

文章编号: 0253-3782(2006)05-0529-11

地震矩比成像算法的发展及应用^{*}

黄建平^{1, 2)}, * 马丽¹⁾ 张晁军^{1, 2)}

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100049 中国科学院研究生院

摘要 以伤口愈合理论为基础的地震矩比成像算法, 把每次大震的能量按照一定的原则在其周围分配, 分析地震矩比 \mathcal{R} 值随时空变化的特征, 从而找出地震矩比 \mathcal{R} 值与强震的对应关系. 本文以中国地震目录分别作分区、震源深度分析和记录完整性分析, 应用调整了参数的地震矩比成像算法, 分析了 1966 年以来中国不同地区 7.0 级以上地震前, 震中及其周围 \mathcal{R} 值对应的异常演化过程, 发现通过分析 \mathcal{R} 值异常的时空变化, 能够定量化确定未来大震的空间范围和时间迫切程度. 结果显示, \mathcal{R} 值的时空变化能够定量反映大震发生的时空要素, 而且 \mathcal{R} 值的变化特征能够反映介质破裂的规律.

关键词 地震矩比成像算法 愈合 定量分析 中国强震

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A

引言

一次地震发生以后, 由于地壳破裂而释放能量, 区域应力场将发生调整, 震中区的应力状态相对较弱, 而附近地区地壳介质所承受的应力将相对增强. 当多次中小地震发生后, 由于每次地震的影响效应, 将形成一个或多个新的应力集中区. 而这个综合影响的效果可与未来发生的每一次地震的时间、地点、强度有关, 它是每次地震的参数的函数, 未来地震将是这一综合影响的结果(中国地震局监测预报司, 2002). 这是把已经发生的地震对区域应力场的影响作为导致发生强震的“因”, 从这样的角度出发人们基于不同的物理模式提出了多种预测方法.

自 1965 年 Fedotov(1965)给出空区定义以来, 应用地震空区研究未来区域地震危险性的中长期地震预报一直是个研究热点且不断变化(Mogi, 1979; 陆远忠等, 1982, 1983; Nishenko, 1985; 韩渭宾等, 1989; Wyss, Wiemer, 1999)的课题. 王炜等提出了地震危险度 D 值(王炜, 刘震华, 1987)、地震强度因子 M_f 值(王炜等, 1994)、地震空间集中度 C 值(王炜等, 1999a)、地震活动因子 A 值(王炜等, 1999b)等一系列指标判断阶段异常, 并用于地震中期和中短期预报.

尹祥础和尹灿(1991)、尹祥础等(1994)提出了加卸载响应比理论, 以孕震地区的加卸载响应比 Y 值来刻画地震的演化过程, 而 Y 值能够在一定程度上定量地度量孕震区介质的孕震进程, 因此可能对地震进行预测. 而 Keilis-Borok 等提出的 M_8 算法, 使用 7 个函数来

* 自然科学基金项目(40574020, 10371012)和中国地震局地震预测研究所青年基金项目(140102-06-134-06)资助.
2005-11-23 收到初稿, 2006-06-12 决定采用修改稿.

* 通讯作者. E-mail: huangjianping@seis.ac.cn

刻画 8 级以上大震前的各种地震活动, 以寻找确定概率增长时间(Keilis-Borok, Kossobokov, 1990; Ma, Vere-Jones, 1997). 前兆逆向追踪法(Keilis-Borok *et al*, 2004)则是运用 8 个函数刻画地震活动性变化, 从而判定大震发生的可能性.

Lomnitz(1985)分析了智利和墨西哥地区强震($M \geq 7$)的震中位置与后续地震的破裂方向之间的关系, 基于能量交换和地幔对流, 提出了愈合的概念解释后续地震的震中位置和破裂尺度. 进而, Lomnitz(1993, 1994, 1996a)提出了地震矩比成像算法(moment ratio imaging, 简称 MRI). 通过计算标准化的残留地震矩, 分析了智利、墨西哥和日本地区大震前地震矩比 \mathcal{R} 值的变化, 发现 \mathcal{R} 的高值与未来大震有较好的对应关系.

本文特引用 MRI 算法, 以 1966 年以来中国发生的 7.0 级以上地震为研究目标地震, 从不同角度寻找适合中国的算法参数, 分析大震前 \mathcal{R} 值的时空变化特征.

1 地震矩比成像算法

1.1 基本原理

假定在 $t=0$ 时刻发生了一次地震, 地震矩为 M_0 , 由于 M_0 等于破裂面积乘以位错量, 而一般都不能直接得到这两个量的测量结果, 则最好的办法就是用 M_0 来等效代替破裂的面积, 这个破裂面积就是一个伤疤. 当这个伤疤愈合时, 它的大小随着时间按指数衰减, 即

$$m_0(t) = M_0 \exp\left(-0.69315 \times \frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

其中, M_0 是初始时刻的地震矩, 即初始时刻伤疤的大小. 常数 -0.69315 即 $\ln(1/2)$, 当 $t = \tau$ 时, $m_0 = M_0/2$, 即得到该常数. τ 表示地震矩 M_0 的半衰期, 即 m_0 变为 M_0 一半的时候经历的时间. m_0 称为该地震经过 t 年后的残留地震矩.

方程(1)描述的是单次地震的愈合情形. 但是地震的发生不是孤立的, 是受到构造体系内部以及构造块体之间的各种作用下产生的. 一次地震的产生也必将在周围地区产生影响, 表达这种影响的形式之一是把地震矩 M_0 在震中周围一定范围内, 按照某个原则进行分配.

进一步, 假定地震破裂的过程是一个地震矩异常在时空上线性叠加的过程, 就得到在一个连续的板块边界上的结果, 即

$$m_0(t) = M_0 \exp\left(-0.69315 \times \frac{t}{\tau}\right) + \sum_{j=1}^i M_{0j} \exp\left(-0.69315 \times \frac{t-t_j}{\tau}\right) \quad (2)$$

式中, $M_{01}, M_{02}, \dots, M_{0j}$ 是在 $[0, t]$ 时间段内主要的地震.

当一次地震发生时, 累积其地震矩 M_0 , 每经过一个 Δt 的时间步长, 就对累积地震矩乘以 $\exp(-0.69315 \times \Delta t)$, 对每一个地区都做同样处理. 这样就可以得到沿着一个板块边界的残留地震矩 m_0 的图象.

为比较不同地震活动水平地区的愈合过程, 显示残留地震矩更为实用的方法是通过计算标准化的地震矩, 即

$$\mathcal{R} = \frac{M_{0\text{tot}}}{\sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} m_0(t)} \quad (3)$$

该无量纲数 \mathcal{R} 值被称为“地震矩比”. 这里, $M_{0\text{tot}}$ 是地震目录覆盖的时间范围内, 该地区全部累积释放的地震矩. 分母上的求和是根据方程(2)得到的, 截止到 t_{end} 时刻累积的残留地震矩. 因此, \mathcal{R} 值即是标准化的残留地震矩的倒数. 这样做的目的是为了把残留地震矩中的不足量在峰值处出现. 这种研究 \mathcal{R} 值在不同地区随时间演化, 并对其成像的过程就称为地震矩比成像(moment ratio imaging, 简称 MRI)(Lomnitz, 1994).

1.2 地震矩异常半衰期

本文在应用 MRI 算法分析中国强震前的空区特征时, 主要的问题之一是如何确定方程(1)中的半衰期 τ . Lomnitz(1985)分析了智利地区 1822 年以来先后发生的 8 次 7 级以上地震的破裂时间及其与破裂长度、破裂方向之间的关系(图 1), 即破裂长度会随着时间的推移呈指数衰减. 他认为在该地区的 τ 值取 20 年比较合适. 但是, 从图 1 中也可以看出, Lomnitz(1994)研究各次地震之间的位置关系时, 是以纬度方向为基准的. 这在环太平洋地区是非常方便的, 因为这些地区的地震破裂方向常常是沿着经线的方向, 因此可以把区域内的地震震中位置、破裂长度及破裂延伸方向进行直接比较, 以确定半衰期. 而本文研究的各个区域范围内, 地震破裂的方向差别较大, 不能按此方法确定半衰期. 但是, 半衰期的物理含义是 m_0 变为 M_0 一半的时候经历的时间, 而地震复发周期是地震矩完全衰减时经历的时间. 因此, 半衰期与地震复发周期之间存在一定的比例关系. 本文即通过古登堡-

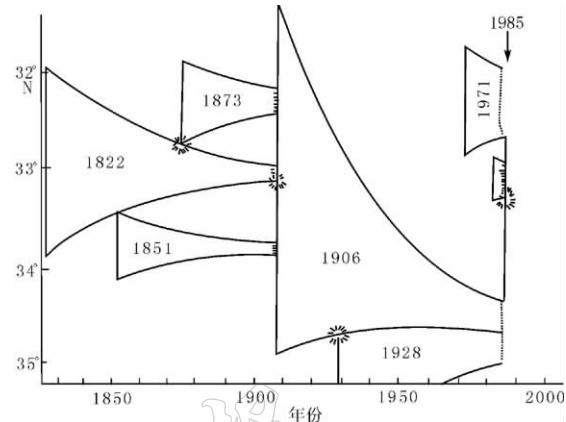


图 1 地震破裂衰减过程(引自 Lomnitz, 1994)

花样符号表示震中纬度, 数字表示地震发生的年份, 坚线表示地震初始破裂长度, 曲线表示破裂指数衰减的愈合过程

里希特的震级-频度(G-R)关系式(刘正荣, 2004; Schorlemmer, Wiemer, 2004)计算地震周期 T_M . 根据得到的不同震级的复发周期值 T_M , 选用不同的倍数值 α , 通过下列方程:

$$\tau = T_M \times \alpha \quad (4)$$

得到不同震级的半衰期 τ , 然后参与 MRI 算法计算. 取不同的 α 的主要原因是, 不能确定地震复发周期 T_M 与半衰期 τ 之间的定量关系.

1.3 能量分配方案

在应用 MRI 算法时, 除了需要确定半衰期 τ 值外, 还需要确定地震能量的分配方案, 即如何在空间范围内分配能量. Lomnitz(1996b)分析了 1900 年 1 月 1 日—1989

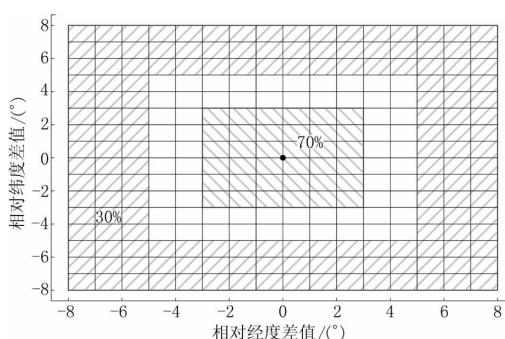


图 2 墨西哥帽模型的能量分配示意

图(引自 Lomnitz, 1996b)

距震中(中心黑圆点) $0^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 范围内(135° 斜线阴影区), 共分配总地震矩的 70%, 每个方格占 $1/36$; $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 范围(空白区)不分配地震矩; $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 范围内(45° 斜线阴影区), 共分配总地震矩的 30%, 每个方格占 $1/156$

年 12 月 31 日全球 7.0 级以上前后发生的两次地震的空间距离,发现前后两次地震的距离变化满足贝塞尔曲线关系。结合余震的分布特征,他提出了“墨西哥帽”模型,并从物理机制方面给予解释。他所采用的能量分配方案如图 2 所示。

但是,在该分配方案中,把中间的空区段不分配地震矩的做法,与地震能量的传播理论似乎不太一致,人们很难理解在能量传播的路程中撇下一个空段只在两头有能量存在。而且,8°范围的依据是全球目录得到的结果,是否适合于中国大陆?震级在 5.0~6.9 之间的地震能量分配方案又是什么?本文用 1900 年 1 月 1 日—2004 年 12 月 31 日中国大陆 5.0 级以上地震目录对不同的震级段,分析其相邻地震的距离空间分布频次,从而确定不同震级的能量分配方案。

2 资料及其预处理

本文采用的地震目录包括两部分。中国大陆的地震目录主要是由历史记录以来至 2004 年底的地震目录。其中,公元前 23 世纪至公元 1911 年的目录取自《中国历史地震目录》(国家地震局震害防御司,1995),1912~1990 年的目录取自《中国近代地震目录》(中国地震局震害防御司,1999),1991 年之后的目录取自中国地震局台网中心的 C01 文件;台湾地区的目录主要是根据统计地震学软件包 SSLib(Harte, 1998),其时间跨度为 1900 年 1 月 1 日—2003 年 12 月 31 日。

根据已有目录,本文所采用的预处理分析包括如下 3 方面内容(黄建平等,2005):

1) 分区选择。根据李祥根(2003)划分的全国的地震区,结合《中国震例》(张肇诚等,1988,1990; 陈祺福等,2002a, b)中记录的 7.0 级以上地震的震中位置,本文选取了华北、西北、西南和台湾 4 个地区作为研究的目标地区。

2) 浅源地震深度选择。表 1 列出了本文研究的目标地震的有关信息。在分析各个地区的目标震例时选用了浅源地震目录。本文通过:① 固定深度段,分析不同震级段的地震发生频次,寻找能够反映深度变化的震级段;② 固定震级段,分析不同深度段的地震发生频次;③ 把地震投影在与该地区主要构造带方向垂直的方向上,得到该区深度剖面图。综合这些分析,确定不同区域内浅源地震的深度范围。

3) 记录完整震级选择。在不同时期内,地震台网布设的密度、记录的精度是不同的。根据已有的研究结果(Gutenberg Richter, 1944, 1954; 宇津德治, 1987),在一定的时空范围内大小地震的频次满足

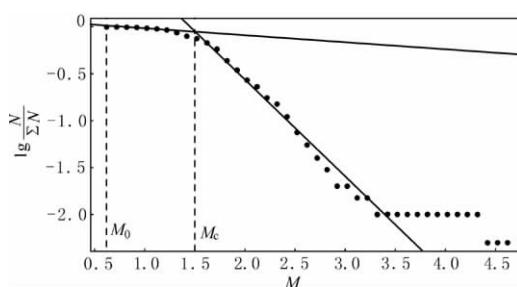


图 3 G-R 关系拟合寻找拐点震级示意图

古登堡-里克特(G-R)关系,但实际情况往往发现有掉头现象,这种现象被归结为地震纪录的不完整性(陈时军等,2002; 陈培善等,2003; 王丽凤等,2004)。本文通过寻找 G-R 关系曲线的掉头拐点,确定各时段的记录完整的震级下限 M_c 。图 3 给出了拟合方法示意图,即在 G-R 关系图中,自最小记录震级 M_0 起,选择分位数在 5%~15% 的一组数据和 25%~75% 的另一组数据(可以滑动调整这些分位数)分别拟合直线,两条直线的交点即确定为记录完整的震级 M_c 。本文以等地震次数将地震目录分段,求取其不同时间段内的拐点震

表 1 目标地震信息

编号	地区	地震名称	发震时间	$\varphi_N/(\circ)$	$\lambda_E/(\circ)$	震级	深度/km	资料来源
1	华北	邢台	1966-03-22	37.5	115.1	7.2	9	张肇诚(1988)
2	华北	渤海	1969-07-18	38.2	119.4	7.4	35	张肇诚(1988)
3	西南	通海	1970-01-05	24.1	102.6	7.7	13	张肇诚(1988)
4	西南	炉霍	1973-02-06	31.5	100.4	7.7	17	张肇诚(1988)
5	西南	大关	1974-05-11	28.2	104.1	7.1	10	张肇诚(1988)
6	华北	海城	1975-02-04	40.65	122.8	7.3	12	张肇诚(1988)
7	西南	龙陵	1976-05-29	39.56	118.0	7.8	11	张肇诚(1990)
8	华北	唐山	1976-07-28	39.56	118.0	7.8	11	张肇诚(1990)
9	西南	松潘	1976-08-16	32.5	104.3	7.2	23	张肇诚(1990)
10	台湾	台湾海峡	1994-09-16	22.5	118.73	7.2	19	陈祺福(2002a)
11	西南	孟联西	1995-07-12	22.04	99.20	7.2	13	陈祺福(2002b)
12	台湾	集集	1999-09-20	23.85	120.81	7.3	8	Harte(1998)
13	西北	昆仑山口西	2001-11-14	35.93	90.53	8.1	10	台网中心

级, 并结合 5.0 级以上地震的年发生频次, 确定 5.0 级以上地震记录完整的起始时间.

在上述 3 方面预处理的基础上, 得到各地区 5.0 级以上的浅源地震目录(表 2). 由于台湾西区和东区的时间及深度范围一致, 故在 MRI 算法的参数分析中将这两个区域合并为一个区域.

3 计算结果及分析

3.1 参数设定

通过把不同的 α 代入方程(4)中, 得到不同震级的地震矩异常半衰期 τ . 这里 α 取值分别为 0.01, 0.02, …, 0.1, 0.2, …, 1.0. 确定最佳 α 的原则是, 使用 α 计算得到的震中区的 \mathcal{R} 值减去相邻地区的 \mathcal{R} 值, 其差值大于 0.5, 以保证震中区的高值特征容易识别. 结果表明, α 的最佳选择值为 0.1.

不同震级段的能量分配按照不同距离内的地震数目的份额进行, 其计算方法如公式(5)所示:

$$k_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^j N_i} \quad (5)$$

其中, N_i 表示在表 3 所示的震级分类范围内, 对于距离目标震中第 i 度的范围内发生的地震数目, k_i 即为第 i 度的能量分配权重. 对于不同的震级段, j 的取值依赖于已有的震级和破裂长度的统计关系(张志坚等, 2001), 所得结果如表 3 所示.

从表 3 可以看出, 不同的震级段分配的空间范围是不同的. 同一震级段内, 能量分配的权重也随着震中距的远近而不同. 根据这些参数, 运用方程(3)可以得到各个目标地震前地震矩比 \mathcal{R} 值的变化图象.

表 2 各研究区域 5 级以上地震选取情况

区域	起止时间	深度/km	地震次数
华北	1480-01-01—2004-12-31	0~35	333
西北	1900-01-01—2004-12-31	0~40	504
西南	1900-01-01—2004-12-31	0~35	771
台湾	1900-01-01—2003-12-31	0~40	631

表 3 能量分配中不同距离内的权重

震级段	震 中 距						
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
5.0~5.3	1.00	0	0	0	0	0	0
5.4~5.8	0.854	0.146	0	0	0	0	0
5.9~6.4	0.72	0.118	0.162	0	0	0	0
6.5~6.8	0.78	0.06	0.100	0.05	0.01	0	0
≥6.5	0.647	0.163	0.02	0.036	0.043	0.041	0.049

3.2 \mathcal{R} 值的特征

在研究的 13 个震例中, 有 12 次地震 \mathcal{R} 值的变化特征一致, 即在目标地震发生前某个时间开始(表 4), 未来震中区的 \mathcal{R} 值, 相对周围地区, 浮现出相对的高值异常. 如果周围没有其它大震发生, 则异常幅度持续增大, 直至地震发生. 否则, 震中区及周围的 \mathcal{R} 值幅度, 会在周围地震的影响下而降低, 但在未来震中区, \mathcal{R} 值仍表现为相对高值. 在目标地震发生后, 震中及附近区域的高 \mathcal{R} 值异常消失, 震中区的 \mathcal{R} 值表现为低谷. 而云南龙陵地震对应的 \mathcal{R} 值在震前表现出不断增大、上升的特征, 但是在震后, \mathcal{R} 值没有出现下降的特征, 仍然表现为高值.

根据各地区的震例分析, 还发现了发生地震的平均警戒 \mathcal{R} 值(表 4), 即超过这个警戒 \mathcal{R} 值, 说明该地区已经进入危险期. \mathcal{R} 值幅度的高低也反映了区域危险性的高低, 即 \mathcal{R} 值的幅度越高, 该

地区发生强震的可能性越大, 距离发生强震的时间越短. 从表 4 可以看出, 除了华北地区的警戒 \mathcal{R} 值略小外, 其它 3 个地区的警戒值基本相同. 这也与区域的地震活动强度基本一致.

3.3 强震前后 \mathcal{R} 值特征

下面以华北地区 1976 年 7 月 28 日唐山地震为例, 说明大震前后 \mathcal{R} 值时空变化特征(图 4). 从图 4 可以看出, 在唐山震中区位置左右(图 4 中横坐标: 7)的 \mathcal{R} 值, 在 1966 年邢台地震发生前一直处于相对的峰值, 而且持续增长. 在 1966 年之后, 每当周围发生一次 7.0 级以上大震, 包括邢台、渤海和海城地震, 唐山震中区的 \mathcal{R} 值幅度都会降低一次, 但该地区 \mathcal{R} 值处于相对峰值的特征始终没有改变. 而且, 从图 4 中还可以看到渤海地震前后震中区的 \mathcal{R} 值的变化特征: 震前 \mathcal{R} 不断增加, 在 7 度范围内之前的地震(邢台地震)会降低该地区的 \mathcal{R} 值, 渤海地震后该地区 \mathcal{R} 值就降为低谷.

图 5 给出了 1973 年 2 月 6 日四川炉霍地震前后震中区及其周围的 \mathcal{R} 值变化. 从图中可以发现, 震中区的 \mathcal{R} 值在地震发生前也出现了上升趋势(从 1948—1963 年). 1968 年震中区的 \mathcal{R} 值有显著的下降, 其原因是 1963 年 4 月 19 在震中区西北部发生了一次 7.0 级地震. 之后, 震中区的 \mathcal{R} 值继续上升, 炉霍地震后 \mathcal{R} 值变小. 虽然震后震中区的 \mathcal{R} 值没有像唐山地震那样成为低谷, 但已经低于平均警戒值, 符合一般的变化规律.

为了更清晰地表示在唐山地震前后空间上 \mathcal{R} 值的变化范围和幅度, 图 6 给出了唐山地震前后空间区域 \mathcal{R} 值变化的平面图.

表 4 各个研究地区 \mathcal{R} 值特征

区域	\mathcal{R} 值异常开始时间	\mathcal{R} 值幅度最大值	平均警戒 \mathcal{R} 值
华北	震前 20~25 年	5.8	3.5
西北	震前 15~20 年	6.9	3.9
西南	震前 15~20 年	7.2	4.0
台湾	震前 15~20 年	6.6	4.0

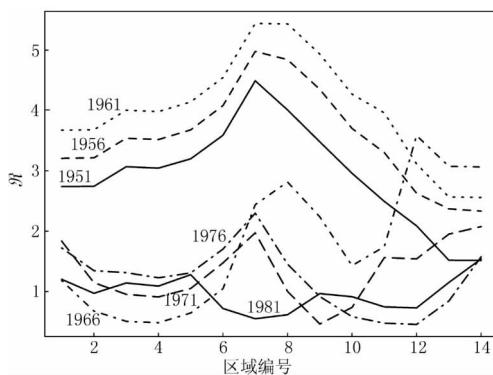


图 4 沿 1976 年 7 月 28 日唐山地震震中
纬度方向东西各 7 度内 \mathcal{R} 值的时空变化
(其中, α 为 0.1, 围空震级下限 5.0)
横轴代表沿震中的纬度方向, 震中东西各 7 度的
14 个方格的位置编号. 其中, 4, 7, 9, 12 点
分别发生邢台、唐山、渤海和海城地震.
每一条曲线对应一个 \mathcal{R} 值的截至年份

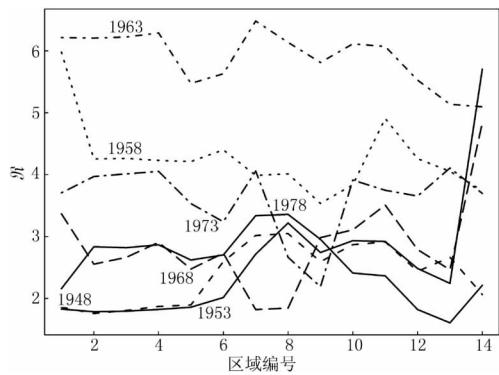


图 5 沿 1973 年 2 月 6 日四川炉霍地震震中
纬度方向东西各 7 度内 \mathcal{R} 值的时空变化
(其中, α 为 0.1, 围空震级 5.0)
横轴代表沿震中的纬度方向, 震中东西各 7 度
的 14 个方格的位置编号. 每一条曲线
对应一个 \mathcal{R} 值的截至年份

从图 6 中可以看出, 在唐山地震发生前 30 年, 即在 1946 年的图象中(图 6a), 在震中的位置附近就出现了相对的 \mathcal{R} 值异常, 而且在该异常区的西南部也出现了一个凸点, 这个凸点对应的位置是邢台地震的震中区. 到了 1951 年(图 6b), 这两个异常区连到了一起, 最大 \mathcal{R} 值在唐山地区. 此时 \mathcal{R} 值高值异常区的范围比 1946 年时明显增大, 从 0.5° 增加到 3° 的范围, \mathcal{R} 值的大小也从 3.4 增大到 4.5. 在以后的 10 年中, 该 \mathcal{R} 异常值图象的范围进一步扩大, 并且 \mathcal{R} 值异常的显著性进一步增强(图 6c, d). 当邢台地震和渤海地震相继发生后, 整个地区的 \mathcal{R} 值从 3 以上降为 3 以下, 特别是邢台地震的震中地区, \mathcal{R} 值幅度从 4.1 降低到 0.6. 在图 6e 和图 6f 中, 唐山、邢台、渤海和海城地区的 \mathcal{R} 值幅度的差别不显著. 在海城地震发生后, 从图 6g 上可以明显看出唐山震中区的 \mathcal{R} 值异常. 这个异常值的幅度要比 1946—1961 年的图象低, 此时 \mathcal{R} 高值区的范围跨越 4° 左右, 即在唐山震中左右各 2° . 最后唐山地震发生(图 6h), 在唐山震中的 \mathcal{R} 高值区消失.

从图 4 和图 5 的分析中可以发现, 区域 \mathcal{R} 值的高值异常能够反映区域地震危险性的高低. 运用 MRI 算法得到的 \mathcal{R} 值变化与唐山地震有较好的对应关系.

4 讨论和结论

本文根据 MRI 算法, 提出了对算法参数的确定和调整方法. 研究了 13 次目标地震发生前后震中及周围的 \mathcal{R} 值变化特征, 得到了 \mathcal{R} 值变化的趋势与未来区域地震的定量化关系, 即当区域的 \mathcal{R} 值超过警戒 \mathcal{R} 值时, 预示着一次大震将会发生. 这个警戒 \mathcal{R} 值在不同地区是有变化的. 而且, 在周围发生大震的情况下, 区域的警戒 \mathcal{R} 值, 也会受到影响而有所降低.

从研究结果中也可以发现地震矩比 \mathcal{R} 值在同一个地区随时间变化的特征. 这种变化特征, 与介质的破裂过程完全一致. 即在周围没有发生大地震的情形下, 区域的 \mathcal{R} 值是缓慢

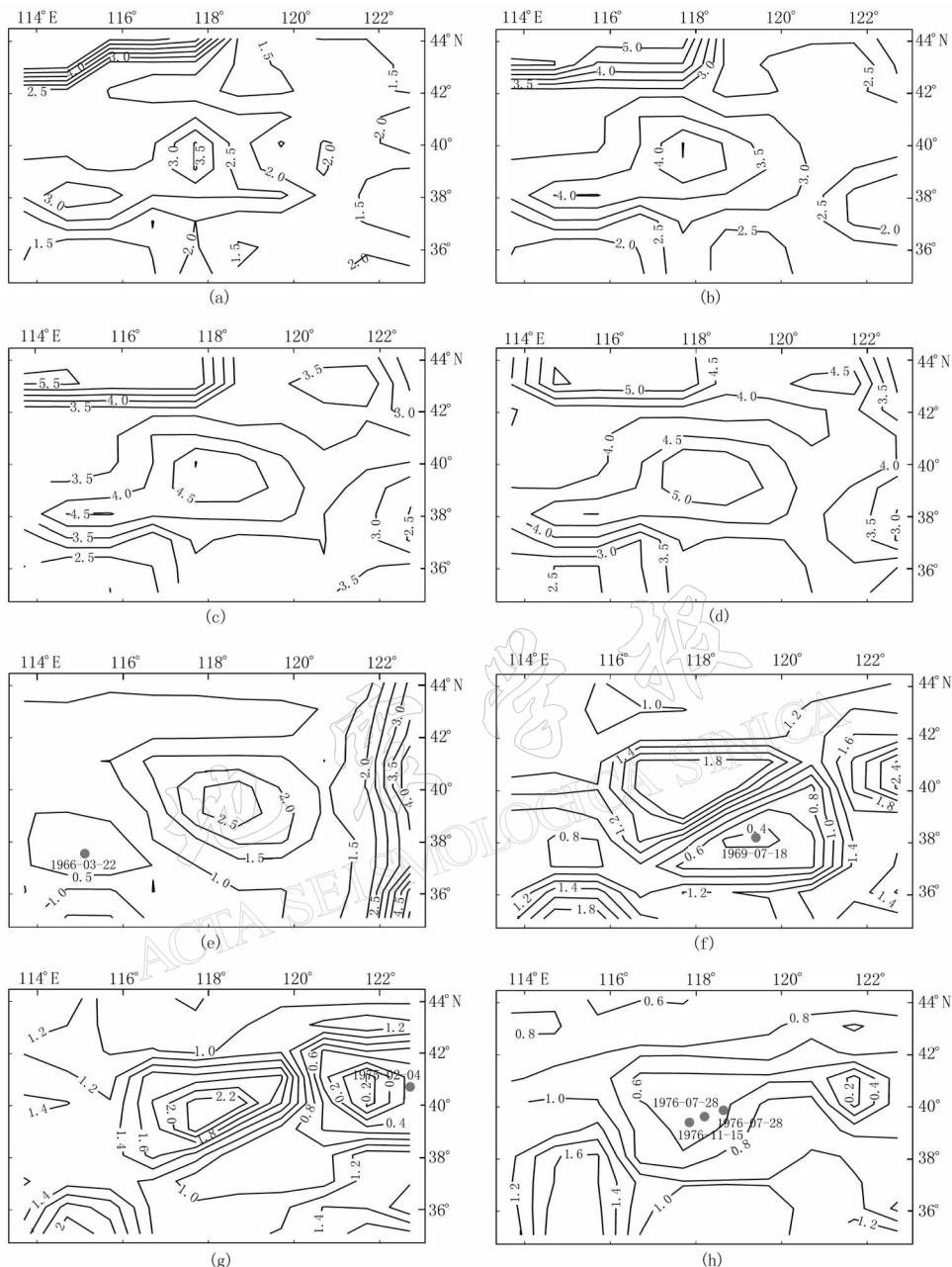


图 6 1976 年 7 月 28 日唐山地震前后震中及周围 \mathcal{R} 值时空变化(其中, α 为 0.1, 围空震级 5.0)
图中心代表唐山地震震中位置, 灰色圆代表不同时间段内发生的 7 级以上地震

(a) 1942—1946 年; (b) 1947—1951 年; (c) 1952—1956 年; (d) 1957—1961 年; (e) 1962—1966 年;
(f) 1967—1971 年; (g) 1972—1976 年; (h) 1977—1981 年

增加的, 表明该区域的地震危险性也是缓慢增加的。这反映了区域地震能量或者应力的累积过程。在能量累积到一定的程度时, 区域的地震矩比 \mathcal{R} 值, 也达到了警戒水平。在周围地区发生大震的时候, 由于应力的释放, 应力场重新调整分布, 使得地震矩比 \mathcal{R} 值降低, 但是此时的介质已经突破了原来的破裂强度, 只需要较小的能量就可以破裂。因此, 在这

种情形下, 即使地震矩比 \mathcal{R} 值较小, 也会发生大震。

本文中算法参数的确定均依据一定的物理含义, 因此其确定方法就极为重要。对其中的参数 τ , 本文根据中国地震发生的特点, 没有按照 MRI 算法的提出者 Lomnitz(1993, 1994, 1996a) 的方法来确定, 而是结合了地震活动性中的活动周期的概念, 通过调整比例系数 α , 得到与实际结果的最佳符合。

对于能量分配方案, 则是在借鉴 Lomnitz(1993, 1994, 1996a) 的思路基础上, 作了进一步的细化分析。本文考虑了背景空区长轴与震级的关系, 地震破裂长度与震级的关系, 以及地震触发等概念, 补充了“墨西哥帽”方法中不容易解释的空区段能量, 使之更符合我国地震活动实际特征。从图 4 中可以看出, 唐山地震之前的几次地震都对唐山地震震中区的 \mathcal{R} 值产生了影响, 但是这种影响受距离远近的制约, 这也是为什么在距离震中不同的距离范围内设定不同的能量分配权重系数的原因。

在 MRI 算法中还有一些值得进一步深入研究分析的地方。比如, 目前计算中把地下介质看作为均匀的单一的, 以及如何根据不同的构造特征, 重新调整能量分配在不同方向上的分配量度等问题。这是下一步需要继续深入研究的工作。

感谢 Cinna Lomnitz 教授在本文的撰写过程中给予的宝贵意见。同时也一并感谢李勇、陈时军、党胜军、王丽萍、刘文兵、尹宝军、Ray Brownrigg 等人的帮助。

参 考 文 献

- 陈时军, 王丽凤, 马丽, 等. 2002. 关于震级频度关系的一些讨论[J]. 地震学报, **24**(2): 176~185
- 陈培善, 白彤霞, 李保昆. 2003. b 值和地震复发周期[J]. 地球物理学报, **46**(4): 510~519
- 陈棋福. 2002a. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京: 地震出版社, 358~390
- 陈棋福. 2002b. 中国震例(1995—1996)[M]. 北京: 地震出版社, 97~145
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)[M]. 北京: 地震出版社, 1~512
- 韩渭宾, 江道崇, 杨虹, 等. 1989. 借助 $R-t$ 、 $D-t$ 图结合震中分布图在四川地区圈定空区的研究[A]. 见: 许绍燮, 陆远忠, 朱传镇, 等编. 地震预报方法实用化研究文集——地震学专辑[C]. 北京: 学术书刊出版社, 25~40
- 黄建平, 马丽, 陈时军, 等. 2005. 定量分析地震活动的活跃与平静特征[J]. 中国地震, **21**(3): 417~428
- 李祥根. 2003. 中国新构造运动概论[M]. 北京: 地震出版社, 253~264
- 刘正荣. 2004. 地震预报方法[M]. 北京: 地震出版社, 42~53
- 陆远忠, 沈建文, 宋俊高. 1982. 地震空区和逼近地震[J]. 地震学报, **4**(4): 327~336
- 陆远忠, 王炜, 沈建文. 1983. 地震空区和逼近地震(续)[J]. 地震学报, **5**(2): 129~144
- 王丽凤, 马丽, David Vere-Jones, 等. 2004. 随机 AMR 模型的参数估计及其在几次强震中的应用[J]. 地震学报, **26**(2): 162~173
- 王炜, 刘震华. 1987. 地震时间间隔的统计分布及其地震危险度 D 值在华北大震前的异常变化[J]. 地震学报, **9**(2): 113~127
- 王炜, 戴维乐, 黄冰树. 1994. 地震震级的统计分布及其地震强度因子 M_f 值在华北中强以上地震前的异常变化[J]. 中国地震, **10**(3): 96~110
- 王炜, 戴维乐, 宋俊高. 1999a. 地震空间集中度 C 值在华北中强以上地震前的中期异常变化[J]. 地震研究, **22**(1): 51~56
- 王炜, 宋先月, 刘峰, 等. 1999b. 地震活动因子 A 值及其在华北地震中期预报中的应用[J]. 中国地震, **15**(1): 35~45
- 尹祥础, 尹灿. 1991. 非线性系统的失稳前兆与地震预报[J]. 中国科学(B辑), (5): 512~518
- 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 1994. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报, **37**(6): 764~775
- 宇津德治(著). 1987. 李裕彻, 卢振业, 丁鉴海, 等(译). 1990. 地震事典[M]. 北京: 地震出版社, 212~215

- 张肇诚. 1988. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社, 1~40, 57~76, 98~116, 155~176, 189~210
- 张肇诚. 1990. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京: 地震出版社, 29~132
- 张志坚, 戴华光, 陈文斌, 等. 2001. 阿尔金中段玉勒肯古地震地面形变系统的综合研究[A]. 见: 李克主编. 中国八级大震研究及防震减灾学术会议论文集[C]. 北京: 地震出版社, 216~223
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录(公元 1912 年—1990 年 $M_S \geq 4.7$)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1~633
- 中国地震局监测预报司. 2002. 强地震中短期预报方法及其效能研究[M]. 北京: 地震出版社, 315~356
- Fedotov S A. 1965. Regularities of the distribution of strong earthquakes in Kamchatka, the Kuril Islands and northeast Japan[J]. *Tr Inst Fiz Zemli, Acad Nauk SSSR*, **36**(203): 66~93 (In Russian)
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **34**: 181~188
- Gutenberg B, Richter C F. 1954. *Seismicity of the Earth and the Associated Phenomena*[M]. Princeton: Princeton Univ Press, 1~38
- Harte D S. 1998. Documentation for the statistical seismology library[A]. *Sciences Research Report* [R]. School of Mathematical and Computing, 93~98
- Keilis-Borok V I, Kossobokov V G. 1990. Premonitory activation of seismic flow: Algorithm M8[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **61**: 73~83
- Keilis-Borok V, Shebalin P, Gabrielov A, et al. 2004. Reverse tracing of short-term earthquake precursors[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **145**: 75~85
- Lomnitz C. 1985. Tectonic feedback and earthquake cycle[J]. *Pure Appl Geophys*, **123**: 667~682
- Lomnitz C. 1993. Moment-ratio imaging of seismic regions for earthquakes prediction[J]. *Geophys Res Lett*, **20**(20): 2 171~2 174
- Lomnitz C. 1994. *Fundamental of Earthquake Prediction*[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 88~127
- Lomnitz C. 1996a. Predicting earthquakes with the MRI algorithm[J]. *Seismol Res Lett*, **67**(6): 40~46
- Lomnitz C. 1996b. Search of a worldwide catalogue for earthquakes triggered at intermediate distances[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**(2): 293~298
- Ma Li, Vere-Jones D. 1997. Application of M8 and Lin-Lin algorithms to New Zealand earthquake data[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophys*, **40**: 77~89
- Mogi K. 1979. Two kinds of seismic gaps[J]. *Pure Appl Geophys*, **117**: 1 172~1 186
- Nishenko S P. 1985. Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal[J]. *J Geophys Res*, **90**(B5): 3 589~3 615
- Schorlemmer D, Wiemer S. 2004. Earthquake statistics at Parkfield: 1 Stationary of b values[J]. *J Geophys Res*, **109**: B12307, 1~17
- Wyss M, Wiemer S. 1999. How can one test the seismic gap hypothesis? The case of a repeated ruptures in the Aleutians [J]. *Pure Appl Geophys*, **155**: 259~278

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE MOMENT-RATIO IMAGING ALGORITHM

Huang Jianping^{1, 2)} Ma Li¹⁾ Zhang Chaojun^{1, 2)}

1) Institute of Earthquake Sciences, China Earthquake Administration, Beijing, 100036, China

2) Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract: In the Moment-ratio Imaging algorithm, which is based on the theory of healing of a wound, the energy of each strong earthquake is distributed around the epicenter according to certain rules, and the features of the Moment-ratio value \mathcal{R} are analyzed as the space and time change, so that the relationships between the Moment-ratio value \mathcal{R} and strong earthquakes can be found. In the present paper, regions divided, hypocenter depths and events completed magnitude analyses were carried out in the Chinese catalogue. By applying the Moment-ratio Imaging algorithm in which the parameters are adjusted, the processes of anomaly evolution which correspond to the epicenter and the surrounding value \mathcal{R} before earthquakes of $M \geq 7.0$ since 1966 in different areas of China were analyzed. It was found that the range area and imminent time of a coming earthquake could be confirmed quantitatively by analyzing the abnormal temporal and spatial variation of the value \mathcal{R} . The results showed that the temporal and spatial variation of the value \mathcal{R} could quantitatively reflect the temporal and spatial factors of a coming strong earthquake as well as the rule of medium rupture.

Key words: moment-ratio imaging algorithm; healing; quantitative analysis; China strong earthquakes