汶川余震序列的加卸载响应比分析

张浪平^{1,3},尹祥础^{1,2},庄建仓⁴,张晓涛⁵,袁 帅^{1,3},梁乃刚¹

 (1.中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室,北京 100190; 2.中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 3.中国科学院研究生院,北京 100049; 4.统计数学研究所,日本 东京
 106-8569; 5.中国地震台网中心,北京 100045)

摘要:该文首先将汶川余震序列分成西南、东北两段,用加卸载响应比方法分别进行分析,结 果表明震后两段的响应比值都比较低,明显小于1,这可判断汶川地震属于主余震型地震;且 地震序列中的强余震(*M* 5.0)发生前加卸载响应比值出现明显异常,大都是加卸载响应比出 现峰值,之后发生强余震。考虑到主震后余震的时空丛集现象,结合 ETAS 模型对原有的加卸 载响应比计算式进行改造,并分析了主震之后15 天的改造后响应比值,发现改造后的响应比 在一定程度上消除了丛集的影响,并展示了对紧随主震发生的强余震的预测能力。

关键词:加卸载响应比;强余震预测;ETAS模型;汶川地震 中图分类号:P315.7 文献标识码:A 文章编号:1000-3274(2009)01-0060-08

引言

2008 年 5 月 12 日四川的汶川发生了 *M*₈8.0 的大地震^[1],震中位置为 31 N,103.4 E, 造成严重受灾面积达 10 万平方公里。地震是震源区介质遭受变形、损伤、演化,最后导致 破坏或失稳的过程。龙门山地震带经过长期的能量累积,最终在北川-映秀地区发生突然 的能量释放,破裂构造沿龙门山中央断裂带迅速扩展,形成地震破裂带。汶川地震有两大 特点:其一是逆冲型地震,龙门山向东逆冲作用并伴有向北的滑移,致使余震明显向北东 方向扩展;其二,属于浅源地震,震源深度为 10 ~ 20 km^[1]。截止到 2008 年 9 月 27 日 0 时,共发生余震 31018 次,其中 4.0 ~ 4.9 级 544 次,5.0 ~ 5.9 级 56 次,6.0 ~ 6.9 级 8 次, 最大余震震级为 6.4 级。汶川地震发生后,最迫切需要解决的问题就是回答该地震是否为 主余震型地震,以及对震后发生强余震的时、空进行预测研究。

在地震力学、损伤力学、非线性科学等学科的基础上, 尹祥础等^[2,3]提出了加卸载响应 比理论(LURR)。该理论不仅可以应用于地震预测, 还可能应用于预测其他的地质灾害(如 滑坡、矿震、岩爆、水库地震等)^[4~6]。经过多年的地震预测实践, 加卸载响应比理论得到

基金项目:国家 973 项目(2004CB418406);国家自然科学基金项目(10721202,10572140);国家地震网格计算应 用节点建设(2005D KA64003)资助 作者简介:张浪平(1982-),男,湖南涟源人,2006 年在读博士研究生,主要从事地震力学和地震预测等研究。

^{*} 收稿日期: 2008-09-28; 修改回日期: 2008-10-23

了比较广泛的研究和应用,并不断取得新的进展。应用加卸载响应比作为地震前兆判定指标,对上百例地震资料进行检验,80%以上的检验效果良好^[7-9]。最近几年用加卸载响应 比方法对中国大陆地区做出的年终预测都取得了较好的预测效果^[10~13]。王海涛等^[14]用加 卸载响应比方法分析了 1997 年发生的新疆伽师强震群过程中加卸载响应比的变化特征, 结果表明在强余震(*M* 5.0)发生之前加卸载响应比值均会出现不同程度的异常,这是加 卸载响应比理论应用于地震短临预测的首次实践。本文根据断层参数的不同将汶川余震区 域分成西南、东北两段,分别对两段余震序列进行加卸载响应比分析,并进行强余震预测 研究。最后还对主震后余震序列时空丛集现象对响应比计算的影响进行了讨论。

1 加卸载响应比方法

加卸载响应比方法的主要思路是:孕震系统对加载响应与卸载响应的比值 *Y* 能够定量 地刻画孕震区介质的损伤程度或反映该系统趋近失稳的程度,可以将其定义为

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \tag{1}$$

式中,下角标为正号表示加载阶段的响应率,负号表示卸载阶段的响应率。取不同的物理 量作响应, *x* 的表达式不同。在实际地震预测中取地震能量作为响应,加卸载响应比 *y* 定 义为

$$Y = \frac{\begin{pmatrix} N_{+} \\ E_{i}^{m} \end{pmatrix}_{+}}{\begin{pmatrix} N_{-} \\ N_{-} \\ E_{i}^{m} \end{pmatrix}_{+}}$$
(2)

式中, *E*为地震的能量, "+"代表加载, "-"代表卸载。*m*可以取为0、1/3、1/2、2/3或1。 当 *m* = 1 时, *E*ⁿ 表示能量; 当 *m*为 1/3或 2/3 时, *E*ⁿ 表示孕震区域的线性尺度和面尺度; 当 *m* = 1/2 时, 表示Benioff 应变; 当 *m* = 0 时, *Y* 值相当于 N^+/N^- , 而 N^+ 和 N^- 分别代 表加载和卸载过程中出现的地震数量。在本文中, *m* 取为 1/2。

在地震预测实践中,加载和卸载可以由日月固体潮引起的库仑应力(有效剪应力)的增加和减少来确定^[15]。根据库仑准则,断层面上的库仑应力(不考虑空隙压力的作用)为

$$CFS = n + f n \tag{3}$$

式中, f、 "和"分别代表断层面的内摩擦系数、剪应力和正应力, f在文中的取值为 0.4。 CFS > 0时判断为加载, CFS < 0时判断为卸载⁽¹⁶⁾。

2 余震序列的LURR 分析

赵翠萍等 利用全球台网体波波形数据反演汶川地震的破裂过程,参考 USGS 公布的 结果,给出断层参数为:走向 229°,倾向 33°,滑动角 141°。从汶川地震构造分析,滑动角 随着地震破裂带方向发生改变^[1],以岷江断裂分界,将地震破裂带按照断层参数的不同, 把破裂带分成西南、东北两段,分界点为 33 N,104 °E 和 29.5 N,106 °E (图 1),下面将分 别对西南,东北两段进行加卸载响应比分析。图 2 是汶川余震序列截止到 2008 年 9 月 28

震

日的 M-t 图。



图 2 汶川余震序列的 M-t 图(截止到 2008 年 9 月 29 日 0 时)

2.1 西南段的计算结果

西南段的断裂是以逆冲和右旋走滑为主,断层参数为:走向 229°,倾向 33°,滑动角 141°。以 4 天为计算时间窗,1 天为滑移步长,就是每隔一天计算一次,对该地区进行实时 的跟踪分析。计算得到该段 Y 值随时间的演化曲线(图 3a)。在图 3(a)中叠加了发生在该段 的强余震(M 5.0)。另外,计算了该段代表性的点(31.0 \mathbb{N} , 103.4 \mathbb{E}) 库仑有效剪应力 (*CFS*)的演化曲线(图 3b)。

2.2 东北段的计算结果

东北段的断裂是以右旋走滑为主,断层参数分别为:走向 229°,倾向 33°,滑动角 180°。同样以 4 天为计算时间窗,1 天为滑移步长,对该段进行实时的跟踪分析。计算得到

该段 Y 值随时间的演化曲线(图 4a)。东北段代表性的点(32.7 N, 105.5 ℃) CFS 演化曲线

见图 4(b)。 Psw3 Psw4 (a) Y 值 In 2008.50 2008.55 2008.60 2008.70 2008.75 2008.35 2008 40 2008.45 2008.65 4 (b)8 2 0 CFS -2 500 2008 55 2008.60 2008.65 2008.75 2008.35 2008 40 2008.45 2008.50 2008 70 时间/a 图 3 西南段的加卸载响应比(a)和库仑有效剪应力(b)变化曲线 Pne4 Pne2 Pne (a) 2008.45 2008.50 2008.55 2008.60 2008.65 2008.70 2008.35 2008 40 2008.75 4 (a) 2 C CFS -A 2008.40 2008.45 2008.55 2008.60 2008.65 2008.70 2008.75 2008.35 2008.50 时间/a

图 4 东北段的加卸载响应比(a)和库仑有效剪应力(b)变化曲线

2.3 结果分析

对图 3 和图 4 进行分析。首先在主震过后西南、东北两段的响应比 Y 值都远小于 1, 这与通常的主余震型地震序列一致,表明汶川地震是主余震型地震。由于计算时间窗为 4 天,而且在主震过后的一段时间加卸载响应比值低于 1,所以先不考虑主震后 10 天内发生 的强余震丛集,只分析 2008 年 5 月 22 日之后发生的 5 级以上强余震。

图 3a 中加卸载响应比的第一个峰值 Psw1 之后 15 天就发生了 3 个 5 级以上余震,即表 1 中 2~4 号余震,用 EQ1 表示;峰值 Psw2 过后 14 天对应有 2 个强余震发生,即表 1 中的 5 号、6 号余震,用 EQ2 表示;峰值 Psw3 过后 2 天发生了 EQ3 表示的 2 个强余震,即表 1 中的 7 号、8 号地震;峰值 Psw4 意味着西南断裂带可能还会有强余震发生。另外,表 1 中的 1 号地震发生在加卸载响应比上升的过程中,即发生在峰值 Psw1 之前。

震

表 I 发生在 2008 年 5 月 20 日后四常段的 5 级以上宗晨序列										
编号		时间 (年-月-日-时:分:秒)	_N / (9	_E / ()	震级	对应峰值				
1		2008-05-22-15:18:42	31.23	103.57	5.1					
2	EQ1	2008-06-08-18:51:16	31.88	104.25	5.1	Psw1				
3		2008-06-09-15:28:36	31.35	103.72	5.0					
4		2008-06-11-06:23:18	30.90	103.27	5.0					
5	EQ2	2008-07-15-17:26:20	31.57	104.00	5.0	Psw2				
6		2008-07-18-00:40:41	31.68	104.10	5.1					

31.83

31.02

104.22

103.22

5.3

5.1

图 4(a) 中加卸载响应比的第一个峰值 Pne1 过去 4 天后发生了 4 个 5 级以上余震,即 表 2 中 1 ~ 4 号余震 . 用图 4(a) 中的 EO1 表示 : 在响应比值升到峰值 Pne2 的同时发生了表 2 中的 5 号余震,用 EQ2 表示;峰值 Pne3 过后 16 天发生了用 EQ3 表示的 5 个强余震,即 表 2 中的 6~10 号地震;峰值 Pne4 之后 12 天发生用 EQ4 表示的强余震,即表 2 中的 11 号地震。

编号		时间 (年-月-日-时:分:秒)	_N / (9	_E /(9	震级	对应峰值
1	EQ1	2008-05-25-16:21:49	32.55	105.33	6.4	Pne1
2		2008-05-27-16:03:22	32.77	105.57	5.4	
3		2008-05-27-16:37:51	32.77	105.58	5.7	
4		2008-05-28-01:35:08	32.65	105.38	5.0	
5	EQ2	2008-06-05-12:41:06	32.37	105.00	5.1	Pne2
6	EQ3	2008-07-24-03:54:43	32.83	105.50	5.6	Pne3
7		2008-07-24-15:09:28	32.83	105.48	6.0	
8		2008-08-01-16:32:42	32.08	104.65	6.1	
9		2008-08-05-17:49:15	32.77	105.45	6.1	
10		2008-08-07-16:15:34	32.13	104.60	5.3	
11	FO4	2008-09-12-01 -38 -58	32 97	105 57	57	Pne4

表 2 发生在 2008 年 5 月 20 日后东北段的 5 级以上余震序列

图 3(b) 和图 4(b) 中还给出了西南和东北两段具代表性的点 *CFS* 的演化曲线。比较 LURR 曲线和 CFS 曲线表明两者出现峰值的时间基本一致,也就是说LURR 与 CFS 呈现 一定程度的相关性。这说明汶川余震区域的西南和东北两段的加卸载响应比值受库仑有效 剪应力的影响很大,表明该地区处于一个非常敏感的临界状态。张晖辉[17.18]研究了一些强 震的余震序列,发现 CFS 与 Benioff 应变之间的相关性在强余震发生之前都会有明显升高 的现象.图 3(b)和 4(b)中 *CFS*与LURR 的相关性也证实了这一现象。

余震丛集影响的讨论 3

在强地震发生之后,余震序列会出现不同程度的时间与空间的丛集现象,也就是在主 震过后很短的时间内发生众多余震,且空间分布大都集中在主震震中的周围。这些余震的 发震时间基本一致,而且空间分布也非常接近,势必会导致要么同为加载地震,要么同为 卸载地震,这样就会对加卸载响应比值带来较大的影响。 张浪平等 [19] 结合 EA TS 模型,提

7

8

EQ3

2008-08-13-05:03:20

2008-08-15-01:06:38

Psw3

出了消除余震丛集效应对加卸载响应比影响的方法,并对式(2)进行了改造。即

$$Y_{\text{new}} = \frac{\begin{pmatrix} N_{+} & & \\ & E_{i}^{m} / & i \end{pmatrix}_{+}}{\begin{pmatrix} & & \\ N_{-} & & \\ & & E_{i}^{m} / & i \end{pmatrix}_{-}}$$
(4)

式中, ; 是对应于第 ; 个地震在余震序列的权重系数。

考虑到余震丛集的时间长度与加卸载响应比计算的时间窗长(4 天),根据式(4)对主 震后 15 天的余震序列进行加卸载响应比分析,计算结果见图 5。图 5 分别是西南段、东北 段的计算结果。图 5 中给出了加卸载响应比值 Y 与改造后的加卸载响应比值 Y_{new}。从图 5(a)中可以看出新响应比值 V_{sw} 可以对之后发生的 EQsw1 表示的两个强余震进行预测; 峰值 P_{sw} 可以对 EQsw2 做出预测。图 5(b)中的新响应比值 V_{ne} 可以对用 EQne 表示的两 个强余震做出预测。改造后的加卸载响应比值可以对 EQsw1、EQsw2、EQne 等强余震做 出预测,而根据式(2)计算出来的加卸载响应比是不能对这些余震做出预测的。这也表明 结合 ETAS 模型的加卸载响应比方法能在一定程度上消除余震丛集的影响。



图 5 结合 ETAS 模型对主震后 15 天的加卸载响应比分析结果 (a) 西南段; (b) 东北段

4 结束语

本文首先根据断层参数的不同,将汶川余震序列分成西南段、东北段,用加卸载响应 比方法分别进行分析,发现震后两段的响应比值都比较低,明显小于1,故判断该地震属 于主余震型地震;分析结果表明序列中的强余震(*M* 5.0)前加卸载响应比值都会出现明 显异常,一般都是加卸载响应比出现峰值,之后发生5级以上的强余震。在汶川强余震预 测实践中,加卸载响应比方法显示出了良好的短临预测能力。考虑到主震后余震的时空丛 集效应,结合 ETAS 模型对原有的加卸载响应比计算公式进行改造,并分析了主震后15 天的新响应比值,发现改造后的响应比值可预测紧随主震发生的5个强余震,而这是原有 的响应比值所不能预测的。总之,结果表明用加卸载响应比方法进行强余震预测是有前途 的。加卸载响应比方法以往的预测时间为"年"尺度,汶川地震余震预测的实践,将其预测 时间可能缩小至"天"的尺度。

本项目得到国家地震网络应用节点建设(004D KA50740)、"973"国家重点基础研究项

目(2004CB418406)和国家自然科学基金委创新群体项目(10721202)的资助。本文的地震 目录数据来源于中国地震台网中心,震源机制解来源于哈佛大学的 CMT Catalog Search 网站,并得到了中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心迟学斌研究员、陆忠华研究员、冯仰德博士等帮助,在此表示感谢。

震

参考文献:

- Burchfiel B C, Royden L H, vander Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People s Republic of China[M]. GSA Today, July, 2008.
- [2] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987, 3(1): 1-7.
- [3] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预测[J]. 中国科学, 1991, (5): 512-518.
- [4] 姜彤, 马莎, 许兵, 等. 边坡在地震作用下的加卸载响应规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3803-3807.
- [5] 贺可强,周敦云,王思敬.降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J]. 岩石 力学与工程学报,2004,23(16):2665-2670.
- [6] Zhang W J, Chen Y M, Zhan L T. Loading/Unloading response ratio (LURR) theory applied in predicting deep-seated landslides triggering[J]. Engineering Geology, 2006, 82: 234-240.
- [7] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping. The load/unload response ratio (LURR) theory and its application to earthquake prediction[J]. Journal of Earthquake Prediction Research, 1994, 3(3): 325-333.
- [8] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping, et al. A New Approach to Earthquake Prediction-The Load/ Unload Response Ratio (LURR) Theory [J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145 (3/4): 701-715.
- [9] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Wang Yucang, et al. Development of a new approach to earthquake prediction: load/ unload response ratio (LURR) theory[J]. Pure Appl Geophys, 2000, 157(11-12): 2365-2383.
- [10] 尹祥础,张晖辉,彭克银,等.加卸载响应比理论的新进展及其对中国大陆未来地震趋势的预测
 [A].中国地震局分析预报中心.中国地震趋势研究(2004 年度)[C].北京:地震出版社,2003. 282-285.
- [11] 尹祥础,张晖辉,张浪平,等.多时空尺度加卸载响应比扫描预测 2005 年中国大陆地震趋势[A].
 中国地震局分析预报中心.中国地震趋势研究(2005 年度)[C].北京:地震出版社,2004.285-292.
- [12] 尹祥础,张晖辉,张浪平,等.从加卸载响应比的变化预测中国大陆地震趋势[A].中国地震局地 震预测研究所.中国地震趋势预测研究(2006 年度)[C].北京:地震出版社,2005.92-96.
- [13] 尹祥础,张浪平,张永仙,等.从加卸载响应比的时空演化预测中国大陆未来1~3年地震趋势的 初步研究[A].中国地震局地震预测研究所.中国地震趋势预测研究(2007年度)[C].北京:地震 出版社,2006,90-95.
- [14] Wang Haitao, Peng Keyin, Zhang Yongxian, et al. Characters of Variation of LURR During the Earthquake Sequence of Xinjiang[J]. Chinese Sciences Bulletin, 1998, 43: 1752-1755.
- [15] Harris R A. Introduction to Special Section: Stress Triggers, Stress Shadows, and Implication for Seismic Hazard[J]. J Goephys Res, 1998, 103: 24347-24358.
- [16] Resernberg P A, Simpson R W. Response of Regional Seismicity to the Static Stress Change Pro-
- © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

duced by the Loma Preita Earthquake[J]. Science, 1992, 255: 1687-1690.

- [17] 张晖辉. 非均匀脆性介质的灾变预测-加卸载响应比理论的研究与实践[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2006.
- [18] Zhang Huihui, Yin Xiangchu, Liang Naigang, et al. Acoustic Emission Experiments of Rock Failure under Load Simulating the Hypocenter Condition[J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163 (11-12): 2389-2406.
- [19] Zhang Langping, Zhuang Jiancang, Yin Xiangchu, et al. Forecasting of strong aftershock by using a combination of the LURR method and the ETAS model [J]. Geophysics Journal of International, 2008 (Submitted): 115-128.

Load/ Unload Response Ratio Analysis of the Wenchuan Aftershock Sequence

ZHANG Lang-ping^{1,2}, YIN Xiang-chu^{1,3}, ZHUANG Jian-cang⁴ ZHANG Xiao-tao⁵, YUAN Shuai^{1,3}, LIANG Nai-gang¹

(1.LNM, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China; 2. Institute of Earthquake Science,

CEA, Beijing 100036, China; 3. Graduate University of CAS, Beijing 100190, China;

4. Institute of Statistical Mathematics, Tokyo 106-8569, Japan; 5. China

Earthquake Networks Center, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract: On 12 May 2008, Wenchuan earthquake with magnitude $M_{\rm s}8.0$ occurred in Sichuan, China. Because of the different focal mechanisms, we divide the distribution region of Wenchuan aftershocks into two parts, namely the southwest part and the northeast part, which are analysed using the Load/Unload Response Ratio (LURR) method separately. The results showed that LURR-values in both the two parts are obviously smaller than 1.0 after the main shock, so the Wenchuan earthquake can be determined to be the u-sual mainshock-aftershock type. On the other hand, before the occurrence of strong aftershocks (M 5.0) in the sequence, the LURR-values show anomalies of high values and most strong aftershocks occurred after LURR experienced a peak value. Considering the temporal clustering and spatial concentration of aftershock sequences after the occurrence of most major earthquakes, an improved version of LURR combining the epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model is applied to the analyses of the sequence in the first 15 days after the main shock. The results showed that the new LURR can eliminate the fluctuations caused by aftershock clusters to some extent and is better for forecasting strong aftershocks.

Key words : Load/Unload Response Ratio (LURR); Strong aftershock forecast; ETAS model; Wenchuan earthquake