

加卸载响应比在震后趋势估计和震前中短期预测中的应用^{*}

李佐唐^{1,2}, 何少林², 王先², 李春森²,
巴志平², 李秋红², 董宗明², 陈继锋²

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学系, 安徽 合肥 230026;
2. 中国地震局兰州地震研究所监测中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以加卸载响应比方法在青藏高原北部地区几次中强地震预报中的应用为例, 讨论了天然地震序列下样本条件对加卸载响应比 Y 值的影响, 探讨了该方法在震后趋势估计和震前中短期预测应用中的若干问题, 以探索提高响应比方法预测地震的成功率。

关键词: 样本条件; 加卸载响应比; 地震预测

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2002)01-0049-07

0 引言

自“八五”攻关以来, 地震预测研究侧重于地震预报新方法及相关计算机软件包的研制。一年一度的全国地震趋势会商会上使用的地震学预报方法, 由 1989 年的 8 种发展到 1993 年的 28 种。但是, 地震预测新方法的大量增加未能有效提高地震预报的对应率, 中国地震预报水平在 1989~1997 年之间无明显提高^[1,2], 只是 I 类(全国地震重点危险区)+II 类(全国地震注意监视区)预报区数的成功率的波动减小, 逐渐稳定于 28.57% 附近。地震学异常对应地震的比率与区数预报的成功率相似也没有随时间的推移逐年上升, 只是异常对应地震的成功率的波动越来越小, I+II 类区的成功率 1994 年后趋于稳定在 27.25% 左右(见图 1)。由此可知, 仍有 72.75% 的地震学异常无地震与之对应。

加卸载响应比方法是“八五”期间提出的地震学预测新方法之一, 本文结合加卸载响应比方法在青藏高原北部地区几次震例中的应用情况, 从可操作性、实用性的角度探讨了响应比方法在震后回顾性地震预报(震例总结)、震后地震趋势估计、震前地震预测应用中的若干具体问题, 以期对响应比方法预测地震成功率的提高能有所帮助。

1 加卸载响应比方法简介

1987 年尹祥础教授提出了加卸载响应比理论, 随后该理论得到了迅速发展和广泛应

收稿日期: 2001-06-06

^{*} 中国地震局“九五”攻关重点项目(95-04-04-03-04-3); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2002006。

作者简介: 李佐唐(1964), 男(汉族), 甘肃甘谷人, 中国科学技术大学在读硕士研究生, 副研究员, 主要从事地震数字信号处理、小波分析方法的应用及地震预测实用方法研究。

用^[3-6], 1994 年施行觉教授在岩石力学实验中得出了响应比理论所预期的结果^[7]. 加卸载响应比理论物理意义明确, 它将地震的孕育与发生视为非线性系统的失稳过程, 提出了一个定量反映非线性系统不稳定程度的新参数——加卸载响应比 Y , 其基本公式为:

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

式中: +号表示加载, 一号表示卸载, X_+ 和 X_- 分别代表系统在承受加载和卸载时的响应率.

对于孕震区域来说, 月球引潮力的周期性变化是连续的加载和卸载过程, 而作为响应的地球物理量很多, 其中直接携带了震源处孕震信息的中、小地震的能量 E 是很好的响应量, 其加卸载响应比的计算公式为^[4]:

$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^N E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^K E_i^m \right)_-}$$

式中: N 为加载地震的个数, K 为卸载地震的个数, 下标 i 表示各个地震. 幂次 m 可以取为 0、1/3、1/2、2/3、1, 相应的响应比依次称为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 .

大量的地震预报实践表明, 当 m 取为 1/2 (即以本尼奥夫应变能作为响应变量) 时, Y 异常 (即 Y_3) 对应地震的效果最好.

2 加卸载响应比在回顾性地震预报 (震例总结) 中的应用

2.1 基本参数的准备

中强地震过后, 人们常常对该次地震之前的加卸载响应比 Y 随时间的动态变化过程进行研究^[8-13], 探讨天然地震序列的加卸载响应比值 Y 与各个计算参数选取方式间的关系, 寻求最佳的震级序列预处理方法、分组窗长、滑动步长、每组地震个数下限的选取方式, 为响应比方法的实用性打好基础. 这种研究的参考依据是基于模拟地震序列的研究结果^[14-16]. 模拟地震序列是按照 Gutenberg-Richter 震级分布关系构造的, 然而, 天然地震序列里大小地震间的关系并不完全符合 G-R 关系^[17], 受台网监测能力和震级饱和现象的影响, $\log N = a - bM$ 关系曲线中普遍存在掉头现象, 地震发生的时间进程也不是完全服从泊松过程. 因此对天然地震序列的研究非常必要.

天然地震事件发生后, 由 P 波初动符号求得地震的震源机制解, 可得出 2 个节面 A 和 B. 根据极震区烈度线的长轴走向、地质构造、较强前震的空间展布形态 (余震序列完成之后还可参考强余震的空间分布), 确定 A 和 B 中的发震断层面和辅助面, 然后计算出滑动角 λ 的大小^[18]. 先求得 λ' :

$$\lambda' = \arcsin \frac{\cos \beta_2}{\sin \beta_1}$$

式中: β_1 为断层面倾角, β_2 为辅助面倾角. 根据震源机制解中震中区的升降及主压应力轴 P 的

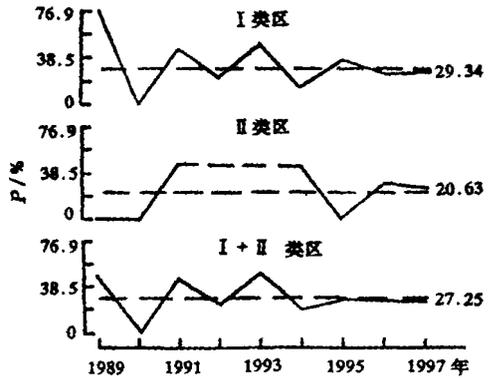


图 1 全国地震趋势会商会所提出的地震学异常对应地震的比率曲线 (据吴富春等, 2000)

Fig. 1 The ratio of seismological anomalies versus earthquakes obtained from NMSC (after Wu Fu-chun et al., 2000).

方向推知发震时的断层错动方式, 按表 1 求出上盘相对于下盘的滑动角 λ :

表 1 不同错动方式下滑动角的表达式

	右旋正断层	左旋正断层	左旋逆冲	右旋逆冲
滑动角 λ	$-180^\circ + \lambda'$	$-\lambda'$	λ'	$180^\circ - \lambda'$

震源位置、发震断层面的走向、倾角和断层的滑动角, 在三维空间中唯一地确定了断层发震时的错动方向 F 。强震孕育过程中, 引潮力不停地对断层面起着加卸载作用, 引潮力沿主震断层面滑动方向 (F) 的分量大于零时为加载, 反之为卸载。加载时发生的大、小地震都称为正地震; 卸载时发生的地震称为负地震。地震能量的平方根 \sqrt{E} 表示了一个地区地震活动性的强弱, 正地震的 \sqrt{E} 之和与负地震的 \sqrt{E} 之和相比即为加卸载响应比 Y_3 。

2.2 计算区域的选取

以微观震中为几何中心, 选取椭圆形(或长方形)区域。椭圆长轴沿断层面走向, 短轴与长轴最小取值为 $2 \times 0.4^\circ$ 与 $2 \times 0.8^\circ$, 最大取值为 $2 \times 1.0^\circ$ 与 $2 \times 2.0^\circ$ 。区域过小, 难以反映一次中强地震的孕育过程; 区域太大, 容易包括附近其它地震的孕育过程, Y 值曲线的形态会很复杂。多次试算结果显示, 对一次 5.0 ~ 5.5 级地震, 最佳计算区域为短轴 $2 \times 0.5^\circ$ 、长轴 $2 \times 1.0^\circ$; 对一次 6 级左右地震, 以 $2 \times 0.7^\circ$ 为短轴、 $2 \times 1.4^\circ$ 为长轴较适宜。

2.3 窗长与步长的选取

除首都圈以外的大部分地区台网监测能力有限, $M_L 1.0$ 以下地震漏记较多, 每 6 个月内的地震个数并不多, 所以窗长最小取为 6 个月, 滑动步长最小 1 个月。通常取 12 个月为窗长, 2 个月为滑动步长。

2.4 较小地震和较大地震的处理

天然地震序列里, M_S 震级可能小于零。由于负数不可开平方, 样本中取震级下限为 0.1。分组计算时, 每组地震个数不可能太多, 通常每组内的地震数目下限取为 25。按时间段分组计算, 如组内地震个数不足 25, 从序列里后续地震补足 25 个。

在 Y_3 的计算中, 取 $m = 1/2$, 一次较大地震 ($M_S > 4.0$) 对计算结果的影响要比一次 1.2 级以下地震大得多。王海涛^[6] 等人的研究表明, 只有当滑动窗内的地震次数在 200 次以上时, 原始地震序列出现 $Y \geq 2.0$ 的高值异常的频度才会在 6% 以下。此时序列中的震级上限不加限制, 随机出现高 Y 值的概率不大。当滑动窗内的地震个数为 20 ~ 80 时, 震级上限略加限制(该地震序列的 b 值截距法线性外推震级 M_i 减去 0.5) 或不加限制, 出现 $Y \geq 2.0$ 的高值异常频度将大于 10%。而地震预报实践中, 除余震序列外, 计算 Y 值的滑动窗内地震个数通常在 50 以下, 与 200 次相距甚远, 所以计算 Y 值之前必须对序列中的较大地震进行适当的预处理。

对较大地震的预处理有 2 种方式。设该区域可能发生的地震在 6.0 级左右, 则一种做法是剔除序列中所有 4.0 级以上地震, 另一种做法是将序列中所有 4.0 级以上地震都当作 4.0 级地震对待。后一种做法的优点在于既保留了 4.0 级以上地震所携带的部分孕震信息, 同时又使序列中的地震个数不会减少。而前一种做法不一定妥当。在某些地区, 当未来可能发生的地震达到 7.0 级以上时, 区内 4.0 级以下的正、负地震随时间变化的前兆特征不明显, 而 $M_S \geq 4.0$ 的正、负地震则表现出一个“正负地震共存 → 正地震集中时段 → 负地震的出现 → 强震发生”的演变过程^[14]。如 1995 年 1 月 17 号日本兵库南 7.2 级地震之前, 1993 年 1 月 ~ 1994 年 9 月研究区内(长轴 $2 \times 1.0^\circ$ 、短轴 $2 \times 1.0^\circ$) 4.0 级以上都为正地震, 且集中在较小的空间范围内; 震

前 4 个月(1994 年 10 月~1995 年 1 月 17 日), 研究区内开始出现负地震. 主震发生在正地震分布区的边缘. 这个实例说明, 在 7.0 级地震孕育区反映加卸载响应比异常变化的正是 4.0 级以上地震.

2.5 异常形态及临界值的确定

对中国大陆和美国加州地区的震例研究都表明, 80% 以上地震震源及附近地区的 $Y-t$ 曲线变化形态属于“上升→下降→发震”特征^[19]. 大量的地震预测实践还表明, Y_3 异常临界值为 1.5. Y_3 越大, 在临界值之上的持续时间越长, 异常信度越高.

2.6 2 次震例

选取祁连山中段的 2 次中强地震, 其基本参数见表 2.

表 2 祁连山中段两次中强地震的基本参数

发震时间	地点	震级	微观震中	断层走向	倾角	滑动角	震源深度
1990-10-20	景泰	6.2	37.12° N, 103.60° E	94°	70°	21.34°	3 km
1995-07-22	永登	5.8	36.37° N, 103.17° E	111°	87°	135.92°	10 km

图 2 为 1995 年 7 月 22 日永登 5.8 级和 1990 年 10 月 20 日景泰 6.2 级地震的加卸载响应比随时间变化曲线. 利用原始地震序列计算的结果为 a_1 、 b_1 ; 将序列中 4.0 级以上地震剔除后计算的结果为 a_2 、 b_2 ; 将序列中 4.0 级以上地震都当作 4.0 级地震计算的结果为 a_3 、 b_3 . 由于永登 5.8 级地震震中周围的椭圆形区域内 5.8 级地震之前中小地震个数较少, 所以与原始数据得到的曲线 a_1 相比, a_2 没有 a_1 平稳, 而 a_3 比 a_1 更为平稳, 显示出 a_3 的映震性能比 a_2 强. 5.8 级地震之前, a_3 曲线一直在 1 附近, 直到 1993 年曲线才出现趋势上升, 到 1994 年底异常达到极大值, 其后异常逐渐恢复, 地震发生在异常完全恢复之后.

景泰 6.2 级地震震中周围的计算区域内, 6.2 级地震之前 4.0 级以上地震较多. 3 种序列计算的结果差别明显, 修正后的新序列计算的 Y 值曲线(b_3)其稳定性明显好于用原始序列计算的结果(b_1), 并且 b_3 曲线上响应比的异常幅度比 b_2 曲线上更大.

2 次地震之前, Y_3 曲线都有明显的趋势异常, 地震均发生在异常完全恢复之后. 预示未来发生地震震级大小的是异常持续时间而非异常幅度. 相同的计算参数选取方式下, 异常持续时间越长, 其后的震级也越大.

表 3 异常持续时间与震级的关系

起始时间	峰值时间	恢复时间	异常持续时间	对应地震
1993-05	1994-11	1995-04	6 月	1995-07-22 M_s 5.8
1985-06	1986-06	1989-01	43 月	1990-10-20 M_s 6.2

3 加卸载响应比在震后趋势估计中的应用

中强地震发生之后, 需要立即回答的 2 个问题是: ①是否还有更大地震? ②假如已发生的地震是主震, 那么最大强余震如何判定? 加卸载响应比提供了一种比较有效的判定方法.

地震之后首先迅速求出已发生强震的震源机制解, 按前述方法, 求出断层错动的滑动角, 根据已发生前震的活动范围和震源机制解确定计算区域的形状、大小、

Y 随时间的动态变化曲线, Y 值变得更大,

, Y 值恢复正常 ($Y < 1.5$),

, Y 值的动态变化,

、
 ， 5.0~5.5 级左右地震；
 ， 6.0 级左右甚至更大的地震。
 ， 1996 年度甘肃省地震局的《地震趋势研究报告》中，
 ， 1996 年甘肃省天祝县及附近地区将有可能发生 5.5 级左右地震。
 ， 1996 年 6 月 1 日甘肃省天祝发生了 $M_S 5.4$ 地震，

$2 \times 0.5^\circ$ 、 $2 \times 1.0^\circ$
 $2 \times 0.7^\circ$ 、 $2 \times 1.4^\circ$

5 结论与讨论

- (1) 、
- (2) ， 4.0 级以上地震做预处理，
 4.0 级以上地震都当作
 4.0 级地震对待。
- (3) 、
- (4) 7 级强震破裂过程复杂，

陈学忠博士提供了加卸载响应比计算软件，工作过程中得到了张树勋高级工程师、许康生高级工程师的帮助，特此致谢！

[]

[1] ， ， ， . [J] . ， 1998， 20(5)： 515—520.

[2] ， ， ， . [J] . ， 2000， 22(2)： 105—109.

[3] . [J] . ， 1987， 3(1)： 1—7.

[4] ， . [J] . (B)， 1991， (5)： 512—518

[5] ， ， ， . (LURR)—— [J] . ， 1994， 37
 (6)： 767—775.

[6] . [D] . ： 1995 届毕业研究生学位论文摘要集 [C] . ：
 ， 1996.

[7] ， . —— [J] . ， 1994，
 37(5)： 633—637.

[8] ， ， . [J] . ， 1999， 13(2)： 112—119.

[9] ， ， . [J] . ， 1999， 13(3)： 193—200.

[10] ， ， ， . [J] . ， 1998， 43(10)： 1109—
 1112.

[11] . 5.5 级以上地震前后的 Y 值变化 [J] . ， 1997， 9(4)： 41—45.

[12] . 6.4 级地震前后加卸载响应比的异常变化 [J] . ， 1997， 19(4)： 47—50.

[13] ， ， ， . [J] . ， 1998， 20(1)： 29—35.

[14] . [J] . . 1996， 12(3)： 269—274.

[15] ， . Poisson 模型下的随机分布 [J] . ， 1999， 15(2)： 128—138.

[16] ， ， ， . [J] . ， 1999， 19(3)： 223—229

- [17] . *b* 值的影响[J]. , 2000, 22(4): 337—344.
- [18] Aki K, Richards P G. [M]. , . : , 1987. 116—117.
- [19] , , . [J]. , 1996 18(2): 179—186.

THE APPLICATION OF THE LOAD/ UNLOAD RESPONSE RATIO FOR TREND PREDICTION BEFORE AND AFTER THE MEDIUM-STRONG EARTHQUAKES

LI Zuo-tang^{1, 2}, HE Shao-lin², WANG Xian², LI Chun-sen²
 BA Zhi-ping², LI Qiu-hong², DONG Zong-ming², CHEN Ji-feng²
 (1. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*
 2. *Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The applications of the LURR (load/unload response ratio) to the prediction of some medium-strong earthquakes in northern Qinghai-Tibet plateau are cited as instances. Based on naturally occurring earthquake sequence, the effect of sample conditions on the results of LURR is discussed. Some matters of applying LURR to mid-short term prediction before an earthquake and to tendency analysis after an earthquake are also studied for raising its prediction corresponding ratio.

Key words: Sample conditions; Load/Unload response ratio; Earthquake prediction