

加卸载响应比 (Load/ Unload Response Ratio)、能量加速释放 (AE/ MR) 的临界区尺度及地震预测 *

尹祥础^{1), 2)} Peter Mora³⁾ 彭克银^{1), 2)} 王裕仓^{1), 2)} Dion Weatherley³⁾

1) 中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室 (LNM), 北京, 100080

2) 中国地震局分析预报中心, 北京, 100036

3) QUA KES, Department of Earth Science, The University of Queensland
Brisbane, Australia

摘要 加卸载响应比理论的主要思路是: 系统在稳定状态时加载响应与卸载响应的比值与非稳定状态时加载响应与卸载响应的比值是完全不同的。大震前加卸载响应比升高和能量加速释放这两种现象可以用来对地震进行中期预报。同时, 加卸载响应比理论和能量加速释放可能有相同的物理机制。为了验证这种地震预报方法的可行性, 我们研究了几例发生在澳大利亚与中国, $M5.0 \sim 7.9$ 之间的地震, 其中包括破坏严重的澳大利亚纽卡斯尔地震和中国的唐山地震。我们利用以震源中心一定范围内的数据计算了震前的加卸载响应比和能量加速释放的幂律拟合。能量幂律加速释放存在一组最佳的拟合, 一定范围内加卸载响应比达最大值表明加卸载响应比也有一个临界区尺度。进一步讲, 加卸载响应比与能量加速释放的临界区尺度是相似的。这些结果表明加卸载响应比与能量加速释放有相同的物理机制。进一步的研究可能会对这种物理机制提供更好的解释, 同时也能对地震的中期预报提供理论基础。

关键词 加卸载响应比 (LURR); 矩加速释放 (AMR); 能量加速释放 (AER); 临界点理论 (CPH); 地震预测; 临界区尺度

中图分类号 P315.75 **文献标识码** A

前言

根据地震的临界点理论, 地壳并不一直处于临界状态。一个地区发生大地震是由于该地区地壳内部累积的应变能突然释放, 使得地壳远离临界状态, 随着地球内部构造应力的逐步增加, 该地区的地壳又逐步趋向临界状态。在大地震发生之前, 地壳内部的能量呈幂律加速释放, 利用能量加速释放的幂律拟合可以进行地震的中期预报。

已有资料表明, 地震前能量加速释放是由于地壳内部应力场的长程相关性, 这种相关性为该地区将要发生的大地震做准备。地壳达到临界状态时, 一个非常小的扰动 (例如地球的潮汐力) 都可能引起很大的地震。地球内部的潮汐力足以诱发地震, 尤其是中等强度的地震。评价地壳是否达到临界状态的一个重要参数是加卸载响应比。

* 收稿日期: 2004-01-15

基于损伤力学的观点，地震的孕育过程就是震源区介质的变形和失稳，加卸载响应比可以定量地刻划介质的损伤演化过程。典型的加卸载响应比就是断层面上加载过程和卸载过程中 Benioff 应变的比值，加卸载响应比的急剧升高可能预示大地震的发生。

大震前加卸载响应比升高和能量加速释放使得地震的中期预报成为可能。最近，人们通过研究发现了地震震级与能量幂律加速释放临界区尺度之间的关系。这些结果表明能量加速释放的临界区尺度与地震震级之间有一定的关系，同时，我们发现加卸载响应比与地震的临界区尺寸之间也存在一种相关性。能量加速释放与加卸载响应比的物理机制是否相同？本文将根据这两种现象的临界区尺度与地震震级之间的关系来回答这个问题。

1 加卸载响应比——一种新的地震预测方法

过去的几年中，利用加卸载响应比理论对中国和其他国家的大地震进行预测取得了一系列的成功。这些结果表明，加卸载响应比的异常变化可以作为大地震发生的前兆。

利用加卸载响应比理论对日本的 3 个地区进行了研究，这 3 个地区分别为：南关东地区（34.5°~36°N；139°~141°E）、鸟取-神户地区（以 35.3°N，133.7°E 为中心，300 km 为半径的圆形区域）和东海地区（34°~35.3°N；137.5°~139°E）。这些地区加卸载响应比的变化情况分别如图 1~3 所示。对于南关东地区，1999 年的下半年到 2000 年初，加卸载响应比急剧升高，之后，在该地区发生了一系列震级大于等于 6 级的地震。图 2 为鸟取-神户地区加卸载响应比的变化情况。1995 年 1 月发生了神户地震（ $M = 7.2$ ），在这次地震发生之前，加卸载响应比出现了明显的异常升高，并且持续了两年多。1999 年下半年该地区的加卸载响应



图 1 南关东地区加卸载响应比随时间的变化

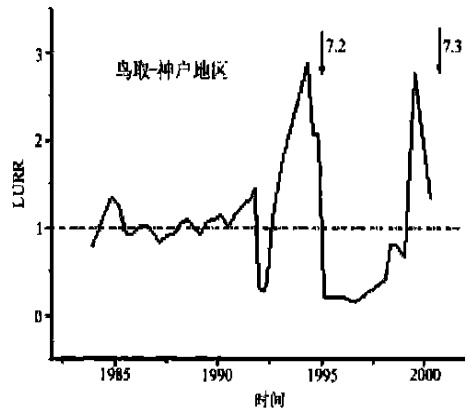


图 2 神户地震和岛取地震前夕加卸载响应比的异常

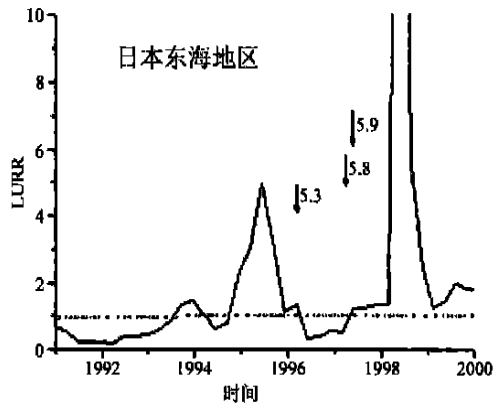


图 3 日本东海地区加卸载响应比曲线

比又出现了异常，一直到 2000 年 10 月 6 日发生了鸟取地震（ $M = 7.3$ ）。图 3 为东海地区加卸载响应比的变化曲线，1995 年 6 月，该地区的加卸载响应比明显升高，并且在高值出现后的 1—2 年内发生了一系列震级为 5~6 级的地震。1998 年 6 月，该地区的加卸

载响应比高达 23, 我们预测该地区 2001—2002 年内可能发生 6 级或 6 级以上的地震。这些结果已经向日本箱根召开的第二届 ACES 大会 (2000 年 10 月 15—20 日) 进行了提交。

应澳大利亚地震学家 David Love (澳大利亚基础产业部) 于 2000 年 12 月向我们发来的请求, 我们研究了澳大利亚南部地区的加卸载响应比和能量加速释放情况。我们选取了最佳的计算半径, 结果分别如图 4 和图 5 所示。这些结果已于 2000 年 2 月 8 日、9 日发送给 David Love, 同时我们还分析了不同地区的临界区尺度。这些结果显示, 澳大利亚南部以彼得伯勒为中心, 大约 150 km 为半径范围内的波拉-彼得伯勒地区可能会在 2001 年 3 月—2002 年 6 月发生 5.5~6 级的地震。这些结果将在其他地方详细讨论。

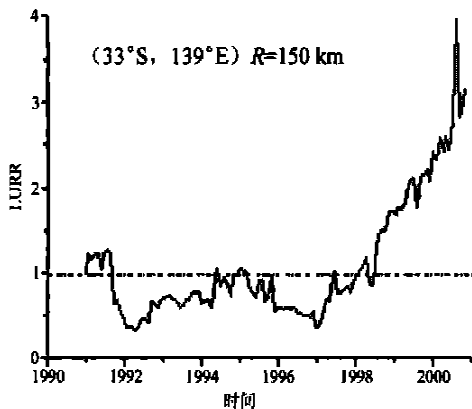


图 4 图 4 澳大利亚彼得伯勒地区加卸载响应比的变化情况 (计算时间为 1 年, 滑动时间为 1 月, 选用最佳半径内的数据进行计算)

2 加卸载响应比和能量加速释放的物理机制

下面, 我们首先计算不同地区大震前加卸载响应比的异常, 从而获得使加卸载响应比达到最高的临界区尺度, 然后与能量加速释放的临界区尺度进行比较。

首先, 我们研究了发生在中国和澳大利亚的 5 次 $M = 5.0 \sim 7.9$ 级地震前能量加速

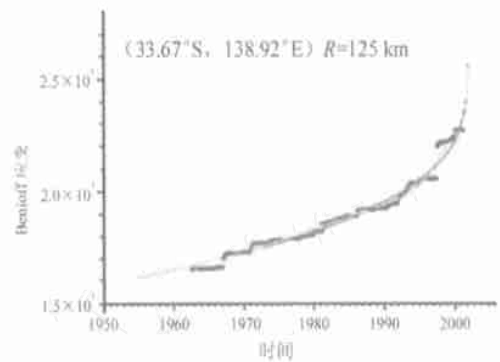


图 5 澳大利亚南部波拉为中心, 125 km 为半径的地区内考虑对数-周期性和不考虑对数-周期性的能量加速释放的幂律拟合 (波拉位于彼得伯勒南部约 80 km)。R = 125 km 使参数 C (C = 幂律拟合的方差/线性拟合方差) 的值最小, 为最佳的拟合半径。根据拟合结果, 我们预测该地区可能在 2001 年的中期发生大约 5.5 级的地震。选取不同的计算半径, 预测地震可能发生在 2001 年的中期至 2002 年的中期, 震级为 5.5~5.8

释放过程。其中包括破坏严重的 1989 年澳大利亚纽卡斯尔地震和 1976 年的中国唐山地震。对于每一次地震, 我们都计算了一定范围内加卸载响应比的异常情况与最佳的幂律拟合函数。最佳的幂律拟合函数是通过参数 C (C = 幂律拟合的方差/线性拟合方差) 来确定的, 能量加速释放的最佳拟合半径就是使 C 的取值为最小。图 6 为地震前参数 C 的变化情况, C 是半径 R 的函数。这些地震为 1997 年澳大利亚的波拉地震 ($M = 5.0$); 1989 年澳大利亚的纽卡斯尔地震 ($M = 5.7$); 1995 年中国的武定地震 ($M = 6.5$); 1990 年中国的共和地震 ($M = 7.0$); 1976 年中国的唐山地震 ($M = 7.9$)。当计算的区域尺度很小时, 所选区域内的地震数目非常少, 所以计算结果非常分散。当计算尺度很大时, 能量加速释放的幂律形式并不明显, 这时的参数 C 很大。表征上述 5 次地震临界区尺度的最佳半径分别为 125 km, 125 km, 200 km, 250 km 和 650 km。图 7 为这些地震

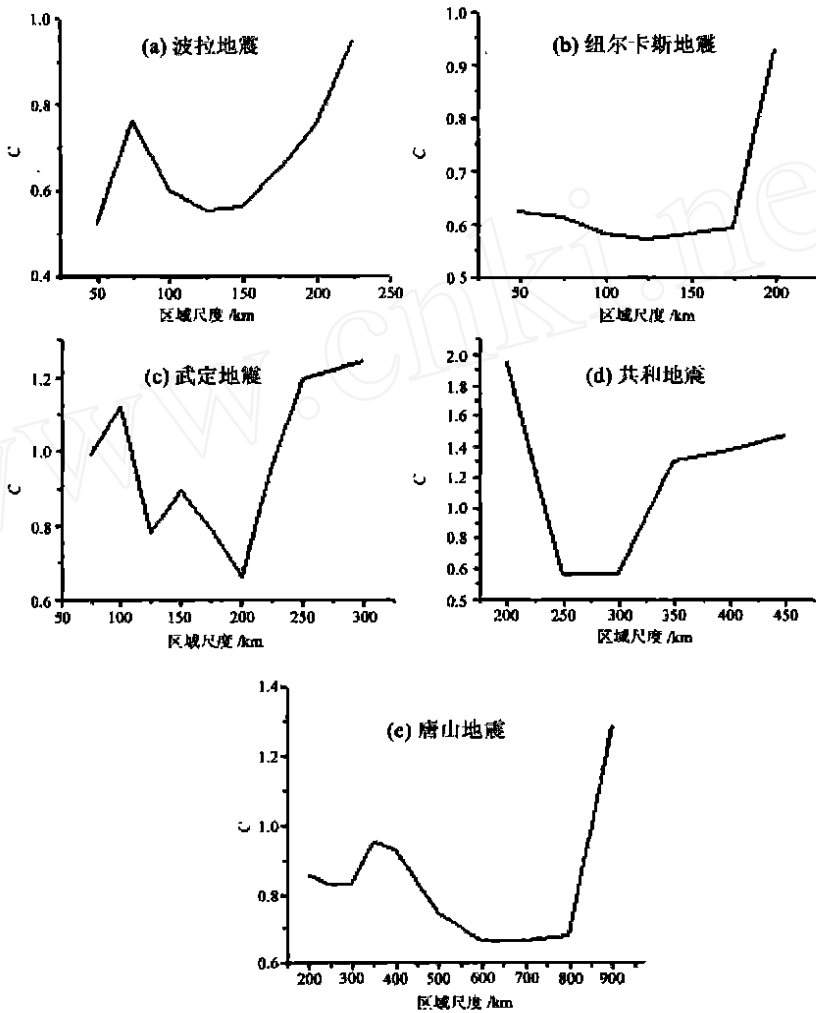


图 6 震前能量幂律加速释放的最佳拟合参数 C 与半径的关系 $C = \text{幂律拟合的方差} / \text{线性拟合的方差}$ 。(a) 1997 年, 澳大利亚波拉地震 ($M = 5.0$)。 (b) 1989 年, 澳大利亚纽卡斯尔地震 ($M = 5.7$)。 (c) 1995 年, 中国武定地震 ($M = 6.5$)。 (d) 1990 年, 中国共和地震 ($M = 7.0$)。 (e) 1976 年, 中国唐山地震 ($M = 7.9$)

临界区内能量加速释放过程幂律拟合情况。

为了计算加卸载响应比的临界区尺度, 也就是使加卸载响应比值最高的最佳半径, 我们计算了发生在澳大利亚和中国五次相同地震前的加卸载响应比。每个震例的计算时间都是 1 年。图 8 是加卸载响应比的最大值与半径之间的关系曲线, 图中对应的震级分别为 $M = 5.0, 5.7, 6.5, 7.0, 9.0$, 最佳半径分别为 $R = 75 \text{ km}, 100 \text{ km}, 200 \text{ km}, 300 \text{ km}, 600 \text{ km}$ 。这些结果表明加卸载响应比的

临界区尺度与震级之间存在明显的相关性。

图 9 是利用加卸载响应比临界区内数据计算的震前加卸载响应比随时间的变化曲线。加卸载响应比的高值出现在震前几个月或者几年。利用该方法我们也做了一些地震的中期预报, 例如 1995 年发生在中国武定的 6.5 级地震, 1990 年发生在中国共和的 7.0 级地震 (中文报告, 未公开发表)。

能量加速释放和加卸载响应比都表明: 临界区尺度与震级有关。图10为能量加速

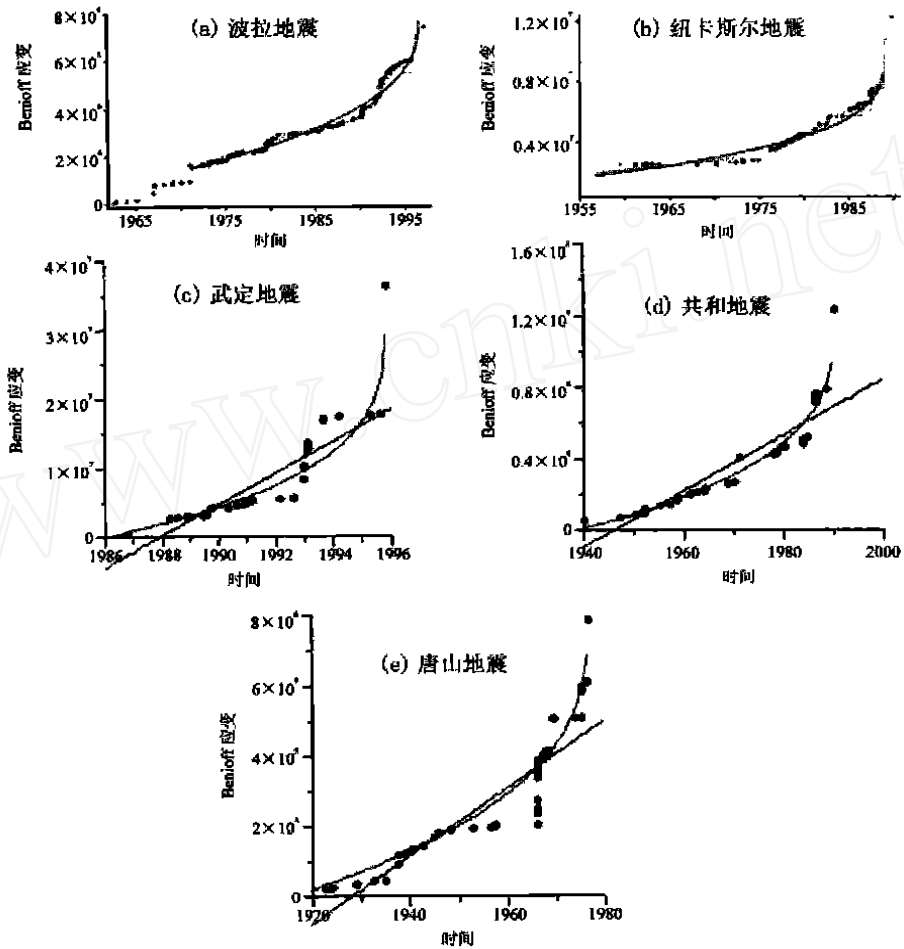


图7 使图6中拟合参数 C 最小的最佳幂律拟合。(a)、(b) 幂律拟合与对数拟合。(c)、(d)、(e) 幂律拟合与线性拟合

释放的临界区尺度与加卸载响应比的临界区尺度之间的关系。能量加速释放的临界区尺度与加卸载响应比的临界区尺度强烈相关,说明这两种现象之间存在相同的物理机制。最近的数值模拟也表明震前能量加速释放和应力演化的相关性与地震的临界点理论是一致的。如果这样的话,加卸载响应比就可以刻划震前地壳岩石的临界敏感性问题。利用图10的结论,根据能量加速释放和加卸载响应比的临界区尺度与地震强度之间的关系可以估算未来地震的震级。

3 结论

根据临界点理论,大地震的发生使地壳

偏离临界状态,构造应力的变化使得地壳又重新回到临界状态。地壳在达到临界状态之前会出现一些现象:

- (1) 中等强度地震的活动性增强;
- (2) 能量呈幂律形式加速释放;
- (3) 应力场长程相关性的建立;
- (4) 临界敏感性;
- (5) 潮汐力明显诱发地震;
- (6) 加卸载响应比升高。

从细观力学的角度来看,非均匀介质构成的材料在接近临界点(断裂)时,材料内部微裂纹的数目和长度都会增加,微裂纹之间的相互影响也会增强,这时系统会变得非常敏感,外界非常小的扰动都会引起很大的

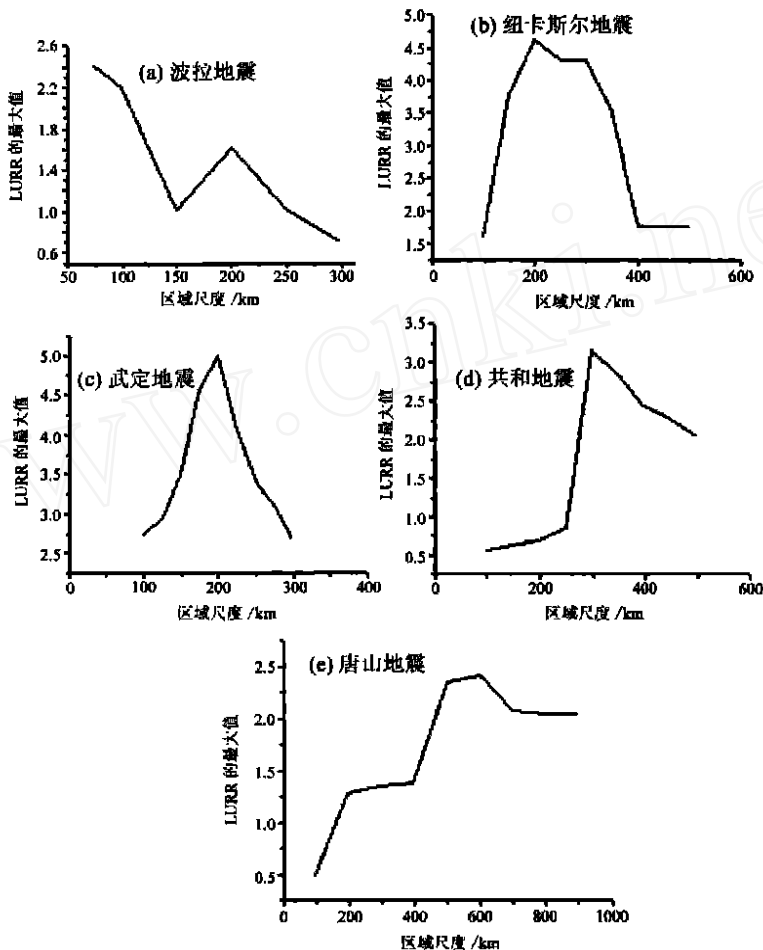


图 8 加卸载响应比的最大值与半径的关系。(a) 1997 年, 澳大利亚波拉地震 ($M = 5.0$)。 (b) 1989 年, 澳大利亚纽卡斯尔地震 ($M = 5.7$)。 (c) 1995 年, 中国武定地震 ($M = 6.5$)。 (d) 1990 年, 中国共和地震 ($M = 7.0$)。 (e) 1976 年, 中国唐山地震 ($M = 7.9$)

响应。这样就可以很容易地理解上面提到的现象, 这些现象可以分成两组, 第 1 组 (前 3 种现象) 与材料内部较大裂纹 (中等强度事件) 的出现有关, 第 2 组 (后 3 种现象) 与系统的敏感性有关, 是第 1 种现象的结果, 也就是说微裂纹之间的相互作用增强时, 系统的敏感性也随之增强。总而言之, 上面提到的基于临界点模型的现象都有相同的物理机制。

根据对上述 5 次地震的分析, 我们得到一些初步结论: 所讨论的地震前都出现了能量的加速释放和加卸载响应比的异常升高。结论还表明, 能量加速释放和加卸载响应比

都有临界区尺度, 而且临界区尺度都与主震的震级有关, 这表明能量加速释放和加卸载响应比有相同的物理机制, 这个物理机制都是基于临界点理论的。进一步的研究可能会对这种机制提供更好的解释, 同时也能对地震的中期预报提供理论基础。

致谢

感谢日本气象局的 Kohji Hosono 为我们提供了日本的地震数据; 澳大利亚地调所和 Kevin Mccue 为我们提供了澳大利亚的地震目录; Russell Cuthbertson 进行地震数据的整理; 澳大利亚南方基础产业部的 David Love

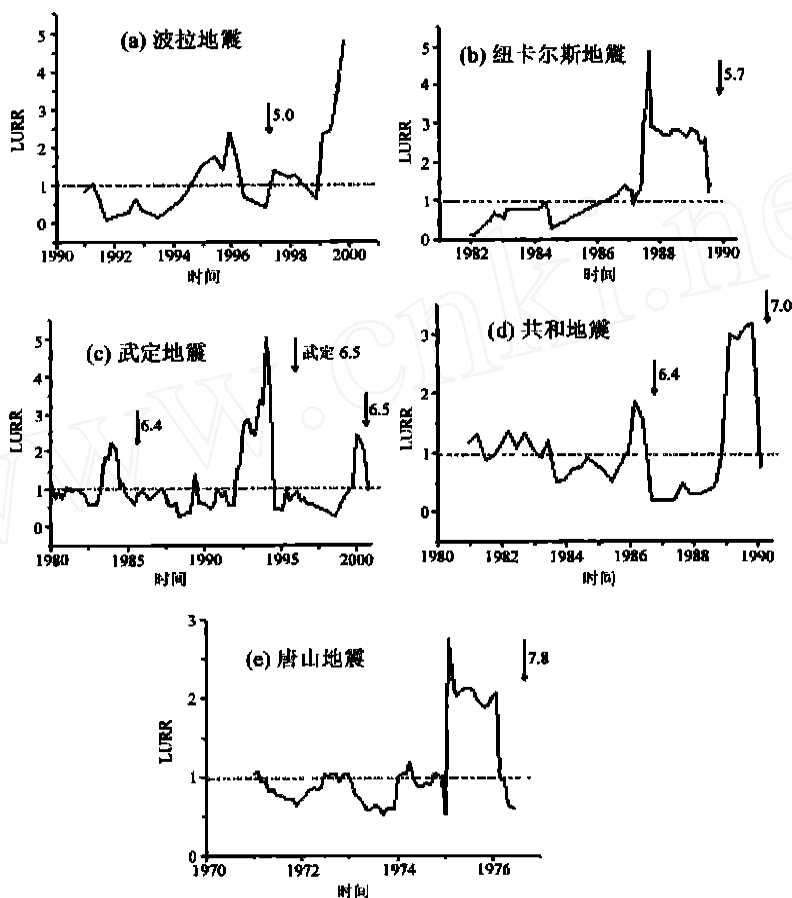


图 9 临界区内加卸载响应比随时间的变化曲线 (临界区尺度是根据图 8 确定的)。(a) ~ (e) 的临界区尺度分别为: 75 km, 100 km, 200 km, 300 km, 600 km, 计算时间均为一年

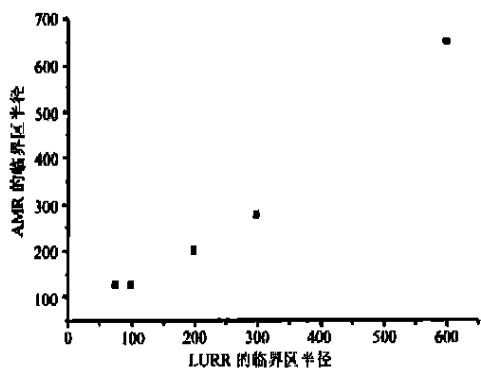


图 10 能量加速释放的临界区半径与加卸载响应比的临界区半径之间的关系

为我们提供了澳大利亚南部的地震目录。本工作受中国国家自然科学基金 (No. 19732060, No. 40004002)、中国科学院非线性力学国家重点实验室、中国地震局分

析预报中心、ARC IREX ACES 国际项目、澳大利亚昆士兰大学和澳大利亚研究委员会的资助。

(作者和译者电子信箱, 尹祥础: xcyin @public. bta. net. cn; 张 晖 辉: zhanghh @Inm. imech. ac. cn)

(译自: Pure and Applied Geophysics, 2002, Vol. 159: 2 511-2 523。翻译: 张晖辉; 校对: 尹祥础)