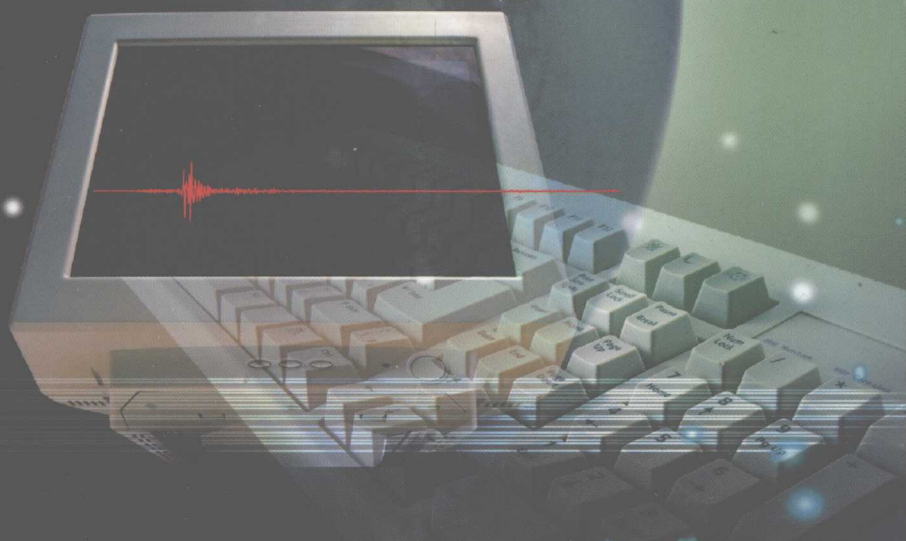


# 数字地震观测资料应用研究

主 编 陈章立

副主编 郑思华 刘 杰



地震出版社

P315.61

C653.1

P315.61 / 2  
C653.1

# 数字地震观测资料应用研究

主 编 陈章立

副主编 郑斯华 刘 杰

地震出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

数字地震观测资料应用研究/陈章立主编. —北京:地震出版社, 2007.10

ISBN 978-7-5028-3185-1

I. 数… II. 陈… III. 数字技术—应用—地震观测 IV. P315.69

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 114421 号

**地震版 XT 200600162**

**数字地震观测资料应用研究**

主 编 陈章立

副主编 郑斯华 刘 杰

责任编辑:刘晶海

特邀编辑:吴 冰

责任校对:张晓梅

---

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

发行部:68423031 68467993

门市部:68467991

总编室:68462709 68423029

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

邮编:100081

传真:88421706

传真:68467991

传真:68467972

经销:全国各地新华书店

印刷:北京地大彩印厂

---

版(印)次:2007年10月第一版 2007年10月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:826千字

印张:32.25

印数:001~1000

书号:ISBN 978-7-5028-3185-1/P·1338 (3874)

定价:100.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

## 序

地震学是一门以观测为主的科学。地震仪对于地震学犹如望远镜对于天文学一样的重要。地震学的发展是与地震仪的发展、地震观测水平的提高密切关联的。据《后汉书》记载,公元138年我国东汉时期的张衡(公元78~139年)检测到了发生于陇西(今甘肃省境内)的地震。这是人类历史上首次用仪器检测到在远处(陇西)发生的、但在仪器所在地(洛阳)无感的地震。张衡用的仪器就是他在公元132年发明的“候风地动仪”。1889年,德国冯·雷伯-帕什维茨(Ernst von Rebeur-Paschwitz)在波茨坦记录到了一次发生于日本的远震。这是人类历史上首次用现代地震仪记录到的远震。Rebeur-Paschwitz用的仪器就是他在1884年根据水平摆倾斜仪原理制成的、灵敏度相当高、可作地震仪用的倾斜仪。

地震学也是一门定量的科学。只不过是在19世纪70年代中期以前,地震学是以宏观观察和定性描述为主,到了19世纪70年代中期以后,随着现代地震仪的发展,地震学家才有可能定量地研究实际的地面运动,并在此基础上发展起了作为定量的科学的现代地震学。从19世纪70年代中期至20世纪70年代中期长达100年的时间里,地震学家主要依靠的是模拟记录地震仪。运用这些现在看来频带很窄、分辨率很低、动态范围很小的地震仪观测得到的资料,地震学家居然在地球内部结构、地震定位、震源机制等诸多方面都取得了堪称辉煌的成绩。

20世纪70年代中期以来,地震仪器的制作技术有了突破性的进展:一方面,地震计的频带展宽了,分辨率提高了,动态范围也扩大了;另一方面,随着微电子技术的发展,地震观测系统大量地采用了数字化记录方式。数字记录地震仪具有记录频带宽、分辨率高、动态范围大以及可与计算机联接处理等优点,从而使地震学发生了一次意义重大的飞跃。从1975年开始,世界各国竞相布设数字地震台网,数字地震台站数量如雨后春笋般地增加。地震观测质量的提高和计算机的广泛应用使地震学家能够以前所未有的效率获取和分析处理海量的、来自地震本身和地球内部的、高质量的信息,在科学上极大地增进了人类对其赖以生存的行星地球内部及地震的认识,在对于经济建设、社会发展以及国家安全具有重大意义的地震震情监测、地震预测、地震预警、工程抗震、预防和减轻地震灾害、地震勘探(特别是石油与天然气地震勘探)、地下核试验的检测与识别等方面均取得了长足的进步。

在过去的近30年间,由于中国地震局和有关部门的高度重视和有力支持,经过广大地震科学工作者和工程技术人员的不懈努力,我国在数字地震观测方面取得了相当大的进展。通过中美合作,中国地震局在1983年5月开始建设、1987年10月建成了在国际地震学界享有盛誉的中国数字地震台网(CDSN),并运作至今,成为全球地震台网(GSN)的一个重要组成部分。1996年以来,通过“中国数字地震监测系统”工程建设,迄今已建成了覆盖全国的国家数字地震台网(由48个地震台组成)、21个区域遥测数字地震台网(共有353个子台),以及地震应急流动数字地震台网和地球深部探测流动数字地震台网等3个层次的地震监测系统。与此同时,在数字地震学方面也开展了相应的研究工作,并取得了许多有意义的成果,《数字地震观测资料应用研究》便是其中的一个。这本以中国地震局原局长陈章立研究员为主编,郑斯华、刘杰研究员等为副主编的文集,汇集了地震局地震预测研究所“地震图像与数字地震观测资料应用研究实验室”研究人员及其合作者近年来在数字地震学研究方面具有代表性的成果,全书共57篇论文,内容涉及地壳-地幔结构、地震定位、地球介质品质因子、地震机制、地震震源参数、地震破裂过程等范围广泛的学术领域,从一个侧面反映了我国在数字地震学研究方面的可喜进展。我热烈祝贺《数字地震观测资料应用研究》出版,并很高兴地将它推荐给从事地震研究的专家学者和关注地震科学发展的广大读者。

陈运泰

2007年5月27日

## 前 言

地震预报是当代自然科学领域里一个难度很大，而富有魅力的前沿课题。近40年来广大地震科技工作者所进行的地震预报努力、所遭受的许多挫折和取得的有限成功表明，从科学上来说，地震预报的希望与困难同在。而在人们所面对的各种困难之中，地球内部的“不可见性”位居首位。这种“不可见性”制约了人们对地震发生的构造环境、震源和孕震过程中震源区及近邻区域应力状态及介质特征的认识。但正如地震学家加里津所说：“地震是霎那间照亮地球内部的一盏明灯”，地震波所携带的来自震源和地球介质的丰富信息为我们克服这种“不可见性”提供了重要的途径。以地震目录为基础数据的地震活动图像的分析，作为一种被广泛应用的地震预报方法，在地震预报的实际应用中所取得的某些成功，正说明了这一点。但目前地震目录所给出的地震参数的数目明显少于描述地震发生时，这一构造事件所需要的自由度，决定了地震活动图像分析所给出的地震预测意见，往往存在某些不确定性。回顾地震预报研究的历史，人们可以看到这样一个重要的事实：地震预报问题的提出和地震预报研究的深入是与地震学本身的发展，尤其是地震参数、介质参数的测定紧密联系在一起。每当人们可以较可靠地测定一个新的参数，地震预报研究就朝前推进一步。这表明，增加物理含义较明确的新的独立参数对减少地震预报的不确定性是至关重要的。而与模拟地震记录比较，现代数字地震记录所具有的频带宽、动态范围大、分辨率高和便于计算机处理等优点逐渐为测定新的地震参数、介质参数与深入研究地震发生的构造环境和震源特征提供了可能，为地震预报研究的深入和预报水平的提高带来了新的希望。

1975年国际上数字地震观测技术诞生后，我国于20世纪80年代初通过国际地震科技合作，开始了数字地震观测台网的建设。“八五”期间中国数字地震观测系统研制的成功为我国全面加强数字地震观测台网的建设奠定了重要基础。“九五”期间在中央和地方各级政府的关心、支持下，中国地震局开始制定并逐步实施了数字地震观测台网的建设计划。“九五”期间已完成了由75个台站组成的国家数字化基本台网和20个区域遥测数字化地震观测台网(含353个子台)的建设，从“十五”开始，台网的密度逐渐增大。但已产出的大量数据尚未能得到充分的利用。2002年初，陈章立、郑斯华、李志雄、刘杰、黄金莉等志同道合的地震学者，共同对其原因作了初步分析，为了推进数字地震观测资料在地震科学研究，尤其在地震预报研究中的应用，在中国地震局原分析预报中心(现为地震预测研究所)领导的支持下，按照“志同道合、开放联合、思想共享、资源共享及成

果共享”的原则，成立了“地震图像与数字地震观测资料应用研究实验室”。实验室建立以来，得到了中国地震局、科技部、外专局和许多省（区、市）地震局的关心与支持，并得到陈运泰院士和梅世蓉、刘启元、王椿镛、张先康、庄灿涛和金星等教授的热情鼓励与指导。近5年来，实验室先后约130人参加了其中的研究工作，与19个省（区、市）地震局及中国地震局地震台网中心建立了良好的合作研究关系。在合作研究过程中，为这些单位培训了80多名年轻的地震科技人员，形成了一个开放联合的新型科研团队。与此同时，受人事部和中國地震局监测预报司、人事教育司的委托，举办了一期全国地震分析预报骨干数字地震观测资料应用研究的培训班；受中国地震局监测预报司的委托，举办了一期首都圈地区数字地震台网技术骨干培训班。参加两期培训班的人员共70多人。实验室还积极支持、推进实验室成员与美国、日本等国家有关科研机构及香港大学的一些专家之间的交流与合作，跟踪和研究国际数字地震学发展的新进展。

推进数字地震观测资料在我国地震科学研究，尤其在地震预报研究中的充分应用不是一蹴而就的，而是一项长期的艰巨的任务。实验室及合作团队将继续在中国地震局的领导下，与广大地震科技工作者作坚持不懈的努力。为便于合作团队及有关同行的深入研究提供有益的参考，特将本实验室及合作团队成员近几年来已在国内外有关刊物发表的和拟发表的部分论文作了汇编《数字地震观测资料应用研究》，并借此向所有关心并支持本实验室工作的各级领导和专家汇报本实验室成立以来的工作。该书主要内容包括利用数字地震观测资料反演地壳结构、地震破裂过程、震源机制、台站场地响应和测定地震震源参数、介质参数及S波分裂参数等，在此基础上对数字地震观测资料在地震预测预防研究中的应用作了粗略的探讨。由于本实验室及合作团队成员知识水平的限制，所得到的一些认识难免有欠妥之处，敬请广大读者予以指正。

本实验室的李志雄、黄金莉为本书做了大量的组织与指导工作，赵翠萍、王勤彩、华卫负责论文的收集和统编。在此，向他们表示感谢。

陈章立

2006年10月

# 目 录

## 壳幔速度结构及地震破裂过程

- 2001年11月14日昆仑山口西  $M_s$ 8.1 地震震源破裂过程研究  
..... 周云好 陈章立 缪发军 (3)
- 1997年1月21日新疆伽师 6.1 及 6.4 级地震震源破裂过程研究  
..... 周云好 王海涛 赵翠萍 (16)
- 2003年大姚 6.2 及 6.1 级地震前三维波速结构的演化..... 周龙泉 刘杰 张晓东 (26)
- 利用测震台网记录获得加速度波形的研究方法研究 ... 姚兰予 聂永安 赵靖华 卞真付 (36)
- 印度尼西亚 8.7 及 8.5 级巨震对云南地区地震活动的远震触发分析  
..... 李纲 刘杰 郭铁栓 (43)
- 地震非均匀度物理意义的实验研究  
..... 李志雄 马胜利 李圣强 李闽峰 路鹏 陈华静 王松 吴婷 (52)

## 地震精定位和震源机制

- 2003年云南大姚 6.2 及 6.1 级地震序列特征分析和地震触发研究  
..... 华卫 刘杰 郑斯华 陈章立 (63)
- 姚安地震序列与永胜地震序列的高精度定位 ..... 王新岭 刘杰 张国民 赵翠萍 (76)
- 双差定位法在华东及安徽地区地震精确定位中的初步应用  
..... 沈小七 黄显良 王行舟 闫素萍 (88)
- 云南地区地震精确定位及其构造意义分析 ..... 徐彦 杨晶琼 苏有锦 刘杰 (95)
- 九江-瑞昌地震的精确定位及发震构造初探  
..... 吕坚 倪四道 沈小七 高建华 曾新福 (102)
- 利用 P 波和 S 波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解  
..... 刘杰 郑斯华 康英 啜永清 (110)
- 1999年岫岩  $M_s$ 5.4 地震序列主应力变化特征的研究  
..... 兰从欣 刘杰 马士振 苗春兰 (117)
- 广东及邻区的应力张量反演 ..... 康英 郑斯华 杨选 陈杏 陈贵美 (127)
- 广东及邻区地震的震源机制特征 ..... 康英 杨选 吕金水 陈杏 陈贵美 (132)
- 青岛震群震源机制与震源区应力场的特征 ..... 山长仑 孙庆文 (144)
- 利用 SH/P 振幅比测定中小地震的震源机制 ..... 康英 (148)
- 小震震源机制 P 轴取向的预报应用..... 刘红桂 缪发军 徐戈 孙庆文 山长仑 (156)
- 采用体波谱振幅相关系数方法研究地震序列的震源机制变化过程



.....	朱航 刘杰 陈天长 (164)
单台振幅比方法在马尔康 $M_s4.7$ 地震序列判断中的应用 .....	朱航 龙锋 (175)
<b>介质品质因子和地震震源参数</b>	
Inversion of Attenuation Function and Source Parameters from Regional Seismic Data	
..... Yuk Lung Wong Zheng Sihua Liu Jie Zhao Xinquan Kang Ying (183)	
利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应	
.....	刘杰 郑斯华 黄玉龙 (195)
云南地区 S 波非弹性衰减 $Q$ 值研究	
.....	苏有锦 刘杰 郑斯华 刘丽芳 付虹 徐彦 (203)
云南 4 个地震序列 $Q_c^{-1}$ 值变化特征对比研究 .....	王伟君 刘杰 (212)
张北地震序列的尾波 $Q_c$ 值研究	
.....	王勤彩 郑斯华 刁桂苓 高景春 朱振兴 赵英萍 刘胜国 李津津 (219)
云南地区尾波 $Q_c$ 值的分布特征及其初步解释	
.....	马宏生 刘杰 张国民 王伟君 王辉 王新岭 (224)
尾波 $Q_c$ 值随时间变化在地震预测中的应用研究 ...	马宏生 刘杰 张国民 王伟君 (234)
浙江省及邻近区域尾波 $Q_c$ 值研究 .....	朱新运 钟羽云 张帆 俞铁宏 戚浩 (243)
基于 Aki 模型的近震 S 波尾波 $Q_c$ 值求解及分析软件研制 .....	朱新运 刘杰 张帆 (252)
北京地区中小地震震源参数的反演	
.....	兰从欣 刘杰 郑斯华 马士振 李菊珍 袁学明 (259)
鄂尔多斯地块地壳内 S 波衰减特征的研究 .....	刘红桂 <span style="border: 1px solid black;">啜永清</span> 陈书清 金春华 (269)
姚安地震序列与大姚地震序列震源参数的对比研究 .....	刘丽芳 刘杰 苏有锦 (279)
中小地震震源参数的求解及其相似关系 .....	康英 郑斯华 刘杰 吕金水 (288)
利用数字地震波资料研究新疆天山中东段地区的介质衰减特征	
.....	赵翠萍 张智强 夏爱国 刘杰 (299)
新疆北天山中东段地区震源参数研究 .....	赵翠萍 夏爱国 郑斯华 陈章立 (307)
天山中东段地区震源参数时空演化特征 .....	夏爱国 赵翠萍 (316)
华北中北部地区震源参数和场地响应的联合反演	
... 王勤彩 高景春 郑斯华 刘杰 陈章立 刁桂苓 赵英萍 刘胜国 张从珍 (323)	
华北中北部地面运动衰减研究	
... 王勤彩 高景春 郑斯华 刘杰 刁桂苓 张从珍 刘胜国 (332)	
场地响应、震源参数与介质衰减的同时反演 .....	刘红桂 缪发军 吴晶 (340)
2004 年阳江 $M_s4.9$ 地震震源参数分析 .....	康英 杨选 吕金水 叶繁英 (349)
伽师地震序列的波谱特征及震源参数研究 .....	夏爱国 赵翠萍 (354)
地震视应力的计算及其在地震序列中的表现 .....	刘红桂 刘杰 丁页岭 孙业军 (362)
内蒙古中西部地区震源参数和场地响应反演 .....	高立新 郑斯华 丁风和 (371)
内蒙古中西部地区的地面运动衰减曲线形态 .....	高立新 丁风和 (380)
辽宁地区地震波衰减和场地响应研究 .....	王连权 潘科 曹凤娟 (386)
浙江地区地震波衰减和场地响应研究 .....	邹振轩 (395)

利用遗传算法反演福建地区非弹性衰减系数、场地响应和震源参数 .....	李祖宁 周峥嵘 林树 陈祥熊 鲍挺	(403)
利用数字地震波资料反演山东地区的震源参数、介质非弹性衰减系数和 台站场地响应 .....	山长仑 孙庆文	(410)
陕西关中陕南地区非弹性衰减系数和场地响应 .....	李少睿 邵辉成	(418)
云南地区与频率相关的 P 波 S 波衰减研究 .....	王勤彩 刘杰 郑斯华 陈章立	(426)
<b>其他</b>		
岫岩 5.4 级地震前后尾波振动持续时间比的演化特征 .....	曹凤娟 孙文福 李芳 于龙伟 于笑非	(439)
云南地区地震序列的波速比( $V_P/V_S$ )异常研究 .....	黎明晓 刘杰	(445)
地震波速比异常的空间分布特征 .....	刘红桂 陈飞 章熙海	(454)
2003 年云南大姚 6.2 及 6.1 级地震序列 S 波分裂研究 .....	华卫 刘杰 陈章立 郑斯华	(460)
2000 年姚安地震余震序列的剪切波分裂研究 .....	王新岭 刘杰 张国民 马宏生 王辉	(476)
2003 年云南大姚 6.2 及 6.1 级地震余震 S 波分裂研究 .....	郭成栋 付虹 刘杰	(489)
乌鲁木齐及附近地区剪切波分裂特征研究 .....	曲延军 赵翠萍 赵建政 马保柱 聂晓红 孙甲宁 上官文明	(497)

# 壳幔速度结构及地震破裂过程



# 2001年11月14日昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震震源破裂过程研究

周云好<sup>1)</sup> 陈章立<sup>2)</sup> 缪发军<sup>1)</sup>

1) 南京 210014 江苏省地震局

2) 北京 100036 中国地震局地震预测研究所

**摘要** 根据 IRIS 全球地震台网 28 个台的长周期地震仪记录的 P 波数字地震图, 用直接由远场体波地震图反演震源破裂过程的一种新方法, 研究了 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西  $M_s8.1$  ( $M_w7.8$ ) 地震的震源破裂过程。结果表明: 这是一次极为复杂的地震破裂事件。破裂从震源位置 ( $35.95^\circ\text{N}$ ,  $90.54^\circ\text{E}$ ,  $h10\text{km}$ ) 开始后, 先向西扩展, 后在有限断层的东端和中部的的大尺度空间范围内接连出现了多个破裂生长点。破裂在这些生长点先后扩展, 最后在矩心位置 ( $35.80^\circ\text{N}$ ,  $92.91^\circ\text{E}$ ,  $h15\text{km}$ ) 以东 50 km 范围内结束。整个破裂持续了约 142 s。破裂过程可粗略地分为三个阶段: 第一阶段, 从第 0 s 开始至第 52 s 结束, 持续了 52 s。释放的地震矩约为总地震矩的 24.4%; 第二阶段, 从第 55 s 开始至第 113 s 结束, 持续了 58 s。释放的地震矩约为总地震矩的 56.5%; 第三阶段, 从第 122 s 开始至第 142 s 结束, 持续了 20 s。释放的地震矩约为总地震矩的 19.1%。地震破裂面长约 490 km, 破裂面最大宽度达 45 km。破裂主要发生在 30 km 深度范围内。地下岩层的平均静态位错量约为 1.2 m, 最大静态位错量达 3.6 m。平均静态应力降约为 5 MPa, 最大静态应力降达 18 MPa。静态位错量和静态应力降最大的区域位于矩心位置以东 50 km 范围内。

**关键词** 数字地震图 反演 昆仑山口西  $M_s8.1$  地震 震源破裂过程

## 引言

2001 年 11 月 14 日, 在我国昆仑山口西发生了  $M_s8.1$  (据我国地震台网测定) ( $M_w7.8$ , HRV; ERIUT) 地震。发震时刻为 09h26min10.0s UTC; 震中位于  $35.95^\circ\text{N}$ ,  $90.54^\circ\text{E}$ ; 震源深度为 10 km (据 USGS NEIC)。这是一次极不寻常的地震事件。它是自 1950 年 8 月 15 日西藏察隅 8.5 级地震后, 50 多年以来, 我国境内发生的最大的一次地震。有史以来, 青藏块体边缘地区曾发生过多次 8 级和 8 级以上地震。但唯有这次 8 级以上地震发生在青藏块体内部 (图 1)。

这次地震前, 出现了诸如空区、条带、增强、平静和震群等地震活动性异常 (刘蒲雄等,

2003)和地下流体异常(车用太等, 2002)。但由于对地震大形势的基本估计不足和没有观测到前震活动等多种原因, 未能对这次地震作出明确和准确的预报(刘蒲雄等, 2003)。这次地震发生在昆仑山南麓近东西向展布的昆仑山断裂的西段。这一青藏高原的偏远地区人烟稀少, 绝大部分地区为无人区, 因而没有造成人员伤亡。但周围的青海、四川、甘肃、新疆、西藏大部分地区震感强烈。青藏公路沿线部分房屋倒塌。青藏公路(109 国道)部分路面和涵洞遭破坏。通讯线路设备、输油管道及其泵站受到不同程度的破坏和影响(陈文斌等, 2001; 陆鸣等, 2002)。

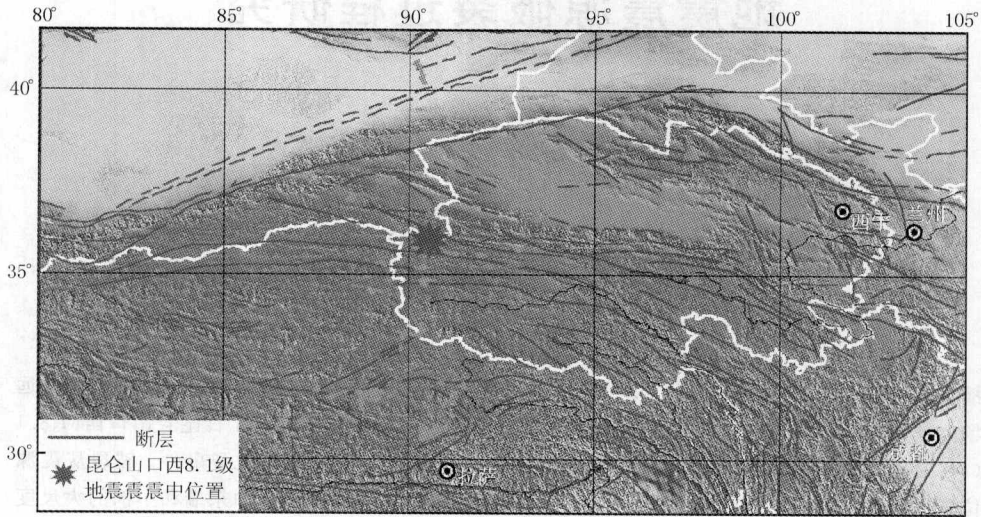


图1 2001年11月14日昆仑山口西  $M_s$ 8.1 地震震中位置(USGS NEIC)和周围区域构造背景

这次地震的孕育、发生可能与大区域的地壳水平运动和变形背景有关。青藏块体内部左旋剪切变形区的范围很大, 这次地震正好发生在与断裂走向一致的左旋剪切应变率量值最高的区域和面膨胀应变的张性区, 重力变化的负值异常区的边缘(江在森等, 2003; 祝意青等, 2003)。日本东京大学地震研究所关于这次地震的矩张量解表明, 这次地震的震源机制为: 断层面走向  $96^\circ$ , 倾角  $86^\circ$ , 滑动角  $1^\circ$ (www.eri.u-tokyo.ac.jp)。断层面近于直立的这一矩张量解与余震的精确定位结果是一致的。近水平向左旋走滑的这一矩张量解与野外考察结果相符合。这次地震主破裂带上地表冻土层最大水平位错量超过 6 m, 垂直向位错量不到 1 m(陈文斌等, 2001; 陆鸣等, 2002; 徐锡伟等, 2002; Lin et al., 2002, 2003; Xu et al., 2002)。Xu 等(2002)的复查结果表明, 这次地震地表最大水平位错量为 7.6 m, 而不是 Lin 等(2002, 2003)报告的 16.3 m。关于这次地震地下断层面滑动的分布情况, 日本东京大学地震研究所网上公布的一个结果(www.eri.u-tokyo.ac.jp; Lin et al., 2003)显示, 在震中附近 200 km 范围内, 破裂没有扩展至地表。这一结果与野外考察结果明显不符(陈文斌等, 2001; 陆鸣等, 2002; 徐锡伟等, 2002; Xu et al., 2002)。许力生和陈运泰(2004)用一种先从观测资料提取震源时间函数, 然后由震源时间函数反演震源破裂过程的方法, 用 20 个台站的长周期 P 波资料, 研究了这次地震的时空破裂过程。他们的结果显示: 这次地震由三次子事件构成。滑动量大于 1.0 m 的破裂区域总长度达 420 km。断层面的最大滑动量达 2.2 m, 平均滑动量约为 1.2 m。最大应力降为 7.9 MPa, 平均应力降为 4.0 MPa。这三次子事件规模不同, 破

裂方向和速度也彼此不同,但由这三次事件组成的昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震由西向东扩展较强的不对称的双侧破裂,破裂时间达 140 s。

反演较大地震的震源过程,出现了多种方法(如: Hartzell and Heaton, 1983; Kikuchi and Kanamori, 1991; Chen and Xu, 2000; Ji et al., 2002. 等)。不同研究者(甚至同一研究者)用不同方法研究同一地震震源过程的文献经常可见。如:关于 1999 年台湾集集  $M_w 7.6$  地震震源过程的研究很多。其中, Ma Kuo-Fong 与 Mori、Lee 和 Yu 一起,曾用 Hartzell 和 Heaton 的方法(Hartzell and Heaton, 1983)对这次集集地震的震源过程做过研究(Ma et al., 2001)。这种反演方法需事先设定大地震破裂起始点位置、破裂传播速度、各子断层在(破裂前沿到达后)每个时间窗中滑动函数的形状(三角形)及持续时间等。两年后, Ji Chen、Helmberger and Wald 又与 Ma Kuo-Fong 一起,用一种将小波变换与模拟退火算法相结合的反演方法(Ji et al., 2002),研究了这次集集地震的震源过程(Ji et al., 2003)。这种方法可同时反演出子断层的滑动幅度、滑动角、破裂起始时间和上升时间函数等(Ji et al., 2002)。本项研究工作,将把一种用梯度法直接根据远场体波观测地震图反演震源时-空过程的新方法(周云好, 2002),应用于昆仑山口西  $M_s 8.1$  ( $M_w 7.8$ )地震的 28 个台站的长周期数字化记录 P 波资料,反演其震源破裂过程。试图得到关于这次地震震源过程新的认识。这种新方法除加了断层不会发生反向滑动的物理约束条件外,没有对断层破裂点的起始位置、破裂方式、破裂传播速度、各子断层滑动函数的形状和持续时间等作任何先验的假定。因而反演结果中很少有人为因素。

## 1 资料

本项研究选取了 IRIS 全球地震台网的、震中距在  $35^\circ \sim 88^\circ$  范围内的 28 个台站的垂直向

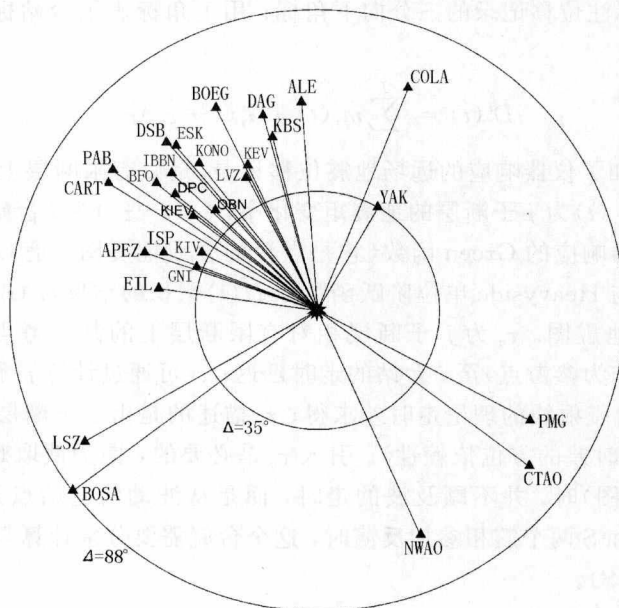


图 2 选用资料的 28 个台站空间分布情况  
 三角星表示台站位置; 英文字母为台站代码; 十角星表示震中位置

长周期地震仪记录到的这次地震的 P 波波形资料(图 2)。在这一震中距范围内,直达 P 波震相远离其他震相,比较清晰(尤其是垂直向 P 波),受地核、地幔结构的复杂性和壳幔边界、上地幔中的间断面以及核幔边界反射、折射的影响较小(Langston and Helmberger, 1975),有利于从中提取震源信息。我们将地震仪的速度记录数据积分变成位移记录数据,并经带宽为 0.005~0.1 Hz 的 8 阶 Butterworth 带通滤波器滤波。在这个频率范围内,所用台站的速度记录型仪器的幅频特性曲线是平直的。选择 0.005 Hz 的低频限,可以滤掉长周期地脉动和由积分速度得位移造成的长周期漂移。0.1 Hz 的高频限高于 P 波的拐角频率,可使地震波携带的震源信息不受损伤。频率高于 0.1 Hz 的远震体波对地球介质的细节比较敏感,地震波携带的震源信息在该频段内会受到严重干扰。本项工作主要研究频带范围在 0.005~0.1 Hz 的震源过程,因而将此频带范围以外的波滤掉。

## 2 方法

本项研究采用一种用梯度法直接根据远场体波地震图反演震源破裂过程的新方法(周云好, 2002),反演这次地震的震源破裂过程。这种方法先根据地震矩张量解、余震分布、记录波形的特征(如方向性效应等)、地震野外考察结果(如地表裂缝和震害空间分布特征)等,确定地震断层面。然后,直接应用地震学基本定理——位移表示定理,将有限断层的全部子断层造成的远场位移的积分表达式写成对有限长波形数据做离散褶积运算的矩阵表达式,在断层不会发生反向滑动的物理约束条件下,用梯度法解出每个子断层的地震矩变化率,从而得出震源的时-空演化图像。下面对这种方法的基本原理作一简单介绍。

将有限源地震断层划分为  $J$  个子断层,每个子断层视为点源,震源机制相同。则由位移表示定理(Aki, K and P. G. Richards, 1980),  $i$  台站的远场地震位移记录可表示为(为叙述简洁起见,以下将不标注位移记录的三分向下角标;用上角标表示台站标号;用下角标表示子断层标号。)

$$D^i(t) = \sum_{j=1}^J m_j(t) * G_j^i(t - \tau_{ij}) \quad (1)$$

式中,  $D^i(t)$  为  $i$  台站加了仪器响应的远场地震位移记录,是以有限断层上参考点波的到时间为时间零点的地震图;  $m_j(t)$  为  $j$  子断层的地震矩变化率;  $G_j^i(t - \tau_{ij})$  为  $i$  台站记录到的  $j$  子断层激发的地震波加了仪器响应的 Green 函数(它是点源的合成地震图,是 Green 函数张量与单位地震矩张量并缩后与 Heavyside 单位阶跃函数源  $H(t)$  褶积的结果)。  $G_j^i(t)$  是从波到达时开始算起的点源的合成地震图。  $\tau_{ij}$  为  $j$  子断层相对有限断层上的某参考点(一般选震源位置——破裂起始点位置作为参考点)至  $i$  台站的走时延迟;  $\tau_{ij}$  可通过计算  $j$  子断层的中心点和参考点至  $i$  台站的两条地震射线的理论走时差求得;  $\tau_{ij}$  描述的是由于子断层之间空间位置的不同引起的到时差异(到时差的方位依赖性)。引入  $\tau_{ij}$  是必要的,因为截取观测地震图和 Green 函数(小震的合成地震图)时,并不顾及波的走时,而是从波动的起始点开始截取的。当从  $i$  台站的资料中截取 P 和 S 两个震相参加反演时,这个台就需要分别计算与 P 波和 S 波对应的延迟时间  $\tau_{ij}(P)$  和  $\tau_{ij}(S)$ 。

为推导简洁起见,令

$$G_j^i(t - \tau_{ij}) = g_j^i(t) \quad (2)$$

则(1)式变为



