

文章编号: 0253-3782(2003)05-0548-10

# 大陆动力学与大陆地震研究<sup>\*</sup>

张东宁<sup>1)</sup> 张国民<sup>2)</sup> 张培震<sup>3)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

3) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

**摘要** 简要介绍了 1999 年英国伯明翰 IUGG 大会以来, 中国地学界围绕大陆地震研究开展的两个重大科学研究项目——《东亚大陆地球动力学研究》项目和《大陆强震机理与预测》项目的科学目标、子项目构成及所涉及的主要研究内容和取得的一些初步研究结果. 文中还介绍了 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西  $M_s 8.1$  强烈地震的主震后, 中国地震局开展的现场余震监测工作及这次强烈地震提出的一些科学问题, 以及地震对震中附近正在进行的重大工程及格尔木周边地区基础设施的影响.

**关键词** 地球动力学 大陆地震 机理 昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震

**中图分类号**: P315.2; P315.75

**文献标识码**: A

## 引言

地球科学意义上的东亚大陆, 系指以西太平洋俯冲带、印度-欧亚碰撞带以及天山—贝加尔地震带为边界的, 以中国大陆为主体的广阔区域. 这一区域基本上囊括了全球范围内所观测到的各种地球动力学现象, 诸如海-陆俯冲、陆-陆碰撞、板内地震、超高压变质带以及岩浆和火山活动等, 并涵盖了地球动力学研究的几乎全部的热点问题, 成为解决大陆动力学关键问题的钥匙, 一直是全球性地球动力学研究的重点地区. 东亚大陆地球动力学研究, 旨在通过对东亚大陆地壳、上地幔细结构的深入研究, 揭示东亚地区构造变形的力源及作用过程, 探讨强震发生的动力机制, 为保护东亚地区自然和生态环境、开发资源和减轻自然灾害服务<sup>①</sup>.

用大陆动力学理论理解大陆地震机理是《大陆强震机理与预测》项目立题的理论前提. 板块学说的建立为沿板块边界发生的地震找到了合理的解释. 依据板块学说所提出的地震空区、特征地震和重现周期等地震发生理论, 不仅为几次板缘地震一定程度的预测提供了指导, 也成为国际上现有地震预测理论的基础. 然而, 这种理论在用于解释大陆地震时却遇到了困难, 其原因是由于大陆与海洋板块在结构、性质、变形、地震、动力机制等方面的根本差别. 《大陆强震机理与预测》提出活动地块动力学假说, 用于描述中国大陆现今构造变形的特征和机制, 并用于解释大陆强震的发生机理(张国民, 张培震, 2000).

$M_s 8$  以上的地震是小概率事件. 2001 年 11 月 14 日发生在青藏高原内部昆仑山口西的

<sup>\*</sup> 中国地震局地球物理研究所论著 03AC1025.

2003-02-19 收到初稿, 2003-05-26 收到修改稿, 2003-06-01 决定采用.

① 陈运泰等. 2001. 国家攀登计划预选项目(95-S-05)《东亚大陆地球动力学研究》项目总结报告.

$M_s 8.1$  地震是 50 年以来在我国大陆发生的震级最大的地震,也是青藏高原北部继 1997 年玛尼  $M_s 7.9$  地震后的又一次大地震。此次大地震展示了极为丰富的现象,提出许多值得深入研究的科学问题。对发生在青藏高原内部的强烈地震及其余震进行监测,将为研究东亚大陆地球动力学问题和大陆内部强震的机理提供宝贵的观测资料(中国地震局监测预报司, 2002)。对这次强烈地震及其余震序列的进一步研究,对解释青藏高原现代构造运动特征具有重要的意义。

## 1 东亚大陆地球动力学研究

考虑到大陆动力学是研究板块内部地震活动的基础,在 20 世纪 90 年代后期,中国的一些地球科学研究人员提出了以东亚大陆动力学为目标的研究项目,并获得科技部攀登项目(预研究)的支持(项目名称:《东亚大陆地球动力学研究》;项目编号:95-S-05)。

几十名地震学、地质学领域的科学家参加了这个项目的研究工作,主要研究课题包括:① 东亚大陆岩石圈深部的三维速度结构;② 东亚大陆内部主要变形带的高分辨率三维速度结构;③ 东亚大陆岩石圈的构造应力场;④ 西太平洋俯冲带的变形、深部结构和流变特征;⑤ 喜马拉雅碰撞带的深部结构、天山-贝加尔湖地震带的地震活动及其地球动力学意义;⑥ 欧亚板块演化历史重建,印度洋板块-欧亚板块碰撞过程的模拟,若干地震的动力学过程模拟;⑦ 东亚大陆内部一些典型大地震的震源机制和时空破裂过程;⑧ 中国大陆活动断层和地壳运动;⑨ 利用地震活动、应力测量及断层滑动擦痕综合研究中国大陆地壳构造应力场。

《东亚大陆地球动力学研究》项目在以下几个方面取得了重要进展:

利用宽频带数字地震台站观测数据和人工勘探资料,得到了东亚大陆地区整体的三维地震波速度结构、青藏高原及周边地区、大别山超高压变质带、腾冲火山区等典型构造区的局部高分辨率三维速度结构(尹周勋等, 1999; 曾融生等, 2000; 丁志峰等, 2001; 王椿镛等, 1999, 2002, 2003; 何正勤等, 2002; 阮爱国, 王椿镛, 2002; 楼海等, 2002)。

利用地震学方法和数值模拟手段得到了东亚大陆岩石圈的总体构造应力格局,及其内部部分地区的区域构造应力场特征(吴忠良等, 2002; 孙荀英等, 2000; 许忠淮等, 1999; 许忠淮, 2001; 谢富仁等, 1999; 崔效锋, 谢富仁, 1999, 2001)和板块边界的变形、深部结构和流变特征(Jing, Ning, 2001; 宁杰远, 臧绍先, 2001; 臧绍先, 宁杰远, 2001; 臧绍先等, 2001; 周元泽等, 2002)。

在对中国大陆地震活动、活动断层和地壳运动特征进行研究的基础上(吴云等, 1999; 吴珍汉等, 2001),提出了印度洋板块-欧亚板块碰撞的模型(滕吉文等, 1999),探讨了西太平洋俯冲带深震的成因(宁杰远, 臧绍先, 1999),并对板块碰撞带及内部深部构造环境形成的可能动力过程进行了模拟研究(王飞等, 1999; Cai *et al.*, 1999; 刘亚静等, 2002)。

给出了东亚大陆内部一些典型大地震的震源机制(周荣茂等, 1999a, b; Mozaffari *et al.*, 1999; 许向彤等, 1999; 许力生等, 1999),时空破裂过程(许力生, 陈运泰, 1999; Wu *et al.*, 1999; 吴忠良, 1999; Chen, Xu, 2000)以及震源动力过程的数值模拟(蔡永恩等, 1999);并开展了一些地震学基础理论方面的探索性研究(吴忠良, 1999, 2001; 吴忠良等, 1999)。

2 大陆强震机理及预测

有效减轻大陆地震灾害，需要多学科、多层次的综合性和有组织的研究群体构架. 中国地震局于 1998 年与中国科学院、国土资源部和一些大学联合，提出了《大陆强震机理与预测》研究项目. 1998~2003 年，该项目被列入国家重点基础研究发展规划，并获得了超过 3 500 万元的经费支持.

《大陆强震机理与预测》项目的研究目标是进一步深入对大陆强震机理的认识，并且为地震预测提供地质、地球物理和地壳运动的背景资料. 该项目在中国大陆构造研究的基础上，以大陆内部活动地块假说和新的观测技术为工具，在 5 年的研究周期内开展了以下方面的研究工作：① 围绕大陆内部活动地块假说的研究和证实，发展大陆强地震的预测理论（张培震等，2002a，2003）；② 勾画未来 10 年内强震危险区，并尽可能将危险区范围缩小；③ 建立流动地震预测实验场，发展强地震时间预测技术；④ 为强地震的空间预测提供地震危险性预测图.

该项目包括的子项目有：① 中国大陆活动构造的时空演化；② 中国大陆强震的深部构造环境；③ 地壳运动和活动地块及其边界的运动；④ 大陆强震的数学与物理模拟；⑤ 流动地震预测实验场；⑥ 强震预测和地震危险性的评价. 目前，该项目已经取得了重要进展（图 1）.

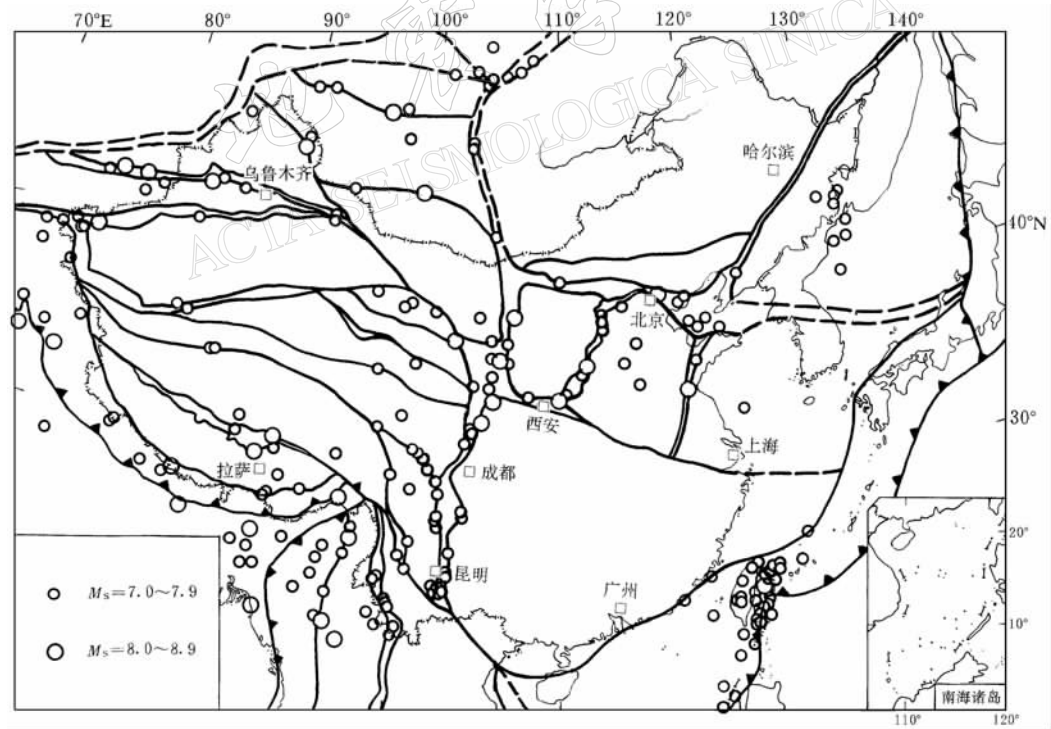


图 1 中国大陆及邻区活动地块划分初步方案与强震分布(引自张培震等，2003)

各子项目的主要研究内容及目标是：

《中国大陆活动构造的时空演化》子项目：以现代活动断裂观测技术和第四纪年代测试

技术为依托(Wu *et al.*, 1999),开展中国大陆岩石圈最新构造变动中的重大构造事件时间序列、古地震和强震复发规律的研究(易桂喜等, 2002; Xu *et al.*, 2001),揭示中国大陆地块运动、断裂活动与强震孕育的关系(田勤俭等, 2002; Guo *et al.*, 2000; 徐锡伟, 闻学泽, 2003),划分出不同级别的活动地块,了解活动地块的运动状态对地震发生格局的影响(袁道阳等, 2002; 冉勇康等, 2001).

《中国大陆强震的深部构造环境》子项目:以数字地震观测与分析技术为主,辅以其它深部地球物理探测技术,开展地壳、上地幔三维速度结构地震波走时和波形成像和岩石圈宽频带地震台阵的高分辨率地震成像研究(李松林, 张先康, 2002; 王椿镛等, 2003; Wang *et al.*, 2001a),揭示中国大陆岩石圈结构与强震发生的关系(Zhang *et al.*, 2002b);研究重要活动地块的深部结构和深浅构造耦合关系在地震孕育过程中的作用,了解大陆强震孕育发生的深部构造环境(杨智娴等, 2002),从深部结构和孕震环境的角度理解地震发生的机制(Wang *et al.*, 2003a).

《地壳运动和活动地块及其边界的运动》子项目:以“中国地壳运动观测网络”为主要技术手段,确定研究区域在不同层次、不同尺度地质构造的运动学特征,建立中国大陆现今地壳运动的位移场、应变场(朱文耀, 张强, 2000);结合地质、地球物理等方法,揭示关键活动构造带和活动地块运动方式、活动规律、幅度和边界条件,建立中国大陆活动地块及其周边地壳运动模型(Wang *et al.*, 2001b; Jiang *et al.*, 2000; 任金卫, 2002, 张培震等, 2002b);进一步探索重要活动地块与关键动力边界运动的不一致性、非平稳性,以及区域差异运动的动力学机制.

《大陆强震的数学与物理模拟》子项目:根据深部地球物理、大地测量和构造地质研究的资料,结合震源实体介质的物理、化学环境研究,用物理模拟和数学模拟的方法重建导致大陆强震的构造物理过程(Ma, He, 2001; Ma *et al.*, 2002; 何昌荣等, 2002).结合实际震例,研究不同类型孕震体的失稳条件、失稳机制、失稳标志和触发因素等.引入考虑地块活动与强震发生动态变化的数学模型,建立有别于板缘地震、符合中国大陆地震实际的地震孕育的运动学和动力学模型(白武明等, 2003; 于泳等, 2003; Zang *et al.*, 2002; Chen, Willemann, 2001).

《流动地震预测实验场》子项目:根据中长期和中期预测研究成果,选择典型地震危险区进行高密度、多学科、多参数、大动态、近震源的强化观测(程万正等, 2002; 秦嘉政等, 2001; Deng, 2000; 王培德, Klaus, 2002).开展强震预测新技术新方法观测与实验(Xu *et al.*, 2002a),探索强震发生的主要控制因素、控制机理和前兆图象(Zhang *et al.*, 1999),为发展新的地震预测理论提供基础资料,并对强震预测进行检验(Zhou, Chen, 2002).

《强震预测和地震危险性的评价》子项目:在前 5 个子项目对中国关键活动构造带的地质构造、地球物理和地球化学综合研究,以及对我国位于高烈度区的重要经济区未来 10 年内强震危险性进行预测的基础上,对重点区域强震可能造成的损失进行预评估(张风华, 谢礼立, 2001; 马玉宏, 谢礼立, 2002; Fu, Liu, 2003; 俞言祥, 高孟潭, 2001; 高孟潭等, 2002; 帅向华等, 2001).

### 3 2001 年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震的现场监测和综合科学考察

2001 年 11 月 14 日(国际时 09:26:14.7),在中国青海、西藏、新疆交界的昆仑山口西

部发生了  $M_w 7.8$  强烈地震(见 <http://neic.usgs.gov/neis/FM/>; <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/>; <http://www.eq-igp.ac.cn/>)。中国国家数字地震台网(CDSN)在地震后给出的面波震级为  $M_s 8.1$ 。这次地震是 1950 年 8 月 15 日西藏察隅  $M_w 8.6$  地震(这次地震在西方文献中不适当地称为“印度阿萨姆地震”)和 1951 年 11 月 18 日西藏当雄  $M_w 7.5$  地震以来发生在青藏高原上的最大的一次地震。极震区位于人烟稀少的可可西里自然保护区附近,地震除给当地的管线、光缆、路基和施工队的临时建筑造成破坏之外,没有引起人员伤亡和特别重大的经济损失<sup>①</sup>。

地震后不久,国际上著名的地震学观测与研究机构,例如哈佛大学、美国地质调查局(USGS)的美国国家地震信息中心(NEIC)、日本东京大学地震研究所(ERI)以及中国地震局等,很快给出了这次地震的震级、震中位置、矩心矩张量(CMT)的矩心位置与地震震中位置的差别,表明这次地震是沿着东西向的断层破裂的,破裂的传播方向为自西向东。地震震源破裂面上的滑动分布的反演结果(参见 <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/>)证实这一结果是正确的。地震断裂是一个近垂直的以左旋走滑为主的断裂。关于这次地震所在的东昆仑断裂带的构造活动特征,中国学者已经做了比较深入的考察和研究(任金卫等, 1999, Xu *et al.*, 2002b)。

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西大地震发生后,为帮助当地的地震部门进行地震监测,根据中国地震局监测预报司、中国地震局科技发展司的指示,中国地震局地球物理研究所派出观测队伍,进行现场实时观测。2002 年 2 月~2002 年底,中国地震局组织了一百多名地质学、大地测量学、工程震害、地震学和地球内部物理学的科研人员,开展了大规模的昆仑山口西 8.1 级地震综合科学考察。

现场流动地震监测工作于 11 月 18 日在所有仪器及现场数据中心架设完成后开始。实时监测工作持续了 5 个月,获得大量高质量的地震资料。观测系统包括由 5 套宽频带地震仪组成的台阵(设在昆仑山口以北、格尔木市区以南,距地震断层 50 km)、6 套跨断层宽频带地震仪和一个现场数据中心。宽频带地震仪是由中国地震局分析预报中心港震公司设计生产的,其速度频率响应曲线的平坦范围为 20 Hz~20 s。地震信号通过短波无线传输系统传至现场数据中心。数据中心的数据处理系统,备有数字地震图分析、震相识别、地震定位和震级测定的工作软件(Xu, Chen, 2002; Yang *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002a; Lin *et al.*, 2002)。

现场观测记录并准实时分析处理了 4 378 次余震。截至 2002 年 4 月 6 日,记录并分析处理地震 4 378 次。其中,  $M_L \geq 1.0$  地震 3 987 次;  $M_L \geq 2.0$  地震 1 364 次;  $M_L \geq 3.0$  地震 203 次;  $M_L \geq 4.0$  地震 54 次。

“昆仑山口西 8.1 级地震综合科学考察”项目在地震地表破裂带考察、流动地震观测、地壳变形观测、工程震害和冻土震害考察方面取得了丰富的考察结果(赵瑞斌等, 2002; 陆鸣等, 2002)。此次综合科学考察为后继的科学研究提供了宝贵、丰富的基础资料。在震后及时取得的大面积、高精度的水平形变复测资料,跨断层 GPS、水准、重力综合观测资料以及断层蠕滑资料,不仅在我国是绝无仅有的,就是在世界上也是极为罕见的(乔学军等, 2002)。科考的地形变资料为青藏块体的地学研究提供了有关的直接、实时观测证据。研究

① 吴忠良等, 2002. 昆仑台阵一期工作汇报. 中国地震局地球物理研究所 2001 年度监测预报工作总结。

内容可包括青藏块体相对于周边块体的运动,以及青藏块体内部以东昆仑山活动断裂带为代表的大型走滑活动断裂带的最新变形和运动的具体状况,包括其滑动方式、速率和演化.讨论青藏块体的变形和演化过程,确定水平滑动、变形的规模,及其对周边的影响,建立青藏块体的变形和演化的地球动力学模式.地震观测得到了完整的地震序列目录.地形变观测及时复测了周边地区,特别是川西的大型构造运动形变,获得了构造运动的展布情况.这些对地震震后趋势判断提供了数据资料,为进一步科学判定青藏高原乃至我国大陆地区近期大震形势提供了依据<sup>①</sup>.

## 4 讨论和结论

### 4.1 中国大陆活动地块划分初步方案与强震分布

从《大陆强震机理与预测》项目的初步研究结果可以看出,中国大陆晚新生代和现代构造变形以地块运动为主要特征.不同活动地块的运动方式和速度是不同的,地块间的差异运动在其边界最为强烈.强震是在区域构造作用下,应力在变形非连续地段的不断积累并达到极限状态后突发失稳破裂的结果,而活动地块边界带由于其差异运动强烈而构造变形非连续性最强,因而最有利于应力的积累而孕育强震.中国大陆几乎所有 8 级和 80%~90% 的 7 级以上强震发生在活动地块边界带上,表明地块间的差异运动是大陆强震孕育和发生的直接控制因素(图 1. 张培震等, 2003).

根据项目提出的块体划分原则和标志,可以将中国大陆分成若干活动地块,不同的活动地块由于其边界作用力不同、边界带深浅结构不同、深部地球动力作用的不同,而具有不同的构造变形方式和地震活动习性.作为工作框架,中国大陆可以初步划分为天山、准噶尔、阿尔泰、塔里木、祁连、柴达木、昆仑、羌塘、拉萨、喜马拉雅、川滇、阿拉善、鄂尔多斯、华北、燕山、东北、华南、胶辽、东南沿海等活动地块.其中天山、祁连、川滇、鄂尔多斯和华北活动地块地震活动性强,且人烟稠密、经济发达,地震造成的潜在破坏很大.这一初步划分方案为下一步的研究提供了活动地块的基本格架.

### 4.2 昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震综合科学考察的地震学研究初步结论

参加现场监测的地震学家从昆仑台阵的工作中提出了一些有意义的科学问题<sup>②</sup>,如地震序列的精定位、典型震相与间断面、特殊构造的关系及地球动力学意义、断层围限波揭示出的断层特征、由地震资料得到的地震断层长度与由地质调查得到的地震断层长度的关系、是否存在“静地震”的问题、小孔径地震台阵的定位能力问题;并认为这些问题是深入了解此次  $M_s 8.1$  强烈地震深部构造环境、动力来源及发生过程的关键所在.

综合余震的空间分布定位结果和主震震源破裂时空过程反演结果,可以看出此次地震的深部破裂长度接近 400 km,这与地面的地质调查结果以及卫星遥感照片解读结果是一致的,且余震主要集中在破裂段的西部.从余震空间分布形态看,此次地震余震活动局限在深度 28 km 范围的上地壳内,断层形态接近直立,断层错动性质以左旋走滑为主(Yang *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002a).

在余震观测同时进行的浅层探测结果显示,深部断裂带的破碎规模比仅从地表观测到

① 任金卫,张祖生等执笔. 2003. 中国地震局科技发展司“昆仑山口西 8.1 级地震综合科学考察工作总结”.

② 吴忠良等, 2002. 昆仑台阵一期工作汇报. 中国地震局地球物理研究所 2001 年度监测预报工作总结.

的要大得多. 地表观测的断裂宽度一般为数米的尺度, 而在 40 米深处, 破裂带宽度已经达到了 100 m. 更深处的破碎带宽度可能更大. 这在断层围陷波的观测中可得到解答. 由于断层破碎带相对于其两侧的介质具有较低的速度和较低的  $Q$ , 因而产生了沿低速的破碎带传播的地震导波, 即断层围陷波. 在昆仑山口西侧观测到的由爆破激发的断层围陷波具有相当大的振幅, 它位于 S 波之后, 频率较低, 具有面波的性质. 利用窄带通滤波的方法, 得到了沿断层传播的围陷波的频散曲线, 表明断层带内的速度明显地低于其两侧的速度. 测线 B 的断层围陷波发育的情况显示, 在数公里深处的断层破碎带的宽度达到了 300 m 以上, 远大于地表观察到的情形(Wang *et al.*, 2003b).

吴忠良博士和李丽博士为本文提供了一些科学项目的资料, 在此表示感谢.

### 参 考 文 献

- 白武明, 林邦慧, 陈祖安. 2003. 1976 年唐山大地震发生对华北地区各地块运动与变形影响的数值模拟研究[J]. 中国科学(D辑), 33(增刊): 99~107
- 蔡永恩, 何涛, 王仁. 1999. 1976 年唐山地震震源动力过程的数值模拟[J]. 地震学报, 21(5): 469~477
- 程万正, 李桂芳, 乔惠珍, 等. 2002. 四川沐川 5.7 级震群子序列的震源参数变化[J]. 中国地震, 18(2): 203~213
- 崔效锋, 谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报, 21(5): 513~522
- 崔效锋, 谢富仁. 2001. 1976 年唐山地震前后华北地区现代构造应力场的时空变化特征[J]. 中国地震, 17(3): 280~288
- 丁志峰, 何正勤, 吴建平, 等. 2001. 青藏高原地震波三维速度结构的研究[J]. 中国地震, 17(2): 202~209
- 高孟潭, 俞言祥, 张晓梅, 等. 2002. 北京地区地震动的三维有限差分模拟[J]. 中国地震, 18(4): 356~364
- 何昌荣, 周永胜, 桑祖南. 2002. 攀枝花辉长岩半脆性-塑性流变的实验研究[J]. 中国科学(D辑), 32(9): 717~726
- 何正勤, 丁志峰, 叶太兰, 等. 2002. 中国大陆及其邻域的瑞利波群速度分布图象与地壳上地幔速度结构[J]. 地震学报, 24(3): 252~259
- 李松林, 张先康. 2002. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报, 45(2): 210~217
- 刘亚静, 叶国扬, 毛兴华, 等. 2002. 俯冲带深部应力场的二维粘弹性有限元数值模拟[J]. 地震学报, 24(3): 285~292
- 楼海, 王椿镛, 皇甫岚, 等. 2002. 云南腾冲火山区上部地壳三维地震速度层析成像[J]. 地震学报, 24(3): 243~251
- 陆鸣, 徐锡伟, 陈文斌, 等. 2002. 昆仑山口西 8.1 级地震调查[J]. 中国地震, 18(1): 117~118
- 马玉宏, 谢礼立. 2002. 考虑地震环境的设计偶遇地震和罕遇地震的确定[J]. 建筑结构学报, 23(1): 48~52
- Mozaffari P, 许力生, 吴忠良, 等. 1999. 用长周期体波数据反演 1988 年 11 月 6 日澜沧-耿马  $M_s=7.6$  地震的矩张量[J]. 地震学报, 21(4): 344~353
- 宁杰远, 臧绍先. 1999. 对俯冲带深震成因的探讨[J]. 地震学报, 21(5): 523~532
- 宁杰远, 臧绍先. 2001. 俯冲带波速结构的数值模拟[J]. 地球物理学报, 44(2): 190~198
- 乔学军, 王琪, 杜瑞林, 等. 2002. 昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震的地壳形变特征[J]. 大地测量与地球动力学, 22(4): 6~11
- 秦嘉政, 李白基, 钱晓东, 等. 2001. 云南武定地震余震近场尾波衰减的区域特征[J]. 地震学报, 23(1): 87~97
- 任金卫. 2002. 利用 GPS 观测结果反演中国大陆及邻区构造变形运动[J]. 地球物理学报, 45(增刊): 123~135
- 任金卫, 汪一鹏, 吴章明, 等. 1999. 青藏高原北部东昆仑断裂带第四纪活动特征与滑动速率[A]. 见: 中国地震局科技发展司《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究——理论与应用(7)[C]. 北京: 地震出版社, 147~164
- 冉勇康, 陈立春, 徐锡伟. 2001. 北京西北活动构造定点资料与未来强震地点的讨论[J]. 地震学报, 23(5): 502~513
- 阮爱国, 王椿镛. 2002. 云南地区上地幔各向异性研究[J]. 地震学报, 24(3): 260~267
- 帅向华, 成小平, 姜立新. 2001. 基于 ArcView 的地震应急快速响应信息系统[J]. 地震, 21(4): 94~99
- 孙苟英, 张怀, 梁国平. 2000. 东亚大陆下的地幔流动及其对东亚的作用力[A]. 见: 白以龙, 杨卫主编. 力学 2000[C]. 北京: 气象出版社, 388~391

- 滕吉文, 张中杰, 王光杰, 等. 1999. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力过程与陆-陆碰撞新模型[J]. 地球物理学报, **42**(4): 481~494
- 田勤俭, 丁国瑜, 申旭辉. 2002. 青藏高原东北隅强震构造模型[J]. 地震, **22**(1): 9~16
- 王椿镛, 楼海, 王飞. 1999. 大别山超高压变质带地壳结构及其构造意义[J]. 地震学报, **21**(5): 533~544
- 王椿镛, 吴建平, 楼海, 等. 2003. 川西藏东地区地壳 P 波速度结构[J]. 中国科学(D 辑), **33**(增刊): 181~189
- 王椿镛, 楼海, 吴建平, 等. 2002. 腾冲火山地热区地壳结构的地震学研究[J]. 地震学报, **24**(3): 231~242
- 王飞, 王椿镛, 张东宁. 1999. 大别造山带构造演化的数值模拟[J]. 地震学报, **21**(5): 478~486
- 王培德, Klaus S. 2002. 地震近场记录中来自沉积盆地底部的 S-P 转换波震相[J]. 地震学报, **24**(5): 407~478
- 吴云, 帅平等. 1999. 用 GPS 观测结果对中国大陆及邻区现今地壳运动和变形的初步探讨[J]. 地震学报, **21**(5): 545~553
- 吴珍珍, 吴中海, 江万, 等. 2001. 中国大陆及邻区新生代构造地貌演化过程与机理[M]. 北京: 地质出版社, 275
- 吴忠良, 陈运泰, Mozaffari P. 1999. 应力降标度性质与震源谱高频衰减常数[J]. 地震学报, **21**(5): 460~468
- 吴忠良. 1999. 鉴别地震活动周期性和随机性的广义 Rydelek-Sacks 检验[J]. 地震学报, **21**(5): 487~494
- 吴忠良. 2001. 由宽频带辐射能量目录和地震矩目录给出的视应力及其地震学意义[J]. 中国地震, **17**(1): 9~16
- 吴忠良, 黄静, 林碧苍. 2002. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报, **24**(3): 293~301
- 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[J]. 地震学报, **21**(5): 449~459
- 许力生, 杨智娴, 陈运泰. 1999. 集集地震序列和震源破裂过程初步分析[A]. 见: 陈运泰主编. 中国地震学会成立 20 周年紀念文集[C]. 北京: 地震出版社, 97~112
- 许向彤, 陈运泰, 王培德. 1999. 1995 年 7 月 20 日怀来盆地  $M_L=4.1$  地震的破裂过程[J]. 地震学报, **21**(6): 570~582
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学(D 辑), **33**(增刊): 151~162
- 许忠淮. 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. 地震学报, **23**(5): 492~501
- 许忠淮, 徐国庆, 吴绍武. 1999. 东海地区现代构造应力场及其成因探讨[J]. 地震学报, **21**(5): 495~501
- 谢富仁, 张世民, 窦素芹, 等. 1999. 青藏高原北、东边缘第四纪构造应力场演化特征[J]. 地震学报, **21**(5): 502~512
- 杨智娴, 于湘伟, 郑月军, 等. 2003. 中国中西部地区地震的重新定位和三维地壳速度结构[J]. 地震学报, **25**(6): (待发表)
- 易桂喜, 闻学泽, 徐锡伟. 2002. 川滇地区若干活动断裂带整体的强地震复发特征研究[J]. 中国地震, **18**(3): 267~276
- 尹周勋, 赖明惠, 熊绍柏, 等. 1999. 华南连县—博罗—港口地带地壳结构及速度分布的爆炸地震深测结果[J]. 地球物理学报, **42**(3): 383~392
- 俞言祥, 高孟潭. 2001. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应[J]. 地震学报, **23**(6): 615~621
- 于泳, 洪汉净, 刘培珣, 等. 2003. 粘弹性有限元与弹簧滑块耦合模型——断层与地块相互作用的数值模拟[J]. 中国科学(D 辑), **33**(增刊): 82~90
- 袁道阳, 刘百箴, 张培震, 等. 2002. 兰州庄浪河断裂带的新构造变形与地震活动[J]. 地震学报, **24**(4): 441~444
- 臧绍先, 宁杰远. 2001. 亚稳态橄榄石对俯冲带负浮力的影响及其动力学意义[J]. 地球物理学报, **44**(3): 336~345
- 臧绍先, 宁杰远, 景志成. 2001. 俯冲带流变性质的研究[J]. 中国科学(D 辑), **31**(9): 705~711
- 曾融生, 丁志峰, 吴庆举, 等. 2000. 喜马拉雅及南藏的地壳俯冲带——地震学证据[J]. 地球物理学报, **43**(6): 780~797
- 赵瑞斌, 李军, 向志勇, 等. 2002. 昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂带西段考察[J]. 内陆地震, **16**(2): 175~179
- 张国民, 张培震. 2000. “大陆强震机理与预测”中期学术进展[J]. 中国基础科学, (10): 4~10
- 张风华, 谢礼立. 2001. 城市防震减灾能力评估研究[J]. 自然灾害学报, **10**(4): 57~64
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002a. 中国大陆现今构造变形的 GPS 速度场与活动地块[J]. 地学前缘, **9**(2): 430~441
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002b. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. 地学前缘, **9**(2): 442~450
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D 辑), **33**(增刊): 12~20
- 中国地震局监测预报司(编). 2002. 2001 年昆仑山口西 8.1 级大地震[M]. 北京: 地震出版社, 129
- 周荣茂, 陈运泰, 吴忠良. 1999a. 由矩张量反演得到的海南东方震群的震源机制[J]. 地震学报, **21**(4): 337~343
- 周荣茂, 陈运泰, 吴忠良. 1999b. 由矩张量反演得到的北部湾地震的震源机制[J]. 地震学报, **21**(6): 561~569



- 周元泽, 蒋志勇, 臧绍先. 2002. 伊豆—小笠原下方 660 km 间断面的区域性差异[J]. 地震学报, **24**(3): 317~324
- 朱文耀, 张强. 2000. 中国地球自转和地壳运动监测研究[M]. 天文学进展, **18**(1): 9~16
- Chen Qifu, Willemann R J. 2001. Global test of seismic event locations using three dimensional earth models[J]. *Bull Seismol Soc Amer*, **74**(6): 1 704~1 716
- Chen Yuntai, Xu Lisheng. 2000. A time-domain inversion technique for the tempo-spatial distribution of slip on a finite fault plane with applications to recent large earthquakes in Tibetan Plateau[J]. *Geophys J Int*, **143**(2): 407~416
- Deng Zhihui. 2000. On the anomaly of satellite infrared temperature before strong earthquake in Yunnan, China[J]. *EOS Trans Amer Geophys Un*, **81**(22): 139
- Fu Zhengxiang, Liu Jie. 2003. Researches on long-term seismic risk in Zhangjiakou-Ponglai fault zone, China[J]. *Tectonophysics*, (in press)
- Guo Shunmin, Xiang Hongfa, Xu Xiwei, *et al.* 2000. Longling-Lancang fault zone in southwest Yunnan, China—A newly-generated rupture zone in continental crust[J]. *Chinese Science Bulletin*, **45**(4): 376~379
- Jiang Zaisen, Zhang Xi, Chen Bing, *et al.* 2000. The Characteristics of recent crustal horizontal movement and strain stress field in north China[J]. *Chinese J Geophys*, **43**(5): 695~704
- Jing Zhicheng, Ning Jieyuan. 2001. A coupled computational scheme on thermal and phase structures of subducting slabs [J]. *Chinese Physics Letters*, **18**(10): 1 297~1 300
- Lin Bichang, Zhang Tianzhong, Zheng Xiufen, *et al.* 2002. Properties of the 2001 Kunlun Mountain Pass, Qinghai-Tibet border,  $M_w 7.8$  earthquake and estimation of the future tendency of strong aftershocks[A]. *The 2002 Western Pacific Geophysics Meeting Oral Report*[C]. Wellington, New Zealand: AGU, 74
- Ma Shengli, He C. 2001. Period doubling as a result of slip complexities in sliding surfaces with strength heterogeneity [J]. *Tectonophysics*, (337): 135~145
- Ma Shengli, Ma Jin, Liu Li Qiang. 2002. Experimental evidence for seismic nucleation phase[J]. *Chinese Science Bulletin*, **47**(9): 769~774
- Wang Chunyong, Chen Winston, Mooney W D. 2003a. 3-D velocity structure of crust and upper mantle in southwestern China and its Tectonic Implications[J]. *J Geophys Res*, (in press)
- Wang Chunyong, Ding Zhifeng, Chen Winston. 2003b. Exploration of detail structure of the Kunlun fault, Qinghai Province, China[A]. *Geophysical Research Abstract*, Vol. 5[C]. Nice, France: European Geophysical Society, 14 315
- Wang Suyun, Thomas Hearn, Xu Zhonghuai, *et al.* 2001a. Velocity structure of uppermost mantle beneath China continent from Pn tomography[J]. *Science in China (D)*, **45**(2): 143~150
- Wang Qi, Zhang Peizhen, Freymueller J T, *et al.* 2001b. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements[J]. *Science*, **294**: 574~577
- Wu Zhenhan, Jiang Wan, Peter Blisniuk, *et al.* 1999. ESR dating of the evolution of the Shuanghu basin in the Northern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, **73**(3): 289~293
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Sun Jianbao *et al.* 2001. A preliminary study on geological and seismogenic structure in the region of 1969  $M=7.4$  Bohai sea earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, **15**(4): 365~379
- Xu Lisheng, Chen Yuntai. 2002. Source parameters of the 2002 Kunlun mountain  $M_w 7.8$  earthquake from the waveform inversion[A]. *The 2002 Western Pacific Geophysics Meeting Oral Report*[C]. Wellington, New Zealand: AGU, 74
- Xu Lisheng, Chen Yuntai, Teng Taliang, *et al.* 2002a. Temporal-spatial Rupture Process of the 1999 Chi-Chi earthquake from IRIS and GEOSCOPE Long Period waveform data using aftershocks as empirical Green's functions[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **92**(8): 3 210~3 228
- Xu Xiwei, Chen Weibin, Ma Wentao, *et al.* 2002b. Surface rupture of Kunlunshan earthquake ( $M_s=8.1$ ), northern Tibetan Plateau, China[J]. *Seism Res Lett*, **73**(6): 884~892
- Yang Jiansi, Wang Peide, Zheng Xiufen, *et al.* 2002. Deploying a mobile small aperture seismic array for the near-real-time and quasi-near-source monitoring of aftershock sequence of the 2001 Kunlunshan  $M_w=7.8$  earthquake[A]. *The 2002 Western Pacific Geophysics Meeting Oral Report*[C]. Wellington, New Zealand: AGU, 74

- Zang Shaoxian, Qiyong Chen, Jieyuan Ning, *et al.* 2002. Motion of the Philippine Sea plate consistent with the NUVEL-1A model[J]. *Geophys J Int*, **150**: 809~819
- Zhang Dongning, Yang Jiansi, Zheng Xiufen, *et al.* 2002a. Preliminary results of the seismological observation of the foreshock main shock aftershock-sequence of the 2001 Kunlun mountain pass  $M_w=7.8$  earthquake[A]. *The 2002 Western Pacific Geophysics Meeting Oral Report*[C]. Wellington, New Zealand: AGU, 74
- Zhang Guomin, Zhu Lingren, *et al.* 1999. Predictions of the 1997 strong earthquakes in Jiashi Xinjiang China[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **89**(5): 1 171~1 183
- Zhang Guomin, Wang Suyun, Li Li, *et al.* 2002b. Focal depth research of earthquakes in mainland China; Implication for tectonics[J]. *Chinese Science Bulletin*, **47**(12): 969~974
- Zhou Shiyong, Chen Xiaofei. 2002. Study on seismogenesis of the 1997 Jiashi earthquake swarm, Western China[J]. *Progress in Nature Science*, **12**(1): 50~54

## CONTINENTAL DYNAMICS AND CONTINENTAL EARTHQUAKES

Zhang Dongning<sup>1)</sup> Zhang Guomin<sup>2)</sup> Zhang Peizhen<sup>3)</sup>

1) *Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China*

2) *Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China*

3) *Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China*

**Abstract:** Two key research projects in geoscience in China since the IUGG meeting in Birmingham in 1999, the Project of East Asian Continental Geodynamics and the Project of the Mechanism and Prediction for Strong Continental Earthquakes are introduced in this paper. Some details of two projects, such as their sub-projects, some preliminary research results published are also given here. Because of the large magnitude of the November 14, 2001 Kunlun Mountain Pass  $M_s=8.1$  earthquake occurred, in the third part of this paper, some preliminary research results are reviewed for the after-shock monitoring and the multi-disciplinary field survey, the impact and disaster of this earthquake on the construction site of Qinghai-Xizang (Tibet) railway and some other infrastructures.

**Key words:** geodynamics; continental earthquake; mechanism; Kunlun Mountain Pass  $M_s=8.1$  earthquake