

李盛, 张慧, 李志雄, 等. 东南沿海地区中强地震震前地震矩释放研究 [J]. 华南地震, 2018, 38 (1): 31–38. [LI Sheng, ZHANG Hui, LI Zhixiong, et al. Analysis on Earthquake Moment Release Before Middle–strong Earthquakes in Southeast Coastal Areas[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1):31–38.]

## 东南沿海地区中强地震震前地震矩释放研究

李 盛, 张 慧, 李志雄, 郭昱琴  
(海南省地震局, 海口 570203)

**摘要:** 对 1970 年以来东南沿海地震地区的中强地震的地震前矩释放进行研究, 获取了东南沿海地区 18 次  $M_L \geq 5.0$  以上地震前一定搜索半径内 (100 km 和 150 km) 地震矩释放的空间分布图和时序变化图。结果表明: 在搜索半径内地震目录 G 关系符合线性特征的情况下, 当搜索半径为 100 km 时, 12 个地震震前存在地震矩加速释放现象; 当搜索半径 150 km 情况时, 9 个地震震前存在地震矩加速释放现象。因此, 相对而言, 搜索半径为 100 km 时, 存在地震矩加速释放现象的地震比例更高。

**关键词:** 地震矩; 搜索半径; 加速; 减速

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2018) 01-0031-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.004

## Analysis on Earthquake Moment Release Before Middle–strong Earthquakes in Southeast Coastal Areas

LI Sheng, ZHANG Hui, LI Zhixiong, GUO Yuqin  
(Hainan Earthquake Agency, Haikou 570203, China)

**Abstract:** This paper studies the earthquake release before middle–strong earthquakes in southeast coastal areas of China from 1970, and obtains the spatial distribution and time series variation of earthquake moment release of 18 earthquakes with  $M_L \geq 5.0$  in southeast coastal areas within searching radius (100 km and 150 km). The results show that in the case that the earthquake catalog within searching radius of the G–R relationship conforms to the linear feature, when the searching radius is 100 km, there are 12 earthquakes with accelerating moment release (AMR) before the earthquakes; when the searching radius is 150 km, there are 9 earthquakes with accelerating moment release (AMR) before the earthquakes. So, relatively speaking, the number of earthquakes with AMR within 100 km is higher.

**Keywords:** Seismic moment; Search radius; Accelerate; Decelerate

收稿日期: 2016–11–26

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(编号: XH15034Y)和海南省地震局科研课题(编号: HDKJ201608 和 HDKJ201711)

作者简介: 李 盛(1986–), 男, 工程师, 主要从事地震活动性研究和地震重力观测分析。

E-mail: lishiyuan@163.com.

## 0 前言

根据临界点理论,地震的孕育过程是一种临界现象<sup>[1]</sup>,这一临界现象的典型特征是大地震之前往往存在地震活动的相关长度增长及主震周围矩释放加速 (accelerating moment release, 简称为 AMR) 现象。Bowman 等<sup>[2]</sup>研究发现,几次大震前震源区地震能量会出现明显幂率加速释放过程,符合临界理论的标度率,进而使用震前累积应变释放曲线的幂率拟合和线性拟合的均方根残差比最小来定量描述 AMR 的“临界”时空尺度。随后人们对世界上其他地区的震例进行了类似的研究, Sykes 和 Jaume<sup>[3]</sup>研究表明美国旧金山几次强震前都有 5.0 级左右中等地震活动的矩释放加速过程; Knopoff 等指出在 1941—1993 年间加利福尼亚州所有 6.8 级以上的地震发生前都伴随着震中区附近 5.1 级以上地震活动的增强<sup>[4]</sup>; Ellsworth 等指出,强震前小震发生率并没有明显变化,而中等地震的累积应变能呈指数增长<sup>[5]</sup>。我国地震学家在长期预报研究实践中也将 AMR 现象作为强震预测的主要前兆之一<sup>[6]</sup>。杨文政和马丽用类似方法对中国震例开展研究,发现三分之二以上的中强震在震前较长时间均出现了地震矩释放加速的现象<sup>[7]</sup>。蒋长胜等研究指出,中国大陆有 60% 的  $M_s \geq 6.0$  地震前存在稳定的地震矩释放加速特征,但在多时、空尺度的二维空间,一些地震前的矩释放表现出加、减速交替出现的复杂现象<sup>[8]</sup>。更有研究表明,主震前临界区范围内地震活动呈现加速释放,而在较小的孕震区范围则出现地震活动的减弱态势<sup>[9]</sup>。李宇彤等经研究认为东北地区中强地震前普遍存在一定程度的 AMR 现象,并与地震的孕育过程物理上相关,地震矩释放程度时-空扫描方法对寻找未来的中强震破裂成核点具有一定的应用潜力<sup>[10]</sup>。李霞等对 1989 年以来华北地区的 12 次  $M_s \geq 5.0$  中强地震前的矩加速释放现象进行了研究,表明  $M_s$  5.6 ~ 6.4 地震前 67% 的震例在震中附近出现稳定和集中分布的矩释放加速区域,说明华北地区  $M_s \geq 5.5$  中强震前 AMR 现象具有一定程度的普遍性<sup>[11]</sup>。

基于地震矩释放研究对震例总结和地震趋势判定的重要意义,本文将对东南沿海地震带的中强历史地震的地震前矩释放进行回溯性研究,提取中强地震发生前的地震矩释放的变化特征,以检验 AMR 现象在东南沿海地区中强地震前是否具有普遍的前兆意义。

## 1 地震矩加速释放 (AMR) 的物理意义

一些物理学家认为 AMR 现象可作为一种中期地震前兆<sup>[12]</sup>。Varnes<sup>[13]</sup>、Bufe 和 Varnes<sup>[14]</sup>将重整化群的思想应用到 AMR 研究中,提出破裂时间分析 (time-to-failure analysis) 方法,通过 AMR 来预测强震的发生时间和震级。地震的“破裂时间分析方程”一般可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\Sigma \Omega = A + B(t - t_f)^m \quad (1)$$

式(1)中,  $\Omega$  是地震活动性的量度,例如标量地震矩、地震辐射能量、地震数或 Benioff 应变等,这里使用 Benioff 应变;  $A$  和  $B$  为常数;  $t_f$  是大地震发生的时间,其中幂指数  $m$  称为标度常数,用以定量描述矩释放加速或减速的程度。由式(1)可知,  $m$  值的大小可表示地震矩释放曲线的类型。当  $m < 1$  时,累积 Benioff 应变 (cumulative Benioff strain, 简称为 CBS) 释放曲线表现为加速行为;  $m > 1$  时为减速;而当  $m = 1$  时, CBS 释放曲线展示的是线性行为。

在累积 Benioff 应变计算中,由于采用了地方震震级  $M_L$ ,因此首先根据 Gutenberg 和 Richter<sup>[15]</sup>给出的经验关系将  $M_L$  折算成面波震级  $M_s$ :

$$M_s = 1.27(M_L - 1) - 0.016 M_L^2 \quad (2)$$

再利用 Kanamori<sup>[16]</sup>给出的经验关系将  $M_s$  转换为标量地震矩  $M_0$ :

$$\lg M_0 = 1.5 M_s + 9.1 \quad (3)$$

式(3)中,  $M_0$  的单位是  $N \cdot m$ 。根据经验关系由地震矩  $M_0$  计算出地震波能量  $E$ :

$$E = 5.0 \times 10^{-5} M_0 \quad (4)$$

Benioff 应变定义为地震波能量的平方根,利用式(1)可计算出常数  $A$  和  $B$ 、标度常数  $m$  以及地震的发生时刻  $t_f$ 。在后面的震例分析及地震趋势分析时,着重分析东南沿海地区中强地震前  $m$  值的时空分布。

## 2 东南沿海地震带概况

东南沿海地区的强震活动主要集中在东南沿海地震带,主要受控于 NE 向活动断裂组,其次为 NW 向活动断裂组。NE 向活动断裂组从东到西分别为滨海断裂带、长乐-诏安断裂带、政和-海丰断裂带、邵武-河源断裂带。其中, NE 向滨海断裂带 (南澳岛-福州以南段) 属于华南地块与南海地块的边界带,总体呈 NE 向展布,长 1000 多公里,宽约 500 km,涵盖了广东省、福建及广西和

海南部分地区。滨海断裂带是该区域最主要的强震发震构造带，多次发生 7 级以上大地震。内陆的长乐-诏安断裂带、邵武-河源断裂带、政和-海丰断裂带等在构造规模、新构造活动性方面均远次于滨海断裂带，最大地震强度仅为 6 级左右。东南沿海强震构造带的 NW 向次级活动断裂组也具有一定的控震作用。自有较完整地震记录的 1 400 年以来，东南沿海地区共发生  $M_s$  6.0~6.9 地震 23 次， $M_s$  7.0 以上地震 4 次。

3 东南沿海地区地震活动

在未删除余震的情况下，1970 年以来东南沿海地区共发生  $M_L$  5.0~5.9 地震 41 次， $M_L$  6.0~6.9 地震 3 次， $M_L$  7.0~7.9 地震 1 次。分别采用 K-K 法、C-S 法和 G-C 法删除余震，对未删除余震和删除余震后的地震目录进行 R/S 分析<sup>[17-18]</sup>，计算

Hurst 指数(见表 1)。从表 1 可见，删除余震后地震目录 Hurst 指数均小于原始目录的 Hurst 指数，且 K-K 法删除余震后的地震目录 Hurst 指数最小。这样根据 Feder<sup>[19]</sup>对 R/s 分析结果的统计解释，我们可以认为删除余震后的目录所反映的地震，比原始目录更接近无“记忆”性(随机)的泊松时间过程，这种接近的程度则取决于两者  $H$  值差别的大小。一般认为， $H$  值越接近 0.5，地震时间过程的独立性越强，从而删除余震的方法就越有效<sup>[20]</sup>。而 K-K 法对应的  $H$  值相对最小，说明 K-K 法在三种方法中是最为有效的删除余震方法。为此，本文为采用 K-K 法对 1970 年以来东南沿海地区  $M_L$  2.0 以上地震目录进行删除余震。K-K 法删除余震后，则发生  $M_L$  5.0~5.9 地震 26 次， $M_L$  6.0~6.9 地震 2 次， $M_L$  7.0~7.9 地震 1 次(见图 1)。地震分布主要集中在闽粤交界及其近海地区和粤桂琼地区。

表 1 地震目录的 Hurst 指数  
Table 1 The Hurst index of seismic catalog

地震目录	原始目录	K-K 法删除余震	C-S 法删除余震	G-C 法删除余震
Hurst 指数	0.737 3	0.621 4	0.646 7	0.647 6

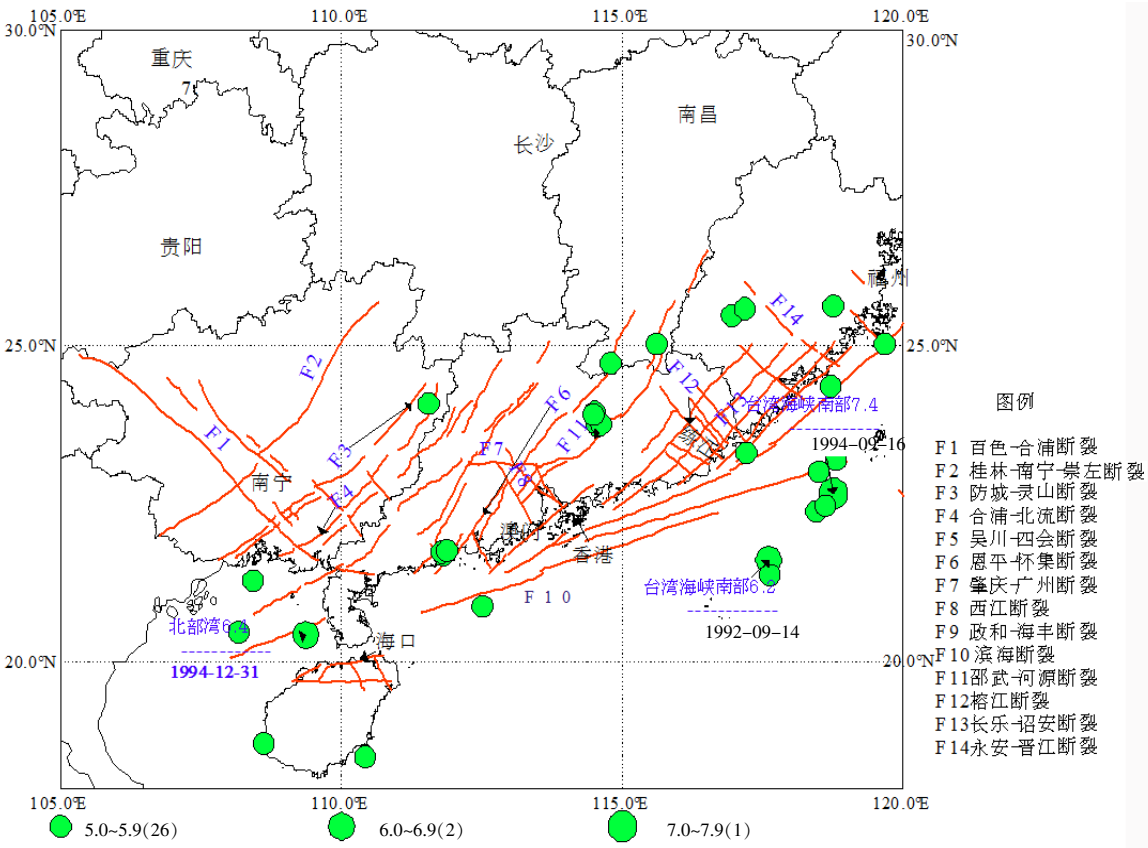


图 1 东南沿海地区震中分布图(地震删余，1970—2016， $M_L \geq 5.0$ )  
Fig.1 The epicentral distribution of southeast coastal areas in China  
(The seismic directory have removed aftershocks, 1970—2016， $M_L \geq 5.0$ )

## 4 东南沿海地震带 $M_L \geq 5.0$ 以上地震震前地震矩释放特征

### 4.1 资料的选取

在正式进行地震矩释放研究之前,首先要确定对哪些地震进行回溯性研究,也即确定研究主震的起始震级。同时,为避免地震序列中某些地震的余震对一定时间序列整体的矩释放规律的干扰,需先将地震序列中的余震删除。

Brehm 和 Braile<sup>[20]</sup>在研究新马德里地震带时,对前兆性地震序列的判别提出了两个准则。第一个准则是:主震前的事件在适当的时间段内是完整的(即震级-频度关系是线性的),其完整记录必须包括震级比主震震级小 2 个震级单位的所有事件。第二个准则是:无“干扰”事件,即发生在同时期、较小范围之内、具有相似震级的事件。Brehm 和 Braile(1998)在研究新马德里地震带时,将与主震差 1 个震级单位之内的事件作为“干扰”

事件。根据第一准则,由删余后东南沿海  $M_L$  2.0 以上地震(震中分布图见图 2)的震级-频度关系图(图 3),可知其震级-频度关系是线性的,也即东南沿海  $M_L$  2.0 以上地震目录是完整的,因此所选取的主震震级必须大于  $M_L$  4.0。而根据第二准则,对于一些双震类的地震类型,只研究前震的地震矩释放,如 1994 年 12 月 31 日北部湾  $M_L$  6.4 地震和 1995 年 1 月 10 日  $M_L$  6.4 地震是典型的双震,在此只对前震也即 1994 年 12 月 31 日北部湾  $M_L$  6.4 地震进行研究;类似情况还有 2012 年 2 月 16 日广东东源  $M_L$  5.1 地震和 2013 年 2 月 22 日广东东源  $M_L$  5.0 地震。综合上述准则和东南沿海地区地震分布情况,将主震震级确定为大于等于  $M_L$  5.0,前兆性地震序列时间长度确定为 10 年(1977 年 9 月 15 日闽粤交界近海  $M_L$  5.0 地震和 1977 年 10 月 19 日广西平果  $M_L$  5.4 地震因 1970 年以前地震目录资料不全,故前兆性地震序列时间长度不足 10 年,此为特殊情况)。

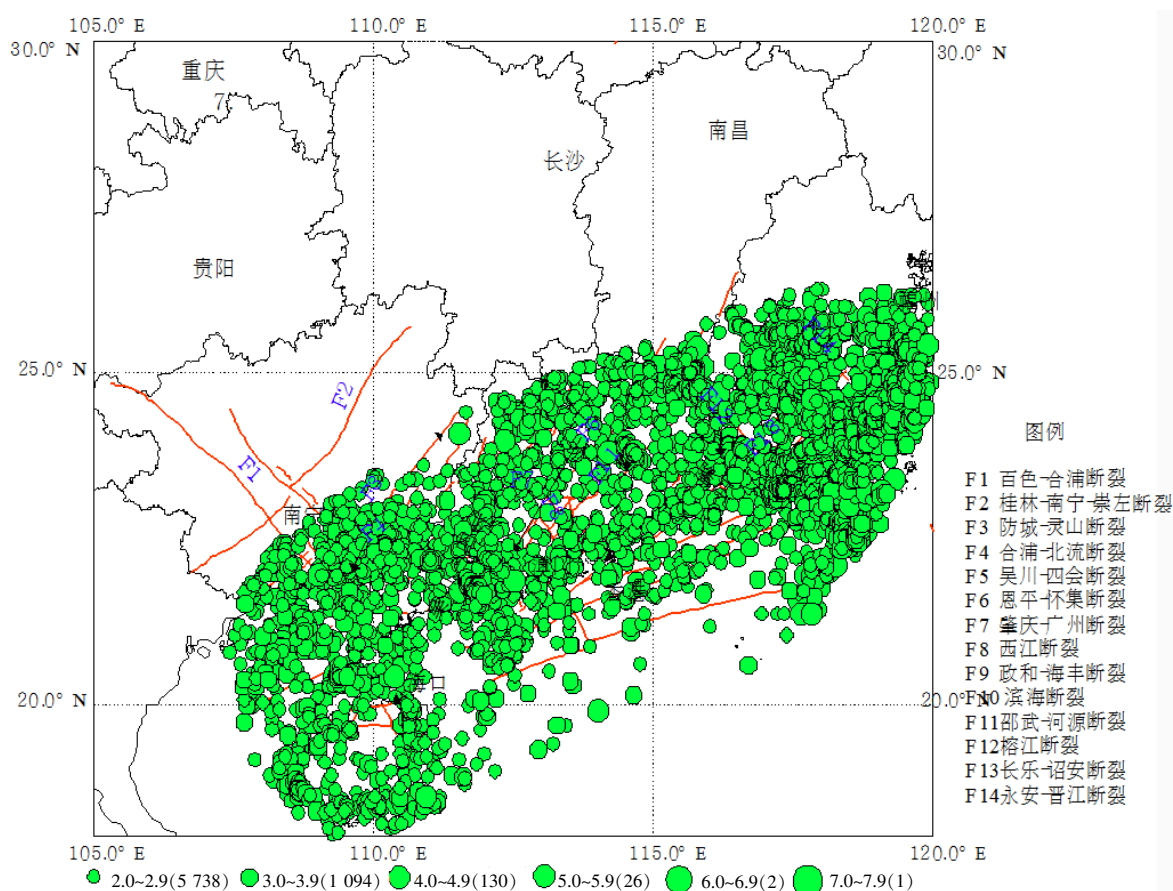


图 2 东南沿海地区震中分布图  
(地震删余, 1970—2016,  $M_L \geq 2.0$ )

Fig.2 The epicentral distribution of southeast coastal areas in China  
(the seismic directory without aftershocks, 1970—2016,  $M_L \geq 2.0$ )

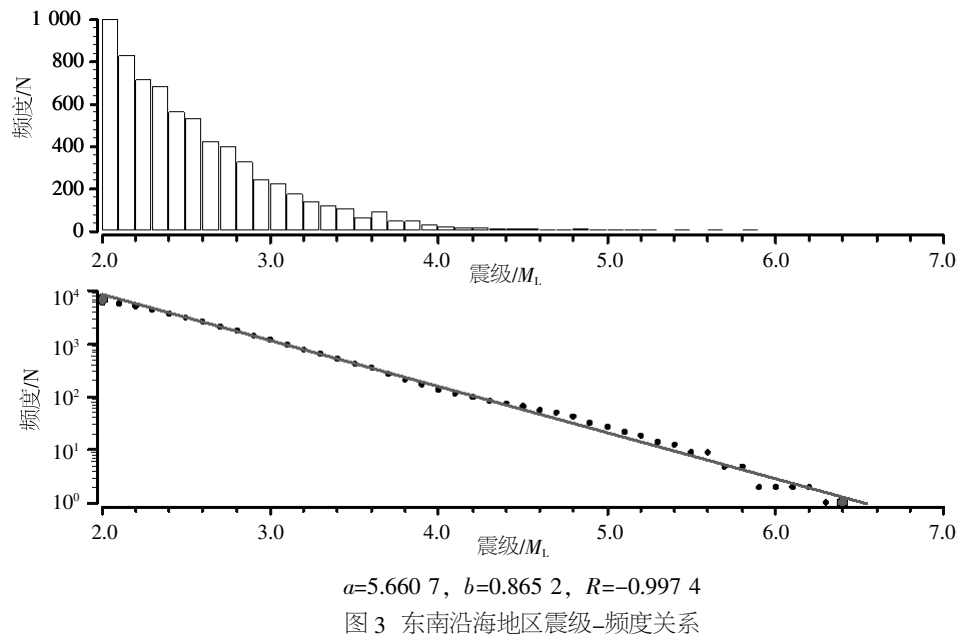


Fig.3 The G-R relationship of earthquake in southeast coastal areas of China

在“破裂时间分析”中，人们常用的确定“搜索半径”的方法，是将主震（“目标地震”）位置，作为区域中心，以对搜索半径内的矩释放进行时空分析。本文分别选择 100 km 和 150 km 作为搜索半径。

4.2 东南沿海地震带  $M_L \geq 5.5$  地震震前地震矩释放

1970 年以来东南沿海地区共发生  $M_L \geq 5.5$  地震 10 次，其中 5 次发生于台湾海峡及其南部区域，因靠近台湾岛一侧的小震目录不全，故不做研究。

表 2 东南沿海地区  $M_L 5.5$  以上地震震前地震矩释放特性

Table 2 The characteristic of AMR before earthquakes with $M_L \geq 5.5$ in southeast coastal areas of China							
序号	时间/(年-月-日 h:min:s)	震中地名	纬度/ (°)	经度/ (°)	震级/ $M_L$	加减速特征 (搜索半径 $R=100$ km)	加减速特征 (搜索半径 $R=150$ km)
1	1987-08-02 17:07:34	江西寻乌	25.03	115.60	5.6	加速, $m=0.79$	加速, $m=0.83$
2	1995-02-25 11:15:08	福建厦门近海	24.37	118.70	5.6	加速, $m=0.58$	加速, $m=0.51$
3	1994-12-31 10:57:16	北部湾	20.43	109.35	6.4	减速, $m=1.52$	减速, $m=1.75$
4	1997-05-31 14:51:01	福建龙岩	25.58	117.18	5.6	加速, $m=0.86$	加减速特征不明显, $m=1.06$
5	2016-07-31	广西苍梧	24.08	111.53	5.7	加速, $m=0.08$	加速, $m=0.42$

对其余 5 个  $M_L 5.5$  以上地震的 10 年尺度地震矩释放进行时间和空间分析。各地震震前地震矩释放特征详见表 1 震前前兆地震序列  $m$  值空间分布图和时序图(CBS 曲线) 在此以 1997 年龙岩  $M_L 5.6$  地震为例给出(见图 4 和图 5)。从表 1 可知，搜索半径为 100 km 的扫描结果显示 5 个地震中有 4 个地震震前存在地震矩加速释放的现象，占 80.0%，1 个减速；搜索半径为 150 km 的扫描结果显示 5 个地震中有 3 个地震震前存在地震矩加速释放的现象，占 60%，1 个减速，一个加减速特征不明显(该地震为 1997 年 5 月 31 日龙岩  $M_L 5.6$  地震)。从空间图来看震中分布并不一定在  $m$  值的低

值区域。

4.3 东南沿海地震带地震  $5.0 \leq M_L \leq 5.4$  震前地震矩释放

1970 年以来，东南沿海地区共发生  $5.0 \leq M_L \leq 5.4$  地震 19 次(删除余震)，其中符合条件(即符合前兆性地震序列的两个判别准则)进行地震矩加减速特性分析的地震有 14 个。根据 14 个地震的震前 CBS 释放曲线形态，得出这些的目标地震(主震)前 10 年的地震矩释放特征(见表 3)，1977 年 9 月 15 日闽粤近海  $M_L 5.0$  地震和 1977 年广西平果  $M_L 5.4$  地震因无 1970 年以前的地震目录，故 CBS 曲线时间长度不足 10 年。

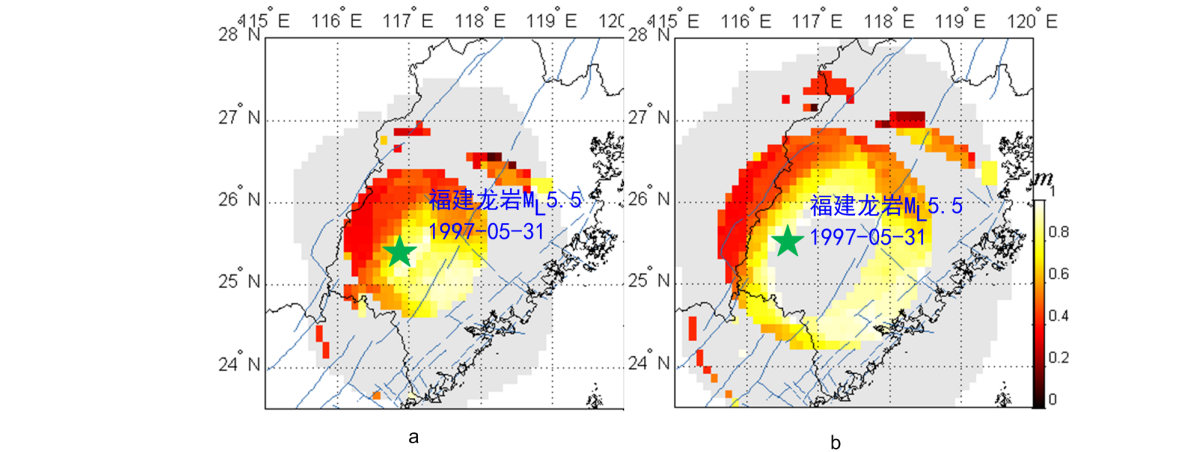


图 4 1997 年龙岩  $M_L$  5.6 地震前 10 年  $m$  值空间分布 (a 图  $R=100$  km, b 图  $R=150$  km)

Fig.4 The  $m$ -value distribution in 10 years before the Longyan earthquake in1997  
(the radius of Fig.6a is 100 km, the radius of Fig.6b is 150 km)

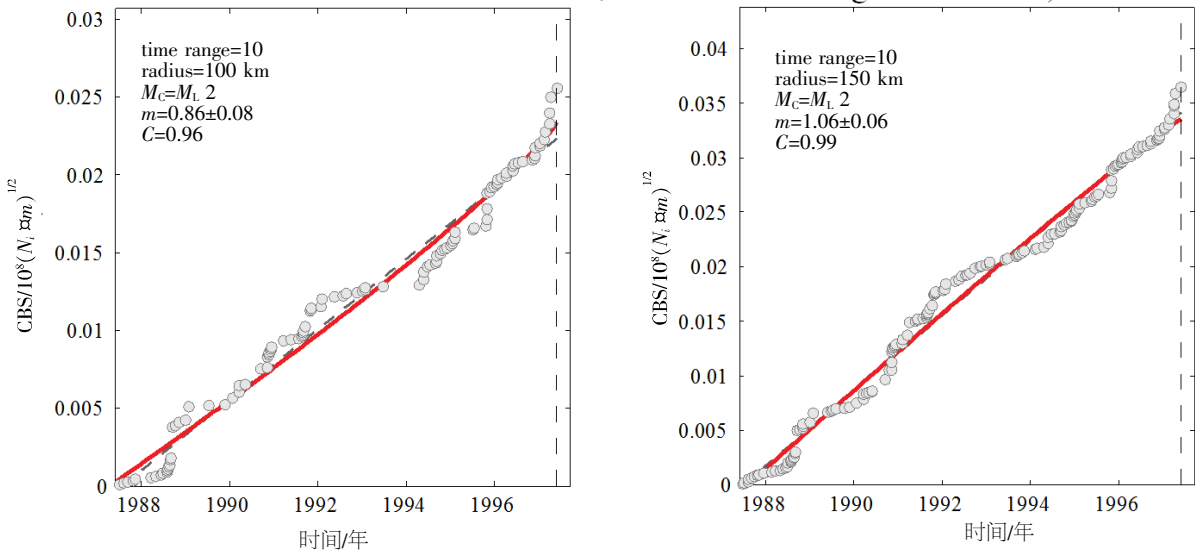


图 5 1997 年龙岩  $M_L$  5.6 地震前 10 年 CBS 曲线 (a 图  $R=100$  km, b 图  $R=150$  km)

Fig.5 The CBS curve in 10 years before the Longyan earthquake in1997  
(the radius of Fig.7a is 100 km, the radius of Fig.7b is 150 km)

表 3 东南沿海地区  $M_L$  5.0~5.4 地震震前地震矩释放特性

Table 3 The characteristic of AMR before $M_L$ 5.0~5.4 earthquakes in southeast coastal areas of China							
序号	时间/(年-月-日 h:min)	震中地名	纬度/ (°)	经度/ (°)	震级/ $M_L$	加减速特征 (搜索半径 $R=100$ km)	加减速特征 (搜索半径 $R=150$ km)
1	1977-09-15 10:33	闽粤近海	23.20	117.20	5.0	加速, $m=0.92$	减速, $m=1.03$
2	1977-10-19 10:44	广西平果	23.38	107.53	5.4	加速, $m=0.25$	加速, $m=0.27$
3	1982-02-25 08:39	江西龙南	24.73	114.78	5.4	减速, $m=1.20$	减速, $m=1.39$
4	1986-01-28 07:13	广东阳江	21.70	111.80	5.4	加速特征不明显, $m=0.97$	加速, $m=0.87$
5	1988-11-10 09:17	广西近海	21.28	108.42	5.4	加速, $m=0.94$	减速, $m=1.21$
6	1991-09-21 23:37	广东河源	23.73	114.55	5.0	减速, $m=1.33$	减速, $m=1.27$
7	1995-03-26 11:25	东沙	20.88	112.5	5.0	减速, $m=4.79$	减速, $m=1.10$
8	1996-06-05 08:16	海南南方近海	18.70	108.6	5.2	加速, $m=0.35$	加速, $m=0.34$
9	1999-05-07 11:29	海南陵水近海	18.50	110.42	5.3	加速, $m=0.20$	加速, $m=0.46$
10	1999-08-20 01:14	广东河源	23.75	114.63	5.1	加速, $m=0.51$	加速, $m=0.57$
11	2004-09-17 02:31	广东阳江	21.77	111.87	5.2	减速, $m=1.41$	减速, $m=1.31$
12	2007-03-13 10:22	福建南平	26.72	117.73	5.1	加速, $m=0.52$	减速, $m=1.46$
13	2012-02-16 02:34	广东河源	23.95	114.50	5.1	减速, $m=1.81$	减速, $m=2.03$
14	2013-09-04 6:23	福建仙游	25.64	118.75	5.2	加速, $m=0.71$	加速, $m=0.92$



与分析东南沿海地区  $M_L 5.5$  以上地震震前地震矩释放特征时一致,在对震前地震目录进行扫描计算之前,先对每个主震搜索半径内的前兆地震序列进行 G-R 关系研究,结果显示各搜索半径内的地震序列 G-R 关系均呈线性。从 14 个地震的 CBS 释放曲线加减速特征统计来看,在搜索半径为 100 km 的情况下,8 个地震震前地震矩呈释放呈加速状态,

占 57.1%, 5 个地震震前呈减速状态,占 35.7%, 1 个地震震前 CBS 曲线几乎呈线性,加减速特征不明显;而在搜索半径为 150 km 的情况下,6 个地震震前呈加速状态,占 42.9%, 8 个呈减速状态,占 57.1%。在此以 2004 年 9 月 17 日广东阳江  $M_L 5.2$  地震为例给出震前前兆地震序列  $m$  值空间分布图和时序图(CBS 曲线)(见图 6 和图 7)。

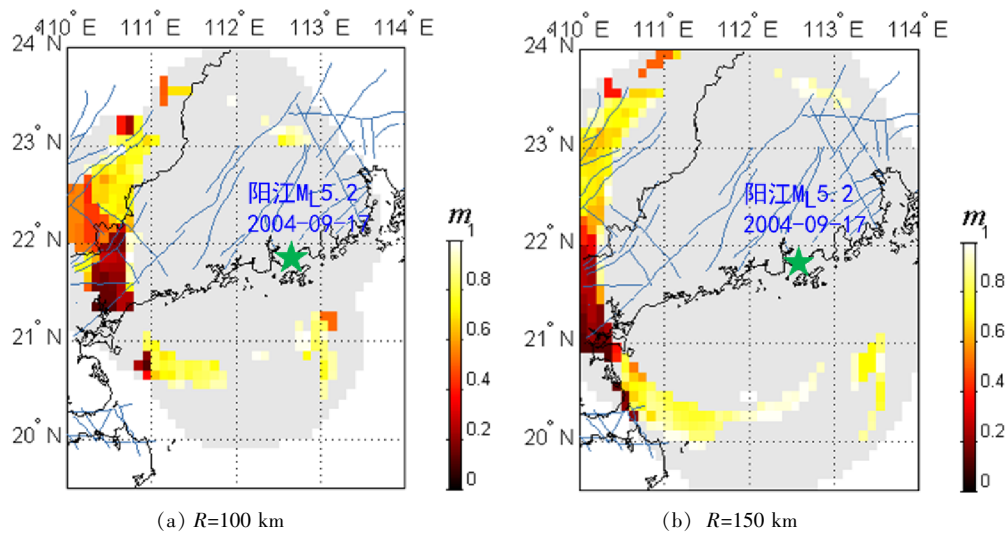


图 6 2004 年 9 月 17 日广东阳江  $M_L 5.2$  地震前 10 年  $m$  值空间分布  
Fig.6 The  $m$ -value distribution in 10 years before the Yangjiang earthquake in 2004

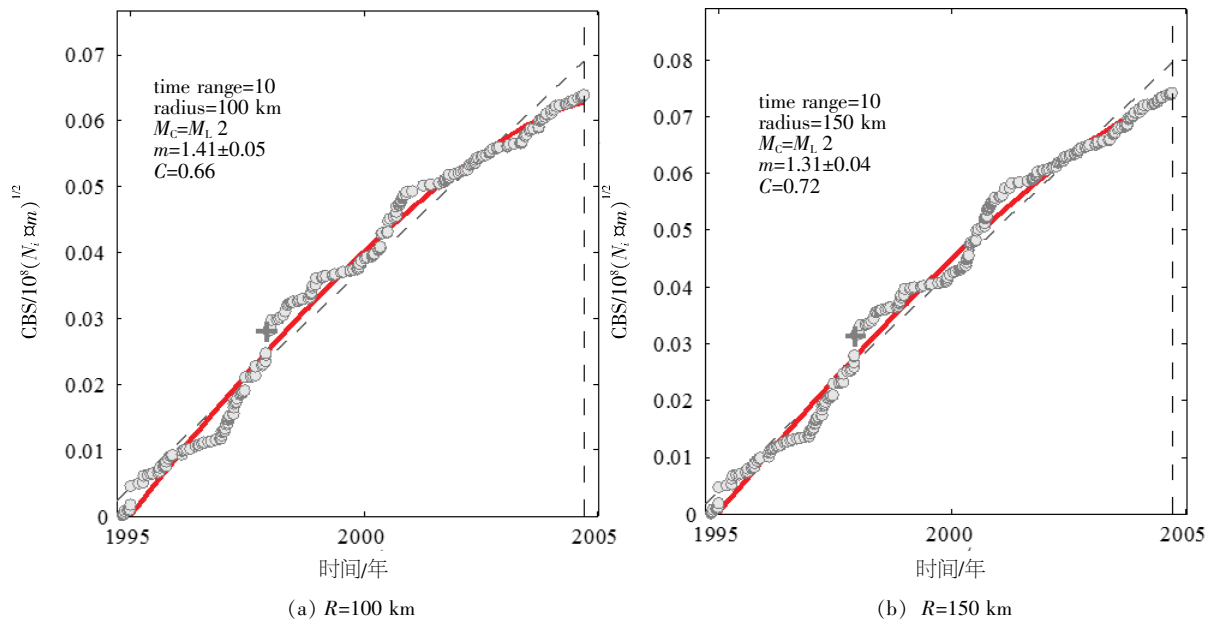


图 7 2004 年 9 月 17 日广东阳江  $M_L 5.2$  地震前 10 年 CBS 曲线  
Fig.7 The CBS curve in 10 years before the Yangjiang earthquake in 2004

## 5 结论

地震前的 AMR 现象是近年来受到普遍关注的一种用于预测中强震发生的方法,由于这种方法

的明显的应用潜力,对东南沿海地区 AMR 现象是否具有普遍性问题进行讨论是必要的。本文的研究结果表明:

(1) 对于东南沿海地区  $M_L$  5.5 以上地震, 在搜索半径为 100 km 的情况下, 震前存在 AMR 现象的占比达到 80%, 处于绝对多数的情况; 而搜索半径为 150 km 的情况下, 存在 AMR 现象的占比达到 60%。对于东南沿海地区  $M_L$  5.0~5.4 地震, 在搜索半径是 100 km 情况下, 存在 AMR 现象的占比达到 57.1%, 而在搜索半径是 150 km 情况下, 存在 AMR 现象的占比达到 42.9%。因此对于  $M_L$  5.5 以上地震, AMR 现象具有一定的普遍性, 而  $M_L$  5.0~5.4 地震, 存在 AMR 现象的地震比例下降; 同时, 在主震目录相同的情况下, 前兆地震序列的搜索半径等于 100 km 比搜索半径等于 150 km 时主震目录存在 AMR 现象的比例更高, 但是否搜索半径越低, 存在 AMR 现象的地震的比例更高, 还需今后进一步的分析确认。

(2) 主震的震中位置并非都位于地震矩释放空间扫描所得的  $m$  值低值异常区(仅对搜索半径为 100 km 和 150 km 两种情况而言), 对应用震前地震矩释放加速预测未来地震震中的位置仍有一定难度, 但可用于被其他地震预测研究方法判定为中强地震危险区的区域进行矩释放空间扫描, 以确定危险区内是否存在 AMR 现象, 增加趋势判定的依据和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] Vere-Jones D. Statistical theories of crack propagation[J]. Mathematical Geosciences, 1977, 9(5):455-481.
- [2] Bowman D D, Ouillon G, Sammis C G, et al. An observational test of the critical earthquake concept [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1998, 103 (10):24 359-24 372.
- [3] Sykes L R, Jaumé S C. Seismic activity on neighbouring faults as a long-term precursor to large earthquakes in the San Francisco Bay area[J]. Nature, 1990, 348(6302):595-599.
- [4] Knopoff L, Levshina T, Keilis-Borok V I, et al. Increased long - range intermediate - magnitude earthquake activity prior to strong earthquakes in California [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1996, 101 (B3):5 779-5 796.
- [5] Ellsworth W L, Lindh A G, Prescott W H, et al. The 1906 San Francisco Earthquake and the seismic cycle [J]. Am. geophys. union Maurice Ewing Monogr, 1981, 22 (3):396-398.
- [6] 刘蒲雄. 强震前地震活动增强特征[J]. 地震, 1982(2):6-8+21.
- [7] 杨文政, 马丽. 地震活动加速模型及其在中国的应用[J]. 地震学报, 1999(1):32-41.
- [8] 蒋长胜, 吴忠良. 强震前的“加速矩释放”(AMR)现象:对一个有争议的地震前兆的回溯性震例研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(3):691-702.
- [9] 苗青壮, 蒋海昆. 地震临界现象及相关尺度增长定量检测方法研究综述[J]. 地震, 2008, 28(2):79-86.
- [10] 李宇彤, 蒋长胜. 东北第五活跃期中强震前的矩释放空间扫描特征研究[J]. 地震学报, 2010, 32(6):680-695.
- [11] 李霞, 蒋长胜, 闫德桥, 等. 1989 年以来华北地区中强震前地震矩加速释放空间扫描特征的研究 [J]. 地震研究, 2015, 38(3):359-369.
- [12] Sornette D, Sammis C G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes; implications for earthquake predictions [J]. Journal De Physique I, 1995, 5(5):607-619.
- [13] Varnes D J. Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity [J]. Pure and Applied Geophysics, 1989, 130(4):661-686.
- [14] Bufe C G, Varnes D J. Predictive modeling of the seismic cycle of the Greater San Francisco Bay Region[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1993, 98 (B6):9 871-9 883.
- [15] Gutenberg B, Richter C F. Magnitude and energy of earthquakes[J]. Science, 2010, 83(2 147):183.
- [16] Kanamori H. The Energy Release in Great Earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1977, 82 (82):2 981-2 987.
- [17] Lloyd E H, Hurst H E, Black R P, et al. Long - term storage; an experimental study [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1966, 129(4):591.
- [18] Hurst H E. Long - term storage capacity of reservoirs. Trans, Am, Soc, Civ, Eng., 1951, 11:770-808.
- [19] Feder J. Fractals[M]. New York and Lndon: Plenum Press, 1988
- [20] 陈凌, 刘杰, 陈颢, 等. 地震活动性分析中余震的删除 [J]. 地球物理学报, 1998(s1):244-252.
- [21] Lwbraile D. Intermediate - term earthquake prediction using precursory events in the New Madrid seismic zone [J]. Translated World Seismology, 1999, 88(2):564-580.