

7-16

p 315.7

板内大震原地准周期复发间隔的概率分布*

p 315.5

甘卫军, 刘百箴, 黄雅虹

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以中国大陆大震原地复发资料(古地震及历史地震)为基础, 采用比较合理的方法确定了板内大震在其活跃期内原地准周期复发的概率密度函数。所得结果表明, 板内大震在重复行为上具有与板间特征地震相类似的分布特征, 两者的差异在于, 板内大震复发间隔的变分系数 COV 为 0.26, 而板间特征地震的该值为 0.215, 即板内大震的重复间隔相对稍显离散。

主题词: 大震; 板内地震; 概率; 复发间隔; 准周期

中图分类号: P315.5; P315.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(1999)01-0007-10

概率分布 地震预报

0 引言

同一震源区或发震断层段上大震所表现出的重复发生行为, 早已为人们所公认, 并成为目前进行地震中长期预报和地震危险性评价的一项重要依据。关于大震的复发行为, 70 年代末到 80 年代初, Bufe(1977), Shimazaki 和 Nakata(1980) 等人曾归纳出一系列简化模式予以描述, 如“精确地震复发模式”、“时间可预报模式”和“滑动可预报模式”等。80 年代中期以来, 由于活断层研究的深入, 尤其是古地震研究的崛起和发展, 使大震记录的时间尺度由平均数百年拓展到了上万年甚至数万年, 极大地丰富了大震的原地复发性资料, 为人们更深刻地认识大震的复发行为奠定了基础。

近年来, 人们对大震原地复发的普遍规律, 至少在两方面取得了比较一致的认识, 一是大震的复发存在着活跃期和平静期; 二是在每一活跃期内, 大震表现为震级和复发间隔均具有一定波动性的准周期过程。

1987 年, Nishenko 和 Buland^[1] 对全球简单板块边界(转换带、会聚带)上大量的特征地震(指在同一震源区或特定断层段上重复发生的主要震级范围内的大震, Schwartz 和 Copper-smith, Aki, 1984; 刘百箴, 1987) 资料进行了统计分析(以历史地震为主, 包含少量的古地震)。他们首先将每个断层段上特征地震的重复间隔进行了归一化处理——将每个重复间隔 T_{ik} (第 k 个断层段上的第 i 个重复间隔) 除以该断层段上重复间隔的中值 $\bar{T}$, 然后, 对归一化后的数据进行了统计分析, 得出了以下结论:

(1) 尽管所收集的资料来自重复间隔及地震矩数值差异很大的各种构造, 但所有断层段上 $T_{ik}/\bar{T}_k$ 的变分系数 COV 均较小且大致为一个常数(0.215)。这似乎表明, 所有板块边界断

收稿日期: 1998-04-30

* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC1999011。

第一作者简介: 甘卫军, 男, 1964 年 8 月生, 副研究员, 现在中国地震局地质研究所攻读博士学位。

层段上的特征地震,其 $T_k/\bar{T}_k$ 服从一种统一的分布.

(2) 较严格的数学拟合表明,对这种统一分布,可用下列双对数正态分布描述:

$$f(T/\bar{T}) = \frac{\bar{T}}{T\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{\alpha}{\sigma_1} e^{-[\ln(T/\bar{T})-\mu_1]^2/2\sigma_1^2} + \frac{1-\alpha}{\sigma_2} e^{-[\ln(T/\bar{T})-\mu_2]^2/2\sigma_2^2} \right\} \quad (1)$$

其中: $\mu_1=0.001$, $\sigma_1=0.066$, $\mu_2=0.019$, $\sigma_2=0.260$, $\alpha=0.341$.

该函数形式较复杂,在进行一些问题的分析时,可采用单对数正态分布形式的简化式,即式(2).一般情况下,2者的总体差异不大,如图2a所示.

$$f(T/\bar{T}) = \frac{\bar{T}}{T\sigma_D\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-[\ln(T/\bar{T})-\mu_D]^2/2\sigma_D^2} \right\} \quad (2)$$

其中: $\mu_D=\alpha\mu_1+(1-\alpha)\mu_2=-0.013$, $\sigma_D=\sqrt{\alpha\sigma_1^2+(1-\alpha)\sigma_2^2}=0.215$

Nishenko等^[1]得出的这一特征地震重复间隔密度函数 $f(T/\bar{T})$,是根据板块边界上滑动速率大、重复间隔短的特征地震资料拟合得出的(其中约70%的重复间隔在100年以内),因而,可较好地适用于板间大震的危险性概率评估.而对于板内大震,其产生的动力学环境和过程与板间大震的情况存在着一定的差异,在同一个活跃期内,它们准周期的复发间隔服从怎样的概率分布,这是需要进行研究的.本文将用所收集到的中国大陆的大震重复性资料,对其进行统计研究.

1 板内大震重复性资料

板内大震的显著特点之一是重复间隔较长(一般为800~3000年),因此,本文所收集的数据(表1),除了一小部分为历史记载外,大部分来自中国近10年来以探槽法和微地貌法为主的古地震研究结果.古地震定年方法主要包括¹⁴C法和热释光法,此外还包括了沉积速率法、裂点溯源法和断层崖坡角法等.

要较准确地拟合确定板内大震重复间隔的概率分布函数,必须要有足够的样本数.通常情况下,数据越多,越能把握分布函数的细节特征.但是如果不能保证数据质量,太多太杂的数据,将会使分布函数的总体特征模糊不清.因此,为了确保数据的连续完整,排除漏震或平静期的干扰,在分析研究的基础上,对一些断层段上的地震重复间隔进行了适当的处理.例如对有些断层段,在相距较近的不同地段开挖了探槽,所得到的地震事件次数及年代有一定的差异,对于这种情况,分别对几个探槽中的资料进行了仔细分析和对比处理,最终选取了比较可靠的一部分连续事件.还有一些断层段上,年代较久远的一些事件,其重复间隔是该段的平均重复间隔的2~4倍.出现这种明显的异常可能有2种原因,一是遗漏了部分古地震事件;二是那些年代较远的事件属于另一个活跃期,与年代较近的一批古地震之间存在一个较长的平静期.显然,对于上述这2种可能,我们均不能将这种“超长”的间隔当作正常的情况进行处理,因此,本文进行了分段处理.这样做既可确保数据序列的连续无遗漏,也可确保只对同一活跃期内的大震的复发行为进行统计研究.

2 板内大震重复性资料的预处理

由于所收集的古地震年代资料来自多种手段和方法,所以它们的可靠性程度互不相同,甚至相差较大.为了能够将这些不同精度的数据放在一起拟合确定分布函数,首先对每个重复间隔数据进行归一化处理,然后对每个归一化数据的相对可靠性作出评估.这样,当把所有的数

表 1 中国大陆板内大震重复性资料

断裂段名称	大震距今时间 $t \pm \sigma_t$ /年	重复间隔 $T \pm \sigma_T$ /年	重复间隔中值 $\bar{T} \pm \bar{\sigma}$ /年	$\bar{\sigma}/\bar{T}$	定年方法及资料来源	备注
海原断裂 西段	12 920 $\pm$ 400					
	9 360 $\pm$ 75	3 560 $\pm$ 406				
	6 300 $\pm$ 70	3 060 $\pm$ 102	3 169 $\pm$ 361	0.11	^{14}C 法, 见《全新世古地震研究方法及其识别标志》(刘百宽等, 1987)	
	3 680 $\pm$ 60	2 620 $\pm$ 92				
	74(1920)	3 606 $\pm$ 60				
可可托海- 二台断裂	9 490 $\pm$ 400	2 630 $\pm$ 565	3 210 $\pm$ 514	0.16	^{14}C 法, 见《可可托海-二台活断层的大震复现期》(戈谢漠等, 1986), 地震地质, Vol. 8, No. 3	年代误差由收集者分析原资料估计给出
	6 860 $\pm$ 400	2 910 $\pm$ 565				
	3 950 $\pm$ 400	3 887 $\pm$ 400				
	63(1931)					
老虎山断裂 西段	4 500 $\pm$ 100	1 500 $\pm$ 233	1 744 $\pm$ 319	0.18	^{14}C 法与地貌法结合, 见《北祁连山活动断裂东段 1:5 万地质填图和特征地震研究》(刘百宽等, 1992)	
	3 000 $\pm$ 200	2 000 $\pm$ 250				
	1 000 $\pm$ 150					
老虎山断裂 东段	5 100 $\pm$ 200	850 $\pm$ 250	967 $\pm$ 130	0.13		
	4 250 $\pm$ 150	1 250 $\pm$ 250				
	3 000 $\pm$ 200	1 075 $\pm$ 265				
	1 925 $\pm$ 175	1 125 $\pm$ 201				
	800 $\pm$ 100	696 $\pm$ 100				
	104(1888)					
西秦岭北缘 断裂东段	12 500 $\pm$ 500	5 000 $\pm$ 707	5 348 $\pm$ 941	0.18	^{14}C 法, 见《西秦岭北缘断裂带黄香沟断裂的活动期次与地震复发周期关系》(腾瑞增等, 1991)	
	7 500 $\pm$ 500	5 652 $\pm$ 500				
	1 848(143)					
昌马断裂	5 348 $\pm$ 941		2 327 $\pm$ 270		^{14}C 法, 见《昌马活断层研究》(国家地震局兰州地震研究所, 1992, 地震出版社)	* 该年代为 8 020 $\pm$ 170 8 430 $\pm$ 70 8 700 $\pm$ 140 的均值
	9 520 $\pm$ 90	1 140 $\pm$ 174				
	8 380 $\pm$ 150*	2 910 $\pm$ 161				
	5 470 $\pm$ 60	2 240 $\pm$ 81				
	3 230 $\pm$ 55	3 168 $\pm$ 55				
贺兰山山前 断裂	62(1932)		751 $\pm$ 119	0.16	地貌法(裂点溯源), 见《用地貌学方法研究贺兰山山前断层全新世活动状况》(杨景春等, 1985), 地震地质, Vol. 7, No. 4	定年误差根据该年代方法“早期的误差比晚期要大”的事实, 分别取了相应年代的 1/10
	6 355 $\pm$ 640	933 $\pm$ 837				
	5 422 $\pm$ 540	1 067 $\pm$ 696				
	4 355 $\pm$ 440	978 $\pm$ 556				
	3 377 $\pm$ 340	1 066 $\pm$ 410				
	2 311 $\pm$ 230	666 $\pm$ 280				
	1 645 $\pm$ 160	845 $\pm$ 178				
	800 $\pm$ 80	555 $\pm$ 85				
海原断裂(西 南华山北麓)	245 $\pm$ 30		860 $\pm$ 117	0.14	^{14}C 法, 见《海原活动断裂带》(国家地震局地质研究所等, 1990), 地震出版社	对个别年代范围取了均值
	2 660 $\pm$ 50	735 $\pm$ 70				
	1 925 $\pm$ 50	835 $\pm$ 78				
	1 090 $\pm$ 60	1 016 $\pm$ 60				
	74(1920)					

续表 1

断裂段名称	大震距今时间 $t \pm \sigma_t$ /年	重复间隔 $T \pm \sigma_T$ /年	重复间隔中值 $\bar{T} \pm \bar{\sigma}$ /年	$\bar{\sigma}/\bar{T}$	定年方法及资料来源	备注
阿尔金断裂 (西水-巴个 峡)	18 620 ± 500 12 590 ± 190 7 080 ± 570	6 030 ± 534 5 510 ± 600	5 773 ± 987	0.17	¹⁴ C 法, 见《阿尔金活动断裂》 (国家地震局《阿尔金活动断 裂带》课题组, 1992), 地震出 版社	
阿尔金断裂 (库什哈)	6 700 ± 500* 4 130 ± 310 2 170 ± 100 960 ± 80	2 570 ± 588 1 960 ± 325 1 210 ± 128	1 711 ± 270	0.16	¹⁴ C 法及沉积速率法, 见《阿尔 金活动断裂》(国家地震局《阿 尔金活动断裂带》课题组, 1992), 地震出版社	* 该年代由沉积 速率法确定
喀什河断裂	5 330 ± 500 2 893 ± 400 182(1812)	2 437 ± 640 2 711 ± 400	2 605 ± 547	0.21	¹⁴ C 法, 见《地震滑坡鉴别标志 的初步研究——以 1812 年新 疆尼勒克地震为例》(杨章, 1987), 西北地震学报, 增刊	
则木河断裂 西昌断层	7 924 ± 155 6 700 ± 155 5 528 ± 95 4 993 ± 137 3 612 ± 106 2 342 ± 152 1 120 ± 120 142(1850)	1 224 ± 219 1 172 ± 181 535 ± 166 1 381 ± 173 1 270 ± 185 1 222 ± 193 978 ± 120	1 129 ± 117	0.10	¹⁴ C 法, 见《则木河活动断裂带 1:5 万地质填图及综合研究 报告》(冯元保等, 1993)	只取了 10 000 年 以来的事件
榆木山东缘 断裂	10 500 ± 600 8 500 ± 600 3 800 ± 600	2 000 ± 848 4 700 ± 848	3 758 ± 921	0.25	热释光法, 见《祁连山—河西 走廊活动断裂系》(国家地震 局地质研究所等, 1993), 地震 出版社	
祁连山北缘 红崖子断裂	4 230 ± 300 2 100 ± 100 385(1609)	2 130 ± 316 1 715 ± 100	1 880 ± 325	0.17		
安宁河断裂 北段	3 736 ± 102 2 790 ± 150 1 957 ± 150 920 ± 80	946 ± 181 833 ± 212 1 037 ± 170	949 ± 163	0.17	¹⁴ C 法、沉积速率法, 见《安宁 河断裂北段的古地震事件及 其在地震研究中的意义》(钱 洪等, 1990), 中国地震, Vol. 6, No. 4	
中卫南断裂	4 840 ± 60 2 690 ± 60 285(1709)	2 150 ± 84 2 405 ± 60	2 275 ± 357	0.16	¹⁴ C 法, 见《中卫—同心活断层 研究》(周俊喜等, 1987), 西北 地震学报, Vol. 9, No. 3	
天山玛纳斯 吐谷鲁断裂	14 500 ± 1 500 10 000 ± 1 000 6 000 ± 500 87(1906)	4 500 ± 802 4 000 ± 118 5 913 ± 500	5 124 ± 927	0.18	热释光法, 见《利用大型探槽 研究新疆北天山玛纳斯和吐 谷鲁逆断裂—褶皱带全新世 古地震》(邓起东等, 1994), 活 动断裂研究, No. 3	年代误差由估计给 出, 依据: ①热释光 法误差较大; ②年 代越早误差越大

续表 1

断裂段名称	大震距今时间 $t \pm \sigma_t$ /年	重复间隔 $T \pm \sigma_T$ /年	重复间隔中值 $\bar{T} \pm \bar{\sigma}$ /年	$\bar{\sigma}/\bar{T}$	定年方法及资料来源	备注
鲜水河断裂	11 016 ± 50(B)	3 316 ± 636				
折多塘断层	7 700 ± 450(B)	2 850 ± 750	3 052 ± 556	0.18		(A), (B)表示测年精度的高低, 这里A级年代误差取平均重复间隔的10%, B级取15%, 下同
	4 850 ± 600(B)	2 935 ± 670				
	1 915 ± 300(A)					
	2 834 ± 50(A)	723 ± 90				
鲜水河断裂	2 111 ± 75(B)	466 ± 90				
色拉哈-康定	1 645 ± 50(A)	439 ± 90	543 ± 68	0.13		
磨西断裂	1 206 ± 75(B)	438 ± 06				
	786 ± 75(B)	604 ± 75				
	164(1786)					
	9 850 ± 180(B)	965 ± 216				
	8 885 ± 120(A)	1151 ± 169				
鲜水河断裂	7 734 ± 120(A)	1 801 ± 216	1 261 ± 161	0.13		
乾宁断裂	5 933 ± 180(B)	1 225 ± 254				
	4 708 ± 180(B)	1 096 ± 254				
	3 612 ± 180(B)					
	12 910 ± 200(B)	1 320 ± 282				
	11 590 ± 200(B)	1 555 ± 282				
	10 035 ± 200(B)	1 635 ± 282	1 430 ± 214	0.15	¹⁴ C法, (李天绍等, 1994)	* 该断裂的古地震明显地分为两个丛集, 这里对两个丛集分别单独处理, 理由见正文。
鲜水河断裂	8 400 ± 200(B)	1 170 ± 282				
道孚断裂*	7 230 ± 200(B)					
	3 980 ± 500 ¹⁾	1 396 ± 522				1) 该值为3 590和4 370的均值, 因分析认为很可能为同一事件
	2 584 ± 150(A)	1 539 ± 212	1 277 ± 217	0.17		
	1 045 ± 150(A)	1 018 ± 150				
	27(1923)					
	11 653 ± 100(A)	753 ± 141				
	10 900 ± 100(A)	790 ± 180				
	10 110 ± 150(B)	2 210 ± 212				
	7 900 ± 150(B)	470 ± 180				
	7 430 ± 100(A)	1 385 ± 180				
鲜水河断裂	6045 ± 150(B)	895 ± 180				
泸霍断层	5 150 ± 100(A)	1 000 ± 141	989 ± 83	0.08		
	4 150 ± 100(A)	735 ± 141				
	3 415 ± 100(A)	565 ± 141				
	2 850 ± 100(A)	550 ± 141				
	2 300 ± 100(A)	767 ± 180				
	1 533 ± 150(B)	1 512 ± 150				
	21(1973)					

据放在一起拟合确定 $f(T/\bar{T})$ 时,可靠性高的数据,对应较大的权值,将对拟合结果产生较大的影响;而可靠性较低的数据,将对应较小的权值,并对拟合结果产生较小的影响。

预处理的具体作法如下:

设 T_{ik} 表示第 k 个断层段上的第 i 个重复间隔,首先,确定出每个断层段上地震重复间隔的中值 $\bar{T}_k$ 及其标准差 σ_k ,并用 $\bar{T}_k$ 对每个 T_{ik} 进行归一化处理,即将 T_{ik} 统一归化为 $T_{ik}/\bar{T}_k$. 然后,用 σ_k 导出每个归一化值 $T_{ik}/\bar{T}_k$ 的方差 $\text{Var}(T_{ik}/\bar{T}_k)$, $\text{Var}(T_{ik}/\bar{T}_k)$ 就是反映可靠性程度的指标,通过它,即可确定出每个归一化数据 $T_{ik}/\bar{T}_k$ 的权值:

$$P_{ik} = 1/\text{Var}(T_{ik}/\bar{T}_k) \quad (3)$$

关于 $\bar{T}_k$ 和 σ_k 的确定,如果该段上重复间隔的精度是相同的,那么, $\ln \bar{T}_k$ 的最大似然估值

$$\text{为:} \quad \ln \bar{T}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \ln(T_{ik}) \quad (4)$$

式中: N_k 表示该断层段上地震的重复间隔数。

实际上,各重复间隔的确定精度往往是不同的.因此,要严格确定出 $\ln \bar{T}_k$ 的最大似然值,应先估计出每个数据 $\ln T_{ik}$ 的方差 $\text{Var}(\ln T_{ik})$. 而估计 $\ln T_{ik}$ 的方差时,必须考虑 2 个随机变化源:第一个变化源是重复间隔 T_{ik} 的外在不确定性,可用标准差 σ_{ik} 来反映. σ_{ik} 是由定年手段及方法所决定的,定年方法和手段越准确,其值越小.如果全部是历史地震资料,则 $\sigma_{ik} = 0$;第二个变化源是重复间隔自身的内在变化性.也就是说,对于一个断层段,即使每次地震的定年完全准确无误差,所确定出的地震重复间隔也是波动变化的.这种变化性程度可用标准差 σ_D 来表示. σ_D 越小,则反映间隔越均匀。

由第一个变化源引起的方差为:

$$\text{Var}_1(\ln T_{ik}) = \frac{\sigma_{ik}^2}{T_{ik}^2} \quad (5)$$

由第二个变化源引起的方差为:

$$\text{Var}_2(\ln T_{ik}) = \sigma_D^2 \quad (6)$$

在理论上, σ_D 应根据没有年代误差的历史地震资料较准确地确定.因为我们的目的是要对每个归一化数据的相对可靠性作出大致评估,因此, σ_D 可近似采用 Nishenko 等^[1] 用板块边界特征地震资料确定出的数值 0.215,这种近似对 $f(T/\bar{T})$ 拟合结果的影响极小,完全可以忽略不计。

因为上述 2 个变化源是相互独立的,故 $\ln T_{ik}$ 的总方差为:

$$\text{Var}(\ln T_{ik}) = \text{Var}_1(\ln T_{ik}) + \text{Var}_2(\ln T_{ik}) = \frac{\sigma_{ik}^2}{T_{ik}^2} + \sigma_D^2 \quad (7)$$

按照最小二乘原理,有:

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{[\ln(T_{ik}) - \ln(\bar{T}_k)]^2}{\sigma_{ik}^2/T_{ik}^2 + \sigma_D^2} = \text{Min} \quad (8)$$

对式(8)的 $\ln(\bar{T}_k)$ 求微分,得:

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{[\ln(T_{ik}) - \ln(\bar{T}_k)]}{\sigma_{ik}^2/T_{ik}^2 + \sigma_D^2} = 0 \quad (9)$$

$$\ln(\bar{T}_k) = \sum_{i=1}^{N_k} \frac{\ln(T_{ik})}{\sigma_{ik}^2/T_{ik}^2 + \sigma_D^2} \bigg/ \sum_{i=1}^{N_k} \frac{1}{\sigma_{ik}^2/T_{ik}^2 + \sigma_D^2} \quad (10)$$

$$\overline{\sigma_k^2} = \overline{T_k^2} \left/ \sum_{i=1}^{N_k} \frac{1}{\sigma_{ik}^2 / \overline{T_k^2} + \sigma_D^2} \right. \quad (11)$$

这样,就确定出了每个断层段上的 $\overline{T_k}$ 及相应的方差 $\overline{\sigma_k^2}$. 下一步可以确定出每个归一化数据 $\ln(T_{ik}/\overline{T_k})$ 的方差 $\overline{\sigma_{ik}^2}$. 因为,这里的问题是要确定出每一个数据 $T_{ik}/\overline{T_k}$ 的可靠性,所以,式(7)中的第二种变化源在这里与本问题无关,于是:

$$\text{Var}(\ln T_{ik}) = \frac{\sigma_{ik}^2}{\overline{T_k^2}} \quad (12)$$

$$\overline{\sigma_{ik}^2} = \text{Var}[\ln(T_{ik}/\overline{T_k})] = \text{Var}(\ln T_{ik} - \ln \overline{T_k}) = \frac{\sigma_{ik}^2}{\overline{T_k^2}} + \frac{\overline{\sigma_k^2}}{\overline{T_k^2}} \quad (13)$$

至此,完成了对每个断层段上各重复间隔归一化处理值 $T_{ik}/\overline{T_k}$ 的可靠性评定,于是,每个归一化数据的对数 $\ln(T_{ik}/\overline{T_k})$ 的权值为:

$$P_{ik} = 1/\overline{\sigma_{ik}^2} = 1/\left(\frac{\sigma_{ik}^2}{\overline{T_k^2}} + \frac{\overline{\sigma_k^2}}{\overline{T_k^2}}\right) \quad (14)$$

在表1中, $T = t_i - t_{i-1}$, $\sigma_T = \sqrt{\sigma_{t_i}^2 + \sigma_{t_{i-1}}^2}$, $\overline{T}$ 及 $\overline{\sigma}$ 分别由式(10)和式(11)算出.

3 板内大震重复间隔的 $f(T/\overline{T})$

3.1 拟合确定方法

首先,对所有的归一化数据 $T_{ik}/\overline{T_k}$ 按其大小进行排序.

$$\text{令} \quad \begin{cases} \tau_j = T_{ik}/\overline{T_k} \\ \sigma_j^2 = \overline{\sigma_{ik}^2} \\ \tau \leq \tau_2 \leq \tau_3 \leq \dots \leq \tau_N \end{cases} \quad (15)$$

这样,每一个 τ_j 对应的频率累积值为 $F_j = j/N$. 假设拟合确定出的最佳概率密度函数为 $f(\tau)$, 则每个频率累积值 F_j 将对应该函数的一个自变量值 $\overline{\tau_j}$, 即:

$$F_j = \int_0^j f(\tau) d\tau \quad (16)$$

由 $f(\tau)$ 和 F_j 所确定出的 $\overline{\tau_1}, \overline{\tau_2}, \dots, \overline{\tau_N}$ 按最小二乘原理应满足

$$\sum_{j=1}^N \frac{[\ln(\tau_{ik}) - \ln(\overline{\tau_j})]^2}{\sigma_j^2} = \text{Min} \quad (17)$$

根据 $T_i/\overline{T}$ 频率直方图(图1a)的形态特征,有理由尝试用3种最有可能的分布类型——正态分布、对数正态分布及 Weibull 分布来拟合板内大震的 $f(T/\overline{T})$. 具体作法是:

以扫描的方式让某一具体分布函数的每个参数按一定的步长在一定的范围内变动,因为每一套参数对应着一组 $\overline{\tau_1}, \overline{\tau_2}, \dots, \overline{\tau_N}$ 及 Σ , 所以,最终可以搜索出使式(17)中的 Σ 等于最小的一套参数,这套参数对应的函数为最佳拟合函数.

需要指出的是,以上整个过程,从前面的公式推导到后面“最佳”拟合函数的扫描搜索,在数学的角度上并不十分严密,而是作了一些必要的简化. 但就所研究的问题而言,这种简化是一种合理的近似,因为该方法所得结果与严密方法之间的差异是极小的.

3.2 拟合结果

3.2.1 正态分布函数形式的拟合结果(图1b)

$$f(T/\bar{T}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(T/\bar{T}-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (18)$$

其中: $\mu = 1.013$, $\sigma = 0.25$.

$$\Sigma = \sum_{j=1}^N \frac{[\ln(\tau_{ik}) - \ln(\bar{\tau}_j)]^2}{\sigma_j^2} = 7.81 \quad (19)$$

3.2.2 对数正态分布函数形式的拟合结果(图 1b)

$$f(T/\bar{T}) = \frac{\bar{T}}{T\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{\alpha}{\sigma_1} e^{-[\ln(T/\bar{T})-\mu_1]^2/2\sigma_1^2} + \frac{1-\alpha}{\sigma_2} e^{-[\ln(T/\bar{T})-\mu_2]^2/2\sigma_2^2} \right\} \quad (20)$$

其中: $\mu_1 = 0.016$, $\sigma_1 = 0.176$, $\mu_2 = -0.150$, $\sigma_2 = 0.427$, $\alpha = 0.752$.

$$\Sigma = \sum_{j=1}^N \frac{[\ln(\tau_{ik}) - \ln(\bar{\tau}_j)]^2}{\sigma_j^2} = 2.48 \quad (21)$$

3.2.3 Weibull 分布函数形式的拟合结果(图 1b)

$$f(T/\bar{T}) = \frac{\alpha}{\beta} (T/\bar{T} - \delta)^{\alpha-1} e^{-(T/\bar{T}-\delta)^\alpha/\beta} \quad (T/\bar{T} \geq \delta) \quad (22)$$

其中: $\alpha = 2.782$, $\beta = 0.435$, $\delta = 0.355$.

$$\Sigma = \sum_{j=1}^N \frac{[\ln(\tau_{ik}) - \ln(\bar{\tau}_j)]^2}{\sigma_j^2} = 7.54 \quad (23)$$

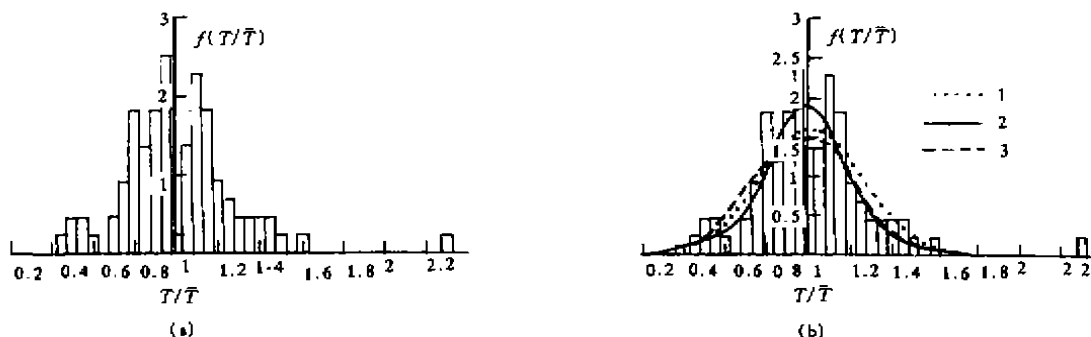


图1 表1资料 $T/\bar{T}$ 频率直方图(a)及3种分布函数形式的拟合结果(b).

Fig.1 Frequency histogram of the $T/\bar{T}$ in Table 1 (a) and fit results (b) for three types of distribution functions.

1 正态分布; 2 对数正态分布; 3 Weibull 分布

对比上述3种可能函数形式的“最佳”拟合结果,对数正态分布的 Σ 值(2.48)明显小于其它2种分布的 Σ 值(7.81, 7.54),因此,对于板内大震重复间隔的概率密度函数,采用对数正态分布函数描述较为合理.考虑到式(20)形式较复杂,可将该式简化如下:

$$f(T/\bar{T}) = \frac{\bar{T}}{T\sigma_D\sqrt{2\pi}} \{e^{-[\ln(T/\bar{T})-\mu_D]^2/2\sigma_D^2}\} \quad (24)$$

其中: $\mu_D = \alpha\mu_1 + (1-\alpha)\mu_2 = -0.025$, $\sigma_D = \sqrt{\alpha\sigma_1^2 + (1-\alpha)\sigma_2^2} = 0.262$.

可见, $\ln(T/\bar{T})$ 近似服从数学期望为 -0.025 , 方差为 0.262 的正态分布. σ_D 的涵义为 T 的变分系数 COV ($COV = \frac{\sigma}{T}$, σ 为 T 的标准差).

将板内大震与板间特征地震的 $f(T/\bar{T})$ ^[1] 进行对比,一个有趣的事实是,二者均服从对数正态分布.二者的差异由图2可以直观地看出:板间特征地震的 $f(T/\bar{T})$ 曲线在形态上具有较突出的“尖峰”,而板内大震的 $f(T/\bar{T})$ 曲线相对较平缓. $f(T/\bar{T})$ 曲线在形态上的这种差

异,反映了板间特征地震的重复间隔相对比较均匀,而板内大震的重复间隔总体上相对稍显离散.产生这种差别的主要原因可能有以下几方面:

首先,板间孕震环境与板内孕震环境存在着较大的差异.板块边界(转换带、消减带)上的应变积累速率高,多期特征地震往往发生在一个相对短的时期内,因此,断层的应力源和应变速率是基本稳定的,因而,地震复发间隔较均匀.而在板内环境下,由于应变积累的速率低,每次地震的孕育往往要经历较长的时间过程,因此,应力源、应变速率等可能会因种种原因而发生一些变化,这些变化将直接影响地震重复间隔的均匀性.

从断裂的物理性质来看,板间断裂带从应变积累到破裂错动基本表现出弹性特征,而板内断裂在这方面除了以弹性特征为主外,还表现出一定的塑性特征.这也是板内大震与板间特征地震相比,其重复间隔较离散的一种原因.

从拟合 $f(T/\bar{T})$ 所用的资料考虑, Nishenko 等^[1] 在确定板间特征地震的 $f(T/\bar{T})$ 时,所用的资料几乎全部为历史地震资料,因此,数据准确无遗漏.而本文用于确定板内大震 $f(T/\bar{T})$ 的资料,来自不同的手段和方法.由于目前的测年水平所限,这些方法和手段所获得的年代数据包含着较大的误差,另外,也不排除少数事件被遗漏的可能,因此这方面的因素可能是导致板内大震的 $T/\bar{T}$ 相对稍显离散的又一个原因.

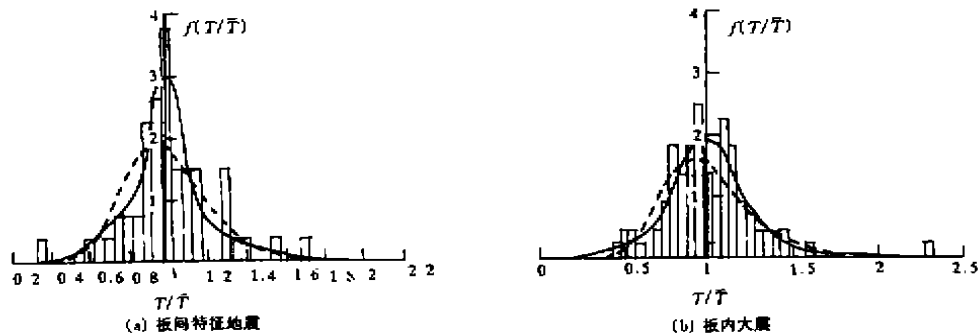


图2 板间特征地震的 $f(T/\bar{T})$ 曲线和板内大震的 $f(T/\bar{T})$ 曲线(虚线为 $f(T/\bar{T})$ 的简化式曲线).

Fig. 2 Density function $f(T/\bar{T})$ of recurrent intervals of earthquakes of interplate characteristic earthquakes and intraplate large earthquakes.

4 几点认识

(1) 关于板内大震在重复行为上是否具有特征地震的特点,多年来,并没有取得统一的认识.本文对实际资料的统计分析表明,板内绝大多数断裂上的大震,尽管其重复间隔长,但在复发行上具有与板间特征地震相类似的分布特征,两者的差异仅表现在板内大震的重复间隔相对稍显离散.因此,大多数的板内大震同样具有特征地震的习性.

(2) 板内大震在同一活跃期内原地复发间隔的概率密度函数,可用对数正态分布函数式(20)或其简化式(24)较好地描述.因此,应用该函数进行某一断层段或震源区的地震危险性分析时,应该首先判定未来的大震是否仍将与以往的大震处于同一活跃期.

(3) Nishenko 等^[1] 确定出板间特征地震重复间隔的变分系数 $COV = \sigma/T = 0.215$, Wu 和 Cornell (1991) 认为该值偏小,取 0.29 或 0.3 可能更合适.对于板内大震,本文用实际资料拟合的结果表明, $COV = 0.26$.

(4) 在拟合确定板内大震的 $f(T/\bar{T})$ 时, 采用了目前活断层研究中常用的各种手段和方法所获取的古地震年代资料, 拟合所得的结果与板块边界特征地震的 $f(T/\bar{T})$ 相对比, 二者在总体上是一致的, 但是也存在小的差异, 且这种差异与一些已知事实相吻合. 这一结果从侧面反映出目前所采用的这些古地震定年手段和方法, 尽管存在着这样那样的一些问题, 但在很大程度上还是有效地反映了地震重复性的主要信息.

本文所用的许多第一手资料是由李天绍研究员、方仲景研究员和聂宗笙研究员提供的, 在此向他们表示衷心的感谢.

参考文献

- [1] Nishenko S P and Buland R. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. Bull Seism. Soc. Am, 1987, 77: 1382~1399.

PROBABILITY DISTRIBUTION OF RECURRENCE INTERVALS OF INTRAPLATE LARGE EARTHQUAKES

GAN Wei-jun, LIU Bai-chi, HUANG Ya-hong

(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou Gansu 730000)

Abstract

Based on the recurrence data of large earthquakes (paleoearthquakes and historical earthquakes) in the mainland of China, the probability density function of the recurrence intervals of intraplate large earthquakes, which occur quasi-periodically in an active period, is defined by a reasonable method. The result shows that intraplate large earthquakes and interplate characteristic earthquakes have a similar probability distribution in their recurrence intervals. The main difference between them is that the COV of the recurrence intervals of intraplate large earthquakes is 0.26, while 0.215 for interplate characteristic earthquakes, that is, intraplate large earthquakes have a more irregular recurrence intervals.

Key words: Macroquake; Intraplate earthquake; Probability; Recurrence interval; Quasi-period