

文章编号: 0253-3782(2004)05-0489-06

地震断层面上的位错分布^{*}

吴 忠 良

(中国北京 100039 中国科学院研究生院地球系统科学中心;
中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 1979 年 Imperial Valley 地震、1989 年 Loma Prieta 地震、1992 年 Landers 地震、1994 年 Northridge 地震、1995 年阪神地震的地震断层面上的位错分布, 满足分段的 Gutenberg-Richter 定律. 对于小位错, b 值约为 1; 对于比较大的位错, b 值大于 1.

关键词 地震位错 Gutenberg-Richter 定律 b 值

中图分类号: P315.3⁺3 **文献标识码:** A

引言

在地震学和工程地震学中, 为解释地面运动的高频成分, 通常假定一次大地震是由一系列尺度不等的小地震所组成的(Frankel, 1991). 这些小地震来自地震断层面上的凹凸体的破裂, 而凹凸体具有分形的几何特征(Aki, 1981). 这一想法, 可以解释诸如震源谱的高频衰减规律等重要的震源性质, 但由于条件所限, 却一直未能得到观测资料的直接证实. 宽频带数字地震学的发展, 使地震学家可以反演详细的地震震源破裂过程和地震断层面上的位错分布(陈运泰等, 2000), 这一进展使对上述想法进行直接验证成为可能.

众所周知, 地震断层面上的位错分布是高度不均匀的, 较大的位错常常局限在地震断层面上几个较小的范围内, 并且, 大小不一的凹凸体的尺度覆盖了若干个数量级. 如何描述这种高度不均匀的分布, 一直是震源研究中一个重要的理论问题. 从观测资料和理论假定出发, Frankel(1991)用分数 Brown 运动(fBm)这一自仿射分形几何对象来描述地震断层面上的位错分布, 并由此解释了地震活动的 b 值和震源谱的 $\omega^{-\gamma}$ 衰减规律. Heaton(1990)将地震破裂的传播过程描述为与孤立子(soliton)类似的“自愈合脉冲”(self-healing slip pulse). Mai 和 Beroza(2000)用等效断层尺度(effective fault dimension)来描述地震断层的大小, 等效断层尺度是通过位错分布的自相关函数定义的; 他们还使用随机场来描述地震断层上的位错分布, 并计算了其分形维数(Mai, Beroza, 2002).

本研究试图考查 1979 年帝王谷(Imperial Valley)地震、1989 年洛马普列塔(Loma Prieta)地震、1992 年兰德斯(Landers)地震、1994 年北岭(Northridge)地震、1995 年阪神(Kobe)地震的地震断层面上的位错分布. 由于有远震资料、区域地震资料、近震源强地面运动资料、GPS 观测资料、形变测量资料的约束, 一般认为关于这些地震的震源过程的结果, 属于目前质量最高的结果.

^{*} 国家自然科学基金(40274013)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 04AC1026.
2003-04-21 收到初稿, 2003-07-29 收到修改稿并决定采用.

一个可能是有意义的结果是, 这些地震的地震断层面上的位错的频度分布, 满足分段的 Gutenberg-Richter 定律(Gutenberg, Richter, 1944; 1954). 换言之, 在地震活动性的时间尺度上得到的 GR 定律, 看来可以拓展到一次地震的震源破裂过程的时间尺度上.

1 地震的位错分布

本研究中使用的 1979 年 Imperial Valley 地震($M_w = 6.5$)的震源过程的结果来自 Archuleta(1984); 1989 年 Loma Prieta 地震($M_w = 6.9$)的震源过程的结果来自 Wald 等(1991); 1992 年 Landers 地震($M_w = 7.3$)的结果来自 Wald 和 Heaton(1994)——正是对这次地震的震源过程的研究结果, 使地震破裂过程的自愈合脉冲的概念(Heaton, 1990)得到普遍接受; 1994 年 Northridge 地震($M_w = 6.7$)的结果来自 Wald 等(1996); 1995 年阪神地震的结果来自 Yoshida 等(1996). 在这些地震的震源过程的反演中, 通常将地震断层面划分成大小相等的若干个“子断层”(表 1 给出了“子断层”的大小), 然后用反演的方法求出每个“子断层”上的位错和位错速率随时间的变化, 由位错函数或位错速率函数, 可以给出最终的位错的大小.

有很多研究者研究过这 5 次地震的震源过程. 由不同研究者得到的这些地震的位错分布, 连同其它一些地震的位错分布的结果, 在 Wald 所维护的网站(http://www-socal.wr.usgs.gov/wald/slip_models.html)上可以得到. 由于所用资料的不同和方法的差异, 不同作者得到的结果不尽相同. 本研究所用的结果是经过 McGarr 和 Fletcher(2002)选择和整理的结果.

“子断层”上位错的频度分布可以“换算”成“子地震”的频度分布. 假定一个“子断层”上的平均位错为 D , 则与此相应的“子地震”的地震矩 $M_0 \propto DA$. 其中 A 是“子地震”的等效断层面积. 值得注意的是, A 并不需要一定等于反演中所用的“子断层”的面积. 借用分形几何学中“数盒子”(box-counting)方法的语言说, 这里的 A 相当于一个分形体实际占据的面积, 而反演中人为地划分的“子断层”的面积则相当于盒子的面积. 按照地震参数的标度关系(Scholz, 1990), 应该有 $D \propto A^{1/2}$, $M_0 \propto D^3$. 因此, 如果位错 D 的频度 N 满足

$$N \propto D^{-\beta} \quad (1)$$

的幂律分布, 则 Gutenberg-Richter 定律(Gutenberg, Richter, 1944, 1954)中的 b 值应表示为

$$b = \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

必须指出, 上述从位错的频度分布到“子地震”的频度分布的“换算”, 是建立在一系列理论假定的前提之上的. 但这种简化和换算并非必不可少. 实际上, 我们可以直接考查位错本身的频度分布, 而不必一定要换算成“子地震”的频度分布. 这里之所以进行这种换算, 是因为地震学家已经对 Gutenberg-Richter 定律非常熟悉, 因此用“等效的” b 值来描述位错的频度分布, 更容易讨论其物理意义.

2 幂律关系的确认和标度常数的计算

在幂律关系的确认和标度常数的计算中, 一个必须解决的问题是样本数不足——在这里, 最多有几十个样本可供研究. 幸而这一问题可由最初在社会科学中提出的(Zipf,

1949)、后来在地震学中应用的(Sornette 等, 1996)级序分析(rank-ordering analysis)方法(或者称为 Zipf 分布方法)来解决. 这一方法, 是在双对数图上画出所考察的物理量按从大到小排列的序号与这一物理量本身的大小之间的函数关系. 可以证明(Sornette 等, 1996), 如果该物理量具有幂律形式的频度分布, 则在这一“级序图”上看到的是一条直线; 如果该物理量具有分段的幂律分布, 则在这一级序图上看到的是斜率不同的直线. 统计理论指出, 这种分析可以在只有几十个样本的情况下, 确定是否存在幂律分布. 但值得注意的是, 由两条直线的交点来推算幂律发生变化处的物理量的大小, 却是不可靠的——这样做, 常

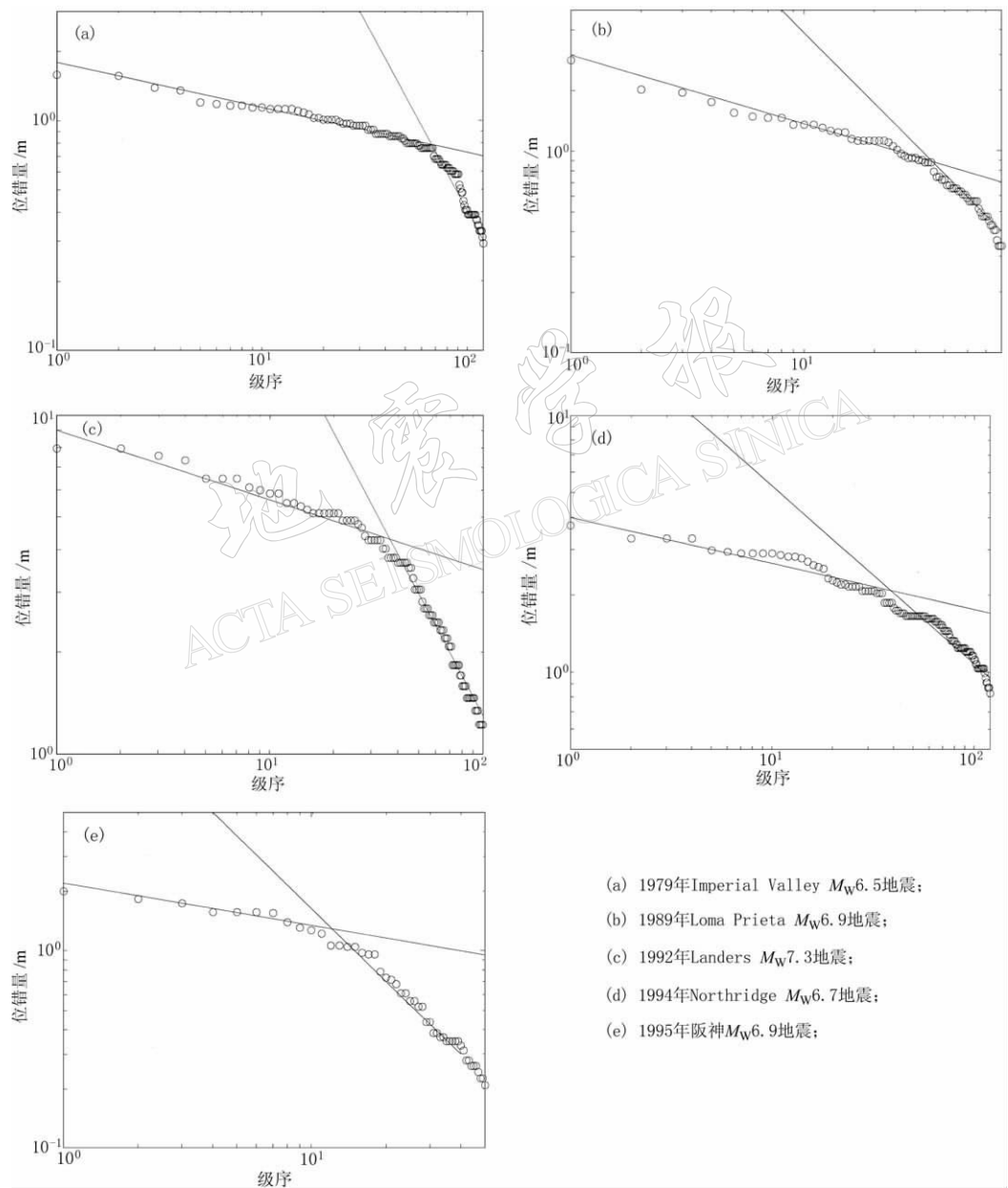


图1 地震的位错分布的级序分析

常有至少是 2 倍的误差.

如果对一个按由大到小的顺序排列的物理量 $\{D_1, D_2, \cdots, D_n\}$, 存在幂律分布 $N \propto D^{-\beta}$, 则在最大似然的意义上, 幂律关系的标度常数可由下式给出 (Sornette *et al*, 1996)

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_i^n \lg(D_i/D_n)} \tag{3}$$

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{n}} \tag{4}$$

图 1 给出了所考虑的 5 次地震的震源断层面上的位错的级序分布, 其中横坐标是级序 (rank), 纵坐标是位错的大小. 对于较大的级序, 或者说较小的位错, 数据有一个明显的跌落. 这一部分, 在图上没有画出. 众所周知, 这种数据的跌落, 是由于反演结果的分辨率的限制所造成的. 这种情况, 与一个地震台网所记录到的小地震的频度偏离标准的 G-R 关系是一样的道理. 因此在图上, 我们只画出大约前 100 个数据. 而不再给出后面的更小的数据. 我们计算标度常数也只用图上所画的数据来进行. 这样, 对于这 5 次地震, 均有样本数的量级为 10^2 的数据可用, 但阪神地震的数据少一些.

在双对数级序图上, 可以看到明显的分段的幂律分布, 由式(3)求得 5 次地震的位错分布的标度常数 β , 再由式(2)得到 b 值, 如表 1 所示.

表 1 两段幂律分布的标度常数

地 震	“子断层”尺度 /km \times km	第一段 起止序号	第一段的 b 值	第二段 起止序号	第二段的 b 值
Imperial Valley	2.5×1	1~70	1.59 ± 0.19	71~120	1.03 ± 0.15
Loma Prieta	3.33×2.5	1~30	1.58 ± 0.29	31~70	0.95 ± 0.15
Landers	3×2.5	1~40	1.53 ± 0.24	41~100	0.98 ± 0.13
Northridge	1.29×1.71	1~40	1.65 ± 0.26	41~120	1.09 ± 0.12
阪神	4×4	1~11	2.20 ± 0.66	12~40	0.96 ± 0.18

分段的幂律分布, 看来不是“子断层”的尺度的影响. 作为一个参照, 图 2a, b 给出了“子断层”的尺度、面积与发生转折处的位错的大小之间的关系. 前已提及, 由图上所读出的发生转折处的位错的大小, 只能是一个大致的概念. 但从图上可以看出, 发生转折处的位错的大小与“子断层”的尺度和面积, 都没有明显的关系.

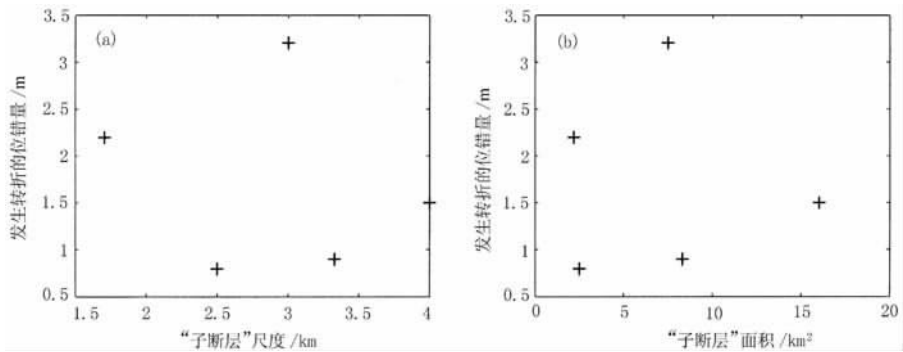


图 2 发生转折的位错与“子断层”尺度(a)和“子断层”面积(b)的关系

3 讨论

本研究的结果给出, 1979 年 Imperial Valley 地震、1989 年 Loma Prieta 地震、1992 年 Landers 地震、1994 年 Northridge 地震、1995 年阪神地震的地震断面上的位错分布, 均满足分段的 Gutenberg-Richter 定律. 对于小位错, 其 b 值接近于 1; 对于比较大的位错, 其 b 值大于 1.

人们很早就认识到地震频度分布的 Gutenberg-Richter 定律来自地震断层的分形性质 (Aki, 1981; King, 1983; Turcotte, 1992). 如果这一看法是正确的, 那么原则上, 适用于地震活动性的时间尺度的 Gutenberg-Richter 定律, 也应该能够拓展到地震破裂的时间尺度. 图 3 给出了 Imperial Valley 地震的位错分布的一个形象的表示, 这里对垂直向坐标 (位错量) 做了夸大, 且沿走向的坐标标度和沿倾向的坐标标度并不相等. 从这一示意性的表示可以看出, 地震断面上的位错分布, 与通常所见的地形十分相似. 因此, 用自相似的语言来描写这种分布, 看来是合适的. 本研究的结果则表明, 描述位错的频度分布的函数, 是与 G-R 关系相似的幂律, 但却不是一个单一的幂律.

在地震强地面运动的合成计算中, 在对震源复杂性了解不多的情况下, 经常经验地用一系列随机分布的小的“子事件”来模拟地震的复杂破裂过程. 但“小事件”按照什么样的分布去取, 却不得不依靠理论上或经验上的假定. 本文得到的结果, 对这类强地面运动的合成计算可能会有所帮助.

如果如上所述, 位错分布的分段幂律并不是由于人为因素造成的, 那么在物理上似乎可以推测, 在一次地震的破裂过程中, 存在两类同时发生的子破裂事件: 一类是“大事件”, 这是地震破裂的主体, 它的 b 值大于 1. 之所以 b 值大于 1, 是因为大的破裂事件具有单一的破裂传播方向, 因而是接近一维的; 另一类是“小事件”. 这些“小事件”满足 b 值约为 1 的 G-R 关系. 这些小事件可能是由动态破裂过程所“触发”出来的 (或者更确切地说, 是“激发”出来的). 而这些“小事件”在时间轴上的延伸, 就是地震的弱余震.

本研究所考查的, 还仅仅是 5 次地震的个例. 所得到的结果是否具有普遍性, 还需要进一步的研究.

感谢陈运泰院士在震源物理和数字地震学方面的指导, 感谢陈颢院士在分形几何和非线性动力学方面的指导. 级序分析方法的使用来自与 D. Sornette 教授和 L. Knopoff 教授的讨论.

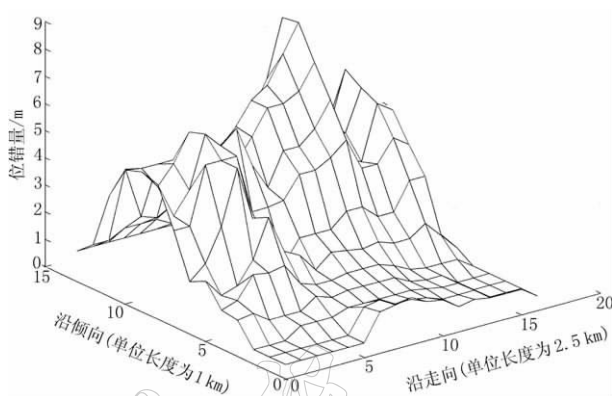


图 3 Imperial Valley 地震的位错分布.
其数据来自 Archuleta (1984)

参 考 文 献

- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 等. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社, 96~153
- Aki K. 1981. A probabilistic synthesis of precursory phenomena[A]. In: Simpson D W, Richards P G eds. *Earthquake Prediction: An International Review*[C]. Washington D C: AGU, 566~574
- Archuleta R J. 1984. A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake[J]. *J Geophys Res*, **89**: 4 559~4 585
- Frankel A. 1991. High-frequency spectral falloff of earthquakes, fractal dimension of complex rupture, b value, and the scaling of strength on faults[J]. *J Geophys Res*, **96**: 6 291~6 302
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **34**: 185~188
- Gutenberg B, Richter C F. 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. 2nd ed[M]. Princeton NJ: Princeton Univ Press, 1~310
- Heaton T H. 1990. Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **64**: 1~20
- King G. 1983. The accommodation of large strains in the upper lithosphere of the Earth and other solids by self-similar fault systems: the geometrical origin of b -value[J]. *Pure Appl Geophys*, **121**: 761~815
- Mai P M, Beroza G C. 2000. Source scaling properties from finite-fault-rupture models[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **90**: 604~615
- Mai P M, Beroza G C. 2002. A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip[J]. *J Geophys Res*, **107**: B11, 2 308, doi: 10.1029/2001JB000588, ESE-10
- McGarr A, Fletcher J B. 2002. Mapping apparent stress and energy radiation over fault zones of major earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **92**: 1 633~1 646
- Scholz C H. 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 160~221
- Sornette D, Knopoff L, Kagan Y Y, *et al.* 1996. Rank-ordering statistics of extreme events: application to the distribution of large earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **101**: 13 883~13 893
- Turcotte D L. 1992. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 35~51
- Wald D J, Heaton T H. 1994. Spatial and temporal distribution of slip for the 1992 Landers, California, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**: 668~691
- Wald D J, Helmberger D V, Heaton T H. 1991. Rupture model of the 1989 Loma Prieta earthquake from the inversion of strong-motion and broadband teleseismic data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **81**: 1 540~1 572
- Wald D J, Heaton T H, Hudnut K W. 1996. The slip history of the 1994 Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**: S49~S70
- Yoshida S, Koketsu K, Shibazaki B, *et al.* 1996. Joint inversion of near-and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake[J]. *J Phys Earth*, **44**: 437~454
- Zipf G K. 1949. *Human Behavior and the Principle of Least-Effort*[M]. Reading, MA: Addison-Wesley

DISTRIBUTION OF SLIP ALONG AN EARTHQUAKE FAULT

Wu Zhongliang^{1,2)}

1) College of Earth Science, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: Slip distribution of the 1979 Imperial Valley, 1989 Loma Prieta, 1992 Landers, 1994 Northridge, and 1995 Kobe earthquake shows a piece-wise Gutenberg-Richter's law. For small slips, the b -value is near to 1; while for large slips, the b -value is larger than 1.

Key words: earthquake slip; Gutenberg-Richter's law; b -value