

7

活动断裂研究

理论与应用

中国地震局科技发展司
《活动断裂研究》编委会

要 目

青藏高原北部东昆仑断裂带第四纪活动特征和滑动速率

中亚及东南亚变形运动学及其动力学问题

天山北麓三个泉河全新世阶地古气候环境和构造事件

祁连山活动断裂带东段位移累积滑动亏损的破裂
分段性研究

祁连山活动断裂带东段的位移累积滑动亏损特征研究

地震出版社

活 动 断 裂 研 究

理 论 与 应 用

Research on Active Fault

7

中国地震局科技发展司
《活动断裂研究》编委会

地 震 出 版 社

Seismological Press

1 9 9 9

内 容 提 要

本书是《活动断裂研究》系列出版物的第七辑,主要反映近年来活动断裂与深浅孕震构造环境的研究成果,同时也包含了涉及我国大陆岩石圈变形与动力学问题的有关论文。利用活动断裂构造机制与量化活动度的研究成果来作未来强震危险地点与震级上限的预测亦是本书中的重要内容。

本书可供从事构造地质、地震地质、地球物理、工程地震及地震预测预报的科技人员及有关院校的师生参考。

活 动 断 裂 研 究

理 论 与 应 用

Research on Active Fault

7

中国地震局科技发展司

《活动断裂研究》编委会

责任编辑:张 平

责任校对:王花芝

*

地质出版社 出版发行

北京民族学院南路9号

北京地大彩印厂印刷

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 11.25印张 2插页 291千字

1999年11月第一版 1999年11月第一次印刷

印数 001—600

ISBN 7-5028-1711-5/P·1022

(2208) 定价:20.00元

《活动断裂研究》第二届编委会

顾问：丁国瑜 邓起东

Advisors: Ding Guoyu Deng Qidong

主编：汪一鹏

Chief Editor: Wang Yipeng

副主编：张培震

Associate Chief Editor: Zhang Peizhen

委员：(以姓氏笔画为序)

丁国瑜 马宗晋 马胜利 王椿镛 邓起东 卢演倬
刘百麓 江娃利 汪一鹏 吴卫民 吴宁远 杨主恩
李安然 张先康 张培震 洪汉净 闻学泽 徐锡伟
黄立人 程绍平 傅征祥 韩慕康

Editorial Committee:

Ding Guoyu Ma Zongjin Ma Shengli Wang Chunyong
Deng Qidong Lu Yanchou Liu Baichi Jiang Wali
Wang Yipeng Wu Weimin Wu Ningyuan Yang Zhuen
Li Anran Zhang Xiankang Zhang Peizhen Hong Hanjing
Wen Xueze Xu Xiwei Huang Liren Cheng Shaoping
Fu Zhengxiang Han Mukang

责任编辑：张 平

Executive Editor: Zhang Ping

编辑：那 燕

Editor: Na Yan

重点文章提要

1. 青藏高原北部东昆仑断裂带第四纪活动特征和滑动速率

东昆仑断裂带东、西大滩段全新世和第四纪时期水平活动和垂直活动速率的比值分别为 15 和 11, 这说明在第四纪时期随着时间的推移, 该断裂的垂直抬升速率在逐渐减小, 而其水平滑动速率却在逐渐增大。在空间上, 垂直抬升的最高点由布尔汉布达山一线往南移至现今昆仑山主脊, 而水平走滑运动却由南侧的昆仑山口断裂向北边的东、西大滩断裂转移。东昆仑断裂运动性质的转化在早更新世末期或中更新世早期有一个突变过程, 从大规模的挤压变为左旋走滑运动。

2. 中亚及东南亚变形运动学及其动力学问题

利用样条函数数字模拟方法获得了中亚及东南亚地区相对稳定欧亚大陆的现今地壳运动速度场, 模拟结果表明, 包括华南在内的东南亚块体相对于西伯利亚有一个反时针的旋转, 这使华南块体以 9mm/a 速率向南东东运动; 喜马拉雅带吸收了印度板块相对于欧亚板块运动量的几乎一半, 天山承担了约四分之一, 阿尔金断裂只消耗了不到四分之一。这意味着 75% 以上的印度板块相对于欧亚板块间的南北向缩短是通过地壳增厚变形来吸收的。

3. 天山北麓三个泉河全新世阶地古气候环境和构造事件

三个泉河全新世阶地堆积物、孢粉和年代学数据表明, 阶地的形成与北天山的逆断裂在约 9200aB. P. 的再次活动有关, 阶地堆积物发育于 9200 ~ 4000aB. P. 。

4. 祁连山活动断裂带东段位移累积滑动亏损的破裂分段性研究

本文根据祁连山活动断裂带东段的位移累积滑动亏损特征, 同时结合障碍体规模、滑动速率的差异、历史地震及古地震活动特征, 着重探讨了断裂带位移累积滑动亏损的破裂分段性。

5. 祁连山活动断裂带东段的位移累积滑动亏损特征研究

本文在建立活动断裂位移累积滑动亏损定量分析方法的基础上, 以祁连山活动断裂带东段为例, 分析其位移分布特征, 定量计算了断裂端部和不连续阶区部位的累积滑动亏损量、滑动亏损率, 归纳总结了走滑活动断裂的位移累积滑动亏损特征。

目 录

我国活动断裂地震危险性研究的进展与问题	闻学泽等 (1)
祁连山活动断裂带东段的位移累积滑动亏损特征研究	袁道阳等 (12)
祁连山活动断裂带东段位移累积滑动亏损的破裂分段性研究	袁道阳等 (21)
强震活动重复发生时间间隔的模式讨论	傅征祥等 (28)
震级-时间可预测模型在估计未来地震危险中的应用	金学中等 (34)
天山北麓三个泉河全新世阶地的古气候环境和构造事件	尹功明等 (40)
天山北麓三个泉河河流阶地的光释光测年	尹功明等 (49)
滇西大盈江断裂带晚第四纪活动的初步研究	饒顺民等 (58)
福建东南沿海晚第四纪断陷构造的形成和发育	黄卿团等 (67)
滇西地区两组交叉型活动断裂及其地震地质意义	向宏发等 (81)
则木河断裂带的几何细结构及邛海、宁南盆地的成因类型	宋方敏等 (88)
沂沭活断层地表形迹的分形特征及其意义	郭 芳等 (96)
“青藏高原岩石圈现今变动和动力学研究”系列成果	
中亚及东南亚变形运动学及其动力学问题	任金卫等 (109)
青藏高原北部东昆仑断裂带第四纪活动特征和滑动速率	任金卫等 (147)
青藏高原地震的震源机制和震源参数研究	郑斯华 (165)

Contents

Progress and Problems in the Research on Active Fault Seismic Hazard Assessment in China	Wen Xueze Wang Yipeng (1)
Study on the Features of Displacement Cumulative Slip Deficits in Eastern Segment of Qilianshan Active Fault Zone	Yuan Daoyang Yang Ming et. al. (12)
Study on the Rupture Segmentation by Displacement Cumulative Slip Deficits in Eastern Segment of Qilianshan Active Fault Zone	Yuan Daoyang Liu Baichi et. al. (21)
Discussion on Models of Strong Earthquake Repeat Time	Fu Zhengxiang Liu Guiping (28)
Application of Time-Magnitude Predictable Model in Estimation of Seismic Risk in Future	Jin Xueshen Liu Zhihui et. al. (34)
Holocene Climatic Change and Tectonics Event From the Terrace at Sangequan River, Northern TianShan	Yin Gongming Shen Jun et. al. (40)
Optically Stimulated Luminescence Dating for the Terrace Sediments of Sangequan River, Northern Tianshan	Yin Gongming Zhao Hua et. al. (49)
The Preliminary Study on Late Quaternary Activity of the Dayingjiang fault zone, western Yunnan Province	Guo Shunmin Xiang Hongfa et. al. (58)
Formation and Development Fault-Subsidence Tectonic in Late Quaternary along Coastal Region of the Eastern Fujian Province	Huang Qingtuan Ding Xianghuan et. al. (67)
Two Intersectional Active Fault Zone and Its Seismological Implications in West Yunnan	Xiang Hongfa Xu Xiwei et. al. (81)
Fine Geometric Structure of Zemuhe Fault Zone and Formation Mechanism of Qionghai Basin as well as Ningnan Basin	Song Fangmin Li Chuanyou et. al. (88)
Fractal Characteristics of Yishu Active Fault Trace and Its Seismological Significance	Guo Fang Yang Zhuen (96)
Serial research achievements about the modern movement and dynamics of lithosphere in Qing-Tibetan Plateau	
Deformation Kinematics of Central-Southeast Asia and Its Dynamics	Ren Jinwei William E. Holt et. al. (109)
Quaternary Faulting of Eastern Kunlun' Fault (Xidatan-Dongdatan), Northern Tibetan Plateau	Ren Jinwei Wang Yipeng et. al. (147)
Focal Mechanism and Source Parameter of Earthquakes in the Qinghai-Xizang Plateau	Zheng Sihua (165)

我国活动断裂地震危险性研究的进展与问题^①

闻学泽

汪一鹏

(四川省地震局, 成都, 610041)

(中国地震局地质研究所, 北京, 100029)

“八五”期间,我国活动断裂与地震关系的研究已趋于定量化,同时在活动断裂地震危险性的研究中取得明显的进展。其中,非常重要是将“时间相依的危险性”模型引入到活动断裂地震危险性评估中,并采用了未来段破裂地震的发生概率与震级共同表达特定断裂段的长期地震危险性。这种技术允许将活动断裂的地质学定量研究资料作为危险性分析的主要输入参数,因此,不仅为缺乏历史强震记载地区的地震危险性评价提供了一条重要途径,而且也探索其他技术方法尚难涉足的、具体地点的长期地震预测问题提供了机会。活动断裂地震危险性研究的成果已初步应用于地震长期预测、地震安全性评价以及地震重点监视防御区判定等方面。本文也针对活动断裂地震危险性评估中三个主要问题进行讨论,它们是:活动断裂的破裂分段问题;板内断裂分段地震复发时间概率模型问题;断裂分段地震复发行为的稳定与变化问题。

一、“八五”研究进展概要

“八五”期间我国的活动断裂地震危险性定量研究的进展,主要表现在以下五个方面。

1. 活动断裂定量地质资料的获取

随着“地震重点监视防御区活动断裂带 1:5 万地质填图及综合研究”项目(85-02-01 课题)的开展,以及其他有关课题研究的深入,已获得许多活动断裂的定量地质资料。主要包括:断错地貌、断层平均滑动速率、单次与多次地震的同震滑动、部分历史及史前地震的破裂延伸范围、断裂分段方案、古地震期次及年代、地震平均复发时间,以及断裂带几何结构、晚第四纪活动习性,等等。这些资料的获得,加上以往研究的积累,已为进一步探讨地震与断裂活动的深层次关系问题以及开展长期地震危险性定量评价打下了良好的基础。

2. 活动断裂分段理论

由于断裂分段在地震危险性评价中的重要性,“八五”期间在分段的理论、原则和方法方面的研究,比起“七五”及其以前工作有十分重要的进展。其中丁国瑜院士等人的工作有重要的贡献(丁国瑜,1992;丁国瑜等,1993)。这些进展可主要概括为:

进一步从理论上阐明了断裂分段与段的涵义。即:分段是指地震破裂分段,目的是为了确定一条活动断裂上未来可能成为独立地震破裂的段落位置与尺度;当进一步将段的尺度与

^① 中国地震局“九五”重点课题 95-04-10-07 专题研究的一部分。

有关震级-破裂长度的关系相结合时,可预测未来地震的震级。段则是断裂在一定的时空上稳定的独立破裂单元,即段具有时间和空间的属性。

引进“障碍体”的概念作为破裂分段界限区的理论基础,强调了识别稳定的或持久性的障碍体是确定持久性破裂分段界限区的重要环节。

初步建立了断裂带破裂分段的层次结构观:一个特定断裂段上既包含最大量级尺度的破裂,也包含较小量级的破裂。这一概念的重要性在于概括了活动断裂地震破裂分段特征中的一种可能较普遍的现象:即某一断裂部分除了可发生整体的最大尺度破裂外,还可发生一些较低层次的或较小尺度的破裂。

另外,通过理论与实践的结合,初步总结出断裂分段的若干类型的标志。

3. 基础观测资料的定量和不确定性分析方法

“八五”期间,已较系统地将有关的定量分析方法,特别是不确定性分析的数学方法引入到活动断裂定量观测数据(断错量、滑动速率、层位年龄、古地震年龄、平均复发时间等)的处理与分析中(闻学泽,1995),这使得不仅能更加合理和有效地将活动断裂的地质学观测资料应用于地震危险性评价,而且对于定量评价观测资料的精度和可靠性也有重要的意义。

4. 地震危险性评估理论、模型、方法研究

“八五”期间针对活动断裂地震危险性的定量评估理论、模型和方法开展了较系统和深入的应用基础研究。例如,邓起东等(1992a、b)建立起可用于估计我国不同类型活动断裂地震强度的震级-破裂长度、位移关系式,发展了估计未来最大突发位移的方法;张培震等(1996)根据中国大陆古地震资料初步建立起地震复发时间概率分布模型,同时发展和完善了利用地震矩率估计地震危险性的方法;闻学泽(1993a、b,1995)则较系统地总结和完善了时间相依的地震复发势率概率评估理论和方法,同时根据历史地震资料初步提出的两种局部适用的地震复发时间概率分布模型,引进了板缘特征地震复发时间概率模型,以及进一步完善了未来最大突发位移的定量评估模型,等等。尽管有些模型和方法有待进一步完善,但这些研究已使得利用活动断裂定量资料评估断裂分段地震危险性的方法初步系统化。

5. 应用

“八五”期间的初步应用研究是在有关活动断裂定量调查的基础上,结合相应的模型和方法,分别就未来10~100年的地震势、最大震级与位错量等作出定量的或者概率性的估计。例如不同研究者曾分别对鲜水河断裂带、老虎山断裂和北天山山前断裂带、吐鲁番盆地、北祁连山断裂带东段、以及鲜水河-小江断裂带的分段发震概率进行评估(张培震和毛凤英,1996;彭斯震等,1996;甘卫军,1995;闻学泽,1993a、b,1995);邓起东等(1992b)和闻学泽(1995)还分别就有关工程场地活动断裂未来百年内最大突发位移量作出定量评估,等等。这些研究结果已初步应用于长期地震预测、重大工程项目的地震安全性评价以及若干地震重点监视防御区的判定。

经过“八五”期间的研究,已逐步形成图1所示的、强活动断裂长期地震危险性定量评估的技术路线。其最主要的特点是引入“时间相依的”概率危险性模型,同时采用以未来段破裂地震发生概率与震级共同描述特定断裂段的长期地震危险性。这一技术路线力图使得评估结果不仅能提供沿强活动断裂带未来可能发生段破裂地震的概率大小,还能提供地震的可能强度。另外,由于该技术路线将活动断裂的地震地质学定量研究资料作为危险性分析的主要输入参数,不仅为缺乏历史强震记载的活动断裂地震危险性评价提供了一条重要途径,而

且也为探索其他技术方法尚难涉足的、具体地点的长期地震预测问题提供了机会。

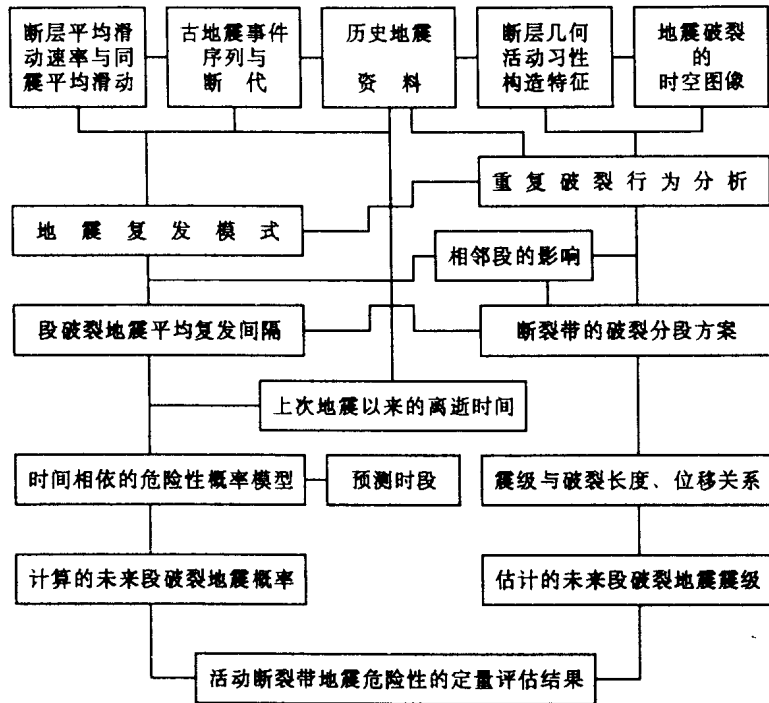


图1 已初步形成的我国强活动断裂长期地震危险性定量评估的技术路线总结

Fig. 1 A diagram summing up the preliminary technical-route for quantitative assessment of long-term seismic hazards on active faults in China

综上所述,“八五”期间取得的这些研究进展,无疑对促进活动断裂研究在长期地震预测、进而在防震减灾中发挥更大的作用有着十分重要的意义,同时也是我国活动断裂与地震关系的研究从定性阶段逐渐走向定量阶段的显著标志。

目前,由图1技术路线获得的长期地震危险性定量评价结果很有限。原因主要是其中的一些理论、模型不够完善,还有许多问题需要作进一步的探索;同时,缺少相应理论指导的野外活动断裂调查所得资料不能完全满足定量评估地震危险性的需要。下面将针对3个最主要的问题进行分析和讨论。

二、活动断裂的破裂分段问题

活动断裂带地震危险性的定量评估是以“段”为基本单元进行的。活动断裂的分段研究已成为预测未来地震破裂位置、破裂尺度的一种基本手段。“八五”期间在分段方面主要的理论研究进展,是澄清了以往在究竟是几何分段、结构分段还是破裂分段的概念上的模糊性(丁国瑜,1992;丁国瑜等,1993),同时也提出了断裂几何结构特征与破裂障碍体之间可能存在一定联系。破裂分段研究的重点是如何有效地应用有关标志和原则去鉴别断裂带上那些可能成为未来地震破裂终止的部位。本文认为以下问题是值得进一步研究的。

1. 几何分段标志

由静态的几何标志确定的“断裂段”与实际的“地震破裂段”之间具有不可忽视的差别。已发表的断裂带分段研究多采用几何标志的证据,可能是这类资料更易于收集的缘故。实际上,断裂带几何上的不连续(如阶区,分离,中断等),随着尺度大小的不同以及随着地震破裂规模的不同,在终止破裂上所起的作用也是不同的。例如海原断裂带由若干条彼此阶列的走滑断裂组成,阶区尺度(离距)达4~6km不等,但这些阶区并未能阻止1920年海原8.5级地震破裂的扩展;相反,沿川西鲜水河断裂带的朱倭-老乾宁部分除了局部的小尺度阶列外,结构相当简单且地球物理背景相似,但过去200多年的历史地震破裂却显示出明显的分段特征(闻学泽,1998)。显然,这两个例子中历史地震破裂的起止与断裂几何或者其他静态结构特征的关系并非简单的对应。MacCalpin(1996)初步总结发现,依据静态标志划分的断裂段能成为独立地震破裂段的可能性仅在18%~39%之间,这表明仅利用静态几何或结构标志进行活动断裂带的破裂分段是远远不够的。

在缺少地震破裂证据的情况下,静态标志对破裂分段仍然是重要的,但应深入考察地震实际重复破裂的时空演变特征及其与各类静态几何、结构标志的关系,从中找寻更加可靠的可用于破裂分段的静态标志。同时,应更加注意收集和 research 由地震位移、位移旋性、复发时间,以及断层滑动速率分布等所显示的断裂最新活动习性的空间差异,并从中分析可能成为未来破裂的分段界限特征。

2. 松弛障碍物

Aki(1984)的障碍物概念主要强调三类:岩性障碍物、几何障碍物与松弛障碍物。前两类障碍物对终止地震破裂传播所起的作用是显而易见的。然而,仅由这两类障碍物的作用还很难解释那种结构简单、地球物理背景各处相似的走滑断裂带(例如鲜水河断裂带)为何仍然存在破裂的分段性。Scholz(1991)指出,不应忽视松弛障碍物在终止破裂传播中的作用。松弛障碍物是指断裂带上前不久发生过破裂的、目前仍然处于低或较低背景应力水平的断裂部位;这种部位同样有利于阻止来自邻段破裂的传播。松弛障碍物的提出较合理地解释了为何相继发生的相邻破裂之间在空间上一般没有大的重叠,解释了地震破裂为何可能终止在一些并不存在岩性或几何障碍物的地方,同时,也解释了为何能将断裂带上的破裂空段确定为未来相对独立的破裂单元等问题。理论上讲,松弛障碍物在更多的情况下属于非持久性质的,随着沿断裂带地震破裂的时空演变,松弛障碍物的位置应是可变的,但由于分段仅仅是针对断裂带未来的破裂轮回,因此这种障碍物的确定对于分段是有意义的。

3. 可变破裂尺度与级联破裂模式

有越来越多的证据显示,沿同一断裂部位地震重复破裂的尺度具有可变性。例如,在1906年美国旧金山8.3级地震时沿圣安德烈斯主断裂破裂的约450km长的段上,1989年复发的7.1级地震破裂长度仅35~40km(Working Group on California Earthquake Probabilities, 1990);Thatcher(1990)的研究也初步揭示板缘断裂带相同部位在不同轮回地震破裂尺度的可变性;丁国瑜等(1993)提出建立破裂分段的层次结构观的思想,均基于这种可能存在的重复破裂尺度的可变行为。

加州地震概率研究组(Working Group on California Earthquake Probabilities, 1995)描述了走滑断裂带的一种“级联”(Cascades)破裂模式,图2是该模式的一种图解概念:断裂带的破裂分为两个或多个的级别或者层次。最低级别的破裂是基本单元的破裂,基本单元即

较小地震可(反复)单独破裂的断裂部分(如图2中的A、B、C和D),相邻的基本单元之间不存在持久性的破裂界限区。较高级别的破裂是发生在两个或多个相连接的基本单元的级联破裂;单次破裂涉及的相连接基本单元数越多,级联破裂的级别就越高。最高级别的级联破裂尺度和位置代表了最大尺度的级联破裂分段方案,其两个边界既可以是持久性的障碍体,也可能是非持久性的障碍体;其他较低级别的级联破裂段落之间不存在持久性的障碍体。级联破裂分段方案的数量 m 与相连接的基本破裂单元的数量 n 有关,共有 $m=n(n+1)/2$ 种。以图2为例,当 n 为4时,应有 $m=10$ 种不同的级联破裂分段方案。

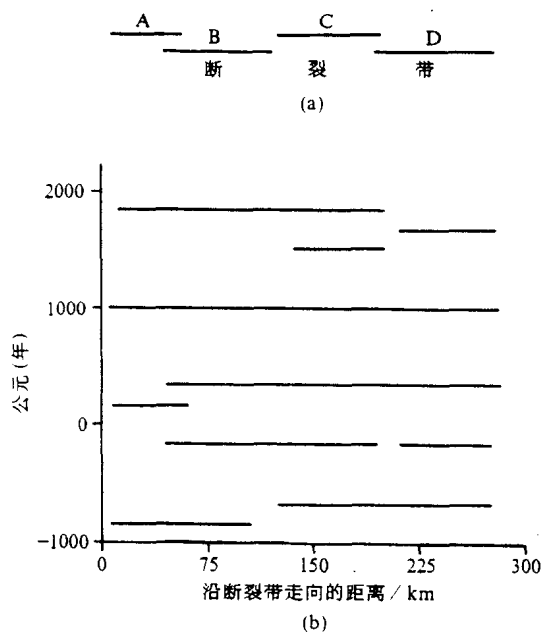


图2 走滑断裂的级联破裂模式的一种图解(据闻学泽,1998修改)

(a) 断裂带平面图, A、B、C和D为基本破裂单元; (b) 理想化的级联破裂时空图像

Fig. 2 An illustration for the cascade-rupture-model of strike-slip fault (Modified from Wen, 1998)

级联模式强调了某一断裂部位既可在一次地震中单独破裂,也可与相连接的断裂部位在某次更大的地震中同时破裂。与具有持久性破裂边界的特征地震分段模式相比,级联模式的重要性是能描述断裂分段地震破裂尺度的可变性。同时,在级联模式中,地震破裂终止于“非持久性”障碍体的机遇要比终止于“持久性”障碍体的机遇更高。这些均是该模式的先进思想。然而,在多达 m 种的级联破裂方案中,如不能确定未来地震破裂是以哪一种方案进行的,则无法将该模式有效地应用于活动断裂地震危险性评估。而要对这一问题作出一定程度的回答,除了应更多地研究地震破裂尺度在不同轮回的变化规律外,还应有现代观测手段的配合。

4. 现代观测手段的配合

分段研究中配合一些现代观测手段和资料,将对了解断裂现今活动习性的空间差异具有重要意义。沿断裂带现今中小地震活动的三维分布图像及有关活动性参数,包含断裂带现今

所处的应力状态、运动性质、断面产状,以及在应力作用下介质物性等方面的信息。因此,利用地震学观测资料研究活动断裂的现今活动习性的分段差异特征、进而判定未来可能成为强震或大地震破裂单元的位置及尺度,应当逐渐成为断裂分段的重要研究方法之一。沿断裂带布置的地壳形变观测网(包括长水准、三角锁、跨断层的短水准、短基线以及蠕变观测)的重复观测结果,包含有断层同震位移、震后蠕变、应变积累与释放、断面闭锁与开放等运动学、动力学特征的信息。这些观测结果是分析断裂带现今分段差异运动特征空间分布的重要基础资料。

三、板内断裂分段地震复发时间概率模型问题

1. 问题的背景

对特定断裂段作“时间相依的地震危险性”概率分析,是通过一个地震复发时间的经验概率分布,将地震的平均复发时间、上次地震以来的离逝时间和预测时段作为输入参数,进行地震发生概率估算。若已知地震复发时间概率密度函数为 $f(T)$,自从上一次地震以来已经过的离逝时间为 T_c ,则在已知直到 T_c 时刻地震仍未复发的条件下,地震在未来时间区间 T_c 至 $T_c + \Delta T$ 复发的条件概率为(Working Group on California Earthquake Probabilities, 1990; 闻学泽, 1995):

$$P_c(T_c \leq T \leq T_c + \Delta T | T > T_c) = \frac{\int_0^{T_c + \Delta T} f(T) dT - \int_0^{T_c} f(T) dT}{1 - \int_0^{T_c} f(T) dT} \quad (1)$$

地震复发的可能性还可用自从上一次地震以来的累积概率 $P(T)$ 表示(闻学泽, 1995):

$$P(T \leq T_c) = \int_0^{T_c} f(T) dT \quad (2)$$

式中, T_c 是离逝时间总长度,即 $T_c = T_c$ 或 $T_c = T_c + \Delta T$ 。

由此可见,估算断裂的分段发震概率,重要的是事先建立适用的地震原地复发时间概率密度函数 $f(T)$,或称复发时间概率模型。由于任一断裂段的资料均远不能满足建立一个 $f(T)$ 的样本需求。因此,寻找通用的 $f(T)$ 是研究的关键。鉴于此,闻学泽(1990, 1995)曾引入由板缘特征地震资料建立的通用复发时间分布模型,该模型亦称“NB 模型”,它是由 Nishenko 和 Buland (1987) 根据环太平洋板缘断裂带那些已重复 3 次或 3 次以上特征地震段落资料建立的。其中采用一个关键技术:引入归一化无量纲: $T_{ik}/\bar{T}_k$ 作为统计样本,即第 k 号断裂段的第 i 次复发间隔时间 (T_{ik}) 与该段 n_k 次复发间隔的中位数 $\bar{T}_k$ 之比。建模结果(53 个样本)得到: $T/\bar{T}$ 很好地服从于参数 $\mu_0 = -0.01$, $\sigma_0 = 0.215$ 的对数正态分布。这一“通用”分布曾受到长期地震预测研究的重视,加州地震概率研究组(1988, 1990)在评估圣安德烈斯断层系各段未来 5~30 年的地震潜势时曾两次使用了 NB 模型。

2. 由古地震资料建立的复发时间分布及其问题

由环太平洋板缘地震复发资料建立的 NB 模型是否也适用于中国大陆板内环境的断裂分段地震复发潜势分析? 一种看法是:大陆板内无论在构造速率、地壳结构还是介质物性等方面均与板缘有明显差别,因此不能将 NB 模型应用于中国大陆地区,应当根据大陆板内资料重新建立通用的地震复发时间经验概率分布(张培震、毛凤英, 1996)。鉴于我国可用于建模的

多轮回原地复发的历史地震资料不足,从而已有采用古地震资料进行建模的尝试。表1总结了两个由中国大陆活动断裂古地震复发时间资料初步建立的模型。

表1 由中国大陆古地震资料建立的两个特征地震复发时间经验分布

Table 1 Two empirical distributions for recurrence interval of characteristic earthquakes, established from paleo-earthquake data on China mainland

研究者 (发表年代)	建模的统计 量形式	样本数量	概率分布类型	分布参数		备 注
				σ_D	μ	
张培震、毛凤英 (1996)	T/T_m	46	对数正态	0.50	-0.12	未考虑古地震年龄的断代误差
甘卫军 (1995)	$T/\bar{T}$	90	对数正态	0.26	-0.025	考虑古地震年龄的断代误差

注: T_m 是某断裂段古地震复发间隔的算术平均, 与中位数 $\bar{T}$ 很接近。

以相同构造环境的资料建立适用的断裂分段地震复发时间经验分布的思路是正确的。然而, 表1两个模型仍然存在如下的主要问题:

(1) 两个模型的对数正态分布参数 σ_D 的差别相当大, 以致于难以确定哪一个模型更为合理。对于对数正态分布来说, σ_D 等于 0.26 还是等于 0.50, 对地震潜势的概率评估结果的影响很大, 甚至可得出不同危险程度的结论。

(2) 两个模型均假定了地震复发具有准周期性行为(板缘的 NB 模型也有相同的假定)。因此, 当断裂的分段地震复发并非准周期行为时, 由这两个经验分布均不能得到地震潜势的正确估计。实际上已有研究初步揭露, 我国一些活动断裂的分段地震复发具有时间可预报的行为(闻学泽, 1993a、b, 1995), 即不完全是准周期的。

(3) 两个模型在建模时可能对古地震断代结果中较普遍地存在的不确定性、不完整性问题的考虑有所不足。古地震断代不确定性不仅仅包含在样品年龄测值的“误差”里, 还包含由样品年龄测值及其误差所不能反映的“偏差”: 主要来自断代误差、由样品年龄估计的事件年龄与该事件真实年龄之间的偏差, 以及对事件的错误辨认导致的错误测龄等。不完整性主要来源于在辨识事件过程中因标志物的复杂或模糊性而造成的辨认上的遗漏, 或由于晚第四纪沉积作用随时间的间断性而使得微地层层序对部分事件造成记录上的遗漏, 等等。尽管也有一些公认的、可靠的古地震断代结果, 但为数有限。对于更多的古地震断代结果, 均不同程度地存在不确定性以及不完整性。因此, 如何在建模时选择可靠的资料, 并将模型的不确定性降到最小程度, 是应进一步探讨的。

3. 对进一步研究的讨论

对断裂的分段地震实际复发行为的揭示, 是建立适用的地震复发时间分布最重要的基础。因此, 应利用原地复发多次的历史地震资料较系统地分析不同类型活动断裂的分段地震复发行为, 并揭示行为的特点和普适性。当研究揭示出的复发行为不仅有准周期, 还有其他的行为(如时间可预报行为)时, 应针对不同的复发行为分别建立相应的复发时间经验分布。由于我国大陆板内的多轮回原地复发的历史地震资料有限, 暂时可尝试由较小的历史复发时间

样本,依据复发行为分别初步建立复发时间的近似概率分布,由这样的分布近似估算发震概率,并随着时间和资料的增加而不断完善。也可通过与板缘环境同种复发行为的较大样本分布相比较的方法,检验两种环境的样本是否出自相同的统计母体,如是,则可将两种环境的样本合并得到更为通用的经验分布。

四、地震复发行为的稳定与变化问题

以地震地质学研究为基础的活动断裂长期地震危险性预测是建立在以下假定基础上的:

(1) 断裂(段)的破裂活动是可以重复进行的,这种重复过程(复发)服从于特征地震复发模式,在时间行为上服从于弹性恢复理论的改进模型,如准周期模式或时间可预报模式等。

(2) 断裂(段)上应力、应变积累或释放的速率在较长时期中基本保持稳定,或者说其过程基本是线性的。

(3) 断面或震源介质的极限应变强度在不同的地震轮回中的变化较小。

上述假定最根本的一点是:认为地震原地复发需要一个震源应力随时间增长的过程,或者复发轮回的时间是一次地震后震源应力重新积累至极限所需的时间。已有较多证据表明,板缘地震原地复发大多不是具有准周期性,就是具有时间可预报行为,完全随机的则较少。这在很大的程度上说明板缘地震的原地复发具有震源应力积累—释放—再积累—再释放的反复轮回过程。现代GPS重复观测结果(图3),也已观测到跨越南加州圣安德烈斯断裂带Mojave段的地壳短期应变平均积累速率与根据地质学方法获得的长期平均滑动速率具有相当好的近似(Working Group on California Earthquake Probabilities, 1995),这更加说明断裂的应变积累总体过程不太可能是非线性的,而更可能是长期较均匀的、总体为线性的。因为能使得几年时间尺度的GPS重复观测结果与几千至一二万年的地质学观测结果相近似的原因,仅用巧合是不能解释的。

中国大陆板内环境的活动断裂分段地震复发行为是否也具有与板缘的相同的证据?这是我国活动断裂地震危险性定量评价研究的重要基础课题。假如能根据较多的资料初步揭示我国活动断裂分段地震实际复发行为的特点及其普适性,同时初步证明地震复发过程具有总体的线性特征,则不仅能在较大程度上证明前述三点假定的成立,而且无疑有助于对构造地震成因的理解。

即使地壳应变的总积累过程是均匀和线性的,但在地壳介质的非均匀性、局部时间应力作用的非均匀性,以及断裂段之间存在相互力学作用等因素的影响下,完全有可能引起地震原地复发过程会出现局部的非均匀和非线性。正因为考虑到由介质非均匀性、局部时间应力作用的非均匀性所引起的复发行为变化最终表现在轮回实际复发时间与依据理论复发模式推算的复发时间估值之间的偏差上,因而通过引入不确定性分析,将这种偏差用复发时间的概率分布进行概括,进而在预测时采用概率的、而不是确定性的方式去描述地震的潜势,这正是“八五”以来的主要做法。

然而,我们仍然对相邻断裂段的破裂之间相互作用的机理及其对特定轮回复发行为的影响了解得很少。已有若干研究初步涉及这一问题。例如,Cornell等(1993)通过三维弹性位错理论研究相互应力作用引起的相邻断裂段复发时间的变化问题,主要结果是:一个段落地

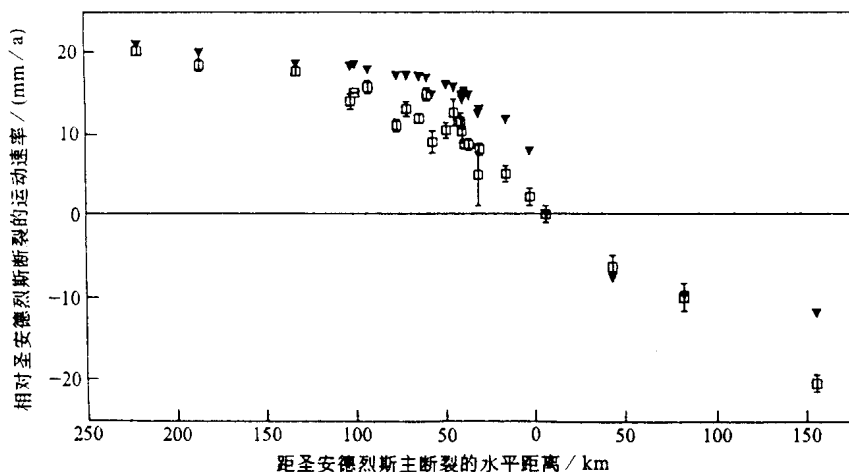


图3 横越南加州圣安德烈斯断裂带 Mojave 段的地壳短期应变平均速率与断层长期平均滑动速率的观测结果对比 (据 Working Group on California Earthquake Probabilities, 1995)。短期应变平均速率根据 1987~1994 年间的 GPS 复测结果 (图中的矩形); 断层长期平均滑动速率是地质学方法的结果 (图中的黑三角形); 图中各点的纵坐标表示各测点相对于圣安德烈斯主断面的速率累积值

Fig. 3 A comparison between relatively short-term mean strain-rate of crust and long-term average slip-rate across Mojave segment of San Andreas fault, southern California (From Working Group on California Earthquake Probabilities, 1995). Short-term mean strain-rates are from repeated GPS survey results (shown by boxes) during 1987 to 1994. Average fault slip-rates are from geologic observation (shown by triangles). Ordinates of every data points indicate rate values cumulated relative to the main San Andreas fault.

震的发生将引起与其相邻的“串联”段落地震复发时间的缩短, 并造成平行展布断裂(段)上地震复发时间的延长。在国内, 也有将该方法进行初步应用的例子 (甘卫军, 1995)。然而, 由于在使用 Cornell 等人的方法估计段与段相互作用引起的复发时间提前或延长量时, 需事先设定一些参数 (如破裂长度与深度的比率、假定走滑断裂的倾角为 90° 等), 以及要求满足规则的边界条件 (例如单一断层平直延伸、不能发生弯曲等), 同时, 他们的模型忽略了断裂段间相互力学作用的不确定性, 等等, 这些均有碍于该方法的有效应用。应当看到: 考虑不同断裂段之间相互力学作用对地震复发过程和行为的影响, 是今后研究的方向。

五、结 语

“八五”期间, 我国不仅已获得和积累了大量的活动断裂定量研究资料, 而且在断裂分段理论和地震危险性定量评估理论、模型和方法等方面的研究有了重要的进展。其中, 逐渐发展起来的“时间相依的”断裂分段地震危险性评估技术, 是以活动断裂的地震地质学定量研究资料为基础, 采用随离逝时间增长的发震概率和预测的震级共同描述断裂段的地震危险性。该技术不但为缺乏历史地震记载地区的危险性评价提供了一条重要途径, 而且也探索其他

技术方法尚难涉足的、具体地点的长期地震预测问题提供了可能性。在对活动断裂地震危险性的进一步研究中应注意：

(1) 断裂的分段地震重复破裂尺度在较大程度上存在可变性。仅由静态几何标志进行分段具有相当大的不确定，深入研究重复破裂与各类静态几何标志的关系将有助于提高利用这类标志进行分段的有效性，同时应更多地注重动态的（活动习性的和地震破裂的）分段标志的研究。现代地震观测以及跨断裂地壳形变观测成果，是分析断裂带现今应力、运动、应变积累状态以及断面产状、介质物性分段差异的有用资料。

(2) 建立可靠的我国活动断裂分段地震复发时间的经验概率分布，是进行地震潜势概率评估的重要环节。分布的建模不应局限于现有的准周期复发的假定，而应重视可能存在的复发行行为的多样性。

(3) 努力揭示我国大陆活动断裂分段地震实际复发行行为的特点及其普适性，不仅是建立和完善适用的地震复发模型、进而发展复发时间及震级预测模型的基础，同时也是证明大陆板内地震的复发过程是总体呈均匀的、线性的还是相反的有用途径。应重视断裂段之间地震破裂相互作用对地震复发行行为的影响。

限于本文篇幅，还有些问题不能作详细讨论。可以预计，随着活动断裂与地震关系研究的不断深入，以及有关理论、模型和方法的不断发展和完善，活动断裂分段地震危险的定量评估在我国长期地震预测、地震区划、地震安全性评价以及防震减灾决策等方面有着广泛的应用前景。

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), 1~10。
- 丁国瑜、田勤俭、孔凡臣、谢霄峰、张立人、王立平, 1993, 活断层分段——原则、方法与应用, 北京: 地震出版社。
- 邓起东、于贵华、叶文华, 1992a, 地震地表破裂参数与震级关系的研究, 活动断裂研究 (2), 247~264, 北京: 地震出版社。
- 邓起东、刘百麟、张培震、袁道阳, 1992b, 活动断裂工程安全评价和位错量的定量评估, 活动断裂研究 (2), 236~246, 北京: 地震出版社。
- 甘卫军, 1995, 北祁连山活动断裂东段大震危险性概率评估, 国家地震局兰州地震研究所硕士学位论文。
- 彭斯震、邓起东等, 1996, 吐鲁番盆地的地震危险性评价, 活断层研究 (5), 54~62, 北京: 地震出版社。
- 闻学泽, 1990, 鲜水河断裂带未来三十年内地震复发的条件概率, 中国地震, 6 (4), 8~16。
- 闻学泽, 1993a, 小江断裂带的破裂分段与地震潜势概率估计, 地震学报, 15 (3), 322~330。
- 闻学泽, 1993b, 准时间可预报复发行行为与断裂带分段发震概率估计, 中国地震, 9 (4), 289~300。
- 闻学泽, 1995, 活动断裂地震潜势的定量评估, 北京: 地震出版社。
- 闻学泽, 1998, 时间相依的活动断裂分段地震危险性评估及其问题, 科学通报, 43 (14), 1457~1466。
- 张培震、毛凤英, 1996, 活动断裂定量研究与中长期强震危险性概率评价, 活动断裂研究 (5), 12~31, 北京: 地震出版社。
- Aki, K., 1984, Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction, J. Geophys. Res., 89, 5867-5892.
- Cornell, C. A., S. Wu, S. R. Winterstein, J. H. Dieterich, and R. W. Simpson, 1993, Seismic hazard induced by mechanically interactive fault segments, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 436-449.
- McCalpin, J. P., 1996, Application of paleoseismic data to seismic hazard assessment and neotectonic research,