

郭星, 潘华, 李金臣, 侯春林. 2018. 一种基于经验分布的大地震复发概率计算方法. 地震学报, 40(4): 506–518. doi: 10.11939/jass.20170167.
Guo X, Pan H, Li J C, Hou C L. 2018. A method for computing the recurrence probability of large earthquakes based on empirical distribution. *Acta Seismologica Sinica*, 40(4): 506–518. doi: 10.11939/jass.20170167.

一种基于经验分布的大地震复发 概率计算方法^{*}

郭 星¹⁾ 潘 华^{2),†} 李金臣²⁾ 侯春林¹⁾

1) 中国北京 100082 环境保护部核与辐射安全中心

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

摘要 以历史重演原则和构造类比原则为基础, 提出了一种基于经验分布的大地震复发概率计算方法, 该方法不作任何复发概率分布的强假定, 直接通过对大量地震序列数据的蒙特卡罗随机抽样来模拟未来大地震的复发规律, 进而统计得到未来一段时间内的大地震发生概率, 并以鲜水河断裂带炉霍段和道孚段为实例, 利用本文给出的复发概率计算方法得出炉霍段和道孚段未来 50 年大地震发生概率分别为 0.15 和 0.31.

关键词 经验分布 大地震 复发概率 蒙特卡罗方法
doi: 10.11939/jass.20170167 中图分类号: P315.5 文献标识码: A

A method for computing the recurrence probability of large earthquakes based on empirical distribution

Guo Xing¹⁾ Pan Hua^{2),†} Li Jinchen²⁾ Hou Chunlin¹⁾

1) Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environment Protection, Beijing 100082, China

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

Abstract: On the basis of historic recurrence and seismotectonic analogy, we presented a method for calculating earthquake recurrence probability in a period in the future by using empirical distribution function. It adopted the Monte Carlo method to sample from a lot of earthquake sequences to simulate the occurrence of future large earthquakes, so as to achieve statistical large earthquake occurrence probability. Besides, this method never makes assumption that the earthquake recurrence data is according with a certain kind of distribution model. Taking the Luhuo segment and the Daofu segment along the Xianshuihe fault zone as examples, the calculation results showed that the large earthquake occurrence probability in the future 50 years on those two segments are 0.15 and 0.31, respectively.

Key words: empirical distribution; large earthquakes; recurrence probability; Monte Carlo method

^{*} 基金项目 国家自然科学基金项目(51408255)资助。
收稿日期 2017-08-24 收到初稿, 2018-03-23 决定采用修改稿。
[†] 通信作者 e-mail: panhua.mail@163.com



引言

基于弹性回跳理论(Reid, 1910),原地复发的大地震具有时间记忆性,为了描述这种记忆性,Utsu (1972),Hagiwara (1974)以及 Rikitake (1974)提出了一种更新模型,即在一次大地震发生之后,该断层源需长时间积累能量才足以再次发生大地震。

对于更新模型,根据有限的古地震或历史地震序列,研究人员提出了很多种假定的概率分布,包括双指数分布(Utsu, 1972)、高斯分布(Rikitake, 1974)、威布尔分布和伽马分布(Utsu, 1984)、对数正态分布(Nishenko, Buland, 1987)、布朗时间过程分布(Ellsworth *et al.*, 1999; Matthews *et al.*, 2002)等。但这些分布均假定基于有限数据的统计推断,通常缺少严格的物理意义,之所以作某种强分布假定,主要是为了数学计算上的方便(陈汉尧, 胡聿贤, 1994)。

有时候严格地根据样本比基于总体作不现实的强假设要更好,Bootstrap 方法允许研究人员不作很强的分布假设,且在不需要计算抽样分布的分析函数的情况下作统计推断(Efron, 1979; Efron, Tibshirani, 1986)。首先假定 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是样本大小为 n , 来自于同一个样本总体的一个随机抽样。通过把 $1/n$ 的概率放置在 x_1, x_2, \dots, x_n 各样本值点上,根据样本直接构建一个经验概率分布 $\hat{F}(x)$, 此为 x 的经验分布函数,该经验分布函数是未知总体分布函数 $F(X)$ 的非参数最大似然估计(Rohatgi, 1984)。也就是说,若无任何总体分布的其它信息,该样本即为总体的最好估计。然后把这个样本视作总体,利用蒙特卡罗方法根据原始样本生成一系列重取样本,进而对该抽样分布作出统计推断。

Ellsworth 等(1999)采用 Bootstrap 方法评估小样本条件下的 BPT 模型变异系数 α 的随机不确定性时,取初始平均复发间隔 μ 和变异系数 α 分别为 1 和 0.5, 分别按样本数 3—10 个进行随机抽取,结果表明由几个小样本估算的 α 值的随机不确定性很大,而不同样本数所对应的不确定性大小也不同,序列中的地震数目越小,其随机不确定性则越大。

此外, Ellsworth 等(1999)考虑到古地震年代测定的认知不确定性,采用蒙特卡罗方法,由一个带有年代不确定性的原始地震序列资料随机生成大量可能的地震序列,取 μ 和 α 的均值作为该古地震序列的实际 μ 值和 α 值。而 Parsons (2008)在此基础上还考虑了 μ 与 α 之间的相关性,采用蒙特卡罗方法,在 (μ, α) 组合的可能性分布图中选取最大可能的 (μ, α) 组合作为该古地震序列的实际 μ 值和 α 值。上述两种方法对古地震发生年代不确定性的考虑均不够充分,因其选取的 μ 值和 α 值仍是确定性的参数,而不是带有不确定性的概率性参数分布。

为此,本文拟提出一种基于经验分布的大地震复发概率计算方法,简称经验分布方法。与 Bootstrap 方法相比,经验分布方法的数学基础依然是经验分布和蒙特卡罗方法,但与 Bootstrap 方法不同的是,其在不确定方面的应用主要体现在对古地震年代认知不确定性的处理。经验分布方法不作任何复发概率分布的强假定,以历史重演原则和构造类比原则为基本物理假设,通过直接对大量地震序列的蒙特卡罗随机抽样来模拟和推测大地震的发生规律,进而得到未来一段时间内的大地震发生概率,并以鲜水河断裂带的炉霍段和道孚段为实例,利用本文提出的方法分别计算出炉霍段和道孚段未来 50 年的大地震发生概率。

1 基于经验分布的大地震复发概率计算方法

历史重演原则和构造类比原则一直是地震危险性分析和中长期地震预报的两个基本假定,经验分布方法严格遵守上述两个原则。根据历史重演原则,历史上发生的事件未来还会

再次发生,历史上未发生过的事件或超出历史所限定范围的事件不可能发生. Nishenko 和 Buland (1987)所采用的归一化复发间隔数据统计方法也体现了构造类比的假定,即不同构造上的大地震具有相同的归一化复发间隔分布和变异系数,这样才可以用大量非本地复发间隔数据来推断预测本地复发间隔的潜在变化.

经验分布方法的数学基础则类似于 Bootstrap 方法,但又存在一定的差别. Bootstrap 方法的数学基础包括:① 根据有限数据所构建的经验分布函数是总体分布函数的非参数最大似然估计;② 蒙特卡罗方法在处理不确定性分析和相关性分析方面的应用.

基本的 Bootstrap 方法是把样本看作一个总体,根据经验函数有放回地随机抽取一个样本量为 n 的简单随机样本,根据这个样本可以计算得到统计量抽样,进而生成统计量抽样分布的经验估计,这个抽样分布是从一个给定总体中抽取样本量为 n 的大量随机样本而计算得到的统计量取值分布,进而可以统计分析由有限样本 n 所造成的样本参数(均值等)与总体之间偏差的随机不确定性.

地震危险性分析中的不确定性包括随机不确定性和认知不确定性,基本的 Bootstrap 方法中主要利用蒙特卡罗方法来分析有限样本量所造成的随机不确定性,包括偏差估计和置信区间估计.而本研究中则利用蒙特卡罗方法在处理认知不确定性方面的应用,虽然同样基于经验分布,但本文的经验分布方法却是利用蒙特卡罗方法来考虑古地震发生年代的认知不确定性.

经验分布方法可以简述如下:首先,根据拉普拉斯原则,在本地复发间隔样本中,等可能地随机抽取一个本地复发间隔数据 A ;然后在复发间隔数据库中等可能地随机抽取一个复发间隔数据 B 与其进行配对,再在 B 所在地震序列中等可能地抽取一个复发间隔数据 C ($C \neq B$), $A(C/B)$ 即为此次模拟所得的本地潜在复发间隔;随后经过大量蒙特卡罗抽样过程,就可以统计分析本地大地震的潜在复发规律,进而可以计算未来 Δt 年内的发震概率.抽取过程也就是利用蒙特卡罗随机抽样来处理古地震发生年代认知不确定性的过程,而配对过程则是与异地复发间隔数据库所构建的经验分布相联系的过程.该方法所得结果主要受实测复发间隔数据库的丰富程度和精确程度的影响,而不受主观假定的各种数学分布模型的影响.

1.1 地震序列数据库

本研究共收集、整理了 40 个中国大陆地区的原地复发型地震序列(包括古地震和历史地震),共计 156 次地震,所建立的数据库列于表 1.本文中的大地震序列的选取原则为:① 考虑到地震破裂的分级性,同一断层上不同级别的地震不能放在同一地震序列中,同时还要考虑高级别破裂对低级别破裂的控制作用;② 考虑到不同观测者在同一地点测定的古地震序列亦会存在差异,选取最新的和权威的古地震序列;③ 仅选取较完整、研究程度较高的古地震(历史地震)序列进行定量分析;④ 排除古地震年代测定不确定性太大的地震序列,特指不确定性大到可以产生负值或 10 倍以上复发间隔的不现实情况;⑤ 破裂长度大于 40 km.

1.2 仅有一个本地复发间隔情况下的发震概率计算方法

本文假定大地震的复发在不同构造上的变异性相同,即归一化复发间隔的概率密度分布函数相同.而对于仅有一个本地复发间隔的情况,这个复发间隔在归一化复发间隔的概率密度分布函数中所处的位置是不确定的,即可以处于任意位置.根据拉普拉斯原则(等可能原则),这个本地复发间隔数据与数据库中任意一个复发间隔数据匹配的概率相同,即归一

表 1 由 40 个地震序列组成的数据库

Table 1 Database consisting of 40 earthquake sequences

断裂名称	古地震事件 年龄/a	复发间隔 数目	资料来源	断裂名称	古地震事 件年龄/a	复发间隔 数目	资料来源
郯城 $M_S8.5$ 地震断裂	E1: 11 000±1 000	3	王华林 (1995)	冷龙岭断裂	E1: 5 926	4	李正芳等 (2012)
	E2: 7 450±950				E2: 4 050±160		
	E3: 3 500±500				E3: 2 900±270		
	E4: 公元 1668				E4: 1 560±360		
					E5: 公元 1540		
三河-平谷 $M_S8.0$ 地震断裂	E1: 20 000	3	冉永康等 (1997)	鄂拉山断裂	E1: 12 500±100	4	袁道阳等 (2004)
	E2: 13 000				E2: 10 000±150		
	E3: 7 500				E3: 6 000±100		
	E4: 公元 1679				E4: 4 100±300		
					E5: 2 600±400		
北祁连山东段 毛毛山—金强河 断裂	E1: 7 700±50	4	袁道阳等 (1997)	延矾盆地 北缘断裂北段	E1: 21 700±2 000	3	刘静和 汪良谋 (1996)
	E2: 6 100±150				E2: 16 000±1 300		
	E3: 5 200±100				E3: 10 880±3 000		
	E4: 4 250±150				E4: 5 756±1 100		
	E5: 3 050±150						
北祁连山东段 老虎山断裂	E1: 7 700±50	7	袁道阳等 (1997)	延矾盆地 北缘断裂南段	E1: 33 100	6	刘静和 汪良谋 (1996)
	E2: 6 100±150				E2: 28 000		
	E3: 5 200±100				E3: 21 000±1 500		
	E4: 4 250±150				E4: 14 000		
	E5: 3 050±150				E5: 10 800		
	E6: 2 000±300				E6: 7 500		
	E7: 800±100				E7: 公元 1338		
	E8: 公元 1888						
东昆仑断裂带 库赛湖段	E1: 31 900±1 923	9	胡道功 (2007)	怀涿盆地 北缘断裂北段	E1: 20 500±1 180	3	刘静和 汪良谋 (1996)
	E2: 27 990±1 681				E2: 14 500±710		
	E3: 23 635±1 427				E3: 6 700±600		
	E4: 20 345±1 225				E4: <1 310		
	E5: 16 865±1 018						
	E6: 12 935±774						
	E7: 9 730±592						
	E8: 6 955±425						
	E9: 3 100±201						
	E10: 公元 2001						
海原断裂 中段破裂	E1: 6 595±275	6	冉永康等 (1998), 张培震等 (2003)	怀涿盆地 北缘断裂南段	E1: 30 000±1 400	6	刘静和 汪良谋 (1996)
	E2: 5 770±200				E2: 24 500±700		
	E3: 4 965±925				E3: 16 000±2 100		
	E4: 3 382±589				E4: 10 000		
	E5: 2 765±355				E5: 6 600±400		
	E6: 2 240±450				E6: 4 400±500		
	E7: 1 275±350				E7: <2 865		

续表 1

断裂名称	古地震事件 年龄/a	复发间隔 数目	资料来源	断裂名称	古地震事 件年龄/a	复发间隔 数目	资料来源
海原断裂 中段破裂	E1: 6 595±275 E2: 5 770±200 E3: 4 965±925 E4: 3 382±589 E5: 2 765±355 E6: 2 240±450 E7: 1 275±350	6	冉永康等 (1998), 张培震等 (2003)	怀涿盆地北缘 断裂南段	E1: 30 000±1 400 E2: 24 500±700 E3: 16 000±2 100 E4: 10 000 E5: 6 600±400 E6: 4 400±500 E7: <2 865	6	刘静和 汪良谋 (1996)
海原断裂 西段破裂	E1: 6 595±275 E2: 4 680±430 E3: 2 655±225 E4: 1 005±465	3	张培震等 (2003)	华山山前断裂	E1: 7 500 E2: 5 610 E3: 4 250 E4: 2 750±250 E5: 公元 1556	4	刘静和 汪良谋 (1996)
海原断裂 全段破裂	E1: 10 770±1 125 E2: 6 595±275 E3: 公元 1920	2	冉永康等 (1998), 张培震等 (2003)	榆木山北缘 断裂	E1: >10 500±600 E2: 7 200~8 500 E3: 3 700~3 900 E4: 公元 180 秋	3	陈柏林等 (2007)
大青山山前 断裂呼和浩特 段	E1: ≤18 800 E2: 16 965±955 E3: 14 600±710 E4: 11 820±690 E5: 9 465±255 E6: 6 830±260 E7: ≥4 030	6	冉永康等 (2003)	榆木山东缘 断裂	E1: 10 500±600 E2: 8 600±600 E3: 3 800±600	2	邹瑾敞等 (1993)
大青山山前 断裂土右旗段	E1: 10 309±991 E2: 8 760±500 E3: 4 545±466 E4: 650±280 E5: 公元 849	4	冉永康等 (2003)	皇城双塔断裂	E1: 15 930±1 160 E2: 9 460±700 E3: 5 000±500 E4: 公元 1927	3	郑文俊等 (2004)
大青山山前 断裂土左旗段	E1: >10 790 E2: 8 276±577 E3: 6 396±891 E4: 1 947±67	3	冉永康等 (2003)	西秦岭北缘 断裂鸳鸯段	E1: 12 500±500 E2: 7 500±500 E3: 5 000 E4: 公元 1276	3	滕瑞增等 (1994), 曹娟娟等 (2003)
灵武断裂	E1: 27 150±778 E2: 20 000 E3: 13 070±60 E4: 10 586±50 E5: 6 000	4	柴炽章 (2001)	西秦岭北缘 断裂锅麻滩段	E1: 12 450 E2: 5 480±60 E3: 公元 1936	2	滕瑞增等 (1994), 曹娟娟等 (2003)
祁连山东段 天桥沟—黄羊 川断裂	E1: 10 743±343 E2: 9 038±39 E3: 7 050±577 E4: 4 847±185 E5: 3 562±190 E6: 2 476±194 E7: 1 505±253 E8: 公元 1927	7	郑文俊等 (2004)	肃南断层段	E1: 2 200 E2: 1 680 E3: 700	2	刘百箴等 (2008)

续表 1

断裂名称	古地震事件 年龄/a	复发间隔 数目	资料来源	断裂名称	古地震事 件年龄/a	复发间隔 数目	资料来源
祁连山东段天桥 沟—黄羊川断裂	E1: 10 743±343 E2: 9 038±39 E3: 7 050±577 E4: 4 847±185 E5: 3 562±190 E6: 2 476±194 E7: 1 505±253 E8: 公元 1927	7	郑文俊等 (2004)	肃南断层段	E1: 2 200 E2: 1 680 E3: 700	2	刘百箴等 (2008)
中卫—同心断裂	E1: 13 150±763 E2: 8 566±512 E3: 6 535±199 E4: 5 450±238 E5: 3 000 E6: 公元 1709	5	郑文俊等 (2004)	霍山山前 断裂中段	E1: 4 965±490 E2: 3 015±460 E3: 公元 1303	2	刘静和 汪良谋 (1996)
罗山东麓断裂	E1: 8 200±600 E2: 5 020±70 E3: 3 331±92 E4: 公元 1561	3	闵伟等 (2000)	五台山 北麓断裂	E1: 6 700—7 600 E2: 5 321—5 575 E3: 4 400—5 400 E4: 4 200±4 400 E5: 公元 512	4	丁锐等 (2009)
贺兰山东麓断裂	E1: 8 240±170 E2: 6 330±80 E3: 4 760±80 E4: 2 675±70 E5: 公元 1739	4	闵伟等 (2000)	巴音郭勒河 北缘断裂	E1: 32 700±1 450 E2: 15 540±1 320 E3: 3 245±330	2	刘小龙和 袁道阳 (2004)
色尔腾山前断裂 大余太段	E1: 31 690±1 770 E2: 23 000±1 320 E3: 15 420±870 E4: 7 440±440	3	陈立春 (2002)	乌拉山山前 断裂	E1: 23 860±1 000 E2: 17 425±9 710 E3: 16 500±600 E4: 13 400±600 E5: 11 850±830 E6: 8 385±470 E7: 4 130±78	6	陈立春 (2002)
色尔腾山前断裂 乌兰呼洞段	E1: 25 130±1 430 E2: 14 570±820 E3: 11 660±650 E4: 7 220±400	3	陈立春 (2002)	则木河断裂	E1: 7 924±155 E2: 6 700±155 E3: 5 528±95 E4: 4 993±137 E5: 3 612±106 E6: 2 342±152 E7: 1 120±120 E8: 公元 1850	7	甘卫军等 (1999)
山西大同盆地 口泉断裂	E1: 13 730 E2: 6 760—10 820 E3: 5 680 E4: 2 520	3	谢新生等 (2003)	东昆仑活动 断裂西大滩段	E1: 10 302±651 E2: 8 650±500 E3: 7 160±506 E4: 2 830±170 E5: 1 985±121 E6: 1 540±92	5	胡道功等 (2007)

续表 1

断裂名称	古地震事件 年龄/a	复发间隔 数目	资料来源	断裂名称	古地震事 件年龄/a	复发间隔 数目	资料来源
昌马—俄博 断裂	E1: 12 000–13 000	6	李正芳等 (2012)	可可托海— 二台断裂	E1: 9 490±400	3	戈涛谟等 (1986), 甘卫军等 (1999)
	E2: 9 520±90				E2: 6 860±400		
	E3: 8 020–8 700				E3: 3 950±400		
	E4: >6 670±80				E4: 公元 1931		
	E5: >5 470±60						
	E6: 3 230						
	E7: 公元 1932						

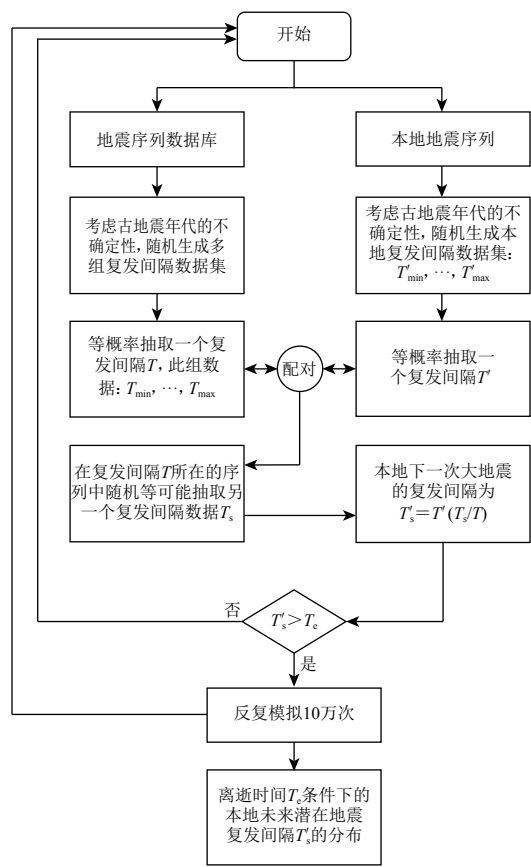


图 1 仅有一个本地复发间隔情况下的经验分布方法流程图

Fig. 1 The flow chart for empirical distribution method with only one local recurrence interval

化后在复发间隔概率密度分布函数中所处的位置相同。综上所述,仅有一个本地复发间隔的情况下,经验分布方法的具体实现步骤如下(图 1):①考虑古地震年代测定的不确定性,在古地震发生时间的不确定性上下限之间进行均匀随机抽样,生成一个本地复发间隔数据 T ,若采用历史地震数据,则无需考虑这种不确定性,直接选取本地仅有的一个复发间隔数据 T ;②考虑古地震年代测定的不确定性,在地震序列数据库中生成多组复发间隔数据集,在其中等概率抽取一个复发间隔数据 T' ,其所在的复发间隔数据集为 $(T'_{\min}, \cdots, T'_{\max})$;③将选取的本地复发间隔 T 与数据库异地复发间隔 T' 进行配对,即它们具有相同的变异性;④在 T' 所在的复发间隔数据集 $(T'_{\min}, \cdots, T'_{\max})$ 中除了 T' 外等可能地抽取一个复发间隔 T_s ,即可得到本地下一次大地震的一个潜在的可能复发间隔 T'_s ,即 $T'_s = T'(T_s/T)$;⑤判断 T'_s 是否大于本地大震离逝时间 T_c ,是则作记录,否则不作记录;⑥反复进行 10 万次上述蒙特卡罗模拟过程,即可得到离逝时间 T_c 条件下的本地复发间隔的概率密度分布;⑦基于上述本地复发间隔的概率密度分布,还可以进一步得到离逝时间 T_c 条件下的未来 Δt 年

内的发震概率。

1.3 两个及以上本地复发间隔情况下的发震概率计算方法

对于有两个及以上本地复发间隔情况下的发震概率的计算,与只有一个本地数据的情况存在一定的差异:首先根据构造类比原则在将本地复发间隔数据与数据库中复发间隔数据

进行配对的过程中,需要增加一个随机抽取本地复发间隔的过程;其次,因为本地有两个或两个以上的复发间隔数据,在配对过程中可能会出现超出历史变异范围的归一化复发间隔数据,而经验分布方法则要求严格遵照历史重演原则,不允许出现超出历史所限定范围的事件.综上所述,两个及以上本地复发间隔情况下经验分布方法的具体实现步骤为(图 2):①考虑古地震年代测定的不确定性,随机生成一组本地复发间隔数据集,并在其中随机抽取一个复发间隔数据 T ,若采用的是历史地震数据,则不需要考虑这种不确定性,直接在本地复发间隔数据中随机抽取一个复发间隔数据 T ;②考虑古地震年代测定的不确定性,在地震序列数据库中生成多组复发间隔数据集,在其中等概率抽取一个复发间隔数据 T' ,其所在的复发间隔数据集为 $(T'_{\min}, \dots, T'_{\max})$;③将抽取的本地复发间隔 T 与数据库异地复发间隔 T' 进行配对,以确保它们具有相同的变异性;④严格遵守历史重演原则,如果在配对过程中出现超出历史变异范围的归一化复发间隔数据,则返回第一步重新进行模拟.若满足条件 $(T_{\max}T'/T)/T'_{\min} > T_{\max}/T_{\min}$ 或 $(T'_{\max}T/T')/T_{\min} > T'_{\max}/T_{\min}$,则需要返回第一步重新开始,否则进行下一步骤;⑤在 T' 所在的复发间隔数据集 $(T'_{\min}, \dots, T'_{\max})$ 中除了 T' 外等可能地抽取一个复发间隔 T_s ,即可得到本地下一次大地震的一个潜在可能复发间隔 T'_s ,即 $T'_s = T'(T_s/T)$;⑥判断 T'_s 是否大于本地地震离逝时间 T_e ,是则作记录,否则不作记录;⑦反复进行 10 万次上述蒙特卡罗模拟过程,即可得到离逝时间 T_e 条件下的本地复发间隔的概率密度分布;⑧基于上述本地复发间隔的概率密度分布,还可以进一步得到离逝时间 T_e 条件下未来 Δt 年内的发震概率.

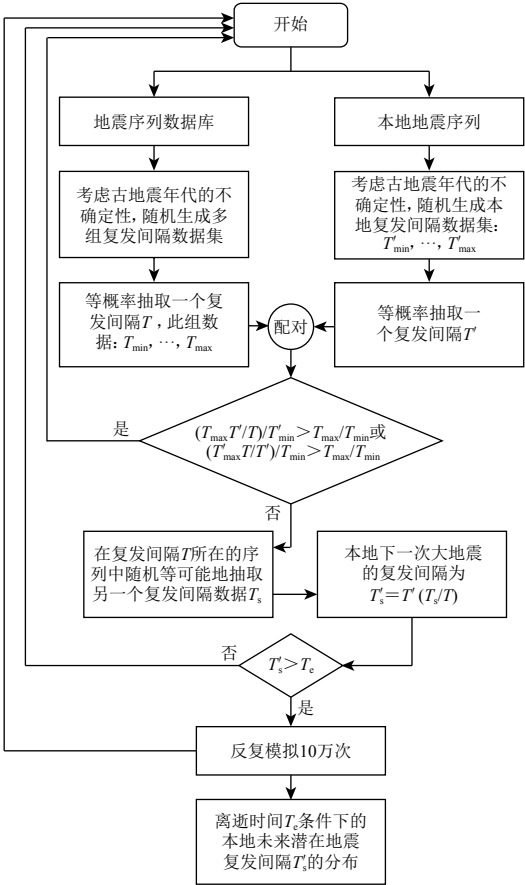


图 2 两个及以上本地复发间隔情况下经验分布方法流程图

Fig. 2 The flow chart for empirical distribution method with two or more local recurrence intervals

2 计算实例

本研究分别选取鲜水河断裂带炉霍段和道孚段,利用本文提出的经验分布方法进行大地震复发概率计算.炉霍段历史上曾经发生过 1816 年 $M7.5$ 和 1981 年 $M7.6$ 地震;道孚段历史上曾经发生过 1792 年 $M6.4$ 、1904 年 $M7.0$ 和 1981 年 $M6.9$ 地震(冉洪流,何宏林,2006).根据历史地震记录,鲜水河断裂带上可收集到近 300 年的强震记录,综合地震完整性分析的结果(黄玮琼等,1994;苏有锦等,2003),鲜水河断裂带上地震目录的完整性最小震级

选取：1725 年以来的 $M6.5$ ，1904 年以来的 $M6.0$ ，1923 年以来的 $M5.0$ ，1970 年以来 $M2.5$ 以上和 1982 年以来 $M2.0$ 。根据历史地震记载和完整性分析结果，炉霍段仅有一个本地复发间隔数据，而道孚段有两个本地复发间隔数据，可以分别采用仅有一个本地复发间隔数据和两个及以上本地复发间隔数据情况下的经验分布方法来计算炉霍段和道孚段未来 50 年的大地震发生概率。

此外，需要注意的是，如果本地地震序列包含在 40 个地震序列所构成的数据库中，在实际计算中需要将数据库中的本地地震序列剔除，然后再进行蒙特卡罗抽样。

2.1 鲜水河断裂带炉霍段的大地震复发概率计算

炉霍段历史上曾经发生过 1816 年 $M7.5$ 和 1981 年 $M7.6$ 地震，对于炉霍段未来 50 年的发震概率，首先可以直接利用仅有一个本地复发间隔 ($T=165\text{ a}$) 情况下基于经验分布方法的发震概率计算方法，直接生成炉霍段大地震复发间隔的概率密度分布柱状图(图 3a)；然后，在蒙特卡罗模拟过程中统计复发间隔不在离逝时间 T_c 内而在未来 50 年内的抽样数目 n ；再统计复发间隔不在离逝时间 T_c 内也不在未来 50 年内的抽样数目 N ，这样就可以得到离逝时间 T_c 所对应的未来 50 年发震概率为 n/N ；最后分别选取不同的离逝时间计算得到炉霍段 50 年发震概率曲线图(图 3b)。考虑到 1981 年 $M7.6$ 地震为炉霍段最近的一次大震，故离逝时间取为 36 年，计算得到炉霍段未来 50 年的发震概率为 0.15。

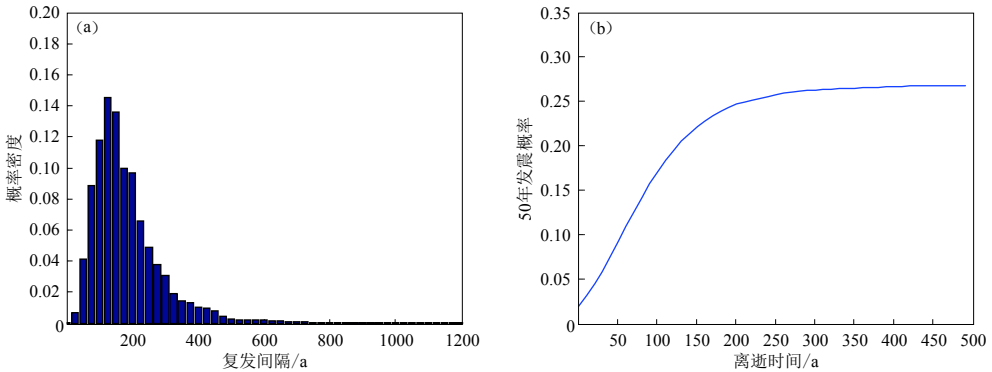


图 3 炉霍段大地震复发间隔的概率密度直方图(a)和未来 50 年发震概率曲线图(b)

Fig. 3 The probability density plot of large earthquakes (a) and the occurrence probability for a 50-year exposure period (b) on the Luhuo segment

2.2 鲜水河断裂带道孚段的大地震复发概率计算

道孚段历史上曾经发生过 1792 年 $M6.4$ ，1904 年 $M7.0$ 和 1981 年 $M6.9$ 地震，对于道孚段未来 50 年的发震概率，首先可以直接利用两个及以上本地复发间隔(两个本地复发间隔 $T_1=112\text{ a}$ ， $T_2=77\text{ a}$)情况下经验分布方法的发震概率计算方法，直接生成道孚段大地震复发间隔的概率密度分布柱状图(图 4a)；然后，在蒙特卡罗模拟过程中统计复发间隔不在离逝时间 T_c 内而在未来 50 年内的抽样数目 n ；再统计复发间隔不在离逝时间 T_c 内也不在未来 50 年内的抽样数目 N ，得到离逝时间 T_c 所对应的未来 50 年发震概率 n/N ；最后分别选取不同的离逝时间，计算得到道孚段 50 年发震概率曲线图(图 4b)。考虑到 1981 年 $M6.9$ 地震为道孚段最近的一次大震，故离逝时间取为 36 年，计算得到道孚段未来 50 年发震概率为 0.31。

很显然，炉霍段和道孚段大地震复发间隔的概率密度分布并不是标准的正态分布，更类

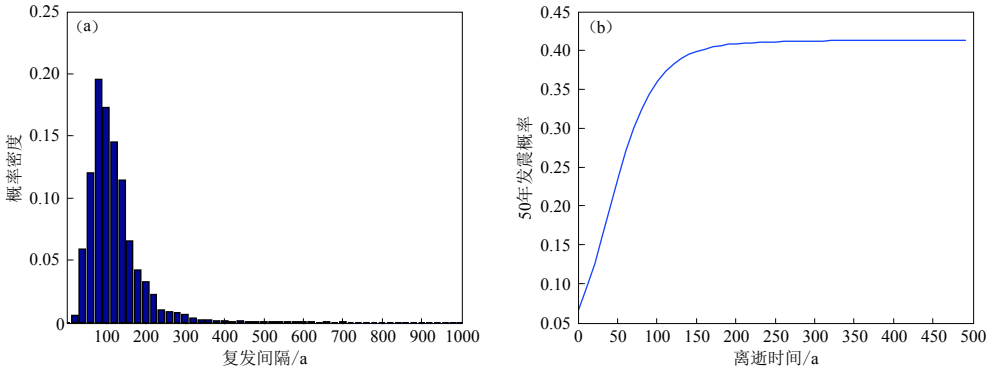


图 4 道孚段大地震复发间隔的概率密度直方图(a)和未来 50 年发震概率曲线图(b)
Fig. 4 The probability density plot of large earthquakes (a) and the occurrence probability
for a 50-year exposure period (b) on the Daofu segment

似于对数正态分布,但其未来 50 年的发震概率曲线却是随着离逝时间的增大而不断递增的,而对数正态分布所对应的发震概率曲线则会在一定离逝时间后出现递减的情况。

本文的经验分布方法中仅采用 10 万次蒙特卡罗模拟,已经可以得到较平滑的发震概率曲线,若要得到更精确的计算结果,则可以采取更多次的蒙特卡罗模拟。

3 讨论与结论

本文提出了一种基于经验分布的大地震复发概率计算方法,简称经验分布方法,该方法不作任何复发概率分布的强假定,以历史重演原则和构造类比原则为物理基础,直接采用经验分布模型,通过对大量复发间隔序列数据的蒙特卡罗随机抽样,模拟未来大地震复发,进而统计得到未来一段时间内的大地震发生概率。经验分布方法与传统 Bootstrap 方法虽然都以经验分布为数学基础,但 Bootstrap 方法主要利用蒙特卡罗方法在处理随机不确定性方面的应用,而经验分布方法则利用蒙特卡罗方法在处理认知不确定性方面的应用。

经验分布方法不需要对大地震复发模型作任何概率分布的强假定,直接通过对大量古地震序列的随机抽样和统计,同样可以得到未来 Δt 年的发震概率。本文以鲜水河断裂带炉霍段和道孚段为计算实例,结果表明,不同于对数正态模型,经验分布方法所得的未来 50 年发震概率曲线随离逝时间的增大不断递增,更符合客观情况。

以鲜水河断裂带炉霍段和道孚段为实例,利用本文给出的复发概率计算方法得到炉霍段和道孚段未来 50 年大地震的发生概率分别为 0.15 和 0.31。本文重点在于探讨一种大地震复发概率的计算方法,炉霍段和道孚段的发震概率计算结果仅供参考,实际应用研究需要作大量的地震地质调查工作,具体模拟过程也更为复杂。

对于无本地复发间隔数据情况下的发震概率的计算,本文提出的经验分布方法存在一定的局限性。若要采用滑动速率法(Shimazaki, Nakata, 1980)或地震矩释放率法(Wesnousky, 1986)估计本地复发间隔,则存在很大的不确定性,这点还需要作进一步研究。

参 考 文 献

曹娟娟,刘百箴,闻学泽. 2003. 西秦岭北缘断裂带特征地震平均复发间隔的确定和地震危险性评价[J]. 地震研究, 26(4): 372-381.

- Cao J J, Liu B C, Wen X Z. 2003. Determination of the average recurrence intervals of characteristic earthquakes and estimate of earthquake risk on northern Xiqinling faults[J]. *Journal of Seismological Research*, **26**(4): 372–381 (in Chinese).
- 柴炽章, 廖玉华, 张文孝, 许文俊, 申旭辉, 田勤俭. 2001. 灵武断裂晚第四纪古地震及其破裂特征[J]. *地震地质*, **23**(1): 15–23.
- Chai Z Z, Liao Y H, Zhang W X, Xu W J, Shen X H, Tian Q J. 2001. Late Quaternary paleoearthquakes and their rupture features along the Lingwu fault[J]. *Seismology and Geology*, **23**(1): 15–23 (in Chinese).
- 陈柏林, 王春宇, 宫红良, 刘建民, 张永双, 刘建生. 2007. 关于河西走廊盆地榆木山北缘断裂晚第四纪活动特征的新认识[J]. *地质通报*, **26**(8): 976–983.
- Chen B L, Wang C Y, Gong H L, Liu J M, Zhang Y S, Liu J S. 2007. A new understanding of the characteristics of Late Quaternary activity of the northern Yumushan marginal fault in the Hexi corridor, northwestern China[J]. *Geological Bulletin of China*, **26**(8): 976–983 (in Chinese).
- 陈汉尧, 胡聿贤. 1994. 不确定性的 Bootstrap 估计及其应用[J]. *地震工程与工程震动*, **14**(1): 1–7.
- Chen H Y, Hu Y X. 1994. Bootstrap estimation of uncertainty and its application[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **14**(1): 1–7 (in Chinese).
- 陈立春. 2002. 河套断陷带的古地震、强震复发规律和未来可能强震地点[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 49–67.
- Chen L C. 2002. *Paleoearthquakes, the Law of Strong Earthquake Recurrence and Potential Sites for the Occurrence of Future Strong Earthquakes in the Hetao Fault-Depression Zone*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 49–67 (in Chinese).
- 丁锐, 任俊杰, 张世民. 2009. 五台山北麓断裂南峪口段晚第四纪活动与古地震[J]. *中国地震*, **25**(1): 41–53.
- Ding R, Ren J J, Zhang S M. 2009. Late Quaternary activity and paleoearthquakes along the Nanyukou segment of the northern piedmont fault of the Wutai mountain[J]. *Earthquake Research in China*, **25**(1): 41–53 (in Chinese).
- 甘卫军, 刘百宽, 黄雅虹. 1999. 板内大震原地准周期复发间隔的概率分布[J]. *西北地震学报*, **21**(1): 7–16.
- Gan W J, Liu B C, Huang Y H. 1999. Probability distribution of recurrence intervals of intraplate large earthquakes[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **21**(1): 7–16 (in Chinese).
- 戈谢漠, 柏美祥, 徐道尊, 向志勇. 1986. 可可托海—二台活断层的大地震复现期[J]. *地震地质*, **8**(3): 1–9.
- Ge S M, Bo M X, Xu D Z, Xiang Z Y. 1986. Recurrence intervals of major earthquakes for the Koktokay–Ertai fault[J]. *Seismology and Geology*, **8**(3): 1–9 (in Chinese).
- 胡道功, 吴中海, 吴珍汉, 赵希涛, 叶培盛. 2007. 东昆仑断裂带库赛湖段晚第四纪古地震研究[J]. *第四纪研究*, **27**(1): 27–34.
- Hu D G, Wu Z H, Wu Z H, Zhao X T, Ye P S. 2007. Late Quaternary paleoseismic history on the Kusai lake segment of east Kunlun fault zone in northern Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, **27**(1): 27–34 (in Chinese).
- 黄玮琼, 李文香, 曹学锋. 1994. 中国大陆地震资料完整性研究之二: 分区地震资料基本完整的起始年分布图象[J]. *地震学报*, **16**(4): 423–432.
- Huang W Q, Li W X, Cao X F. 1994. Study of the completeness of the continental earthquake catalog of China (II): The regional distribution of the beginning years of basically complete earthquake data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **16**(4): 423–432 (in Chinese).
- 李正芳, 周本刚, 冉洪流. 2012. 运用古地震数据评价东昆仑断裂带东段未来百年的强震危险性[J]. *地球物理学报*, **55**(9): 3051–3065.
- Li Z F, Zhou B G, Ran H L. 2012. Strong earthquake risk assessment of eastern segment on the East Kunlun fault in the next 100 years based on paleo-earthquake data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(9): 3051–3065 (in Chinese).
- 刘百宽, 曹娟娟, 袁道阳, 何文贵. 2008. 青藏高原北部活动地块内部的活断层定量资料[J]. *地震地质*, **30**(1): 161–175.
- Liu B C, Cao J J, Yuan D Y, He W G. 2008. Quantitative data of active faults within the active tectonic block in north Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Seismology and Geology*, **30**(1): 161–175 (in Chinese).
- 刘静, 汪良谋. 1996. 运用活断层资料评价汾渭地震带中长期强震危险性[J]. *地震学报*, **18**(4): 427–436.
- Liu J, Wang L M. 1996. Using active fault data to evaluate long-term earthquake risk in Fenwei earthquake zone[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **18**(4): 427–436 (in Chinese).
- 刘小龙, 袁道阳. 2004. 青海德令哈巴音郭勒河断裂带的新活动特征[J]. *西北地震学报*, **26**(4): 303–308.

- Liu X L, Yuan D Y. 2004. Study on the new active features of Bayinguole river active fault, Delingha, Qinghai Province[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **26**(4): 303–308 (in Chinese).
- 闵伟, 张培震, 邓起东. 2000. 区域古地震复发行为的初步研究[J]. 地震学报, **22**(2): 163–170.
- Min W, Zhang P Z, Deng Q D. 2000. Primary study on regional paleoearthquake recurrence behavior[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **22**(2): 163–170 (in Chinese).
- 冉洪流, 何宏林. 2006. 鲜水河断裂带北西段不同破裂源强震震级($M \geq 6.7$)及复发间隔研究[J]. 地球物理学报, **49**(1): 153–161.
- Ran H L, He H L. 2006. Research on the magnitude and recurrence interval of characterized earthquakes with $M \geq 6.7$ along the northwestern portion of the Xianshuihe fault zone in western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(1): 153–161 (in Chinese).
- 冉勇康, 邓起东, 杨晓平, 张晚霞, 李如成, 向宏发. 1997. 1679年三河—平谷8级地震发震断层的古地震及其重复间隔[J]. 地震地质, **19**(3): 193–201.
- Ran Y K, Deng Q D, Yang X P, Zhang W X, Li R C, Xiang H F. 1997. Paleoearthquakes and recurrence interval on the seismogenic fault of 1679 Sanhe-Pinggu M_8 earthquake, Hebei and Beijing[J]. *Seismology and Geology*, **19**(3): 193–201 (in Chinese).
- 冉勇康, 邓起东. 1998. 海原断裂的古地震及特征地震破裂的分级性讨论[J]. 第四纪研究, **18**(3): 271–277.
- Ran Y K, Deng Q D. 1998. Paleoearthquakes along Haiyuan fault and discussion of grading on rupture of large earthquakes[J]. *Quaternary Sciences*, **18**(3): 271–277 (in Chinese).
- 冉勇康, 张培震, 陈立春. 2003. 河套断陷带大青山山前断裂晚第四纪古地震完整性研究[J]. 地学前缘, **10**(增刊1): 207–216.
- Ran Y K, Zhang P Z, Chen L C. 2003. Research on the completeness of paleoseismic activity history since Late Quaternary along the Daqingshan piedmont fault in Hetao depression zone, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(S1): 207–216 (in Chinese).
- 苏有锦, 李永莉, 李忠华, 易桂喜, 刘丽芳. 2003. 川滇地区区域地震目录完整性最小震级分析[J]. 地震研究, **26**(增刊1): 10–16.
- Su Y J, Li Y L, Li Z H, Yi G X, Liu L F. 2003. Analysis of minimum complete magnitude of earthquake catalog in Sichuan-Yunnan region[J]. *Journal of Seismological Research*, **26**(S1): 10–16 (in Chinese).
- 滕瑞增, 金瑶全, 李西侯, 苏向州. 1994. 西秦岭北缘断裂带新活动特征[J]. 西北地震学报, **16**(2): 85–90.
- Teng R Z, Jin Y Q, Li X H, Su X Z. 1994. Recent activity characteristics of the fault zone at northern edge of western Qinling MT[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **16**(2): 85–90 (in Chinese).
- 王华林. 1995. 1668年郯城8.5级地震断裂的全新世滑动速率、古地震和强震复发周期[J]. 西北地震学报, **17**(4): 1–12.
- Wang H L. 1995. Holocene displacement rate, paleoearthquakes and recurrence intervals of strong earthquakes along the 1668 Tancheng earthquake ($M_S=8.5$) fault[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **17**(4): 1–12 (in Chinese).
- 谢新生, 江娃利, 王瑞, 王焕贞, 冯西英. 2003. 山西大同盆地口泉断裂全新世古地震活动[J]. 地震地质, **25**(3): 359–374.
- Xie X S, Jiang W L, Wang R, Wang H Z, Feng X Y. 2003. Holocene paleo-seismic activities on the Kouquan fault zone, Datong basin, Shanxi Province[J]. *Seismology and Geology*, **25**(3): 359–374 (in Chinese).
- 袁道阳, 刘百箴, 吕太乙, 何文贵, 刘小凤. 1997. 北祁连山东段活动断裂带古地震特征[J]. 华南地震, **17**(2): 24–31.
- Yuan D Y, Liu B C, Lü T Y, He W G, Liu X F. 1997. Palaeoearthquake features along the eastern segment of north Qilianshan active fault zone[J]. *South China Journal of Seismology*, **17**(2): 24–31 (in Chinese).
- 袁道阳, 张培震, 刘小龙, 刘百箴, 郑文俊, 何文贵. 2004. 青海鄂拉山断裂带晚第四纪构造活动及其所反映的青藏高原东北缘的变形机制[J]. 地学前缘, **11**(4): 393–402.
- Yuan D Y, Zhang P Z, Liu X L, Liu B C, Zheng W J, He W G. 2004. The tectonic activity and deformation features during the Late Quaternary of Elashan Mountain active fault zone in Qinghai Province and its implication for the deformation of the northeastern margins of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, **11**(4): 393–402 (in Chinese).
- 张培震, 闵伟, 邓起东. 2003. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学: D辑, **33**(8): 705–713.
- Zhang P Z, Min W, Deng Q D. 2003. Paleoearthquake and strong earthquake recurrence of Haiyuan active fault zone[J]. *Science*

- in China: Series D, **33**(8): 705–713 (in Chinese).
- 郑文俊, 袁道阳, 何文贵. 2004. 祁连山东段天桥沟—黄羊川断裂古地震活动习性研究[J]. 地震地质, **26**(4): 645–657.
- Zheng W J, Yuan D Y, He W G. 2004. Characteristics of palaeo-earthquake activity along the active Tianqiaogou-Huangyangchuan fault on the eastern section of the Qilianshan mountains[J]. *Seismology and Geology*, **26**(4): 645–657 (in Chinese).
- 邹谨敬, 虢顺民, 陈志泰, 代华光. 1993. 榆木山东麓断裂带晚第四纪活动特征的初步研究[J]. 高原地震, **5**(2): 31–35.
- Zou J C, Guo S M, Chen Z T, Dai H G. 1993. Preliminary study on the Late Quaternary active feature of the Yumushan eastern marginal fault zone[J]. *Earthquake Research in Plateau*, **5**(2): 31–35 (in Chinese).
- Efron B. 1979. 1977 Rietz lecture: Bootstrap methods: Another look at the Jackknife[J]. *Ann Statist*, **7**: 1–26.
- Efron B, Tibshirani R. 1986. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy[J]. *Statist Sci*, **1**: 54–77.
- Ellsworth W L, Matthews M V, Nadeau R M, Nishenko S P, Reasenber P A, Simpson R W. 1999. *A Physically-Based Earthquake Recurrence Model for Estimation of Long-Term Earthquake Probabilities*[R]. Reston: US Geological Survey Open-File Report: 99–522.
- Hagiwara Y. 1974. Probability of earthquake occurrence as obtained from a Weibull distribution analysis of crustal strain[J]. *Tectonophysics*, **23**(3): 313–318.
- Matthews M V, Ellsworth W L, Reasenber P A. 2002. A Brownian model for recurrent earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(6): 2233–2250.
- Nishenko S P, Buland R. 1987. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(4): 1382–1399.
- Parsons T. 2008. Monte Carlo method for determining earthquake recurrence parameters from short paleoseismic catalogs: Example calculations for California[J]. *J Geophys Res*, **113**(B3): B03302.
- Reid H F. 1910. *The California Earthquake of April 18, 1906: The Mechanics of the Earthquake*[M]. Washington DC: The Carnegie Institution of Washington: 43–47.
- Rikitake T. 1974. Probability of earthquake occurrence as estimated from crustal strain[J]. *Tectonophysics*, **23**(3): 299–312.
- Rohatgi V K. 1984. *Statistical Inference*[M]. New York: John Wiley: 1–940.
- Shimazaki K, Nakata T. 1980. Time-predictable recurrence of large earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **7**: 279–282.
- Utsu T. 1972. *Large Earthquakes Near Hokkaido and the Expectancy of the Occurrence of a Large Earthquake Off Nemuro* [R]. Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction, **7**: 7–13.
- Utsu T. 1984. Estimation of parameters for recurrence models of earthquakes[J]. *Bull Earthquake Res Inst, Univ Tokyo*, **59**(1): 53–66.
- Wesnousky S G. 1986. Earthquakes, Quaternary faults, and seismic hazard in California[J]. *J Geophys Res*, **91**(B12): 12587–12631.