

美国加州地区地震前加卸载响应比的时空演化特征及预测意义*

宋治平¹⁾ 尹祥础^{2, 3)} 王裕仓³⁾ 徐平¹⁾ 薛艳²⁾

1) 中国北京 100080 北京市地震局

2) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

3) 中国北京 100080 中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室(LNM)

摘要 对美国加州地区 1976~1994 年 6 级以上强震的加卸载响应比的时空演化过程进行了系统分析, 指出该地区强震前响应比在震前 3~4 年开始大范围出现与该地区的区域构造走向一致的高 γ 区, 高 γ 区以每年数十公里的速率向震中附近地区收缩。震中附近地区的响应比异常主要呈“升—降”型特征, 多数地震在震前 1 年内响应比才升高, 并且上升曲线较陡。该区内正地震一般形成丛集区, 主震发生在正地震丛集区内或边缘。在分析美国加州地区地震与中国大陆地区地震特征异同的基础上, 讨论了如何应用响应比的时空演变特征, 对美国加州地区强地震三要素(地点、时间、强度)的中期预测进行估计的步骤与方法。

关键词 美国加州地区 加卸载响应比 预测方法

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A

引言

加卸载响应比(LURR)理论的提出已有 10 年左右(尹祥础, 尹灿, 1991)。在理论方面, 由理论分析发展到岩石实验、数值模拟的深入研究(施行觉等, 1994; 王裕仓等, 1999); 在加卸载响应比的异常特征方面, 由固定区域的响应比随时间的变化(尹祥础等, 1994; Yin *et al.*, 1995)发展到响应比的时、空演化过程研究, 提出了应用响应比定量估计地震三要素的方法(宋治平等, 1996); 并将该方法应用于日本关东地区强地震及阪神大地震研究(王裕仓等, 1998)。为了研究加卸载响应比理论是否适用于构造环境与中国大陆有较大差异的美国加州地区, 本文对美国加州地区 1976~1994 年 6 级以上地震响应比的时空演化过程进行系统分析, 讨论其与中国大陆地区异常特征的异同。

1 资料及处理方法

运用 LURR 理论的关键在于两方面: 一是如何计算或判别加卸载? 二是采用什么地球物理参量作为响应? 由于日、月引潮力使地球内各处的应力不断地变化, 不停地对地球进

* 国家自然科学基金(19732006)和北京市自然科学基金(8992008)共同资助
2000-03-13 收到初稿, 2000-06-12 收到修改稿, 2000-06-29 决定采用

行加载与卸载 为此计算出地球内(尤其是地壳内)某一点在任一时刻由引潮力引起的应力张量, 根据库仑准则判别该点处于加载或卸载状态(尹祥础等, 1994). 以地震波能量作为响应时, 定义加卸载响应比 Y 为(尹祥础, 尹灿, 1991; Yin *et al.*, 1995)

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

式中, E 为地震波能量, “+”和“-”分别代表加载和卸载, 将加载期间发生的地震称之为“正地震”, 反之称为“负地震”(李洁, 尹祥础, 1993); N_+ 和 N_- 分别为规定时间窗内正地震数与负地震数 m 是一个 0~ 1 之间的常数, $m = 1$ 时, E^m 是该次地震波能量; $m = 1/2$ 时, E^m 为应变; $m = 1/3$ 及 $2/3$ 时, E^m 分别代表震源体的线尺度和面尺度; $m = 0$ 时, Y 表示正地震总数与负地震总数之比 据LURR 的 45°N 计算经验表明, $m = 1/2$ 时效果最佳, 故本文取 $m = 1/2$ 时的 E 作为响应, 分析美国加州的震例

采用美国加州地区 1976~ 1994 年 0 级以上地震目录 其中, 6 级以上地震 12 次(图 1), 而满足计算响应比条件的地震只有 9 次(图中黑圆点). 这 9 次地震的具体参数见表 1. 将加州地区分为 1×1 的若干小区, 根据区内震源机制解确定出每一个小区内主要断层参数, 再对该区进行日月引潮力计算, 判断地震发生在加载期间或卸载期间, 即可确定出地震的正负 由加卸载响应比的自然概率可知, 样本数超过 20, Y 2.0 就已包含丰富的孕震信息(陈棋福等, 1996). 因此, 对于 6 级以上地震, 一般取 $8 \times 8^\circ$ 的区域为研究区 计算 Y 的空间分布特征时, 取 1×1 的空间窗, 0.2 为滑动步长 为满足地震样本数 20 的要求, 如果时间窗短, 则加大空间窗; 反之, 如果时间窗长, 则缩小空间窗

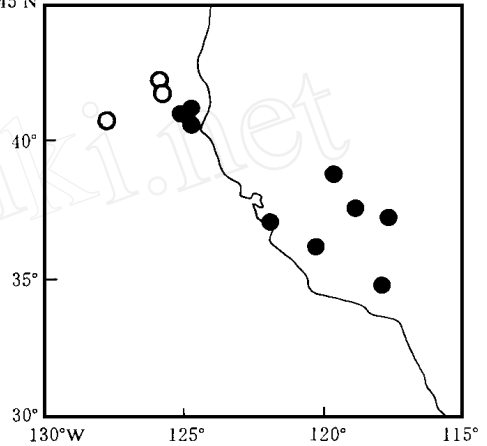


图 1 美国加州地区 1976~ 1994 年 6 级以上地震分布 黑圆点表示本文研究的地震, 圆圈表示由于资料不足而未研究的地震

表 1 美国加州地区 6 级以上地震前 Y 值异常特征量

序号	地震基本参数				Y 高值区分布走向	Y 高值区出现时间 /a	Y 高值区收缩特征	收缩视速 / $\text{km} \cdot \text{a}^{-1}$	震中位于收缩区部位	时间预测偏差 /a	收缩区 $Y-t$ 曲线特征	“正负主震”特征	负地震距主震时间 /月
	年-月-日	ϕ	λ_w	M									
1	1980-11-08	41 08	124 44	6 6	NW	4	存在	54	区内	0.20	升—降	明显	8
2	1981-05-26	40 55	124 59	7.0	NW	2	存在	56	区内	0.30	升—降	明显	2
3	1981-09-30	37 35	118 52	6.0	NW	4	存在	88	区内	0.16	升—降	明显	2
4	1983-05-02	36 13	120 19	6.1	NW, NNE	3	存在	64	区内	0.71	升—降	明显	4
5	1989-10-18	37 02	121 52	6.9	NW, NE	3	存在	106	区内	0.03	升—降	明显	2
6	1990-02-28	34 05	118 00	6.3	NW, NNE	3	存在	93	区内	0.08	升—降	不明显	
7	1992-04-26	40 22	124 34	6.0	NW	3.5	存在	73	区内	0.10	升—降	不明显	
8	1993-05-17	37 10	117 46	6.2	NW	3.5	存在	86	区内	0.20	升—降	不明显	
9	1994-01-17	34 12	118 32	6.7	NW, NE	4	存在	79	区内	0.27	上升	明显	0.5

2 1980 年 11 月 8 日 6.6 级地震前响应比的时空演化

2.1 震前响应比的空间演化

以 1980 年 11 月 8 日 6.6 级地震为例, 分析强震前的响应比的时空过程. 在求出 Y 的空间场的基础上, 作出 $Y = 2.0$ 的空间等值线图和相应的立体图(图 2), 从而可研究 Y 的时空演变过程. 可见, 震前 4 年左右就存在多个高 Y 区, 高 Y 区沿圣安德烈斯断层的走向呈条带分布. 地震前不同时间的 Y 空间图象是变化的, 早期大面积出现高 Y 区, 高 Y 区分布范围随时间沿圣安德烈斯断层收缩到震中区附近. 震前半年, 整个研究区只出现两个高值异常区, 主震就发生在异常值最大的一个区边缘.

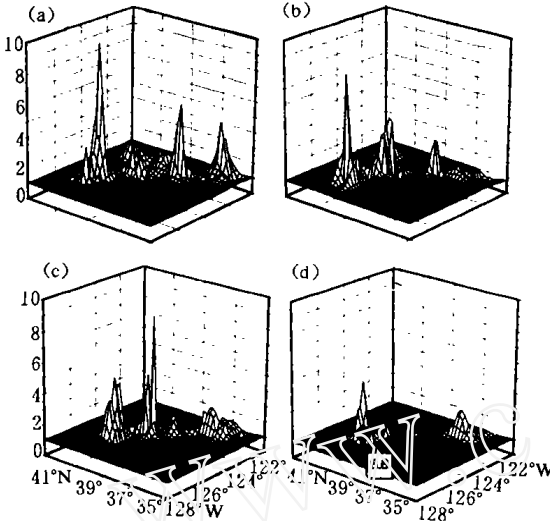


图 2 1980 年 11 月 8 日 6.6 级地震前不同时段响应比立体图

- (a) 1976-11-08~1978-11-07; (b) 1977-11-08~1979-11-07;
(c) 1978-11-08~1980-11-07; (d) 1979-04-01~1980-11-07

前高 Y 区收缩视速率为 54 km/a

2.3 震源及附近地区正负地震的演变过程

取震源及附近地区 ($40^{\circ} \sim 42^{\circ} \text{N}$, $126^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{W}$) 作为研究区, 图 3a 给出了该区加卸载响应比随时间的变化. 它显示了在 1978 年年初至 1979 年上半年, Y 值保持在 1 附近; 1979 年下半年至 1980 年上半年, Y 值出现异常; 而在震前半年左右恢复正常. 3 级以上正负地震随时间的变化表明(图 3b), 正、负地震表现出一个“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. 通过对震前不同时段的正、负地震空间分布研究, 表明在 1979 年 4 月~1980 年 3 月, 研究区内 2.5 级以上地震都为正地震, 且集中在较小的范围内(图 3c 中虚线区); 震前 7 个月研究区内主要发生负地震. 最后主震发生在正地震集中区的内边缘(图 3d).

3 加州地区 6 级以上地震前响应比异常的时空特征

下面从响应比空间特征、高 Y 区收缩视速率和收缩区内 Y 的演变过程等几方面分析加州地区 6 级以上地震前的特征(宋治平, 1996).

3.1 高 Y 区的分布特征

由表 1 可见, 9 次地震在震前 3~4 年开始大范围出现高 Y 区, 这些高 Y 区的分布走向

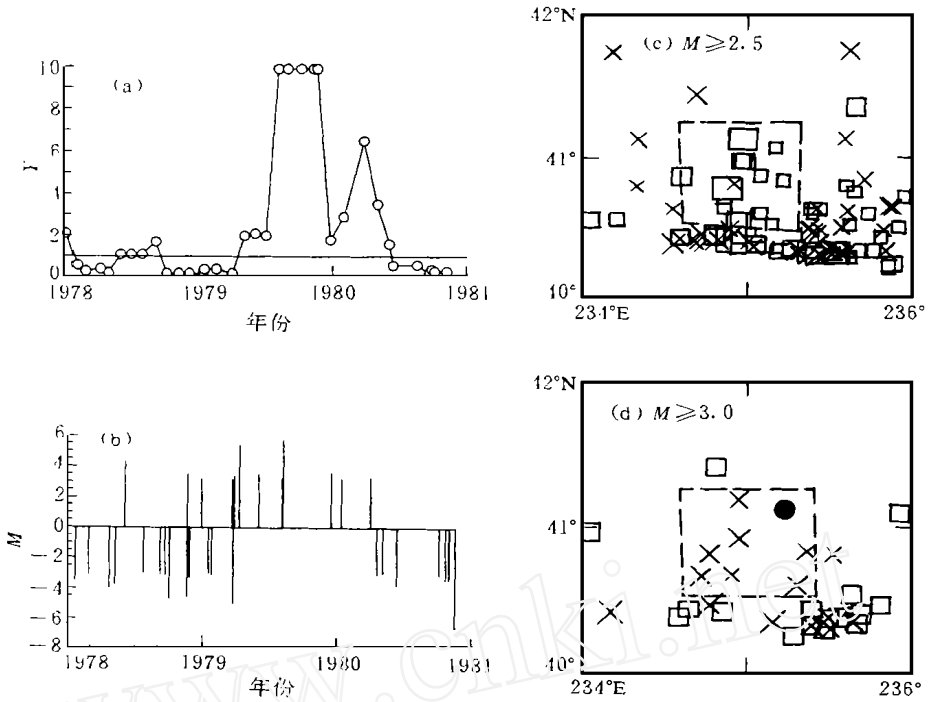


图 3 美国加州地区 1980 年 11 月 8 日 6.6 级地震震源及附近区响应比异常特征
 表示主震, 表示正地震, x 表示负地震; (a) $Y-t$ 曲线; (b) 正负地震 $M-t$ 图;
 (c) 1979 年 4 月~ 1980 年 3 月正负地震分布图; (d) 1980 年 4 月~ 11 月正负地震分布图

主要为 NW 向。这一特点可能受该地区的区域构造圣安德烈斯断层的控制, 使高 Y 区呈条带分布

3.2 高 Y 区收缩的视速率

对地震前高 Y 区迁移速率进行了系统研究, 分析加州地区 9 次地震前高 Y 区收缩的视运动方程, 该方程的斜率即为收缩视速率(宋治平, 1996)。将每次地震前高 Y 区的收缩速率列入表 1, 可见, 大部分地震的收缩视速率小于 100 km/a

3.3 震源区 Y 的时间变化特征

由震源附近地区的 $Y-t$ 曲线(图 4 和图 3a)表明: 加州地区 9 次 6 级以上地震前均出现响应比异常; 8 次地震前在 Y 升高再降低后才发震, 属于“升—降”型特征(表 1), 只有 1 次地震在上升过程中发震; 多数地震(9 次中有 7 次)前 1 年内响应比才升高, 并且上升曲线较陡

3.4 正地震丛集区与主震震中关系

根据每次强震震源附近地区正负地震分布表明, 震源附近地区的正负地震的演变过程表现为正负地震共存之后, 正地震一般形成丛集区, 主震位于正地震丛集区内或边缘(宋治平, 1996)。

3.5 正、负地震的演变过程

研究了 9 次强震前震中附近的正地震集中区内的正、负地震的演化过程, 表明在 6 次地震前正负地震的演变出现“正负地震共存—正地震—负地震出现—主震”特征, 而有 3 次

地震前该特征并不明显(表 1).

3.6 负地震开始出现的时间

表 1 给出了收缩区内正地震丛集后第一次负地震发生距主震的时间 表明负地震平均在震前 4 个月出现, 最长的也在 1 年之内

综上所述, 美国加州 9 次强震前响应比的时空异常表明, 在震前 3~ 4 年开始大范围出现与该地区的区域构造走向一致的高 γ 区; 高 γ 区以每年数十公里的速率向震中附近地区收缩 而震中附近地区的响应比异常主要呈“升—降”型特征, 多数地震在震前 1 年内 γ 才升高, 并且上升曲线较陡 该区内正地震一般形成丛集区, 主震发生于正地震丛集区内或边缘

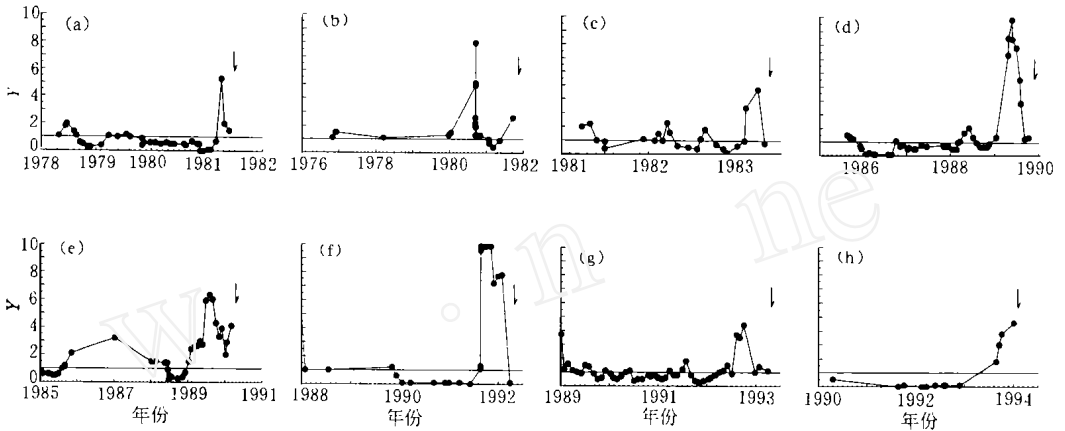


图 4 美国加州地区地震前震源及附近区的 γ 随时间的变化

- (a) 1981-05-26, $M = 7.0$; (b) 1981-09-30, $M = 6.0$; (c) 1983-05-02, $M = 6.1$; (d) 1989-10-18, $M = 6.9$;
(e) 1990-02-28, $M = 6.3$; (f) 1992-04-26, $M = 6.0$; (g) 1993-05-17, $M = 6.2$; (h) 1994-01-17, $M = 6.7$

4 美国加州地区与中国大陆地震前响应比异常的分析

将本研究分析的加州地区响应比异常与中国大陆地区的结果(宋治平等, 1996)进行对比分析, 两个地区地震的响应比异常表现出如下共性特征: 强地震前几年存在许多高 γ 区, 这些高 γ 区向震中附近地区收缩, 并在震中附近地区形成明显的正地震集中和响应比异常

同时也表现出各自的特性:

- (1) 美国加州地区地震前出现的高 γ 区主要表现为条带分布, 而中国大陆地震前的高 γ 区一般在震中周围地区形成一个区域
- (2) 加州地区地震前高 γ 区主要沿区域构造方向(北西向的圣安德烈斯大断层)向震中附近地区收缩; 而中国大陆地区, 高 γ 区从四周向震中附近地区收缩形成会聚特征
- (3) 加州地区地震前高 γ 区收缩速率一般低于 100 km/a , 而中国大陆地震的收缩速率一般高于 100 km/a

(4) 加州地区震中附近地区的响应比异常出现时间较晚, γ 上升曲线较陡, 主要表现为“升—降”型特征; 而中国大陆地区, γ 异常时间较早一些, 其形态复杂, 有“上升”型和

“升—降”型和“波动”型等

由于美国加州与中国大陆两个地区的孕震环境存在差异, 因此响应比异常表现出差异。美国加州地区的地震是沿长条形线性均质断裂带作剪切运动, 孕震环境除断裂带外, 介质较均匀, 而中国大陆地震发生于大规模的复合大陆构造和高压状态, 整个孕震环境的介质非常不均匀。王裕仓等(1999)基于非均匀各向异性材料的宏观损伤破坏理论, 应用数值模拟研究固体材料在损伤破坏时的加卸载响应比, 发现材料越是不均匀, LURR 值开始上升得越早, 且越缓慢; 而材料越均匀, LURR 值上升得越晚, 只有在临近整体破坏时, 才开始上升, 且很陡。可见, 加州地区地震前震中附近地区的响应比异常出现较晚, γ 曲线上上升较陡等特点是由于其孕震环境介质的均匀程度所致。

5 美国加州地区地震响应比异常特征的预测意义

根据高 γ 区的收缩特征, 对研究震例进行回顾性检验(宋治平, 1996)。取高 γ 区收缩方程中 t 的偏差定义为时间偏差。对加州地区地震的研究表明, 时间的偏差最长为 0.7 年(见表 1), 小于 0.3 年的占 89%。说明运用高 γ 区的收缩性对时间预测是可行的。震中一般在收缩区内, 说明根据高 γ 区的收缩方向确定的收缩区可对未来地震的地点给出估计。根据以上分析, 初步给出了适合于该地区强地震三要素的预测步骤与方法。

5.1 发震地点的预测

根据大范围 $\gamma \geq 0$ 的等值线图, 找出高 γ 区聚集的区域, 这可能是孕震区(一级预测区)。沿区域构造对高 γ 区收缩的方向进行追踪。由其迁移方向可确定出高 γ 区的收缩区, 相当于近源区(二级区); 再由正、负地震分布确定出正地震丛集区, 结合高 γ 区迁移方程中的距离 d 的偏差确定出三级区, 它就是未来地震发震可能性最大的区域。

5.2 发震时间的确定

由高 γ 区的迁移方程估计地震的发生时间, 这种方法适于 1 年尺度的中期预测。若高 γ 区收缩区内正地震集中后再出现负地震, 则可判断地震的孕育进入半年尺度的短期预测。

5.3 震级的估计

根据加州地区强震前高 γ 区外包线所围面积的特征长度 L (km) 与震级 M 的经验关系式(宋治平等, 1996)

$$L = -175 + 95M \quad (\text{震级偏差: } 0.26; \text{ 相关系数: } 0.80)$$

由一级区面积求出其特征长度, 由上式可对未来地震震级进行估计。

6 结语

研究表明, 美国加州地区强震前响应比在震前 3~4 年开始大范围出现一些条带分布的高 γ 区, 并以每年数十公里的速率向震中附近地区收缩。而震源附近地区的响应比异常主要呈“升—降”型特征, 多数地震在震前 1 年内响应比才升高, 并且上升曲线较陡。该区内正地震一般形成丛集区, 主震发生于正地震丛集区内或边缘。这些特征与中国大陆地震的结果存在一些差异。分析表明, 孕震环境介质的均匀性可能是形成这些差异的原因之一。通过对研究震例的回顾性检验, 提出了应用加卸载响应比方法预测美国加州地区强地

震的预测思路

当然, 在计算响应比时, 断层参数的选取、资料的下限、样本数的确定以及不同地区响应比异常差异的机理等问题都有待进一步深入研究

感谢美国地质调查局 E. A. Bergman 博士和美国南加州大学 K. Aki 教授在资料方面给予的帮助

参 考 文 献

- 陈棋福, 尹祥础, 马丽 1996 加卸载响应比的自然概率[J]. 中国地震, 12(3): 269~ 274
- 李洁, 尹祥础 1993 正、负地震震中分布图及其在响应比理论中的应用[J]. 中国地震, 9(3): 270~ 273
- 施行觉, 陈学忠, 许和明, 等 1994 模拟引潮力作用下的岩石破裂特征——加卸载响应比理论的实验研究之一[J]. 地球物理学报, 37(5): 633~ 638
- 宋治平, 尹祥础, 陈学忠 1996 加卸载响应比 γ 的时空演变特征及其对地震三要素的预测意义[J]. 地震学报, 18(2): 179~ 186
- 宋治平 1996 加卸载响应比与其它地震前兆时空演化研究及其应用[D]: [学位论文]. 国家地震局地球物理研究所 1~ 112
- 王裕仓, 宋治平, 细野耕司, 等 1998 日本兵库县南部地震和关东地区强震前正负地震的演变特征及其对地震预测的意义[J]. 地震学报, 20(1): 29~ 35
- 王裕仓, 尹祥础, 彭克银, 等 1999 加卸载响应比的数值模拟[J]. 地球物理学报, 42(5): 669~ 676
- 尹祥础, 尹灿 1991 非线性系统的失稳前兆与地震预测[J]. 中国科学(B), 34(5): 512~ 518
- 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等 1994 加卸载响应比理论(LURR)——一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报, 37(6): 767~ 775
- Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping, et al 1995 A new approach to earthquake prediction: bad/unbad response ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, 145(3/4): 701~ 715

THE TEMPO-SPATIAL EVOLUTION CHARACTERISTICS OF THE LOAD/UNLOAD RESPONSE RATIO BEFORE STRONG EARTHQUAKES IN CALIFORNIA OF AMERICA AND ITS PREDICTING IMPLICATIONS

Song Zhiping¹⁾ Yin Xiangchu²⁾ Wang Yucang³⁾ Xu Ping¹⁾ Xue Yan²⁾

1) Beijing Seismological Bureau, 100080, China

2) Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing, 100036, China

3) LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080, China

Abstract In this paper, the tempo-spatial evolution characteristics of the load/unload response ratio (namely LURR or γ value) before strong earthquakes with magnitude over $M = 6$ during 1976~ 1994 in California of America are studied in detail. The results show that there appear some high- γ -regions cohering with the regional tectonic trend in a great area 3~ 4 years before strong earthquakes and these high- γ regions migrate from the periphery to the epicenter region at a speed of tens kilometers per year. The LURR anomalies near the epicenter region

characterizes a type of “ascend descend” and appear and increase steeply until one year or less before most strong earthquakes. Positive earthquakes form usually a concentration area; in and near which the main shock occurs. We have analyzed the different and the same characters of earthquakes between California of American and the Chinese Mainland. Basing on these results, we discuss the approach and method how to predict and estimate the three parameters (place, time and magnitude) of a strong earthquake in California of American by applying the characteristics of the LURR.

Key words: California of American; the bad/unbad response ratio (LURR); prediction method

www.cnki.net