

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

研究
进展

海原活动断裂带破裂行为特征研究

闵伟 张培震 邓起东 毛凤英

中国地震局地质研究所, 北京, 100029

内容提要 通过对海原断裂带18个探槽资料的研究, 分析得出海原断裂带10 ka 以来共发生 10 次古地震事件, 这些古地震事件具有分级破裂的特征, 第一次和最后一次是沿全断裂的破裂事件, 其他都是沿次级段落的破裂事件。在时间上, 古地震事件的分布是不均匀的, 具有丛集的特征; 在空间上, 具有西段或中东段(中段)来回迁移的特征。沿全断裂的破裂事件震级约8.5级左右, 沿次级断裂的破裂事件震级约7.5级左右。

关键词 断裂 古地震 丛集

海原断裂带作为青藏高原东北缘一条重要的断裂带, 自80年代初以来, 对其古地震及强震重复间隔的研究就不断开展起来(宋方敏等, 1983; 程绍平, 1984; 张维歧等, 1984; 刘百篪等, 1985; 国家地震局地质研究所等, 1990; 冉勇康等, 1997)。由于早期受测年方法的限制以及探槽数量少等因素的影响, 使许多探槽揭露出的古地震事件没有年龄控制, 有些只有事件发生年龄的上限或下限, 使古地震期次具有很大的不确定性(国家地震局地质研究所等, 1990)。三维探槽能大大提高判别同一地点古地震期次的精度, 但海原断裂带上只有高湾子一个三维探槽(冉勇康等, 1997), 不能反映海原断裂带的分级破裂特征。震级、地表破裂长度和位错量中的任意两者之间确实存在一定的线性关系(Slemmons, 1977; 陈达生, 1984; 邓起东等, 1992; Donald et al., 1994)。由破裂分段的原则可知(丁国瑜, 1992), 破裂带的长度是相对稳定的, 因此, 通过在断裂带不同部位开挖系列探槽不仅可以提高确定古地震事件的精度, 而且可以根据揭露同一事件的探槽位置确定事件的破裂范围, 以研究断裂带的分级破裂特征及古地震强度。因此, 有必要在新思路和方法的指导下, 对海原活动断裂带古地震进行更精细的研究。通过本次研究, 第一次实现了对所确定的古地震事件具有明确的时间上限和下限, 而不同于以往古地震研究中, 许多事件只有上限年龄或只有下限年龄(国家地震局地质研究所等, 1990; 冉勇康等, 1997), 大大

减小了古地震研究中的不确定性。

1 断裂带活动特征简介

断裂带西起甘肃景泰, 经宁夏海原, 东至固原, 宽1~3 km, 长240 km, 由11条次级剪切断层组成(图1)。断裂走向在海原以西为 $280^{\circ}\sim 290^{\circ}$, 海原以东为 320° 。组成断裂带的11条次级剪切断层的规模和活动情况差别很大。规模大的断层活动强烈, 位移量也大。在规模大的断层之间是规模小、累积位移量也小的断层。这种大小强弱的间隔在活动性方面把11条次级剪切断裂组合成了3个相互关联、又相对独立的部分或段落, 它们是黄家洼山南麓断层以西的西段, 南西华山断裂组成的中段和以南的东段。

海原活动断裂带规模巨大, 活动历史悠久, 破碎带宽达几百米, 早更新世中晚期以来, 具有强烈的左旋走滑活动特征, 在次级断层的活动岩桥区, 分别形成拉分盆地和推挤构造。1920年发生了一次沿整个断裂带破裂的8.5级地震, 该次地震形成的最大水平位移达10~11 m(国家地震局地质研究所等, 1990)。

2 海原断裂带古地震研究

探槽布置的原则是尽可能在每一条次级断层上都有分布, 特别是以前没有研究过的东段以及长度大于30 km 的其他主要次级断层上。本次工作沿海原断裂带共开挖19个探槽(图1)。由于在古地震识

注: 本文为国家自然科学基金杰出青年基金(编号 49825104)和地震科学联合基金(编号 9507421)项目资助的成果。

收稿日期: 2000-02-01; 改回日期: 2000-09-04; 责任编辑: 任希飞。

作者简介: 闵伟, 男, 1964年生。1985年毕业于中山大学地质系, 1988年和1998年分别获国家地震局地质研究所硕士学位和博士学位。现为中国地震局地质研究所副研究员, 一直从事活动构造及应用研究。电话: (010)62009125; E-mail: minww. 263.net.cn。

别、年龄样等方面原因,只在10个探槽进行了古地震事件分析和断代。下面重点介绍其中的3个探槽。

2.1 小山东探槽

位于海原断裂带中段小山东约2 km 的一个小

冲洪积扇上,1920年地震地表破裂带通过此处,在地表形成高约2 m 的断层陡坎,探槽垂直此陡坎开挖。探槽剖面如图2所示。

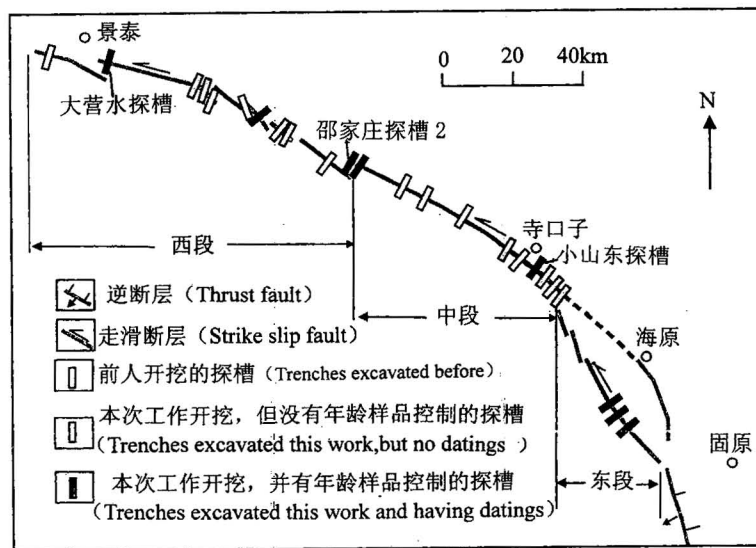


图 1 海原断裂带探槽分布图

Fig. 1 The distribution map of trenches along Haiyuan fault

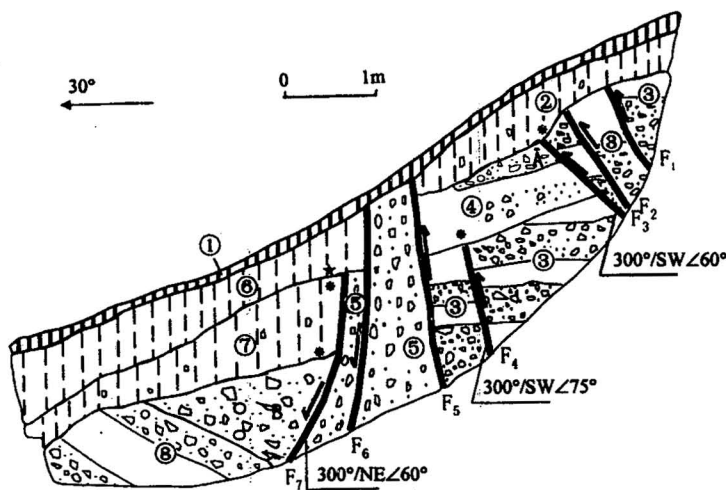


图 2 小山东探槽剖面

Fig. 2 Trench log on a small alluvial fan of east Xiaoshan

①—黑色腐植土;②—棕黄色粉砂土;③—具有白色钙膜的中小砾石层夹黄色粉砂土;④—灰白色粉砂土含少量小砾石;⑤—砾石与黄土混杂堆积,具有平行断面的层理;⑥—黑色腐植土,夹个别小砾石;⑦—棕红色粉砂土;⑧—具有白色钙膜的砾石层与黄色和黑色粉砂土互层;A和B—崩积楔,具有白色钙膜的中小砾石与白色粉砂土混杂堆积; * —热释光取样点;★— ^{14}C 取样点

①—Black humus soil; ②—brown fine silt; ③—pebble layers with white calcium velum containing yellowish silt and sand; ④—gray and white silty soil with pebbles; ⑤—pebbles mixed with reworked loess with beddings parallel to fault plane; ⑥—black humus soil with several pebbles; ⑦—brown and reddish silty soil; ⑧—pebble layers with white calcium velum interbedded with black silty soil; A and B—colluvial wedges, pebbles mixed with white silty soil; * —thermoluminescence sampling site; ★— ^{14}C sampling site

从探槽东壁可以分析出5次古地震事件。第一次沿断层 F_4 活动,错断层③,随后堆积了层④,覆盖了早先活动的断层。第二次事件为断层 F_1 、 F_2 、 F_3 发生逆冲活动,错断了层④并沿断层 F_3 下盘形成一崩积楔A,随后被层②覆盖,此为第二次事件。第三次事件沿断层 F_7 发生正断活动,上盘地层⑧发生顺时针旋转,并形成崩积楔B,随后堆积了层⑦。第四次事件也沿断层 F_7 活动,错断层⑦,断层 F_7 被后来沉积的层⑥覆盖。第五次事件即1920年地震,沿断层 F_5 和 F_6 活动,错断层⑥、②等到达地表。

为确定各次古地震事件的时代,分别在层④底部、层②底部、层⑦底部、顶部分别采集热释光年代样品,在层⑥底部采集 ^{14}C 样品,经测试,其年龄分别为 6290 ± 360 a BP、 5480 ± 430 a BP、 4440 ± 360 a BP、 3520 ± 280 a BP 和 1460 ± 70 a BP。因此,第一次古地震事件发生于 6290 ± 360 a BP 以前,第二次古地震发生于 5480 ± 430 a BP 以前,第三次古地震发生于 4440 ± 360 a BP 以前,第四次古地震发生于 $3520 \pm 280 \sim 1460 \pm 70$ a BP 之间,第五次即1920年地震。

2.2 邵家庄探槽2

位于干盐池邵家庄西约500 m一冲沟的Ⅱ级阶地上,阶地高约5 m,沿阶地的东壁劈开一古地震剖面,如图3。

如图3所示, F_1 的下盘为灰绿色前寒武系基岩破碎带,它们全都被厚2 m 多的阶地堆积砾石层覆盖;上盘为第四系阶地堆积物,发育多条断层,分别错断了不同的层位,由它们可以分析出4次古地震事件。第一次事件沿断层 F_2 、 F_3 活动,错断层④,被层③覆

盖。在断层 F_2 上覆黄土的底部取一热释光样,经测试年龄为 8050 ± 630 a BP,因此,第一次事件发生于 8050 ± 630 a BP 以前。第二次事件沿断层 F_4 、 F_5 、 F_6 和 F_7 发生,错断层⑤和层③,断层 F_5 、 F_6 形成一小地堑,后期可能遭受侵蚀,在断层两盘没有留下相对位错。在层③黄土层的顶部取一热释光样,经测定其年龄为 7530 ± 590 a BP,因此第二次事件发生于 7530 ± 590 a BP 以后。第三次事件沿断层 F_3 和 F_7 发生,形成一个较大的地堑,但垂直位错的幅度不大,从层③的相对位错来看,只有30 cm 左右,断层向上错断了部分阶地堆积砾石层,在未被错断的阶地堆积砾石层的底部取一热释光样,经测定其年龄为 3630 ± 290 a BP,因此,第三次事件发生于 3630 ± 290 a BP 以前。第四次事件即1920年地震,主要沿断层 F_1 、 F_8 、 F_9 、 F_{10} 活动,在断层上盘形成构造楔A和B,断层通天,在地表形成高约80 cm 具有自由面的断层陡坎。

2.3 大营水探槽剖面

位于大营水盆地内部高枣坪张剪切断层上,断层在地表主要表现为断层陡坎,最高可达10 m,探槽即垂直此陡坎开挖,探槽西壁剖面如图4所示。

该剖面共揭露出3条断层,可以分析出4次古地震事件。第一次事件沿断层 F_1 和 F_2 活动,形成一小地堑,错断层④,随后被层③覆盖。在层③底部取一热释光样,其年龄为 6350 ± 530 a BP。第二次事件沿断层 F_3 活动,错断层③,被层②覆盖,在断层 F_3 顶部覆盖层②的底部取一热释光样品,其年龄为 27450 ± 220 a BP。第三次事件主要沿 F_1 活动,形成崩积楔A,黄色粉砂土与砾石混杂堆积,在其上的

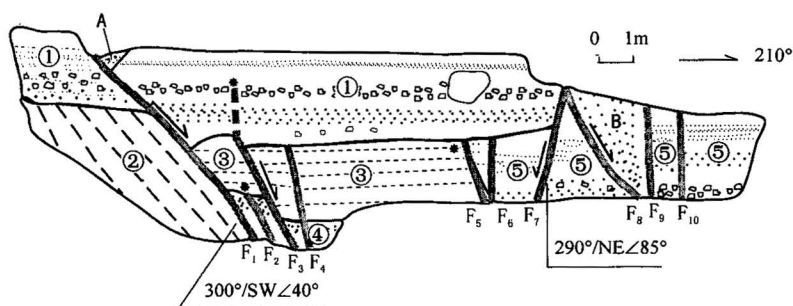


图3 邵家庄探槽2东壁剖面

Fig. 3 The east wall log of Shaojiazhuang trench 2

- ①—阶地堆积灰绿色砾石层; ②—断裂破碎带,发育平行断面的劈理; ③—黄色粉砂土; ④—灰绿色中细粒砾石层夹砂土层;
⑤—细粒灰绿色砾石层与黄色粉砂土互层; A和B—崩积楔,黄土与中小砾石层混杂堆积; *—热释光样品取样点
①—Gray and green pebble layers; ②—fault fractured zone; ③—yellowish silty soil; ④—gray and green pebble layers containing
silt and sand; ⑤—gray and green pebble layers interbedded with yellowish silty soil; A and B—colluvial wedges,
reworked loess mixed with pebbles; *—thermoluminescence sampling site

层①底部取一年龄样品,其热释光年龄为 20060 ± 1580 a BP。第四次事件即1920年地震,也沿 F_1 活动,错断崩积楔,直达地表。

这些年龄样的结果新老关系明显倒置,另外根据沿整个海原断裂带多个探槽的古地震年代值可知, 27450 ± 220 a 和 20060 ± 1580 a 明显偏老,所以在古地震定年中没有使用这两个结果。因此该剖面有年龄控制的古地震事件只有一次,即发生于 6350 ± 530 a BP 之前。

3 古地震事件的确定

通过本次研究及结合前人的研究结果,在海原活动断裂带上已经有古地震年龄断代的探槽18个和大量的年龄数据(表1)。但这些年龄数据分布很不均匀,

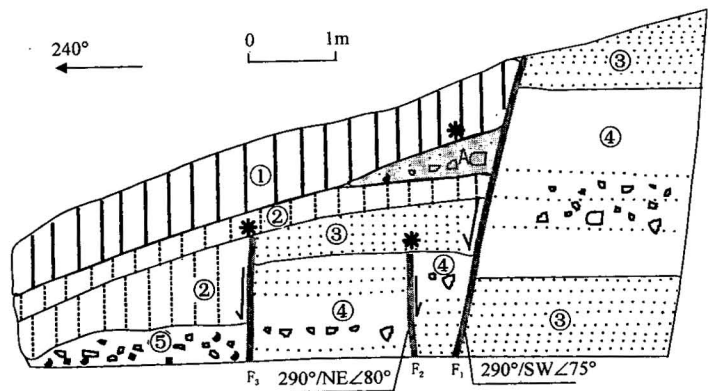


图4 大营水盆地北侧边界断层探槽剖面

Fig. 4 The west wall log of Dayinshui trench

- ①—黄土; ②—黄色粉砂土; ③—细砂; ④—砾石层与粉砂土互层;
⑤—砾石层; *—热释光取样点; A—崩积楔
①—Loess; ②—yellowish silty soil; ③—fine sand; ④—pebble layers interbedded with silty soil; ⑤—pebble layers;
*—thermoluminescence sampling site; A—colluvial wedge

表1 海原活动断裂带探槽及年龄数据一览表

Table 1 The trenches and dates of paleoearthquake samples on Haiyuan fault zone

探槽名称	古地震次数	样品编号	样品年龄值(a)	测年方法	资料来源	探槽名称	古地震次数	样品编号	样品年龄值(a)	测年方法	资料来源	
八只窑	4	BzhyTL②	7440±580	热释光	[1]	哨马饮	3	sh1	6365±285	¹⁴ C	[2]	
		Bzhyc14①	1260±60	¹⁴ C				sh2	6100±450	¹⁴ C		
		Bzhyc14②	590±60	¹⁴ C		邵水	4	1	14720±190	¹⁴ C		
上大寨	3	Shdjcl4①	7670±150	¹⁴ C				2	12170±200	¹⁴ C		
黄蒿湾	3	HHWc14①	11500±110	¹⁴ C				3	7876±115	¹⁴ C		
		HHWTL①	5640±450	热释光				4	4985±165	¹⁴ C		
小山东	5	XshTL①	6290±510	热释光		荒凉滩	5	h1	12510±400	¹⁴ C		
		XshTL②	5480±430	热释光				h2	9370±120	¹⁴ C		
		XshTL③	4440±360	热释光				h3	8325±105	¹⁴ C		
		XshTL④	3520±280	热释光				h4	6145±155	¹⁴ C		
		Xshc14①	1460±70	¹⁴ C		三塘	3	s1	7125±100	¹⁴ C		
邵家庄 Tc-1	4	WshTc-1 TL①	5410±430	热释光				s2	4140±90	¹⁴ C		
		WshTc-1 TL②	4370±350	热释光		高湾子 三维探槽	7	T8ED	13220±1060	热释光	[3]	
		EshTc-1 TL②	2900±230	热释光				T7WF1	6910±550	热释光		
		EshTc-1 TL①	2630±210	热释光				T7WFC1	7070±100	¹⁴ C		
邵家庄2	4	shTc-2 TL①	8050±630	热释光				T7WFC4	6804±110	¹⁴ C		
		shTc-2 TL②	7530±590	热释光				T7WFC3	6450±200	¹⁴ C		
		shTc-2 TL③	3630±290	热释光				T5EGC4	6010±70	¹⁴ C		
大营水	4	DyshTL②	6350±530	热释光				T7WGC3	6445±180	¹⁴ C		
沈家庄	3	ShjzhTL①	7640±620	热释光				T5EGC2	5255±110	¹⁴ C		
		ShjzhTL②	3590±290	热释光				T5EG1	6360±500	热释光		
刺儿沟	3	1	2835±120	¹⁴ C				[2]	T10EIC6	6405±185		¹⁴ C
		2	1945±65	¹⁴ C					T7WI1	4920±390		热释光
		3-1	1125±75	¹⁴ C					T10EIC3	5130±115		¹⁴ C
		3-2	1040±70	¹⁴ C					T7WHC1	3800±155		¹⁴ C
		3-3	1005±60	¹⁴ C					T6WK1	3290±260		热释光 ¹⁴ C
菜园	3	c1	2710±235	¹⁴ C	T5EKC2				2500±70	¹⁴ C		
		c2	1500±175	¹⁴ C	T3WK3				1470±120	热释光		
大沟门	4	d1	1805±90	¹⁴ C	T3WMC1				540±65	¹⁴ C		

注:[1]本次工作; [2]据国家地震局地质研究所等,1990; [3]据冉勇康等,1997。

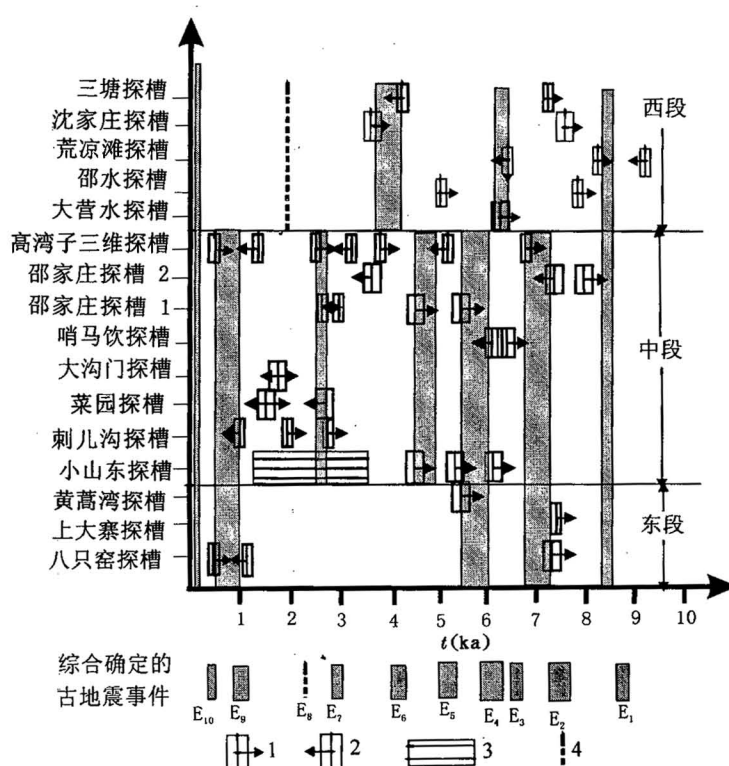


图 5 海原断裂带古地震时空分布图

Fig. 5 The paleoseismic distribution diagram along Haiyuan faults

1—古地震年龄上限及误差; 2—古地震年龄下限及误差; 3—古地震年龄区间; 4—推测古地震事件

1—Upper limit and error of paleoseismic age; 2—lower limit and error of paleoseismic age;

3—paleoseismic age area; 4—guessing paleoseismic event

表 2 探槽揭露的海原断裂带古地震目录

Table 2 Catalogue of paleoseismic events along Haiyuan fault

编号	破裂段落	事件窗控制年代 (a BP)	估计发生年代 (a BP)	距上次事件的间隔 (a)
E ₁	全断裂	8325±105~9370±120	8534±80	
E ₂	中东段	6808±288~7530±328	6952±328	1582±338
E ₃	西段	6145±155~6350±530	6252±276	700±429
E ₄	中东段	5640±450~6100±450	5870±318	382±421
E ₅	中段	4440±360~5025±105	4560±187	1310±369
E ₆	西段	3590±290~4140±90	3865±152	695±241
E ₇	中段	2630±210~2710±235	2670±158	1195±219
E ₈	西段	—	—	?
E ₉	中东段	590±60~1260±90	922±54	?
E ₁₀	全断裂	1920年地震	1920年地震	900±54

注:表中“—”为没有年龄样控制的古地震事件。

10 ka 以来的数据比较多,沿整个断裂带分布均匀; 10 ka 以前的数据比较少,而且主要分布于断裂带的西段。为了尽量减少古地震揭露不完整的影响,本文只讨论数据较多的 10 ka 以来海原断裂带的古地震活动特征。

在目前比较多年龄样品的情况下,就有可能运用古地震逐次限定法(毛凤英等,1995)较准确地确定古地震的发生年代。根据所有探槽和古地震事件

的年龄做出古地震时空分布图(图5),运用逐次限定法确定了海原断裂带 10 ka 以来 10 次破裂不同段落的古地震事件及时间窗如表 2。

4 古地震活动特征

4.1 古地震时间分布特征

图 6 是古地震时间分布图,每个事件由古地震时间窗构成,而不是估计的大致发震时间,这样可能更

能反映古地震活动的实际特征。尽管最终确定的每个古地震的时间窗大小不一致,但还是可以看出这10次古地震活动在时间上是不均匀的,具有丛集的特征。

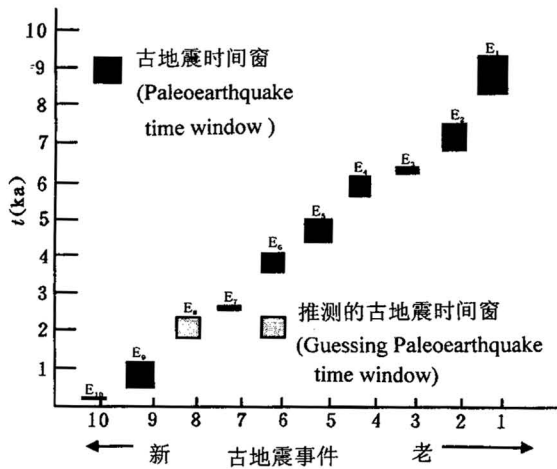


图6 海原断裂带古地震时间分布图

Fig. 6 Distribution of paleoearthquakes in time

4.2 古地震震级分布特征

确定古地震的震级一般是将探槽揭露的古位移与已知历史强震的最大位移比较或根据震级与最大位移的关系求得。系列探槽的开挖可以确定古地震的破裂范围,利用震级与破裂长度的关系,确定古地震震级。青藏地区走滑断裂震级(M)与破裂长度(L)之间的关系为(邓起东等,1992):

$$M = 5.92 + 0.88 \lg L$$

据此可以确定海原断裂带沿全断裂破裂的古地震震级约为8.5级左右,沿部分段落破裂的古地震震级约为7.5级左右。

4.3 古地震空间分布特征

海原断裂带10 ka 以来的古地震事件并不是一个级别或沿同一断裂段重复发生,而是有分级破裂特征,第一次和最后一次分别沿整个断裂带破裂,其他事件分别沿次级段落破裂。图7为10 ka 以来海原断裂带的破裂历史,古地震的迁移方向为(由老到新):全断裂→东段→西段→东段→东段→西段→东段→西段→东段→全断裂,破裂次级断裂的事件总体上具有在东段和西段之间来回迁移的规律。

5 结论

(1)通过对18个探槽的研究,确定了海原断裂带10 ka 以来的10次古地震事件。

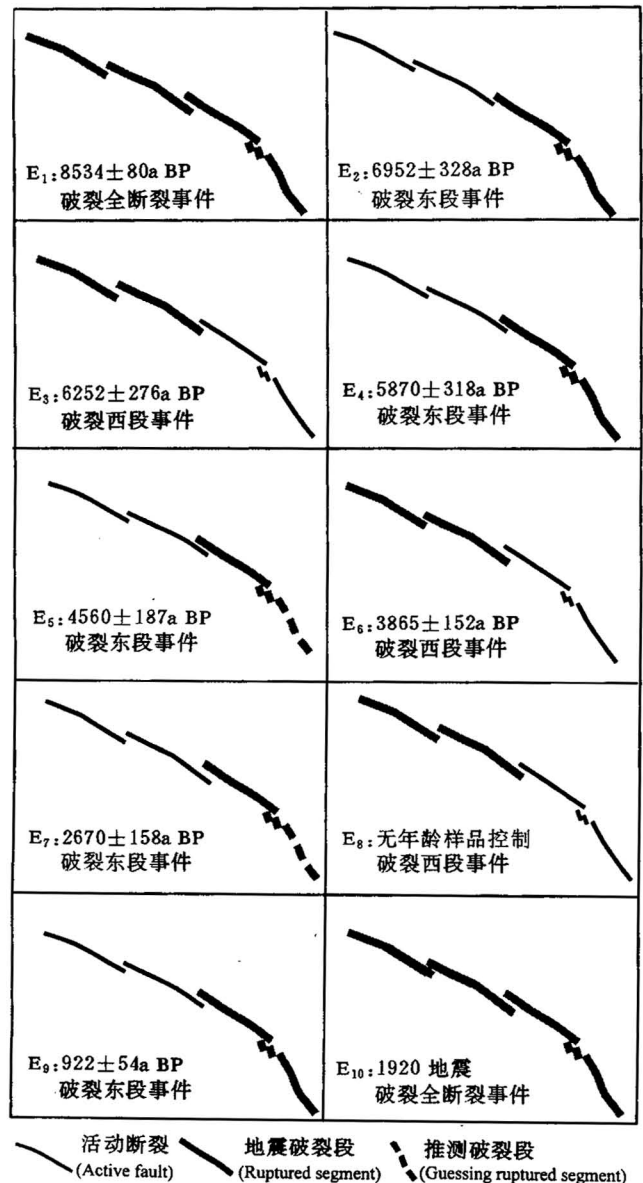


图7 10 ka 以来海原断裂带破裂历史图

Fig. 7 The rupture history of Haiyuan fault since ten thousand years

(2)这10次古地震事件具有分级破裂的特征,第一次和最后一次是沿全断裂的破裂事件,其他都是沿次级断裂的破裂事件。

(3)沿全断裂的破裂事件震级约8.5级左右,沿次级断裂的破裂事件震级约7.5级左右。

(4)在时间上,古地震事件的分布是不均匀的,具有丛集的特征;在空间上,具有西段或中东段(中段)来回迁移的特征。

参考文献

陈达生. 1984. 地震引起的地表破裂长度与震级之间的经验关系. 华

- 北地震科学, 2(2):26~32.
- 程绍平, 彭贵, 李洪春. 1984. 宁夏海原南华山北麓断裂带的冲沟断错与8.6级强震重复率. 地震地质, 6(4):25~37.
- 邓起东, 于贵华, 叶文华. 1992. 地震地表破裂参数与震级关系的研究. 见: 国家地震局地质研究所编. 活动断裂研究(2). 北京: 地震出版社, 247~264.
- 丁国瑜. 1992. 有关活断层分段的一些问题. 中国地震, 8(2):1~10.
- 国家地震局地质研究所, 宁夏地震局. 1990. 海原活动断裂带. 北京: 地震出版社, 234~255.
- 刘百箴, 周俊喜. 1985. 海原活断层上的史前大地震. 地震地质, 7(4):11~21.
- 毛凤英, 张培震. 1995. 古地震研究中的逐次限定法与新疆北部主要断裂带的古地震研究. 见: 国家地震局地质研究所编. 活动断裂研究(4). 北京: 地震出版社, 153~164.
- 冉勇康, 段瑞涛, 邓起东, 焦德成, 闵伟. 1997. 海原断裂高湾子地点三维探槽的开挖与古地震研究. 地震地质, 19(2):97~107.
- 宋方敏, 朱世龙, 汪一鹏, 邓起东, 张维歧. 1983. 1920年海原地震中的最大水平位移及西华山北缘断裂地震重复率估计. 地震地质, 5(4):29~38.
- 张维歧, 焦德成. 1984. 海原古地震的一个剖面. 地震地质, 6(3):14.
- earthquake magnitude and parameters of surface ruptures associated with historical earthquakes. in: Institute of Geology, China Seismological Bureau. ed. Research on Active fault, 2, Beijing: Seismological Press, 247~264.
- Donald L W, Kevin J C. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974~1002.
- Institute of Geology, State Seismological Bureau, Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Province. 1990. Haiyuan active fault. Beijing: Seismological Press.
- Lui Baichi, Zhou Junxi. 1985. The prehistoric major earthquakes for Haiyuan active fault. Seismology and Geology, 7(4):11~21.
- Mao Fengying, Zhang Peizhen. 1995. Progressive constraining method in paleoseismic study and paleoearthquakes along the major active faults in northern Xinjiang. in: Institute of Geology, China Seismological Bureau. ed. Research on Active fault, 4, Beijing: Seismological Press, 153~164.
- Ran Yongkang, Duan Ruitao, Deng Qidong, Jiao Decheng, Min Wei. 1997. Paleoseismological studies by using three-dimensional trenches across the Haiyuan fault at Gaowanzi location. Seismology and Geology, 19(2):97~107.
- Slemmons D B. 1977. Faults and earthquake magnitudes. U. S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, Misc. Papers-73-1, Report 6, 129.
- Song Fangmin, Zhu Shilong, Wang Yipeng, Deng Qidong, Zhang Weiqi. 1983. Themaximum horizontal displacement in the Haiyuan earthquake of 1920 and the estimation of the earthquake recurrence along the northern marginal fault of the Xihuashan. Seismology and Geology, 5(4): 29 - 38. Zhang Weiqi, Jiao Decheng. 1984. A brief report on profiles of the Haiyuan paleoearthquake. Seismology and Geology, 6(3):14.

References

Detailed Study of Holocene Paleoeearthquakes of the Haiyuan Active Fault

MIN Wei, ZHANG Peizhen, DENG Qidong, MAO Fengying

China Seismological Bureau, Institute of Geology, Beijing, 100029

Abstract

Through studying eighteen trenches along the Haiyuan fault, ten paleoearthquakes were determined since ten thousand years ago. They have different rupture scales. The first and last events ruptured along the entire fault; the other events ruptured along secondary segments. The paleoevents are characterized by clustering in time and migrated back and forth from the west segment to middle—east segment. The magnitude of earthquakes along the entire ruptured fault is about 8.5 and of those along the secondary ruptured segments is about 7.5.

Key words: fault; paleoearthquake; cluster