

活动断裂分段研究 译文集

朱世龙 何永年 张宏卫 朱向军 徐锡伟

地震出版社



活动断裂分段研究译文集

朱世龙 何永年 张宏卫 朱向军 徐锡伟



地震出版社

1992

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

断裂分段研究是80年代后期活动断裂研究及地震地质领域中的一项最新进展,它与古地震、地震区划、震害预测与防治以及工程抗震等方面有着非常密切的关系。可以说,要使地震危险性评估达到一个新的水平,活动断裂分段研究是一条必由之路。本文集摘译了国外有关活动断裂分段研究论文 23 篇,集中反映了目前国际上关于活动断裂分段研究的动态、方向,以及近年来所取得的一些成果和认识。

本书可供从事构造地质、地震地质、地球物理、工程抗震和工程建筑的科技人员及有关院校的师生参考。

活动断裂分段研究译文集

朱世龙 何永年 张宏卫

朱向军 徐锡伟

责任编辑:朱向军

*

地质出版社出版

北京民族学院南路9号

北京丰台区丰华印刷厂印刷

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 15 75 印张 400 千字

1992 年 12 月第一版 1992 年 12 月第一次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-5028-0750-0 / P · 486

(1143) 定价: 12.00 元

前 言

活动断裂研究是地球科学中一个重要的研究领域，也是地震科学的重要基础之一。众所周知，活动断裂与破坏性地震的发生有着非常密切的关系，而且在预测未来地震危险区（段）、圈定潜在震源区、地震区划、工程建设以及减轻地震灾害等方面也是不可缺少的前提。因此活动断裂的研究一直受到国内以及国际上的重视。但在 70 年代以前，它长期停留在描述性的阶段，从 70 年代开始，由于它在地震和工程建设中的特殊地位和重要性，从而获得了飞跃的进展。其中最为突出和重要的两个方面应该是：古地震与大震重复间隔的研究；断裂分段性的研究。

断裂分段性的研究，可以说是 80 年代活动断裂研究及地震地质领域中一项最新进展和成果，它是活动断裂研究向深度发展的重要课题，从一开始就显示出了蓬勃的生命力。所谓断裂的分段，并不是单纯和简单的形态上的分段。目前，一般地认为，应是指一条大的断裂带往往可以分成若干个段落（Segment），每个段落都作为一个独立的震源区而发生地震破裂，每一段落发生的地震破裂都不受相邻段落的制约，而有着自己独特的活动历史，即具有相对独立和稳定的活动习性。不难看出，断裂分段的研究与古地震、地震区划、灾害预测与防治以及工程抗震设防等方面有着非常密切的联系。可以说，要使地震危险性评估达到一个新的水平，活动断裂分段性的研究是一条必由之路。概括起来，断裂分段性研究的重要意义表现在三个最明显的方面：（1）它有助于从理论上认识地震破裂的起始与终止过程及其岩石圈的破裂强度和习性；（2）它是预测地震危险性的有效手段；（3）它正在成为地震工程稳定性评价中的最基本方法之一。

断裂分段性的研究虽然在地震危险性预测中意义重大，但在目前无论是其方法本身还是实际应用都还存在着有待于进一步研究和解决的问题。所以，关于断裂分段性的研究在今后仍将是地震地质和地震危险性预测研究中的重点课题。

在我国，断裂分段性的研究目前还只是刚刚开始。为了在我国更好地开展这方面的工作，使我国的活动断裂研究跟上世界先进水平，更好地为地震危险性预测和工程建设服务，我们于 1991 年开始组织有关人员翻译了有关断裂分段性研究方面的论文，经过一年多时间的努力，这本关于断裂分段性研究的译

文集今天终于和读者见面了。在这本论文集里包括有关论文 23 篇，它集中反映了目前国际上关于断裂分段性研究的动态、方向，以及近年来所取得的一些成果和认识。我们希望这本译文集能对我国的活动断裂研究起到一定的推动作用，把我国活动断裂研究推上一个新的台阶。

本译文集由朱世龙、何永年、张宏卫、朱向军、徐锡伟主编译，另外参加具体翻译工作的同志还有赵和平、张培震、孔凡臣、冉勇康、毛凤英、韩竹君、熊扬武、周永东、焦文捷等，全书校对工作由朱向军、徐锡伟负责。

最后，谨对给予本书大力支持和帮助的同志一并表示感谢。

目 录

盆地山脉省正断层分段性和同震特性——以爱达荷	
中东部和蒙大拿南部地区为例	(1)
盆-岭地区正断层的持久段落边界	(14)
美国西北部盆地山脉省历史时期的地表破裂: 断层分段性的含义	(22)
美国内华达州 Dixie Valley-Pleasant Valley 活动正断裂带的构造几何图象、	
破裂终止特征和段落的划分	(39)
南加利福尼亚和北下加利福尼亚 Elsinore-Laguna Salada 断裂带各断裂段的	
特征: 特征地震模型的解释	(52)
加利福尼亚 Saw Jacinto 走滑断层带的分段和地震事件	(65)
加利福尼亚 Mount Abbot 地区分段走滑断层带的形成	(84)
美国犹他州 Wasatch 断裂带的分段模型和全新世历史地震	(95)
根据地质、大地测量和地震观测资料评价断层滑动: 地震机制和断	
层分段性的解释	(107)
走滑断层的构造演化和地震活动性	(115)
脆性地壳中断层面的分段与加载系统的非均质性	(124)
南加州 Ocotillo Badlands 压缩断阶的地质构造	(129)
地震重现模型评述	(140)
走滑环境下的构造转换	(147)
爱达荷 Lost River 断裂带上断层段落界限区的构造及其对 1983 年	
Borah Peak 地震破裂的可能影响	(151)
挤压阶区对地震破裂的影响	(160)
与地震破裂形成和终止有关的断层带的几何特征	(168)
走滑型地震破裂带上挤压弯曲效应	(171)
古地震、断层段落的持久性和大地震的时间丛集——以圣安德	
烈斯、Wasatch 和 Lost River 断裂带为例	(178)
圣安德烈斯断层斜向段的滑动分布	(188)
内华达和犹他州大盆地省第四纪断层带的区域端点及分段	(198)
新墨西哥 Sangre de Cristo 山的晚第四纪断裂陡坎、山前地貌和山前	
断裂的分段	(206)
断层相互作用对雁行走滑断层稳定性的影响	(231)

盆地山脉省正断层分段性和同震特性

——以爱达荷中东部和蒙大拿西南部地区为例

A.J. Crone K. M. Haller

(美国地质调查所)

一、引言

准确地评估地震灾害主要依赖于对潜在发震断层的同震特性的基本理解。例如,准确地估计地表破裂长度、位移量和多震层的厚度等,使我们能够对未来可能发生的地震的震级大小进行评估,从而有助于我们确定有关灾害的属性。断层分段性的概念对灾害评估具有很重要的意义,这是因为,如果我们能够识别和确定灾害性断层的段落,就可以确定在单个地震中将发生破裂的断层的区域、长度和位置。

断层分段性的概念是基于大地震中在一条长的断层带上只有一部分发生破裂这一客观事实 (Schwartz 和 Coppersmith, 1984; 1986)。一些重要断裂带上历史地震和古地震的最新研究表明,特殊的地质构造在断层面上形成障碍,并自然地把断层划分成不同的段落 (Bruhn 等, 1987; Crone 等, 1987; Fonseca, 1988; King 和 Tiedling, 1984; Machette 等, 1987; Wheeler 和 Krystinik, 1987)。障碍可以延缓或者终止同震破裂的扩展,在一些情况下,这些障碍能经受几个地震过程 (Wheeler, 1987)。

1983 年 Borach Peak 地震很好地说明了障碍是如何影响一段正断层破裂扩展的。地质、地震和大地测量资料表明,这次地震的破裂两端受到了 Lost River 断层上的障碍的限制。很显然,这些障碍也影响到了更早的破裂 (Crone 等, 1987)。Lost River 断层在 1983 年地震中的破坏特性,典型地代表了盆地山脉省许多正断层的同震属性。因此, Lost River 及其邻近断层分段性研究可广泛应用于整个盆地山脉省。

爱达荷州中东部和蒙大拿州西南部的 Lost River 和邻近山脉的山前正断层为研究正断层分段性提供了一个很好的场所,因为沿这些断层的断层崖保存得很好,且很少受到人类文化活动的改造。Borah Peak 地震是山前正断层同震破坏的最好例子。

本文总结了爱达荷州和蒙大拿州 Lost River 和 Lemhi 山前以及 Beaverhead 和 Tendoy 山脉正断层分段的地质证据和特征 (图 1)。在区域研究 (Haller, 1988a, 1988b) 和 Lost River 断层上的详细研究的基础上 (Crone 等, 1987, Schwartz 和 Crone, 1988), 我们描述了一些段边界的一般标志。在区域内广泛地进行断层分段, 对研究单一断层有两个重要的益处: 其一是在区域上能提供更为完全的段落边界的各种标志类型; 其二是, 它提供了张性构造区内地表断裂作用在区域上的时空分布。在研究区和盆地山脉省的其它地区断层间的相似性表明, 我们在这里所讨论的段落边界标志可以应用于整个盆岭构造省。

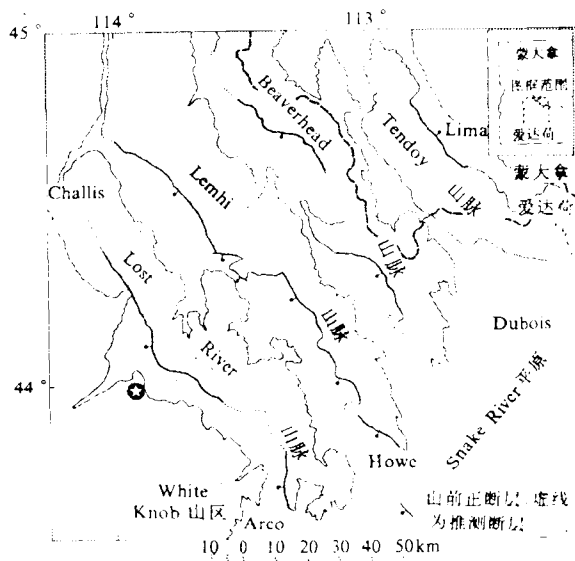


图1 爱达荷中东部和蒙大拿西南部主要山前正断层略图
阴影地区为山区；各断层的分段性示于图3和4；
五星处为1983年Borach Peak地震震中

二、Borach Peak 地震期间 Lost River 断层的分段特性

1983年10月28日，Borach Peak 7.3级地震是总长为141km的Lost River断层上的部分地段发生破裂的结果，地表破裂带总长36km（图2）。地质、地震和大地测量资料表明，破裂主要限于长约22km的Thousand Springs段上（Crone等，1987），主要发生在分隔Mackay段与Thousand Springs段之间几何障碍内或附近，这两段的边界为山前的一个显著的凸出体，在这一凸出体附近，山麓走向在几公里的范围内改变了 55° 。地震破裂沿倾角 45° 、倾向西南的平面状断层向上和向北西方向单侧延伸到整个Thousand Springs段上（Crone等，1987），主体地表破裂局限在Thousand Springs段，地震所引起的构造落差最大达2.7—2.7m，单个断层崖高接近5m，地表破裂带宽达140m。

— 2 —

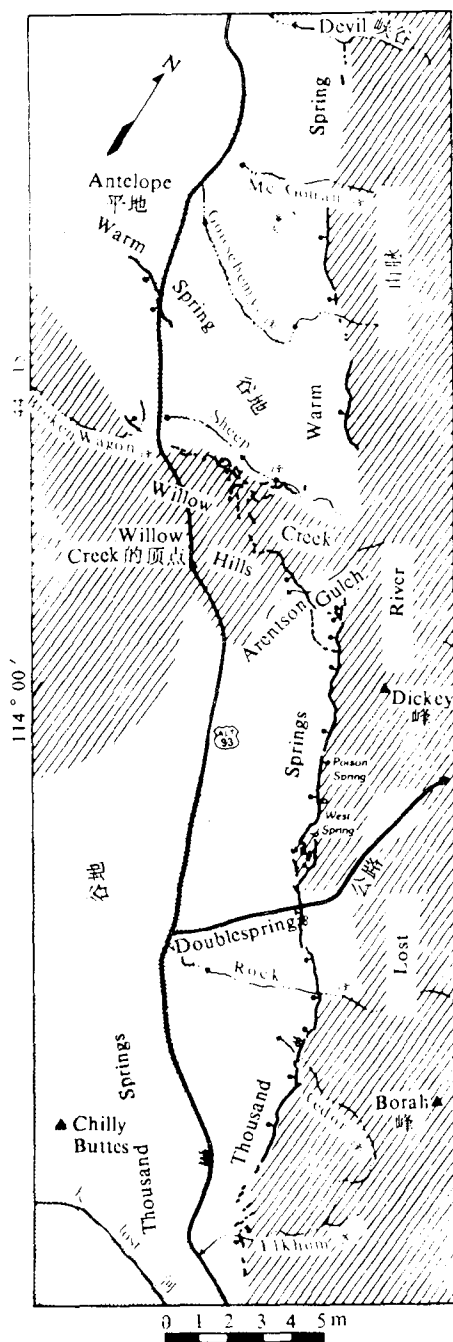


图2 与爱达荷州Borach Peak地震有关的地表破裂和断层崖分布概图
(据Crone等，1987)

在 Thousand Springs 段的北西端 Willow Creek 隆起与 Lost River 山脉交界处, 地震破裂遇到了障碍 (图 2), 这一障碍不是完全阻止了地震破裂, 而是使破裂偏离 Lost River 断层而转到障碍体内的断裂上; 在这一障碍的南端, 1983 年地震陡崖分为两支, 较小的一支沿 Lost River 断层延伸约 1—2km 后消失, 而由不连续的地表破裂所组成的西支则斜切穿过 Willow Creek 隆起至其北翼。1983 年的地表破裂在障碍体附近沿 Lost River 断层出现长 4.7km 的空缺, 在这一空缺北西侧, 沿 Warm Spring 段仅形成小的陡坎和裂缝。地质、地震和大地测量资料 (Crone 等, 1987, Boatnright, 1989; J.Nabelek, 1988) 都表明, Willow Creek 隆起障碍体有效地阻止了山前断层上的初期破裂, 强烈的振动和破裂的方向性诱发了障碍北西侧 Warm Spring 段上的次级滑动。

三、山前断层的分段性

在 Lost River、Lemhi 山岭和 Beaverhead 山脉西南翼、Tendoy 山脉北东翼高耸的断层崖可用来在这些山前正断层上进行段落的划分和第四纪晚期断裂作用历史的深入研究。Lost River、Lemhi 和 Beaverhead 等断层是以它们各自的山脊而命名的, Red Rock 断层是 Tendoy 山脉北东边界断层。沿这些断层的走向断层崖的大小、连续性和地形是有变化的, 我们利用这些变化把断层细分为若干段落。断层崖地形与断层崖和第四纪不同时期沉积物之间的地貌关系提供了估计各段落上最新运动的年代。

必须认识到, 利用多次事件形成的断层崖的地形资料来估算断层作用的年代还存在着许多致命的问题 (Crone 和 Omclahl, 1987), 因为从这些资料获得的年龄数据具有很大的不确定性, 所以在利用时要相当谨慎。因而, 考虑到这些局限性, 我们只是利用这些多次事件的断层崖的地形资料来作一般性地年代估算, 而重点是用于不同段上断层崖年代即断层作用年代的比较。

四、区域地质背景

爱达荷中东部山脉、盆地的地形和构造类型与盆地山脉省其它地区相类似 (Reynolds, 1979), 山岭由前寒武纪和古生代岩石组成, 它们在白垩纪至始新世时期向北东方向逆掩。其后的构造活动包括始新世时期北东走向的正断层的形成、始新世到渐新世的火山活动以及新生代晚期的区域性抬升、火山活动和控制现代地形的北西向正断层的发育。山岭和邻近盆地间的地形高差一般为 1.5km, 最大达 1.9km, 山前正断层的累积落差不太清楚, 但局部地区约 3—4km (Scott 等, 1985), 在 Lost River 断层上最大可达 6.1km (Skipp 和 Hait, 1977)。

1. Lost River 断层

Scott 等依据最新的地表断裂作用的年代估算、山岭的地形和构造落差等, 将长 141km 的 Lost River 断层划分为 6 段 (图 3), 以北西到南东各段落分别为 Chullis, Warm Spring, Thousand Springs, Mackay, Pass Creek 和 Arco 等 (Scott 等, 1985; Crone 等, 1987), 各段平均长 23km, 最短的 Warm Spring 长 18km, Pass Creek 段最长约 29km (表 1)。

表1 爱达荷中东部、蒙大拿西南部 Lost River, Lemhi, Beaverhead 和 Red Rock 等断层的分段性

段落名称	长度(km)	年代估计	段落名称	长度 (km)	年代估计
Lost River 断层			Lemhi 断层		
Challis	25	P?	May	23	LP
Warm Spring	28	MH	Patterson	23	MH
Thousand Springs	22	1983	Goldburg	12	LP
Mackay	22	MH	Sawmill Gulch	43	MH
Pass Creek	29	LP?	Fallert Spring	29	LP
Arco	25	LP	Howe	20	LP
	平均 23			平均 25	
Beaverhead 断层			Red 断层		
Lemhi	20	LP? / P	Timber Butte	11	LP
Mollie Gulch	20	LP	Sheep Creeks	16	MH
Leadore	23	MH			
Baldy Mountain	21	LP?			
Nicholia	42	LP			
Blue Dome	25	LP? / P			
	平均 25			平均 14	

年龄缩写: MH. 全新世中期; P. 更新世; LP. 晚更新世。

打问号者为不太确定者, 段落名称从北西向东南排列。

Arco 段上的断裂作用的研究表明, 最新的地表断裂作用发生在 30000a 以前 (Pierce, 1985), 切割较老沉积物, 经多次活动所形成的较高的断层崖错断了 160000a 老的沉积物约 19m (Pierce, 1985)。最长的 Pass Creek 段以缺失第四纪断层崖为特征, 山前最老的冲积物为晚更新世 (~15000a) (Pierce 和 Scott, 1982), 因而在过去的 15000a 中 Pass Creek 段上没有地表断裂作用, 最新的地表断裂作用可能在 30000—50000a 左右 (Scott 等, 1985)。

1983 年地震时, Thousand Springs 段发生过破裂, 尽管还很难确定早于 1983 年的地表破裂事件的确切年代, 但有迹象表明可能为全新世早中期 (Scott 等, 1985; Vincent, 1985; Hanks 和 Schwartz, 1987)。同时, 有资料表明, 1983 年地震以前的地表位移与 Borach Peak 地震相差不大 (Schwartz 和 Crone, 1985; Vincent, 1985)。

1983 年地震期间 Warm Spring 段上出现少量的地表断裂作用, 但正如已讨论过的那样, 它们可能是次级地表破裂。高约 5.7m 的 1983 年以前的断层崖分布于该段晚更新世晚期的冲积扇上 (Crone 等, 1987)。在该段上相距 7.5km 的两个探槽的 ^{14}C 年龄测定最年轻的地表断裂作用发生在 5500—6200a 前的较短的时间内。

对 Challis 段上断裂作用的历史知道得不多, 野外踏勘也没有获得晚第四纪活动的证据。Challis 段的山前地貌与相邻段落相比显示有相对下沉迹象, 具有一个低的长期滑动的速率。此外, 沿 Challis 段盆地和山岭的地貌形态表明, Lost River 断层发散成两支 (图 3), 下沉的山前地貌或许是由于滑动速率相对低的两支断层间位移的结果。

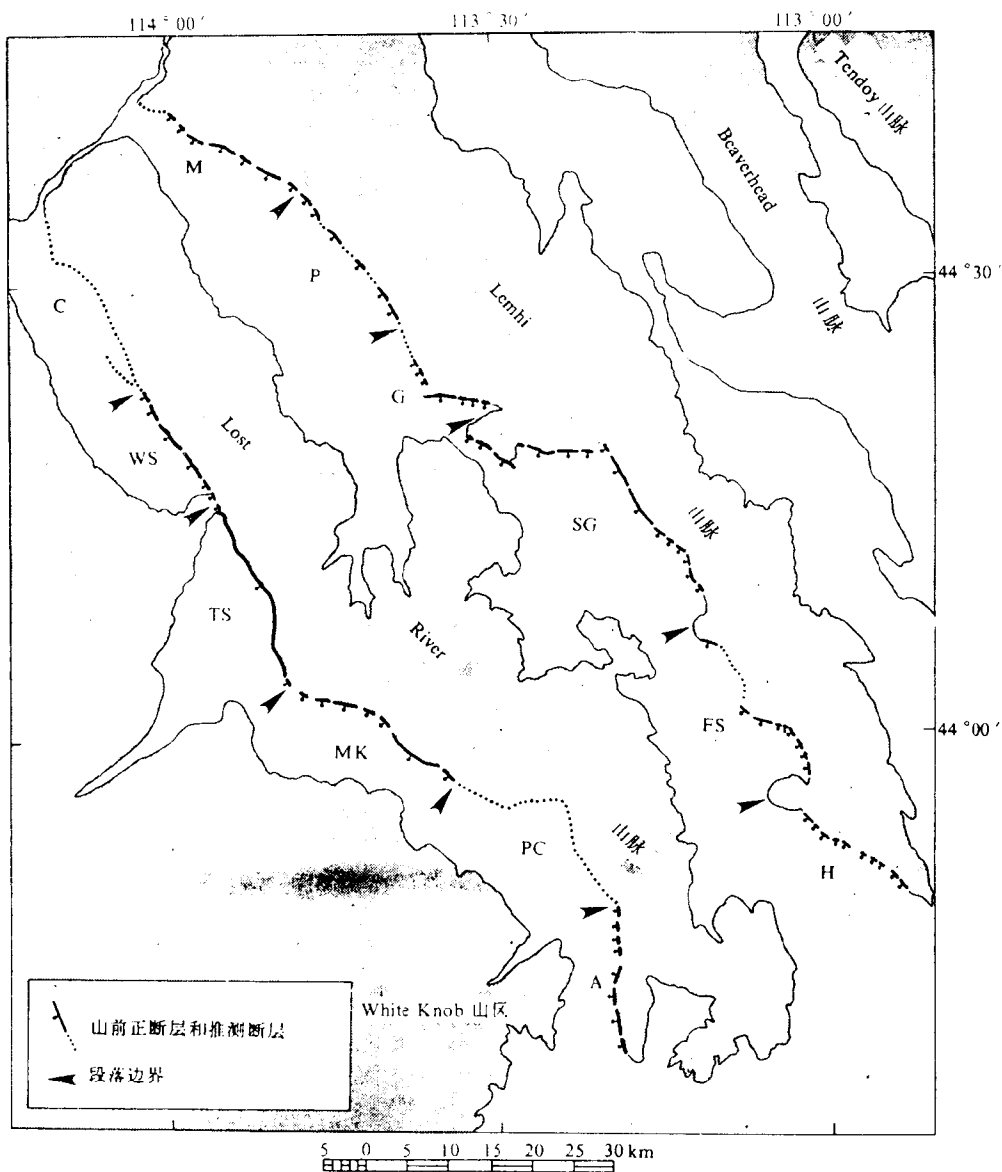


图 3 Lost River 和 Lemhi 等断层分段性概图

箭头为段落边界，Lost River 断层各段落名称为：

C. Challis; WS. Warm Spring; TS. Thousand Springs; MK. Mackey; PC. Pass Creek;

A. Arco. Lemhi 断层: M. May; P. Patterson; G. Goldburg; SG. Sawmill Gulch;

FS. Fallert Springs; H. Howe。有关各段落资料见表 1。

2. Lemhi 断层

Lemhi 断层长 150km，至少有 6 段组成 (Haller, 1988b)。从北西到南东各段分别

为: May、Patterson、Goldburg、Sawmill Gulch、Fallert Springs 和 Howe (图 3)。段落平均长 25km, 最短的 Goldburg 长 12km, 最长的 Sawmill Gulch 段长 43km (表 1)。由较老沉积物组成的高的断层崖表明, 第四纪晚期以来各段落上都有活动。

通过对 Howe 段上的探槽的研究, 揭示了在过去的 600000a 内至少有 5 次地表断裂作用事件, 最新的一次老于 15000a (Malde, 1987)。断层崖的高度-坡角关系与 Lost River 断层上的 Arco 段相似, 这意味着晚更新世以来它们的最新地表断裂作用年代相同。

Fallert Springs 段的断层崖的连续性和地形特征等表明, 最新的地表断裂作用为晚更新世。然而, 与 Howe 段的断层崖相比, 相同高度的断层崖具有较陡的地形坡角。可见, 该段上最新的断裂作用时代可能较 Howe 段要稍晚一点。

Sawmill Gulch 段是 Lemhi 断层最长的一段 (43km), 包含了一个山岭的转折部分。在这一段落上, 单一事件造成的断层崖发育在最新的 Pinedale 期的阶地上 (Pierce 和 Scott, 1982), 但断层崖的地形特征表明它们可能是全新世中期的产物。在更老阶地上, 较高的断层崖则反映了晚更新世的地表断裂作用。Pinedale 早期的阶地已经历了两次事件的错动, Bull Lake 期 (Pierce 和 Scott, 1982) 的沉积物已经历了 6 次断裂作用, 因为现存的断层崖比 Pinedale 早期阶地上的那些要高 3 倍。

Goldburg 段内断层崖易变的特性和方向表明, 有关该段的长度和边界还是可以确定的。这是断层上最短的一段, 含有一个山前凸出体。凸出体以南, 东西向的地形和多次事件形成的断层崖表明, 最年轻的地表断裂作用发生在 15000a 以前; 在凸出体附近, 最年轻的陡崖偏离山前, 并向坡下的洪积扇上延伸; 凸出体以北陡崖走向 NW-SE 向, 基本上发育在基岩内。在凸出体附近走向发生变化处的最年轻陡崖内, 存在着一个长不到 1km 的空缺; 然而, 断层崖的地形所反映的事件的年代应老于 30000a (Haller, 1988b)。

Patterson 段的所有 Pinedale 期 (晚更新世晚期) 阶地上, 都发育着许多单一事件的断层崖, 它们的地形形态表明, 最近的断裂作用事件发生在全新世中期。更长时期的断裂作用历史, 由于多次事件的断层崖几乎没有得到保存下来而难以估计。

在 May 段上的断层崖的地形形态与 Lost River 断层的 Arco 段很难区分。因此, 和 Howe 段一样, 我们推断上一次地表断裂作用为晚更新世。通过类比, 断裂作用的年代可能在 30000a 这一数量级左右。

3. Beaverhead 断层

Beaverhead 断层长 151km, 由 6 个段落组成, 但与 Lemhi 断层不同, 并不是所有段落落在第四纪沉积物中都保存有断层崖 (Haller, 1988b), 从北西到南东各段落分别为 Lemhi、Mollie Gulch、Leadore、Baldy Mountain、Nicholia 和 Blue Dome (图 4)。平均长 25km, Mollie Gulch 和 Lemhi 最短约 20km, Nicholia 段最长约 42km (表 1)。

沿 Blue Dome 段山前平缓的地势和低矮的地形表明, Beaverhead 断层上的这一段第四纪滑动速率相对于西北部的其它段落较低, 航片解释也表明断层可能分叉成多段, 断层两侧没有冲积物, 在断层崖最明显处的两侧都出露了古生代的灰岩, 第三纪落差相对断层的其它段落要小。

由第四纪沉积物构成的单个或多个事件的断层崖在整个 Nicholia 段上几乎呈连续分布。该段是 Beaverhead 断层上最长的一段, 包含了一个山前较大的弯曲。估计年龄约

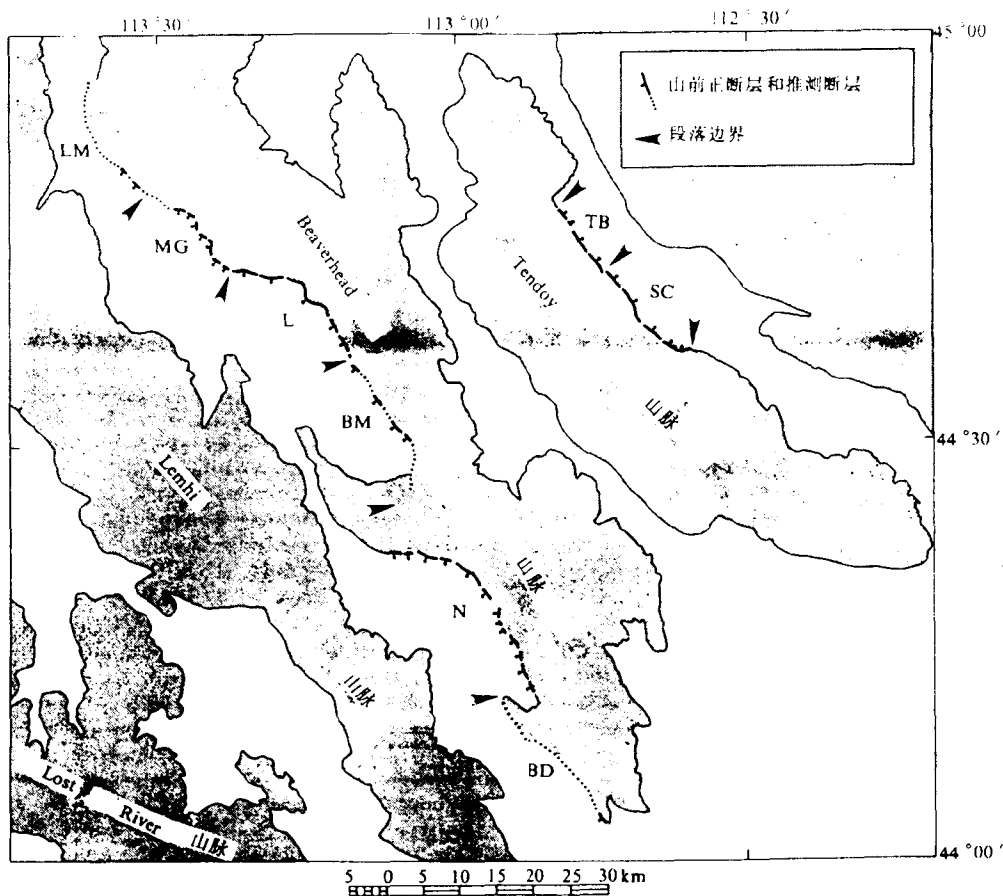


图4 Beaverhead 和 Red Rock 断层分段性概图

箭头为段落边界, Beaverhead 断层的各段落名称为: LM. Lemhi, MG. Mollie Gulch; L. Leadore;

BM. Baldy Mountain; N. Nicholia; BD. Blue Dome。Red Rock 断层各段名称为: TB. Timber

Butte; SC. Sheep Creeks。单个段落资料见表1。

15000a 的冲积物曾经历过一次断裂作用, 年龄约 30000a 的冲积物内陡崖较高, 它们是多次事件的产物。然而, 该段上许多单事件陡崖在地形上大约与 Arco 段上 30000a 的断崖相似, 因而地质对比表明 30000a 以来约有 2 次断裂作用事件, 相对较低的一级最年轻的断崖, 我们相信是在年龄为 15000a 的沉积物沉积不久便发生的断裂作用的产物。

Baldy Mountain 段在第四纪冲积物内无断崖存在, 这表明自 25000a 前的主要冲积期以来没有发生过地表断裂作用 (Pierce 和 Scott, 1982); 然而, 根据 Bull (1987) 准则, 山前地势晚第四纪存在着抬升, 亦即断裂作用在这一段上曾发生过。Baldy Mountain 段山前和山麓接合部位通常是平直的, 源于山区的横穿盆地的河流为“V”字型或“U”字型。根据这些地貌特征 (Bull, 1987, 图 1), 我们可以推断抬升即断裂作用发生的时间不大于 100000—150000a。

Leadore 段, 包含了一个明显地山前弯曲, 在整个段落上都发育有年轻的、连续的断崖。在过去的 25000a 里, Leadore 段曾破裂过 2 次, 根据对该段上单一断崖与 Lost River 断层 Mackay 段上的断崖的对比可知, 最新的一次断裂作用可能发生在全新世中期。

Mollie Gulch 段上的断崖保存得不太好, 且通常位于山前洪积坡上较高的地段, 断裂作用的年代很难确定。但在山前较陡的斜坡上 ($> 75^\circ$) 仍可辨认出断崖。由此推断, 最新的地表断裂作用可能发生在晚更新世。

Lemhi 段是 Beaverhead 断层上最北边的一段, 山前地势没有南部其它段落险峻。在 Lemhi 段山岭较高的部分与附近盆地之间有一个宽约 5km 的低缓的斜坡分隔带, 这通常表明该段上的构造抬升速率较小。冲积物上缺失断层崖的现象则反映出最新的地表断裂作用老于晚更新世晚期, 或者可能老于 100000a。

4. Red Rock 断层

Tendoy 山脉北东侧边界为 Red Rock 断层, 长约 60km (图 4)。北段 23km 和南段 10km 的山前第四纪地层没有被断层切割, 因而我们仅讨论冲积物内发生过断裂作用的中段。断层中段长约 27km, 根据其断层崖地貌的变化可进一步划分成两段 (图 5): 东南部长 16km 的 Sheep Creeks 段和北西部长 11km 的 Timber Butte 段 (Stickney 和 Bartholomew, 1987)。

多期事件断层崖发育在 Sheep Creeks 段的晚更新世阶地上, 这些断崖与不同时期第四纪沉积物的关系、断崖地貌资料以及 Bartholomew 和 Stickney (1987) 在该段南端附近开挖的探槽资料表明, 在过去的 10000—15000a 内有 2 次断裂作用, 最新的一次可能在全新世中期。

Timber Butte 段上最年轻的断崖较 Sheep Creeks 段上的要低一些, 它们的地形资料表明最新一次断裂作用事件为 15000a。多期事件断崖在该段上也存在, 但我们无法估计这些事件的年代。

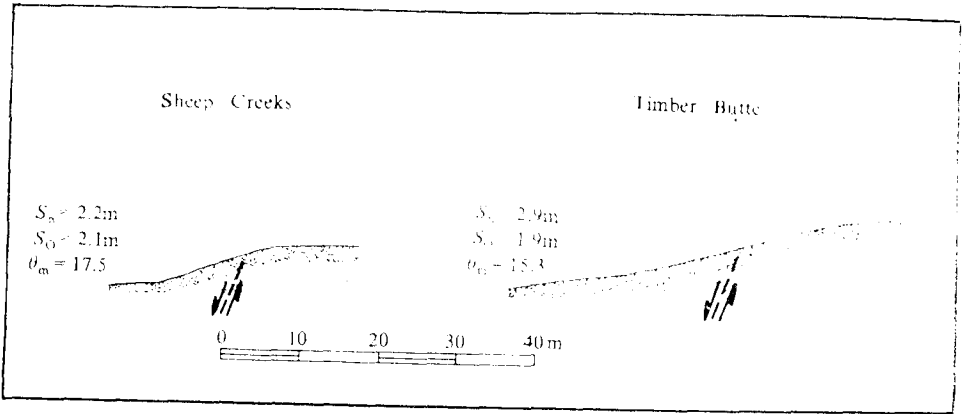


图 5 Red Rock 断层上 Sheep Creeks 段和 Timber Butte 段上单个事件断崖典型地形比较

S_h 是断层崖高; S_0 是地表位错; θ_m 为最大坡角。水平和垂直比例尺相同,

带有箭头的虚线为推测断层的位置, 断崖几乎是连续分布的。

总而言之,断层崖的大小、地势及其与不同时代的第四纪沉积物的关系等提供了将 Lost River、Lemhi、Beaverhead 和 Red Rock 等断层进一步划分为许多段的依据。通常,断层中部各段都发生过最新的地表断裂作用,并且有最清晰的晚第四纪晚期断裂作用的证据;相反,断层的两端以平缓的山前地貌和低缓的断层崖为特征,这些都是构造抬升速率相对较低的结果。

Lost River、Lemhi、Beaver head 和 Red Rock 等断层的各段落平均长度分别为 23km、25km、25km 和 14km,而犹他州和爱达荷州的 Wasatch (Machette 等, 1987)、East Cache (McCalpin, 1987) 和 Bear Lake (Crone, 1982) 等断层各段落平均长度分别为 30km、18km 和 18—21km。因此,如果同震破裂确实典型地限于某一段落上,且上面讨论过的各断层的段落长度都基本正确的话,那么和大地震有关的地表破裂的平均长度可能在 20—25km 的范围内。

地表破裂长度和震级的统计关系 (Bonilla 等, 1984) 表明,长 20—25km 的地表破裂与震级小于 7 的地震有关。这一地区的两个历史地震的震级都大于 7,但它们的地表破裂的长度都较统计线性关系所预测的长度要小。 $M_S=7.3$ 爱达荷州的 Borach Peak 地震产生了最长约 36km 的地表破裂,但初次破裂占有 22km 长 (Crone 等, 1987); $M_S=7.5$ 的蒙大拿 Hebgen 湖地震 (Doser, 1985) 却仅产生了约 26km 的地表破裂 (Bonilla 等, 1984)。由此可见,当考虑盆地山脉省北部地区的断层时,应用破裂长度和震级的这些统计关系应相当慎重。

五、段落边界的判别

从爱达荷、蒙大拿地区的研究中我们认识到,划分段落边界有 4 个地质特征:①明显的斜列或连续的断层崖的突然空缺;②沿断层走向不同时期断裂作用所形成的断层崖地形的明显而连续的变化;③山前大的凸出体;④反映断层上累积升降幅度局部减少的横向基岩脊。根据单一的特征,并不能准确地划分段落边界。但我们相信,在空间上,几个特征综合在一起,则在构造上是段落边界的一个很好的证据。当我们应用这些特征时,首先应注意到一个比例因素,例如,在一个段落内几十米、甚至几百米的空缺或斜列是常见的,同样,小的弯曲和凸出体在段落内部也是常有的,只有当斜列、空缺和凸出体的范围达到公里的数量级时,我们才把它作为段落边界的标志。

1. 断崖中的斜列或空缺

在连续的断层崖中,大的斜列和空缺是段落边界的有效标志,尤其是断层崖在空缺或斜列的一侧偏离山前的地方时 (图 6)。断层崖中的斜列或空缺明显地与构造原因有关,因而能反映断层沿走向的不连续性或几何形态不规则性。断层的这种不连续性或几何不规则性对断层破裂的扩展起阻止作用 (Sibson, 1987)。很明显,断层运动后期的侵蚀作用或沉积作用所造成的空缺是地表作用的结果,而地表作用与断层的几何学没关系。

在我们所研究的断层中有几个是空缺和斜列作为段落边界的。在 Lost River 断层上,晚更新世断层崖中 1.4km 的空缺和 1983 年断层崖中 4.7km 的空缺分隔了 Warm Spring 和 Thousand Springs 两段;沿山前长 3—4km 的空缺也分隔了 Thousand Springs 和 Mackney 两段;在 Lost River 断层上没有斜列作边界。在 Lemhi 断层上,一个 2.5km

长的空缺分隔了 Fallert Springs 和 Howe 两段，斜列限制了 Goldburg 段的两端，在 Goldburg 段的西北端与 Patterson 段斜错 1.4km，在东南端与 Sawmill Gulch 段斜错了 3.8km。在 Beaverhead 断层上，一个长 6km 的空缺分隔了 Baldy Mountain 和 Nicholia 两段；宽 5.5km 的斜列分隔了 Nicholia 和 Blue Dome 两段（图 6）。

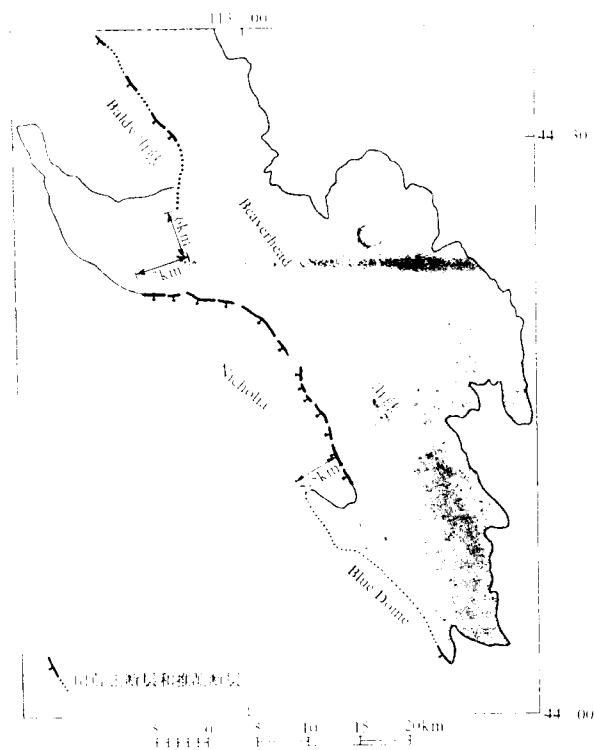


图 6 爱达荷中东部 Beaverhead 断层部分断层崖草图

图上表示了 Baldy Mountain 和 Nicholia 两段的空缺，以及 Nicholia 和 Blue Dome 两段之间的斜列

2. 断层崖形态的持久性变化

断崖形态在走向发生显著的、持久的变化，通常反映断层相邻各部分的地表断裂作用的年代是很不相同的。断层崖形态为广泛地对断崖年代分类提供一种简单而有效的办法，从而可以识别出具有不同破裂历史的断层的各个段落。Red Rock 断层上的几个段落的边界（包括 Timber Butte、Sheep Creeks 两段的边界）与陡崖形态的显著变化相对应（图 5）。

3. 大的凸出体

Borah Peak 地震和 Wasatch 断层带的研究表明，段落的边界通常和山前大的凸出体相符合，Borah Peak 地震发生在山前走向发生 55° 变化的凸出体边界附近（Crone 等，1987）；Wasatch 断层带上判别出了 4 个大的凸出体持久性边界，它们可能控制着未来的同震破裂（Machette 等，1987，Wheeler 和 Krystinik，1987）；在 Beaverhead 断层上，Leadore 和 Mollie Gulch 两段间的边界对应于山前大的凸出体（图 4）。

4. 横向基岩脊

一些段落的边界是由横向基岩脊来构成的，它们可以暴露在地表或隐伏在地下。在基岩脊区，断层两侧的累积落差远远小于相邻段落，很小的落差是它们长期存在的标志，可能持续了许多个地震过程（Wheeler 和 Krystinik, 1987）。

横向基岩脊在 Thousand Springs 段的西北端形成了一个障碍，它阻止了 Borah Peak 地震的主要破裂，这一基岩脊在地貌上表现为 Willow Creek 山脊，即一组在 Lost River 山岭西南翼的谷地内的山脊（图 2）；在 Lemhi 山岭和 Beaverhead 山脉西南翼的谷地内山脊，可认为是横向脊，它们构成了 Goldburg 和 Sawmill Gulch 两段的边界（Lemhi 断层）（图 3）以及 Baldy Mountain 和 Nicholia 两段的边界（Beaverhead 断层）（图 4）。

一些横向基岩脊在地表没有出露，但能从重力、航磁或地震反射资料中判别出来，重力资料对判别埋藏在盆地沉积物下的横向基岩脊十分有益。通常由于断层两侧落差小，横向基岩脊上的沉积物很薄，因而埋藏的横向基岩脊应表现为重力鞍。

我们发现在邻近的盆地内重力鞍部和段落边界位置之间大多数有很好的相关性（图 7）。对于许多段落，尤其是 Lemhi 断层上，封闭的重力低对应于落差最大的段落，因而盆地内的充填物也最厚。尽管不是所有的重力鞍部与地表地质资料所判别的边界相对应，但布格重力和地表地质的综合分析为正断层段落边界的识别提供了较好的基础。

六、分段性和地震灾害评估

准确的地震灾害评估依赖于断层带段落的划分和单一段落边界对阻止破裂扩展的可靠程度的估计。能完全终止破裂的段落边界在地震期间表现出一定的独立性。在古地震学研究中，一个重要目的应该是估计经受几个地震过程的不同类型的段落边界的行为特征，这一目的可以通过对邻近段落上连续事件的时代确定来实现。如果相邻段落有不同的地表作用历史，并且它们之间的边界在过去一直在阻止破裂的扩展，那么，它们在未来可能仍会这样。

我们简要描述了上述段落边界的特征，而这一研究中所判别的段落边界实际上仅是断层上的一小部分（称障碍），它们能不断地阻碍破裂作用，与相邻部分相比，它们不常遭到破坏（或者经常破坏但每次的落差很小）。这些障碍段过去的行为特征大概是它们未来特性的合理的指示。然而，在它们的演化历史过程中，有时所有的边界都终究要被破坏，不然的话，山麓地带就不会发展成为连续的地形差异。因此，在断层的整个历史中，实际上这些段落边界最终将不复存在。

在我们对段落边界特征进行简单化的描述中，需要强调的是，一些边界最好描述为开放型（Leaky）边界，在这种情况下，边界严格地妨碍着破裂的扩展，但并不完全有效地阻止相邻段落上的位移。Thousand Springs 段西北端边界在 Borah Peak 地震期间就显示出这种类型的特征；在 Willow Creek 山脊障碍处，主要破裂偏离 Lost River 断层，但有足够的能量通过障碍释放掉，并诱发 Warm Spring 段上的地表次断裂作用。这种开放型可能与断层相邻段落的应变量和破裂扩展方向有函数关系。