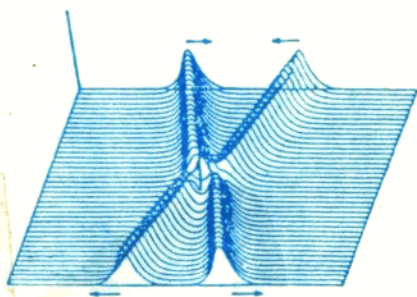


地震科学中的非线性问题

(2)

陈英方 等 编著



地震出版社

地震科学中的非线性问题

(2)

陈英方 等 编著

地震出版社

1995

(京)新登字 095 号

地震科学中的非线性问题

(2)

陈英方 等 编著

责任编辑: 张存德 李 玲

责任校对: 王花芝

地 震 出 版 社 出版发行

北京民族学院南路9号

邮编: 100081

中国地质大学轻印刷厂印刷

787×1092 1/32 4.375印张 100千字

1995年6月第一版 1995年6月第一次印刷

印数: 001—200

ISBN 7-5028-1153-2/P·695

(1546) 定价: 6.00元

目 录

b 值问题的非线性物理解

..... 吴忠良 (1)

基于非线性科学的地震预报方法述评

..... 尹祥础 陈学忠 (15)

孕震系统的非线性探索

..... 安镇文 刘小伟 赵明 朱传镇 (38)

地震过程非线性物理模型研究的现状分析

..... 陈英方 (81)

b 值问题的非线性物理解^①

吴 忠 良

一、引 言

关于 b 值这个概念的起源,有一些不同的说法。比较普遍的看法是 b 值始于 Gutenberg 和 Richter (1944)^[1]关于加州地区的地震活动性的研究和后来进行的关于世界范围内的地震活动性的研究,因此,震级和频度之间的幂律关系又称为 Gutenberg-Richter 定律。这样,1994 年恰好是 b 值的 50 周年纪念。50 年来,特别是 80 年代以来,尽管距离完全揭开 b 值之谜尚有相当长的一段路程,人们对于 b 值的认识确实已经取得了令人瞩目的进步。在此,我们重点介绍一下 90 年代以来关于 b 值的非线性物理学研究的进展。

从物理学的角度看, b 值的魅力在于它令人惊异的简单性和跨越若干个数量级的普适性,因为后来陆续提出的用来描述地震活动性的参数尽管多到几乎可以填满整个拉丁字母表和希腊字母表,却没有一个参数象 b 值这样简单并具有普适性。而与天文学中的提丢斯-波特定则和天体物理学中的狄拉克大数假设的孤寂的境遇不同, b 值问题一直吸引着相当多的地震学家的兴趣,其原因还在于很多破坏性地震之前可能存在的 b 值的前兆变化。

① 国家地震局地球物理研究所论著号 94C0044

在地震学中， b 值的研究一直处于一种自相矛盾的地位。一方面，在很多地震学家中都流传着这样的说法：“这家伙搞不动别的题目了，所以只好去钻研 b 值”；另一方面，又有许多第一流的地震学家不断地进行关于 b 值的物理学问题和地震学问题的探讨，而这方面的研究却又至今未能取得令人满意的结果。

在半个世纪以来围绕 b 值的物理学问题和地震学问题的研究中，至少有几个重要的历史事件是值得一提的：60 年代，茂木清夫、Scholz 等人在岩石破裂实验中发现，岩石破裂之前的声发射事件也存在类似的幂律关系；60—70 年代，Duda, Bath 等注意到，震级-频度关系在震级较大时明显地偏离线性幂律，大地震的数目似乎要比线性外推的结果更多一些；80 年代初，Scholz, 安艺敬一, King 等人按照 Mandelbrot 的概念和方法，把 b 值理解为一种分形，并把地震活动的分形特征与断层系的分形特征联系起来；80 年代，安艺敬一等指出，小震端 b 值的非线性变化可能与 $f_{\max}$ 有着极为密切的联系；80 年代末，Bak 和 Tang 从自组织临界性 (SOC) 的角度将 Gutenberg-Richter 定律解释为一种特殊的 $1/f$ 定律。

90 年代以来关于 b 值的非线性物理学研究的进展是本文介绍的重点。然而有四个方面的工作尽管不是本文介绍的内容，却在有关的进展中具有关键性的意义。第一是关于震级标度和震源性质的地震学研究，因为推动 b 值问题的研究不断深化和不断前进的真正动力还是震级标度研究的不断深化和震源研究的迅速发展，那貌似简单的震级-频度统计其实是以地震学大量的研究成果为基础的。第二是关于地震记录，特别是近震源宽频带记录的频谱特性的研究，近年来这

方面的研究已经开始与 b 值问题的研究物理地联系起来, 并且很有可能成为 90 年代非线性物理学在震学中的应用的另一个生长点。第三是关于地震现象的非线性动力学问题的研究, 特别是 80 年代以来的研究。本文所述的内容正是建立在这些研究成果的基础之上的, 有些则是 80 年代的有关成果的直接的继续和深化。此外, 中国学者在这方面的研究中也做出了创造性的工作, 关于这一点我们将另文详述。

二、关于 b 值的研究

关于 b 值本身的研究仍是 90 年代这方面研究的重要内容之一。Tsapanos (1990)^[2]比较了环太平洋地震带上两个性质不同的构造单元上的 b 值, 一个是南美、中美和墨西哥, 另一个是其他地区。发现第一个构造区的 b 值比第二个构造区系统偏低, 说明 b 值与现代构造运动有着直接的联系。Ogata 等 (1991)^[3]研究了日本 Kanto 地区 b 值的三维图象, 发现微震活动的 b 值与地震波速结构密切相关。Papadopoulos 等 (1993)^[4]研究了希腊弧沟体系的 b 值及震级-频度关系在大震端的非线性变化。Frohlich 和 Davis (1993)^[5]用哈佛 CMT 资料、ISC 资料等四种不同的地震目录研究了用远震资料定出的 b 值, 发现四种结果的差异达 30% 以上, 而这种差异并没有物理意义, 它与具体的目录、震级范围和资料处理方法有关。

震级-频度关系在小震端偏离 G-R 定律的现象是近年来讨论的一个重要问题, 这种针对越来越小的地震事件的讨论显然是与地震观测技术的进步分不开的。Trifu 等 (1993)^[6]用矿山地震记录研究了一个 $200\text{m} \times 200\text{m} \times 200\text{m}$ 范围内的 $M < 1$ 地震活动的地震矩与频度关系的非线性变

化。Taylor 等 (1990)^[7]研究了日本北海道地区的小震活动对 G-R 关系的偏离。Umino 和 Sacks (1993)^[8]研究了日本东北部地壳内地震和中深源地震的非线性震级-频度关系。

在对于小震端的这种非线性分布的讨论中,地震目录的完整性是一个必须首先讨论的问题。目前普遍采用的完整性判据有两个,一是地震分布的非局域性,以避免由于台站接收能力而引起的地震记录缺失,对于单台,则采用 Aki (1987)^[9]的地震密度法。二是 Rydelek-Sacks 检验 (Rydelek and Sacks, 1989)^[10],其基本点是假定小震活动具有无规的泊松分布,而人类活动的噪声干扰在晚间总比在白天小,所以如果在 24 小时的统计中出现明显的依赖于时间的方向性,而且这种方向性超出了无规运动假设所能容许的范围,那么地震目录就是不完整的。应该指出的是,这两个判据都是必要性判据,但是,目前的工作似乎是在用这两个必要性判据进行充分性论证,这显然是不够的。影响结果的另一个致命的问题是在进行震级-频度统计之前必须去掉余震,而去掉余震的不同的方法也对结果有很大影响。Molchan 和 Dmitrieva (1992)^[11]讨论了余震识别问题,并提出了基于博弈理论 (game theory) 的余震鉴别方法。

近年来非线性动力学的研究结果表明,地震活动的 b 值与断层系的分形特征有着极为密切的联系。90 年代以来,也有一些关于断层系的分形特征和岩石破裂的分形特征的测量的报道和争论。Velde 等 (1990)^[12]用康托尔集法 (Cantor's dust method) 进行岩石破裂的分形特征的分析, Harris 等 (1991)^[13]对这种方法进行了讨论。Vignes-Adler 等 (1991)^[14]针对非洲大陆的两个地区研究了从卫星影象

到地面资料的不同尺度的断层系的特点。Merceron 和 Velde (1991)^[15]分析了日本北海道 Toyoha 矿的断裂的分形。Matsumoto 等 (1992)^[16]研究了日本和菲律宾的断层系的分形。值得注意的是, Davy (1993)^[17]研究了圣安德烈斯断层系的长度-频度分布,发现这种分布并不满足标准的幂律关系。考虑到近年来围绕分形测量及其不确定性的研究和争论,在这方面还有许多问题值得进一步研究。

三、从非线性物理学角度对 b 值问题的理解

b 值在一个相当宽的震级范围内接近于一个常数的事实启发人们把地震现象看作一种自组织临界现象,而将 Gutenberg-Richter 定律看作一种特殊的 $1/f$ 定律。事实上,在地震现象的自组织临界性假说中, Gutenberg-Richter 定律占有非常重要的地位。90 年代以来,这方面的理论研究亦有所发展。几乎与 Bak 和 Tang (1989) 的工作同时, Ito 和 Matsuzaki (1990)^[18]用 SOC 的概念和一个可以产生 $1/f$ 噪声的细胞自动机模型解释地震活动的总体特征。Sornette 等 (1990)^[19]讨论了地震作为一种自组织临界现象的物理成因和地质成因,并仿造朗道理论,根据对称性和守恒关系提出了一个二级相变场论模型。

另一种看法是将地震破裂本身作为一种相变 (Sornette, A. and D. Sornette, 1990)^[20]。Matsuzaki 和 Takayasu (1991)^[21]引入一个高度简化的二维粘滑模型,在这个模型中存在动力学有序-无序相变,只有在临界点附近,地震分布才满足 Gutenberg-Richter 定律。SOC 假说和相变假说这两种假说具有相近的形式,但从本质上说, SOC 假说和相变假说所处理的并不是同一个时空尺度上的地震现象。它

们的共同点是都把 G-R 定律看成是许多小的基本单元之间的非线性相互作用的直接结果,而这也是从非线性物理学角度进行关于 b 值的探讨的基本思路。

由于在临界点附近不同的物理体系可能存在一些与体系无关的普适的性质,所以有关模型尽管是非常简单的,却可能揭示了地震现象的某些本质特征。在这个基本概念的框架下,一些作者引入看上去似乎是过于简单的模型进行对地震现象的基本特征的阐释。Barriere 和 Turcotte (1991)^[22]引入一个改进的 CA 模型,在这个模型中可以包括前震、主震和余震,其中主震和余震都满足 G-R 关系。Sornette 和 Davy (1991)^[23]研究了断层生长的运动学模型,指出如果令断层生长率与断层大小的某次方成反比的话,那么任何初始分布最终都会演化成为一种幂律分布。我们不知道这个结果与目前正在讨论的 DLA 模型^①有怎样的联系。这些不同的模型所显示出的某些共同的性质表明 G-R 定律很有可能具有更普遍的物理意义。当然,模型可以是简化的,甚至是高度简化的,但决不是任意的。Lomnitz-Adler (1993)^[24]讨论了大量的 CA 模型,发现如果把能否产生 Gutenberg - Richter 关系作为评价模型的一个必要性约束的话,那么仅有很少的几类模型是可以接受的。

b 值的空间变化是很多作者关注的问题之一。Sornette 等 (1991)^[25]指出, b 值有两个来源,一是普适的相互作用导致的共同的幂律分布,二是作为背景的断层系统的分形特征。Lomnitz-Adler (1992)^[26]的数值计算也表明 b 值的空间变化与断层系的分形特征有关。80 年代关于 b 值的起源

① 吴忠良,1994,DLA:一个经典地震学问题的现代解,中国地震,10(2)。

有两种不同的看法，一些人将 b 值作为断层系的分形特征的直接结果，并将 b 值与断层系的分形维数联系起来；另一些人则强调，即使在一个均匀的格子上，通过非线性相互作用也能产生 $1/f$ 定律。不妨说这是地震与断裂之间的因果关系的争论在非线性动力学这个分量上的投影。现在看来，这两种机制应当是缺一不可的。

大震端高度的非线性变化——大地震偏多，同时存在一个震级上限——是对各种模型的适用性的另一个关键性的检验。Radulian 等 (1991)^[27] 考虑了两类地震，一是作为背景的“裂纹型” (crack-like) 地震，一是大的“凹凸体型” (asperity-like) 地震。小地震与大地震之间的转化通过逾渗 (percolation) 过程实现，在这个模型中，小地震服从 G-R 关系，大地震则不然。Trifu 和 Radulian (1991)^[28] 还将这种考虑应用于 Vrancea 地区的实际地震资料的分析。Carlson (1991)^[29] 用一个类似于弹簧-滑块模型的离散模型研究了“小震”与“大震”的关系，这个模型满足一维线性波动方程，非线性来自粘滑摩擦项，结果发现“地震”可以分成两类，小事件满足幂律关系，大事件则与 G-R 定律有明显的偏离。这个结果的优点是不需要人为地干预地震事件的分类，“自然地”给出了大地震与小地震之间的区别。Christensen 和 Olami (1992)^[30] 也得到类似的结果。Shaw 等 (1992)^[31] 还用相似的模型研究了大震之前的地震活动性图象，并试图将有关结果与加州地区的实际资料进行比较。亦有人考虑了更复杂一些的模式。Yamashita (1993)^[32] 考虑了大量的裂纹用来模拟断层上地震的复发性，发现小事件的尺度-频度关系服从幂律分布，而大事件则不是如此。

对于小震端的非线性变化的解释目前尚不成熟。Godano

(1991)^[33]使用了一个简化模型,其中包括一系列随机分布的小裂纹,其大小服从高斯分布,大地震由小裂纹聚合产生,在这个体系中,3级以上的地震存在G-R关系,而对更低的震级,则事件数随震级的下降而下降。这个多少不能摆脱循环论证的模型暗示,与 $f_{\max}$ 起源的假说相似,“地震量子化”是小震端非线性震级-频度关系的可能的来源。

在这方面研究中一个值得注意的发展方向是 b 值问题越来越多地与震源谱问题联系起来,有关的非线性动力学模型也越来越多地向着模拟和解释地震辐射的方向发展。Frankel (1991)^[34]从分形断层的角度讨论了震源谱标度关系、 $f_{\max}$ 和 b 值,将震源谱的非 ω^{-2} 变化与震源断层的分形特征联系起来。Lomnitz-Adler 和 Lund(1992)^[35]研究了分形断层产生的准动力学(quasi-dynamical)加速度地震图。Shaw (1993)^[36]研究了与弹簧滑块模型相似的断层模型产生的震源谱。这方面的研究对于探索新的描述地震破裂过程及其复杂性的震源参数具有重要意义,一个值得注意的问题则是在与实际资料进行比较并以此测定震源断层的分形维数的时候必须充分地考虑介质结构的分形特征及其衰减效应。

四、讨 论

90年代以来围绕 b 值的非线性物理学研究呈现出日益深入的特点,它使人感到最终揭开震级-频度关系之谜可能并不需要再过另一个50年的时间了。目前在这方面可以开展的工作很多,然而在这里我们想重点强调一下资料工作。一种地震学理论如果不与实际资料相结合,它的生命力是有限的,只有在不断增加的具有可以接受的精度和置信度的实际资料中我们才能不断地得到新的启发。用于 b 值研究的基

本资料，就其实质而言，实际上是地震学观测与研究成果的一种全方位的综合；用于 b 值问题研究的基本理论，就其实质而言，实际上也是物理学和地震学成果的多方面的结合与渗透的结果。因此，如果认为 b 值问题不过是一种统计，如果真的在研究工作中把 b 值问题处理成一种简单的算术，那就错了。

五、附 录

1994 年是进行 b 值研究的 50 周年。作为献给这个纪念日的的一个小的但可能是有新意的礼物，这里简单介绍一下我们最近的一项工作——在应用于地震问题的非线性物理学研究中有一个标准的推导。从 Gutenberg-Richter 定律出发

$$\log N = a - bm$$

这里 N 是震级不小于 m 的地震的累积频度，结合震级 m 与能量 E 之间关系的假定

$$\log E = c + dm$$

则很容易得出能量与频度之间具有典型的幂律关系

$$N \propto E^{-f}$$

现代地震学中对 Gutenberg-Richter 定律的兴趣，其实更主要地是由于能量的标度性而不是 G-R 关系本身。然而在传统的地震学研究中，辐射能量 E 是通过对有限频带宽度内的地震信号的测量——即震级 m 的测量——间接地得到的，这样得到的结果，由于不得不依据某种模式对频带覆盖范围以外的能量成分进行外推而具有相当大的局限性。

80 年代以来，在一个相当宽的频带范围内无畸变地进行地震辐射能量的测量已经成为可能，这项宽频带地震学的重要的研究成果日前事实上已经部分地成为一些地震学观测

与研究机构的常规工作。为了用更接近“真实”的地震辐射能量来检验地震辐射能量的标度性，我们分析了 NEIC 的宽频带辐射能量测定结果。宽频带辐射能量与哈佛标量地震矩、体波震级和面波震级的比较表明，在宽频带能量与其他震级标度之间似乎并不存在一个理想的对数关系，这个结果的物理意义是，天然地震，特别是发生在岩石圈上部的浅源地震，通常具有比较复杂的频谱成分，然而“经典”震级的测定常常是针对有限频段中的信号，有时甚至是“单色”的信号测量得到的。这就是说为了检验地震能量标度性，我们应当直接考虑宽频带辐射能量本身。

NEIC 宽频带能量目录目前仍不是一个完整的目录，这一不足可能是迄今为止针对这方面资料开展的研究工作较少的原因之一。通过对能量目录的分析，我们注意到能量目录的非完整性与全球台网的分布有着极为密切的关系，而更为重要的是我们可以圈出若干完整性较好的“窗口”进行研究。

宽频带能量与频度关系的统计表明，地震能量标度性仍是存在的，同时由宽频带能量揭示出的标度性甚至比由“经典”震级推导得到的标度性具有更好的特点。部分地出于对 Gutenberg-Richter 定律的敬畏，我们一直小心地避免给出一个尚不成熟的“宽频带能量震级”的定义和提出一个“宽频带 b 值 (BB b)”的概念，然而我们相信这项工作的重要性决不仅仅是一种简单的地震统计，因为不负责任地宣称自己把 G-R 关系推广到宽频带的情况固然是不合适的，但是目前确实存在的一个令人遗憾的事实是，尽管很多非线性地震模型的提出是现代物理学发展的直接结果，用来检验这些模型的地震学观测证据却在某种意义上仍旧停留在“经典”阶段。

参 考 文 献

- [1] Gutenberg, B. and C.F. Richter, Frequency of earthquakes in California, Bull. Seism. Soc. Am., 34, 185—188, 1994.
- [2] Tsapanos, T.M., b-values of two tectonic parts in the Circum-Pacific belt, PAGEOPH, 134, 229—242, 1990.
- [3] Ogata, Y. M. Imoto and K. Katsura, 3-D spatial variation of b-values of magnitude-frequency distribution beneath the Kanto district, Japan. Geophys. J. Int., 104, 135—146, 1991.
- [4] Papadopoulos, G.A., H. G. Skafida and I. T. Vassiliou, Nonlinearity of the magnitude-frequency relation in the Hellenic arc-trench system and the characteristic earthquake model. J. Geophys. Res., 98, 17737—17744, 1993.
- [5] Frohlich, C. and S. D. Davis, Teleseismic b values; or, much ado about 1.0, J. Geophys. Res., 98, 631—644, 1993.
- [6] Trifu, C.-I., T. I. Urbancic and R. P. Young, Non-similar frequency-magnitude distribution for $M < 1$ seismicity, Geophys. Res. Lett., 20, 427—430, 1993.
- [7] Taylor, D. W. A., J. A. Snoke, I.S. Sacks and T. Takanami, Nonlinear frequency-magnitude relationships for the Hokkaido corner, Japan. Bull. Seism. Soc. Am., 80, 340—353, 1990.
- [8] Umino, N. and I. S. Sacks, Magnitude-frequency relations for northeastern Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1492—1506, 1993.
- [9] Aki, K., Magnitude-frequency relation for small earthquakes: a clue to the origin of $f_{\max}$ of large earthquakes, J. Geophys. Res., 92, 1349—1355, 1987.
- [10] Rydelek, P. A. and I. S. Sacks, Testing the completeness of

- earthquake catalogues and the hypothesis of self-similarity, *Nature*, 337, 251—253, 1989.
- [11] Molchan, G. M. and O. E. Dmitrieva, Aftershock identification: methods and new approaches, *Geophys. J. Int.*, 109, 501—516, 1992.
 - [12] Velde, B., J. Dubois, G. Touchard and A. Badri, Fractal analysis of fractures in rocks: the Cantor's dust method, *Tectonophysics*, 179, 345—352, 1990.
 - [13] Harris, C., R. Franssen and R. Loosveld, Fractal analysis of fracture in rocks: the Cantor's dust method—comment, *Tectonophysics*, 198, 107—115, 1991.
 - [14] Vignes-Adler, M., A. L. Page and P. M. Adler, Fractal analysis of fracturing in two African regions, from satellite imagery to ground scale, *Tectonophysics*, 196, 69—86, 1991.
 - [15] Merceron, T. and B. Velde, Application of Cantor's method for fractal analysis of fractures in the Toyoha mine, Hokkaido, Japan, *J. Geophys. Res.*, 96, 16641—16650, 1991.
 - [16] Matsumoto, N., K. Yomogida and S. Honda, Fractal analysis of fault systems in Japan and the Philippines, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 357—360, 1992.
 - [17] Davy, P., On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system, *J. Geophys. Res.*, 98, 12141—12151, 1993.
 - [18] Ito, K. and M. Matsuzaki, Earthquakes as self-organized critical phenomena, *J. Geophys. Res.*, 95, 6853—6860, 1990.
 - [19] Sornette, D., P. Davy and A. Sornette, Structuration of the lithosphere in plate tectonics as a self-organized critical phenomenon, *J. Geophys. Res.*, 95, 17353—17361, 1990.

- [20] Sornette, A. and D. Sornette, Earthquake rupture as a critical point: consequences for telluric precursors, *Tectonophysics*, 179, 327—334, 1990.
- [21] Matsuzaki, M. and H. Takayasu, Fractal features of the earthquake phenomenon and a simple mechanical model, *J. Geophys. Res.*, 96, 19925—19931, 1991.
- [22] Barriere, B. and D. L. Turcotte, A scale-invariant cellular-automata model for distributed seismicity, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 2011—2014, 1991.
- [23] Sornette, D. and P. Davy, Fault growth model and the universal fault length distribution, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1079—1081, 1991.
- [24] Lomnitz-Adler, J., Automaton models of seismic fracture: constraints imposed by the magnitude-frequency relation, *J. Geophys. Res.*, 98, 17745—17756, 1993.
- [25] Sornette, D., C. Vanneste and A. Sornette, Dispersion of b-values in Gutenberg-Richter law as a consequence of a proposed fractal nature of continental faulting, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 897—900, 1991.
- [26] Lomnitz-Adler, J., Interplay of fault dynamics and fractal dimension in determining Gutenberg & Richter's b-value, *Geophys. J. Int.*, 108, 941—944, 1992.
- [27] Radulian, M., C.-I. Trifu and F. O. Carburar, Numerical simulation of the earthquake generation process, *PAGEOPH*, 136, 499—514, 1991.
- [28] Trifu, C.-I. and M. Radulian, Frequency-magnitude distribution of earthquakes in Vrancea: relevance for a discrete model, *J.*