

地震序列震级结构的特征研究^{*}

孙佩卿 李钦祖 戴英华 赵军

(中国石家庄 050021 河北省地震局)

摘要 通过对严格选取的中国大陆 1965 年以来的 108 个地震序列震级结构特征的研究, 分析了大多数地震序列震级结构不符合古登堡-李克特(G-R)关系的原因, 提出了分段拟合地震序列震级结构的方法, 并着重研究了分段拟合震级结构在大震级段的特征值。其中特征震级百分比 f 和大震级段斜率 b_2 的特征意义最为显著, 它们对于不同类型的地震序列是有差别的。结果表明, 有 52.8% 的地震序列震级结构的 N-M 图象在不到 80% 最大震级处开始不符合 G-R 关系, 而且只有 18.5% 的地震序列震级结构在大震级段 N-M 关系呈下降趋势。当 $b_2 < 0$ 或 $0 \leq b_2 < 3.0$ 而 f 又较小时, 地震序列除主震外强震发生得较少; 当 $b_2 \geq 3.0$ 时, 地震序列往往伴有多次强震发生; 当 $0 \leq b_2 < 3.0$ 而 f 又较大时, 地震序列除主震外, 比主震小一些的中等地震发生得较多。

主题词 震级 地震序列 特征震级

引言

1944 年古登堡和李克特在研究世界地震活动性时, 总结出全球各大地震区 6 级以上地震的频度 N 与震级 M 之间存在着对数关系 $\lg N = a - bM$ 。从此以后, 关于这一公式意义的讨论从未间断过。近十多年来, 我国不少学者已将其应用于地震序列的震级-频度关系的研究工作中。但是实际结果表明, 就中国大陆的地震活动情况而言, 并不是所有的地震序列的震级结构都完全符合 $\lg N - M$ 的线性关系, 有的甚至偏离很大, 其结果是使我们对地震序列的发展趋势产生不符合实际的判断, 从而影响了我们对地震序列特点的认识和对地震序列发展趋势的分析。因此, 有必要从地震序列的原始资料本身出发, 对地震序列的震级结构进行更深入的分析, 重新认识地震序列震级结构的特征。

1 地震序列的选取原则

在工作中我们选取了 1965 年以来我国大陆的地震频度大于 30 次的地震序列 108 个, 这些地震序列的震级按同一标度取自地震区域台网或临时台网提供的资料。这些地震序列的主震集中在华北地区有 22 个, 在西南及华南地区有 70 个, 在西北地区有 16 个, 使其尽可能反映中国大陆地震序列的观测事实。

在资料选取中, 我们基本上按下列原则进行:

* 国家地震局“八五”地震短临预报攻关课题 85-04-03-01-09 的一部分。
1996-10-03 收到初稿, 1997-09-05 收到修改稿, 1997-09-16 决定采用。

(1) 地震序列的空间范围是按 $\lg L(\text{km}) = 0.51M - 1.78 \pm 0.09$ (吴开统等, 1990) 计算选取余震区的长轴, 并将余震震中基本相连在一起者确定为余震区的范围;

(2) 地震序列的截止时间以地震活动低于该地的背景水平作为该地震序列活动期的活动时间, 同时要求地震尽量多, 只要有可能, 地震序列中还包含了前震序列;

(3) 一般认为, 我国近震震级的标准误差在 $0.13 \sim 0.32$ 之间 (陈培善, 秦嘉政, 1983), 因此, 我们对地震序列震级结构的震级分档取 0.3 级, 并从最大震级计起采取递减方式分档;

(4) 为了较好地反映震级-频度关系的真实性, 我们对各档次地震频度的计算一律采用不累积的方法进行统计.

2 地震序列震级结构小震级段的观测事实

在我们选取的 108 个地震序列震级结构中, 大部分(约占 90.7%)在小震级段存在掉头现象, 这是一个观测事实, 我们分析其中原因可能有以下几个方面:

- (1) 各地区对地震的监测能力不同, 在小震级段可能存在地震记录缺失;
- (2) 较大地震发生后伴随而发生的小地震被大地震的尾波所掩盖, 影响小地震记录的完整性;
- (3) 由于地震台站台基条件不同, 造成某些小地震记录减少;
- (4) 由于在震中附近台网分布不均匀引起某些小地震记录缺失;
- (5) 有可能在观测事实上, 的确在小震级段不符合 G-R 关系, 即出现掉头现象是由于地震序列本身的物理机制引起的.

在这里我们只依据我国大陆 108 个地震序列提供这样一个事实, 而无意对小震级段的情况进行更深入的探索, 因为就地震序列发展趋势而言, 我们更关心地震序列震级结构的大震级段的特征. 因此, 在研究中我们把震级分档后具有最高地震频度的震级值作为起算震级, 进行地震序列震级结构的特征分析.

3 G-R 关系在地震序列震级结构中应用时存在的问题

我们按上述方法对每个地震序列选定起算震级, 得到每个地震序列的频度-震级($N-M$)观测图象, 这些图象大致有如下几种形态(图 1):

- (1) 频度 N 随震级 M 呈上凸衰减;
- (2) 频度 N 随震级 M 呈下凹衰减;
- (3) 频度 N 随震级 M 在较大范围内近似呈线性衰减;
- (4) 频度 N 随震级 M 衰减后在大震级段变化不大, 延续很长;
- (5) 频度 N 随震级 M 衰减后在大震级段转折上翘;
- (6) 频度 N 随震级 M 衰减后在大震级段呈上翘趋势.

这 6 种形态又可以归纳为 3 类: ① 大震级地震频度高, 中等地震丰满, 如第(1)种形态; ② 大震级地震频度高, 中等地震不够丰满, 如第(5)、(6)种形态; ③ 地震频度随震级增大而衰减, 只是衰减程度不同, 如第(2)、(3)、(4)种形态.

从这里我们看到, 确有一部分地震序列的 $N-M$ 观测图象[如第(2)种形态]满足 G-R 关系, 但是由于这些观测图象千变万化, 有些震级间隔(甚至是很长的震级间隔)内根本没

有地震；有些震级间隔即使有地震也偏离 G-R 公式太远，所以我们选择的地震序列中大部分的震级结构观测图象（约占 82.4%）是不满足这一关系的。

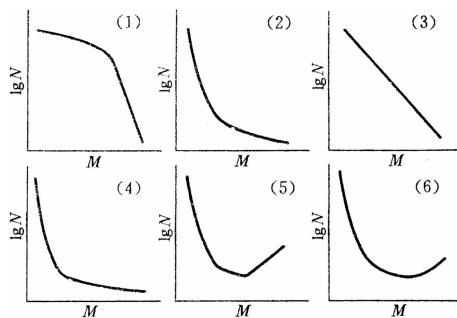


图 1 地震序列频度-震级关系的基本形态

这就告诉我们这样一个事实，就我国大陆地震序列而言，G-R 这一经典关系在地震序列震级结构中的应用，在大多数情况下是不适合的，由此我们推断地震序列预期将要发生较大余震的结论往往是错误的。实际上，直至整个地震序列结束也没有预期的较大余震发生。为此，我们需要对地震序列震级结构的大震级段进行重新认识。

4 地震序列震级结构的大震级段特征研究

4.1 拟合函数的选取

在上述分析中，我们已经把震级结构作了分段处理，即把小震级段和大震级段进行了分别考虑。实际上，我们在研究中采用了 6 种函数（古登堡、威布尔、抛物线、双曲线、二次多项式和分段拟合），对 108 个地震序列的震级结构图象进行了数学拟合与比较。结果表明，分段拟合的残差最小、效果最好（李钦祖等，1995），而且更为重要的是，分段拟合还可以通过更多的参数提取更多的信息。分段拟合的公式为

$$\begin{cases} \lg N = a_1 + b_1 M & M < M_c \\ N = a_2 + b_2 M & M \geq M_c \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中，上式就是 G-R 关系，它在 $M < M_c$ 时是适用的；下式为 $N-M$ 的线性关系。之所以这样选择是因为大震级段的地震频次往往较少，我们只需要知道其变化趋势和特征即可，没有必要进行复杂的拟合。式(1)中， M_c 为分段点，是通过扫描使拟合残差达到最小而得到的， M_c 实际上可以作为震级结构的一个特征点。为了便于地震序列震级结构的纵向比较，我们把特征震级 M_c 转换为其在震级跨度中的相对位置，即特征震级百分比

$$f = \frac{M_c - M_0}{M_{\max} - M_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中， M_0 为地震序列的起算震级， M_{\max} 为最大震级。

用于对比的残差计算公式为

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{N_i - \hat{N}_i}{\hat{N}_i} \right|}{n} \quad (3)$$

式中， n 为震级间隔数， N_i 为每一震级间隔的观测值，而 \hat{N}_i 为其拟合值。残差公式的意义为拟合函数相对误差的平均值，它既可以对不同拟合函数的拟合效果进行比较，也可以对 108 个地震序列的震级结构进行纵向比较。

4.2 震级结构的大震级段特征

(1) 通过分段拟合地震序列的震级结构, 我们分析了特征震级百分比 f 的分布情况(图 2). 可以看出, 一方面 f 分布存在从集现象, 另一方面 $f < 80\%$ 的地震序列有 57 个, 占样本总数的 52.8%. 这就是说, 有一半以上的地震序列震级结构的 N-M 图象在不到 80% 最大震级处即开始不符合 G-R 关系.

(2) 对地震序列的大震级段, 即 $M > M_c$ 震级段, 我们通过分段拟合可以清楚地看出, 地震频度 N 随震级 M 的增大呈下降和上翘趋势的形态不一, 其中只有 18.5% 的地震序列在大震级段 N-M 关系呈下降趋势, 即 $b_2 < 0$; 而其余 81.5% 的地震序列 $b_2 \geq 0$, 表现了大震级段地震频度的上翘趋势(图 3, 表 1).

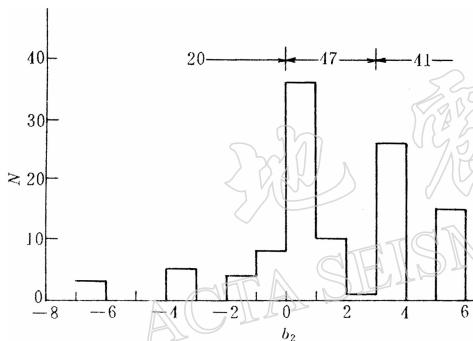


图 3 地震序列大震级段斜率 b_2 分布图

表 1 地震序列震级结构的尾部形态

	$b_2 < 0$	$0 \leq b_2 < 3.0$	$b_2 \geq 3.0$
序列个数	20	47	41
所占比例	18.5%	43.5%	38.0%

(3) 为了确定地震序列大震级段不符合 G-R 关系的原因, 我们在对震级进行 0.3 级分档后统计了存在震级空档的情况. 结果是: 有 87.0% 的地震序列存在震级空档, 有 57.4% 的地震序列从次大震级档起存在连续震级空档, 最长的连续震级空档个数达 10 个即 3.0 级. 另外, 还有 8.3% 的地震序列在其它震级段存在连续震级空档(表 2). 这就是说, 有 65.7% 的地震序列震级结构本来就不是丰满的, 存在连续的震级空档, 所以, 以此推断地震序列是否缺震往往会产生错误的结论.

表 2 地震序列震级结构中的震级空档统计表

	次大档 存在空档	其它档 存在空档	次大档起 有连续空档	其它档 有连续空档
序列个数	79	15	62	9
所占比例	73.1%	13.9%	57.4%	8.3%

4.3 震级结构特征的初步分析

通过对地震序列的震级结构选择拟合方法和进行统计分析, 我们总结了震级结构大震级段的几个明显的特征. 当然, 可能还存在其它特征我们并没有发现. 上述几个特征的共同特点是: 在大震级段, 即 $M > M_c$ 的震级段, 大部分地震序列的震级结构就不再符合 G-R 关系, 而且其中又有大部分表现了尾部上翘特征. 这反映在地震序列上就是大部分的地震序列在发生一次或多次主震之后, 伴随有大量的余震发生, 而这些余震中的中等地震较少.

这些特征反映在震源破裂上, 就是大部分的地震序列中的主震以直立断层走向滑动为主. 主震发生以后, 震源应力场急剧调整, 大小断裂相互作用使原有的断裂分叉、延展, 产生新的破裂, 即以大量小震的形式表现, 其震源体以椭圆体形态由震中逐渐向外围扩张、衰减. 而只有少数的地震序列是以体破裂为主, 震源系统中的小破裂聚合、沟通, 形成多条大断裂, 发生多次较大的中等地震, 才使震级结构较为丰满, 这样的地震序列的震源体

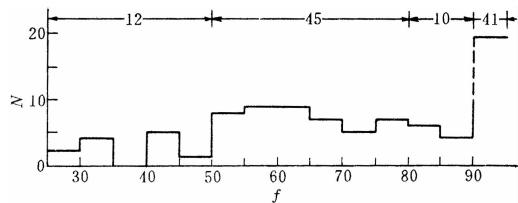


图 2 地震序列特征百分比 f 的分布图

由多个断层面上的多次破裂构成，表现为较复杂的不规则形状。

4.4 震级结构特征的应用意义

结合地震序列的特征，我们利用特征震级百分比 f 和大震级段斜率 b_2 这两个特征值得到表 3 的结果。

表 3 大震级段斜率 b_2 与特征震级百分比 f 关系

	$b_2 < 0$	$0 \leq b_2 < 3.0$	$b_2 \geq 3.0$
序列个数	20	47	41
f 的均值及误差	55.2 ± 19.8	66.1 ± 15.4	90.2 ± 7.5
b_2 的均值及误差	-4.02 ± 6.52	0.59 ± 0.50	4.49 ± 1.74
震级空档平均个数	1.32	2.38	2.61

从表 3 中看出，特征震级百分比 f 和大震级段斜率 b_2 这两个特征值，从另一个侧面反映了地震序列的特征，它们基本存在以下规律：

当 $b_2 < 0$ 或 $0 \leq b_2 < 3.0$ 而 f 较小时，地震序列除主震外，强震发生得较少；

当 $b_2 \geq 3.0$ 时，地震序列往往伴有多次强震发生；

当 $0 \leq b_2 < 3.0$ 而 f 较大时，地震序列除主余震外，比主震小一些的中等地震发生得较多。

5 结论

通过对我国大陆 108 个地震序列震级结构的特征研究，我们可以得到如下几点关于地震序列震级结构的看法：

(1) 我国对地震序列的研究并利用其特征进行地震序列发展趋势判断，处于世界领先水平。但是在地震预报工作中，试图使所有的地震序列的震级-频度都满足对数线性关系，事实上引起了很多次的错误判断；

(2) 以震级间隔为 0.3，我们研究地震序列的震级-频度关系发现，在许多震级间隔内无震，即存在震级空档。通过统计 108 个地震序列，存在震级空档的地震序列占 87.0%。这就意味着大部分地震序列的震级-频度关系不满足 $\lg N - M$ 线性关系。在以前的工作中，我们经常采用累积频度以研究其与震级的关系，事实上这是一种掩盖缺陷的做法；

(3) 通过分段拟合地震序列的震级结构，我们可获得更多的特征值，即起算震级、最大震级个数、震级空档个数、特征震级百分比 f 、 $M < M_c$ 区间中的系数 a_1 、 b_1 和 $M \geq M_c$ 区间中的系数 b_2 。在新建立的特征值中， f 和 b_2 的特征意义最为显著，它们对于不同类型的地震序列是有差别的；

(4) f 的分布表明，有 52.8% 的地震序列震级结构的 $N-M$ 图象在不到 80% 最大震级处开始不符合 G-R 关系。 b_2 的分布表明，只有 18.5% 的地震序列震级结构在大震级段 $N-M$ 关系呈下降趋势。

参 考 文 献

- 陈培善，秦嘉政，1983. 量规函数、台基及不同测量方法对近震震级 M_L 的影响. 地震学报, 5(1): 87~98
 李钦祖，戴英华，孙佩卿，等，1995. G-R 关系不是我国地震序列震级-频度关系的最佳拟合. 见：辽宁省地震局(编)，
 发展中的地震科学的研究. 北京：地震出版社. 46~52
 吴开统，焦远碧，吕培苓，等，1990. 地震序列概论. 北京：北京大学出版社. 250