



活动断裂研究

理论与应用

《活动断裂研究》编委会
国家地震局地质研究所

要目

古浪活动断裂带现代应力场的构造解析

内蒙古大青山山前断裂带西段全新世古地震的
大探槽研究

吐鲁番盆地的地震危险性评价

地震的原地复发模式理论及其有关问题

活动断裂定量研究与中长期强地震危险性
概率评价

1937年花石峡7.5级地震地表破裂带及有关问题

地震出版社



《活动断裂研究》编委会

顾问: 丁国瑜

Advisor: Ding Guoyu

主编: 邓起东

Chief Editor: Deng Qidong

副主编: 汪一鹏 张培震

Associate Chief Editor: Wang Yipeng Zhang Peizhen

委员: (以姓氏笔划为序)

丁国瑜 马宗晋 方仲景 王国治

邓起东 卢寿德 卢演侑 刘国栋

刘光勋 刘百麓 汪一鹏 时振梁

杨懋源 张宏卫 张培震 张裕明

聂宗笙 高维明 曹树民 韩慕康

Editorial Committee:

Ding Guoyu	Ma Zongjin	Fang Zhongjing	Wang Guozhi
Deng Qidong	Lu Shoude	Lu Yanchou	Liu Guodong
Liu Guangxun	Liu Baichi	Wang Yipeng	Shi Zhenliang
Yang Maoyuan	Zhang Hongwei	Zhang Peizhen	Zhang Yuming
Nie Zongsheng	Gao Weiming	Cao Shumin	Han Mukang

编辑: 朱向军 那 燕

Editors: Zhu Xiangjun Na Yan

编 者 的 话

在国家地震局有关方面的关心与广大读者的热情支持下,《活动断裂研究》已经出版了五册,受到了国内地震科技工作者乃至地质界的关注,也引起了国外一些同行的重视。看来,本出版物所企求的“实、新、快”(资料充实、认识创新、报道快)宗旨获得了一定程度的收效。

“九五”来临,地震工作要走上新的台阶,确立新的目标。活动断裂和活动构造的研究将在继续深化的同时更加注意与深部孕震构造的联结,更加着力于活动断裂的定量研究结果在以未来强震危险地点与震级上限为主要目标的中长期预测中的应用研究。本出版物将及时反映我国在上述研究领域的最新进展。欢迎同行们积极在本出版物上介绍自己的最新研究成果。

《活动断裂研究》编委会

1996年11月

重点文章提要

1. 古浪活动断裂带现代应力场的构造解析

古浪活动断裂带主要由皇城-双塔断裂、天桥沟-黄羊川断裂组成, 总体走向北西西-东西向。应用构造应力解析方法研究古浪活动断裂带构造应力场, 结合周边区域有关构造应力场资料总结了区域构造应力场的基本特征。

2. 内蒙古大青山山前断裂带西段全新世古地震的大探槽研究

本文根据大探槽内地层的盖断关系、张裂楔及液化等现象, 认为大青山山前活动断裂西段全新世时期存在 6 次古地震事件。在空间位置上断裂活动有向盆地内迁移特征, 在时间上古地震间隔具不均一性。

3. 吐鲁番盆地的地震危险性评价

根据 1:50000 活动构造填图资料, 得出系列活动构造变形速率, 详细地讨论了吐鲁番盆地地震危险性, 提出了有关评价挤压构造区地震危险性新的思路和方法及发震构造模型。

4. 地震的原地复发模式理论及其有关问题

本文较系统地分析了现有地震复发模式的基本概念、各自所基于的物理假定、相互间的关系等, 以及当采用断层滑动法和古地震法估算平均复发间隔所隐含的复发模式以及地震复发行为问题。这些问题对于地震危险性预测具有重要意义。

5. 活动断裂定量研究与中长期强地震危险性概率评价

活动断裂定量研究正在强地震中长期地震危险性预测中发挥重大作用。本文引入以断裂长度和断裂滑动速率为基本输入参数的强地震中长期危险性概率预测方法。克服了同震位移不易获取和许多断裂带上没有历史地震记录的困难, 具有很广的应用范围。

6. 1937 年花石峡 $7\frac{1}{2}$ 级地震地表破裂带及有关问题

前人对 1937 年花石峡 $7\frac{1}{2}$ 级地震的震中位置和所形成的地表破裂带展布、长度, 始终意见不一。本文在对东昆仑活动断裂带及其多期地震地表破裂带全面调查的基础上, 阐明了该大震地表破裂带的展布、长度、组合结构、活动性质和沿破裂带的位移分布。据此, 确定了该地震宏观震中位置, 并对其震级和极震区烈度进行了讨论。

目 录

地震的原地复发模式理论及其有关问题	闻学泽 张培震 (1)
活动断裂定量研究与中长期强地震危险性概率评价	张培震 毛凤英 (12)
四川西部主要走滑活动断裂带各段落未来 10 年地震危险的概率评估	闻学泽 (32)
北天山吐鲁活动逆断裂-背斜几何学、运动学特征研究	杨晓平 邓起东等 (42)
吐鲁番盆地的地震危险性评价	彭斯震 邓起东等 (54)
毛毛山断裂带晚第四纪活动特征	何文贵 刘百饒等 (63)
古浪活动断裂带现代应力场的构造解析	陈永明 贾云鸿等 (78)
皇城-双塔活动断裂分段及不均匀性研究	刘洪春 贾云鸿等 (87)
1713 年寻甸地震地表破裂带的识别与论证	宋方敏 汪一鹏等 (95)
中越边境段红河断裂带活动形迹概述	计凤桔 戴顺民 (105)
色尔腾山山前断裂西段活断层研究	吴卫民 聂宗笙等 (113)
内蒙古大青山山前断裂带西段全新世古地震的大探槽研究	聂宗笙 江娃利等 (125)
1937 年花石峡 $7\frac{1}{2}$ 级地震地表破裂带及有关问题	刘光勋 肖振敏等 (136)
巴颜喀拉山地区断层活动性研究及其地震地质意义	张裕明 李闽峰等 (154)
柴达木盆地北缘的活动构造	叶建青 沈 军等 (172)
罗山东麓断裂、烟筒山断裂与 1561 年 $7\frac{1}{4}$ 级地震	闵 伟 王增光等 (181)
合浦断裂第四纪活动性初步研究	汪一鹏 曹忠权等 (189)
新生断层的形成及其前震活动性研究	徐锡伟 何昌荣 (197)
鲜水河活动断裂带的数字地形模型分析	张景发 王四龙等 (211)
华山山前建筑物基础破坏与断裂蠕滑活动	韩恒悦 米丰收等 (226)

CONTENTS

Earthquake Recurrence Models and Associated Problems	Wen Xueze Zhang Penzhen (1)
Active Faulting and Fault Specific Probabilistic Seismic Hazard Assessment	Zhang Penzhen Mao Fengying (12)
Ten-Years Probabilistic Seismic Hazard Assessment along Major Active	
Strike-slip Fault in Western Sichuan Province	Wen Xueze (32)
Research on Geometry, Kinematics of Tugulu Active Reverse Fault-Fold	Yang Xiaoping Deng Qidong et al. (42)
Assessment of Earthquake Hazards of the Turfan Basin, Northwestern China	Peng Sizhen Deng Qidong et al. (54)
The Late Quaternary Activity of the Maomaoshan Fault Zone	He Wengui Liu Baichi et al. (63)
Tectonic Analysis of Contemporary Stress Field along the Gulang	
Active Fault Zone	Chen Yongming Jia Yunhong et al. (78)
Research on Segmentation Inhomogeneity of the Huangcheng-Shuangta	
Active Fault	Liu Hongchun Jia Yunhong et al. (87)
Recognition and Demonstration of the Surface Rupture Zone Produced by	
1713 Xundian Earthquake	Song Fangmin Wang Yipeng et al. (95)
Outline about the Activity Traces along the Honghe Fault at the Border of	
China-VietNam	Ji Fengju Guo Shunmin (105)
Research on the Active Fault of Western Segment of the Piedmont Fault of	
Mt.Scirteng	Wu Weimin Nie Zongsheng et al. (113)
Study on Holocene Paleoeearthquake by Larg Trench along the Western Segment	
of the Daqingshan Piedment Fault Zone, Inner Mongoliar	Nie Zongsheng Jiang Wali et al. (125)
The Surface Rupture Zone of the 1937 Huashixia Earthquake ($M = 7.5$) in	
Qinghai	Liu Guangxun Xiao Zhenmin et al. (136)
Research on Fault Activity and Their Seismogeological Implication in	
Bayankala Mountain Area	Zhang Yuming Li Minfeng et al. (154)
The Northern Marginal Active Tectonics of Qaidam Basin	
	Ye Jianqing Shen Jun et al. (172)
The Eastern Piedment Fault of Luoshan, the Yantongshan and the Earthquake	
$M = 7\frac{1}{4}$ in 1561	Min Wei Wang Zengguang et al. (181)

- Preliminary Research on the Quaternary Activity of Hupu Fault
 **Wang Yipeng Cao Zhongquan et al. (189)**
- Research on Formation of New-Generation Fault and Its Foreshock Activity
 **Xu Xiwei He Changrong (197)**
- The Analysis of Digital Terrian Model in Xianshuihe Active Fault Zone
 **Zhang Jingfa Wang Silong et al. (211)**
- Fault Creep and Foundation Failure of Building in Front of the Huashan
 Mountain **Han Hengyue Mi Fengshou et al. (226)**

地震的原地复发模式理论及其有关问题

闻学泽

张培震

(四川省地震局, 成都 610041) (国家地震局地质研究所, 北京 100029)

在活断层与地震关系的定量研究中, 无论是采取断层滑动法还是古地震法去估算地震的原地复发间隔, 均包含有一定的物理假定, 而这些物理假定是建立在有关地震原地复发模式基础之上的。因此, 为了在地震原地复发时间间隔的研究中更好地把握和理解所得结果的物理涵义, 正确使用有关计算公式, 以及为了进一步发现有关现行理论和方法的不足并加以改善, 有必要了解地震原地复发模式的基本理论。本文较系统地分析了现有地震复发模式的基本概念、它们各自所基于的物理假定、相互间的关系, 以及当采用断层滑动法和古地震法估算平均复发间隔时所暗含的复发模式以及地震复发行问题。

一、地震的原地复发模式概述

“地震是弹性应变积累和释放过程的最后一‘站’”, 这一概念是 G. K. Gilbert (1883) 最早提出的。以后, 经过 Reid (1910, 1911) 等人的进一步发展, 形成了现代第一个地震预测的理论基础。根据对 1906 年旧金山大地震前后跨圣安德烈斯断层三角网复测结果的分析, Reid 认为: “引起断层在同一部位发生破裂的两次大小相似的大地震, 可用一个时间间隔期分开来; 在这一间隔期中积累的应变量, 相当于伴随第一次地震的弹性应变降”。这就是在地震界流传已近一个世纪的、十分著名的“弹性恢复理论”的要点。这一理论为定量分析原地复发强震或大地震之间的时间间隔, 进而将分析结果应用于地震中一长期预测奠定了基础。根据弹性恢复理论, 一个特定的断层段或者震源区, 当上一次地震中释放掉的应力得到恢复时, 即面临发生下一次地震的危险。由于构造应力积累缓慢, 在活动的板块边界断裂段上, 一次大地震至另一次大地震的应力恢复时间一般为几十至上百年; 大陆内部的非板块边界断裂段上的大地震复发时间间隔往往为一二百年至数千年。

Bufe 等人 (1977) 注意到一些震源区的多次地震复发过程呈现出十分接近的“稳态滑动”, 从而提出一种“精确的地震复发模式”。1980 年, 日本学者岛崎和中田进一步将地震的复发行理想化为三种情况 (图 1)。如图 1 所示, 在地震原地复发的各个轮回中, 若记地震时震源或断层面的极限应力水平为 τ 、震后的终止应力水平为 $\tau-s$ 、震时释放的应力降为 s , 则有: ① 若每一轮回 τ 和 $\tau-s$ 都分别为固定的值, 则相同大小的地震呈严格的周期性复发, 此种复发模式称为“严格周期模式” (图 1a); ② 若极限应力 τ 在每次地震时为固定值, 但震后的终止应力 $\tau-s$ 不固定, 则一次地震的大小 (用释放的应力降 s 表征) 与这次地震后至下一次地震的间隔时间呈正比, 此种模式称为“时间可预报模式” (图 1b); ③ 若每次地震时 τ 不固定, 但 $\tau-s$ 固定, 则下一次地震的大小与它发生之前的应

力积累时间呈正比, 这时称为“滑动可预报模式”(图 1c)。

图 1 的三种地震原地复发模型中, 以不同次地震时极限应力水平 τ 恒定的模型(时间可预报模式)与板块边界的实际情况对应最好。本文第二节将进一步详细分析这种模式。

上述三种模式现已被称为“特征地震”的复发模式。所谓特征地震(characteristic earthquake)是指在同一震源区或特定断裂段上重复发生的主要震级范围内的地震(Schwartz 和 Coppersmith, 1984; Aki, 1984)。已有的研究表明, 在单一震源或发震断裂段的震级—(对数)累积频度关系图上, 中—小地震部分仍然服从于古登堡—里克特关系(指数分布); 而主要(特征)地震的发生频度, 明显地离开由中—小地震活动而确定的古登堡—里克特关系曲线, 亦即不服从于指数分布或 b 值模型(Schwartz 和 Coppersmith, 1984; Davison 和 Scholz, 1985)。特征地震的发生指明了在活动断裂带上存在着独立破裂的段落(丁国瑜, 1992)。

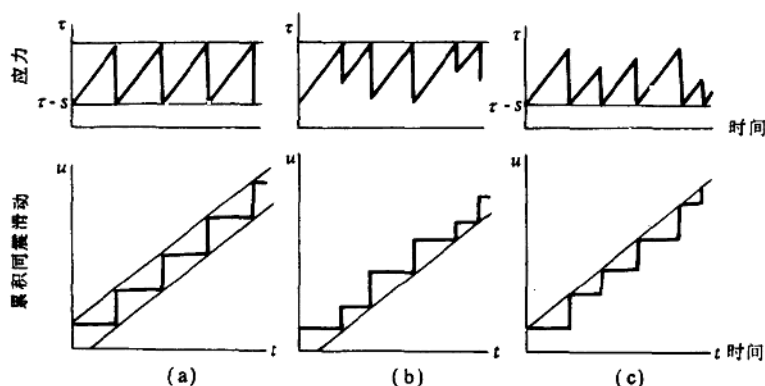


图 1 地震原地复发轮回的三种理想化模式(据 Shimazaki 和 Nakata, 1980)

(a) 严格周期性复发模式; (b) 时间可预报复发模式; (c) 滑动可预报复发模式

Fig.1 Three ideological models of earthquake recurrence (after Shimazaki and Nakata, 1980)

(a) Periodical recurrence model; (b) Time-predictable recurrence model; (c) Slip-predictable recurrence model

部分研究者原先对特征地震复发行为的理解仅仅限于图 1 中的 a 模式, 即认为特征地震复发行为 = 严格周期复发行为。这种认识主要来源于对少数断层段上过去若干次地震同震位错量基本为同一常数的观测结果(Schwartz 和 Coppersmith, 1986)。然而, 越来越多的观测资料表明, 严格周期复发行为是非常罕见的, 在一些已被鉴定为特征地震源的断层段, 原地复发的多次地震的大小一般尚有 0.5 个震级单位波动。因此, 近年来人们已更多地趋于用图中 b 模型(时间可预报模式)以及本文下面将要分析的准周期模式来描述特征地震的复发行为(Working Group on California Earthquake Probabilities, 1988; 1990)。

实际上, 自然界特征地震的复发行为除了有遵循图 1 的三种确定性复发模式的任何一种之外, 还明显表现出不确定的另一面。例如, 有些震源区特征地震的时间间隔并非呈现严格的周期性, 而是表现出带有不确定性的准周期复发性质; 有些震源区特征地震的时间

间隔并非呈现严格的时间可预报性,而是表现出带有不确定性的准时间可预报复发行性质(闻学泽, 1993a、b),等等。因此,在利用活断层定量研究结果进行中一长期地震预测的实践中,不应忽视地震原地复发的现实行为中的不确定性。

二、时间可预报模式

现已被形象地称为“岛崎-中田锯齿”的时间可预报复发模式(图2),归纳起来有如下几点基本的物理构想:

(1) 一个震源区或一特定的断裂段上,前后不同次地震发生时,均具有相同的屈服(极限)应力(这可用图2上图的水平线表示),但各次地震的应力降可以不同,从而造成前后各次地震的大小也可以不同。

(2) 两次相继地震之间时间间隔的长短,与前一次地震的大小呈正比,亦即一次地震震级愈大,它发生后至下一次地震的时间间隔就愈长。

(3) 同一震源或断层段的应力积累速率,或者地震滑动势的积累速率,在相当长的时期中保持常数或恒定不变。

(4) 当前后各次地震具有相同的应力降(或者相同的同震位错)时,地震之间的时间间隔表现出严格的周期性。亦即严格周期性复发行是时间可预报复发行的一种特殊情形。

根据图2下图,当已知一次产生了同震位错量为 u 的地震后,至下一次地震的时间间隔 T 为:

$$T = \frac{u}{v} \quad (1)$$

这里, v 是该震源断层的长期恒定地震滑动速率。因此,对于确定性的时间可预报复发模式而言,时间间隔 T 是前一次地震位错量 u 的确定性函数。

自从时间可预报复发模式提出以来,已经得到广泛的重视,并已有许多应用这一模式进行中一长期地震预报的研究成果。例如, Sykes 和 Quittmeyer (1981) 应用这一模式分析了环太平洋地震带中地震空区的大地震危险性以及研究了圣安德烈斯断层不同段落的地震潜势; Buckan 和 McEvilly (1984) 则将其应用于解释中部加州帕克菲尔德地方中强地震复发时间的间隔规律,等等。这些研究结果共同证实的一点是:原地的强震或大地震的复发行中,的确存在着与时间可预报复发模式

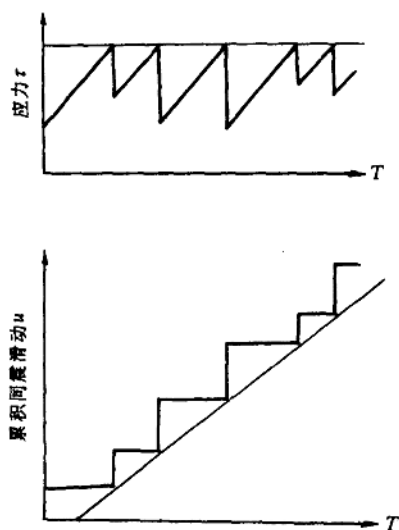


图2 确定性的时间可预报复发模式图解
(据 Shimazaki 和 Nakata, 1980)

Fig.2 Diagram showing deterministic time-predictable recurrence model

上图表示不同次地震之间的应力积累与释过程;

下图表示不同次地震的同震位错随时间的积累

相同或接近的表现形式。

实际上,时间可预报复发模式也就是“弹性恢复理论”(Reid, 1910, 1911)的一种具体的形象表示。自从 R.E. Wallace (1970) 根据对圣安德烈斯断层的研究,率先提出利用地震同震位错与断层平均滑动速率的比值来估计地震平均复发间隔的方法以来,在地震地质定量研究中,基于这种“断层滑动法”估计某一次给定大小的地震后至下一次地震的复发时间间隔就是以时间可预报复发模式作为理论基础的。

然而,用式(1)或时间可预报复发模式进行中一长期预测时,由于模式本身并没有考虑以下的不确定因素,从而难以达到较理想的预测效果。可能造成预测结果不确定的主要因素有:

(1) 同一震源(或断层段)的应力、应变(或地震滑动势)积累速率 v 随时间有波动,或者是非线性积累。

(2) 不同次地震时,震源的极限应变(或屈服应力水平)有所不同。这完全可能起因于早先地震对原有震源构造及介质物性的改变。

(3) 用以表征一次地震大小的量,例如同震位错、应力降、应变能等的测定或估计中存在误差;同时,与这些量相应的长期平均速率的测定存在误差,以及用小样本进行有关参数估计时产生的抽样误差等。

由第(1)和(2)种因素造成的给定一次地震大小后复发间隔的不确定性可称为“内在不确定性”,它受到地震孕育和发生过程中自然因素的严格制约。由第(3)种因素引起的复发时间间隔估计中的不确定性,则可相应地称为“参数不确定性”,它不可避免,但却可通过提高测量或估计精度、增加观测数据量等手段来减小或降低。

正是考虑到现实中存在的不确定性,近年来已在利用时间可预报模式进行中一长期预测的研究中引入了有关的不确定性,并进一步将“内在”与“参数”两种不确定性“结合”,共同用于建立地震复发时间间隔的概率预测模型(Working Group on California Earthquake Probabilities, 1990; 闻学洋, 1993a、b)。

三、准周期复发与更新模式

1. 准周期复发行

地震原地复发的准周期(Quasi-Periodic)性质是指某震源区或断裂段主要地震之间的时间间隔大体在某一数值附近摆动、且摆动的范围不太大的行为特点;同时,各次地震的大小也在一定的范围内波动。例如,加州 Bishop-Mammoth 湖地区在 1978~1986 年间的 6 次地震($M_L=5.4\sim 6.4$)之间的间隔时间分别为 1.64、1.35、1.27、1.88 和 1.65 a (Savage 和 Cockerham, 1987); 琉球海沟的宫城一冲绳段, 1646~1978 年间的 10 次地震之间的间隔时间分别为 30、32、53、39、65、26、36、39 和 42 a; 智利及墨西哥太平洋沿岸板块边界的部分段落上的历史地震复发间隔,也有类似的特点(Nishenko 和 Buland, 1987)。地震原地复发的这种准周期性质,使得有可能依据一个地区过去的地震复发间隔去预测未来地震的大致发生时间,从而对于地震的中一长期预报来说,具有很大的意义。

继 Shimazaki 和 Nakata (1980) 提出图 1 的严格周期、时间可预报及滑动可预报三

种(特征)地震复发模式之后, Savage 和 Cockerham (1987) 发展了准周期性地震复发模式及其表达式。从本质上讲, 准周期性地震复发模式是对图 1 中三种模式的“混合”和进一步引伸的结果, 它可能更能近似地描述特征地震的原地复发行为。

如图 3 所示, 假如震源应力以某一均匀的速率 v 积累至极限水平 τ , 然后发生破坏, 使应力突然下降到 $\tau-s$, 再开始一个新的轮回。设第 i 次事件的破坏发生在时间 t_i , 其极限应力为 τ_i , 并伴有应力降 s_i , 则有:

$$\tau_i = \tau_1 - \sum_{k=1}^i s_k + v (t_i - t_1)$$

或者

$$t_i = t_1 + \frac{(\tau_i - \tau_1 + \sum_{k=1}^i s_k)}{v}$$

在第 i 次和第 $i+1$ 次事件之间的时间间隔 T_i 为:

$$T_i = t_{i+1} - t_i = \frac{(\tau_{i+1} - \tau_i + s_i)}{v}$$

可进一步得到

$$T_{i+1} = \frac{(\tau_{i+2} - \tau_{i+1} + s_{i+1})}{v}$$

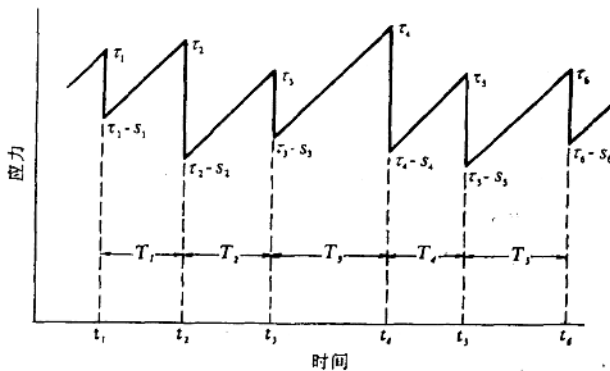


图 3 特征地震的准周期复发模式解析图解 (据 Savage 和 Cockerham, 1987)

Fig.3 Diagram showing Quasi-Periodic recurrence model (Savage and Cockerham, 1987)

以上 4 个公式便是准周期复发模式中 τ 、 t 、 s 和 v 等参量之间相互关系的一般表达式。尽管上述解析表达式不能用于预测, 但可帮助理解准周期复发行为的物理涵义及其与其他复发行为的关系。

在特定的条件下, 准周期复发模式分别等效于图 1 的三种模式:

(a) 严格周期性复发: $\tau_i = \tau_1$, $\tau_i - s_i = \text{常数}$ ①;

(b) 时间可预报复发: $\tau_i = \text{常数}$, $\tau_i - \tau_1 = 0$;

(c) 滑动可预报复发: $\tau_i - s_i = \text{常数}$ 。

或者说:图1的严格周期性复发模式、时间可预报复发模式、滑动可预报复发模式分别是准周期复发模型的三种极端情形。由此也可看出图1与图3的复发模式之间在理论上的相互关系。

2. 更新模式

设在一个特定的断层段上,过去曾重复发生过多次特征地震,每次特征地震按其发生的先后顺序记为 i ($i=1, 2, 3, \dots$),则这些地震发生时间 t_i 是一些相互独立的随机变量,其序列

$$\{t_1, t_2, t_3, \dots\}$$

可视为一个更新过程(王梓坤, 1976),且有:

$$t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_n < \dots$$

其中任意两次特征地震之间的时间间隔为:

$$T_i = t_{i+1} - t_i$$

所谓特征地震复发的更新模式是对满足以下两个假定的复发行为的一种概率描述:

(1) 地震之间的时间间隔 T_i 是一些相互独立且具有相同概率分布的随机变量,其序列也是更新序列,记为

$$\{T_1, T_2, T_3, \dots\}$$

(2) 每次地震时沿断层段上产生的同震位移量 u_i 与每次地震后至下一次地震的时间间隔长度 T_i 相互独立。同震位移序列也是随机序列

$$\{u_1, u_2, u_3, \dots\}$$

当然也可将同震位移量 u 用其他表征地震大小的量(如应力降、震级等)替代。

设概率事件 ($u_i = d$) 表示第 i 次地震时,沿断层段产生大小为 d 的同震位移;再设概率事件 ($T_i = T$) 表示地震 i 之后至地震 $i+1$ 的时间间隔为 T 。根据概率事件的独立性定义,显然有

$$p(T_i = T | u_i = d) = p(T_i = T) \quad (2)$$

亦即地震 i 之后至地震 $i+1$ 的时间间隔长短,与地震 i 的同震位移量(或大小)无关。式(2)即更新模式的一种概率数学表达。

由此可见,特征地震复发的更新模式,从本质上不同于时间可预报模式。在时间可预报模式中,一次地震后的平静时间是这次地震大小的函数或者与这次地震大小呈正比。而在更新模式中,完全忽略了每一次地震的大小(用同震位移量 u 或其他参量表征)对其后续平静时间长短的影响;但这不一定是缺点,因为在许多情况下,我们并不能确切地知道一个断层段过去每一次地震的大小,只能根据历史震害记载、古地震遗迹、地表断层破裂长度或位移产生的微地貌特征、以及有限的且误差较大的早期仪器记录等资料去作出“近

①Savaget和Cockerham (1987)认为此时仅 $s_i = \text{常数}$ 。这种分析可能有误,因为即使 $s_i = \text{常数}$,而 $\tau_i \neq \text{常数}$,也不一定为严格周期性复发。

似的”推断。然而,有时即使考虑了“近似推断的”每次地震大小对复发时间的影响,但其结果也不一定比“忽略”每次地震的大小而考虑“平均”的更新模式的结果更好。从后面还将看到,在特殊的、但往往常见的情况下,基于更新模式的地震平均复发时间间隔估计结果,与基于时间可预报模式的估计结果是等效的。

由一个断层段多次古地震年代数据估算的古地震事件平均复发时间间隔的过程,即假定了那里的古地震复发行为服从于更新模式。

在忽略年代测定误差以及地震大小的情况下,一个断层段 n 次特征地震之间的 m ($=n-1$) 次复发时间间隔的算术平均值为

$$T_{av} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i \quad (3)$$

复发间隔的标准差为

$$S = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (T_i - T_{av})^2} \quad (4)$$

由以上两式计算得到的特征地震复发间隔算术平均值及标准差,隐藏着复发行为服从更新模式的假定。而由断层滑动速率及多次地震的同震位错资料,依据更新模式估算复发间隔平均值的公式是下面的式(6)。对于带有年龄误差的多次古地震事件复发间隔平均值及其误差的计算公式,将在本文第三节中给出。

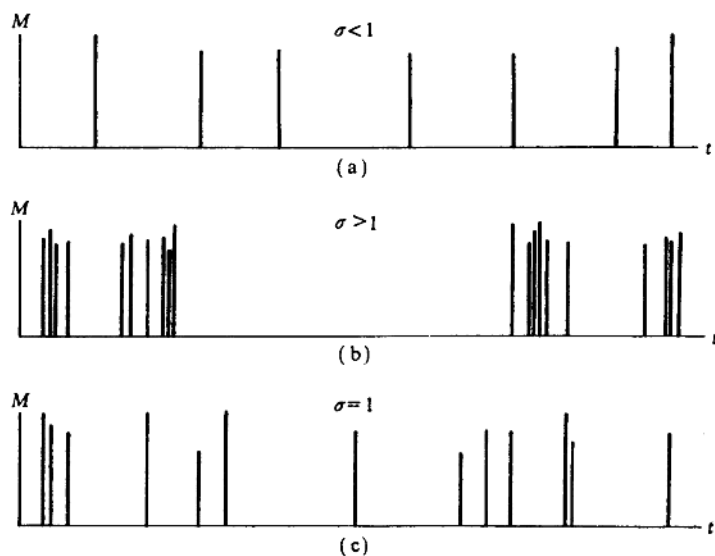


图4 地震复发时间标准差与平均值之比(变异系数) $\sigma < 1$ 、 $\sigma > 1$ 和 $\sigma = 1$ 三种情况下地震的发生时间-震级图象示意

Fig.4 Time-Magnitude diagram showing three cases when the ratio between the standard deviation of recurrence interval to average recurrence interval less than, greater than, and equal to 1

值得注意的是:所谓更新复发行为,严格地说并不一定是准周期性质的。因此,对于更新模式,可以采用所谓“点过程”的统计学方法来研究地震复发时间间隔的表现行为。定义“变异系数”为地震复发时间间隔的标准差 S 与平均值 T_{av} 之比,即

$$\sigma = \frac{S}{T_{av}} \quad (5)$$

S 和 T_{av} 由式 (4) 和 (3) 确定。

当地震的复发时间间隔具有准周期行为时,变异系数 $\sigma < 1$; 且当 σ 愈接近于 0, 周期行为愈强烈 (图 4a)。

当变异系数 $\sigma > 1$ 时,地震的复发过程显示为“丛集”行为,即在某个时段中,地震接二连三地发生,但在另一较长的时期中又表现为相当的平静 (图 4b), 亦即“丛集”行为表现出 (马宗晋等, 1982) 所称的平静期较长的“幕式”活动。

当变异系数 $\sigma = 1$ 时 (图 4c), 地震的发生过程,即为完全随机的泊松过程,而地震之间的时间间隔可以证明服从于指数分布。这是一种复发的危险性与上一次地震以来消逝时间无关的地震复发行为,常见于较大区域内的地震复发行为,但单一震源或断裂段上特征地震的复发是否也有变异系数 $\sigma = 1$ 的情形,目前仍无有力的证据。

到目前为止,从与时间有关的 (或实时的) 地震危险分析的观点出发,更新模式更趋向于考虑 $\sigma < 1$ 的准周期性特征地震复发行为。这当然是有更多的实际资料表明强震或大地震的原地复发行为是准周期性质的 (Nishenko 和 Buland, 1987)。而对于 $\sigma > 1$ 时的丛集活动行为,更重要的是分析特定的断层段在目前及我们所关心的未来时段是处于强震活跃阶段,还是平静阶段。

已有个别的古地震研究结果表明:在同一断裂的两个相邻段落,古地震年代学证据反映出每一段落落在过去的强震或大地震活动中均表现出 $\sigma < 1$ 的准周期特点,但在两个段落的连接部位的古地震证据却反映出 $\sigma = 1$ 的泊松行为或 $\sigma > 1$ 的丛集行为 (K.E.Sieh 等, 1989)。这种现象完全可能是由于在两个独立破裂段落的连接部位上,古地震证据记录的是这两个段落地震破裂的时间交错,空间 (局部) 重叠作用的结果。

四、更新模式与时间可预报模式在应用中的等效性

更新模式忽略了每次特征地震事件的具体大小,而时间可预报模式假定了一次特征地震的同震滑动量愈大,至下一次地震的时间间隔就愈长。这里讨论这样一个问题:更新模式与时间可预报模式两者在一定条件下 (也是实际常见的条件下) 能否“等效”? 这里的“一定条件”主要是指:我们在野外研究中仅观测到某断层段上 1 次 (也是最后那次) 地震的同震滑动和年代资料。此时,面临的一个问题是:如何确定采用更新模式还是时间可预报模式去估计地震复发间隔更加合适。

假若在一研究的断层段上观测到过去 n 次特征地震的同震滑动,它们的测值分别为 $u_1, u_2, \dots, u_n$, 但暂无法得知每次地震的发生年代 (或只知最后一次地震的年代)。然而,经详细的野外活断层定量研究,获得该段断层近代的平均滑动速率 v (假定已扣除了蠕动分量)。显然,根据这种资料状态以及更新复发模式, n 次地震的复发间隔的平均值

或者中位数①为

$$T = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i}{v} \quad (6)$$

由于分子

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i = \bar{u} \quad (7)$$

是 n 次特征地震同震滑动的平均值, 故式 (6) 也可写成

$$\bar{T} = \frac{\bar{u}}{v} \quad (8)$$

无论是式 (6) 还是式 (8), 中位数复发间隔的估值均与某一次特征地震的同震滑动量无关, 仅仅是这 n 次地震同震滑动平均值的函数 (这里暂时假定滑动速率 v 是常数), 从而, 此时 T 的估计方法符合于更新复发模式。

假如在所研究的断层段上, 仅仅可获得最后一次特征地震的同震滑动 u_L 以及近代沿断层的地震平均滑动速率 v 时, 式 (6) 由于 $n=1$ 而化为:

$$T = \frac{u_L}{v} \quad (9)$$

因此, 在 $n=1$ 的极端情况下, 地震同震滑动的平均估值, 仅仅是上一次 (也是唯一可得到的一次) 地震的滑动 u_L (这种情况在实际研究中是常见的)。只要比较式 (9) 和 (1) 即可清楚地看出, 此时由更新复发模式与时间可预报复发模式估计的地震复发间隔中位数完全相同。

因此, 从粗略近似的观点来看, 当采用“断层滑动法”估计地震的复发间隔、且当只可获得当地最后那次地震的滑动量时, 从更新模式估计的复发时间间隔结果与从时间可预报模式估计的结果是完全“等效的”。

通常将由地震的同震位错及断层滑动速率估算地震原地复发时间间隔的方法称为“断层滑动法”。这种方法可用“Wallace 公式”表示为

$$T = \frac{u}{V - C} \quad (10)$$

(Wallace, 1970)。式中, T 是地震原地复发间隔; V 是由地质学方法得到的较长时期中断层的平均滑动速率; C 是断层上无地震的长期蠕变平均速率, 通常由跨断层的形变观测、人工构筑物在无震期间的位移变形以及经验估计等方法获得; u , Wallace (1970) 称为“地震滑动”或“地震位错”, 显然是指地震时沿地震断层的位移量, 亦称“同震位错”。假如依上式估算的 T 是复发间隔的平均值 (或者中位数), 则 u 亦应取平均值。然而, 对同震位错 u 如何取平均, Wallace (1970) 并没有明确论述。实际上, u 平均值的不同取法, 分别代表了研究者对地震原地复发行为的不同理解, 从而也使得平均复发间隔 T 的估计结果赋有不同的物理涵义。

第一种方法, u 取同一地点在过去不同次地震位错量的平均。若设过去同一地点共观

①由断层滑动法估算得到的地震平均复发间隔, 通常被假定为正态变量, 此时算术平均值与中位数是相等的。然而, 在复发间隔为对数正态变量的假定下, 由多次古地震年龄估算的复发间隔算术平均值与中位数不相等, 此时两者之间有换算关系式。

测到 n 次地震的位错, 每一次的位错量分别为 u_i ($i=1, 2, \dots, n$), 则它们的平均值可由式 (7) 计算。在这种情况下, 地震平均复发间隔估值 $\bar{T}$ 是当地过去 n 次地震的同震位错平均值与平均地震滑动速率之比, 而不与某次地震时的具体位错量相关。显然, 此时所假定的地震复发模式为“更新模式”。

第二种方法, 式 (10) 的 u 取一个断层段上最后一次地震时, 沿地震断层长度或地震断层某段长度上同震位错的平均值 $\bar{u}_L$ 。这里脚标 L 表示“最后一次地震”。从而, 以最后一次地震时平均位错大小为条件的平均复发时间间隔 $\bar{T}$ 变成:

$$\bar{T} = \frac{\bar{u}_L}{V - C} \quad (11)$$

此时, 估值 $\bar{T}$ 中隐含的地震复发行为是时间可预报复发行为, 或者说, 当假定地震复发过程遵循于时间可预报复发模式时, 一次地震之后至下一次地震的平均复发间隔可用式 (11) 估算。

当 $n=1$ 时, 更新模式与时间可预报模式的地震平均复发间隔计算方法及结果完全等效。此时可将式 (11) 的脚标“ L ”去掉。

值得注意的是: 式 (11) 计算得到的仅仅是中位数复发间隔 $\bar{T}$ 的中值, 实际上由于 $\bar{u}$ 和 $(V-C)$ 的估值均存在不确定性, 从而致使 $\bar{T}$ 的估值也是不确定的。有关 $\bar{T}$ 估值误差及其参数不确定计算公式的推导请参阅《活动断裂地震潜势的定量评估》一书 (闻学泽, 1995)。

参 考 文 献

- 丁国瑜, 1992, 有关活断层分段的一些问题, 中国地震, 8, 2.
- 马宗晋、傅征祥、张郅珍、汪成民、张国民和刘德富著, 1982, 1966~1976年中国九大地震, 地震出版社.
- 王梓坤, 1976, 概率论基础及其应用, 科学出版社.
- 闻学泽, 1993 a, 小江断裂带的破裂分段与地震潜势的概率估计, 地震学报, 15, 3.
- 闻学泽, 1993 b, 准时间可预报复发行为与断裂带分段地震概率估计, 中国地震, 9, 4.
- 闻学泽, 1995, 活动断裂地震潜势的定量评估, 地震出版社.
- Aki, K., 1984, Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction, J. Geophys. Res. 89, 5867~5892.
- Bakun, W.H. and T.V. McEvilly, 1984, Recurrence models and Parkfield, California, earthquakes, J. Geophys. Res., 89, 3051~3058.
- Bufe, C.C., P.W. Harsh and R. D. Burford, 1977, Steady-state seismic slip—A precise recurrence model, Geophys. Res. Lett., 4, 91~94.
- Davison, F.C. and C.H. Scholz, 1985, Frequency-moment distribution of earthquakes in the Aleutian Arc: A test of the characteristic earthquake model, Bull. Seism. Soc. Am., 75, 1394~1361.
- Nishenko, S.P. and Buland, R., 1987, A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting, Bull. Seism. Soc. Am., 77, 1382~1399.
- Reid, H. F., 1910, The mechanics of the earthquake, In the California Earthquake of April 18, 1906, (Lawson, A. C., Chairman), Report of the State Earthquake Investigation Commission (Reprinted 1969) (Carnegie Institution of Washington Publication 87, vol. 2, 1910), 192.
- Reid, H. F., 1911, The elastic-rebound theory of earthquakes, Univ. Calif. Publ. Bull. Dept of Geol., vol. 6, 413~444.