

中国东南沿海地震带大震 重复性和大震减震作用*

陈家超 冯霞英

(广东省地震局, 广州)

提 要 本文从物质分异的角度出发并利用现代小震活动资料, 讨论了东南沿海地震带历史大震震源区及其附近, 今后一段历史时期内是否有大震 ($M \geq 0$) 震源区大震重复性和大震减震作用问题。结果表明, 这些历史震源区目前还处在减震阶段, 今后一段时间只能以小震或中强地震的活动特点来显示这一弱化区。

关键词 闽粤沿海地震构造带 大震 地震周期 减震作用 物质分异

1986 年我们在参加编制《中国大陆强震减震区划图》(1987—2037) 时, 对中国东南沿海地震带大震重复性和大震减震作用进行了讨论。提出在这一地区已发生过 $M \geq 7$ 级地震的地段, 目前不大可能再发生类似强度或更大的地震, 今后一段历史时期内仍然处在减震阶段 (图 1)。

对于大震重复性, 郭增建等定义为两次大震震源体地表投影的重叠¹⁾。我们认为这一定义是过于严谨的, 实际上按这个定义, 在中国大陆很难找到 ≥ 7 级地震的重复。我们对中国大陆公元 138—1976 年发生的 84 次 $M \geq 7$ 级浅源历史大震中的 71 次历史地震进行了总结^[1], 从中发现一些震源在它恢复了以后, 重新发生大震时, 震源体并没有完全重迭, 而是部份重迭。中国大多数历史大震重复性属于这种类型。例如, 1920 年 12 月 16 日海原 8.5 级大地震, 这个历史震源前后发生过 3 次大地震, 第一次是 1622 年 10 月 25 日宁夏固原北 7 级地震, 相隔 298 年海原 8.5 级大震发生, 9 天后即 1920 年 12 月 25 日在宁夏径源附近又发生 7 级大震。这几个震源重迭或部份重迭成为一个震源区。中国东南沿海地震带同样存在这种类型。

东南沿海地震带地壳下部是一条物质分异的强烈地带, 在这个带上喜山期玄武岩浆侵入与喷发一直持续到全新世 (Q_1), 近代发生过 4 次 $M \geq 7$ 级地震, 即 1600 年 9 月 29 日南澳 7 级地震, 1604 年 12 月 19 日泉州海外 8 级地震, 1605 年 7 月 13 日琼山文昌间 $7\frac{1}{2}$ 级地震和 1918 年 2 月 13 日南澳 $7\frac{1}{4}$ 级地震。对于这几个历史大震震源区及其附近, 今后一段历

1) 郭增建、秦保燕等, 大地震重复性和大震减震作用, 1987。

* 本文为“大地震重复性和大震减震作用”地震基金课题的二级课题。

本文 1992 年 4 月 10 日收到

史时期内是否有大震重复 ($M \geq 7$) 或减震作用, 是本文主要的讨论问题。

1 南澳——南澎区

讨论大震震源区大震重复性和附近平行同旋断裂的减震作用涉及到震中位置的确定。过去对本区 1918 年 $7\frac{1}{4}$ 级大震宏观震中位置习惯上定在南澳岛北东海域七星礁附近 (北纬 $23^{\circ}30'$, 东经 $117^{\circ}13'$)^[2]。1987 年 5 月郭增建、秦保燕和我们到南澳、南澎实地调查, 发现这次强震对南澳造成的破坏比不上南澎严重。前者破坏的建筑物大多座落在第四纪海积或残坡积物上, 属沙浆土结构, 破坏程度较轻。而在南澎, 建筑物座落在花岗岩或混合花岗岩片麻岩上, 属钢筋水泥结构, 破坏反而严重。据《中国沿海灯塔志》记载:

“十三日下午一时半, 本岛发生地震。洋员²⁾、宿舍、院内围墙皆已被毁, 水池之水悉为荡空, 高灯之塔虽屹然未动, 而透镜则损坏不堪, 华员³⁾、宿舍完全倒塌, 火药库、贮油室亦皆倾塌, 低灯之柱脚则已震斜……, 塔之南有一小谷, 震时地裂, 涌出一泉副经浚成井。震后立即重建, 于民国九年竣工”。该志再述“该岛不时颤动, 只见地层外壳尚未恢复原状, 以致该年之内簇新房屋复被震裂, 旧日透镜亦有损伤, 十一年复有微震发生, 直到十三年八月二十日新灯始开燃, 以后该站地震, 无年无之, 十三年高灯罩三具悉被震破, 灯光遂熄。同年八月间, 同样情况又重演, 近则岛中微震, 七日来复, 几成定例……”。由此可见, 南澎在地震时不仅造成严重破坏, 而且在主震发生后, 余震还不断发生, 且有倍九律特征; 而在南澳, 当时人口稠密, 文化比较发达, 有感的余震只在主震后的几天感觉到, 同时在南澎岛东岸, 堆积有大量巨砾 (大者近千吨), 可能是当时地震崩塌的遗迹, 也进一步佐证了地震震中在南澎岛附近。

根据我们的研究^[3], 历史大震从它的地震后效上看可以分为两种类型: 一种类型是地震后效严重, 也即大震时使震源体破坏严重, 余震特别发育的类型; 第二种类型是震源发育时完整性没有受到很大破坏, 余震不发育。对于这两种类型, 其震源区现代小震活动也相应不同。前者可视为弱介质区, 这种地区在构造力作用下, 小震较发育。由于震源很破碎, 因此小震的复盖面可以近似地反映震源体的范围和尺度。上述原定的震中区小震活动较少, 相反, 南澎以东北纬 $23^{\circ}20'$, 东经 $117^{\circ}23'$ 地区小震呈现北东向的密集群 (图 2)。据此可

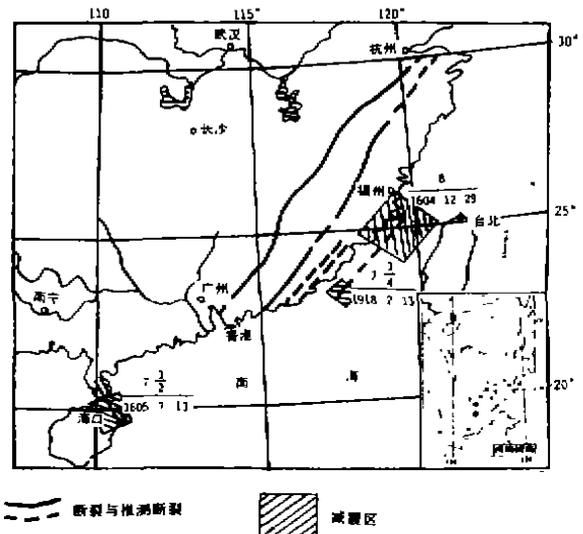


图 1 中国东南沿海大震减震区划图

Fig. 1 Attenuation zones of major earthquakes in Southeast China coast region

2) 值守南澎灯塔外国员工;

3) 值守南澎灯塔的中国员工

以初步认为该处小震的覆盖面是 1918 年 7¼ 级地震的震源, 这一意见与其他研究者的意见是一致的^[4]。

1.1 大震重复性问题

讨论这一地区大震重复性问题, 也涉及到 1600 年南澳 7 级地震震源位置。我们认为它的震源位置可能也在现今南澎小震的位置, 发震构造与 1918 年 7¼ 级地震相同, 是北东向南澎——兄弟屿断裂。两次大震相隔 313 年, 在同一震源区重复。在第一次大震发生后, 震源完整性没有受到严重破坏, 因此相隔 318 年时间又发生了 1918 年 7¼ 级地震。这两个震源体重迭, 成为现今密集的小震活动区。

1918 年 7¼ 级的地震发生后距今 74 年了。震源区小震活动仍然十分频繁, 说明震源区经过两次大震以后破坏严重, 至今仍然是弱介质区。要使震源区完整性得到恢复, 需要较长一段时间, 在震源恢复以后重新积累弹性剪切应力到发生大震需要的时间可能更长。我们采用郭增建等在 1973 年提出的下列经验公式:

$$T = \frac{D}{V} \quad (1)$$

$$D = 10^{0.52M-1.25} \quad (2)$$

上式中, T 为大震震源恢复后至大震重复发生的时间;

V 为震后断层相对运动速率;

D 为发震断层错距 (厘米)。

按我国平均速率 $V = 10\text{mm/a}$ 计算, 震源恢复后重新积累应力到发震需要的时间见表 1。

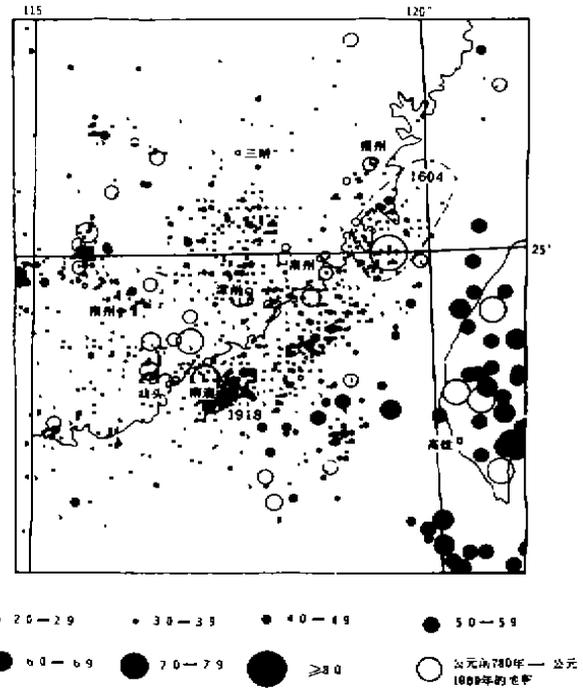


图 2 中国东南地区地震震中分布图
($M_L \geq 2.2$ 1970—1989)

Fig. 2 Distribution of earthquake epicentres in Southeast China

表 1 Tab. 1

M (震级)	D (厘米)	T (年)
8.5	1480	1480
8.0	813	813
7.5	446	446
7.0	246	246
6.5	135	135
6.0	74	74

由此可见,上述历史大震震源区今后将长期处在减震阶段,不可能重复发生大震,目前属大震安全区。

1.2 震源区周围的减震作用

我们知道,在一定的地质时期内,区域构造应力场应该是不变的,一组平行同旋的断裂所产生的剪切形变的特征应当相同,同时在一个震源区内其震源底部的垂直作用力大体一致,由它衍生出的水平剪切应力与区域构造应力场迭加应该大致相同,因此,沿着两个相互平行的断裂所产生的剪切形变特征一般情况下应该也是一致的。这样,当其中一条断裂发生大震,其断层盘的错动将使其相邻的平行断裂上的剪切应力减少,从而使该断裂在相当长的一段时间内不再发生大震^[5]。在南澳—南澎历史大震震源区周围与南澎—兄弟断裂平行的还有一系列北东向断裂,这些断裂在1918年7¼级大震发生后,相应发生了减震作用。减震距离(以垂直距离计)可采用郭增建经验公式:

$$R = \frac{20}{1.17} \cot \left(\frac{\pi}{2}, \frac{100}{U} \right) \quad (3)$$

其中 R 为减震距离; $U = \frac{D}{2}$

由此计算出距离震源破裂面45km以内的平行断裂发生了减震作用,减震长度至少与震源破裂面的长度相当,即相当震源区现代小震活动区的长轴,约65km。

其次,本区还有一组北西向断裂,它与北东向震源破裂面相交,地震发生时也发生了减震作用。因此,本区以1918年7¼级大震震中为中心,长轴65km,短轴45km的椭圆形面积范围内,和大震震源区一样今后长期处于减震阶段,不会重复发生大震,属大震安全区域(图1)。

2 琼北地区

1605年7月13日在海南琼山—文昌间发生了7½级地震,震中区及其周围(包括琼北大区)是第四纪玄武岩浆喷发区,形成现今一望无际的火山岩低丘台地,最后一期岩浆喷发属全新世雷虎岭期橄榄拉斑玄武岩(Q_4),这一期岩浆喷发主要分布在震源区西侧,与张裂环境下的大陆裂谷作用有关(图3)。根据深源包体研究显示^[6],岩浆形成温度为1000—1400℃,压力20000—38000bar(1bar = 10^5 Pa)相当地下65—130km的范围;玄武岩 $87_{Sr}/86_{Sr}$ 初始值为0.70299—0.73066^[4]。上述说明岩浆来源于上地幔,系陆壳不断解体造成的。由于上地幔和下部地壳物质分异,形成上地幔隆起,在地表也造成同步隆起,致使震源区西侧形成第四纪蚂蝗岭穹窿构造地形^[7]和福山热水盆地。

由于区域构造应力场在一定时期内不变,物质分异造

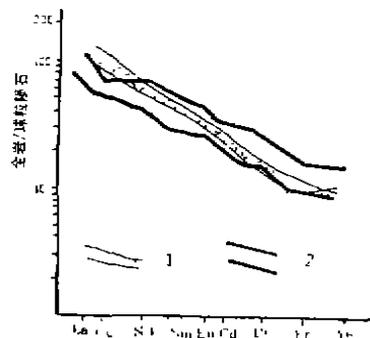


图3 琼北玄武岩球粒陨石标准化的稀土元素配分型式

- 1 大陆裂谷玄武岩(据 Su. s. s., 1975)
- 2 琼北玄武(据广东省地矿局区测队, 1984)

Fig. 3 REE distribution pattern in northern Hainan basalt

4. 邹和平, 海南岛北部晚新生代构造演化, 1984.

成上地幔隆起产生的垂直作用力是变化的, 它与区域构造应力场水平作用力迭加后, 水平剪切应力可有变化, 我们在文献^[13]指出, 迭加形成的水平剪切应力最大的构造部位在上地幔隆起的边缘, 即 1605 年凉山地震震源的位置。根据我室人工地震探测结果, 在这个震源上部地下 6—11km 范围内存在一低速层。对低速层的形成目前有两种不同看法, 一些学者认为它是地下局部熔融引起的, 当岩石中存在 3% 熔融物质时即可造成低速层; 另一些学者则认为它是高温、高压下含水矿物脱水引起的。上述两种意见, 虽然观点不同, 但都承认它存在高温流体。如果这种流体在大震发生前存在, 则当时的震源是处于高温弹—塑性变形阶段, 在这种状态下是不可能积累大的剪切应力发生一次 7½ 级大震的, 实际上在地下 10km 左右也不可能产生局部熔融或出现含水矿物脱水现象。显然, 这个低速层是大震发生后, 由上地幔分异的玄武岩浆或“岩汁”沿着震源破裂面上涌并在震源上部地下 6—11km 的范围形成厚 1—3km 的低速层 (5.5km/s)。据杰格尔 (Jaeger, 1957) 对岩浆结晶速率的研究表明, 一个厚约 8.045km (即 5 英里) 的大岩基, 所需要的结晶时间约为 10 百万年; 一个厚约 2km 垂直产状的花岗岩墙, 在温度 800℃ 侵入于温度为 100℃ 的围岩中, 在 600℃ 完全结晶时需 6.4 万年时间; 一个厚约 700m 水平产状的玄武岩浆, 在 350m 岩层覆盖下, 温度 850℃ 完全结晶, 需要 9000 年。由此可见, 要使本区地下 6—11km, 厚 1—3km 由玄武岩浆或“岩汁”充填形成的低速层完全结晶成岩石, 则需经历一个漫长的时间, 在这段时间内, 整个震源及其周围处于弹塑性阶段, 不可能积累巨大应力发生一次大震。在这个减震阶段内, 只能以小震或中强地震的活动特点来显示这一弱化区。

3 泉州海外区

1604 年 12 月 19 日在本区发生了 8 级地震, 由于地震发生在海域至今人们研究得甚少, 但从仅有的陆地地震史料勾画出来的半边烈度等震线图 (图 4), 可以看出, 地震震中位于北纬 25.0° 东经 119.5° 的位置, 发震构造是北东向的南澎—兄弟屿断裂。目前震中区现代小震活动相当集中 (图 2), 小震活动区长轴走向北东, 长度约 180km, 与南澎—兄弟屿断裂在本区的分布方向一致。按照 M 与震源体线性尺度 L 之间的关系式求得相应震级为 8 级, 与历史震级相同。

1604 年泉州海外 8 级大震发生后, 距今已经 388 年, 震源区仍有较多小震活动, 说明震源体完整性尚未完全恢复, 仍可视为弱介质地区。

震源破裂面重新闭锁, 尚需要一段时间。该区与南澳—南澎历史震源区同处在一条发震构造, 震源及其周围地区都具有喜山期岩浆分异的喷玄穴, 断裂运动速率相当。因此, 震源破裂面闭锁后重新积累应力至发生大震的时间, 与上述地区大致相同。这样, 在泉州海外历史大震震源区, 目前还处在减震阶段, 不可能发生大震, 今后在恢复过程中, 只能以

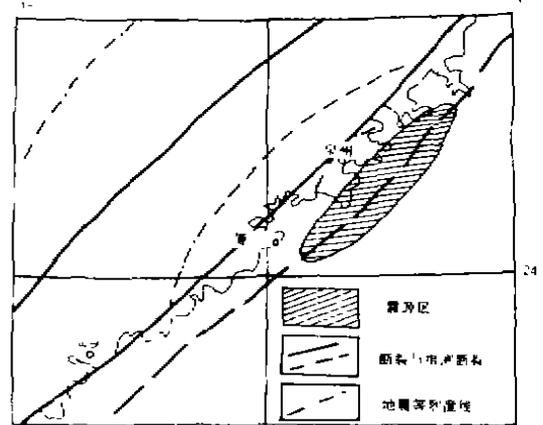


图 4 1604 年泉州海外历史震源区及地震等烈度线

Fig. 4 Focal zone and isoseismal lines of 1604 Quanzhou earthquake in offshore area

小震或中强地震的活动特点来显示这一弱化区。根据计算,在这个历史震源区的两侧,垂直距离 90km 的平行断裂也发生了减震作用,所以与之平行的长乐—南澳断裂(图 4)至今没有发生过 6 级以上地震,它的减震时间长短与 1604 年历史震源区相同。

4 问题讨论

上述东南沿海地震带三个历史大震震源区及其周围,目前均处在减震阶段,属地震安全区域。过去,我们曾经指出过^[9]潮汕地区有喜山期玄武岩浆喷发,它是强震始发点喷玄穴位,其通道可插入到软流圈,1600 年 9 月 29 日发生 7 级地震,震后沿着震源破裂面深部的弹塑性层迁移,并于 1604 年 12 月 19 日触发福建泉州海外喷玄穴位发生 8 级地震,然后又以同样方式触发琼北喷玄穴位,结果在 1605 年 7 月 13 日发生了 7.5 级地震,从而结束了这个地震旋回。但是,1918 年 2 月 13 日在南澎附近同一个震源区内又发生了 $7\frac{1}{4}$ 级地震,为什么这次地震没有触发泉州或琼北这两个历史震源区发生强震呢?这就涉及到减震作用的问题。如前所述,泉州海外和琼北历史震源区至今未完全恢复完整性或积累应力不多,还处在减震阶段,虽有 1918 年南澳—南澎 $7\frac{1}{4}$ 级大震发生,也未能触发这两个喷玄穴位发生大震。因此,能否触发大震发生决定因素是所在地区减震阶段是否已经结束,现今剪切应力强度是否超过岩石耐剪强度,触发只是一种外因条件。上述讨论的范围只限于东南沿海地震带几个历史大震震源区及其周围的地震重复性和大震减震作用,对于整个地震带其它构造部位是否潜在发生大震的危险性并没有讨论。在我国大陆地震断裂带内,它往往是分段破裂(一次地震事件)贯通全程完成一次构造运动的^[10],因此,在一条地震断裂带内,已经发生大震的历史震源区不但可以重复破裂发生大震,而且在未发生破裂的地段更有可能破裂发生大震。这些地段能否发生取决于它的地震地质和地球物理背景。例如泉州海外和南澳—南澎两个历史大震震源区之间一段的南澎—兄弟屿断裂,由于其两端正处在减震阶段,属弱介质区,给南澎—兄弟屿断裂中间地段发生破裂提供了让位条件。

在这一地段西侧即云霄—厦门之间存在上地幔隆起,出现有低速层变线、增厚现象,地表上分布有上新世—更新世拉斑玄武岩⁵⁾;同时,根据蔡晋安等同志对台湾海峡及其邻近地区震源深部构造层析成像分析:在泉州海外八级地震震源区,上地幔存在东西向椭球体低速层隆起,表明在这一地段西侧和东北端,上地幔和下地壳物质分异十分强烈,由此引起两个历史震源之间的地段水平剪切应力增大,使这一地段容易形成大震震源。因此,在这一地段有潜在大震震源和未来发生大震的可能性。目前,在这一地段小震活动比较频繁(图 2),它是一种弱介质区的反映?还是大震前一种小震活动加强现象?有待于进一步研究。

5) 章慧芳,中国东南沿海地区泉州爆破深地震测深资料的再解释,1989.

参 考 文 献

- 1 陈家超, 等. 利用现代小震活动资料确定我国大陆浅源历史大震震源区及判定潜在震源(英文稿). 西北地震学报, 1992, 14 (1).
- 2 李善邦, 等. 中国地震目录. 科学出版社, 1950.
- 3 秦保燕、陈家超, 等. 利用现代小震活动性资料确定历史大震震源区. 地震, 1989 (1).
- 4 杨义全. 广东省南澎小震与 1918 年的大震. 华南地震, 1985, 5 (1).
- 5 郭增建、秦保燕. 平行断层之间的相互影响—减震作用. 青藏高原地震文集, 第 1 辑, 1986.
- 6 中国科学院南海海洋研究所海洋地质研究室. 南海地质构造与陆缘扩张. 科学出版社, 1988.
- 7 杨美娥, 等. 琼北地区第四纪火山活动与断裂活动关系的探讨. 海南岛北部地震研究文集, 地震出版社, 1988.
- 8 陈家超, 等. 地壳下部及上地幔物质分异作用对地震成因机制的影响. 西北地震学报, 1985, 7 (1).
- 9 郭增建, 等. 新生代以来玄武岩喷发区与震中迁移始发点—兼论三层模式. 西北地震学报, 1988, 10 (增刊).
- 10 丁国瑜. 全新世断层活动的不均匀性. 中国地震, 1990, 6 (1).

RECURRENCE AND ATTENUATION OF MAJOR EARTHQUAKES IN SOUTHEAST CHINA COASTAL SEISMIC BELT

Chen Jiachao and Feng Xiaying

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

Abstract

In a material differentiation point of view and from the data of recent small seismic shocks, this paper deals with the recurrence and attenuation of major earthquakes ($M \geq 7$) in the focal zones in Southeast China coastal seismic belt. It indicates that these historical focal zones are still in an attenuation stage. These seismic attenuation zones are characterized only by small or moderately strong earthquakes in a relatively long period to come.

Key words: Material differentiation; Attenuation of major earthquakes; Southeast China coastal seismic belt; China