

活断层特性

〔英〕P.L. 汉考克 〔美〕R.S. 耶茨 等著
侯建军 白太绪 梁海华 李克 等译校



地震出版社

国家教委优秀青年教师基金资助

活断层特性

[英]P. L. 汉考克 [美]R. S. 耶茨 等 著

侯建军 白太绪 梁海华 李克 等 译校

地震出版社

1992

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

本译文集收了“构造地质学杂志”(第13卷,第2期,1991)“活断层特性”专辑的9篇文章,介绍了活断层的构造地质学、古地震学和构造地貌学等的研究理论和方法;论述了美国、新西兰、日本、爱琴海和喜马拉雅等地的某些主要活断层的特性,尤其讨论了活动正断层作用及其分段的原理、标志和研究方法,探讨了断层活动的不均匀性和重复破裂过程及其与地震活动的关系。

本书可供从事地震地质学、构造地质学、地貌学、地球物理学、大地测量学和工程地震学等学科的科技人员和大专院校师生参考。

Characteristics of Active Faults

P. L. Hancock, R. S. Yeats et al.

活 断 层 特 性

[英]P. L. 汉考克 [美]R. S. 耶茨 等 著

侯建军 白太绪 梁海华 李克 等 译校

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 7印张 184千字

1992年12月第一版 1992年12月第一次印刷

印数:0001—1000

ISBN 7—5028—0739—X/P·481

(1132)定价:5.80元



译者序^①

活断层的概念在本世纪初即已提出,由于它在促进地球科学基础理论的发展和实际应用中的重大意义,很快得到地球科学家的广泛重视。早期的工作在于辨别活断层、确认其存在和分布。随着新技术的发展和应用,地球科学家力图将活断层研究从定性分析推向定量分析的高度。近20年,特别是近10年来,因地震预报和工程建设的蓬勃发展,有力地推动了对活断层的广泛调查和深入研究。

活断层在全球分布广泛,为了进一步对比全球主要活断层的特性、将活断层研究推向一个新的高度,1989年7月在美国加利福尼亚州马默思湖召开了IGCP206“全球主要活断层特性对比”学术讨论会,提交会议的论文共31篇,“构造地质学杂志”(第13卷,第2期,1991)除最后一篇文章外,其余全部选自这次的会议论文。本译文集选录了该期杂志的9篇文章,它们从构造地质学、古地震学和构造地貌学的角度研究了美国、新西兰、日本、爱琴海和喜马拉雅等地的某些主要活断层特性,试图定量地研究和确定断层活动的年龄、位移速率、断层几何和细结构特性、古地震和大震的重复周期。对隐伏活断层的研究,采用了现代勘测方法,例如在日本近畿地区,对隐伏活断层进行了大地电磁勘测,确定了单断层的规模,并进一步探讨了与地震活动的关系。根据这些研究结果和技术,文集论述了活断层的分段原理、标志和研究方法,这对研究断层活动的不均匀性和重复破裂过程、未来强震发生的地点、震级大小和区分不同断层段的地震危险程度和工程地质条件有着重要的理论和实际意义。

全书由侯建军、白太绪、梁海华和李克等译校,郭满红、谭新红、谢顺兴和董文忠参加了部分翻译工作,最后由侯建军和白太绪统一审校。

限于译者水平,译文中难免有错误和不妥之处,欢迎读者批评指正。

译者

1992年12月于北京

① 本书由国家教委优秀青年教师基金资助。

序 言

本专辑收录的 9 篇论文从构造地质学、古地震学和构造地貌学的角度研究了一些活断层和新断层。除最后一篇文章外,其他均为 1989 年 7 月 2 日—4 日在美国加利福尼亚州马默思湖召开的 IGCP206“全球主要活断层特性对比”学术会议论文。

IGCP206 项目自 1983 年开始实施,美国地质调查局(科罗拉多州丹佛)的 R. C. Bucknam、中国国家地震局的丁国瑜和张裕明共同担任项目主席。该项目旨在对特定主要活断层的构造历史和特性进行系统地综合对比分析;为此,专家们研究了不同大陆构造区特定活断层的地震、地质和地貌特征,并将获取的大量资料汇集成图集和报告;另外,建立各国活动构造和新构造学家间的国际合作关系,在图集中收录活断层的国家召开学术讨论会和野外考察。项目实施期间共组织了 4 次学术会议:(1)日本神户,1984;(2)中国北京,1985;(3)新西兰法兰士约瑟夫,1987;(4)美国马默思湖,1989。其中两次会议的内容以野外考察指南的形式发表。R. C. Bucknam 和 P. L. Hancock 编辑的“图集”将由剑桥大学出版社正式出版。由于版面所限,“图集”仅汇编了选定的断层,项目参加者对许多断层和课题的研究成果未被编入。

本专辑的论文选自这次 IGCP206 最终讨论会,但它并不是一本“会议记要”。提交会议的论文共 31 篇,本书只收录了其中的 10 篇(译者注:翻译时略去一篇)。会议代表从盆地山脉省至马默斯湖的野外考察期间,在马默斯湖举行了为期 3 天的最终讨论会,因而专辑收录了重点讨论正断层作用的论文,这并不意味着 IGCP206 项目参加者研究兴趣的倾斜。在 Bob Bucknam, Tony Crone, Kathy Haller, Mike Machette, Mike Rymer 和 Bob Wallace 的共同努力下,大会和 7 天的野外考察获得了圆满成功。

P. 汉考克
B. 耶茨
D. 桑德森

目 录

北美西部盆地山脉省的历史地表断层作用与断层分段性	(1)
犹他州沃萨奇断层带分段性和全新世地震历史	(16)
美国盆地山脉省正断层的分段性与同震行为: 以爱达荷中东部 和蒙大拿西南地区为例	(30)
新西兰不同构造区断层性状差异	(43)
爱琴海区新构造期正断层带中构造不均匀性的尺度	(57)
爱琴海北部耶里索斯(1932)和阿伊奥斯埃夫斯特拉提奥斯(1968) 两次强震的构造特征	(73)
喜马拉雅前缘断裂系的现代大地构造: 褶皱、 盲冲断层和 1905 年坎格拉地震	(82)
日本西南地区四国中部中央构造线的全新世断层作用时间和位移	(95)
日本西南部近畿北区活断层系的大地电磁勘测	(104)

北美西部盆地山脉省的历史地表断层作用 与断层分段性

CRAIG M. DEPOLO

(美国内华达大学麦凯矿业学院内华达地矿局)

DOUGLAS G. CLARK 和 D. BURTON SLEMMONS

(美国内华达大学麦凯矿业学院新构造研究中心)

ALAN R. RAMELLI

(美国内华达大学麦凯矿业学院内华达地矿局)

引 言

一次地震所产生的破裂不可能贯通整条断层带,所以在地震危险性分析时应考虑某一断层带在未来地震时的可能破裂长度,以此来估计未来地震的大小。目前已有了几种估计潜在地震破裂长度的方法,即半长法、部分长度法和断层分段法。其中断层分段法考虑了较多的地球物理和古地磁资料,它已被普遍采用。断层分段性是指断层带被控制破裂的不连续区分割成一些不连续段的现象。

本文综合分析了盆地山脉省伸展构造区的 11 次历史地震(图 1)所产生的多种形式的地表破裂(从简单到复杂的都有)。目的是寻找控制或影响这些地表破裂终止区的各种现象,确定与断层分段有关的破裂特征。另外,本文还讨论了正断型、正断斜滑型和走滑型错动所造成的地表破裂。

本文考虑了 3 种类型的地表破裂,即原生的、次生的和同生的地表破裂。原生地表破裂是地下孕震断层错动引起地表破裂,次生地表破裂是主孕震断层的分支断层错动造成的或由主破裂次生出来的地表破裂,同生地表破裂指孕震断层以外的断层在地震时的同步滑动所造成的地表破裂。

断 层 分 段

断层分段标志的不同引起了断层段尺度的差异以及“断层段”一词不同的含义。了解不同作者对这一名词的定义,并在使用这一术语时给出清楚的定义是十分重要的。本文详细研究了历史时期的“地震段”,将其定义为一条断层带或几条断层带上在一次地震时产生的破裂段,较大的地震段可以包含一条或多条几何段或构造段。

划分地震段包括确定断层带中的不连续区,并刻划其特征,这些不连续区可能是地震破裂的潜在障碍物。目前已发表了许多关于断层带不连续区特征的综述性文章。断层带不连

续区的标志包括几何、构造活动方式、古地震、地貌、地质、地球物理和流变性等多方面标志。确定潜在地震的不连续区和估计其所能持续的时间需要考虑多方面的因素。确定地震不连续区的尺度是十分重要的,通常只有大尺度的不连续区(尺度为几百米至几千米量级)才能够阻止地震破裂的传播。

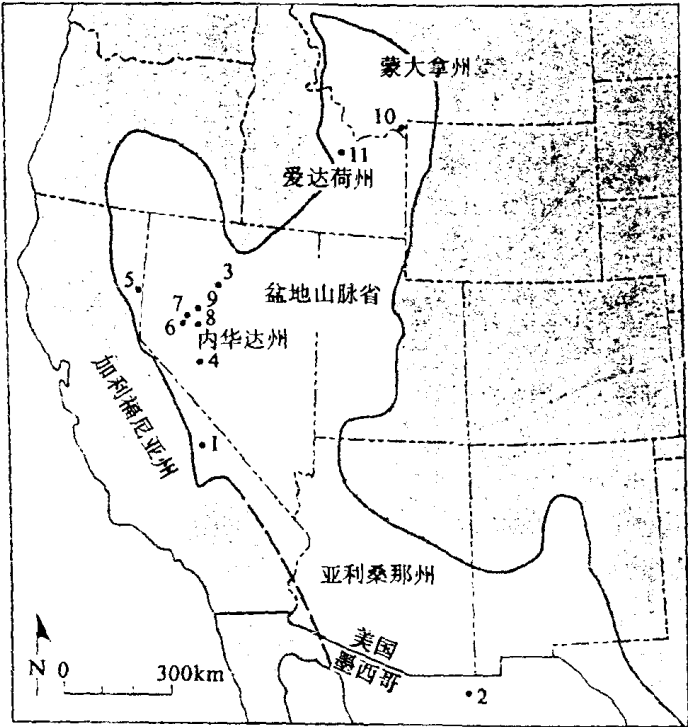


图1 盆地山脉省中具有原生地表断层作用的地震分布图

1. 1872 年欧文斯谷地震, 2. 1887 年墨西哥索诺拉地震, 3. 1915 年普莱森特谷地震, 4. 1932 年锡达山地震, 5. 1950 年萨格堡地震, 6. 1954 年雷恩博山地震, 7. 1954 年斯蒂尔沃特地震, 8. 1954 年费尔维尤峰地震, 9. 1954 年迪克西谷地震, 10. 1959 年赫布根湖地震, 11. 1983 年博拉峰地震。盆地山脉省的边界根据 Stewart(1983) 改绘

以确定先存断层段上地震活动的时空变化特征。遗憾的是本文所研究的几次地震的发生区其古地震资料都是十分有限的。

盆地山脉省

盆地山脉省位于美国西部和墨西哥北部,是一个新生代伸展构造区(图1)。本区新生代时期的活动速率在时间和空间上都有变化,该区北部及东西部边界区现今活动速率较高。该区具有伸展构造区的明显特征,如热流值高、地壳薄、有稀疏的双峰式火山活动,地震

一般可将断层带的不连续区分成三类,即几何不连续、构造不连续和活动特征不连续。这种划分是为了描述上的方便,类与类之间有“灰区”存在,某些不连续可能是跨类的。几何不连续包括断层走向的变化(弯曲),阶叠和断层带的分离或间断。Wheeler (1987)指出,平面上的几何不连续对正断型地震破裂的传播没有太大影响。例如,正断层在平面上的突然转弯并不影响垂直方向上的滑动,阻止破裂的传播。因此,在以几何资料进行断层分段时应特别注意断层的不同错动型式。构造不连续包括断层分叉、与其它断层或褶皱的交切和在横向构造处的终止。因此,断层带端点可以看作是构造不连续,单一断层可以看作是一个构造段。活动特征的不连续包括滑动速率的变化、带内地震在时间上的不均匀分布,以及活动方式是蠕滑还是粘滑。

古地震资料可以清楚地显示出地震段的破裂历史和不连续区的持久性。古地震是指史前地震,根据断层带中古地震段的活动历史和范围,可

活动较强烈、震源深部较小(一般为 10—15km 或更小些)。张性构造作用导致了倾斜断块、地垒和地堑在该区的广泛分布,还导致了上地壳中构造和岩性的不均匀,这些特征在地质、地貌和地球物理资料中都有明显显示。本区的历史地震活动集中于 3 个主要地震带上,即(1)本区西部边缘地震带,(2)本区西部的内华达中部—加利福尼亚东部地震带,以及(3)本区东部边缘山间地震带的北部。

历史地表断层作用事件

本文研究了盆地山脉省中造成了较大地表破裂的 11 次地震(表 1,图 1)。这些地震在盆地山脉省中的分布不均匀,具有一定的时空丛集性。其中有 7 次地震发生在 NNE 向的内华达中部—加利福尼亚东部地震带上,1959 年赫布根湖地震和 1983 年博拉峰地震发生在地震带上。

表 1 盆地山脉省中与原生历史地表断层作用有关的地震

编号	日期	震级	地震	主要地表错动型式
1	1872 年 3 月 26 日	$M=7.7-8.0+$	加利福尼亚欧文斯谷	走滑
2	1887 年 5 月 3 日	$M_w=7.2-7.4$	墨西哥索诺拉	正断
3	1915 年 10 月 3 日	$M_s=7.6$	内华达普莱森特谷	正断
4	1932 年 12 月 21 日	$M_s=7.2$	内华达锡达山	走滑
5	1950 年 12 月 14 日	$M_L=5.6$	加利福尼亚萨格堡	正断
6	1954 年 7 月 6 日	$M_s=6.3$	内华达雷恩博山	正断
7	1954 年 8 月 24 日	$M_s=7$	内华达斯蒂尔沃特	正断
8	1954 年 12 月 16 日	$M_s=7.2$	内华达费尔维尤峰	正断斜滑
9	1954 年 12 月 16 日	$M_s=6.8$	内华达迪克西谷	正断
10	1959 年 8 月 17 日	$M_s=7.5$	蒙大拿赫布根湖	正断
11	1983 年 10 月 29 日	$M_s=7.3$	爱达荷博拉峰	正断

由于对不同地震所给出的震级类型不同,本文使用了不同类型的震级,但不同类型的震级是可以对比的。为区分不同类型的震级,本文采用下面几个首字母缩写词: M_s 为面波震级、 M_L 为地方震级、 M_w 为矩震级、 M 表示没有区分的矩震级或烈度震级。

1872 年加利福尼亚欧文斯谷地震

从所估计的震级,最大错距和最大破裂长度来看,1872 年 3 月 26 日欧文斯谷地震是盆地山脉省最大的历史地震。估计其震级为 $M7.7-8$ 以上,强烈有感区面积达 324000km^2 。该地震沿欧文斯谷断层带造成了约 90—110km 长的地表断裂(图 2),地表错动以右旋走滑为主,最大水平错距为 7m,平均为 6m,最大垂直错距 4.4m,平均 1m。隆派恩区两条平行断层位移量的叠加造成了最大地表错距为 11m(正断右旋斜向错动)。这次地震的地表破裂由位于大地堑(欧文斯谷)中部的相对较平直的中间段和较分散的不平直的北部段和南部段组成(图 2)。

1872 年地震破裂的北端和南端都终止于拉分盆地中或其附近。破裂带北端表现为阶梯状的离散滑动,在欧文斯谷北部形成了一系列小凹陷(图 2 中点 A)。破裂带南端的确切位置还不确定,不过破裂带南端错断了欧文斯湖北岸的湖岸线是很清楚的,但其位移量在欧文斯湖南岸由于强烈冲刷而变得模糊不清。其南端可能终止于欧文斯湖盆地被北东向断层和科索山所围限的地方(图 2 中点 D)。

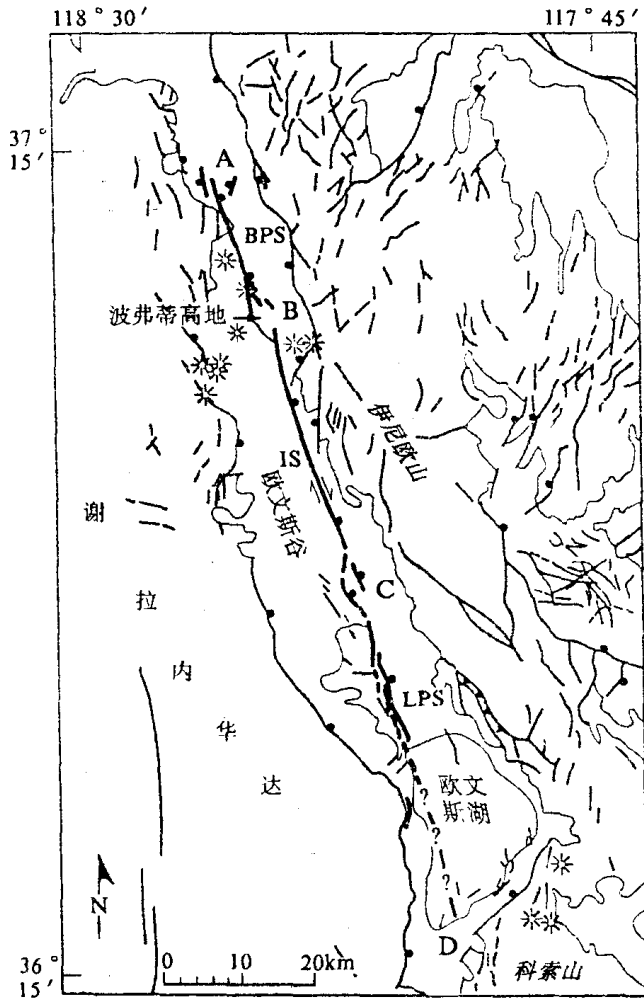


图 2 1872 年欧文斯谷地震产生的地表破裂

BPS=大派恩段, IS=独立山段, LPS=隆派恩段。星号表示第四纪火山口。粗线表示地表破裂,中粗线表示其它精选的断层,黑圆点所在处为具有正断分量的断层的下降盘,有小黑三角标示的线为逆断层,阴影区表示基岩,白色区为冲积物覆盖的谷地和盆地,大字母所在的位置为正文中所讨论的端点或不连续区

断层带在此处与其它断层交切,(3)此处为断层带中一个左阶型结合区,(4)欧文斯湖和毕晓普盆地中的基岩有明显高差以及有相应的地球物理异常,(5)该区有第四纪火山活动。1872 年的地表破裂在波弗蒂高地处发生了弯曲,但该不连续区未能阻止破裂传播。大派恩段位

Beanland 和 Clark 根据断层连续性、走向和类型将欧文斯谷断层带分为 7 段,虽然我们采用了 Beanland 和 Clark 的一些段名,但我们的分段原则与他们的不同,比他们的更为合理。我们认为欧文斯谷断层带至少可以分成 3 个几何段(图 2),即隆派恩段、独立山段和大派恩段,这些段基本上是根据几何不连续来划分的。隆派恩段南端的确切位置还不清楚,它可能终止于横向断层与之交汇的地方(图 2 中点 D)。由于现代河流冲积物的存在和水流的冲刷作用,欧文斯谷断层带在该段南部 18km 长的一段中变得很不清楚。根据 Carver(1969)标出的位于欧文斯湖干枯湖底的稍向西偏的右阶排列的线性构造和断层,可以肯定地区分出欧文斯谷断层带的第 4 个几何段。隆派恩段从欧文斯湖北部向北比较清楚,这一段长 32km,一直延伸到隆派恩段与独立山段之间的一个 1.5km 宽(接近垂直走向距离)的右阶带附近(图 2 中点 C)。隆派恩段宽 2.5km,其地表形迹比独立山段复杂得多,正断分量也大得多。独立山段长为 35km,宽 0.5km,是一个明显的线性狭窄断层带,具有断陷塘和其它复杂小构造,如小型阶梯状断层等。在独立山段北端,波弗蒂高地分隔了欧文斯谷断层带,构成了断层带中一个明显的不连续区(图 2 中点 B),其证据有:(1)断层几何和断层展布在此处发生明显变化,(2)

于波弗蒂高地以北,长为 23km,该段比以上两段稍靠西一些,形态更为复杂,发育有许多小断层。

1872 年地震至少使欧文斯谷断层带中的 3 个几何段发生了破裂。隆派恩段和独立山段之间地表破裂的复杂程度和垂向滑动量的差异进一步表明了断层活动的分段特征。有证据表明,欧文斯谷断层带上全新世以前至少发生过两次地震,地震时发生破裂的段可能与 1872 年地震的破裂段是一致的。

1887 年墨西哥索诺拉地震

1887 年 5 月 3 日索诺拉地震发生在盆地山脉省南部,估计其震级为 $M_w 7.2-7.4$,有感区面积约 2000000km²。这次地震的地表破裂沿皮塔伊卡奇断层发育,长约 75km,是世界上有历史记载的最大正断型地表破裂。地震所产生的断层陡坎高度为 0.5—4m 以上。Herd 和 McMaster(1982)测得的最大正断滑动位移为 5.1m。

1887 年地震的地表破裂大都沿山前与冲积物接触面发育,可以分成 3 个几何段。南段长约 22km,垂向位移小于 1m,比北面两段的位移明显要小。在其南端,破裂消失在基岩中。有一个 2.5km 宽的右阶区使其与主破裂分开(图 3 中点 D 和 C)。中段大部分沿谢拉德圣路易斯山前发育,长约 39km,该段的地表位移量最大。在其南端山前附近发生了近 60° 的偏转,发育了一个 0.5km 宽的右阶带,沿一个大谷地向南延伸了 10km,最终消失在谷地中一个基岩高地的南侧。北段长约 14km,离开了山前,沿山前夷平区与冲积物的接触带发育了几公里,并且向圣贝纳迪诺谷延伸了 5km。我们认为北段为 1887 年地震破裂带的第 3 个段,主要根据是破裂进入北段发生了近 30° 的偏转、分成了几条平行断层、并且偏离山前(图 3 中点 B)。地表破裂和累积位移量在北段与中段之间的不连续区内及其南北两侧基本上是连续的。

索诺拉地震产生的地表破裂比较简单,呈狭窄条带状沿山前发育,可分为 3 个几何段。Bull 和 Pearthree(1988)估计从最近一次古地震到 1887 年地震大约经历了 20 万年,这次古地震的地表破裂在长度和错动量上与 1887 年地震的破裂是相似的。

1915 年普莱森特谷地震

1915 年 10 月 3 日普莱森特谷地震的震级为 $M_s 7.6$ 。有感范围较大,从华盛顿南部到墨西哥北部、从科罗拉多西部到太平洋东岸都有感。形成了由 4 个主要断层陡坎组成的右阶雁列式地表破裂(图 4),破裂总长度为 60km。从东北到西南这次地震的主要断层陡坎是:中国山段(长度 $L=10\text{km}$,最大位移 $D_{\max}=1.5\text{m}$)、托宾段($L=8.5\text{km}$, $D_{\max}=4.7\text{m}$)、皮尔斯段($L=30\text{km}$, $D_{\max}=5.8\text{m}$)和苏高地段($L=10.5\text{km}$)。雁列阶距为 3.5—6km。第 5 段在斯蒂尔沃特山附近($L=1.5\text{km}$, $D_{\max}=1.2\text{m}$?)可能是重力作用造成的,位于断层带中第 5 个可能的右阶分支的位置上,其间距、方位及西侧下掉等特征反映是构造成因的。如果这一段是构造成因的,那么总的破裂长度将变为 74km,该段与苏高地段之间的阶长和断层作用空区为 10.4km(图 4 中点 E)。

这次地震所造成的 4 条主要地表破裂出现在一些山脉块体的西麓,主要沿先存的晚第四纪断层陡坎发育。断层作用以正断滑动为主,最大垂直位移出现在皮尔斯段上,为 5.8m,总体平均垂直位移为 2m,局部有错距达 2m 的右旋水平错动。

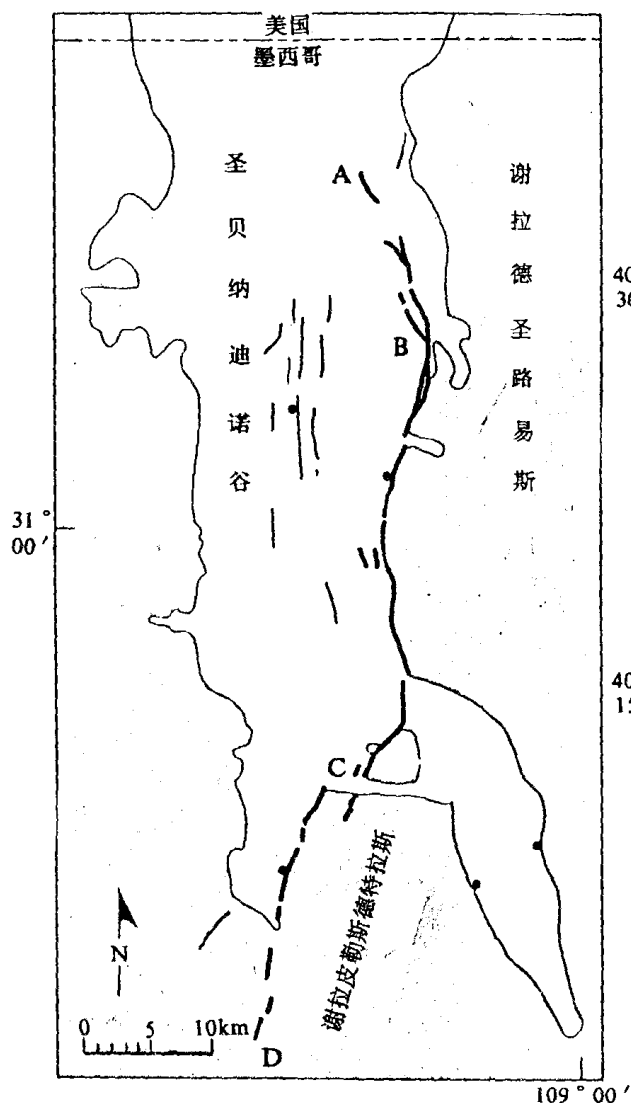


图3 1887年墨西哥索诺拉地震的地表破裂
注释如图2

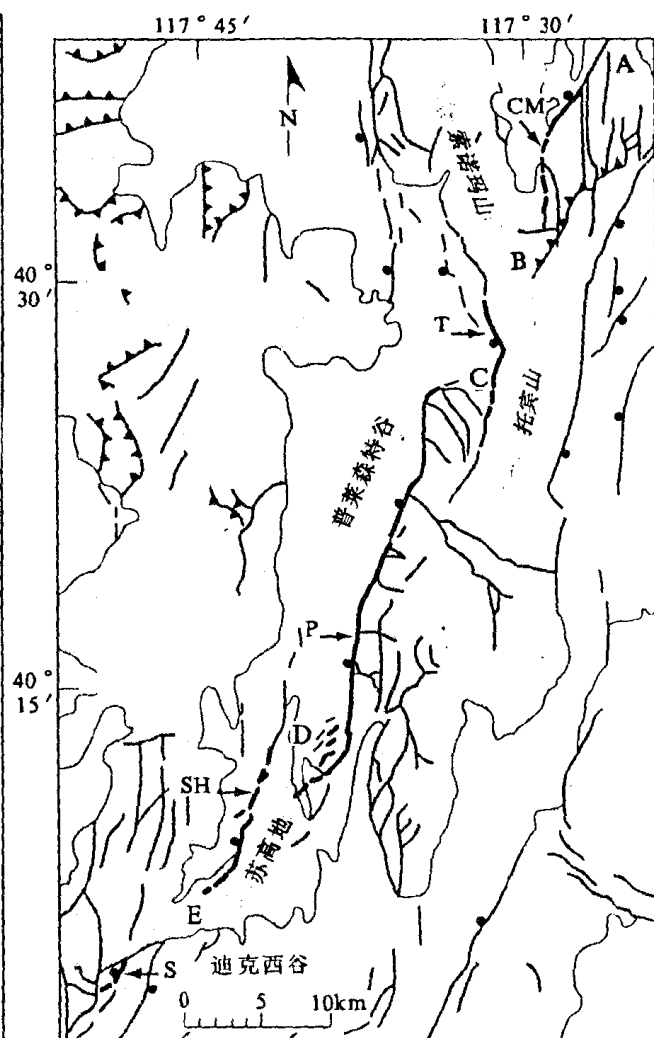


图4 1915年普莱森特谷地震的地表破裂
CM = 中国山段, T = 托宾段, P = 皮尔斯段,
SH = 苏高地段, S = 斯蒂尔沃特段。注释如图2

根据全状块体的连续性、晚第四纪断层陡坎的形态和断层带中的大型阶叠区,可以看出这次地震所产生的地表破裂贯通了4—5个构造段或几何段。其中皮尔斯段和托宾段的地表位移最大,它们构成了托宾山的西界,被一个3.5km宽的右阶区分开(图4中点C),形成两个几何段。中国山段和苏高地段构成了不同山脉块体(从托宾山中分离出来的)的边界,所以将其看作构造段。

这次地震破裂带的南端(包括位于斯蒂尔沃特山上的1.5km长的破裂)位于苏高地上的基岩倒转(图4中点E)。Fonseca(1988)根据地质、地貌和古地磁资料指出苏高地在第四纪期间表现为地表破裂的重要障碍体。该区还是不同方向的重力异常带、航磁异常带的交叉区,而且苏高地南北两侧纬度相近的山体的掀斜方向也有明显变化。

这次地震的地表破裂带穿过了托宾山,在托宾段与中国山段之间有一个6km宽(垂直

走向的距离)的阶叠区(图4中点B)。托宾段的北端沿托宾山和索诺玛山西麓的第四纪断层陡坎发育,这一第四纪断层陡坎在托宾段以北向NW方向延伸达几十公里,但在1915年地震时,托宾段以北的这一段第四纪断层陡坎没有活动。

1915年的地震破裂可分成4—5个构造或几何段,这些破裂段呈右阶雁列式排列,阶区宽达6km(垂直走向距离)。Wallace (1989)提出地表断层作用的分布形式可能是深部与地表断层相交的断层的错动所造成的,深部断层的错动只造成地表断层中位于其上部的一些段落发生破裂。

1932年内华达锡达山地震

1932年12月21日锡达山地震时断层运动很复杂,以右旋走滑为主。所产生的地表破裂分布比较广泛。这次地震的震级为 $M_s 7.2$,有感区面积为 850000km^2 。震中位于加布斯谷或其附近,接近其破裂带的北端(图5)。其地表破裂带长约60km(两端间距离),宽6—14km,由震中区向东南延伸。地表破裂并不局限于一条山前带或单一地形区,而是广布于三个谷地和邻近的一些局部山前带中。在这次地震时,有几条断裂不同程度地发生了破裂(图5),例如斯蒂尔特—蒙特克里斯托断层带,以及斯图尔特谷和加布斯谷中的一些无名小断层。由区域或远震地震图所做的体波模拟表明,这次地震实际上是两次次级地震,这两次次级地震在空间上分别与破裂带的北半段和南半段有关。

这次地震地表破裂带的北端不甚清楚,由加布斯谷中的几条间距较大的小破裂组成,这些小破裂的位移不足几分米(图5中点A),最北面的一条小破裂出现在一条断层的南端,该断层在1954年费尔维尤峰地震时有微弱活动。该破裂带南端的破裂比北端的长,分布较集中,位移量也大,由几条地表破裂组成。其中最长的一条长约17km,出现在蒙特克里斯托谷北部,沿斯蒂尔特—蒙特克里斯托断层带发育,连续性较好,最大水平位移1—2m,最大正断位移0.5m。破裂带南端终止于一条横断层和拉分盆地附近(图5中点C)。

地表破裂带的北部区和南部区中间是一个9km长的断层作用空区,该区在1932年地震时没有发生破裂。区内地表沉积物和中新世沉积物中发育了许多褶皱,但在老火山岩和

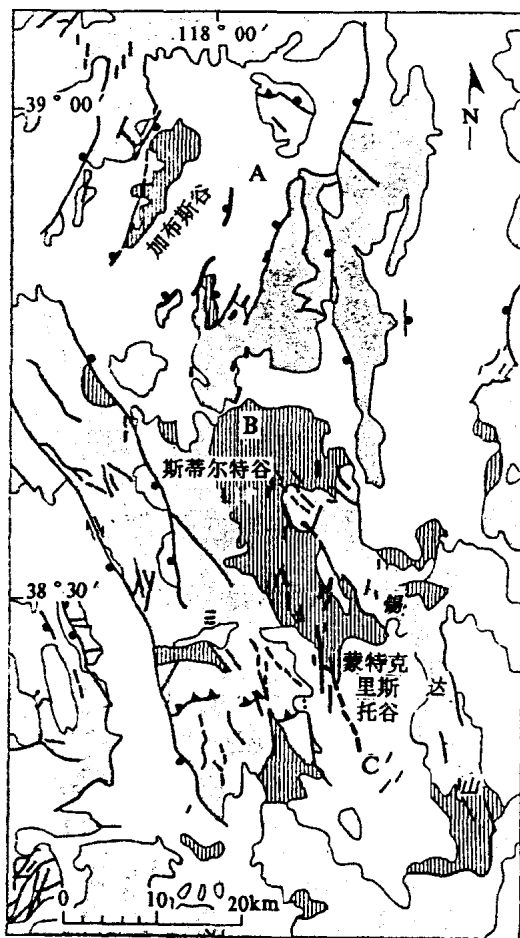


图5 1932年锡达山地震的地表破裂
竖线区为第三纪沉积物,破裂由C点沿斯蒂尔特—蒙特克里斯托断层带向北北西延伸。注释如图2

基岩中没有褶皱现象。Molinari (1984a)认为这是表生浮皱作用造成的,这也可能是造成地表破裂不连续的原因。地表破裂在该空区以北偏向北东,而在其以南为南北向的。

1932 年地震所产生的地表破裂由许多小破裂组成,分布非常广泛,因此很难圈定其范围。地表破裂的这种分布特征使得断层分段更为复杂。锡达山地震可以解释为多条断层(构造段)依次破裂所造成的,由此造成了地表破裂的复杂化,并且提高了其震级。

1950 年加利福尼亚萨格堡地震

1950 年 12 月 14 日萨格堡地震的震级为 $M_L 5.6$,有感区面积大于 52000km^2 。所产生的地表破裂沿萨格堡山西麓断层发育,长 9.5km ,由两条呈左阶斜列的破裂段组成,其中的阶区宽 320m (图 6)。虽然最大地表错距只有 20cm ,但如果考虑到冲积物的褶皱变形,地表位移实际可达 60cm 。地表错动为正断型的,没有发现水平错动证据。

温泉断层系位于萨格堡山东北麓,构成该山的东北边界,萨格堡山断层和 1950 年地震所产生的地表破裂都终止于该断层处(图 6 中点 A)。1950 年地表破裂南端沿山前(宽阔凸体)发育,偏离原走向不到 38° (图 6 中点 B),偏转段的长度为 2km 。1950 年地震的地表破裂可能只局限于一个几何段中。

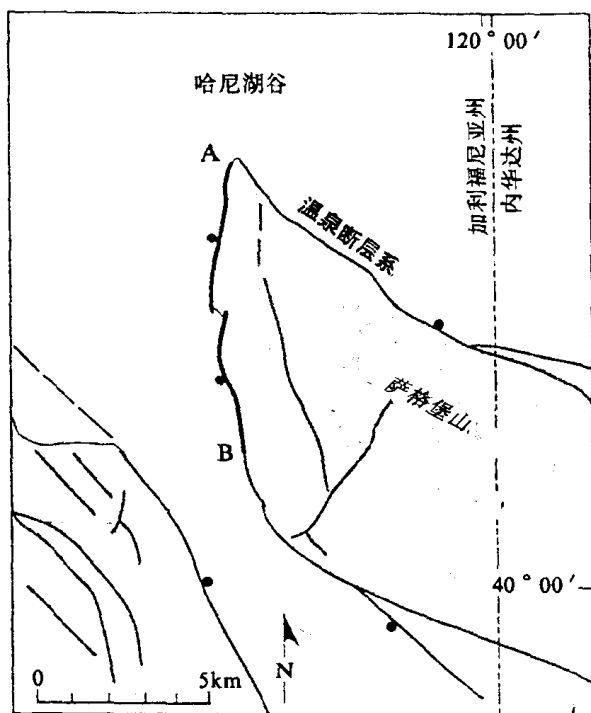


图 6 1950 年萨格堡山地震的地表破裂

注释如图 2

1954 年内华达雷恩博山和斯蒂尔沃特地震

内华达州在 1954 年 7 月到 12 月短短 6 个月内发生了 4 次地震,而且发震地点相距很近。1954 年 7 月 6 日雷恩博山地震($M_s 6.3$)和 1954 年 8 月 24 日斯蒂尔沃特地震($M_s 7$)是 4 次地震中最早的 2 次。

7 月 6 日地震的地表破裂发育在一个构造段中,长为 18km (图 7),大部分(约 10km)位于雷恩博山脚下。该破裂带具有张性特征,沿 NNE 向的雷恩博东麓断层形成了一些向东倾的高达 30cm 的小陡坎和张裂隙。破裂带延伸到了第四纪沉积盆地中,两端都有些散开,最终消失在这些盆地中(图 7 中点 C 和 D)。

8 月 24 日斯蒂尔沃特地震时,7 月 6 日地震破裂北端再次活动,断层陡坎的高度也有增大(图 7)。这次地震的破裂带向北穿过斯蒂尔沃特沼泽地,到达卡森洼地,延伸长度达 34km ,其断层陡坎高度达 76cm 。该破裂带北端不太确定,可能终止于图 7 中点 A 处。其南端终止于雷恩博山地震的地表破裂中。至少有 3 条断层在这次地震中有明显活动(图 7 中有影线标示的断层)。根据切割关系,我们认为这次地震的破裂带由两个构造段组成(图 7 中点 B 为分界点),这两段在走向上相差 40° 角。

以上两次地震都没有产生地表水平错动。可是,震源机制解明显具有走滑分量,特别是 7 月的地震。Doser (1986)认为 7 月的地震是由两个次级地震组成的,第一个次级地震释

放了地震的大部分能量,并且以走滑错动为主,而第二个次级地震震源较浅,产生了较大的正断滑动。Doser 指出地表破裂是由第二个次级地震所造成的。这种说法在一定程度上解释了为什么地表没有水平错动证据。

这两次地震时活动的断层,地震以前 12000 年间,也即拉洪顿湖地层沉积之后,几乎没有产生任何地表构造变形。7 月地震的地表破裂沿一个构造段发育,而 8 月地震的地表破裂出现在两个构造段中,两者重合了约 12km。

1954 年内华达费尔维尤峰—迪克西谷地震

1954 年 12 月 26 日费尔维尤峰和迪克西谷地震的震级分别为 $M_s 7.2$ 和 6.8,发生在内华达中西部(图 1)一个长 120km、宽 32km 的带中,产生了非常复杂的地表破裂。费尔维尤峰地震的地表破裂带长 67km,走向南北,为右旋正断的斜向滑动带,分布于费尔维尤峰断层、韦斯特盖特断层和戈尔德金断层这三条主要断层上(图 8)。Doser(1986)做出的震源机制解表明,其中一个节面的走向为北西 10° ,倾向 NE,倾角 60° ,具有明显的右旋错动分量。迪克西谷地震发生在费尔维尤峰地震之后约 4 分 30 秒,其地表破裂沿斯蒂尔沃特山东麓发育(图 8),以正断滑动为主。

费尔维尤峰地震的地表破裂北端位于卢德巴克山的一个小凸体附近,在此迪克西谷明显变宽(图 8 中点 D)。其南端在贝尔低地以南比较复杂,由几条分散的不连续破裂组成,一直延伸到芒特安纳以南。

这次地震的地表破裂发育在三条不同断层带上(费尔维尤峰断层,戈尔德金断层和韦斯特盖特断层),所以可将这次地震的地表破裂分为 3 个构造段。其中费尔维尤段位于斯莱特山、费尔维尤峰和乔克山的东麓,长约 37km,以正断右旋滑动为主,最大水平位移 3.7m,最大正断位移 3.1m。该段沿费尔维尤峰东麓向北变成了一系列 NE 向的雁列式破裂,并沿乔克山前断裂继续向北延伸,穿过了卢德巴克山南面的冲积物缺失区(图 8 中点 E)。戈尔德金段长 16km,倾向 W,一部分发育在卢德巴克山西缘,另一部分发育在该山的基岩中。费尔维尤峰段和戈尔德金段在构造上和活动特征上都有明显不同,因为这两段分别出现在两条不同的山前断层上,所在的山坡是相对的,山前断层的倾向也是相反的,而且其水平错动量和下滑量也具有明显不同。戈尔德金段的正断位移量高达 60cm,可能与 1903 年(?)旺德地震在该段所产生的地表位移量近似,这是美国仅有的几个重复性历史地表断层作用中的一例。最近的野外调查表明,戈尔德金段的一个分支向西北进入迪克西谷,具有明显的右旋滑动分量。韦斯特盖特段是一条西盘下掉的山前断层,位于费尔维尤峰段和戈尔德金段东面 2—4km 处,并与这两段平行,该段长 18km,最大正断位移为 1m,最大右旋滑动位移 0.5m。

Doser (1986)所做的波形反演模拟表明,费尔维尤峰地震由 2—3 次次级地震组成,这与本文提出的分段模型之间有什么关系还不清楚,地震矩在这些断层段中的分配以及次生和同生地表破裂所占的比例也不清楚,例如韦斯特盖特段和戈尔德金段可能是费尔维尤峰段派生出的,也可能有同生的关系。

迪克西谷地震的地表破裂带位于迪克西谷西侧,长 43—47km。该破裂带可能没有穿过迪克西谷和费尔维尤峰破裂之间的宽为 10km 的左阶区,所以该左阶区可能是这两次相隔很近的地震破裂带之间的界限。在迪克西谷地震破裂带上测得的正断位移大于 2m。该破

裂带南端大致位于斯蒂尔沃特山东南端,此处破裂复杂,且离散状分布(图 8 中点 C)。

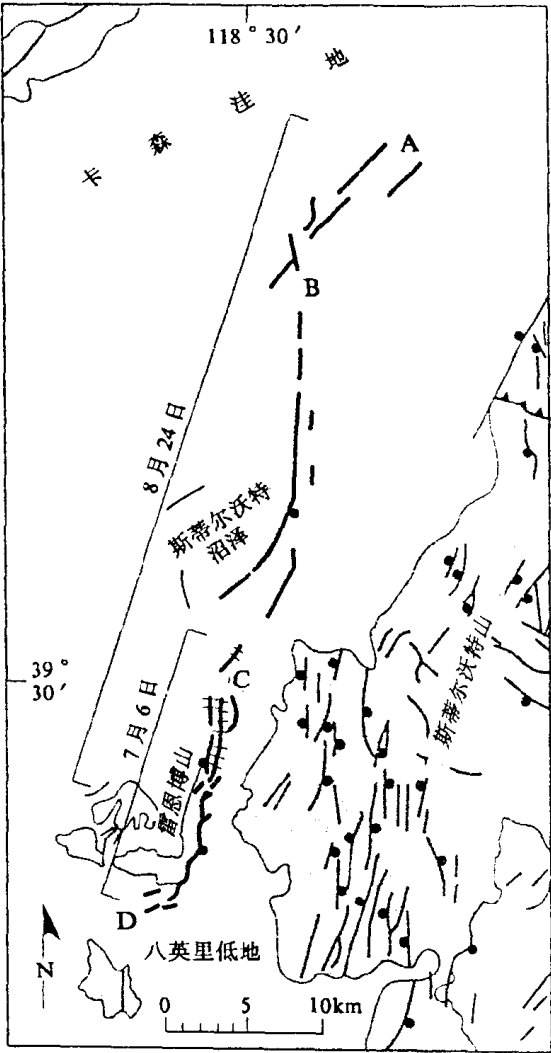
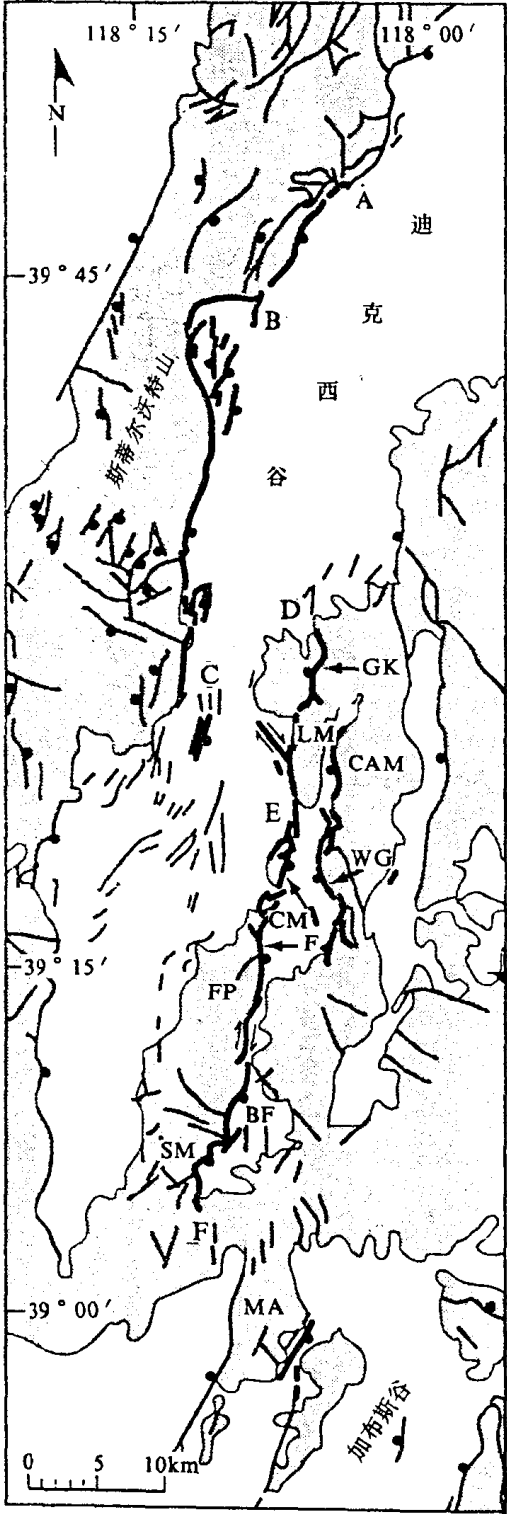


图 7 1954 年雷恩博山和
斯蒂尔沃特地震的地表破裂
影线表示 7 月 6 日和 8 月 23 日地震的地表破裂
范围。范围标志线表示两次地震的破裂范围。注
释如图 2

图 8 1954 年费尔维尤峰和迪克西谷地震
的地表破裂

GK=戈尔德金段, LM=卢德巴克山, CAM=克
兰山, WG=韦斯特盖特段, CM=乔克山, MA=
芒特安纳, F=费尔维尤峰段, FP=费尔维尤峰,
BF=贝尔低地, SM=斯莱特山。注释如图 2



迪克西谷地震破裂通过一个大规模山前内凹(称为“弯曲”)后,继续沿山前断层向北延伸了 12km,走向偏转了近 40° (图 8 中点 B)。所以我们认为该山前弯曲以北的断层为破裂带的第二个几何段,该段的位移一般为 0.5m 或更小些。地表破裂带的北端(图 8 中点 A)位于断层带中一个 0.8km 宽的右阶区处,此处山地内还发育一条横断层。这条横断层可能是斯蒂尔沃特山中的一条南北向断层带的一部分,它与北东向断层相交或将 NE 向断层切断。由洪堡岩盆所造成的磁异常在 1954 年地震破裂带的北端附近穿过了迪克西谷断层。Speed (1976) 根据重力及地质资料估计该岩盆的厚度(深度)只有 1km 或略多一些,这种地壳浅层的现象可能并不影响深部的破裂,但对地表的破裂形式会有影响。

山前的晚第四纪断层陡坎在迪克西谷破裂带北端以北基本上是连续的。Bell 和 Katter (1990) 推测迪克西谷地震破裂带的北段与北面相邻的地震段可能有重叠,其重叠长度可能有 25km。这是一个典型实例,由此可以说明地震段的明显重叠是怎样形成的,而且是有可能确定的。

总之,1954 年费尔维尤峰—迪克西谷地震的地表破裂主要沿山前的冲积物——基岩界线及其附近发育,而且几乎总是出现在史前断层陡坎上 (Slemmons 1957)。费尔维尤峰地震至少使 3 个复杂的构造段发生了破裂,即费尔维尤段、戈尔德金段和韦斯特盖特段。迪克西谷地震破裂带沿迪克西谷断层带发育,可能包含两个几何段。

1959 年蒙大拿赫布根湖地震

1959 年 8 月 18 日赫布根湖地震的震级为 $M_s 7.5$ 。地震破裂带发育在蒙大拿州西南的麦迪逊山南端附近,长 28km (端间距离,包括次级和同生破裂),其中的破裂错综复杂。该地震的有感区面积大于 870000km^2 ,产生了明显的断层陡坎、滑坡和大规模盆地沉降。这次地震的主震是山间地震带上有记录的最大地震。地震资料表明,这次地震实际上为两次较大的次级地震,其时间间隔约 5s,发生在一条或多条 NWW 向的断层上,这些断层倾向 S,倾角 $45^\circ - 60^\circ$,为纯倾向滑动断层。

雷德谷断层和赫布根断层(构造段)有明显正断滑动(图 9),其它几条断层的错动较小,是次级错动。雷德谷断层和赫布根断层的走向主要为 EW 向到 NW-SE 向,与著名的麦迪逊山走向不一致。雷德谷断层上的破裂很复杂,呈曲线形,长约 23km,与拉腊米时期(白垩纪晚期至新生代早期)的褶皱轴和逆断面几乎平行,最大垂直位移($D_{\max}$)为 4.6m,这一位移

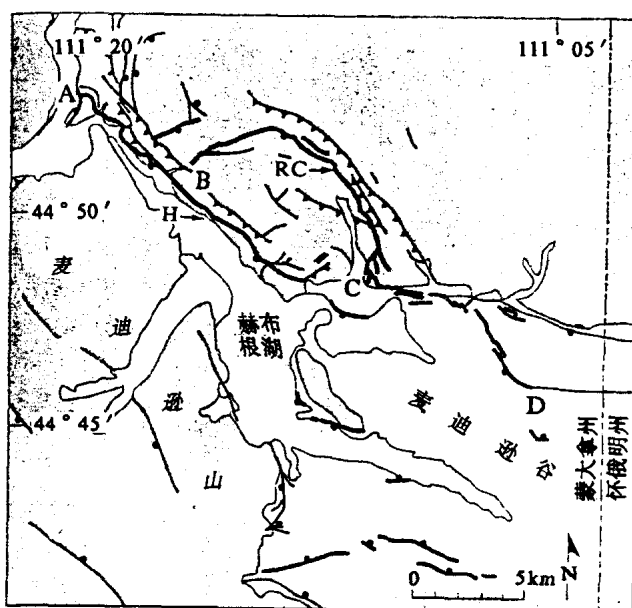


图 9 1959 年赫布根湖地震的地表破裂(地表破裂和基岩分布据美国地质调查所 1964)

H = 赫布根段, RC = 雷德谷段。

雷德谷是点 C 北面的一条冲沟