

95

“九五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

实验场区地震预报 新技术新方法

中国地震局监测预报司



地震出版社

“九五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

实验场区地震预报新技术新方法

中国地震局监测预报司

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

实验场区地震预报新技术新方法/中国地震局监测预报司.

—北京:地震出版社,2002.6

ISBN 7-5028-2042-6

I. 实… II. 中… III. 试验场-地震预报 IV. P315.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 016736 号

“九五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

实验场区地震预报新技术新方法

中国地震局监测预报司

责任编辑:张友联

责任校对:庞娅萍

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 68423031
门市部:68467991 传真 68467972
总编室:68462709 68423029 传真:68467972
E-mail seis@ht rol cn net

经销:全国各地新华书店

印刷:北京地大彩印厂

版(印)次:2002年6月第一版 2002年6月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:432千字

印张:17

印数:001~800

书号:ISBN 7-5028-2042-6/P·1119 (2597)

定价:28.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

丛书编委会

主 任：陈章立 陈建民
副主任：阴朝民 潘怀文 李志雄
委 员：张国民 罗兰格 陆远忠 罗灼礼
高 旭 车 时 李永林

本书编委会

主 编：罗灼礼 郭大庆 张天中 杜建国
委 员：秦嘉政 杜 芳 程万正 白彤霞
任熙宪 陈华静 顾浩鼎 关华平
毛桐恩 王檀文 石绍先 顾谨平
邓志辉 康春丽 钱家栋 刘祖荫
马 丽 杨立明 兰丛欣

序 言

强烈地震常常以其猝不及防的突变性和巨大的破坏力给社会经济发展、人类生存安全和社会稳定带来严重的危害。建国以来我国发生的 1966 年河北邢台大地震、1970 年云南通海大地震、1999 年台湾南投大地震，特别是 1976 年河北唐山大地震等，都对人民生命财产安全造成严重损失，给社会公众带来了巨大的灾难。

尤其值得注意的是，随着现代经济的快速发展，人口向城市集中和城市都市化程度的提高，地震灾害正在以加速的趋势发展。远的不说，单就 20 世纪 90 年代以来，造成万人以上死亡或百亿美元以上经济损失的重大地震灾害就有多次。其中包括：1990 年伊朗大震造成 4 万人死亡；1993 年印度拉土耳其地震造成 2.5 万人死亡；1994 年美国洛杉矶地震造成 200 亿美元的经济损失；1995 年日本阪神地震死亡人数超过 6000 人，经济损失近 1 000 亿美元；1999 年土耳其伊兹米特地震造成 1.7 万人死亡和 200 亿美元的经济损失。当世界刚刚踏入新世纪门槛的 2001 年 1 月 26 日，发生在印度古吉拉特邦的 7.9 级大地震，又夺去了 3 万人的生命造成超过 100 亿美元的经济损失。因此，减轻地震灾害已成为国际社会的一个热点。

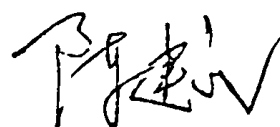
通过地震预报和在预报基础上的预防以减轻地震灾害，一直是地震科学家为之奋斗的目标。我国自邢台地震后开始地震预报研究和实践以来，经过数十年几代地震学家的努力，已建立起独特的地震预报研究和管理机制，以及较为完善且全面服务于地震预报的监测台网体系；与我国国民经济五年计划同步开展的地震科技攻关研究，已成为这种特色机制的有机组成部分。

“九五”地震预报科技攻关研究旨在提高中短期（一年尺度）地震预报水平，同时加强 1~3 年中期预报方法和理论的研究。经过几年的努力，在“边研究、边应用”方针的指导下，年度中短期地震预报水平有明显提高，在中短期前兆异常识别、动态图像预报方法、强震中短期孕育过程的物理机理及预报模型等方面的研究成果，进一步改进和完善了经过几十年地震预报实践形成的长、中、短、临渐进式地震预报的理论系统，并取得了 1997 年新疆伽师 6.3 级、6.4 级地震，1999 年辽宁岫岩 5.4 级地震等多次具有减灾实效的成功预报实例。在国际地震学界关于地震能否预报的争论声中进行的“九五”地震预报研究所取得的成果，展示了地震预报研究的前景，坚定了中国地震工作者的信心。中国地震学家多年努力取得的宝贵资料和经验，将成为世界科学宝库中的一颗明珠。

“九五”是中国地震预报事业发展中承前启后的重要阶段。经过“六五”以来四个地震预报科技攻关五年计划的实施，已经建立起较为系统的经验性地震预报的方法、判据，并尝试性地探索了地震预报的理论。然而我们也清醒地认识到，现有的进步离突破地震预报的科学目标还有相当长的距离。“九五”期间建立的数字化地震和前兆观测台网、中国地壳运动观测网络，为地震预报研究取得进展提供了契机。依托新的观测技术，开发新的信息处理方法，取得对地震现象更细致、更接近真实的认识，将是地震预报取得突破的希望之所在。

地震预报是世界性的科学难题，解决这个难题是社会的需求，是地震学家不可推卸的职责。我国的防震减灾事业任重道远，地震工作者应积极探索，深入研究，敢于实践，善于突破，为提高地震预测预防能力，减轻地震灾害损失而努力工作。

本套丛书是“九五”地震预报研究成果的提炼和总结，是广大地震科技工作者辛勤劳动的结晶。希望这套丛书能对提高地震预报工作人员的业务水平，促进地震预报研究和实践的深入开展发挥作用。



前 言

本书中地震实验场的概念与严格的地震实验场概念有所不同，具有双重的含义：①这里的地震多，便于开展地震的科学研究，如中国云南滇西地震实验场。这里自 1980 年开始就明确是中国地震局地震预报实验场；②部分地震重点防御区，人口稠密，政治地位重要，防震减灾任务重，用于地震观测的手段较齐全，如中国首都圈地区。中国地震预报的实践本身就有开展地震预报实验的含义；中国地震重点防御区又是开展地震预报研究工作的重要实验场所，抓住地震实验场观测手段多且比较齐全的特点，努力探索开展新方法、新手段的研究是中国开展地震预报研究的基本思路之一。

本书是在“九五”科技攻关重点项目 95 - 04 - 05 课题的成果总结，它对“八五”短临预报攻关具有继承性，在探索地震预报的新思路、新方法和地震预报基础理论方面具有创新性，这是课题设置的基本考虑。在着眼地震实验场的研究上，重点立足于川滇和首都圈地区。课题研究既具有内容丰富的基本特点，地域上又具有特殊的选择性。

按照学科来分，课题在地震学、前兆方法、物理统计（非线性）和动态场理论方面都有新的理论探索和对以往预报方法和思路的完善，主要涉及了以下几方面的研究：

1. 地震学方法

- (1) 环境应力值；
- (2) 震源机制、波速比与尾波 Q 值的深入研究；
- (3) 前震、尺度不变性和地震震源能量辐射系数等参数的研究；
- (4) 小孔径地震台网数字化资料的应用；
- (5) 震源介质参数观测的新方法。

2. 前兆理论及方法

- (1) 短临地震前兆的气体地球化学判识方法和机理研究；
- (2) 水汞、断层土壤气、井水 γ 射线强度的方法研究；
- (3) 体应变、地电阻率、大地电场、大气电场、电磁辐射的再研究；
- (4) 前兆群体非均匀性异常判别与应用。

3. 非线性科学方法及物理统计非线性理论与动态场方法的应用

- (1) 临界现象作为孕震机理的预报方法研究；
- (2) 分维及多重分形在预报中的应用；

(3) 神经网络、物元分析、Bootstrap 统计方法的应用。

4. 损伤力学理论及动态场应用

(1) 损伤力学与动态损伤 $D(t)$ 模型的应用；

(2) 基于前兆场短临预报动力动态图像方法的研究；

(3) 地理信息系统在地震分析预报中的应用研究。

以上 4 个主题方面的研究，在不同程度上取得了新进展。通过对现有短临预报方法和技术的研究，进一步完善方法的可用性和实用性，为实验场区的短临预报提供较好的应用方法及计算机程序；通过对短临预报新方法和新技术的研究，将 GIS 系统、微震台阵技术、数字化地震学等较好地应用到短临预报中，同时将水岩关系等研究成果应用到前兆异常的判定识别上，一定程度上提高地震预报的科学水平；通过前兆动态动力演化机制、综合概率模型和非线性新方法的研究，提出一、二种短临预报新的综合预报思路和短临预报方法，同时为实验场区提供用于日常分析预报的动力动态综合预报方法和程序。

“地震实验场短临预报新技术新方法及预报模型的研究”课题研究报告是由罗灼礼、郭大庆、张天中、杜建国、康春丽、兰丛欣等在 3 个专题研究报告的基础上汇总的，《实验场区地震预报新技术新方法》是由罗灼礼、郭大庆、张天中、杜建国在课题研究报告的基础上编写的，全书最后由罗灼礼、杜建国统编。下面分别列出了 3 个专题报告的主要作者：

《95-04-05-01 专题：现有短临预报方法的深入和实用化研究》：罗灼礼、张天中、白彤霞、陈华静、任熙宪、程万正；

《95-04-05-02 专题：短临预报新方法、新技术的应用研究》：杜建国、秦嘉政、石绍先、顾谨平、邓志辉、康春丽、李占维；

《95-04-05-01 专题：实验场区前兆动态动力演化机制及综合预报模型的研究》：郭大庆、杜芳、刘祖荫、钱家栋、马丽、杨立明、兰丛欣。

除此之外，尚有近百名科技人员参加了课题，做出了应有的贡献。课题参加人员的所在单位在课题的执行过程中，给予了很大的支持和帮助，在此表示感谢。

目 录

第 1 章 地震学方法	(1)
1.1 环境应力值的测定及其在地震预测中的应用	(1)
1.1.1 引言	(1)
1.1.2 数字化地震记录资料处理软件和方法	(2)
1.1.3 数字化地震记录资料处理结果	(5)
1.1.4 环境应力值在地震预测中的应用	(8)
1.1.5 小结	(8)
1.2 华北地区地震震源机制的分区跟踪监测	(9)
1.2.1 计算方法	(9)
1.2.2 资料	(10)
1.2.3 结果	(10)
1.2.4 小结	(15)
1.3 华北地区尾波 Q 值的连续监测及其在地震预测中的应用	(15)
1.3.1 尾波 Q 值研究的概况	(15)
1.3.2 原理与方法	(16)
1.3.3 华北地区 1993 ~ 1998 年跟踪监测结果和讨论	(17)
1.3.4 怀来地区尾波 Q 值的实时观测	(18)
1.4 首都圈地区波速比的跟踪监测	(20)
1.4.1 资料处理和异常的检测方法	(20)
1.4.2 异常区的检测	(21)
1.4.3 观测结果和讨论	(21)
1.5 张家口 - 渤海地震带的短周期面波频散与中上地壳速度结构	(23)
1.5.1 资料	(24)
1.5.2 Rayleigh 波相速度频散的测定	(25)
1.5.3 结果与讨论	(25)
1.6 小孔径台网数字化测震资料的应用研究	(27)
1.6.1 武定地震序列的震源参数与频率特征	(27)
1.6.2 用数字化地震记录研究近震源区的衰减特征	(30)
1.6.3 地震矩张量反演地震应力场	(37)
1.6.4 中小地震地震谱周期特征及其应用	(40)
1.6.5 小结	(41)
1.7 地震活动性短临前兆及其应用	(41)
1.7.1 地震活动序列图像短临前兆特征	(42)

1.7.2	震群群体特征和未来强震的预测	(45)
1.7.3	地方平太阴时计算与强震前显著地震的识别	(51)
1.7.4	地震震源能量辐射系数参数分析计算	(56)
第2章	前兆理论及方法	(60)
2.1	流体地球化学	(60)
2.1.1	地震监测的主要气体组分的来源	(61)
2.1.2	气体的运移	(64)
2.1.3	地球深部流体在地震活动中的作用	(71)
2.1.4	气体地球化学异常形成机理	(73)
2.1.5	地震气体地球化学短临前兆的判识	(74)
2.1.6	强震的气体地球化学前兆特征	(77)
2.2	地震的电磁学短临前兆特征	(87)
2.2.1	地电阻率	(88)
2.2.2	大地电场	(92)
2.2.3	电磁辐射	(97)
2.2.4	大气电场	(102)
2.2.5	小结	(105)
2.3	体应变	(106)
2.3.1	体应变异常特征	(106)
2.3.2	体应变的干扰因素	(108)
2.3.3	排除干扰方法的选择	(110)
2.3.4	首都圈应变场的变化特征	(111)
2.3.5	应用与预报实践检验	(113)
2.4	前兆群体非均匀性异常及其在地震短临预报中的应用	(114)
2.4.1	前兆异常识别的 χ^2 统计检验法	(115)
2.4.2	地震短期预测的 Bayes 判别法	(118)
2.4.3	前兆群体非均匀度 ID 法	(123)
2.4.4	前兆异常信度 P.C 时空综合法	(132)
2.4.5	小结	(137)
第3章	非线性科学方法及物理统计	(139)
3.1	记忆合金表层晶体破裂分形动力学过程与孕震机理相似性的实验研究	(139)
3.1.1	实验材料与实验方法	(139)
3.1.2	天然破裂过程的非线性特征	(140)
3.1.3	天然破裂和孕震机理分析	(141)
3.2	地震活动的逾渗模型及临界状态的研究	(142)
3.2.1	地震活动的逾渗模型	(142)
3.2.2	利用重正化群方法研究地震活动的逾渗相变	(144)

3.2.3 地震活动逾渗模型的应用探索	(145)
3.2.4 临界现象作为孕震机理的研究与应用	(147)
3.3 地震活动的多重分形谱	(159)
3.3.1 多标度分形	(160)
3.3.2 地震多重分形谱的变化	(160)
3.3.3 D_q 动态变化异常及应用分析	(161)
3.4 中等地震序列的非线性及其他参数	(162)
3.4.1 资料和分析方法	(163)
3.4.2 前兆性序列参数的分布	(164)
3.4.3 小结	(165)
3.5 预报研究中可应用的新的统计概率模型的研究	(165)
3.5.1 地震活动离散度 Bootstrap 统计方法在短临预报中的应用	(165)
3.5.2 中强地震预测的物元分析理论方法	(167)
3.5.3 模糊神经网络在地震短临预报中的应用	(169)
3.5.4 云南孕育过程的空区与前震序列新的统计特征	(170)
第4章 损伤力学理论及动态场应用	(188)
4.1 动态损伤度在区域孕震状态监测中的物理意义和应用	(188)
4.1.1 损伤描述	(188)
4.1.2 动态损伤	(189)
4.1.3 积累损伤和速率	(191)
4.1.4 损伤度 $D(t)$ 的算法和应用研究	(192)
4.2 细观损伤力学与损伤演化诱致突变理论及其应用	(197)
4.2.1 细观损伤力学的基本理论原理	(197)
4.2.2 损伤演化诱致突变理论与地震活动的关系	(198)
4.2.3 演化诱致突变理论与地震活动的关系研究	(203)
4.2.4 图型动力学预报方法及应用研究	(206)
4.2.5 小结	(221)
4.3 前兆场短临预报动力动态图像方法的研究	(221)
4.3.1 综合地震前兆场动态图像方法的研究	(221)
4.3.2 多维前兆场动态图像的研究	(225)
4.3.3 地壳垂直形变场运动速率动态图像的研究	(230)
4.3.4 张北地震部分测项前兆动态场分析	(232)
4.4 地理信息系统在地震分析预报中的应用研究	(236)
4.4.1 地理信息系统	(236)
4.4.2 GIS 在地震分析预报中的应用开发	(238)
4.4.3 GIS 在地震分析预报中的应用举例	(242)
参考文献	(247)

第 1 章 地震学方法

1.1 环境应力值的测定及其在地震预测中的应用

1.1.1 引言

根据构造应力场水平确定地震危险区,是以发震的物理本质为依据的,是“八五”期间开展的一项新的探索。本节的研究是在“八五”所取得的成果的基础上,将数字化地震技术应用到构造环境应力值的测定中,研究相应的资料处理方法和应力值测定方法。利用 IASPEI 提供的 PITSA 软件,选用北京数字地震台 1997 年 1 月至 1998 年 12 月 110 余个 3.0 级左右的数字地震记录、云南数字地震台 1997 年 5~10 月 41 个 3.0 级左右的数字地震记录、怀来小台网记录的京西北地区 1995 年 7 月至 1997 年 1 月 42 个 1.8~4.4 级的数字地震记录资料,分别计算了它们的应力值。目前,已能逐月处理北京遥测数字化台网(前一个月)的记录资料,对首都圈地区的构造环境剪应力场做逐月的跟踪监测,以寻求短期应力场的前兆信息。

从地球物理观点看来,地震的孕育和发生过程本质上是一个力学过程,是在构造应力作用下发生的大规模岩石破裂过程。因此,构造环境剪应力场水平是控制地震发生的根本原因,应力值较高的地区是容易发生强震($M \geq 6.0$)的地区。大尺度应力场研究的资料来源主要是地震的震源机制解,通过震源机制解可以得出震源处介质在地震发生时的主应力方向。从震源机制解中能得到地球上主要地震带上的主应力方向,应该说震源机制解是地震学对地球应力场状态研究的一大贡献。然而,应力的绝对值,特别是剪应力值的测量一直是十分困难的工作。原地应力测量方法以及近年发展起来的水压致裂法、钻孔崩落法等也是地壳应力场研究的主要方法之一。它们有的能提供应力的大小和主应力方向,但由于技术条件和经费的限制,这些方法只能局限在某些地点或小范围地区,并且只能提供地壳浅部的应力状况,对于研究深部或大范围乃至全球的应力状态来说,这是远远不够的。

地震是一种被断裂力学阐明的低应力破坏现象,地震波是由裂纹端部的快速破裂所激发的,即位错理论中激发地震波的位错就是断裂力学中的裂纹端部的错开位移。利用断裂力学中的裂纹端部的错开位移公式和位错理论中的位错表达式,将环境剪应力值与位错和断层长度联系起来,得到了由断层长度和位错量估计环境剪应力值的一种新方法(陈培善等, 1978; 陈培善, 1981)。但是,由于测量地震断层长度和位错量的困难,仍然不能对较多地震,特别是中小地震,或发生在海洋中的地震计算它们的环境剪应力值。最近几年,通过研究震源位移谱、速度谱和加速度谱的特征,以及地震辐射能对环境剪应力的依赖性,得出了一系列由不同的地震参数(如峰值加速度、峰值速度、峰值位移、地震辐射能、短周期体波震级 m_b 等)来估计环境剪应力强度 τ_0 值的公式(陈培善和陈海通, 1992; 陈培善和 Duda, 1993a, 1993b)。使用这些公式,针对不同的观测资料,就可以大量地计算许多地震的环境

应力值。

基于断裂力学的地震破裂模式,可得到由震级计算构造环境剪应力值的公式(陈培善等,1992):

$$\lg(\tau_0) = \begin{cases} 1.5m_b - M_{S7} - 2.2 & 3.8 < m_b \leq 5.2 \\ 0.75m_b - 0.25M_{S7} - 1.75 & 5.2 < m_b \leq 5.8 \\ 0.75m_b - 0.375M_{S7} - 0.95 & 5.8 < m_b \leq 6.5 \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, m_b 是短周期体波震级; M_{S7} 是长周期面波震级。据此,只要有 $m_b \geq 3.8$ 地震发生,就可以计算环境应力值,使得测定构造环境剪应力值变得简单易行。在研究唐山地震序列的环境应力场时,又发现震级大小与 $\lg(\tau_0)$ 在统计上呈线性正相关关系(陈培善等,1994)。因此,在大量测定环境应力值的基础上,依据该值的空间分布就可以在在一定程度上确定地震危险区,还可以同时估计出可能发生的地震震级;依据其随时间的变化,可以粗略地估计大地震发生的时间。据大量数据与震例分析的结果表明,可以利用环境应力值的空间分布预测未来1~3年的地震危险区。

根据地震发生的断裂力学模式和震源谱理论,可以导出震源处峰值加速度 a_p , 峰值速度 v_p 和峰值位移 d_p 与构造环境剪应力场 τ_0 和地震矩 M_0 的关系(陈培善和 Duda, 1993a):

$$a_p = C_a \tau_0^2 \quad (1-2)$$

$$v_p = C_v \tau_0^{\frac{4}{3}} M_0^{\frac{1}{3}} \quad (1-3)$$

$$d_p = C_d \tau_0^{\frac{2}{3}} M_0^{\frac{2}{3}} \quad (1-4)$$

上述公式没有震级限制,式中 C_a , C_v , C_d 均为常数。若能根据一批实际观测资料,确定出这3个常数,则可分别用震源处的 a_p , v_p , d_p 和 M_0 , 计算出 τ_0 值。由于数字地震记录与速度成正比,且具有宽频带、大动态范围、精度高、时间服务准确等特点,所以,利用数字化台网微震观测资料,能提高计算环境应力值的精度,并降低可用资料的震级下限。

我们选择首都圈和云南这两个地区作为实验场,利用目前有限的数字地震记录,试验性地估算这两个地区的构造环境剪应力场,为短临地震预测提供构造应力场背景。

1.1.2 数字化地震记录资料处理软件和方法

1.1.2.1 数据处理软件

选用由国际地震学和地球内部物理学协会(IASPEI)和联合国教科文组织(UNESCO)以及美国地震学会(SSA)联合推荐的一套优秀的数字化分析处理软件 PITSA (Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis)。这是一套对硬件环境要求极低、占据硬盘空间很小(约2M字节)、功能较强、便于安装使用的菜单操作式软件。可用来回放原始记录波形(即速度波形),进行部分放大、震相拾取、求震级、定震中、分量旋转等常规分析工作,还可进行数值微分、积分、基线校正、谱分析、滤波、相关分析、Hilbert变换、旋转分量、偏振滤波、交叉谱、相关谱、画质点运动图以及各种模拟地震图的仿真等,比较适合广大地震工作者使用。

1.1.2.2 数据格式转换

数字记录形式是 UNIX 系统下的二进制码,只能在工作站上处理。但对于大多数只具备

PC 机的用户来说,不能直接使用 UNIX 系统下的二进制码的数据。因此,编制了转换程序,将二进制数字记录转换成 ASC II 码,使之能在 PC 机上 DOS 环境下进行处理和分析。每个事件分解成 N (个台) $\times 3$ (分向) 个数据文件和一个参数文件,每个参数文件中包含有该次事件记录台的台代码、台站坐标、事件开始记录时间、仪器的数字灵敏度、频率特性等。

1.1.2.3 数据处理方法

利用 PITSA 软件首先将已转换成 ASC II 码的数字记录回放出原始地震波形 (即速度波形),在波形上选定窗口,再将窗口内容放大。由于数字地震记录与速度成正比,可由记录直接量取 S 波的振幅,除以相应的仪器数字灵敏度,即得到一个台一个分向的峰值速度值;对速度记录进行数值微分,即得到它的加速度,量取 S 波的加速度振幅,除以数字灵敏度,得到峰值加速度值;对速度记录进行数值积分,得到位移。然而,速度记录中往往有直流分量,所以要去掉直流分量和对位移波形进行基线校正,最后得到正确的位移记录,再进一步得到峰值位移值。图 1-1 (a)、(b)、(c) 是以北京数字台网 1998 年 1 月 11 日 02 时张北地震余震 (41.03°N , 114.47°E , $M_L 4.6$),太师屯台垂直分向 (TST, UD) 记录为例,显示的从数字波形记录中直接得到的峰值速度波形、峰值加速度和峰值位移波形。

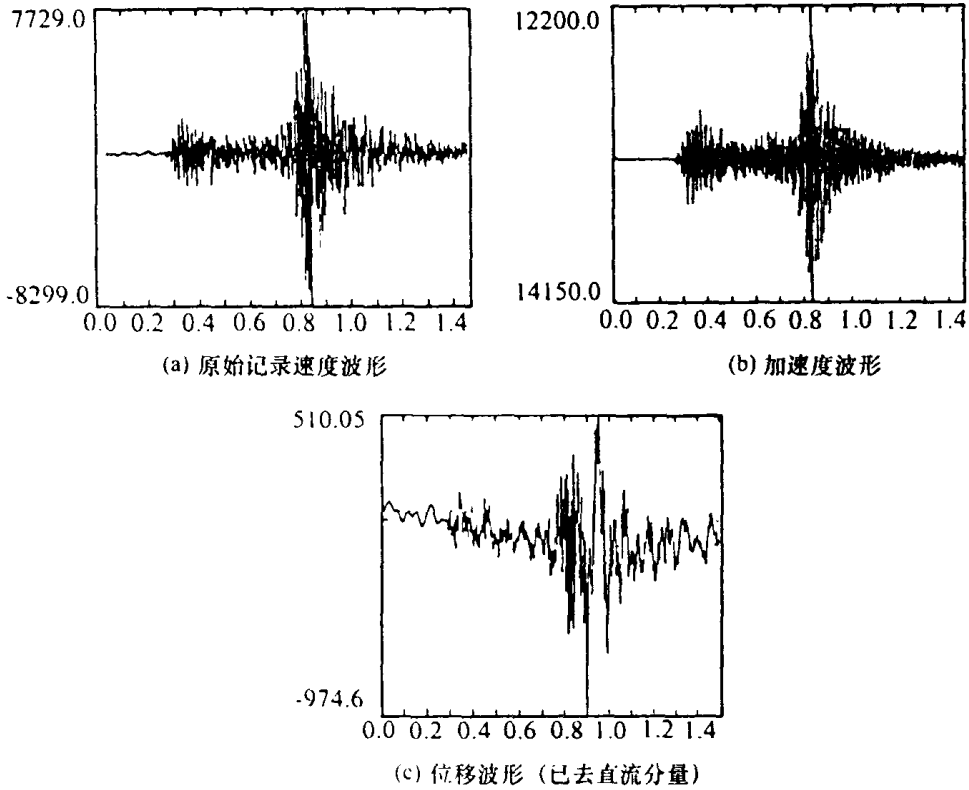


图 1-1 1998 年 1 月 11 日 $M_L=4.6$ 地震太师屯台数字记录回放波形 (部分放大)

每个地震每个台三分向均照此处理,即得到该次地震该台三分向峰值加速度 a_{obs} ,峰值速度 v_{obs} 和峰值位移 d_{obs} 的观测值。然后,选取适合当地的地震波衰减模式,将观测点的值换算到震源处的值。

1.1.2.4 地震波衰减模式

由观测点的值换算到震源处的值,必须考虑当地地震波衰减模式。要求远台和近台求得

的 τ_0 值一致, 根据峰值加速度 a_p , 峰值速度 v_p 和峰值位移 d_p 求得的 τ_0 值一致。地震波衰减, 一般由两部分组成, 几何扩散与介质吸收 (含散射衰减)。如果用等效均匀介质模式, 则几何扩散为 $\frac{1}{r}$ 。在实际计算中, 我们发现用 $\frac{1}{r}$, 衰减太快。经反复试验, 选用 $\frac{1}{r^{0.7}}$ 衰减较为合适。采用以下衰减模式:

$$F(r, f) = \frac{1}{r^{0.7}} e^{-\frac{\pi f}{\beta Q}} \quad (1-5)$$

把观测点的值换算成震源处的值。式中 r 是震源距; f 是相应波的优势频率, 对于速度, $f_v = 10^{-0.4M_w+1.8}$ (对于 $M_w = 3.0$, $f_v = 4.0\text{Hz}$); 对于加速度, $f_a = f_v \times 2.0$; 对于位移, $f_d = f_v / 2.24$; β 是 S 波速度, 取 $\beta = 3.5 \text{ km/s}$; $Q = Q_0 f^\eta$, Q_0 为 1 Hz 时的 Q 值, 取 $Q_0 = 300$, η 为 Q 对频率的依赖指数, 取 $\eta = 0.2$ 。这样, 扣除等效均匀介质的几何扩散 ($\frac{1}{r^{0.7}}$) 和介质吸收 ($e^{-\frac{\pi f}{\beta Q}}$) 的影响以后, 即可得到震源处相应的 a_p , v_p 和 d_p 值, 例 $a_p = a_{\text{obs}} / [F(r, f_a) \times (2.0 \times 0.6)]$, 式中 2.0 和 0.6 分别是地面和辐射图形矫正。 a_{obs} 为观测点两水平分向的几何平均值或三分向的矢量和。这样得到一次地震一个台震源处的 a_p 值。再取多台 a_p 值的几何平均值 (也就是 $\lg a_p$ 的算术平均值), 作为一次地震的 a_p 值。

1.1.2.5 确定常数

下面以 a_p 为例, 确定式 (1-2) 中的常数 C_a 。由 N 次地震得:

$$\lg(a_p)_i = \lg C_a + 2\lg(\tau_0)_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1-6)$$

$$\sum_{i=1}^N \lg(a_p)_i / N = \lg C_a + 2 \sum_{i=1}^N \lg(\tau_0)_i / N \quad (1-7)$$

式中, $\lg(a_p)_i$ 是第 i 次地震的值; $\sum_{i=1}^N \lg(\tau_0)_i / N$ 是这组地震的应力的平均值。从许多地震序列的环境应力场研究中得到统计关系 (陈培善等, 1994):

$$\lg \tau_0 = 0.15M_w + 0.1 \quad (1-8)$$

对于 $M_w = 6.0$ 地震, τ_0 平均为 10 MPa; 对于 $M_w 3.0$ 左右地震, τ_0 平均为 3.55 MPa, $\lg \tau_0 = 0.55$ 。当处理的地震的平均震级 M_w 大约为 3.0 时, 可以取 $\sum_{i=1}^N \lg(\tau_0)_i / N = 0.55$ 。这样由式 (1-7) 即可求得 $\lg C_a$ 值, $\lg C_a = 0.561$ 。按照相似的办法可以求得 $\lg C_v = -5.308$, $\lg C_d = -10.741$ 。但是在求 C_v 和 C_d 时, 需要知道地震矩 M_0 。

1.1.2.6 用震源处峰值加速度 a_p 、峰值速度 v_p 和峰值位移 d_p 求地震矩 M_0

根据公式 (1-1) 求环境应力值, 当用 v_p 和 d_p 求环境应力值时, 必须知道 M_0 值。用常规方法, 必须做出每个台的位移谱, 相当繁琐。我们利用数字地震记录得到的加速度或速度值结果, 找到了一种独立快速地测定地震矩 M_0 的新方法 (陈培善等, 1998b)。

1.1.2.7 计算环境应力值

确定出式 (1-2) ~ (1-4) 中的常数, 即可根据 a_p , v_p 和 d_p 值分别计算每次地震的应力值 τ_{01} 、 τ_{02} , τ_{03} 。比较上述三个求 τ_0 值的关系式可知, 在小跨度震级范围内, 震源处的峰值加速度 a_p 仅与构造环境剪应力场量值的平方成正比, 与震源尺度无关, 相对误差较小, 所以用式 (1-2) 计算出的 τ_{01} 值作为剪应力值的最终结果。

1.1.3 数字化地震记录资料处理结果

1.1.3.1 北京遥测数字化台网资料处理结果

在原北京遥测台网的基础上, 1996 年将其中 7 个子台进行了数字化改造, 这些台是太师屯 (TSTD), 龙泉寺 (LQSD), 周口店 (ZKDD), 法华寺 (FHSD), 陡河 (DHD), 四座楼 (SZLD) 和清水顶 (QSDD), 台站分布见图 1-2。

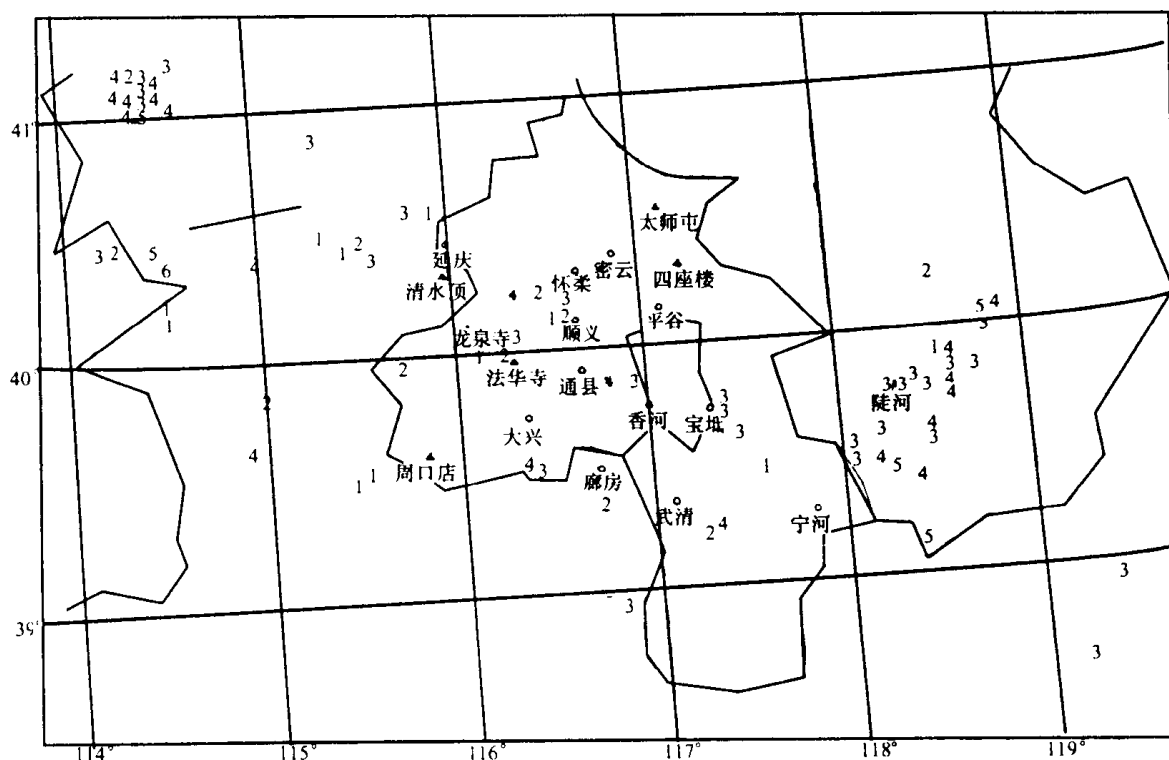


图 1-2 北京数字台网分布和首都圈地区应力等级值

▲为数字地震台; 数字为应力等级值

这些台使用的仪器是中国地震局研制的速度平坦型数字地震仪, 平坦频带大约在 0.05 ~ 20 Hz 之间, 动态范围为 96 dB, 采样率是 50 次/秒。 $M_L \geq 2.0$ 地震的记录较好, 信噪比较高。由于研究时仍处于试运行阶段, 所以资料不够完整和连续。选取首都圈地区 ($38.5^\circ \sim 41.0^\circ\text{N}$, $113.0^\circ \sim 120.0^\circ\text{E}$) 1997 年至 1998 年 12 月共 110 余个 $M_L = 3$ (最小 1.4 级) 左右的数字地震资料, 震中距为几公里到 200 多公里, 计算了构造环境应力值。为了绘图方便, 把应力值换算成等级值 g [$g = \text{Int}(\lg(\tau_0)/0.2 + 1.0)$]。若 $\lg(\tau_0) < 0$, 则 $g = 0$; 若 $0 \leq \lg(\tau_0) < 0.2$, 则 $g = 1$; 若 $0.2 \leq \lg(\tau_0) < 0.4$, 则 $g = 2$; 以此类推, 直到 $g = 9$, 然后将 g 值标于图中震中处, 如图 1-2 即为首都圈地区应力等级值图。计算结果表明, 首都圈地区的总体应力水平较低, 近期发生大地震的可能性较小。相对应应力值较高的地区和可能发生地震的震级是: 唐山老震区 (4~5 级); 怀柔-龙泉寺 (4 级左右); 通县-平谷 (4 级左右); 大兴-廊坊 (3~4 级); 宝坻-武清 (4 级左右); 山西东北部怀安一带 (5~6 级)。

1.1.3.2 云南地区数字化台网资料处理结果

云南数字化台网所用数字地震仪和资料处理方法与北京数字台网相同。1997 年云南省

地震局完成了 15 个遥测地震台的数字化改造, 台站分布如图 1-3。选用了云南地区 1997 年 5 ~ 10 月共 41 个 $M_L \geq 3$ 地震数字地震资料 (近 1000 条记录), 震中距为几十公里至 200 多公里。计算了云南地区的构造环境剪应力值 (图 1-3)。结果表明, 该时段云南地区应力场水平较低 (白彤霞, 1999)。

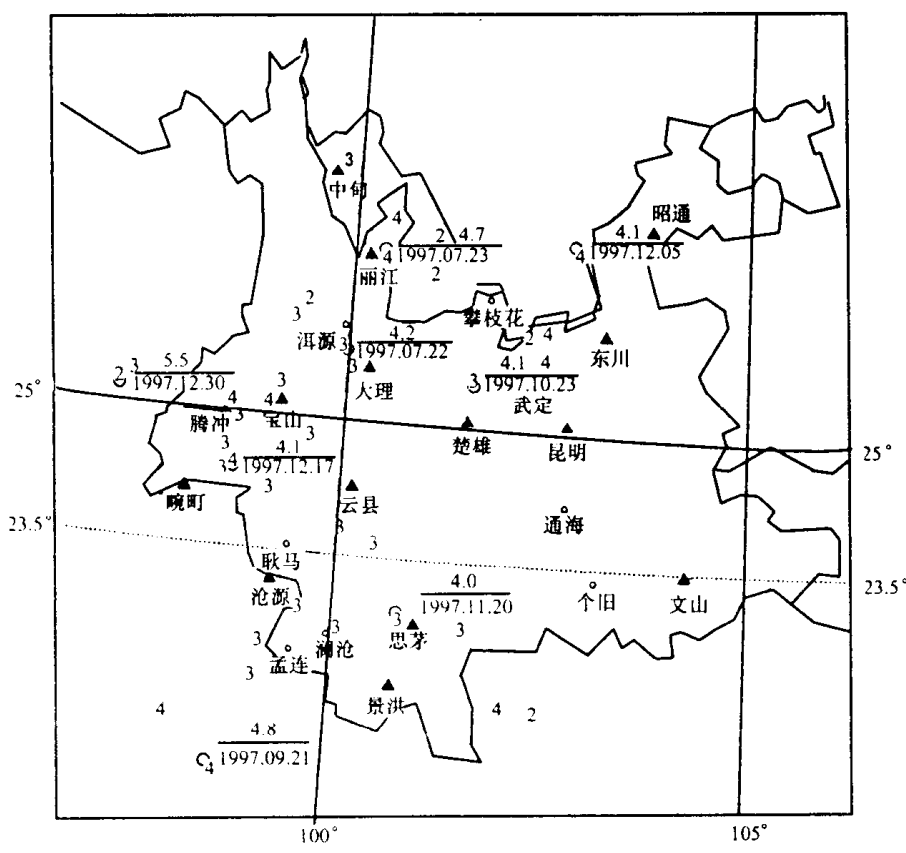


图 1-3 云南数字化台网台站分布图及云南省环境剪应力等级值分布图
▲为数字地震台 数字为应力等级值

1) τ_0 值测定结果及前兆信息分析

用 400 多条 1995 年 10 月 24 日武定 $M_S 6.5$ 地震序列的数字地震图资料估算了余震序列的环境应力 τ_0 值, 分析该次地震序列的环境剪应力场随时间、空间动态变化图像并讨论其所表现出的前兆现象。 τ_0 值随时间的变化。

根据武定地震序列资料计算的 τ_0 值绝大多数在 10 ~ 40 MPa 之间, 整个序列的平均 τ_0 值是 10 MPa。这次地震序列的平均 τ_0 值比滇西北地区 1992 年 12 月永胜 5.4、5.3 级地震余震序列的 τ_0 值要高 2.2 倍; 也比 1986 年鹤庆 5.4 级地震余震序列的 τ_0 值平均高 2.5 倍。这表明武定地震序列是在高应力强度背景下发生的, 图 1-4 是武定地震系列平均 τ_0 值随时间的变化。这个结果显示出在主震后的余震活动期间内, τ_0 值强度不衰减, 在这一期间内高 τ_0 值地震不断出现。这种现象可以很好地解释武定地震序列衰减所表现出两个基本现象: 一是余震数目多, 在 3 个月内余震发生不断, 频度衰减缓慢, 衰减周期长。二是余震强度高, 在主震后两个星期内 $M \geq 5.0$ 强余震就发生多达 10 次。高应力场背景能相当好地解释这种高频度和高强度的余震序列活动的力学背景。