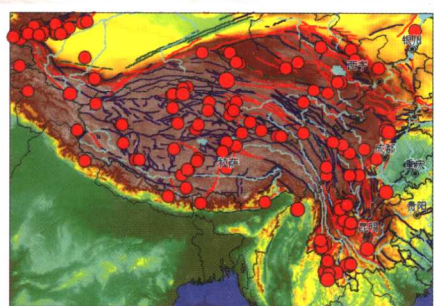


- 国家科技基础条件平台工作重点项目2003DIA6N005
- 中国地震局地质研究所博士后流动站
- 国家重点基础发展规划项目 2004CB418401
- 科技部社会公益项目课题2004DIA3J010

断层相互作用与 地震活动

陈化然 徐锡伟 赵国敏 著
田 山 赵根模 马宏生



唐山地震30周年
天津市地震局建局30周年
纪念专著系列之二

唐山地震30周年纪念专著系列之二
天津市地震局建局30周年

断层相互作用与地震活动

陈化然 徐锡伟 赵国敏 著
田 山 赵根模 马宏生

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在统计、研究地震之间、断层之间相互联系的基础上,利用最新的GPS、测深等资料、成果,应用二维、三维有限方法研究地震之间、断层之间、地震与断层之间相互作用;主要分析研究了西南地区,特别是川滇地区强震孕育、发生规律;对西南地区,特别是川滇地区地震活动规律进行了解释。

本书可供相关大专院校师生,科研单位从事构造地质、地球物理、构造物理、工程地质、工程地震、地震预测预报的研究人员和工程建设部门人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

断层相互作用与地震活动/陈化然等著. —北京:科学出版社,2005
(唐山地震30周年,天津市地震局建局30周年纪念专著系列之二)
ISBN 7-03-015628-5

I. 断… II. 陈… III. 地质断层-关系-地震-研究-中国 IV. P315.2
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 055768 号.

责任编辑:谢洪源 贾海新/责任校对:鲁 素
责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年9月第一次印刷 印张:8 1/4

印数:1—1 400 字数:179 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

地震是地壳变动、构造应变和震源体岩石突发性断裂失稳破坏而迅速释放弹性应变能的具体表现形式(徐锡伟等,2002)。其中,岩石圈是地震孕育和发生的母体,地壳变动则是地震孕育和发生的外在动力环境,而外在动力与母体耦合作用引起构造应变,地震是一种突发的、剧烈的构造应变形式。强烈的地震给人类带来极其严重的灾难,特别是在经济高度发达、社会城市化的今天,地震的威胁和造成的损失越来越大。探索地震孕育、发生过程是地震科学研究的基础,也是最大限度地减轻地震灾害的前提。

川滇地区位于中国大陆西南边陲,青藏高原东南缘或南北地震带中南段,是印度板块与欧亚板块间“阿萨姆”强作用点附近的构造应变强响应区带,是第四纪地壳构造变动十分强烈的构造活动带、一级地貌变异带、地震频发带、地质灾害多发带和重要金属成矿带(潘桂棠等,1990;马宗晋等,1981;马宗晋,1990;马宗晋等,1992;丁国瑜,1990,1991;任纪舜等,1990;张宗诒,1990;Houseman et al., 1993;程裕淇,1998;宋方敏等,1998),也是地壳-岩石圈厚度和重力异常的陡变带(殷秀华等,1980;朱介寿等,2002;马杏垣,1989;陈学波等,1991;滕吉文等,2002)。现有地壳三维速度结构显示出它是分割西部青藏高原与东部华南地块不同构造属性的特殊构造异常带,在东亚大陆动力学研究中占有十分重要的地位,关系到东亚大陆东南缘现今构造变形的动力学、灾害与环境变迁的力源体系,以及大陆内部“俯冲”和“地幔柱”等板内第四纪构造变形动力学问题的讨论(周兵等,1991;丁志峰等,1999,2001;滕吉文等,2001;王椿镛等,2002);多期水准复测资料给出这一地带的垂直运动梯度最高(黄立人,1995;马青等,2003);也是GPS观测给出的现今地壳东向运动速度最显著的锐减部位(江在森等,2001;Qi Wang et al., 2001;张培震等,2002)。青藏高原东缘独特的大地构造位置是解决中国大陆东西部构造演化差异的关键地带和解开东亚大陆动力学的钥匙,更是检验、修改、完善现有“俯冲说”、“压缩增厚说”、“侧向挤出逃逸说”等青藏高原运动学模型的理想王国(Molnar et al., 1975;Tapponnier et al., 1976; Tapponnier et al., 1982;Avouac et al., 1993;Ratschbacher et al., 1996;Xu Xiwei et al., 1996;许志琴等,1999;Chen Z et al., 2000;Tapponnier et al., 2001;马宗晋等, 2001)。

川滇地区发育着众多具有发生破坏性地震能力的活动断层,地震活动以震级大、频度高、灾害严重为基本特色(Xu Xiwei et al., 1996)。作为活动块体主控边界的活动断层具有地震破裂分段性、相邻断层段间相互作用和应力一应变加载、触发等效应,造成地震沿主要活动断裂带有规律的时空迁移和在时空上又表现出明显的丛状群集复发与相对平静期交替现象(Sanders,1993;Stein et al., 1997;易桂喜等,2002)。地震断层间相互作用、相互影响是构成地震活动复杂性的一个重要因素。因此,一个特定地区的强震组不是孤立事件,它们之间存在着密切的对环境动力作用的应变响应联系,某些强震组常常是同一个孕震过程的产物。紧紧抓住这一构造格局清晰、活动强烈、地震频发的川滇地区,应用地震构造和深部地球物理探测的最新研究成果,建立三维有限元模型,开展地震断层相互

作用和地震时空迁移模拟,研究强震迁移和成组活动的机制,为地震预测搭建一个有一定构造物理基础的平台,推动现有经验性统计地震预测向具有物理意义地震预测的过渡,以及探索地震物理预测的可能途径,也是本专著的初衷所在。具体技术思路如下。

首先,以中国大陆地区的历史地震记录为统计样本,对大陆地震在时间和空间上的分布特征进行统计。结果表明,无论是把我国陆区作为一个整体来研究,还是把我国陆区分为东西两区来研究,乃至取某一个地区的区域地震活动来研究,大陆地震活动在时间和空间上呈成组性丛集活动特征,即中国大陆强震成组活动的特征具有鲜明的客观性。

其次,采用 A_t 值扫描方法,对地震间的关联特性进行半定量研究,计算地震应变释放在区域强震扰动发生前后的变化。通过空间扫描图像描述大范围的响应情况,分别对大陆的华北地区、西南地区 and 西北地区强震前后地震活动进行了分析。分析表明,某次强震活动可以引起某些孕震区的加载,介质非线性应变积累加速,使处于高应力状态的震源失稳提前进入不稳定状态,后续强震提前发生,即强震之间存在着时间、空间上的触发关联性。

之后,针对强震频发的川滇地区,应用 Okata 的应力触发理论,对川滇地区强震相互触发、地震成组活动进行了系统深入的研究。结果表明:大约 50% 的地震均发生在前一次地震的库仑破裂应力变化正值区,30% 发生在应力变化负值区,20% 发生在正负交界区。

在上述研究基础上,对地震成组活动及其相互影响进行了有限元数字模拟。第一步针对青藏构造地块,尝试建立了应力演化和地震活动二维有限元模型,研究应力演化、应力调整与强震成组孕育、成组活动的关系。模拟分析表明,可以用有限元方法模拟计算强震的应力调整和影响作用,并确定应力增强区,为下一次强震发生的地点判定提供依据。第二步根据近年来取得的川滇地区活动构造和深部地球物理等最新研究成果,建立川滇地区四层三维有限元模型。模型划分较细,包括了各种性质的断裂带,如:甘孜—玉树断裂带、鲜水河断裂带、岷江断裂带、龙门山断裂带、金沙江断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带、小江断裂带、楚雄—建水断裂带、红河断裂带、小金河—丽江断裂带、龙陵—澜沧断裂带等。又根据近年来取得的震源机制解和 GPS 测量数据为约束条件,确定了模型的边界条件,分别计算川滇地区的背景应力场、断层蠕动产生的应力场和强震触发应力场,重点对川滇地区 1988~1996 年动态库仑破裂应力变化进行了模拟计算,研究了前次地震对后续地震的触发影响。结果表明,1988~1996 年川滇地区的几次强震中,1989 年巴塘强震群发生在 1988 年澜沧—耿马地震后的库仑破裂应力变化正值区,1995 年的武定地震发生在库仑破裂应力变化正负值交界区,1996 年丽江地震发生在库仑破裂应力变化正值区。这说明,前次强震对后续地震有相当大的影响,后续地震大多发生在前次强震所引发的库仑破裂应力变化正值区,显示出先发地震对后续地震有一定的触发作用。强震往往是在较高的应力背景下相互作用、相互影响的,进而呈现为带有时空丛集性的成组活动图像。

最后,从强震发生前后的前兆异常变化特征等方面对上述模型进行了实际检验,表明模型与实际地震活动特征相一致,模型模拟结果对前兆异常机理研究有一定的指导作用。

通过以上研究认为,地震成组孕育和成组活动是中国大陆强地震孕育、活动的基本特征。既然地震前的各种异常反映的是强震孕震过程,并且大多数强震是成组孕育的,那么

在各种异常中就有可能存在地震组异常,这对日常判断、识别前兆异常,提高地震预测水平有实际应用意义。

本专著对川滇地区初步搭建了一个地震预测的三维有限元数值模拟平台,尽管还有许多待完善之处,但研究本身是一次有益的尝试,对数值模拟应用于实际地震预测有理论上的启迪意义,对地震从经验性统计预报向具有物理意义的预测发展有一定的借鉴作用。如果本书所取得的任何学术进步能对读者未来的科研工作有一定的启发和帮助,为地震预测预报和防震减灾事业发挥一定的作用,作者将感到极大的欣慰和满足。

本专著得到了国家科技基础条件平台工作重点项目(2003DIA6N005)资助,为《青藏高原活动断层鉴定、监测与灾害防治平台》项目成果之一。

真诚感谢石耀霖院士、张国民教授、陈连旺博士的大力帮助。受时间、篇幅和水平的限制,本专著一定有不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

参 考 文 献

- 陈学波等. 1991. 龙门山构造带两侧地壳速度结构特征. 载:中国大陆深部构造的研究与进展. 北京:地震出版社. 97~113
- 程裕淇. 1998. 中国区域地质概论. 北京:地质出版社
- 邓起东等. 1990. 海原活动断裂带. 北京:地震出版社
- 邓起东等. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. 地震地质, 16(4): 389~403
- 丁国瑜. 1990. 我国大陆的新构造变形与板内现代运动. 载:国际大陆岩石圈构造演化与动力学讨论会——第三届全国构造地质会议论文选集Ⅱ 前寒武纪构造、活动构造与地震以及其他. 北京:科学出版社. 73~85
- 丁国瑜. 1991. 中国岩石圈动力学概论. 北京:地震出版社
- 丁志峰等. 1999. 青藏高原东部及其边缘地区的地壳上地幔三维结构. 地球物理学报, 42(2): 197~205
- 丁志峰等. 2001. 青藏高原地震波三维速度结构研究. 中国地震, 17(2): 202~209
- 黄立人. 1995. 中国大陆地壳垂直运动梯度图的编绘. 地壳形变与地震, 15(2): 30~34
- 江在森. 2001. 青藏东北缘近期水平运动与形变. 地球物理学报, 44(5)
- 马青等. 2003. 中国大陆中轴构造带的现今地壳垂直运动. 地质学报, (1)
- 马宗晋, 张家声, 汪一鹏. 2001. 青藏高原三维变形运动随时间的变化. 载:叶叔华. 现代地壳运动与地球动力学研究. 北京:地震出版社
- 马宗晋. 1990. 中国大陆地震分区及其动力学讨论. 载:国际大陆岩石圈构造演化与动力学讨论会——第三届全国构造地质会议论文选集Ⅱ 前寒武纪构造、活动构造与地震以及其他. 北京:科学出版社. 86~95
- 马宗晋等. 1981. 中蒙大陆中轴构造带及其地震活动. 地震研究, 4(4): 421~436
- 马宗晋等. 1992. 地震迁移的规律解释和预报——中国大陆四条地震带的地震迁移. 地震地质, 14(2): 129~138
- 潘桂棠等. 1990. 青藏高原新生代构造演化. 北京:地质出版社
- 任纪舜等. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京:科学出版社
- 宋方敏等. 1998. 小江活动断裂带. 北京:地震出版社. 237
- 滕吉文等. 2001. 中国东南大陆及陆缘地带的瑞利波频散与剪切波三维速度结构. 地球物理学报, 44(5): 663~677
- 滕吉文等. 2002. 东亚大陆及周边海域 Moho 界面深度分布和基本构造格局. 中国科学, 32(2): 89~100
- 徐锡伟等. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震. 北京:科学出版社
- 王椿镛等. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究. 地震学报, 24(1): 1~16
- 许志琴等. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起. 地学前缘, 6(3): 139~151
- 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. 中国地震, 18(3): 267~276
- 殷秀华等. 1980. 中国大陆区域重力场基本特征. 地震地质, 2(4)
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, 9(2): 430~431
- 张宗诒. 1990. 中华人民共和国及其毗邻海区第四纪地质图及其说明书. 北京:中国地图出版社

- 周兵等. 1991. 青藏高原及其邻近地区的 S 波三维速度结构. 地球物理学报, 34(4): 426~440
- 朱介寿等. 2002. 东亚及西太平洋边缘海域高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, 43(5): 646~663
- Avouac J P, Tapponnier P. 1993. Kinematic model of active deformation in central Asia. *Geophys. Res. Letters*, 20: 895~898
- Chen Z et al. 2000. Global positioning system measurements from the eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *Journal of geophysical research*, 105: 16215~16227
- Houseman G A, England P. 1993. Crustal thickening versus lateral extrusion in the Indian-Asia collision. *Journal of geophysical research*, 98: 12233~12249
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189: 419~425
- Qi Wang et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294: 574~577
- Ratschbacher L et al. 1996. Cenozoic deformation, rotation and stress patterns in eastern Tibet and western Sichuan, China. In: An Yin & Harrison. *The Tectonic Evolution of Asia*. London: Cambridge Univ. Press
- Sanders C O. 1993. Interaction of the San Jacinto and San Andreas fault zones, southern California: Triggered earthquake migration and coupled recurrence intervals. *Science*, 260: 973~976
- Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys J Int.*, 128: 594~604
- Tapponnier et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10: 611~616
- Tapponnier P et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671~1677
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264: 319~324
- XU Xiwei & Deng Qidong. 1996. Nonlinear characteristics of paleoseismicity in China. *Journal of geophysical research*, 101(B3): 6209~6231

目 录

前言

第 1 章 地震应力触发与强震成组活动	1
1.1 地震学与地震预测研究的发展和概况	1
1.2 地震应力触发与地震成组活动研究的进展	4
1.3 强震成组活动分析	8
第 2 章 川滇地区地震静态应力触发研究	13
2.1 应力触发理论原理	13
2.2 资料的选取及分析	15
2.3 结论与问题	20
第 3 章 断层位错引起的应力场变动与地震危险性预测	21
3.1 引言	21
3.2 断层引起的应力场与地震触发	21
3.3 地震触发活化系数 A_1 扫描	25
3.4 问题讨论	26
第 4 章 青藏构造地块强震相互作用的二维有限元数值模拟	28
4.1 青藏构造地块有限元模型的单元划分	28
4.2 模型边界条件及单元材料性质的确定	31
4.3 强震对应力场的调节作用及其对后续地震的影响	33
4.4 结论与问题	34
第 5 章 川滇地区强震相互作用的三维有限元数值模拟	36
5.1 川滇地区地震地质概况与三维有限元模型建立的基础	36
5.2 模拟地震的情况	42
5.3 三维有限元模型的建立和模拟结果	50
5.4 活动断裂的强震活动对其他活动断裂地震危险性的加卸载效应	63
5.5 地震的某些前兆异常特征解释	78
5.6 结论与讨论	83
第 6 章 相邻先发大震诱发的异常地震活动图像	85
6.1 “诱发前震”的物理机制和前兆意义	85
6.2 相邻大地震的诱发作用和前兆地震	90
6.3 我国板内大地震之间的一种联系——诱发作用	97
6.4 全球主要板块边界的诱发前震图像	111
主要参考文献	118

第 1 章 地震应力触发与强震成组活动

1.1 地震学与地震预测研究的发展和概况

人类社会发展的历史,是人类不断征服自然的历史。经过几千年的发展,人类抗拒自然灾害的能力随着科学技术的进步有了极大的提高。地震是到目前为止被人类认识最少、造成生命和财产损失最严重的少数自然灾害之一。特别是在中国,地震的威胁尤其巨大。地震预报是减轻地震灾害、减少生命财产损失的有效途径,是地震工作者为社会发展做出贡献的重要方式之一。然而,到目前为止,由于地震现象的复杂性和对地震孕育发生机制认识还很浮浅,地震预报成功率依然不高。

地震是地球内部构造运动的重要表现形式之一。人们总是期望更好地了解地震的本质,正是这种愿望使地震学自开创以来不断取得进展。自古以来,人们对地震的起因就有多种看法。直到 19 世纪后半期,科学家们才开始对地震仪器观测到的各种现象进行分析和科学研究。

在近代,具有深刻影响的地震力学理论是“弹性回跳理论”,它是美国科学家 Reid (1910)在本世纪初提出的,用来解释 1906 年旧金山大地震的力学机制。该理论认为:引起构造地震的岩体破裂是由于周围地壳的构造运动引起的相对位移使震源区应力增长并大于岩体破裂强度的结果,这种相对位移不是在破裂时突然产生的,而是在较长时期内逐渐达到最大值;地震是破裂面两边的物质突然发生的弹性回跳。该理论虽然只给出了能量积累和释放的方式,未进一步揭示地震缓慢积累弹性能的力源问题,但可以把大的浅源地震的一些主要特点以一个简单统一的理论加以解释,明确提出了断层是地震的成因。

此后,地震成因的研究不断取得进展。1917 年,志田顺依据观测到的 P 波初动方向在地表按方位成四象限分布的事实提出了节线(节面)的概念。Byerly 在 20 世纪 20 年代提出用单力偶模型解释 P 波初动的象限分布,而本多(Honda, 1931)则提出了双力偶模型。此后多年,在地震学界就地震到底是单力偶还是双力偶的发震机制问题展开了长期争论。直到丸山卓男(Maruyama, 1968)从理论上阐明了沿断层的剪切位错(断层运动)与双力偶模型是等价的,争论才告一段落。

随着地震断层理论主导地位的逐步建立,人们开始致力于震源过程细节即岩体破裂过程的深入研究。由于岩石断裂破坏是浅源地震的一种主要机制,作为研究脆性材料断裂现象的有力工具之一——断裂力学应用于地震研究之中是很自然的事。断裂力学研究的是由于裂纹引起的应力集中和裂纹扩展,利用有物理基础和实验依据的准则来判断裂纹是否稳定或扩展。岩石中的破坏以各种不同的方式发生,除了与岩石性质有关外,还与周围条件有关。20 世纪 60 年代中期,断裂力学在岩石破裂和地震学领域的应用,比较满意地解释了岩石破裂和地震过程中断层错动的一些现象。人们进行了大量的岩石破裂力学实验,如地球材料的断裂参数测量(Rudnicki, 1980),岩石受压条件下裂纹起始、发展和

止裂条件(Brace,1963;Horri,1985),岩石内裂纹间的相互作用(Dieterich,1979;Rudnicki,1981),岩石破坏过程中的声发射现象(Ohnaka,1983;Rudnicki,1980)等等。

准确预报灾害性地震的发生,从而最大限度地减轻由地震造成的灾害是人们研究地震的主要原因之一。随着人们对地震本质的逐步了解和大量观测资料的获取,20世纪60年代以来,世界上各个多震国家如中国、日本、美国、前苏联和土耳其等都陆续开展有计划的孜孜不倦的地震预报研究。

笠原庆一(Kasahara,1981)将地震预报分为四个阶段:第一阶段为统计预报,即研究发生于特定地区的一系列地震具有的不随时间变化的统计特性;第二阶段为构造预报,主要是预报可能发生在给定地区的地震的震级、类型及其他构造参数,地震构造运动的积累是这一阶段预报的主要假定;第三阶段是物理预报或精确预报,即通过识别大地震的有意义的前兆,精确地确定地震三要素(时间、地点、震级),这一阶段要求充分认识地震过程的物理规律,及时精确地监视震源区及其外围的物理状态;第四阶段为临震警报。他认为下列二项是成功预报的关键:①确认地壳的某一部分已达到临界状态,即应变已达到其极限;②由某些决定性的前兆,确认主要破裂前的初始破裂已经开始。

此外,根据不同的目的、依据和方法,地震预报可划分为长期预报、中期预报、短期预报、临震预报和余震预报五个阶段。

随着地震资料的不断积累,人们开始从地震活动的历史记录寻找其统计规律。1941年 Gutenberg 和 Richter 根据全球地震资料提出了地震震级与频度的经验关系(G-R 关系)。尽管此后的研究表明,在某些情况下震级和频度的关系并非严格服从 G-R 关系,但它仍是地震研究中的最基本的统计关系之一。我们可以根据 G-R 关系估计一定区域内未来发生的最大地震的震级,并依据 b 值的变化情况判断区域的地震趋势。

茂木(1968)根据地震活动图像提出了第一类地震空区(背景空区)的概念,指出邻近地区不断发生大地震,而自身却没有发生地震的地区,不久将发生地震的可能性很大。人们此后比较成功地预测了1985年墨西哥8.1级大地震。宇津(1968)将上述概念进一步推广,提出了第二类地震空区的概念,即在某些震源区附近,地震活动几乎呈现完全静止状态。

近些年来对地震前兆现象的研究有了很大的发展。人们从不同地区大量的震例中获得了许多相似的前兆现象。力武常次(Rikitake,1976)汇编了全世界不同时间、不同地区清理过的一大批前兆,共15类:地形变、倾斜和应变、前震、 b 值、微震活动性、震源机制、断层蠕动异常、波速比、地磁、地电、电阻率、氦、地下水、油井流量等。这些前兆现象为探索建立具体地震三要素预报的方法提供了线索。

随着地震观测技术、观测范围、实验室技术和计算技术的不断进步,加之非线性科学在地震学中的应用,20世纪70年代以来,人们试图对各种前兆现象和地震全过程给予综合的理论说明,用一些有物理依据的地震孕育模式来解释地震孕育过程中出现的前兆现象,提出了多种孕震假说,比较有代表性的如膨胀-扩容模式(Scholz,1973;Nur,1972),雪崩-不稳定模式(Myachkin,1972,1975)、粘滑模式(Brace,1966)、障碍体模式(Aki,1979,1984)和凹凸体模式(Lur,1980)等。这些工作对判断各种异常现象是否为前兆,判断它们处于地震孕育过程中的什么阶段,无疑具有重要的意义,同时比经验性预报方法具有更科学的理论基础。然而,由于震源深部环境、构造动力条件、岩石介质特性及孕震过程等

的复杂性,使孕震理论模式的研究尚未取得突破性进展。近年来,寻找新的模式的努力仍在继续,目的是能够应用地球科学最新成果,不断接近真实的孕震过程,更确切地描述实际观测到的大量的前兆现象。

回顾地震预报的历史和现状,可以看到,它已从占星术式的卜算发展到运用科学方法,从个人探索的对象发展成为一个被广泛研究的科学领域,从只是定性的趋势估计发展到逐渐敢于进行大震的临震预报,并且在很多方面取得了进展,其中有过成功预报的喜悦,但更多的是失败的苦恼。成功预报的典型震例是1975年发生在中国海城的7.3级的大地震。由于发布了紧急警告,大多数人冒着严寒居住在户外,从而拯救了成千上万人的生命。这是迄今为止地震预报史上为数不多的成功事例之一,它给人们带来了成功进行地震预报的期望。而对于更多的灾害性地震,人们却无能为力。地震灾害最惨重的震例之一是1976年发生在中国唐山的7.8级地震,由于震前没能准确预报,共造成24万人死亡,16万人严重受伤。此外,虚报的震例也很多,最典型的是美国帕克菲尔地地震预报实验。该地区曾在1857年、1881年、1901年、1922年、1934年和1966年发生过一系列中强地震,这些地震在时间上呈现了一个几乎每隔22年发生一次地震的周期特性。地震波记录进一步反映发生于1922年、1934年和1966年的三次地震波形十分类似。根据大量的分析研究,科学家们预测该地区下次地震将发生在1988年,统计误差为4年。十几年后,由于预期的地震并没有发生,本次地震预报实验宣告失败。

尽管科学家们在地震预报方面做出了不懈的努力,在理论研究、观测技术、前兆积累等方面取得了一定成就,但客观地说,地震预报并未取得突破性的进展,地震预测仍然是现今国际社会公认的最富挑战性的科学难题之一。

近年来关于地震的可预测性,地震学界展开了异常激烈的争论。盖勒(Geller,1997)认为地震是不可预测的,其依据之一是,地壳处于自组织临界状态,而地震是地壳运动的产物,因而其行为具有不确定性,是不可预测的。其依据之二是,找不到确切可靠的前兆,单纯靠大量资料来分析的经验性预测一定会走入死胡同。虽然其观点得到部分学者的认同,但其论证过程也并非无懈可击。Sykes等(1997)则认为,整个地壳,从大的时间尺度上看,的确处于自组织临界状态。但地壳各部分并非同时处于临界状况。对于一次大的地震孕育过程而言,初始阶段并非处于临界状态,随着应力的积累,孕震区的力学状态不断演化直到接近并进入临界状态,这一过程中,大地震发生的危险性不断增加。随着大地震发生,该地区从临界状态返回。从另一角度来说,Sykes等的观点正好说明,临界状态可以作为地震危险性的判据之一。与Geller等的观点相反,滨田和郎(Hamada,1991)认为,当前的地震预测的水平已经发展到能对一次板间大地震作出预测的程度;希腊的Varotsos、Alexopoulos和Nomococ等人则声称,他们用测量地电场异常的方法可有效地预测地震。尽管存在上述分歧,科学家们仍致力于地震预报的探索,一起努力设法在此领域有所突破。

1959年以统一全球地震台的仪器型号和频率响应为手段,使地震观测进一步精确化的全球标准地震台网建设开始实施。20世纪80年代,全球标准地震台网开始应用数字化装备,其中一些台站构成了新的全球数字地震台网。目前,在世界大多数国家都已建成设备良好的区域或地方地震台网。中国自1956年开始(国家地震局《1976年唐山地震》编辑组,1982),先后在北京、广州、上海、武汉等地建立基本地震观测台。1966年河北邢

台地震以后,在北京地区首次建立了由 8 个子台组成的有线传输测震台网。并在 1975 年海城地震后扩充到 21 个子台,使华北成为全国台网密度最大、监测能力最高的地区。与此同时,在日本、美国等发达国家建立了高密度、高精度的区域台网,大大提高了地震观测能力。这使得自 20 世纪 70 年代以来,积累了极其丰富的地震资料,使我们不仅能观测到大地震后余震活动的空间分布细节,而且能观测到更大范围内微、小地震活动变化,由此观测到一些新的地震活动相关、地震相互作用的现象。在此以前,由于受到观测技术的制约,这些现象往往由于缺乏准确、大量的观测资料,难以进行定量判断而被忽视。

总之,地震学是在近代物理、数学等科学技术发展基础上形成的,是研究地震及其有关现象的观测学科,主要包括地震事件的科学、地球内部物理学和应用地震学三部分(Kasahara, 1981)。地震事件的科学主要研究地震事件在地球内部孕育、发生和发展的条件和过程,地震的产生和传播,地震发生的时间和强度的分布特征,地震事件之间相互作用和对构造环境依赖等有关的力学机制,构成了地震学中最根本、最基础的部分,简称为地震力学。地震力学可分为两个分支,即单个地震震源的研究和地震活动群体特征的研究。本研究内容属于后者,即地震活动群体活动的研究。

1.2 地震应力触发与地震成组活动研究的进展

所谓地震“应力触发”,是指前面地震产生的应力变化张量投影到后续地震的断层面和滑动方向上,考虑正应力、孔隙压力和摩擦系数的影响得到库仑破裂应力变化。若库仑破裂应力变化方向与后续地震断层滑动方向一致,即库仑应力变化为正,前面地震产生的应力变化促使断层破裂,地震可能被触发,地震危险增大;反之,负库仑破裂应力变化抑制断层的破裂,发生地震的可能性降低,此区域称为“应力影区”。

近年来,提出了各种模型用以计算地震产生的库仑破裂应力变化对后续地震的影响,其研究结果在许多地震区进行了实验和检验(万永革等,2000)。特别需要说明的是,1999 年 8 月 17 日土耳其的伊兹米特地区发生强烈地震,而在地震发生之前,Stein 等(1997)和 Nalbant 等(1998)通过计算几十年内地震产生的库仑破裂应力变化就得出,此地区一直处于库仑破裂应力增加较大的地区,并指出此地区是地震危险性较高的地区。这在国际地震界产生了很大的轰动,促使地震学家重视地震产生的库仑破裂应力变化问题(Hubert et al., 2000; Parsons et al., 2000)。

地震产生的静态应力变化估算由来已久,在 20 世纪 60~80 年代就有一些早期的研究成果。例如,Smith 和 Van de Lindt(1969)曾讨论过南加州地震后的应变调整;曾用位错理论探讨过主震应力调整对余震的影响;Yamashina(1979)对板内浅源地震触发问题进行了探讨;王仁等(1980,1982)基于弹塑性力学原理模拟了华北地区地震迁移规律,确定了最后一次地震之后华北地区地震危险性的变化,说明了大震发生对其他地区和断层的影响。近年来研究天然地震产生的静态应力变化对后续地震序列时间和位置影响的工作已遍布世界范围,如非洲东北部、智利、意大利、日本、墨西哥、新西兰、土耳其、美国的加利福尼亚、内华达和中国(黄福明等,1983;黄福明等,1992;傅征祥等,1999;刘桂萍等,2000;万永革等,2000)等。

在一次地震触发另一次地震的研究中,Deng 和 Sykes(1997a,b)通过研究得出,南加

利福尼亚地区 1932~1995 年间 85% 的 $M_s > 5$ 的地震发生在正库仑应力变化区。

Stein 等(1997)研究了土耳其北安那托利亚断层自 1939~1992 年间的 10 次 $M_s > 6.7$ 地震的应力转移情况,计算得到 9 次地震在库仑破裂应力变化“驱使”下发生,库仑破裂应力变化的典型值为 0.1~1MPa,相当于 3~30 年的长期应力加载效果;在将应力转移转化为发震概率时,给定 1999 年发生大地震的伊兹米特地区存在 12% 的发震概率。

Nalbant 等(1998)也研究了土耳其西北地区和北爱琴海地区的 29 次 $M_s > 6$ 地震,发现 16 次地震与前面地震产生的库仑应力变化有关,并给定伊兹米特为未来可能发生地震的地区,结果伊兹米特在 1999 年果真发生了大地震。由于单独由地震产生的静态库仑应力变化数值太小,以上计算考虑了由地形变观测资料得到的断层加载过程。

傅征祥和刘桂萍(1999)计算了 1920 年 12 月 16 日宁夏海原大地震($M_s 8.5$)在 1927 年 5 月 23 日甘肃古浪大地震($M_s 8.0$)断层面和滑动方向上产生的静态库仑应力变化,从而得出古浪大地震可能被海原大地震触发,提前 6 年至 20 年发生的结论。

1992 年 6 月 28 日加利福尼亚 Landers 地震发生之后,在数秒到数天内,远离 Landers 震中 1250km 的地方地震活动性突然增加(Hill et al., 1993; Anderson et al., 1994; Bodin et al., 1994)。加利福尼亚 Long Valley 地区和 The Geysers 地区在 Landers 地震产生的 Love 和 Rayleigh 面波到达后地震活动性就增加了,3.5h 之后发生了 Big Bear 地震。6 月 29 日远离震中 280km 处发生了 $M_s 5.4$ Little Skull Mountain 地震(约 22h 后)。其西部的地震活动至少持续了 1 个月(Gomberg et al., 1996)。Wen 等(1996)检验了台湾地区地震活动性的远程“触发”问题,发现远处的大地震可能触发中等地震,触发的最大距离为 3000km。被远处(几个震源尺度)的地震触发了较小地震的例子在日本(Kanamori, 1972)、哥斯达黎加(Protti et al., 1995)也被观测到。

在如此远的距离,地震产生的静态库仑破裂应力变化太小,不能触发地震。最常见的解释是地震产生的低频率地震波破坏了趋于破裂边缘的断层稳定性(Hill et al., 1993; Anderson et al., 1994)。

Kilb 等(2000)研究了 Landers 地震在近场产生的动态库仑破裂应力变化峰值与静态库仑应力变化在空间延伸方向上是一致的,动态库仑应力变化峰值由于具有非对称性而能更好地解释地震之后地震活动性的改变。

Gomberg(1996)研究了 Landers 地震之后的远程地震触发问题,他比较了触发区(地震活动增加区)和未触发区的动态库仑破裂函数和应变图后指出,虽然地震产生的动态应变比静态应变大得多,但不能解释被触发地震活动性的空间分布。

Landers 地震之后,震中北部的 Great Basin 地区地震活动性急剧增加,而在较近距离的圣安德烈斯断层上 Park field 地区却没有可分辨的触发作用(Hill et al., 1993)。Park field 地区的形变测量数据表明,圣安德烈斯断层在 Park field 地区已加载到接近破裂的水平(Segall et al., 1986)。

一般说来,如果远处的触发作用明显,则近处的触发作用应更明显(Spudich et al., 1995)。另外,Joshua Tree 地震产生的动态应变的时空分布与 Landers 地震基本相同,并没有触发远处地震活动性(Gomberg, 1996)。这些现象均与传统的动态“应力触发”概念不一致。地震波导致地球内部应变的频率成分是否与触发有关呢? Gomberg 和 Davis (1996)通过对 The Geysers 地区远程地震触发问题的研究,认为触发临界应变阈值随频

率的减小而增加。他们还给出了具体函数关系,给出地震触发的应变频带宽度为 $0.05 \sim 0.25\text{Hz}$ 。Hill 等(1993)和 Anderson 等(1994)在研究 Landers 地震的动态触发问题时指出,地震之后动态应力触发的最大延迟时间为 15d。Wen 等(1996)在检验台湾地震被远处地震触发时就采用了 15d,他们发现地震可触发远处 4 级左右的中等地震。

为了解释地震活动性随时间的变化,Gomberg 等(1997)假定地震为一个粘滑过程,并运用弹簧滑块模型和依赖于速率状态的摩擦本构关系,模拟动态加载的应力变化导致地震时间的提前。结果表明,瞬态加载可以导致发震时间提前的程度非线性地依赖于地震周期。另外,高频、持续时间较长的地震波使发震时间提前较多。

他们的模拟结果还表明,幅度大的地震波还可以使本来以稳定状态滑动的断层变为粘滑,从而致使没有地震的地区出现地震。Gomberg 等(1998)运用弹簧滑块模型,研究了地震周期的变化与动态和静态扰动的关系,发现静态应力扰动在地震周期后期导致的发震时间提前小于地震周期前期,而动态应力变化在地震周期后期导致的发震时间提前大于地震周期前期。

“地震动态应力触发”阈值随地点的不同而不同,依赖所属地块的特性和响应,并与滑动不稳定理论有关(Comberg,1996)。在远场范围内,动态应力变化大大超过了静态应力变化。但是在近场,两者可能都很重要(Cotton et al.,1997)。现已观测到一次地震几秒钟之后触发另一次地震的例子(Harris,1998)。当地震产生的正库仑应力变化沿着断层走向分布并触发那里的破裂时,会导致大的地震和较复杂的破裂过程(Harris et al.,1991;Harris et al.,1993)。

孙加林、陆远忠、刘蒲雄等(1995)在研究强震孕育过程中地震活动性演化图像时指出,强震发生前十年或更长时间中,未来强震区周围普遍存在由中等以上地震围空的现象,称为背景空区。在背景空区图像出现之后,在强震前 2~6 年,未来强震区及其附近将出现地震活动增强的图像,且这种地震活动增强往往是大震前普遍的现象。孙加林等用 M-T 图和应变释放曲线图给出了我国川滇地区和华北地区 12 次 7 级以上强震的这种地震活动增强图像。

进一步分析发现,多数震例中地震活动性增强是在其外围地区发生一次大地震之后不久出现的。例如,1974 年 5 月 11 日昭通 7.1 级地震前的增强活动是在 1970 年 1 月 5 日通海 7.8 级大地震后出现的,显示了通海大地震对昭通地震孕震过程的影响。而 1976 年 5 月的龙陵 7.4 级地震和 1976 年 8 月松潘 7.2 级地震前的增强活动是在 1973 年 2 月炉霍 7.9 级大震后出现的,从而显示了炉霍大地震对龙陵和松潘地震的影响。同时,炉霍地震对昭通地震也有进一步的增强作用。

在华北地区的成组强震活动过程中,由于邢台地震前尚无区域地震台网而不好判定外,比较典型的是 1969 年 7 月 18 日渤海 7.4 级大震对海城地震和唐山地震的影响。海城 7.3 级地震前的地震活动性增强异常和唐山 7.8 级地震前的增强图像都是渤海地震后不久出现的。此外,1983 年越南莱州 7.3 级地震对 1988 年澜沧地震的影响,1986 年门源地震对 1990 年共和地震的影响等也有较显著的显示。

为了更清晰地展示强震间相互影响而引发的地震活动增强图像,赵根模、陈化然(1981,1987,1995,2001)等用中小地震活动应变释放为参数,对华北地区进行时空扫描研究,给出了邢台地震后华北地区出现河间一带地震活动增强的图像,其后一年则发生了河

间 6.3 级地震。在渤海 7.4 级地震后,华北地区出现了海城和唐山两个地区地震活动的增强图像。值得注意的是,这些地震活动增强的异常图像在区域上与强震发生的构造带有较清晰的内在联系。邢台地震后河间地区的地震活动增强是呈现为同一构造上的相互作用。渤海地震后海城和唐山两个增强区则呈现为两个交叉断层的作用。

刘桂萍、傅征祥(2000)研究了 1976 年唐山地震前后区域地震的变化,通过统计检验,认为在主震后 30h 至 7d 时间之内,距震中 4~300km 的 3 个区域:辽宁西部、天津宝坻和天津中部,地震活动速率上升 20~33 倍,它们可能是由唐山地震触发的。为证实这一观点,他们采用 Okada 程序,计算了唐山地震由于弹性位错造成的静应力变化,得到触发地震基本上分布在库仑破裂应力变化为正的区域内,应力变化幅度为 0.001~0.05MPa。库仑破裂应力的增大可能使这些地震提前发生。

当然,需要注意的是强震孕育过程中其区域地震活动的增强是孕震过程进入中期阶段的反映,周围发生强震并对其影响是这种中期阶段异常图像的成因之一。因此,并不一定在所有地震前都能找到周围地震这种影响的图像。

李钦祖等(1980,1993,1994)最早提出地震成组活动现象,张国民等(1985,1987,1993,1999)对中国大陆强震的韵律特征和强震轮回活动的计算机模型等进行了研究,李丽、张国民、石耀霖(1999)利用弹簧滑块模型对强震成组孕育、成组活动特征进行了较深入的研究。研究表明:在多数情况下强地震的孕育不是孤立地进行的,而且一个相对统一的地震区,作为一个相对独立的孕震系统,在边界构造动力的作用下,该孕震系统(地震区)内多个潜在震源呈现为应力应变增加,并相互作用、相互影响,导致强震成丛活动,整个孕育过程密不可分。当整个一组地震基本孕育成熟后,则呈现按一定顺序相继发生一系列强震,构成一个地震组。因此,不仅存在着一次地震的孕育过程,而且还存在着更具普遍意义的地震的成组孕育过程。作为孕震过程反映的地震异常,可分为一次地震异常和地震组异常两类。

“地震组异常”指的是不属于某一次地震所“独”有,而属于地震组内若干次地震所“共”有的异常或异常群体。水位、水化等方面的大量实际观测资料论证了地震组异常的存在及其特点,提出了相应的判别准则。在研究地震异常问题方面,这既是思路上的一次根本性开拓,观点上的一次重要发展,也是对存在地震组异常这一事实的确认,它使我们在面对的地震活动不是一次地震而是一组地震时,将处于较主动的地位。

研究中国的强震序列所具有的特征,是建立在把强震过程看作序列中各单次地震组合的基础之上,每一地震都与序列的发展相关联,既反映它自身的特点,也携带序列全过程的信息。将地震序列作为一个系统,着重提取和分析序列中大量地震的信息,以了解地震破裂全过程。基于这种观点和分析方法,可以拓宽地震序列研究的视角,从更深层次去了解地震发生、发展的过程,从而丰富人们的认识。考虑地震之间的组合关系,认识地震序列的发展变化,是一条研究地震相互作用的新途径。

以物理为基础的概率预报,在现阶段是我国研究地震预报理论和地震预报方法的核心。在几年到十几年时间尺度的地震预报问题上,它的主要含义也是清楚的。地震发生之前的几年到十几年,是整个孕震过程中的一个非常重要的阶段。孕震过程是发生地震的主要物理基础,关于孕震过程的理解是地震预报理论和方法的主要物理理论基础。而地震在时间空间中的非均匀分布,则是概率预报的主要事实依据。根据对孕震过程的理

解,在地震的非均匀时空分布中,研究几年到十几年发生地震的时间、地点、震级、数量等的概率,是我国现阶段对地震进行该时间尺度的以物理为基础的概率预报的基本途径。

关于孕震过程,大多只是围绕一次地震来讨论它的长、中、短、临各阶段,却很少涉及各地震之间的关系。在解释观测事实时,常常遇到一些困难,出现一些矛盾。地震活动的事实表明,强地震不是孤立事件,强震之间有密切关系,且显然有成因上的联系。这说明某些强地震是同一个孕震过程的产物,一次地震的孕育并非是一次孤立事件孕育的过程。

关于地震非均匀时空分布的研究,有相当一部分文献是在确定的时间中研究地震的非均匀空间分布,由此寻求发震概率高的地区;或在确定的空间中研究地震的非均匀时间分布,由此寻求发震概率高的时段。在地震活动图像的演变中,寻找和研究强震在时间和空间中同时出现密集的现象,总结出一定的统计规律,寻求时空一体中的高概率,则更有利于强震预报。强震在时间和空间中同时出现相对密集而表现出的成组活动,意味着这些地震从属于一个共同的孕震过程。

中国大陆虽然处于板内,但是构造活动强烈,构造格局复杂。中国大陆的构造运动并非只在一个小区域积累应力应变,并在这个小区域中发生强震,而是呈现为大的区域应力应变积累和发生地震。中国大陆地震震中分布清楚地表明,不发生地震的地区很少。一方面,各地的介质结构和物理性质不均匀,受力状况不均匀,造成应力应变积累速率不均匀。另一方面,相对于任意起始时间,各处的应力应变初值不同;破裂前须达到的应力应变临界值也不同。这样的差异最终造成的结果是,各处应力应变达到临界值的时间有早有晚,强震的发生有先有后。一旦某个区域的应力应变达到临界值,这一区域便不会太小,从而在其中的若干地点相继发生强地震,构成一组地震活动。这一区域是这一组地震的孕育区。这些地震是成组孕育,成组发生的。之后,该区域的应力应变降到较低的值,重新经历积累过程,地震活动也相应平静。各个具备发生地震条件的区域都如此,只不过区域的大小,组内地震数目的多少,全组活动持续时间及相继两次地震时间间隔的长短等等,各有不同。于是,在中国大陆强地震活动图像中,表现为此起彼伏的成组活动。

成组活动是中国大陆强地震活动的基本特征,成组孕育是中国大陆强地震孕育过程的基本特征。由研究地震活动得到的这一认识,对于按照地震活动规律本身的要求来分析鉴别地震异常,具有重要意义。既然地震前的各种异常是反映孕震过程的,既然大多数强震是成组孕育的,那么在各种异常中就应该有地震组异常。

总之,本书认为地震相互作用、相互影响是构成地震活动复杂性的一个重要因素。我们试图从现象到理论,研究地震之间的相互作用、相互影响,并针对川滇这一典型地区,建立三维有限元模型,为地震分析预测研究搭建一个有一定理论基础的平台,探索地震物理预测的一些途径。这也正是本书的初衷。

1.3 强震成组活动分析

日本学者笠原庆一曾把地震学的基础研究(他称之为“地震力学”)分为两个分支。其中一个分支是研究地震的一般特征,即分析单个地震的震源过程,也就是分析单个地震的孕育、发展、发生和震后全过程,从而给出一幅地震现象的全面图像。而第二分支则是研究成组地震中的群体特征。包括成组地震之间的相互关系、时空特征、地震发生对构造环

境的依赖关系等(图 1.1)。

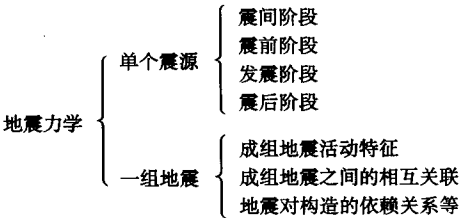


图 1.1 地震力学的分支(据笠原庆一)

根据笠原庆一的归纳,本项研究属于地震力学研究中的第二个分支。张国民、李丽(1987,1999)通过大量的计算和对计算结果分析研究,结果表明,我国大陆强震活动具有成组丛集活动特征,无论是把我国陆区作为一个整体来研究,还是把我国陆区分为东西两区来研究,乃至取某一个地区的区域地震活动性来研究都显示了这种成组活动特征。多种数学统计结果显示,这种成组活动并不是偶然的和随机的,而是有其内在联系并能通过统计检验的。

地震活动具有空间不均匀性和时间非平稳性特点。前者表现为地震在空间上往往成带、成区分布,后者即表现为地震活动在时间轴上具有活跃和平静(高潮和低潮)相交替的丛集特性。本书所用的强震活动成组性是指强震活动在某些时段十分集中,呈成丛或丛集式活动,而且每个强震组往往有其主体活动区,即在空间上也带有一定的丛集性。地震组之外,强震相当稀少,且在时间上和空间上呈十分离散的状态。

张国民等(1987,1999)研究了我国大陆强震活动的韵律性特征。应用 20 世纪以来记录相对较完整的我国陆区 $M_s \geq 7.0$ 地震资料,研究给出了我国大陆 7 级以上地震(含 7 级,下同)平静和活跃相交替的轮回性特点,指出自 19 世纪末至 20 世纪 70 年代,我国陆区已经历了四次活跃期。在其后的研究中,又发现 80 年代末之后,我国又进入了第五活跃期(图 1.2)。在表 1.1 中,进一步讨论了强震平静与活跃的划分,将每个轮回划分为三个阶段,即三个幕,分别为平静幕、过渡幕和强震幕。从统计平均的结果看,平静幕持续时间为 8 年,其间几乎不发生 7 级以上地震;过渡幕持续时间为 6 年;此间发生 3 次 7 级以上地震,即年平均为 0.5 次;强震幕亦即强震丛集活动的高潮幕,持续时间为 10 年,此间发生 13 次 7 级以上地震,年均 1.3 次。由于强震幕内 7 级以上大震成丛集中发生,且其频度随时间增长呈指数型分布,因此,本研究中将强震幕称为强震组,即强震成组活动时段。于是,由表 1.1 可见,从 19 世纪末到 20 世纪 70 年代,我国陆区经历了四个强震组,第一强震组时间为 1895~1906 年,此强震组中 7 级以上地震资料不完整;第二强震组时间为 1920~1934 年,14 年间共发生 12 次 7 级以上大震,总应变释放量为 $190.4 \times 10^7 J^{1/2}$;第三强震组时间为 1947~1955 年,8 年间发生 14 次 7 级以上地震,总应变释放量为 $176.8 \times 10^7 J^{1/2}$;第四强震组时间为 1969~1976 年,7 年间发生 13 次 7 级以上地震,总应变释放量为 $128.1 \times 10^7 J^{1/2}$ 。

自 1976 年 8 月以后,我国陆区进入强震活动的平静期,直至 1988 年 11 月澜沧、耿马两次 7 级地震前,12 年中仅发生一次 7 级以上地震,即 1985 年 8 月新疆乌恰 7.4 级地震。1988 年 11 月澜沧—耿马地震后,我国陆区 7 级地震相对活跃,至 1997 年 11 月,9 年间共