

# 中国大陆活动断裂的段破裂 地震复发行为<sup>\*</sup>

闻学泽

(中国成都 610041 四川省地震局)

**摘要** 为了考察中国大陆活动断裂带段破裂地震的复发行为, 根据多轮回复发的地震资料定量分析了 19 个断裂段的地震历史。结果表明: 这些断裂段的地震原地复发主要表现出: ① 良好的准周期行为(约占 9/19); ② 时间可预报行为(约占 12/19)。第 1 种行为的复发间隔内在不确定性为平均间隔的 0.15~0.40, 不同轮回事件的震级在平均震级 ±0.5 级之内变化。第 2 种行为的复发间隔内在不确定性大多为平均间隔的 0.19~0.40, 相继轮回事件的最大震级差可达 1.7 级。另外, 少数情况下第 1 种行为可与第 2 种或者滑动可预报行为共存。

**关键词** 活动断裂 段破裂地震 复发行为 中国大陆

## 引言

特定活动断裂段上发生的强震或大地震亦称段破裂地震, 这类地震在原地重复发生。现有的地震原地复发理论模式是基于板缘特征地震的有限资料提出的, 主要有: 时间可预报模式和滑动可预报模式(Shimazaki, Nakada, 1980)、准周期模式(Bakun, McEvilly, 1984; Savage, Cockerham, 1986)和时间-震级可预报模式(Papazachos, 1992)。这些模式均以“弹性回跳理论”(Reid, 1911)作为基本物理假定, 即假定一个断裂段在一次大地震时所释放的应变, 需要经过一定的时间才能恢复, 以复发下一次大地震。

在中国大陆的板内环境, 活动断裂的段破裂地震复发究竟具有怎样的行为特征, 对这一问题的较好回答将有助于发展断裂分段的长期地震危险性评估模型。本研究试图初步揭示中国大陆活动断裂的段破裂地震复发行为及其普适性。这里的“段破裂地震”是广义的, 包括了断裂(段)上伴有或不伴有地表破裂的大地震和中强地震。

## 1 资料与方法

### 1.1 地震资料

中国大陆地处板内构造环境, 大地震的原地复发间隔往往长达数百~数千年。因此, 尽管许多地区有 2~3 千年的地震记载, 但能用于分析段破裂地震复发行为、多轮回的地震资料是有限的。笔者系统收集了具有完整记载或记录、至少已原地复发 3 次地震的资料,

\* 地震科学联合基金会资助项目(95-07-423)。

1999-01-04 收到初稿, 1999-04-29 收到修改稿并决定采用。

根据每次的震害文字描述判定相应的发震断裂段。同时，对这些资料作了如下处理：

(1) 对大多数仪器记录前的历史地震，其震级取自《中国历史强震目录》(国家地震局震害防御司，1995)，仅在±0.05 级范围内作调整。对少数历史地震的震级确定，参考了《中国历史地震图集》(国家地震局地球物理研究所，复旦大学历史地理研究所，1990a, b, c) 给出的震级和相应的震害记述，在±1/4 级内作调整。对极少数上述目录中只给出了下限震级的地震，则通过分析，经验性地确定不大于已给下限震级 0.5 级的震级。

(2) 将在时间上集中发生的地震视为“丛事件”，将组成一“丛事件”的各次地震及其前震和余震视为“子事件”。由各子事件的能量相叠加，估计出“事件震级”

$$M = \frac{\lg \Sigma E - 4.8}{1.5} \quad (1)$$

式中， $\Sigma E$  是各子事件的能量和。 $E$  与面波震级  $M_s$  的关系为  $E = 10^{4.8} + 1.5M_s$ ，单位是 J。

(3) 将“丛事件”的时间定在最大主震或第 1 次主震的发生日期。

## 1.2 地震复发行为判别方法

### 1.2.1 时间-强度不相关行为的判别

一个简单的无量纲可用于判别地震复发是具有准周期性、成丛性还是完全随机性。该无量纲即复发间隔的变异系数  $\sigma$ ，它是不同轮回复发间隔的标准差  $S$  与平均值  $T_{av}$  之比

$$\sigma = \frac{S}{T_{av}} \quad (2)$$

方差的无偏估计为

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{av})^2 / n$$

其中， $T_i$  是事件之间的间隔， $n$  是样本数。研究表明：当  $\sigma < 1$  时，复发是准周期行为；当  $\sigma > 1$  时，复发为丛集特征；而当  $\sigma = 1$  时，复发是完全随机的泊松过程(Kagan, Jackson, 1991)。然而， $\sigma < 1$  并不意味着准周期就是“最佳的”(具有最小不确定性的)复发行为。只有当  $\sigma << 1$  时(良好准周期行为)，事件的序次  $i$  与其发生年代  $t$  的关系才明显地呈线性(Bakun, McEvilly, 1984)。

### 1.2.2 强度-时间相关行为的判别

如果复发具有时间可预报行为，则任意两相继事件的时间间隔  $T$  与其中前一次事件的强度呈正比(Shimazaki, Nakata, 1980; Papazhacos, 1989)。根据这一特点，本研究对具有至少 4 次复发事件的断裂段分别建立如下形式的回归方程：

$$\ln T = a + bM_p + \epsilon \quad (3)$$

其中， $M_p$  是前一次事件的震级， $\ln T$  是  $T$  的自然对数， $a$  和  $b$  为回归系数， $\epsilon$  是随机项。相关系数  $r$  大于或等于给定信度  $\alpha$  的临界值  $r_\alpha$ ，是判断式(3) 成立、或复发具有时间可预报行为的主要指标，取  $\alpha = 0.1$  或  $0.2$ 。 $\epsilon$  是一均值为 0、方差为  $\sigma_\epsilon^2$  的正态变量， $\sigma_\epsilon^2$  为

$$\sigma_\epsilon^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [\ln T_i - E(\ln T | M_p)]^2 \quad (4)$$

条件期望  $E(\ln T | M_p) = a + bM_p$ 。因此， $T$  可视为对数正态变量，由对数正态分布性质得到

$$\sigma_\epsilon^2 = \ln \left( 1 + \frac{S_{T|M_p}^2}{[E(\ln T | M_p)]^2} \right) \approx \frac{S_{T|M_p}^2}{[E(\ln T | M_p)]^2} \quad (5)$$

(黄克中,毛善培,1987). 其中,  $S_{T|M_p}^2$  是以  $M_p$  为条件的复发间隔  $T$  的方差.

比较式(5)和(2), 可看出:  $\sigma_e$  与  $\sigma$  具有相同的统计性质和估计精度.  $\sigma_e$  描述了以前一次事件强度为条件的复发间隔的内在不确定性, 而  $\sigma$  则是与强度无关的复发间隔的内在不确定性. 因此, 对于一个断裂段, 可用式(2)和(4)分别估计  $\sigma$  和  $\sigma_e$ . 当  $\sigma < 1$ , 且明显  $< \sigma_e$  时, “最佳的”复发行为是准周期的; 反之, “最佳的”复发行为应是时间可预报的.

### 1.2.3 时间-强度相关行为的判别

分析两相继事件的间隔与后一次事件的震级之间是否存在相关性, 可评价复发是否具有滑动(或震级)可预报行为. 对于具有至少 4 次复发事件的断裂段分别建立回归方程

$$M = A + B \ln T + \epsilon_M \quad (6)$$

当式(6)成立时, 可认为存在滑动(震级)可预报复发行为. 式中,  $A$  和  $B$  为回归系数,  $\epsilon_m$  是均值为 0、方差为回归剩余方差的正态变量.

另外, 本研究也由应变积累-释放随时间的变化图象来判断可能的地震复发行为.

## 2 复发行为分析

### 2.1 丽江—剑川断裂带的剑川段

滇西北丽江—剑川断裂带由若干北北东向的断裂组成(图 1a). 其中, 剑川段以左旋走滑为主, 兼有正倾滑分量, 具有相对独立的地震破裂历史.

自 1481 年以来, 剑川断裂段共发生 7 次  $5\frac{3}{4} \sim 6\frac{3}{4}$  级的地震(图 1b), 表现了  $6\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$  级的特征地震重复性. 在不考虑强度-时间相关性时, 地震复发间隔的变异系数  $\sigma = 1.17$ , 显示出趋于丛集的复发行为. 然而, 这里的 1481, 1501 和 1511 年的 3 次地震可视为同一“丛事件”(图 1b), 这样得到事件之间复发间隔的变异系数  $\sigma = 0.59$ , 表现了准周期复发行为. 进一步的分析表明: 剑川段的地震复发过程存在很好的强度 - 时间相关性, 关系式为:  $\ln T = 1.25M_p - 3.25$  ( $\sigma_e = 0.29$ ,  $r = 0.92$ , 可通过  $\alpha = 0.1$  的相关检验), 但不存在时间 - 强度相关性. 由于  $\sigma_e$  值(0.29) 小于前述不考虑强度 - 时间相关性时的复发间隔内在不确定性  $\sigma$  值(0.59), 说明时间可预报行为是剑川段地震复发的“最佳”行为. 这种带有一定程度不确定性的行为也被称作“准时间可预报行为”(闻学泽, 1993, 1995). 图 2 更加直观地展示了剑川断裂段地震原地复发的“最佳”行为.

### 2.2 淮南断裂带的霍山—六安段

安徽的北东向淮南断裂带为一相对弱活动的逆-走滑断裂带. 1425 年以来该带的霍山—六安段发生过 4 次  $M=5\frac{3}{4} \sim 6\frac{1}{4}$  的特征地震事件. 按式(1)的方法统计表明: 这 4 次事件之间的间隔在 118~227 年, 平均为 164 年, 变异系数  $\sigma=0.34$ , 反映出良好的准周期复

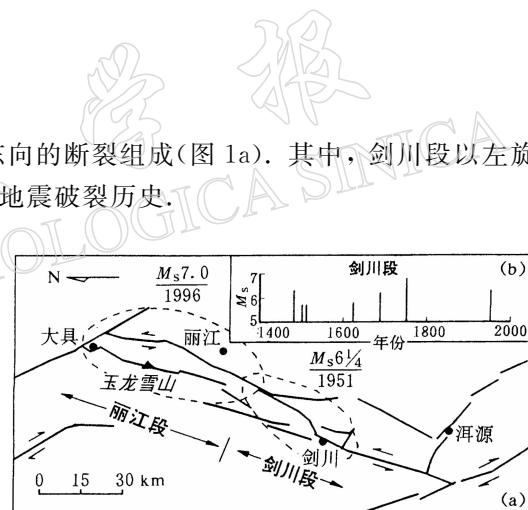


图 1 丽江—剑川断裂带结构及分段图. (粗线为活动断裂, 箭头表示断裂运动旋性, 虚线圈闭区为最晚地震震源)(a)和剑川段的历史地震时间序列(b)

发行为. 图 3 表明, 这里特征事件的序次  $i$  与发生年代明显地呈线性关系. 另外, 由式(3)和(6)的方法统计表明, 这里的地震复发不服从于时间可预报和滑动可预报行为.

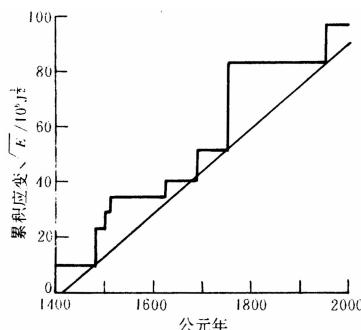


图 2 丽江—剑川断裂带剑川段历史地震的积累应变-时间图象

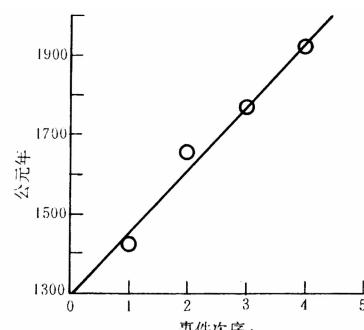


图 3 淮南断裂带霍山—六安段历史地震的序次-年代关系. 直线为最小二乘拟合

### 3 分析结果

除了逆断层因资料不足而未作分析外, 本研究分析了 19 个其它类型断裂段的地震复发行为, 这些段落均至少具有 3 次事件的资料. 全部资料及其分析结果列于表 1. 表 1 还列出了部分仅有两次事件的断裂段, 它们分别与前述 19 个断裂段中的部分相邻. 分析结果表明:

对于活动断裂的段破裂地震, 若不考虑强度-时间相关性, 同时把每次地震作为独立事件, 则复发间隔的变异系数  $\sigma$  随断裂段的不同而不同, 在 0.15~1.17 之间变化. 表现了既有准周期, 也有完全随机的以及成丛的多行为复发特点; 即使把在时间上相对集中发生的地震作为“丛事件”考虑, 不同断裂段的值仍然在 0.15~1.02 之间变化. 然而, 9/19 的断裂段具有 0.15~0.40 的  $\sigma$  值, 表现出不确定性较小的良好准周期复发行为.

当考虑复发过程的强度-时间(或时间-强度)相关性、且将时间上集中发生的地震视作“丛事件”时, 全部  $\sigma > 0.40$  的断裂段均表现出时间可预报复发. 此外, 还有少数  $\sigma \leq 0.40$  的断裂段也具有这种复发行为. 从而, 具有时间可预报复发行为的断裂段比例为 12/19. 这种行为复发间隔的内在不确定性  $\sigma_e$  值在 0.03~0.40, 其中大多数集中在 0.19~0.40. 另外, 约有 3/19 的  $\sigma \leq 0.40$  的断裂段表现出滑动可预报复发行为.

图 4 总结了不同复发行为的断裂段数量与  $\sigma$  的关系, 它初步揭示了良好准周期与时间可

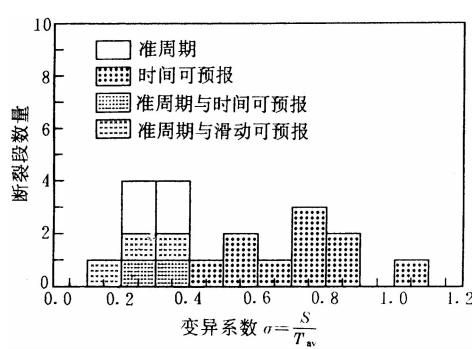


图 4 不同复发行为的断裂段数量与复发间隔变异系数的关系. 断裂段总数为 19

预报警是中国大陆活动断裂带段破裂地震的两种最普遍的复发行为; 同时表明, 这两种行为可以用  $\sigma \leq 0.40$  或  $\sigma > 0.40$  进行判别, 尽管少数  $\sigma \leq 0.40$  的情况也可能表现出时间或滑动可预报行为. 因此, 中国大陆的段破裂地震的危险性可基于这两种复发行为进行评估.

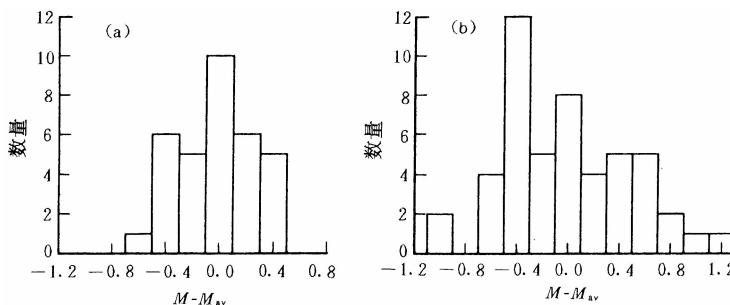
表1 中国大陆活动断裂的多轮回段破裂地震资料及复发行为判别

断裂带、断裂 段及其性质	历史地震		事件 震级	变异 系数	强度-时间相关关系				时间-强度相关关系				复发行为 判别
	年-月-日	M <sub>s</sub>	M	$\sigma$	a	b	r	$\sigma_e$	A	B	r	$\sigma_M$	
金沙江断裂带	1722-	≥6	6.5										
四川巴塘段 (逆-走滑)	1870-04-11	7½	7.5	0.15									准周期与 震级可预报
	1989-04-16	6.7*	7										
	1989-04-25	6.7*											
	1989-05-02	6.4*											
四川鲜水河 断裂带	1747-03-	6¾	6.8										
炉霍段 (走滑)	1816-12-08	7½	7.5	0.38									准周期
	1923-03-24	7.3	7.3										
	1973-02-06	7.6	7.6										
道孚段 (走滑)	1792-09-07	6¾	6.8										准周期与 震级可预报
	1904-08-30	7	7	0.27									
	1981-01-24	6.9	6.9										
康定段 (走滑)	1725-08-01	7½	7.2										时间可预报
	1786-06-01	7¾	7.7										
	1932-03-07	6*	6.2	(0.84)									
	1935-	6*		0.69	-4.30	1.19	0.99	0.19					
	1955-04-14	7.4	7.4										
四川安宁河— 则木河断裂带 安宁河段 (走滑)	1489-01-04	6¾	6.5										时间可预报
	1536-03-19	7½	7.5	1.02									
	1952-09-30	6.7	6.7										
则木河段 (走滑)	1732-01-29	6¾	6.7										
	1850-09-12	7½	7.5										
云南小江断裂 带巧家—东川 段(走滑)	1733-08-02	7¾	7.7										
	1966-02-05	6.5*	6.7										
	1966-02-13	6.2*											
	1500-01-13	≥7	7.5										
嵩明—宜良段 (走滑)	1713-02-26	7*	7.2	(1.10)									准周期与 时间可预报
	1725-01-08	6¾*		0.39	-2.94	1.09	0.95	0.13					
	1750-09-15	6¼*											
华宁段 (走滑)	1833-09-06	8	8.0										
	1789-06-07	7	7.0										
	1909-05-11	6½	6.5										
江川—通海段 (正-走滑)	1517-07-22	5½	5.5										
	1565-	5½	5.5										
	1571-09-19	6¼	6.3	0.75	-2.83	1.25	0.96	0.29					
	1763-12-30	6½	6.5										
	1929-03-22	6	6.0										
建水段 (正-走滑)	1420-	5½	5.5										
	1539-08-08	5½	5.5	(1.03)									
	1606-11-30	6¾	6.8	0.83	-1.21	1.04	0.98	0.40					
	1935-04	5½*	5.8										
	1950-09-13	5¾*											
云南营盘山断 裂带普洱段 (逆-走滑)	1884-11-14	6½	6.5										准周期与 震级可预报
	1923-07-01	6½	6.5	0.37									
	1971-04-28	6.7	6.7										
	1993-01-27	6.3	6.3										
普渡河断裂带	1893-04	5¾	5.7										
四川鹿鹤段 (走滑)	1947-06-07	5½	5.5	0.20									准周期
	1988-04-15	5.2	5.2										

续上表

断裂带、断裂 段及其性质	历史地震		事件 震级	变异 系数 $\sigma$	强度-时间相关关系 $\ln T = a + bM_p$				时间-强度相关关系 $M = A + B \ln T$				复发行 判别
	年-月-日	$M_s$	$M$		$a$	$b$	$r$	$\sigma_e$	$A$	$B$	$r$	$\sigma_M$	
云南丽江— 剑川断裂带	1481-07-24	6 1/4 *	6.5										
剑川段 (正-走滑)	1501-06-11	5 3/4 *											
	1511-11-27	5 3/4 *											
	1624-03-26	5 3/4	5.8 (1.17)										
	1688-06-16	6 1/4	6.2 0.57	-3.25	1.25	0.92	0.29						不存在
	1751-05-25	6 3/4	6.8										时间可预报
	1951-10-21	6 1/4	6.3										
云南楚雄— 建水断裂带	1511-05-12	5 1/2	5.5										
楚雄段 (走滑)	1615-08-24	5 1/4	5.3 0.79	-1.02	1.00	0.98	0.19						不存在
	1680-09-09	6 3/4	6.7										时间可预报
	1975-01-12	5.6	5.6										
宁夏银川断陷 (正倾滑)	1143-04	6 1/2	6.7										
	1378-04-30	5 3/4	5.7										
	1477-05-13	6 1/2	6.3 0.46	-0.49	0.91	0.92	0.27						不存在
	1709-10-14	8	8.0										时间可预报
山西断陷带	1102-01-15	≥6	6.3										
太原-徐沟段 (正倾滑)	1366-08-07	6	6.0 0.21										可能存在
	1679-10	5 1/2	5.5										
	1883-06-23	5 1/2	5.5										
介休段 (正走滑)	1549-04	5 1/2	5.5										存在
	1618-05-20	6 1/4	6.3 0.79	-5.46	1.76	0.98	0.08						不存在
	1891-04-17	5 3/4	5.7										时间可预报
	1979-06-19	5.2	5.2										
临汾盆地段 (正倾滑)	649-09-15	≥6 3/4	7.0										
	1181-03-	6 1/4	6.3										可能存在
	1291-09-01	6 1/2	6.5 0.86	(受邻段 1303 年地震影响)									时间可预报
	(1303-09-25)	8											
	1695-05-18	7 1/2	7.5										
河北滦县西— 桃园断裂(段)	1562-06-	5	5.0										
(正走滑)	1624-04-17	6 1/2	6.5										存在(1976 年前)
	1795-08-05	5 1/2	5.5 0.54	0.83	0.66	0.99	0.03						不存在
	1880-09-06	5	5.0										
	1945-09-23	6	6.0										
安徽淮南断裂 霍山-六安段	1425-03-16	5 3/4	5.7										
(逆-走滑)	1652-03-23	6	6.0 0.34										不存在
	1770-01-16	5 3/4	5.7										准周期
	1917-01-24	6 1/4	6.3										
西藏羊八井— 当雄断裂带	1901-04-21	6 3/4	6.7										
尼木段 (正倾滑)	1924-10-09	6 1/2	6.5										
	1937-08-15	5 3/4	5.7 (0.95)										
	1955-03-27	5 3/4 *	5.9 0.22										不存在
	1955-12-19	5 1/4 *											准周期
	1956-03-23	5 1/4 *											
	1992-04-30	6.5	6.5										

注：带“\*”的震级相邻地震为同一“丛事件”；括号内的  $\sigma$  值是把每次地震作为独立事件计算的；括号内的地震发生在邻段。

图 5 不同轮回事件震级的距平值  $\Delta M$  统计直方图

(a) 良好准周期复发; (b) 时间可预报复发

为了分析在不同复发轮回的段破裂地震的震级变化, 分别对良好准周期和时间可预报两种复发行为的震级距平值  $\Delta M = M - M_{av}$  作了统计。对于一个断裂段,  $M$  是事件震级,  $M_{av}$  是多次事件的平均震级。统计表明: 良好准周期复发时, 不同轮回事件的震级分布呈现以平均值  $M_{av}$  为重心的集中趋势, 可变范围仅在  $M_{av} \pm 0.5$  之内(图 5a). 说明对于这种复发行为的断裂段, 未来事件的震级可用  $M_{av} \pm 0.5$  进行估计。然而, 时间可预报复发时, 不同轮回事件震级的可变范围很宽, 相继轮回事件的震级差最大可达 1.7 级(图 5b). 表明对于这种复发行为的断裂段, 未来事件震级的估计不能仅依赖于统计平均。

在分析中已注意到这样的现象: 在受到相邻断裂段大地震破裂的影响时, 少数断裂段的原有地震复发行为会发生变化。

## 4 结论

(1) 当把时间上相对集中发生的地震当作“丛事件”时, 中国大陆活动断裂的段破裂地震复发, 主要表现出良好的准周期行为(约占 9/19)和时间可预报行为(约占 12/19)。良好准周期复发间隔的内在不确定性  $\sigma$  值在 0.15~0.40 之间变化, 而时间可预报复发间隔的内在不确定性  $\sigma_e$  值大多位于 0.19~0.40。这两种复发行为适用于较宽的段破裂地震的震级范围。仅在少数情况下, 良好准周期行为与时间可预报或滑动可预报行为之一同时并存。

(2) 良好准周期复发的断裂段, 不同轮回的事件大小集中在该断裂段的平均震级  $M_{av} \pm 0.5$  之内。然而, 时间可预报复发的断裂段, 不同轮回的事件强度明显可变, 相继轮回事件的最大震级差可达 1.7 级。

以上结论已排除了受相邻断裂段相互作用影响的结果。笔者将以本研究结果为基础, 进一步探讨可用于评估活动断裂带分段地震潜势的概率模型。

## 参 考 文 献

国家地震局震害防御司编. 1995. 中国历史强震目录. 北京: 地震出版社, 1~514

国家地震局地球物理研究所, 复旦大学历史地理研究所主编. 1990a. 中国历史地震图集(远古至元时期). 北京: 中国地图出版社, 1~174

- 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学历史地理研究所主编. 1990b. 中国历史地震图集(明时期). 北京: 中国地图出版社, 1~194
- 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学历史地理研究所主编. 1990c. 中国历史地震图集(清时期). 北京: 中国地图出版社, 1~244
- 黄克中, 毛善培. 1987. 随机方法与模糊数学应用. 上海: 同济大学出版社, 1~346
- 闻学泽. 1993. 小江断裂带的破裂分段与地震潜势概率估计. 地震学报, **15**(3): 322~330
- 闻学泽. 1995. 活动断裂地震潜势的定量评估. 北京: 地震出版社, 1~150
- Bakun W H, McEvilly T V. 1984. Recurrence models and Parkfield, California, earthquakes. *J Geophys Res*, **B89**: 3 051~3 058
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1991. Seismic gap hypothesis: Ten years after. *J Geophys Res*, **B96**: 21 419~21 431
- Papazachos B C. 1989. A time-predictable model for earthquakes in Greece. *Bull Seism Soc Amer*, **79**: 77~84
- Papazachos B C. 1992. A time-and magnitude-predictable model for generation of shallow earthquakes in the Aegean area. *Pure Appl Geophys*, **138**(2): 287~308
- Reid H F. 1911. The elastic-rebound theory of earthquakes. *Univ Calif Publ Bull Dept of Geol*, **6**: 413~444
- Savage J C, Cockerham R S. 1986. Quasi-periodic occurrence of earthquakes in the 1978~1986 Bishop-Mammoth lakes sequence, eastern California. *Bull Seism Soc Amer*, **77**(4): 1 347~1 358
- Shimazaki K, Nakata T. 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophys Res Lett*, **7**: 279~282