件.90年代以来,使用宽频带数字地震资料和“于破裂”的“语言”研究复杂震源破裂过程的工作越来越多^[48,67,68].以震源时间函数来描述的震源过程的复杂性则得到更多的重视^[69-73].使用宽频带数字地震资料和形变测量资料,陈运泰等^[74,75]对1990年青海共和6.9级地震的震源过程进行了数字地震成像研究,以“快照”的方式,系统地给出了这次地震的详细的破裂过程.与此类似的研究工作目前在国际上方兴未艾.已有的研究结果,例如对1989年Loma Prieta地震及1992年Landers地震的研究结果,显示出这方面的工作具有广阔的应用前景和重要的理论意义.

3 震源力学的理论研究

3.1 地震断裂力学的应用与发展

随着观测与实验结果的增加和计算技术的进步,震源力学的理论研究取得进一步的进展.黄建梁等^[76]研究了点源位错引起的重力、位势及其梯度的变化.小山顺二、郑斯华^[77]研究了浅源地震的断层不均匀性和短周期波动的多普勒效应,通过断层破裂的有限传播效应来解释破坏性地震的烈度分布.李世愚、陈运泰^[78]的平面内剪切断层的超S波速破裂解推广了平面内剪切断层破裂的Kostrov理论.他们还给出了由动态裂纹退化得到的静态裂纹解^[79].吴忠良等^[80]从声子的角度分析了“地震量子”的物理意义.

如何通过“失稳”形成地震破裂是地震破裂力学讨论的主要问题之一.许多研究者或从理论概念出发,或从实验结果与观测资料出发,讨论了这一为地震学界所普遍关注的问题.张超、陈连旺^[81]从震源体破裂机制和摩擦滑动机制的综合研究的角度讨论了地壳深部稳定性问题.张超等^[82]结合1976年唐山地震,讨论了震源失稳性态的控制因素.滕春凯等^[83]研究了流变介质中亚临界扩展前地震孕育过程的能量积累问题.“失稳”的研究,是与地震预测理论的研究直接联系在一起的.

近年来,断层之间的相互作用和多断层体系的动态行为引起多方面的关注和兴趣.滕春凯等^[84]用有限元方法研究了含摩擦多断层周围的应力场.李兴才^[85-87]、张之立和

王华强^[88]、张之立^[89,90]从不同角度研究了断裂之间的相互作用问题。谢新生、阮小平^[91]讨论了雁行构造的力学问题。孔园波和华安增^[92]研究了受压岩石裂隙相互作用导致破裂的机理。

3.2 非线性物理学在震源研究中的应用

80年代以来非线性物理学的发展,为理解大陆地震的复杂性提供了新的视角^[93]。这方面的进展尽管还是初步的,却在相当程度上活跃了震源物理的研究。其中的一些问题,有可能成为新的世纪中震源物理研究的生长点。

地震现象的自相似性(自仿射性)一直是地震学者关注的焦点^[94]。由此而定义的各种分形维数及其派生的指数^[95-108]给出了地震动力系统的复杂性的信息。震级-频度分布是地震学中最“经典”的自相似性,近年来,这种自相似性及其问题引起多方面的关注和兴趣。作为这方面研究的深化和现代化,震级-频度关系的研究被应用于具有独立过程的地震序列^[109]和宽频带地震辐射能量的情况^[110-112]。肖蔚文等^[113]研究了不同地震区的应力降分布与分形特征。周硕愚等^[114]讨论了地震孕育过程中地壳形变场的图像动力学参量。

在非线性地震动力学模型的研究方面,顾浩鼎、孙文福^[115]用一个唯象模型讨论了地震活动的自组织和演化。蒋海昆、刁守中^[116]给出了一个具有分形结构的地震活动性模型,并讨论了分形维数 D 与 b 值之间的关系。陆远忠、吕悦军^[117]研究了带断层的细胞自动机模型及其算法复杂性。高原、刘昭军^[118]探讨了随机性细胞自动机的地震模拟的动力学含义。牛志仁、陈党民^[119-121]研究了弹性摩擦系统的奇怪吸引子。牛志仁、施行觉^[122]提出岩石分形断裂的统计理论。吴忠良^[123]用扩散置限凝聚(DLA)模型解释了分形地震断层的成因。朱元清、石耀霖^[124]用弹簧滑块模型进行地震活动性的模拟。陈祥熊^[125]运用二维弹簧滑块模型研究了具有分形结构强度分布的二维地震断层的力学行为。

可以看出,这个领域中的工作目前有一个明显的缺点,这就是在这个领域中使用的实际资料大多数仍以传统的地震目录为主。新一代地震观测系统所提供的新的资料和由这些资料的分析所得到的新的信息,还没有得到足够的重视。从某种意义上说,这是这个领域的工作目前被认为难以继续深入下去的主要原因;不过,从另一个角度看,对这个缺点的克服,正是21世纪中这个领域的一个重要的发展方向。

4 震源物理实验研究

4.1 岩石破裂实验

庄灿涛等^[126]研制了岩石破裂实验数据采集分析系统。张流等^[127]通过三轴实验测定了几种地壳岩石在高压下的剪切破裂参数。刘长泰、耿乃光^[128]进行了岩石超高压状态参数的测定。程海旭等^[129]研究了固体围压下花岗岩的粘滑现象。方华、金济山^[130]测定了三轴压缩下大理岩的剪切破裂能。金济山等^[131]进行了三轴压缩下大理岩循环加载实验。根据实验结果,吴海威^[132]建议,累积损伤疲劳断裂可能是地壳构造变形的一种基本机制。唐春安、徐小荷^[133]讨论了岩石破裂全过程与孕震全序列的理论和实验结果。李红等^[134]进行了高围压下岩石材料的断裂力学实验,测定了剪切破裂能 G_{IIc} ,发现在围压增

加至 400 MPa 时, G_{IIc} 骤然增加至 10^6 J/m^2 . 王子潮、王绳祖^[135]根据实验结果讨论了地壳岩石半脆性非均匀蠕变破坏—失稳的判据.

施行觉等^[136,137]研究了岩石断面的分形测量及其分维的计算. 雷兴林等^[138]报道了三轴压缩下粗晶花岗闪长岩声发射三维分布及其分形特征. 施行觉等^[139]研究了模拟引潮力作用下的岩石破裂特征. 马瑾等^[140]对断层几何结构与物理场的演化及失稳特征进行了系统研究.

新技术, 主要是以数字化和宽频带为特征的声发射记录和微破裂定位技术的引进和发展, 为震源物理实验提供了更强的分辨本领, 使详细地研究岩石破裂的复杂性成为可能. 从目前的情况来看, 这方面的潜力还有待进一步发挥.

大尺度试验和现场试验是震源物理实验研究的一项重要内容. 陈大元等^[141]进行了岩石变形特征及物理特性的现场试验研究. 陈峰等^[142]研究了现场试验中原位岩体的视电阻率变化. 刘万琴等^[143]用微震记录监测冲击地压(矿山地震)前的应力变化, 认为存在明显的前兆现象. 詹志佳等^[144]报道了地下核爆炸前后的地磁观测的结果.

4.2 地震前兆物理机制的实验研究

通过实验室实验研究地震前兆的物理机制一直是震源物理实验研究的一项重要内容. 许昭永等^[145,146]讨论了真三轴压机刚度对岩石破裂声发射的影响和真三轴压缩时的微破裂的分布. 梅世蓉等^[147]通过实验室实验研究了“孕震”岩体性质对“地震”频度异常的影响. 吕培苓等^[148]研究了岩石蠕变过程中的声发射活动. 焦文捷等^[149]研究了围压下岩石破坏的声发射及其“震级”—频度关系. 赵永红等^[150,151]通过破裂带发展的扫描电镜实验讨论了“地震活动性”的一些特征. 赵阿兴^[152]讨论了岩石蠕变破坏实验研究及其对地震预报的意义. 耿乃光等^[153]研究了低围压($<200 \text{ MPa}$)下岩石波速比与静水压的关系. 王彬等^[154]测定了岩石破裂孕育过程中的几种品质因子(Q 值)的变化.

冯玮等^[155]研究了在超声作用下水—大理岩系统的化学异常行为. 陈刚林、周仁德^[156]开展了水对受力岩石变形破坏的宏观力学效应的实验研究. 荣代潞等^[157]通过模拟实验讨论了水的临界温度对大震孕育和发生的作用. 张伯崇等^[158]研究了应力对岩石中孔隙流体压力的影响和地下水位震前异常变化的机理.

曹惠馨等^[159]研究了岩石破裂过程中的超长波段电磁信号和声发射信号, 指出两者之间有很强的相关性. 朱元清等^[160]通过岩石破裂实验研究了岩石破裂时的电磁辐射, 并在理论上给出了关于这种电磁辐射的机理的设想. 钱书清等^[161]系统研究了伴随岩石破裂的 VLF, MF, HF 和 VHF 电磁辐射特性. 从理论和实验的角度, 震磁效应的物理机制得到了系统的研究^[162—164]. 用遥感技术探测岩石破裂过程中的红外辐射也引起相当的关注^[165,166].

5 讨论: 世纪之交我国震源物理研究展望

在跨世纪的中国地震学研究中, 大陆地震震源物理研究具有重要意义. 目前, 关于大陆地震的震源的研究, 正面临着三个基本问题的挑战, 这就是: (1) 观测地震震源过程和地球内部结构的分辨本领; (2) 对中强地震的反应速度; (3) 对大陆强震的复杂性的物理

机制的定量的理解. 简言之, 即: 分辨本领问题、反应速度问题和复杂性问题. 大陆地震预测问题的解决和减轻地震灾害的目标的实现, 在相当大的程度上取决于这三个基本问题的解决程度. 大陆地震震源物理研究的目的, 就是要以高新技术提供的新一代观测资料 and 现代物理科学的新的进展为基础, 从理论上深化对大陆地震的孕育环境和发生过程的规律性的认识, 逐步实现从经验性的地震预测向以物理为基础的地震预测的转变, 提高我国在经济、社会的可持续发展中抗御地震灾害的能力.

80 年代以来高新技术的发展和现代物理科学的发展, 为大陆地震的震源物理的研究提供了有利的条件. 与此相应, 一个重要的发展趋势是, 对大陆地震的预测, 逐步从经验性的和统计性的预测发展成为以物理为基础的预测. 这种进展一方面表现为以物理为基础对地震预测概念的重新界定; 另一方面表现为以物理模型为工具对与地震灾害有关的地学现象 (例如地震引起的强烈地面运动) 的定量预测. 反过来, 理论的发展又将为现有的地学观测系统的改造、扩展和优化提供新的理论基础, 从而在理论上和技术上为在 21 世纪极大地提高减轻地震灾害的能力提供新的可能性.

就目前而言, 大陆地震的震源物理研究至少应包括如下内容: (1) 大陆强震震源区深部构造的高分辨率的地球物理探测; (2) 地震孕育的非线性过程的动力学模拟; (3) 大陆强震震源过程的宽频带数字地震成像; (4) 大陆强震序列图像的复杂性的研究; (5) 大陆地震预测的物理含义和大陆地震的可预测性的理论研究; (6) 地震引起的强烈地面运动及其造成的工程结构破坏的机制及定量预测的研究.

在这些研究课题中, 现场观测、理论研究、计算模拟和实验室实验都是不可或缺的.

可以相信, 充分利用我国的地域优势, 以高新技术的发展和现代物理科学的发展为基础, 我国地震学家在大陆地震的震源物理研究方面, 必将取得长足的进展, 并为国际地震科学的发展做出独特的贡献.

参 考 文 献

- [1] 林邦慧、李大鹏、白武明、滕春凯, 1988 年澜沧-耿马地震的震源特征及其有限元模拟, 地球物理学报, 37 (5): 621—632, 1994.
- [2] 俞维贤、周瑞琦、侯学英、周光全, 澜沧-耿马地震的成因机制, 地震学报, 16 (2): 160—166, 1994.
- [3] 程万正, 巴塘 6.7 级震群非单一指数衰减的复杂时序结构, 地震学报, 14 (增刊): 600—611, 1992.
- [4] 程万正、陈天长, 1989 年巴塘 6.7 级震群的复杂时-空扩展和震源力学机制, 地震学报, 16 (2): 153—159, 1994.
- [5] 杜学彬、阎志德、邹明武、景泰, 6.2 级地震震源动力学过程, 地震学报, 16 (3): 296—303, 1994.
- [6] 巩守文、郭逢英, 与青海共和地震有关的地面垂直形变, 地震学报, 14 (增刊): 725—727, 1992.
- [7] 巩守文、王庆良、林继华, 共和 6.9 级地震垂直形变场位错模式及其演化特征的研究, 地震学报, 15 (3): 289—295, 1993.
- [8] 陈祥熊、袁定强、吴长江, 台湾海峡南部 $M_s 7.3$ 地震震源破裂特征及东南沿海地震形势分析, 地震学报, 18 (2): 145—155, 1996.
- [9] 环文林、葛 民、常向东, 1920 年海原 $8\frac{1}{2}$ 级大地震的多重破裂特征, 地震学报, 13 (1): 21—31, 1991.
- [10] 吴忠良、臧绍先, 用体波合成地震图方法确定渤海、永善两大地震的震源参数, 地震学报, 13 (1): 1—8, 1991.

- [11] Xie, X. B., Yao, Z. X., The faulting process of Tangshan earthquake inverted simultaneously from the teleseismic waveforms and geodetic deformation data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **66**: 265—277, 1991.
- [12] 郑天愉、姚振兴, 用近场记录研究唐山地震的震源过程, *地球物理学报*, **36** (2): 174—184, 1993.
- [13] 孙荀英、刘激扬、王 仁, 1976 年唐山地震震时和震后变形的模拟, *地球物理学报*, **37** (1): 45—55, 1994.
- [14] 曾融生、朱露培、何正勤、丁志峰、孙为国, 华北盆地强震的震源模型兼论强震和盆地的成因, *地球物理学报*, **34** (3): 288—301, 1991.
- [15] 汪素云, Ni, J., 马宗晋, 张郅珍, Seeber, L., Armbruster, J. G., 张立人, 华北强震断层面解和震源深度特征, *地球物理学报*, **34** (1): 42—54, 1991.
- [16] 曾融生、孙为国, 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论, *地震学报*, **14** (增刊): 534—563, 1992.
- [17] 臧绍先、吴忠良、宁杰远, 日本海—鄂霍次克海下俯冲带的应力状态及其深部形变, *地球物理学报*, **35** (5): 560—573, 1992.
- [18] 李安葵、臧绍先, 西北太平洋地区的一些深震震源的研究, *地震学报*, **18** (1): 19—26, 1996.
- [19] 周惠兰, 青海省西南部西捷与沱沱河沿之间 1988 年 11 月 5 日强震的震源机制, *中国地震*, **11** (1): 84—91, 1995.
- [20] 李东升、周惠兰, 近源地壳构造与远场体波理论地震图的计算, *地震学报*, **15** (3): 269—275, 1993.
- [21] 卓钰如, 不同震源机制地震 PP 波与 P 波振幅比特征的讨论, *地震学报*, **13** (2): 150—160, 1991.
- [22] 刁桂苓、于利民、李钦祖, 震源机制解的系统聚类分析: 以海城地震序列为例, *中国地震*, **8** (3): 86—92, 1992.
- [23] 刁桂苓、于利民、宁杰远、孙佩卿、张子广, 1989 年大同震群的体破裂特征, *地球物理学报*, **36** (3): 360—368, 1993.
- [24] 刁桂苓、于利民、李钦祖, 强震后震源区应力场变化一例, *地震学报*, **16** (1): 64—69, 1994.
- [25] 刁桂苓、于利民、李钦祖、王绍晋, 唐山和澜沧地震序列震源区应力场的对比分析, *地震学报*, **17** (3): 305—311, 1995.
- [26] 杜兴信、张春生, 用小震资料测定陕西地区平均应力场的研究, *地震学报*, **16** (3): 395—398, 1994.
- [27] 林纪曾、蒋维强、李幼铭、梁尚鸿, 粤东闽南沿海小震震源参数的研究, *地震学报*, **13** (4): 420—429, 1991.
- [28] 蒋维强、林纪曾、赵 毅、李幼铭、梁尚鸿, 华南地区的小震震源机制与构造应力场, *中国地震*, **8** (1): 36—42, 1992.
- [29] 孙 勇、郑斯华、梅世蓉, 唐山余震震源参数和衰减的联合反演, *地震学报*, **13** (4): 430—441, 1991.
- [30] 阎 明, 区域小震平均节面解的时空分析, *地震学报*, **13** (1): 9—20, 1991.
- [31] 魏柏林、陈茂龙、李富光、黄河生, 新丰江地震震源机制解及构造应力场, *地震学报*, **13** (4): 462—470, 1991.
- [32] 傅征祥, 1983 年 11 月 16 日夏威夷 Kaoiki 地震 ($M_S=6.6$) 前后的小震震源机制解, *地震学报*, **13** (2): 139—149, 1991.
- [33] 李钦祖、Bolt, B. A., 1979 年加州凯奥蒂湖地震序列震源机制分析: 美国加州地震比中国大陆地震破裂过程简单的证据, *地球物理学报*, **35** (2): 160—173, 1992.
- [34] 陈培善、Duda, S. J., 峰值速度和加速度对环境剪应力的依赖性, *地球物理学报*, **36** (2): 185—194, 1993a.
- [35] 陈培善、Duda, S. J., 地震辐射能对环境应力场的依赖性, *地震学报*, **15** (2): 146—152, 1993b.
- [36] 陈培善、白彤震、肖 磊, 根据环境应力场寻找中国大陆地区的潜在震源区, *地震学报*, **17** (3): 294—304, 1995.
- [37] Chen, P. S., Duda, S. J., Variation of ambient shear stress in earthquake sequence, in: Ding, G. Y. and Chen, Z. L. (eds.), *Continental Earthquakes*, IASPEI Publication Series for the IDNDR, Vol. 3, Beijing: Seismological Press, 273—287, 1993.
- [38] Chen, P. S., Duda, S. J., Fracture mechanics rupture model of earthquakes and an estimate of ambient shear stress, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **93**: 299—308, 1996.

- [39] 陈培善、Duda, S. J., 由 CDSN 记录计算出的潜震级和地震辐射能, 地震学报, 15 (4): 418—426, 1993c.
- [40] 倪江川、陈运泰、陈祥熊, 地震矩张量及其反演, 地震地磁观测与研究, 12 (5): 1—17, 1991a.
- [41] 倪江川、陈运泰、王 鸣、吴明照、周家玉、王培德、吴大铭, 云南禄劝地震部分余震的矩张量反演, 地震学报, 13 (4): 412—419, 1991b.
- [42] 陈运泰、王培德、吴忠良, 地震矩张量及其反演, 北京: 国家地震局地球物理研究所, 101 页, 1992.
- [43] 陈运泰、吴忠良、李鸿吉、王培德、牟其铎, 数字地震学, 北京: 国家地震局地球物理研究所、国家地震局杭州干部培训中心, 130 页, 1995.
- [44] 姚振兴、郑天愉、温联星, 用 P 波波形资料反演中强地震地震矩张量的方法, 地球物理学报, 37 (1): 36—44, 1994.
- [45] 吴忠良、陈运泰、倪江川、王培德、王 鸣, 近震源宽频带记录的地震矩张量反演, 地震学报, 16 (2): 141—152, 1994.
- [46] 吴忠良、陈运泰、牟其铎, 核爆炸地震学概要, 北京: 地震出版社, 140 页, 1994.
- [47] 刘鹏程、郑天愉, 用全局反演方法确定地震震源的最佳和极端模型, 地震学报, 18 (1): 11—18, 1996.
- [48] 王 凯、高莉萍、姚振兴、张受生, 澜沧—耿马地震的震源机制研究, 地球物理学报, 34 (5): 569—580, 1991.
- [49] 韦宝珠、王 凯、姚振兴, 1989 年大同—阳高地震震源机制及发震模式研究, 中国地震, 8 (1): 51—59, 1992.
- [50] 赵 里、李志坚、郑斯华, 1989 年 10 月大同地震的震源机制, 地震学报, 14 (2): 251—254, 1992.
- [51] 马文涛、刘启元、范会吉、胡 平、周 攀, 宽频 P 波反演 1988 年澜沧地震震源参数, 中国地震, 8 (1): 43—50, 1992.
- [52] 郑斯华、铃木次郎, 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, 1992.
- [53] 方韶东、陈培善, 用地震波形资料反演中国大陆六个中强地震的矩张量和震源机制, 地震学报, 15 (3): 261—268, 1993.
- [54] 郑天愉、姚振兴, 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, 1994.
- [55] 郑天愉、刘鹏程, 1994 年 9 月 16 日台湾海峡地震及其构造背景研究, 地球物理学报, 39 (1): 68—79, 1996.
- [56] Zheng, T. Y., Yao, Z. X., Liu, P. C., The 14 November 1986 Taiwan earthquake: an event with isotropic component, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 91: 285—298, 1995.
- [57] Wu, Z. L., Geometry of seismic moment tensor representations for underground nuclear explosions, In: Console, R. and Nikolaev, A. (eds.), *Earthquakes Induced by Underground Nuclear Explosions: Environmental and Ecological Problems*, Springer-Verlag, 333—344, 1995.
- [58] Wu, Z. L., Chen, Y. T., Decomposition of seismic moment tensors for underground nuclear explosions, *PA-GEOPH*, 147: 357—366, 1996.
- [59] 王 鸣、王培德, 1989 年 10 月 18 日大同—阳高地震的震源机制和发震构造, 地震学报, 14 (4): 407—415, 1992.
- [60] Wang, M., Wang, P. D., The Datong, Shanxi Province, China earthquakes, of October, 1989 and March, 1991. In: Ding, G. Y. and Chen, Z. L. (eds.), *Continental Earthquakes*, IASPEI Publication Series for the IDNDR, Vol. 3, Beijing: Seismological Press, 153—155, 1993.
- [61] 王 鸣、张康强、王培德, 1991 年山西省大同—阳高 $M_s=5.8$ 地震的断面图, 地震学报, 16 (1): 124—128, 1994.
- [62] 王培德、王 鸣、周家玉、瞿 江、倪晓希、倪江川、陈运泰、吴大铭, 澜沧—耿马地震强余震的反应谱, 地震学报, 13 (3): 338—343, 1991a.
- [63] 王培德、王 鸣、周家玉、瞿 江、倪晓希、倪江川、陈运泰、吴大铭, 澜沧—耿马地震近场强地面运动特征, 见: 陈达生、周锡元、邵向谦、罗永康主编, 云南澜沧—耿马地震震害论文集, 北京: 科学出版社, 69—84, 1991b.

- [64] 王培德、陈运泰、王 鸣, 中国西南地区近震源强地面运动特征, 北京: 地震出版社, 120 页, 1993.
- [65] Chen, Y. T., Zhou, J. Y., Ni, J. C., Inversion of near-source broadband accelerograms for the earthquake source-time-function, *Tectonophysics*, **197**: 89—98, 1991.
- [66] 周家玉、陈运泰、倪江川、王 鸣、王培德、孙次昌、吴大铭, 用经验格林函数确定中小地震的震源时间函数, *地震学报*, **15** (1): 22—31, 1993.
- [67] 高 原、吴忠良, 1993 年 11 月 13 日塔察加大地震的破裂过程及其构造意义, *地球物理学报*, **38** (1): 55—63, 1995a.
- [68] 高 原、吴忠良, 用远震体波宽频带记录分析 1993 年 10 月 2 日中国新疆南部地震的震源过程, *中国地震*, **11** (2): 147—160, 1995b.
- [69] 陈运泰、赵 明、李 旭、许力生, 青海共和地震震源过程的复杂性, 见: 陈运泰、阎荣举、滕吉文、王椿儒主编, 中国固体地球物理学进展: 庆贺曾融生教授诞辰七十周年, 北京: 海洋出版社, 287—304, 1994.
- [70] 陈运泰、许力生, 用宽频带数字地震资料研究地震破裂过程的复杂性, 第五届台湾地区地球物理研讨会文集, 1—10, 1994.
- [71] 李 旭、陈运泰, 用长周期地震波波形资料反演 1990 年青海共和地震的震源过程, *地震学报*, **18** (3): 279—286, 1996.
- [72] 许力生、陈运泰, 用经验格林函数方法从长周期数字波形资料中提取共和地震的震源时间函数, *地震学报*, **18** (2): 156—169, 1996.
- [73] 许力生、陈运泰, 用数字化宽频带波形资料反演青海共和地震的震源参数, *地震学报*, **19** (2): 1—16, 1997.
- [74] Zhao, M., Chen, Y. T., Gong, S. W., Wang, Q. L., Inversion of focal mechanism of the Gonghe, Qinghai, China, earthquake of April 26, 1990 using leveling data, in: Ding, G. Y. and Chen, Z. L. (eds.), *Continental Earthquakes*, IASPEI Publication Series for the IDNDR, Vol. 3, Beijing: Seismological Press, 246—252, 1993.
- [75] Chen, Y. T., Xu, L. S., Li, X., Zhao, M., Source process of the 1990 Gonghe, China, earthquake and tectonic stress field in the northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau, *PAGEOPH*, **146**: 697—715, 1996.
- [76] 黄建梁、李 辉、李瑞浩, 点源位错引起的重力、位势及其梯度变化, *地震学报*, **17** (1): 72—80, 1995.
- [77] 小山顺二、郑斯华, 断层破裂传播速度与破坏性地震的烈度分布: 浅源地震的断层不均匀性与短周期波动的多普勒效应, *地震学报*, **13** (2): 190—201, 1991.
- [78] 李世愚、陈运泰, 平面内剪切断层的超 S 波速破裂, *地震学报*, **15** (1): 9—14, 1993.
- [79] 李世愚、陈运泰, 由动态裂纹退化得到的静态裂纹解, *地震学报*, **16** (3): 304—309, 1994.
- [80] Wu, Z. L., Chen, Y. T., Kim, S. G., Physical significance of earthquake quanta, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **86**: 1623—1626, 1996.
- [81] 张 超、陈连旺, 地壳深部稳定性: 震源体破裂机制和摩擦滑动机制的综合研究, *地震学报*, **13** (4): 450—461, 1991.
- [82] 张 超、陈连旺、唐万能, 1976 年唐山地震震源失稳性态控制因素的模型研究, *地震学报*, **14** (4): 507—510, 1992.
- [83] 滕春凯、白武明、王新华, 流变介质中临界扩展前地震孕育过程的能量积累, *地球物理学报*, **34** (1): 32—41, 1991.
- [84] 滕春凯、白武明、王新华, 用有限元方法研究含摩擦多断层周围的应力场, *地球物理学报*, **35** (4): 469—478, 1992.
- [85] 李兴才, 断层的震前滑动对唐山地震发生的影响, *地震学报*, **14** (3): 304—308, 1992a.
- [86] 李兴才, 地震危险性分析中如何考虑交汇断层的影响, *地震学报*, **14** (增刊): 728—731, 1992b.
- [87] 李兴才, 1975 年海城地震的前震对主震的作用, *地震学报*, **16** (3): 320—325, 1994.
- [88] 张之立、王华强, 澜沧—耿马地震序列的非均匀断裂系破裂模式及弹塑性断裂计算方法, *地震学报*, **14** (4): 463—471, 1992.
- [89] 张之立, 断裂之间的相互作用和应力场计算, *地震学报*, **16** (1): 32—40, 1994.
- [90] 张之立、田 华、刘新美、刘国民, 山西大同震群序列的震源力学特征和有限元数值模拟, *地震学报*, **17** (1):

- 11—19, 1995.
- [91] 谢新生、阮小平, 雁行构造力学解析与控震意义, 地震学报, 16 (1): 41—48, 1994.
- [92] 孔园波、华安增, 受压岩石裂隙相互作用导致破裂的机理, 地球物理学报, 38 (6): 767—773, 1995.
- [93] Koyama, J., Feng, D. Y., (eds.), *Advance in Mathematical Seismology*, Beijing: Seismological Press, 193pp., 1995.
- [94] 李海华, 地震自相似现象初探, 地震学报, 14 (1): 119—123, 1992.
- [95] 徐叶邦, 活动断裂带中地震分布时空结构的信息维特征初探, 地震学报, 13 (3): 372—379, 1991.
- [96] 蒋 铭、张国玉、姜秀娥, 地震活动的时间层次结构, 中国地震, 7 (3): 42—53, 1991.
- [97] 冯德益、林命周、刘喜兰、蒋 淳、伊藤秀美、吉田明夫, 大地震活动的模糊时间分维特征, 中国地震, 7 (4): 1—11, 1991.
- [98] 冯德益、刘喜兰、蒋 淳、郑熙铭、林命周, 模糊分维及其在地震研究中的某些应用, 地球物理学报, 35 (4): 459—468, 1992.
- [99] 朱令人、周仕勇、王海涛、白超英、龚宇清, 地震活动信息维的研究, 地震学报, 14 (4): 385—392, 1992.
- [100] 蔡静观、唐 进、许昭永, 地震空间分数维及其在地震预报中的应用, 地震学报, 14 (3): 289—295, 1992.
- [101] 安镇文、王林瑛、姚栋华、朱传镇, 大地震孕育过程中的混沌特征, 地震学报, 14 (4): 393—399, 1992.
- [102] 安镇文、王林瑛、陈 瑶、潘寒萌, 探讨孕震过程中的非线性特征, 地震学报, 15 (3): 276—281, 1993.
- [103] 刘长海、刘义高、张 军, 中强地震后地震时间序列的自仿射分形特征, 地震学报, 16 (3): 352—360, 1994.
- [104] 王碧泉、黄汉明、范洪顺、王春珍、陈佩燕, 非线性 R/S 方法研究及其在地震预测中的应用, 地震学报, 17 (4): 528—532, 1995.
- [105] 刘长海、刘义高、张 军, 地震时间间隔的 R/S 分析, 地震学报, 17 (3): 389—392, 1995.
- [106] 陈荣华、罗灼礼, 地震活动性的层次模型及推导的地震活动经验公式和分维性质, 中国地震, 11 (2): 116—120, 1995.
- [107] 周仕勇、朱令人, 地震活动信息熵在地震危险区判定中的研究, 中国地震, 11 (3): 283—292, 1995.
- [108] 王安东、顾浩鼎, 辽宁地区地震活动空间分布的多重分形, 地震学报, 18 (1): 34—43, 1996.
- [109] 孙文福、顾浩鼎, 具有独立过程的地震序列震级—频度分布, 地震学报, 14 (3): 273—280, 1992.
- [110] 吴忠良、高 原, 地震能量标度律的宽频带地震学检验, 科学通报, 39 (20): 1883—1885, 1994.
- [111] 吴忠良、高 原, 用宽频带辐射能量检验地震能量标度性, 地球物理学报, 38 (2): 206—212, 1995.
- [112] Wu, Z. L., Gao, Y., Scaling law of earthquake energy: a modification in the view of broad frequency band, *Fractals*, 2: 583—588, 1994.
- [113] 肖蔚文、黄 琦、王荣君, 不同地震区应力降分布与分形特征, 地震学报, 14 (3): 281—288, 1992.
- [114] 周硕恩、吴 云、王若柏、杨国华, 地震孕育过程中地壳形变场图像动力学参量的研究, 地震学报, 16 (3): 336—340, 1994.
- [115] 顾浩鼎、孙文福, 地震活动的自组织和演化, 地球物理学报, 35 (1): 25—36, 1992.
- [116] 蒋海昆、刁守中, 一个具有分形结构的地震活动性模型及分形维数 D 与 b 值之间关系的初步讨论, 地震学报, 7 (4): 524—527, 1995.
- [117] 陆远忠、吕悦军, 带断层的细胞自动机型及算法复杂性, 地震学报, 16 (2): 183—189, 1994.
- [118] 高 原、刘昭军, 随机性细胞自动机的地震模拟的动力学含义, 中国地震, 11 (1): 8—14, 1995.
- [119] Niu, Z. R., Chen, D. M., Period-doubling bifurcation and chaotic phenomena in a single degree of freedom elastic system with a two state variable law, in: Newman, W. I. and Gabrelov, A. M. (eds.), *Nonlinear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena*, AGU Geophysical Monograph Series, 83: 75—80, 1994.
- [120] 牛志仁、陈党民, 弹性摩擦系统奇怪吸引子的 Lyapunov 指数和维数, 地震学报, 17 (4): 469—476, 1995.
- [121] 牛志仁、陈党民, 摩擦系统倍周期分岔细结构的研究, 中国地震, 12 (1): 16—25, 1996.
- [122] 牛志仁、施行觉, 岩石分形断裂的统计理论, 地球物理学报, 35 (5): 594—603, 1992.
- [123] 吴忠良, DLA: 一个“经典”地震学问题的现代解, 中国地震, 10 (2): 175—181, 1994.

- [124] 朱元清、石耀霖, 地震活动性研究中的非线性动力学模型, 地球物理学报, 34 (1): 20—31, 1991.
- [125] 陈祥熊, 具有分形结构强度分布的二维地震断层模拟, 地震学报, 18 (4): 460—469, 1996.
- [126] 庄灿涛、徐 速、张伟学、许昭永、梅世蓉, 岩石破裂实验数据采集分析系统的研制, 地震学报, 13 (4): 489—495, 1991.
- [127] 张 流、李 彪、高 平、王宝生, 三轴实验测定的几种地壳岩石在高压下的剪切断裂参数, 中国地震, 7 (2): 12—18, 1991.
- [128] 刘长泰、耿乃光, 岩石超高压状态参数的实验研究, 地震学报, 13 (1): 96—103, 1991.
- [129] 程海旭、吴开统、张 流, 固体围压下完整花岗岩粘滑现象的实验研究, 中国地震, 9 (3): 211—222, 1993.
- [130] 方 华、金济山, 三轴压缩下大理岩剪切断裂能的测定, 地球物理学报, 35 (6): 748—752, 1992.
- [131] 金济山、石泽全、方 华、于智海、任爱华、邹 英, 在三轴压缩下大理岩循环加载实验的初步研究, 地球物理学报, 34 (4): 488—494, 1991.
- [132] 吴海威, 累积损伤疲劳断裂: 地壳构造变形的一种基本机制, 地质科学, 26 (2): 101—110, 1991.
- [133] 唐春安、徐小荷, 岩石破裂全过程与孕震全序列, 地震学报, 13 (4): 517—521, 1991.
- [134] 李 红、李世愚、许征宇、尹祥础, 高围压下岩石材料的断裂力学实验, 地震学报, 14 (1): 124—127, 1992.
- [135] 王子潮、王绳祖, 地壳岩石半脆性非均匀蠕变破坏—失稳的判别, 地质科学, 26 (1): 60—68, 1991.
- [136] 施行觉、牛志仁、许和明、范增节、周泰禧, 岩石断面的分形测量及其分维的计算, 地球物理学报, 35 (2): 154—159, 1992.
- [137] 施行觉、许和明、牛志仁、范增节, 岩石断面的自仿射分形及其分维的计算, 中国地震, 8 (3): 1—6, 1992.
- [138] 雷兴林、马 瑾、楠濂勤一郎、西泽修、佐藤隆司, 三轴压缩下粗晶花岗岩内长岩声发射三维分布及其分形特征, 地震地质, 13 (2): 97—114, 1991.
- [139] 施行觉、许和明、万永中、卢振刚、陈学忠, 模拟引潮力作用下的岩石破裂特征: 加卸载响应比理论的实验研究之一, 地球物理学报, 37 (5): 633—637, 1994.
- [140] 马 瑾、马胜利、刘力强、邓志辉、马文涛、刘天昌, 断层几何结构与物理场的演化及失稳特征, 地震学报, 18 (2): 200—207, 1996.
- [141] 陈大元、许东俊、陆阳泉、曹其平、陈 峰、罗荣祥、关华平, 岩石变形特征及物理特性的现场试验研究, 地震学报, 14 (3): 356—362, 1992.
- [142] 陈 峰、陈大元、曹其平、于淑筠、许东俊、陈从新、余毓良、盛建豪, 原位岩体在剪切和摩擦试验中的视电阻率变化特征研究, 地震学报, 15 (2): 217—223, 1993.
- [143] 刘万琴、郑治真、鲁振华、张连成, 用微震记录监测冲击地压前的应力变化, 中国地震, 7 (3): 80—87, 1991.
- [144] 詹志佳、高金田、胡荣盛、张洪利、赵从利、沈文志, 地下核爆炸前后的地磁观测及其结果, 地震学报, 14 (2): 351—355, 1992.
- [145] 许昭永、梅世蓉、庄灿涛、李佩林, 真三轴压机刚度对岩石破裂声发射的影响及与地震活动性的联系, 地震学报, 13 (2): 223—233, 1991.
- [146] 许昭永、梅世蓉、庄灿涛、杨洪沧、包一峰, 真三轴压缩时几种岩样微破裂定位的初步结果, 地震学报, 14 (增刊): 702—709, 1992.
- [147] 梅世蓉、许昭永、庄灿涛、舒燕华、包一峰, 孕震岩体性质对地震频度异常的影响, 地球物理学报, 35 (增刊): 391—396, 1992.
- [148] 吕培苓、吴开统、焦远碧、李纪汉、刘晓红, 岩石蠕变过程中声发射活动的实验研究, 地震学报, 13 (1): 104—112, 1991.
- [149] 焦文捷、马 瑾、吴秀泉、刘力强, 围压下岩石破坏声发射测试系统及震级频度关系的实验研究, 地震地质, 13 (1): 54—59, 1991.
- [150] 赵永红、黄杰藩、王 仁, 破裂带发展的扫描电镜实验研究及其对地震前兆的启示, 地球物理学报, 36 (4): 453—462, 1993.

- [151] 赵永红、黄杰藩、侯建军、王 仁, 岩石细观破裂的实验观测研究及其对认识地震活动性的启示, 地球物理学报, 38 (5): 627—636, 1995.
- [152] 赵阿兴, 岩石蠕变破坏实验研究及其对地震预报的意义, 地震地质, 14 (1): 89—95, 1992.
- [153] 耿乃光、郝晋升、李纪汉、刘晓红、方亚如、蔡戴恩, 岩石的波速比与静水压的关系, 地震学报, 14 (4): 500—506, 1992.
- [154] 王 彬、许昭永、赵晋明、胡毅力, 岩石破裂孕育过程中的几种 Q 值变化, 地震学报, 18 (4): 513—517, 1996.
- [155] 冯 玮、杨书田、张 勇、范松川、周鸿娟, 在超声作用下水—大理岩系统的化学异常行为, 地震学报, 15 (4): 498—507, 1993.
- [156] 陈刚林、周仁德, 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的实验研究, 地球物理学报, 34 (3): 335—342, 1991.
- [157] 荣代路、金发辉、贺玉亭、金 铭、蒋续媛、高中强, 水的临界温度对大震孕育和发生的作用的模拟实验研究, 地震学报, 14 (2): 156—163, 1992.
- [158] 张伯崇、郭慧敏、刘长义、韩 风、马元春, 应力对岩石中孔隙流体压力的影响和地下水位震前异常变化机理, 地震学报, 13 (1): 88—95, 1991.
- [159] 曹惠馨、钱书清、吕 智, 岩石破裂过程中超长波段的电、磁信号和声发射的实验研究, 地震学报, 16 (2): 235—241, 1994.
- [160] 朱元清、罗祥麟、郭自强、赵志光、祝中伟, 岩石破裂时电磁辐射的机理研究, 地球物理学报, 34 (5): 594—601, 1991.
- [161] 钱书清、任克新、吕 智, 伴随岩石破裂的 VLF, MF, HF 和 VHF 电磁辐射特性的实验研究, 地震学报, 18 (3): 346—351, 1996.
- [162] 郝锦琦、黄平章、周建国, 岩石流变磁效应: 震磁效应的一种可能机理, 中国地震, 8 (2): 53—60, 1992.
- [163] 郝锦琦、黄平章、周建国, 微破裂对岩石剩磁的影响: 对地震预报的意义, 地球物理学报, 36 (2): 203—211, 1993.
- [164] Hao, J. Q., Zhou, J. G., The remanence variation of rocks stressed to failure and its implication to earthquake prediction, *J. Geomag. Geoele.*, 46: 393—402, 1994.
- [165] 耿乃光、崔承禹、邓明德, 岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端, 地震学报, 14 (增刊): 645—652, 1992.
- [166] 邓明德、崔承禹、耿乃光, 遥感用于地震预报的理论及实验结果, 中国地震, 9 (2): 163—169, 1993.

RESEARCH IN PHYSICS OF EARTHQUAKE SOURCE IN CHINA IN THE TURN OF THE CENTURIES

CHEN YUN-TAI WU ZHONG-LIANG LI SHI-YU

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing 100081, China*)

Abstract

Developments in the research in physics of earthquake source since the 1990's in China are reviewed in perspective of observation, theoretical modeling, and laboratory experiment. These developments include: estimation of source parameters of continental earthquakes; inversion of the 'modern' earthquake parameters, such as moment tensor and slip function, using digital broadband seismic data; application and development of fracture mechanics; application of non-linear dynamics in the study of earthquake source; laboratory experiments characterized by improved resolution; and experimental studies of the mechanism of the possible earthquake precursors. It is pointed out that the development of high-technology and modern physics has a significant influence on the research of physics of earthquake source in China, leading to a better understanding of the complexity of continental earthquakes. The study in physics of earthquake source in China in the turn of the centuries is prospected in the view of the development of modern seismology. It may be expected that such studies will play an active role in the social endeavor of the reduction of seismic hazards.

Key words Continental earthquake, Physics of earthquake source, China, the 1990's.

作者简介 陈运泰, 男, 1940年8月10日生, 中国科学院院士. 现任国家地震局地球物理研究所所长、研究员, 中国地震学会理事长, 中国地球物理学会常务理事, 国际《纯粹和应用地球物理》(PAGEOPH)、《地震学刊》(JOSE)编委, 《中国科学》、《科学通报》、《科学》编委, 《地震学报》、《世界地震译丛》主编, 《地球物理学报》副主编. 主要从事地震波理论、地震震源理论、强地面运动地震学等方面的研究.

吴忠良 男, 1963年5月3日生, 研究员, 博士. 现任国家地震局地球物理研究所副所长, 中国地震学会常务理事, 主要从事数字地震学方面的研究.

李世愚 男, 1945年12月26日生, 研究员, 博士. 现任国家地震局地球物理研究所震源物理研究室主任, 主要从事震源物理的理论和实验研究.