

强大地震前地震活动增强区 及其力学研究^{*}

宋治平¹⁾ 梅世蓉²⁾ 尹祥础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

摘要 通过对 85 次 6 级以上地震前地震活动增强区的深入研究表明: ①强大地震前出现的地震活动增强区具有一定的普遍性; ②增强区的规模和形成时间都随震级而增大; ③增强区尺度与震源区尺度之比随震级增大而减小; ④增强区形成的时间因地区各异, 中国东部地区较西部地区长。运用坚固体孕震模式和硬包体理论, 对以上特征进行了定性和半定量的初步解释, 从而应用地震活动增强区进行了 2 次地震的长期预测尝试。可见, 强震前的地震活动增强区是具有一定力学基础的现象。

关键词 地震活动 增强区 坚固体模式 硬包体理论 预测实践

引言

强震前, 在震源区周围一定时空范围内经常出现地震活动增强现象。这是国内外学者早已注意到的异常现象。茂木清夫(Mogi, 1969)曾指出巨大地震前 10~20 年, 在大震震源区周围常出现地震活动增强的环形分布, 称之为环形现象(或“面包圈”)。自此以后, 国内外学者陆续报道在强震前, 甚至中强地震前有环形分布图象出现。然而迄今为止, 震例比较零散。

为此, 梅世蓉等(1996)对中国大陆及邻区 16 次巨大地震($M \geq 7.8$)前的地震活动环形分布图象与规律进行了归纳, 并初步定性地讨论了其形成机理。同时, 发现大震($M=7.0 \sim 7.7$)和强震($M=6 \sim 7$)前的活动图象也存在类似特点。因此, 我们在研究巨大地震的基础上, 增加了 47 次中国大陆资料完整的大震以及华北地区 22 次强震, 程度不同地剖析了 85 次 6 级以上地震前的活动图象异常, 并对其普遍性和规则性进行了提炼, 然后应用梅世蓉(1995)提出的坚固体模式以及 Добровольский(1991)的硬包体理论, 定性和半定量地对其特征进行了初步分析理解。

1 地震活动增强区的普遍性

对于巨震, 取震前数十年至上百年的 $12^\circ \times 12^\circ$ 的区域作为研究范围; 对于大震, 则为

* 地震科学联合基金资助项目(198085)。

1998-08-14 收到初稿, 1999-01-28 收到修改稿并决定采用。

震前数十年 $8^\circ \times 8^\circ$ 的时空范围；而 6 级强震则更小一些。增强区确定的具体方法见梅世蓉等(1996)文章。研究中使用的资料是我们自己整编的中国大陆及其边缘地区的 $M \geq 4.0$ 地震目录，其编制的原则与方法见宋治平等(1995)和 Song 等(1995)。

无论是巨大地震，还是 6 级以上强震，在孕震过程中一般都形成一个围绕主震的地震活动增强区(梅世蓉等, 1997)，只是增强区的大小、分布走向等都与地震震级、孕震区构造等因素有关。由于篇幅所限，本文只给出几次巨震的震例。图 1 给出了几次巨大地震前的地震活动环形分布。图 1a 为华北地区 1557~1654 年 $M \geq 5.0$ 地震分布，地震活动主要受 4 次巨大地震(1654 年甘肃天水 8.0 级、1668 年山东郯城 8.5 级、1679 年河北三河平谷 8.0 级和 1695 年山西临汾 7.8 级)的孕育所控制。围绕 4 次巨震表现为 4 个地震活动增强区。例如郯城地震前的活动增强区为长轴达 1 000 余公里，呈北东向的椭圆形区。图 1b 为中苏边界 19 世纪末 20 世纪初的 4 次巨大地震的活动增强区分布。

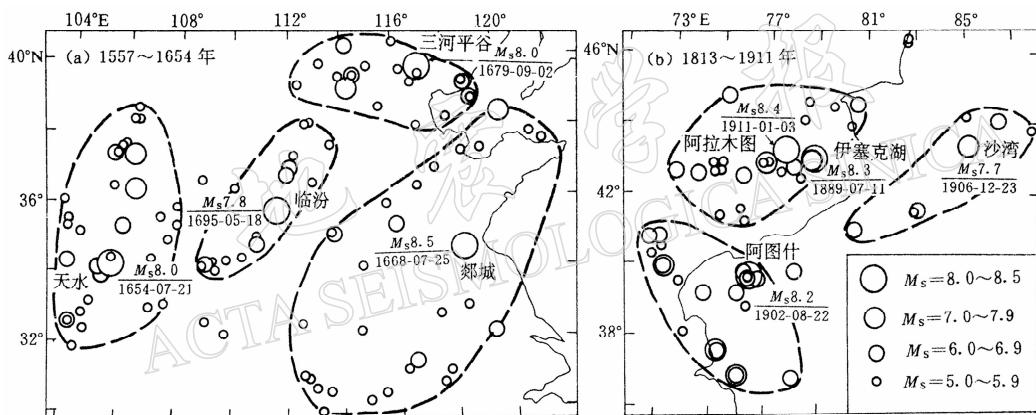


图 1 地震前的环形分布特征

- (a) 华北地区 15~16 世纪 4 次巨震前的地震活动增强区；
 (b) 中苏边界地区 19 世纪末 20 世纪初的 4 次巨震前的活动增强区

宋治平(1996)给出了 85 次地震活动环形分布区的形成时间、长度、形状、走向和环区与源区之比等参量。85 次地震中有 95% 的地震前出现椭圆形的增强区(4 次例外)，即地震的“环形分布特征”是一种普遍性较强的现象，它对强震的长期预测具有重要意义(梅世蓉等, 1996)。

2 $M \geq 6.0$ 地震前地震活动区特征

由于华北地区(110°E 以东; 35°N 以北)、东部地区(110°E 以东)、西部地区(110°E 以西)的地震活动增强区略有不同，因此，下面分不同地区进行统计分析。

2.1 地震活动增强区出现的时间

图 2 表明，在东部地区 7 次巨震前，其地震活动增强区出现的时间多为 100 年左右，7 级多的大震为 70~90 年，6 级多的地震为 40~60 年，即活动增强区出现时间随震级而增大。东部 7 级以上地震的活动增强区形成时间比西部要长，东部约为 70~100 年，西部则为 20~50 年。

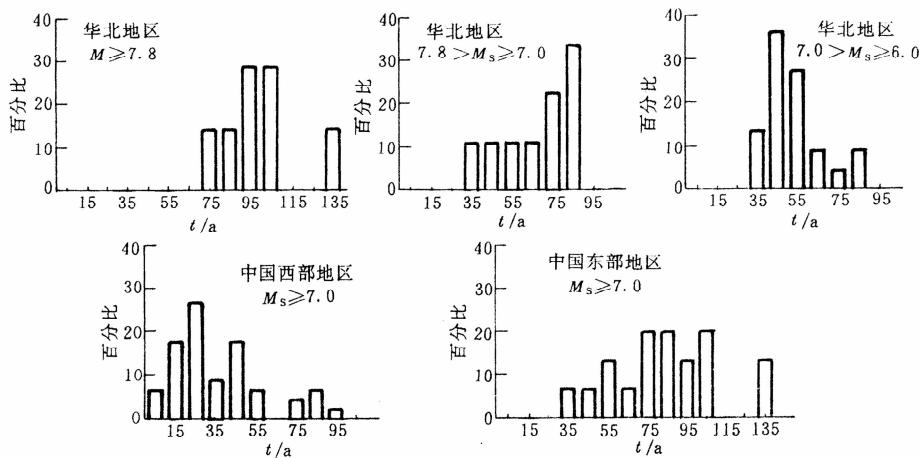


图 2 不同地区地震前活动增强区的形成时间统计

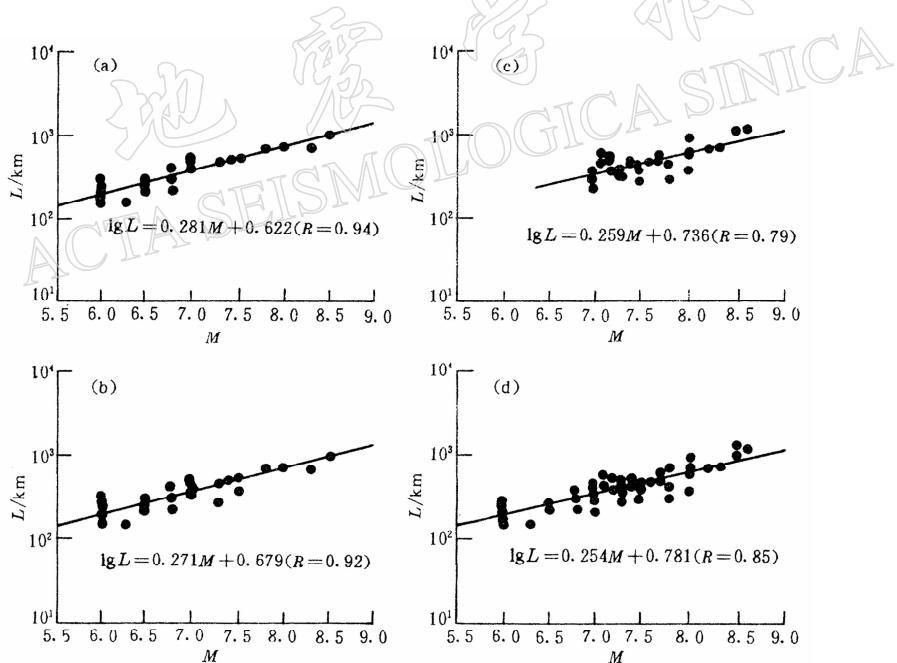


图 3 不同地区地震前活动增强区尺度与震级的关系

(a) 华北地区; (b) 东部地区; (c) 西部地区; (d) 本文 85 次震例

2.2 增强区长度与震级的关系

增强区长轴 L 与震级 M 的统计关系如下(如图 3):

$$\lg L = 0.281 M + 0.622 \quad (\text{相关系数 } 0.94, \text{ 华北地区, 37 次地震}) \quad (1)$$

$$\lg L = 0.271 M + 0.679 \quad (\text{相关系数 } 0.92, \text{ 东部地区, 40 次地震}) \quad (2)$$

$$\lg L = 0.259 M + 0.736 \quad (\text{相关系数 } 0.79, \text{ 西部地区, 45 次地震}) \quad (3)$$

$$\lg L = 0.254 M + 0.781 \quad (\text{相关系数 } 0.85, \text{ 中国大陆地区, 85 次地震}) \quad (4)$$

其中, L 单位为 km。这些关系对该地区的地震震级预测具有参考价值。

2.3 增强区与震源关系

不同地区地震前的活动增强区的尺度(半长轴 r)和震源区尺度(半径 R)之比与震级的关系(图 4)如下:

$$\lg(r/R) = -0.175M + 1.967 \quad (\text{相关系数 } 0.79, \text{ 华北地区, 37 次地震}) \quad (5)$$

$$\lg(r/R) = -0.189M + 2.047 \quad (\text{相关系数 } 0.79, \text{ 东部地区, 40 次地震}) \quad (6)$$

$$\lg(r/R) = -0.174M + 1.854 \quad (\text{相关系数 } 0.67, \text{ 西部地区, 45 次地震}) \quad (7)$$

$$\lg(r/R) = -0.216M + 2.200 \quad (\text{相关系数 } 0.83, \text{ 中国大陆地区, 85 次地震}) \quad (8)$$

其中, r 为增强区半长轴, 即 $r=L/2$; R 为震源半径(主要以实际资料与经验关系相结合确定)。可见, 震级不同, 震源影响场的尺度也不相同, 即增强区尺度与震源区尺度之比随震级增大而减小。据中国大陆强震资料, 7 级以上强震的活动区约为震源区的 3~5 倍, 对 6 级多地震可达 6 倍以上。

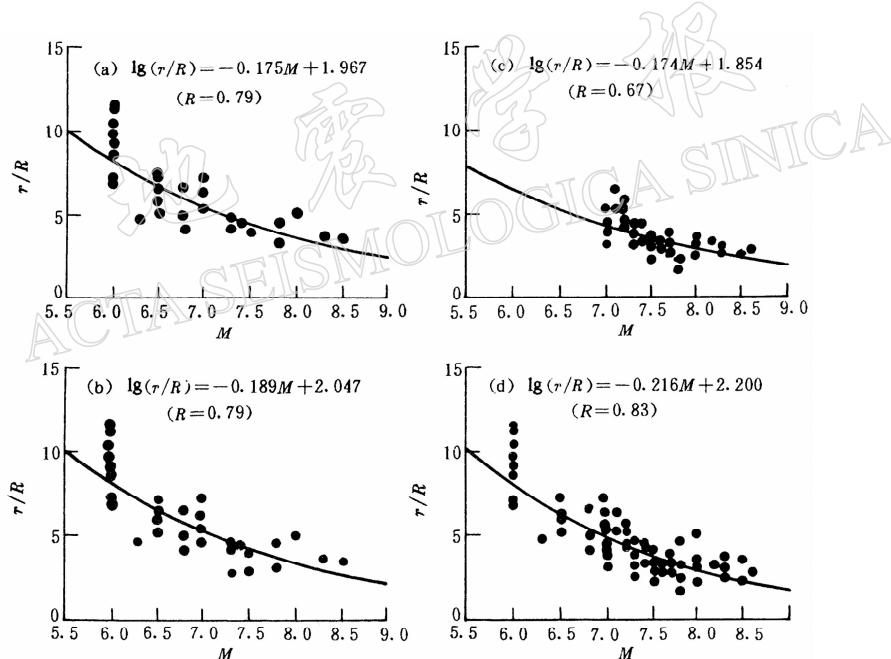


图 4 不同地区地震前活动增强区的 r/R 与震级的关系

(a) 华北地区; (b) 东部地区; (c) 西部地区; (d) 本文 85 次震例

3 强震前地震活动区的力学初步解释

3.1 地震活动环出现的原因

强震孕育通常都要经历一个漫长的过程, 可长达数百年或上千年。在此过程中, 边界大致处于位移速率基本不变的条件。理论研究表明(梅世蓉, 1995), 对于这样的边界条件, 能够逐步积累大量弹性位能的地区是具有坚固体(硬包体)性质的高速块体区及其外围一定范围。对于坚固体外围的非均匀及非完全弹性介质中, 若加上断层(相当于软包体)分布, 其内部虽不积累能量, 但断层外也有位能的积累, 积累的总能量较少, 发生大破裂不可能,

发生中小破裂则是可能的。一旦时机成熟(能量密度达到相应极限值)，中、小破裂就会发生。坚固体内因其破裂强度高，能量密度不够，所以保持不破状态，这就是在孕震的中长期阶段普遍出现地震活动环的原因。某些理论与实验研究也得到了类似的结果。宋治平等(1997)采用二维弹性介质圆形包体模型，运用连续介质力学理论求出包体内、外的应力场、应变场、最大剪应力、体应变等解析解，分析了这些量在包体内、外的变化特征及包体扰动区的演变过程；利用这些理论结果解释了地震活动环的形成与特征。许昭永等(1997)用含坚固体混凝土试样在底面支撑、侧面双轴加压、顶面自由的条件下，进行破裂实验研究。发现在主破裂前，微破裂的空间演变特征与强震前的活动图象是相似的。

3.2 地震活动增强区与震源尺度之比的力学分析

由于应用坚固体(硬包体)模式定性地分析了地震活动增强区的形成，因此可应用Добровольский(1991)三维弹性硬包体理论模型，半定量地分析地震活动增强区的尺度与震源尺度之比和震级的关系。

由三维弹性硬包体理论可知，取应变 $\epsilon=10^{-8}$ 为背景值，则其影响范围 r 与震级 M 的关系为

$$r = e^M \quad (9)$$

取震级与能量的关系如下：

$$E = 10^{aM+b} = \rho V \quad (10)$$

其中， a, b 为待定常数； ρ 为单位体积的能量密度。 V 为震源体积。如果震源体取为圆柱体模型， R 为震源半径，则震源体影响范围的尺度和震源尺度之比(r/R)与震级的关系式

$$\lg(r/R) = A_1 + B_1 M \quad (11)$$

其中， $A_1 = \lg[10^{b/2}/(\pi\rho H)^{1/2}]$ ， $B_1 = 0.434 - a/2$ ， H 为震源深度。

同理，如果震源体为球体模型，则

$$\lg(r/R) = A_2 + B_2 M \quad (12)$$

其中

$$A_2 = \lg[10^{b/3}/(4\pi\rho/3)^{1/3}] \quad B_2 = 0.434 - a/3$$

可见，无论震源体是圆柱或球体模型，其影响范围与震源尺度之比(r/R)的对数与震级呈线性关系。这说明地震活动增强区尺度和震源尺度之比与震级的关系[如式(5)～(8)]具有一定力学基础。

另外，观测资料[式(5)～(8)]表明，7级以上强震的活动区约为震源区的3～5倍，对6级多地震可达6倍以上。宋治平等(1997)采用二维弹性介质中存在圆形包体模型(类似于圆柱体包体)，计算表明包体产生的扰动场尺度一般为包体尺度的3～5倍。可见，对于7级以上浅源地震，震源尺度一般大于震源深度，取柱状包体模型较为恰当；而对于6级左右的浅源地震，震源尺度与震源深度相当，则震源模型取球体较为恰当。

3.3 地震活动增强区尺度与震级关系的力学分析

Добровольский(1991)利用前苏联的地震前兆观测资料，得出了孕震体产生的应变场范围。为了解释中国的前兆特征，由我国的资料(吴开统等，1990)，结合硬包体理论，导出了中国大陆地区的应变场范围与震级的经验关系式

$$r_\epsilon = 0.85 \times (\alpha V \tau / \mu \epsilon)^{1/3} \quad (13)$$

其中， α 为包体内外剪切模量之比， τ 为边界剪应力， μ 为包体外剪切模量， V 为震源体积。

我国余震面积 S 与震级的关系式取为(吴开统等, 1990)

$$S = 10^{0.94M-3.48} \quad (14)$$

震源体积 V 近似等于 $S \times H$, H 为震源深度, 由此可得

$$\lg r = 0.31M + C_1 \text{ 或 } \lg L = 0.31M + C_2 \quad (15)$$

其中, $C_1 = \lg[0.06(\alpha H\tau/\mu\varepsilon)^{1/3}]$ 和 $C_2 = \lg[0.12(\alpha H\tau/\mu\varepsilon)^{1/3}]$ 为与震级无关的常数, $L = 2r$.

对中国大陆而言, 式(1)~(4)中 M 的系数一般为 $0.25 \sim 0.28$, 与式(15)中 M 的系数 0.31 相近. 可见, 地震活动增强区长度与震级的关系, 可由包体理论进行半定量分析.

3.4 地震活动增强区的形成时间分析

地震活动出现的时间一般随震级而增大, 例如在中国东部地区, 巨震前的地震活动增强区出现时间一般为 100 年左右, 7 级大震为 70~90 年, 6 级多地震为 40~60 年. 根据古地震资料, 单个大地震的重复周期可长达数千年(高维明, 1990). 宋治平(1996)导出了流变包体模型中体应变的理论公式并计算表明, 决定孕震时间长短的力学参数中粘滞系数起重要作用. 当 η 取为 10^{22} 泊时, 孕震时间为数千年; η 取为 10^{21} 泊, 则为数百年. 可见, 地震活动增强区的形成时间只为孕育一次地震所需时间的 1% 或者更少.

增强区的形成时间还因地区而不同, 如东部 7 级以上地震的形成时间比西部要长. 东部为 70~100 年, 西部则为 20~50 年. 时振梁(1982)研究了大陆地震的重复周期, 指出板块边界地区的地震重复周期最短, 一般为 30~40 年, 离开板块边界向内陆延伸, 地震活动的重复周期逐渐变长, 由 100 年左右增至 300~400 年. 对于介质相对完整与存在较多断裂的地区, 其粘性系数也存在差异, 前者偏高, 后者偏低, 则前者孕育地震的时间较后者长(宋治平, 1996). 这可能是中国东部与西部地震活动周期存在差异的原因之一.

4 预测实践

强震前出现地震活动增强区, 可能是震源体在地震孕育过程中在物理场上的一种表现. 运用坚固体孕震模式和硬包体理论, 对地震活动增强区的形成过程及规模进行了定性和半定量的初步分析. 因此, 可将这一具有一定物理基础的特征应用于预测实践. 例如 1995 年 4 月, 罗贵安等(1996)对南北带中南段地区 1977~1994 年的地震资料进行充分研究后发现, 4 级以上地震活动形成一个增强区, 其中包含了两个空区, 形成明显的环形分布. 根据该区内的地震活动、蠕变曲线、活动度的韵律性、最大熵谱特征等特点作出预测: “在此增强区内(特别是环内以及环与空区的交界附近)发生 6.0 级以上地震的可能性很大……”. 而 1995 年 10 月 24 日云南武定 6.5 级和 1996 年 2 月 3 日云南丽江 7.0 级两次地震都发生在预测区内.

5 结果与讨论

应用统一的地震活动增强区边界确定的原则和方法(梅世蓉等, 1996), 对 85 次 6 级以上地震的深入研究发现, 强大地震前出现地震活动增强区具有一定的普遍性; 增强区的尺度随震级而增大; 增强区尺度与震源区尺度之比随震级增大而减小; 增强区形成的时间随震级而增大, 并且因地区而不同, 东部地区较西部地区长. 并运用坚固体孕震模式和硬包体理论进行了初步的定性和半定量的解释, 从而进行地震预测实践, 取得 2 次地震的长期

预测实效。可见，强震前的地震活动增强区是具有一定物理基础的普遍现象。

当然，在实际应用中，为了避免人为性和随意性，应采取由某一震级以上地震（例如预测巨震时取5级以上地震；预测6级以上强大地震取4级以上地震）相对集中的区域，结合地质构造条件确定地震活动增强区，从而进行预测。

参 考 文 献

- 高维明. 1990. 沂沐大陆裂谷的生成与演化. 地震地质, **12**(3): 150~157
- 罗贵安, 宋治平, 梅世蓉. 1996. 1974年永善7.1级地震活动异常特征及其机理探讨. 地震研究, **19**(1): 1~7
- 梅世蓉. 1995. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——坚固体孕震模式的由来与证据. 地震学报, **17**(3): 273~282
- 梅世蓉, 宋治平, 薛艳. 1996. 我国巨大地震前地震活动环形分布图像与规律. 地震学报, **18**(3): 1~10
- 梅世蓉, 薛艳, 宋治平. 1997. 华北地区强震前地震活动长期演变过程的共性. 见: 国家地震局预测预防司编. 地震短临预报的理论与方法——“八五”攻关三级课题论文集. 北京: 地震出版社, 3~12
- 时振梁, 环文林, 卢寿德, 等. 1982. 东亚、中亚大陆地震活动特征. 见: 国家地震局科技监测司编. 大陆地震活动和地震预报国际学术讨论会论文集. 北京: 地震出版社, 86~99
- 宋治平, 梅世蓉, 薛艳. 1995. 中国地震历史资料的信息开发与利用. 地震, **15**(1): 12~19
- 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: [学位论文]. 北京: 国家地震局地球物理研究所, 1~112
- 宋治平, 尹祥础, 陈学忠. 1997. 包体模型的力学场特征及其在地震活动性解释中的应用. 见: 国家地震局预测预防司编. 地震短临预报的理论与方法——“八五”攻关三级课题论文集. 北京: 地震出版社, 529~536
- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 等. 1990. 地震序论概论. 北京: 北京大学出版社, 1~250
- 许昭永, 王彬, 赵晋明, 等. 1997. 含硬包体试样破裂特征的实验研究. 地震学报, **19**(1): 79~85
- Mogi K. 1969. Some feature of recent seismic activity in and near Japan, (2) Activity before and after great earthquake. *Bull Earthq Res Inst*, **47**: 395~417
- Song Z P, Mei S R, Xue Y. 1995. The information development and application of the historical earthquake data of China. *J Earthq Pred Res*, **4**(4): 560~569
- Добровольский И. П. 1991. Теория Полготовки Тектонического Землетрясения. Москва: Академия Наук СССР, 1~218