

强震复现周期的分形估计法^{*}

周仕勇, 朱令人

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:从分析地震能积累的动态方程入手, 推导出了估计强震复现时间的分形估计法. 应用这一方法, 可根据现代记录完备的小地震对强震复现周期进行一定精度的估计, 并通过实例对其可靠性和实用性进行了研究.

关键词: 强震; 分形; 复现周期

中图分类号: 315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(1999)02-0140-04

0 引言

强震复现时间的估计在地震灾害预报及工程地震中是极为重要的. 根据某地区地震活动性资料就可对该区的地震危险性进行估计^[1]. 但由于地震记录的历史太短, 加之历史地震记录的遗漏, 历史地震震级的确定欠准确, 强震样本少甚至缺, 不可能为小区域的地震活动提供统计律. 古地震可提供特殊断层上历史地震活动的信息, 但不幸的是, 这种技术时间性强且只有在相当苛刻的环境下有可用性, 而根据一些地质证据(如断层长度等)推断的强震重现间隙难以直接得到检验^[2].

近30a来区域性地震记录台网已基本完善, 记录了大量的中小地震, 并在一定震级限上记录的地震是基本完备, 无遗漏的. 根据这些丰富的, 记录基本完备的, 震级较为准确的中小地震资料推断强震的重现时间不失为一种经济途径. 近年来分形理论在地震学研究中应用的迅速发展为地震的层次结构特征的揭示, 为地震分形研究的深入, 为利用中小地震的时间分布统计律推断强震时间分布的统计律进而估计强震复现周期提供了理论依据. 本研究正是基于这一思想, 从研究地震能量的动平衡方程出发, 根据地震的层次结构特征, 发展了一套由现代完备的中小地震记录推导强震的平均复现时间的分形估计法.

1 基本原理

根据弹性回跳假设, 大震的发生是岩石中应变能积累到一定限度的结果. 若以 $E(t)$ 表示某时刻震源体应变能状态, $I(t)$ 表示该时刻震源体应变能正常积累速率, $O(t)$ 为震源体中应变能释放的速率, 则震源体应变能变化可写为

$$\frac{dE(t)}{dt} = I(t) - O(t), \quad E \leq E_c. \quad (1)$$

收稿日期: 1998-02-23

^{*} 地震科学联合基金资助项目(950085)

第一作者简介: 周仕勇, 男, 1962年出生, 副研究员(现在中国地震局地球物理研究所攻读博士学位), 从事地震活动性预报方法的研究.

式中 E_0 是震源所能积累的应变能限度,它取决于震源所处的构造大小及介质强度.

考虑一个断层系统,系统中存在各种大小不同的破裂.系统中活动的动力源来自外围板块(或构造单元)的作用,可以认为这种作用在数年或数百年中是恒定的,故 $I(t)$ 可视为常量 I ,即系统应变能的输入是常量.如果我们假设地震是一个从应变能积累到完全释放,再积累再释放的循环过程,则由(1)式得

$$\int_0^T \frac{dE}{dt} \cdot dt = \int_0^T I(t) dt \int_0^T O(t) dt$$

式中 T 为一个地震孕育-发生周期,则

$$\int_0^T dE = 0$$

$$\text{则} \quad \int_0^T I(t) dt = \int_0^T O(t) dt \quad (2)$$

$$\text{若 } I(t) \approx I, \text{ 则} \quad I = \frac{1}{T} \int_0^T O(t) dt \quad (3)$$

因此 I 可以用一个地震活动周期应变能释放量的平均值来估计(或用长时间地震能释放的平均值来估计).

我们要着重研究的是 $O(t)$. $O(t)$ 显然与此时断层系统所积累的能量 $E(t)$ 有关.

地震的强度具有层次分布特征^[3].由 Gutenberg-Richter 公式

$$\lg N = a - bM \quad (4)$$

和震级-能量关系可以推算出孕震过程中将发生应变能释放量为 E 的地震个数 $N(E)$, 其推算程序如下:

将 $\lg E = 11.8 + 1.5M$ 代入(4)式得

$$\lg N(E) = a - b[\lg E - 11.8]/1.5$$

$$\text{即} \quad \lg N(E) = a - \frac{2}{3} b \lg E \quad (5)$$

根据地震的离散分布,如果每发生一次最大破裂地震,可由(5)式估计出将有 $(10^{\frac{2}{3}b} - 1)$ 次能量释放为其 $1/10$ 的地震发生,有 $(10^{\frac{4}{3}b} - 10^{\frac{2}{3}b})$ 次能量释放为其 $1/100$ 的地震发生,…….

若定义 E_1 为研究区预计发生最大地震所释放的能量,则总释放能量为

$$E_{\text{总}} = E_1 \left[(10^{\frac{2}{3}b} - 1) \cdot \frac{E_1}{10} + (10^{\frac{4}{3}b} - 10^{\frac{2}{3}b}) \cdot \frac{E_1}{100} + a \right]$$

若取 $b = 0.8$, 则

$$E_{\text{总}} \approx E_1 (1 + 0.24 + 0.082 + 0.028) = 1.35E_1 \quad (6)$$

在 t 时刻,断裂系统可能发生的最大地震的能量释放 E_1 不可能超过系统此时所拥有的应变能 $E(t)$, 即可令

$$E_1 = \eta E(t)$$

式中效率因子 $\eta < 1$, 它与研究区本身介质特性有关,且与 $E(t)$ 有弱正相关关系^[4].考虑到

$\frac{d\eta}{dE} \ll 1$, 为了使问题简化,在本文中我们将 η 视为准静态常数,即假定 $\frac{d\eta}{dE} = 0$.

因为 $E_{\text{总}} = 1.35\eta E(t)$

$$\text{则} \quad O(t) = \frac{dE_{\text{总}}(t)}{dt} = 1.35 \frac{dE(t)}{dt} = 1.35\eta \frac{dE(t)}{dt} \quad (7)$$

将(7)式代入(1)式得

$$\frac{dE(t)}{dt} = I - 1.35\eta \frac{dE(t)}{dt}$$

则 $(1 + 1.35\eta)E(t) = It + C \quad E(t) \leq E_c \quad (8)$

取 $t = 0$, 系统的应变能为参考零点, 即 $E(0) = 0$, 则 $C = 0$

$$E(t) = \frac{I}{[1 + 1.35\eta]}t \quad E(t) \leq E_c$$

由(8)式可以估计出断层系统(研究区)发生最大地震能 E_1 相当于 $\eta E(t)$ 的地震所需的平均间隔时间. 当然可视不同研究区 b 值的不同, 按(5)式对(8)式中的系数进行适当修正.

若我们定义 T_M 是能量释放强度为 E_1 的地震的重现周期, 那么在能量积累过程中, 系统

释放的能量 $E_{释} = 1.35E_1$, 系统共积累能量 $E = \frac{1.35E_1}{\eta}$, 则有

$$\langle T_M \rangle = \frac{1.35E_1}{\eta dE(t)/dt} = \frac{1.35\eta E_1(1 + 1.35\eta)}{\eta I}$$

由 $\lg E_1 = 1.5M + 11.8$, 即得

$$\langle T_M \rangle = \frac{1.35(1 + 1.35\eta) \cdot 10^{1.5M+11.8}}{\eta I} \quad (9)$$

根据长期观测可由(3)式估计出研究区地震能量的平均积累速率, 由(9)式可以估计出不同震级地震 M 所相应的平均重现时间 $\langle T_M \rangle$. 须注意的是, 式中 η 因子是受研究区发震构造非弹性性质支配的一个 $0 < \eta < 1$, 即在(0, 1)范围内的量. 对理想的弹性应变构造而言, $\eta = 1$. 该值可以在用(9)式拟合有较多样本的中等地震的重现周期时进行估计.

2 应用实例

喀什-乌恰震区位于天山断裂与西昆仑断裂的交汇带, 发震构造极为丰富, 是我国地震活动最强烈最集中的地区之一, 也是新疆7级地震活动的主体地区. 该区自1970年有台网记录以来已发生7.0级以上地震2次, 6.0~6.9级地震10次, 5.0~5.9级地震数十次. 因此取该区为研究区可为检验本文的方法提供丰富的检验样本. 此外, 考虑到该区由于人烟稀少, 历史地震记录不全, 利用现代较为完整的小震记录推断该区大震的重现时间对科学研究和防震减灾都十分有益.

利用1970年以来研究区内记录相对完整的地震目录, 由(3)式可估算出该区地震能平均积累速率 $I = 6.9 \times 10^2 \times 10^{11.8} \text{J/a}$, 代入(9)式可以计算出一组不同 η 值下各档次地震重现周期(见表1).

表1 不同 η 值下各级地震的平均重现周期

η	各级地震的平均重现周期 $\langle T_M \rangle/a$					
	M8.0	M7.5	M7.0	M6.0	M5.5	M4.5
1.00	325.6	57.9	10.3	1.8	0.30	0.06
0.85	350.0	62.2	11.1	2.0	0.35	0.06
0.75	371.8	66.1	11.8	2.1	0.37	0.07
0.50	464.1	82.5	14.7	2.6	0.46	0.08
0.35	582.9	103.7	18.3	3.3	0.58	0.10

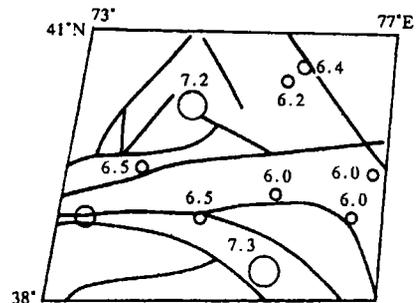


图1 研究区内地质构造和震中分布

Fig.1 Distribution of geologic structures and epicenters in the studied region.

表2给出了有台网记录以来(1970~1996年)研究区4.5级以上地震的统计结果.

由表1可以看出,所计算的地震复现周期 $\langle T_M \rangle$ 随参数 η 的变化不是很大,对中小地震尤其如此.然而,比较表1和表2可以看出,在 $\eta = 0.5$ 时,所估算的 $\langle T_M \rangle$ 值与1970~1996年的实测值最为接近,故取 $\eta = 0.5$ 时的结果作为研究区各级地震重现时间间隙的理论估算值.由表1可容易地查到,该区8级地震的重现周期为400~500a,7.5级强震的重现周期为80~100a,7级地震的重现周期为14a左右.由此可见,该区作为内陆地区,其地震活动强度是非常之高的.这与该区所处的特殊构造环境有关.关于这个问题我们将另文作详细讨论.

表2 研究区1970~1996年
 $M_S \geq 4.5$ 地震频次统计

震级	频次	平均复现周期 $\langle T_M \rangle/a$
$M_S \geq 8.0$	0	
$M_S \geq 7.5$	0	
$M_S \geq 7.0$	2	13.5
$M_S \geq 6.0$	12	2.3
$M_S \geq 5.5$	20	1.3
$M_S \geq 4.5$	174	0.2

3 讨论和结论

强震的重现周期在地震危险性估计中是非常有用的.由于强震样本少,重现周期长达千百年,因而对一些缺少强震记录的地区进行地震危险性估计是困难的.而根据一些地质证据(如断层长度等)推断的强震重现周期难以得到直接检验.应用非线性理论提出的强震重现周期分形估计法,可望能在地震危险性估计中,利用丰富的小震记录结果,科学地推断出强震重现周期参数.

参考文献

- [1] Turcotte D L. Fractals and chaos in geology and geophysics[M]. Cambridge University Press, 1992.
- [2] Randall Marrett. Scaling of intraplate earthquake recurrence interval with fault length and implications for seismic hazard assessment[J]. Geophysical Research Letters, 1994, 21(24): 2637~2640.
- [3] 陈颀编著.分形与分维[M]. 学术出版社, 1989.
- [4] Zbigniew Czechowski. A kinetic model of nucleation, propagation and fusion of cracks[J]. J. Phys. Earth, 1993(41): 127~137.

ESTIMATING STRONG EARTHQUAKE RECURRENCE PERIOD BY THE FRACTAL METHOD

ZHOU Shi-yong, ZHU Ling-ren

(Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

Abstract

Based on the dynamic equation of the seismic energy accumulation, a method for estimating the strong earthquake recurrence period by the fractal principle has been deduced in this paper. The strong earthquake recurrence period can be precisely estimated from the recent complete microquake data by the method. An example has been analyzed in order to test reliability and practicality of the method.

Key words: Strong earthquake; Fractal; Recurrence period