



地震动态应力触发研究进展

张 彬, 杨选辉, 陆远忠

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 本文从以下几方面阐述了近几年来地震动态应力触发的研究进展: 地震动态应力触发问题的提出; 地震动态应力触发存在的证据(包括地震频度图中探寻被触发震群和独立地震、数字滤波后新发现的被触发地震和形变仪器记录的同震变化和应力阶跃等); 地震动态触发的研究现状和机理等。还提出了目前动态应力触发研究中存在的问题, 并对其近期的发展进行了展望。

关键词: 动态应力触发; 库伦摩擦破裂; 速率-状态模型

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2008)03-0298-06

Development in the Research of Seismic Dynamic Stress Triggering

ZHANG Bin, YANG Xuan-hui, LU Yuan-zhong

(Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China)

Abstract: The research progress of seismic dynamic stress triggering in recent years from several aspects is expounded; How the problems are put forward. The exist evidences of dynamic stress triggering, including seek triggered earthquake swarm or single earthquake in seismic frequency map, find new triggered earthquake by digital filter, and co-seism change and stress step recorded by strain instrument; current situation of the research; triggering mechanism and so on. Meanwhile some problems in the research are given up, and the development of seismic dynamic tress triggering research in recent future is look ahead.

Key words: Dynamic stress triggering; Coulomb frictional failure; Rate-state model

0 引言

地震学家早就注意到, 一次强震的震源断裂错动所造成的应力场变化可能扰动其后的区域地震活动的演化过程, 往往导致区域地震活动性的变化。这类影响被称为应力触发。地震应力触发包括静态应力触发和动态应力触发。地震静态应力触发研究始于20世纪60年代, 取得了较大成果。如王海涛等研究结果表明新疆巴楚—伽师 $M_s 6.8$ 地震触发其强余震^[1]; 万永革等研究发现东昆仑活动断裂带大地震之间存在弹性应力触发作用^[2]。地震动态应力触发指大地震快速破裂错动激发的地震波(主要是面波)传播到某些处于临界状态的高应力区而

即时引起的地震事件^[3], 地震学家对其研究较晚。真正的动态应力触发研究是1992年美国兰德斯地震后, 虽然起步较晚, 但发展迅速。近些年来随着全球数字台网的建立, 精确地震数据记录成为可能, 并成功发现一些大震后的小震群。这些小震群的出现成为地震动态应力触发强有力证据, 可靠的震源参数的提供进一步推动了动态应力触发问题的研究。

1 动态应力触发研究的提出

地震应力触发是从研究静态应力触发开始的。经过近50年的科学探索, 地震静态应力触发研究已

收稿日期: 2007-10-17

基金项目: 十一五支撑项目资助(2006BAC01B03-02-02); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2007-22)

作者简介: 张 彬(1982-), 男(汉族), 山东济宁人, 研习员, 主要从事地震活动性研究。

经取得了很多成果。虽然静态应力触发模型在解释大地震对后续地震事件影响中取得了很大成功,但对一些震例是无法解释的,并且和一些理论出现了矛盾。如一些地震的后续事件特别是余震不仅没有发生在正库仑破裂应力变化区内,还发生在负的库仑破裂应力变化区内。还有,一般我们计算得到的静态库仑破裂应力变化量图像都是沿走滑断裂四象限对称分布的,而现实情况中只在破裂扩展方向上会出现更多的余震^[4],静态库仑破裂应力在解释余震分布时存在一定的矛盾。静态应力触发无法解释远震触发,因为在一般情况下当离开一个地震破裂带一定距离时,就会出现静态应力小于0.01 MPa(触发阈值)的情况^[5-7]。但地震远程触发的震例确实存在,如Hill等^[5]认为1992年Landers地震触发了最远达1 250 km处的地震。1999年土耳其伊兹米特地震、1995年亚喀巴地震和1999年美国加州赫克托矿地震也都触发了远程地震^[8-10]。这些问题迫使地震学家从另一个角度思考地震之间触发作用——地震动态应力触发。

2 地震动态应力触发存在的证据

随着精密地震仪器的出现和广泛应用,地震动态触发现象逐渐被我们识别。目前,一些强震的动态触发作用可以用地震活动突然增加来识别,如 $M-t$ 图或频度图等。然而一些强震远程触发的地震会被这个强震面波所掩盖,需要通过滤波识别出被触发的地震活动。

2.1 动态应力触发的震群或独立地震

1992年6月28日美国兰德斯地震发生之后,在数秒到数天内,远离兰德斯震中1 250 km地区的地震活动性突然增强^[11-13]。加利福尼亚长谷川地区和盖沙斯地区在兰德斯地震产生的勒夫和瑞雷面波到达后小震增多,3.5小时之后发生了大熊地震。美国西部的地震活动至少持续了一个月^[14]。

Brodsky等^[8]研究土耳其伊兹米特 M_w 7.4地震触发作用时发现,希腊境内距震中400~1 000 km远的地区地震活动性突然增强,其中触发的最大地震超过3.5级。

Mohamad等^[9]描述了1995年11月22日亚喀巴海湾 M_s 7.3地震在叙利亚和黎巴嫩边界产生的远程触发:亚喀巴海湾地震发生在左旋死海断层上,破裂长度达500 km,亚喀巴海湾主震发生2.8小时后,叙利亚和黎巴嫩边界3.8个小时内共发生超过20次的小震,其中最大震级达3.5级。

2000年6月17日和21日在冰岛地震带上分别发生了 M_w 6.5和 M_w 6.4的两次地震,这两次地震东西方向相隔17 km,并且都是在正北走向右旋走滑节面上。Arnadottir等^[15]研究发现, M_w 6.5地震在其西部100 km的Reykjanes半岛触发了地震活动。而 M_w 6.4地震虽然比第一个地震近17 km,但没有触发该地区的地震活动。同时Arnadottir等^[15]研究得出 M_w 6.5地震产生静态应力不能够触发该地区5级地震,只有动态应力才能够触发。

在台湾地区也存在动态触发现象。Wen等^[16]研究1973—1994年间台湾测震台网(TTSN)地震目录时发现12个距台湾138~2 959 km的6.5~7.1级地震在台湾具有触发现象,其中9个在震后的15天内 $M \geq 4.5$ 地震增加了三倍;同样在主震15天内有10个震例出现 $M_w \geq 4$ 地震增加了6倍的情况。

2002年11月3日美国阿拉斯加德纳里 M_w 7.9地震后,相距上千公里的美国西部许多地区出现远震触发,可见触发地震的区域非常广泛。2004年12月美国地震学会通报(BSSA)出版的德纳里巨震专辑中就有6篇文章涉及这个问题,其中Prejean等^[17]发现触发地区很广阔,最远距震中3 660 km,触发事件开始于周期为15~40 s的勒夫波和瑞利波到达后,在面波持续时间内触发事件丛集。

日本也有动态应力触发的记录。整个日本在高密度地震和形变台网监测下,同时广泛存在活动火山和地热,日本远程触发应该相对更明显,但实际上日本远程触发并没有想象的那么突出。Harrington和Brodsky^[18]指出日本之所以对触发不敏感可能与日本处于压缩性构造单元有关,还有可能由于日本大地震较多,它频繁破坏了断裂系统的束缚,以致阻止了显著孔隙压力的形成。Miyazawa等^[19]研究发现1999年9月20日台湾 M_w 7.7集集地震后日本九州中央的阿苏山火山区孤立震动和微震显著增多;Harrington和Brodsky^[20]指出2004年苏门答腊 M_w 9.0地震后阿苏山火山区地震活动增强。

中国大陆也发现了动态应力触发的证据。李纲等^[21]认为苏门答腊8.7、8.5级巨震对中国云南地区地震活动具有远程触发作用,这两次大震后云南地区的地震活动明显增强;马寅生等^[22]研究发现苏门答腊8.7级地震对柴达木地方震有触发作用;焦明若等^[23]认为印尼8.7级地震对辽宁地区地震活动有明显触发作用。

2.2 数字滤波后新发现的一些动态应力触发的地震

20世纪90年代随着全球数字测震台网的建立,特别是宽频带、大动态数字记录仪器实时记录和传输,一些远程触发的地震活动可被识别。但是还有很多被触发地震被主震面波覆盖,需要通过滤波这些地震才能被识别出来。Prejean等^[17]在对美国Mannoth山南部4 km的OMM台站数字记录高通滤波时发现,2002年德纳里地震面波通过时触发了该地区的地震活动。2004年苏门答腊8.7级地震后对美国兰格尔火山和中国云南地区地震台站记录进行数字滤波同样观测到这种现象^[3,21]。通过数字滤波一些被面波覆盖的地震活动逐渐被识别出来,成为地震远程触发的新证据。这些地震有可能是背景地震,恰巧被强震面波覆盖,但是通过分析背景地震活动率和其它手段能够区别出它们是背景地震还是被触发的地震。

3 全球动态应力触发研究现状

虽然对动态应力触发系统研究开始于1992年兰德斯7.3级地震后,并且在寻找被触发地震证据时也存在很多困难,但是经过地震学家的研究发现天然地震动态触发的地震活动也象静态应力触发的地震一样遍布世界范围,如西伯利亚^[19]、中国大陆^[21-23]、台湾^[16,24]、日本^[19-20,24-25]、汤加^[24]、美国^[26-31]、墨西哥^[33-34]、叙利亚—黎巴内^[35]、希腊^[8]、冰岛^[15](见表1)。从表中可以看出大部分被触发地区在北美洲,特别是在美国,但这不能说明美国比其它地区更容易被触发地震,这可能与其研究水平有关。但是目前较系统研究的震例较少,粗略统计了一下,共有9个强震(见表2)。

4 地震动态应力触发的机理

动态应力是伴随地震波传播而出现的,并且其变化量是短暂的,所以作用于触发断层面上的时间是有限的。那么在有限的时间内动态应力增量又是如何导致断层失稳和触发地震的呢?动态应力触发的机理目前仍不完全清楚,大振幅面波产生的动态应力和地下流体作用被认为是动态触发的重要因素。现已发展了一些相关的模型^[35],目前比较流行的有两种解释:一是摩擦失稳破裂机制,包括库仑摩擦破裂机制和速率-状态机制两种模型;另一个是孔隙压力扩散机制。地下流体对断层影响主要表现在两个方面:一是上地壳的流体动力作用,即流体渗透性和流动性;二是下地壳的岩浆流气泡扩散、岩浆入侵、岩浆体松弛、晶体热柱下沉等作用^[36-38]。

表1 目前主要动态触发地区一览表

被触发地区	触发响应		主震	
	次数	最大震级/M	震级/M	震中距范围/km
兰格尔山脉	1	<1	9.1	~11 000
卡特迈	4	2.3	7.9	115~740
加拿大南部	1		7.9	1 800~2 200
雷尼尔山	1	<1	7.9	3 108
盖沙斯	~11	<3	6.5~7.9	202~3 120
科索	>4	3.2	~7.9	165~3 660
长谷川	2	3.4	7.4~7.9	414~3 454
阿巴拉契亚	2	<2	7.2~7.9	420~3 454
拉森峰	1	2.8	7.4	840
柏尼	1	2.8	7.4	900
沙顿海	1	4.7	7.1	120~150
美国中南部	>5	5?	5.8~6.1	70~120
美国南近海	12.5	7.9	4 003	
内达华西部	1	~4	7.4	450~650
黎克特制	1	5.6	7.4	240
黄石	2	3	7.4~7.9	1 250~3 100
沃萨奇	2	3.2	7.4~7.9	3 000~3 500
Cascade, ID	2	1.7	7.4	1 100
美国东部(1811~1812)	1	~5	>7	~1 000
墨西哥	1	4.1	7.1	260
墨西哥流域	~7	~4	7.6~8.0	303~588
冲绳,日本	5	~2	7.1~7.7	900~2 213
硫磺岛,日本	4	<2	7.1~8.0	1 228~2 002
冰岛	1	~5	6.5	80~100
罗峨山谷	1	3.7	5.4	40
希腊地区	1	>3.5	7.4	400~1 000
叙利亚和黎巴嫩边界	1	3.7	7.3	500
台湾地区	9	>4	6.5~7.1	138~2 959
名张	2		7.3~8.1	900~4 000
东京湾	2	5.9~7.7	7.1~7.6	260~290
云南地区	2	5.1	8.7	2 500
新疆地区	1	6.2	8.7	4 500
西藏地区	1	6.5	8.7	3 800
辽宁地区	1	3.2	8.7	5 000

表2 目前动态触发主要研究震例及触发情况

地震名称	时间	震级/M	触发点个数	最远距离/km	触发地震最大震级/M
兰德斯	1992-06-28	7.4	14	1 250	5.6
亚喀巴	1995-11-22	7.3	1	500	3.5
南极洲	1995-03-28	8.1	2	250	
赫克托矿	1999-10-15	7.1	5	750	
伊兹米特	1999-08-17	7.4	希腊	1 000	3.8
冰岛	2000-06-17	6.6	冰岛	500?	5
德纳里	2002-11-03	7.9	18	3 660	3.2
十胜	2003-09-25	8.1	3	1 400	
苏门答腊	2004-12-26	9	2	11 000	6

5 存在的问题和未来的研究

经过十多年的科学研究,动态应力触发在触发证据、触发地区、触发机理等研究方面都取得较大进展,但也存在很多问题需要进一步解决。

(1) 如何更有效的探寻被触发的地震活动?

随着对地震研究的深入和现代地震记录仪器的广泛应用,地震触发现象才被发现。一些触发的地震可以用地震活动突然增加来识别,如 $M-t$ 图或频度图,但是还是有很多动态应力触发的地震没有识别出来,特别是一些独立地震。一些大地震发生后触发的地震被主震面波掩盖,如果不进行滤波很难识别出来。在识别低动态范围单台站记录的小地震时自动识别地震算法是无效的,因为触发的地震被大地震面波及尾波淹没,这就需要高通滤波或声谱图进行可视扫描,但是并非所有的台网都能够做到。

动态应力到达时间和触发地震之间存在一个时间差,很难确定多长时间后发生地震不属于触发地震;另外时间过长让我们很难理解它们是否存在直接联系;当发生的地震是震群时,还会面临这个震群是主震触发的地震活动还是被触发地震的余震这类的问题。

(2) 如何区别是动态应力还是静态应力触发了地震?

传统研究认为地震余震一般被静态应力触发,动态应力触发一般是远程触发。但对大量地震研究后发现动态应力和静态应力都能触发余震,但问题是动态应力还是静态应力在触发余震时的作用大?为了避免不确定性,一些学者使用数据限制它们:如果震中距超过一个或两个断层长度时静态应力太小而不能触发地震^[12]。然而, Gombert 等^[28]提出即使我们给出了很严格的数据限制余震带上动态应力触发,但是动态应力仍然对这个地域触发起到一定作用。Kilb 等^[4]通过对比动态应力振幅和余震分布发现很多余震是动态触发的。Pollitz 等^[39]研究发现在加利福尼亚相似地震矩慢地震(准静态)余震比典型破裂地震少得多。上面研究说明动态波在近场触发早期余震中起到的作用远超过以前的认识。

(3) 怎么使地震动态应力触发研究全球化?

虽然大地震发生后远程触发的震例报道越来越多,然而我们研究过的动态应力触发地震大部分集中在美国加利福尼亚、内华达以及土耳其、日本和中国,远未达到全球。通过对最近几个强震细致研究后发现,强震后动态地震波触发的地震比平常认为的多,并且触发地区的广泛性也远远超出我们的想象。起初人们寻找触发地震一般在高背景地震率、台网密度大、关注水平高地区,特别是一些地热或火山活动区。实际上根据 Spudich 等^[40]研究发现,一

些挤压块体和非地热区也存在地震触发现象。目前识别触发地震主要看地震目录有没有地震发生率突然增加,然而可能由于仪器记录饱和或自动识别地震法则出现问题,有的因为地震太小只有被个别台站记录,所以很多地震没有出现在地震目录中。随着一些宽频带、高动态范围仪器的安装,一些高频率地震从相对比较低频率地震波列中区别出来,所以一些新的触发地区出现。然而在一些地区,由于动态范围的限制,触发事件还是很难从主震波列中识别出来。所以要想更进一步弄清楚这个问题,需要在更广泛的地区进行系统研究。

(4) 怎么把地震应力触发应用到地震预测?

研究地震落脚点就是为了更好的进行地震监测预报。目前地震应力触发主要局限在观测研究方面,怎么把地震应力触发应用到地震预测中还需要大量研究和实践。1999年8月11日土耳其的伊兹米特地区发生强震,而在此地震发生前,Stein 等^[41]和 Nalbant 等^[42]通过计算10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。地震触发只是外在诱发因素,地壳应力只有达到临界状态,在外界较小扰动下才会发生地震。但如果要将应力场及其变化的研究与地震预测结合起来,还需要做很多工作,对模型初始应力场状况应有所了解等。

本文及有关研究工作得到了中国地震局地壳应力研究所刘耀炜、陈连旺、崔效峰研究员,中国地震局地质研究所韩竹军研究员、中国地震局地球物理研究所陈学忠研究员等的帮助和支持。在此对他们表示衷心感谢!

[参考文献]

- [1] 王海涛,王琼,赵翠萍. 2003年2月24日新疆巴楚—伽师 $M_s 6.8$ 地震的应力触发作用研究[J]. 西北地震学报, 2006, 28(40): 335-340.
- [2] 万永革,沈正康,甘卫军,等. 东昆仑活动断裂带大地震之间的弹性应力触发研究[J]. 西北地震学报, 2003, 25(1): 1-7.
- [3] 张国民,张晓东,刘杰,等. 印尼苏门答腊 8.7 级大震对中国陆区的影响[J]. 地震, 2005, 25(4): 15-25.
- [4] Kilb D, Gombert J, Bodin P. Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stresses[J]. Nature, 2000, 408: 570-574.
- [5] Hill D P, Reasenber P A, Michael A, et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake [J]. Science, 1993, 260: 1617-1623.
- [6] Cotton F, Coutant O. Dynamic stress variations due to shear faulting in a plane-layered medium[J]. Geophys. J. Int., 1997,

- 128:676-688.
- [7] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. *J. phys. Res.*, 1998, 103:24347-24358.
- [8] Brodsky E E, Karakostas V, Kanamori H. A new observation of dynamically triggered regional seismicity: earthquakes in Greece following the August, 1999, Izmit, Turkey earthquake[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27:2741-2744.
- [9] Mohamad R, Darkal A N, Seber D, et al. Remote earthquake triggering along the Dead Sea Fault in Syria following the 1995 Gulf of Aqaba earthquake ($M_S = 7.3$) [J]. *Seismol. Res. Lett.*, 2000, 71:47-52.
- [10] Gombert J, Reasenber P A, Bodin P, et al. Earthquakes triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes[J]. *Nature*, 2001, 411:462-465.
- [11] Hill D P, Reasenber P A, Michael A, et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California earthquake[J]. *Science*, 1993, 260:1617-1623.
- [12] Anderson J G, Brune J N, Louie J N, et al. Seismicity in the western Great Basin apparently triggered by the Landers, California, earthquake, 28 June 1992 [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 1994, 84:863-891.
- [13] Bodin P, Gombert J. Triggered seismicity and deformation between the Landers, California and Little Skull mountain, Nevada, earthquakes [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 1994, 84: 835-843.
- [14] Gombert J, Davis S. Stress/strain changes and triggered seismicity at The Geysers, California [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101: 733-749.
- [15] Amadottir T, Geirsson H, Einarsson P. Coseismic stress changes and crustal deformation on the Reykjanes Peninsula due to triggered earthquakes on 17 June 2000 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, doi:10.1029/2004JB003130.
- [16] Wen K L, Beresnev I A, Cheng S. Moderate-magnitude seismicity remotely triggered in the Taiwan Region by large earthquakes around the Philippine Sea Plate [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 1996, 86:843-847.
- [17] Prejean S G, Hill D P, Brodsky E E, et al. Remotely triggered seismicity on the United States west coast following the $M_w 7.9$ Denali Fault earthquake [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 2004, 94:S348-S359.
- [18] Harrington R M, Brodsky E E. The absence of remotely triggered seismicity in Japan [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 2006, 96: 871-878.
- [19] Miyazawa M, Mori J. Detection of triggered deep low-frequency events from the 2003 Takachi - oki earthquake [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32:L10307.
- [20] Harrington R M, Brodsky E E. The absence of remotely triggered seismicity in Japan [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 2006, 96: 871-878.
- [21] 李纲, 刘杰, 郭铁栓. 印尼 8.7、8.5 级巨震对云南地区地震活动的远震触发分析 [J]. *地震*, 2005, 25(4):49-57.
- [22] 马寅生, 史大年, 安美建, 等. 苏门答腊地震对柴达木地方震的触发作用 [J]. *地质力学学报*, 2005, 11(2):110-115.
- [23] 焦明若, 王海燕, 李芳, 等. 印尼 8.7 级地震对辽宁地区的影响 [J]. *东北地震研究*, 2005, 21(4):1-9.
- [24] Ukawa M, Fujita E, Kumagai T. Remote triggering of microearthquakes at the Iwo-Jima volcano [J]. *Journal of Geography*, 2002, 111:277-286.
- [25] West M, Sanchez J J, McNutt S R. Periodically triggered seismicity at Mount Wrangell, Alaska, after the Sumatra earthquake [J]. *Science*, 2005, 308:1144-1146.
- [26] Tibi R, Wiens D A, Inoue H. Remote triggering of deep earthquakes in the 2002 Tonga sequence [J]. *Nature*, 2003, 424:921-925.
- [27] Aagaard B T, Anderson, Hudnut K W. Dynamic rupture modeling of the transition from thrust to strike-slip motion in the 2002 Denali Fault earthquake [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 2004, 94:S190-S201.
- [28] Gombert J, Bodin P, Reasenber P A. Observing earthquakes triggered in the near field by dynamic deformations [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 2003, 93:118-138.
- [29] Gombert J, Bodin P, Larson K, et al. Earthquakes nucleated by transient deformations caused by the $M = 7.9$ Denali, Alaska, earthquake [J]. *Nature*, 2004, 427:621-624.
- [30] Gombert J, Johnson P. Dynamic triggering of earthquakes [J]. *Nature*, 2005, 437:830.
- [31] Hill D P, Johnston M J, Langbein J O, et al. Response of Long Valley Caldera to the $M_w = 7.3$ Landers, California, earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100:12985-13005.
- [32] Ziv A. On the role of multiple interactions in remote aftershock triggering: the Landers and the Hector Mine case studies [J]. *Bull. Seismol. Soc. America*, 2006, 96:80-89.
- [33] Singh S K, Anderson J G, Rodriguez M. Triggered seismicity in the Valley of Mexico from major Mexican earthquakes [J]. *Geofiscia International*, 1998, 37:3-15.
- [34] Mohamad R, Darkal A N, Seber D, et al. Remote earthquake triggering along the Dead Sea Fault in Syria following the 1995 Gulf of Aqaba earthquake ($M_S = 7.3$) [J]. *Seismol. Res. Lett.*, 2000, 71:47-52.
- [35] Hill D P, Pollitz F, Newhall C. Earthquake - volcano interactions [J]. *Physics Today*, 2002, 55:41-47.
- [36] Brodsky E, Sturtevant B, Kanamori H. Earthquakes, volcanoes, and rectified diffusion [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 23827-23838.
- [37] Linde A T, Ladwin M T, Johnston M J S, et al. A slow earthquake sequence on the San Andreas fault [J], *Nature*, 1996, 383: 65-68.
- [38] Hill D P, Johnston M J S, Langbein J O, et al. Response of Long Valley Caldera to the $M_w = 7.3$ Landers, California, earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100:12985-13005.
- [39] Pollitz F F, Johnston M J. Direct test of static stress versus dynamic stress triggering of aftershocks [J]. *Geophys. Res. Lett.*,

- 2006,33:1029G1026764.
- [40] Spudich P, Steck L K, Hellweg M, et al.. Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M_s 7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: Observations from the UPSAR dense seismograph array[J]. J. Geophys. Res., 1995, 100: 675-690.
- [41] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering [J]. Geophys. J. Int., 1997, 128: 594-604.
- [42] Nalbant S S, Hubert A, King G C P. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea [J]. J. Geophys. Res., 1998, 103: 24469-24486.

(上接 269 页)

3 结论

本文在对我省“十五”期间架设的强震台站记录到的 60 道强震记录进行分析后得出,我省大部分地区的地震动强度依从幂指数衰减规律,其公式为 $y = e^{26.628} \cdot x^{-3.786}$ (以 EW 向为例),并获得了烈度与震中距的对应关系。

[参考文献]

- [1] 中国科学院地球物理研究所编. 地震学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [2] 闵祥仪, 姚凯, 何新社. 2003 年 10 月 25 日甘肃民乐—山丹 M_s 6.1 地震强震近场记录和分析[J]. 西北地震学报, 2003, 25(4): 289-292.
- [3] 李滔, 马建新. 地震拟合相关系数在青海地区地震预报中的应用[J]. 西北地震学报, 2008, 30(2): 184-188.
- [4] 张俊玲. 1879 年甘肃武都南 8 级地震新史料[J]. 西北地震学报, 2007, 29(3): 264-266.
- [5] 石树中, 沈建文. 美国西部地震烈度衰减规律[J]. 世界地震工程, 2003, (3): 50-55.
- [6] 刘高, 李新召, 邓建丽, 等. 岩体力学参数变异性及取值方法[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 1-5.

[1] 中国科学院地球物理研究所编. 地震学基础[M]. 北京: 科学