

区域古地震复发行为的初步研究^{*}

闵 伟 张培震 邓起东

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所)

摘要 在对青藏高原东北边缘和华北构造区西缘过渡区主要断裂活动特征, 及其相互关系详细研究的基础上, 通过大量探槽资料, 剖析了研究区一万年以来古地震活动在时、空、强分布上的特征。研究区区域古地震复发模式表现为两种密集程度不同的丛集形式: 一种是历时 300 年左右; 另一种是历时 1 000 年左右, 古地震复发行为表现为显著的阶段性和不均匀性。

关键词 断裂带 古地震 重复模型

引言

古地震研究是活动断裂研究内容的一部分, 具有非常重要的意义。一方面, 它延长了地震记录, 使人们可以在更长的时间范围内研究强震重复规律, 建立强震重复模型, 进行未来地震危险性预测; 另一方面, 它也是表明断裂活动特征的参数之一, 是进行断裂分段、活动强度对比、动力学研究等不可缺少的内容。古地震学作为地震地质学领域的一门分支学科, 它的发展历史已充分表明它在地震地质学领域的重要地位。

自从 Reid 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, 提出了“弹性回跳理论”(Reid, 1911)以来, 它就成为各种定量分析原地复发强震之间的时间间隔模型的理论基础(Shimazaki, Nakata, 1980; Savage, Cockerham, 1987)。80 年代在古地震的研究中, 人们提出了特征地震模式(Schwartz, Coppersmith, 1984; Aki, 1984)。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), 为原地重复理论模型在地震危险性概率评估的应用提供了实际依据。但在大陆内部, 由于原地重复地震的周期很长, 使得古地震平均重复间隔与实际复发间隔之间的差异很大, 给大陆内部原地重复地震的危险性概率评估带来了很大的不确定性。

1989 年 Sieh 等对圣安德烈斯断裂 Pallett Creek 地点的 10 次古地震事件重新进行了精确年代测定, 提出了地震存在丛集发生的形式(Sieh *et al.*, 1989)。在随后的研究中, 人们发现丛集可以发生在一条断层的不同断层段上(McCalpin, Nishenko, 1996), 或同一断裂系的不同断裂上(Wallace, 1987)。丛集模型有可能是适合于大陆内部地震危险性概率评估的地震复发模型, 因为在大陆内部地震原地重复时间尺度内, 对于一定区域可能有多次地震发生, 相邻地震之间的时间间隔远远小于一条断裂上原地重复地震之间的时间间隔, 等于“缩短”了地震重复间隔。当一条断裂发生地震后, 根据区域古地震复发行为确定的地震

* 地震科学联合基金(9507421)资助项目。中国地震局地质研究所论著 99B0024。
1999-05-18 收到初稿, 1999-07-30 收到修改稿并决定采用。

空间迁移关系,可以确定下一次发生地震的地点。当离逝时间接近平均重复间隔时,由区域古地震复发行为得出的“未来一定时期内”可能只有几十年,大大减小了地震危险性概率评估的不确定性。因此,很有必要研究区域强震的复发行为。一定区域就是在一定应力作用条件下,具有多条不同活动强度断裂组合的空间范围,这一范围内古地震复发行为是应力传递、断裂活动强度和不同段落之间相互作用等因素的综合反映。由于断裂或断裂段之间的相互影响,或由于区域应变积累和释放的不均匀性,使强震重复行为常表现为非准周期性。对这种不均匀性原因的了解具有重要意义,可以发现更可靠的断层长期和短期活动习性。

研究区地处青藏高原东北边缘与华北构造区西缘过渡部位,活动断裂十分发育,历史地震和现代地震活动十分活跃,在距今约400年前到公元1920年,先后发生5次 $M \geq 7$ 地震,提供了区域强震丛集的实例。另外,本区的活动断裂研究程度非常高,主要断裂都进行过古地震研究。在前人的基础上,通过开挖系列探槽,根据断层窗或逐次限定法的原理,就有可能保证古地震的完整性并较准确地确定每次事件的年代,使我们得出的区域古地震复发行为更接近于真实情况,因此,该地区是研究区域古地震复发行为的良好场所。我们于1997年进行了几个月的野外工作,确定了全新世以来与强震有关的断裂,重点对海原断裂和中卫—同心断裂带进行了系列探槽开挖。共开挖探槽30个,取 ^{14}C 样33个、热释光样200多个,实际测试 ^{14}C 样7个、测试热释光样33个。在研究了海原、中卫—同心、贺兰山和罗山东麓断裂一万年以来古地震的基础上,探讨了研究区区域古地震复发行为。

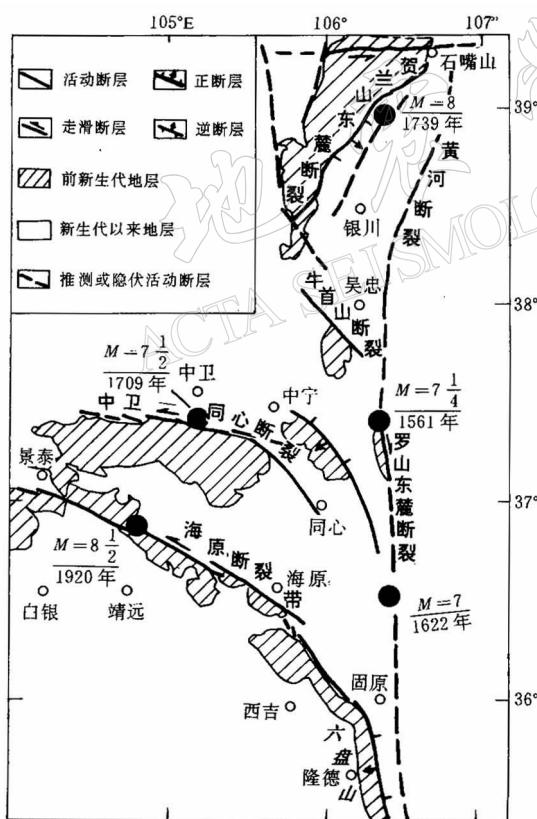


图1 研究区地质构造略图

研究区断裂活动基本特征

中国大陆处于多个板块相互作用的复合部位。由于板块间相互作用方式、方向和强度方面的差异,造就了中国大陆活动断裂的构造分区,并直接影响到现代地震的发震构造类型和大地震重复周期的长短(邓起东等,1994)。研究区位于青藏高原和华北构造区的过渡部位(图1),来自青藏高原北东方向的挤压应力是该区域最主要的动力来源。在这一动力作用下,研究区内断裂和地震活动既有区别又有联系。

青藏高原东北缘的海原、中卫—同心断裂带都为逆走滑断裂,海原断裂带

全新世以来的走滑速率和大震重复间隔分别为 $6\sim10\text{ mm/a}$ 和1 000年左右(国家地震局地质研究所,宁夏地震局,1990);中卫—同心断裂带全新世以来的走滑速率和大震重复间隔

分别为 2.5 mm/a 和 $2\,000\sim4\,000\text{ 年}$ (汪一鹏等, 1990). 华北构造区西缘的罗山、贺兰山东麓断裂都为正右旋走滑断裂, 贺兰山东麓断裂全新世大震重复间隔为 $2\,000\sim2\,500\text{ 年}$, 晚更新世以来的滑动速率为 $2.58\sim4.73\text{ mm/a}$ (国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组, 1988; 邓起东等, 1984); 罗山东麓断裂全新世以来的走滑速率和大震重复间隔分别为 $3\sim4\text{ mm/a}$ 和 $2\,500\text{ 年左右}$ (闵伟等, 1994). 除海原断裂带活动强度明显较大外, 其它几条断裂带的活动强度相差不大. 另外, 研究区的历史地震给出了一个准确无误的强震丛集期, 从公元 $1561\sim1920\text{ 年}$, 研究区先后发生了 $1561\text{ 年罗山东麓 }7\frac{1}{4}\text{ 级地震}$ 、 $1622\text{ 年固原北 }7\text{ 级地震}$ 、 $1709\text{ 年中卫 }7\frac{1}{2}\text{ 级地震}$ 、 $1739\text{ 年银川-平罗 }8\text{ 级地震}$ 和 1920 年海原大地震 . 前后 359 年 的时间发生 5 次 7 级以上 的地震, 平均间隔只有 90 年 , 表明南北两区在地震发生时间上有着内在的联系. 因此, 尽管研究区跨越了华北和青藏断裂活动性质不完全一样的两大构造区, 但他们有着共同的动力来源, 使断裂活动强度、地震活动特征具有很大的相似性, 所以将其作为一个共同的区域, 探讨其强震活动特征.

2 研究区主要断裂带古地震复发行为

2.1 青藏高原构造区东北边缘断裂古地震分布及大震复发行为

2.1.1 海原断裂带古地震及大震复发行为

海原断裂带是研究区内活动性最强、规模最大、结构也最为复杂的一条断裂带, 可以分为西、中、东3段(国家地震局地质研究所, 宁夏地震局, 1990). 根据本次对海原断裂带古地震研究的结果, 破裂事件主要有破裂西段、中段、中东段和全断裂4种. 东段不是一个独立的破裂段落, 它是中段破裂事件的影响段. 因此, 从破裂分段的原则出发, 将海原断裂带分为两段更合适, 称为西段和东段. 东段包括以前划分的中段和东段, 将同时破裂中段和中东段事件统称为东段破裂事件.

一万年以来海原断裂带共发生 10 次古地震事件(表1; 闵伟, 1998): 破裂全断裂的事件两次, 分别发生于距今 $8\,534\pm80\text{ 年}$ 和 97 年 , 间隔大于 $8\,000\text{ 年}$; 西段全新世以来共发生 3 次古地震; 东段全新世以来共发生 5 次古地震事件. 平均重复间隔 $940\pm76\text{ 年}$, 最大间隔 $1\,582\pm338\text{ 年}$, 最小间隔 $382\pm421\text{ 年}$, 其重复特征已明显偏离准周期性.

表1 探槽揭露的海原断裂带古地震目录

时间/a

编号	破裂段落	事件窗控制年代(距今)	估计发生年代(距今)	距上次事件的间隔
E ₁	全断裂	$8\,325\pm105\sim9\,370\pm120$	$8\,534\pm80$	
E ₂	中东段	$6\,808\pm288\sim7\,530\pm328$	$6\,952\pm328$	$1\,582\pm338$
E ₃	西段	$6\,145\pm155\sim6\,350\pm530$	$6\,252\pm276$	700 ± 429
E ₄	中东段	$5\,640\pm450\sim6\,100\pm450$	$5\,870\pm318$	382 ± 421
E ₅	中段	$4\,440\pm360\sim5\,025\pm105$	$4\,560\pm187$	$1\,310\pm369$
E ₆	西段	$3\,590\pm290\sim4\,140\pm90$	$3\,865\pm152$	695 ± 241
E ₇	中段	$2\,630\pm210\sim2\,710\pm235$	$2\,670\pm158$	$1\,195\pm219$
Ea	西段	$2\,000\text{ 年左右}$	$2\,000\text{ 左右}$	670 ± 158
E ₈	中东段	$590\pm60\sim1\,260\pm90$	922 ± 54	$1\,748\pm54$
E ₉	全断裂	公元 1920 年地震	公元 1920 年地震	900 ± 54

注: Ea为年代不很精确的事件.

2.1.2 中卫—同心断裂带古地震分布及大震重复行为

中卫—同心断裂带 1 万年以来古地震只有 5 次(汪一鹏等, 1990)^{①②}: 东段 3 次, 西段两次, 都为破裂次级段落的地震, 没有破裂全断裂的地震。最大间隔 3 000 年左右, 最小为 $1\ 085 \pm 312$ 年, 平均重复间隔为 $2\ 070 \pm 150$ 年(表 2)。在全新世中期, 古地震重复间隔相对短一些, 在全新世早期和晚期, 重复间隔变大。

表 2 中卫—同心断裂带 14 000 年以来古地震目录

序号	破裂段落	事件窗范围(距今)	估计发生年代(距今)	时间/a
E ₁	东段	$8\ 400 \pm 600 \sim 8\ 732 \pm 830$	$8\ 566 \pm 512$	
E ₂	西段	$6\ 319 \pm 190 \sim 6\ 750 \pm 350$	$6\ 535 \pm 199$	$2\ 031 \pm 549$
E ₃	东段	$5\ 100 \pm 120 \sim 5\ 800 \pm 460$	$5\ 450 \pm 238$	$1\ 085 \pm 312$
E ₄	西段	3 500 年左右	3 500 年左右	$1\ 950 \pm 238$
E ₅	东段	公元 1709 年	289	3 000 年左右

2.1.3 海原断裂带和中卫—同心断裂带古地震活动特征对比

(1) 海原断裂带地震频度高, 全断裂共发生 10 次古地震; 中卫—同心断裂带古地震频度明显低于海原断裂带, 全断裂只有 5 次次级破裂事件;

(2) 两条断裂带都具有分段破裂特征, 都可以分为东、西两个破裂段。海原断裂带东段发生 7 次古地震, 西段发生 5 次; 中卫—同心断裂带东段发生 3 次古地震, 西段发生两次古地震, 两条断裂带东段活动强度都略强于西段;

(3) 海原断裂带具有两个级别的特征地震: 一个是破裂全带的最高级别地震, 一个是破裂东段或西段的次一级地震。最高级别的破裂事件只有两次, 位于所研究时段(一万年)的开始和结尾; 中卫—同心断裂带则只有破裂东段或西段的次一级破裂事件;

(4) 两条断裂独立段落古地震重复间隔分布具有准周期性, 但全断裂古地震分布则有所不同。海原断裂带具有一定的丛集, 丛集期内的地震分别为破裂东、西段的次一级地震; 中卫—同心断裂带丛集特征不明显, 反映了海原断裂带次级断层结合紧密、相互作用强烈; 中卫—同心断裂带不仅活动频度不能与海原断裂带相比, 而且次级破裂段之间的结合程度很差。

2.2 华北构造区西缘主要断裂古地震分布及大震重复行为

2.2.1 罗山东麓断裂古地震分布及大震重复行为

探槽揭露该断裂 1 万年以来共发生 4 次破裂事件(闵伟等, 1993), 分别为距今 $8\ 200 \pm 600$ 年, $5\ 020 \pm 70$ 年, $3\ 331 \pm 120$ 年和 1 561 年历史地震。最大重复间隔 $3\ 180 \pm 604$ 年,

表 3 罗山东麓断裂古地震目录

古地震编号	Tc-3 探槽(距今)	Tc-6 探槽(距今)	发生年代(距今)	时间/a
E ₁		$8\ 200 \pm 600$	$8\ 200 \pm 600$	
E ₂	$5\ 020 \pm 70$		$5\ 020 \pm 70$	$3\ 180 \pm 604$
E ₃	$3\ 260 \pm 170$	$3\ 975 \pm 70$	$3\ 331 \pm 92$	$1\ 670 \pm 116$
E ₄	公元 1561 年地震	公元 1561 年地震	437	$2\ 895 \pm 92$

① 国家地震局分析预报中心. 1991. 黄河黑山峡河段主要断裂活动及大柳树坝址地震危险性分析报告.

② 宁夏地震局. 1995. 天景山活动断裂带(“八五”填图报告).

最小 $1\ 670 \pm 116$ 年, 平均间隔 $2\ 588 \pm 207$ 年。中间两次地震的重复间隔明显小于其它几次地震的间隔。

2.2.2 贺兰山东麓断裂古地震分布及大震重复行为

沿红果子断层崖和苏峪口外断层崖的探槽研究表明(国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组, 1988), 贺兰山东麓断裂 1 万年以来共发生 5 次 8 级左右的地震, 其时间分别为距今 $8\ 240 \pm 170$ 年, $6\ 330 \pm 80$ 年, $4\ 760 \pm 80$ 年, $2\ 675 \pm 70$ 年和公元 1739 年历史地震。全新世早期和晚期重复间隔长, 一般大于 2 000 年; 全新世中期的两次地震重复间隔短, 只有 $1\ 570 \pm 113$ 年, 平均重复间隔 $1\ 996 \pm 53$ 年。

表 4 贺兰山东麓断裂古地震目录*

时间/a

古地震编号	苏峪口外探槽(距今)	红果子沟探槽(距今)	估计发生年代(距今)	重复间隔
E ₁	$8\ 060 \pm 170$	$8\ 420 \pm 170$	$8\ 240 \pm 170$	
E ₂		$6\ 330 \pm 80$	$6\ 330 \pm 80$	$1\ 910 \pm 144$
E ₃	$4\ 760 \pm 80$		$4\ 760 \pm 80$	$1\ 570 \pm 113$
E ₄	$2\ 720 \pm 60$	$2\ 630 \pm 90$	$2\ 675 \pm 70$	$2\ 085 \pm 97$
E ₅	1739 年历史地震	1739 年历史地震	259	$2\ 416 \pm 97$

* 引自国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组, 1988

2.2.3 罗山东麓断裂和贺兰山东麓断裂古地震活动特征对比

(1) 贺兰山东麓断裂古地震活动强度略大于罗山东麓断裂, 1 万年以来, 贺兰山东麓断裂发生 5 次 8 级左右的地震, 罗山东麓断裂发生 4 次 7 级左右的地震;

(2) 贺兰山东麓断裂晚更新世以来的活动段长度约为 90 km, 罗山东麓断裂则为 60 km。它们都为一个独立的破裂段, 没有更次一级的破裂段落; 贺兰山东麓断裂的特征地震震级为 8 级左右, 罗山东麓断裂特征地震震级小于 7.5 级;

(3) 罗山东麓断裂和贺兰山东麓断裂的古地震分布都具有准周期性。一万年以来, 早期和晚期的重复间隔长, 中间两次地震的间隔短。相比而言, 贺兰山东麓断裂比罗山东麓断裂的周期性更强些。

3 区域古地震复发行为

研究区 4 条断裂一万年以来共发生古地震 24 次, 这些古地震时空分布如图 2 所示。将所有古地震投影到时间轴上, 可以看出它们在时间分布上具有 4 个相对集中的古地震丛集期。如果仅从古地震发生时间的相对集中程度来考虑, 可以划分为 4 个丛集期, 但这样的划分显然太粗糙, 有的丛集期只有 4 次古地震, 有的丛集期有 8 次古地震, 有可能把两个时间上比较近的丛集期当成了一个丛集期, 而且空间分布上也没有一定的规律。如果考虑古地震的空间迁移方向, 除第 1 和第 6 轮回外, 古地

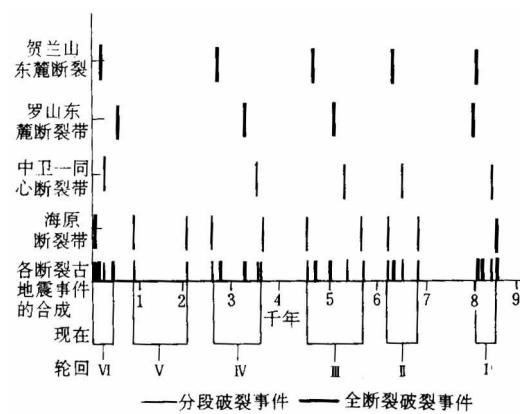


图 2 研究区主要断裂古地震
时空分布合成图

震的发生有从海原断裂带的某一次级段开始，向北迁移，然后再回到海原断裂带的某一次级段的特征。因此把 4 条断裂带上先后发生的、时间上最接近的古地震称为一次轮回，这样可以划分出 6 个轮回。其古地震具有较好的时空分布规律。

第 1 轮回。距今 $8\ 566 \pm 512 \sim 8\ 200 \pm 600$ 年，4 条断裂带分别发生破裂事件，历时 366 ± 788 年，4 次地震平均间隔为 122 ± 202 年，地震之间的迁移没有明显规律。

第 2 轮回。第 1 轮回以后经历了长达 $1\ 248 \pm 683$ 年平静期，在距今 $6\ 952 \pm 328$ 年～ $6\ 330 \pm 80$ 年，海原断裂带的东段、中卫—同心断裂带西段、贺兰山东麓断裂分别发生古地震。在贺兰山东麓断裂发生地震后几十年，海原断裂带西段在距今 $6\ 252 \pm 276$ 年又发生一次古地震，但罗山东麓断裂没有发生古地震。这一轮回断裂带之间的古地震迁移方向为由南向北。

第 3 轮回。第 2 轮回以后只经历了 382 ± 421 年的平静期，在距今 $5\ 870 \pm 315$ 年～ $4\ 560 \pm 187$ 年，海原断裂带东段、中卫—同心断裂带的东段、罗山东麓断裂、贺兰山东麓断裂、海原断裂带东段分别发生破裂事件，这一轮回历时 $1\ 310 \pm 366$ 年。断裂带之间的古地震迁移仍然是由南向北。

第 4 轮回。第 3 轮回以后经历了 695 ± 240 年的平静期，研究区又经历了一次与第 3 轮回非常相似的破裂过程。在距今 $3\ 865 \pm 152$ 年～ $2\ 670 \pm 158$ 年，海原断裂带西段、中卫—同心断裂带西段、罗山、贺兰山东麓断裂和海原断裂带东段分别发生破裂事件，历时 $1\ 195 \pm 219$ 年。断裂带之间的古地震迁移仍然是由南向北。

第 5 轮回。第 4 轮回以后经历了约 670 年的平静期，进入第 5 轮回，这是一个非常不完整的轮回，只是在距今 2 000 年和 912 年分别在海原断裂带西、东段发生两次次级破裂事件。其它断裂没有揭露到古地震事件。造成这种状况的原因很可能是遗漏了古地震。

第 6 轮回。第 5 轮回以后，经历了约 500 年的平静期，进入第 6 轮回。这是离我们最近的一次轮回。4 条断裂带上发生的地震都是有准确记录的历史地震，分别为 1561 年罗山东麓 $7\frac{1}{2}$ 级地震、1709 年中卫—同心断裂带 $7\frac{1}{2}$ 级地震、1739 年贺兰山东麓断裂 8 级地震和 1920 年海原 8.6 级地震。这一轮回历时 379 年，它在破裂方式、持续时间等方面类似于第 1 轮回，与其它几次轮回有较大区别。

从以上分析我们可以看出，一万年以来，研究区所发生的古地震大致可以分为 6 次轮回。这 6 次轮回根据所经历时间的长短可以分为两类：一类是历时 300 年左右的轮回，有两次，分别为距今 8 000 年左右的第 1 轮回和历史上的最后这次轮回，轮回内都以每条断裂发生一次地震为特征。海原断裂带为破裂全带的特大地震，断裂带之间古地震的迁移没有明显的规律；第 2 类轮回历时 1 000 年左右，除了第 1、第 6 轮回，其它轮回都属于第 2 类，其历时显著长于第 1 类。地震的空间分布具有明显的规律，每次轮回的地震都是从海原断裂带开始，然后是中卫—同心断裂带、罗山东麓断裂、贺兰山东麓断裂，依次向北迁移，最后再回到海原断裂带，即每次轮回海原断裂带要发生两次地震，时间上分别位于每次轮回的开始和结束，震级上没有破裂全断裂的特大地震。图 3 表示了研究区古地震在时间上及空间分布上的这种规律。其中，“E”表示地震事件，其下标数字表示发生的先后顺序；“(东)”表示破裂东段的古地震事件；“(全)”表示破裂全断裂的古地震事件。

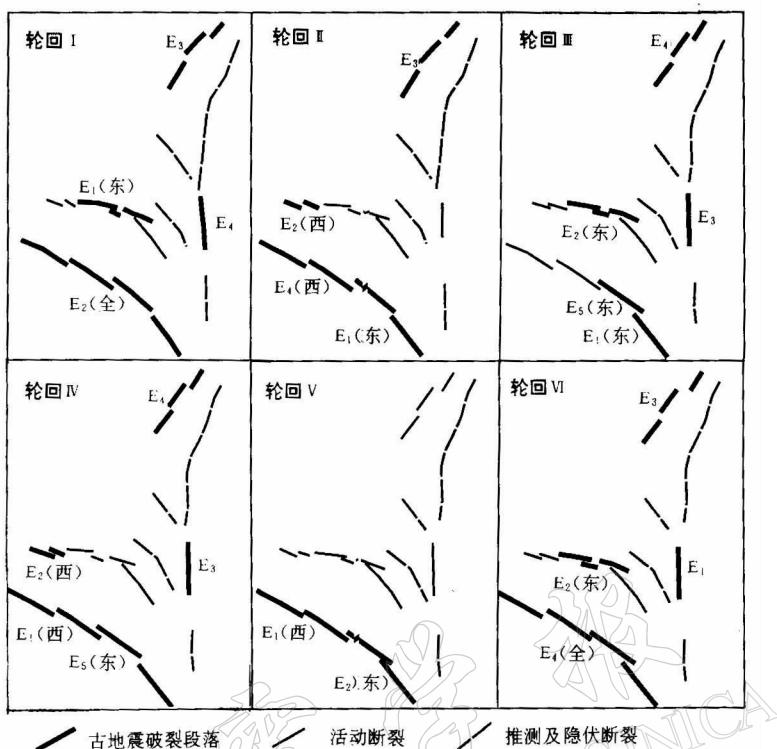


图3 研究区1万年以来古地震破裂历史图

4 讨论与结论

通过以上分析，可以看出古地震复发行为在断裂带、不同构造区以及区域3个不同层次上的复发行为具有以下不同的特征：

(1) 单条断裂的古地震分布特征重复间隔一般都在1 000~2 000年左右，具有准周期分布特征，平均重复间隔与实际重复间隔之间的差异比较大，在几百年甚至上千年；

(2) 青藏高原东北边缘和华北构造区的古地震活动似乎具有不同的特征。华北构造区断裂带的古地震分布具有较好的准周期性，而青藏高原东北边缘构造区断裂带的古地震分布不具有准周期性，但独立段落上的古地震似乎具有一定的准周期现象；

(3) 区域古地震活动具有明显的从集特征，从集期内的古地震平均重复间隔只有几百年，与实际复发间隔之间的差异很小，而且具有较规律的空间迁移方向。

古地震活动历史的完整性是将活动断裂与古地震研究应用于地震危险性预测的基础和前提。只有完整地揭露古地震事件，恢复古地震在时、空、强分布上的历史，才能真正认识断层活动的习性和大地震重复的规律，客观地评价未来大地震的危险性(Sieh *et al.*, 1995; Schwartz, 1995; Yeats, 1995; Zhang, 1995)。如果漏掉或重复计算一次古地震事件，对于原地重复模型来说，就是100%漏掉或增加了一个活动期，其平均重复间隔会增加或减少很多；而对于区域从集模型来讲，漏掉或重复计算一次古地震事件，不会增加或减少一个从集期。另外，由于区域古地震从集期是位于两次原地重复地震的时间间隔内，

其平均重复间隔远远小于原地重复地震的平均重复间隔，因此，漏掉或增加一次古地震事件，对平均重复间隔的影响也远远小于对原地重复模型的影响。因此，重视研究区域强震重复规律，是提高未来强震时空预测精度的一条有效途径。

区域古地震的研究才刚刚起步，还有许多问题需要深入研究，如如何科学地确定研究区域及其大小，以及影响区域强震复发行为的因素等。只有进行更多的研究才有可能发现区域强震的活动习性。

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
- 邓起东, 汪一鹏, 廖玉华, 等. 1984. 多次断层崖崩积楔及贺兰山山前断裂全新世活动历史. 科学通报, **29**(9): 557~560
- 邓起东, 徐锡伟, 于贵华. 1994. 中国大陆活动断裂的分区特征及其成因. 见: 中国地震学会地震地质专业委员会编. 中国活动断层研究. 北京: 地震出版社, 1~14
- 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, 234~245
- 国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组. 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京: 地震出版社, 258~269
- 闵伟, 柴炽章, 王萍, 等. 1993. 罗山东麓断裂全新世古地震研究. 高原地震, **5**(4): 97~107
- 闵伟, 王萍, 杨平, 等. 1994. 罗山东麓活动断裂的几何学特征及全新世滑动速率. 见: 活动断裂研究编委会编. 活动断裂研究. 北京: 地震出版社, 140~150
- 闵伟. 1998. 区域古地震研究: [学位论文]. 中国地震局地质研究所
- 汪一鹏, 宋方敏, 李志义, 等. 1990. 宁夏香山—天景山断裂带晚第四纪强震重复间隔的研究. 中国地震, **6**(2): 15~24
- Aki K. 1984. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction. *J Geophys Res*, **89**: 5 867~5 872
- McCalpin J, Nishenko S P. 1996. Holocene paleoseismicity, temporal clustering, and probabilities of future large ($M > 7$) earthquakes on the Wasatch fault zone, Utah. *J Geophys Res*, **101**(B3): 6 233~6 253
- Reid H F. 1911. The elastic-rebound theory of earthquakes. *Univ Calif Publ Bull Dept of Geol*, **6**: 413~444
- Savage J C, Cockerham R S. 1987. Quasi-periodic occurrence of earthquakes in the 1978~1986 Bishop-Mammoth Lakes Sequence, eastern California. *Bull Seism Soc Amer*, **77**(4): 1 347~1 358
- Schwartz D P, Coppersmith K J. 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and Anderson fault zones. *J Geophys Res*, **90**: 5 681~5 698
- Schwartz D P. 1995. Earthquake Repeatability: Magnitude, Timing, Segmentation, International School of Solid Earth Geophysics 11th Course: Active Faulting Studies for Seismic Hazard Assessment, Erice, Italy
- Shimazaki K, Nakata T. 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophys Res Lett*, **7**: 278~282
- Sieh K E, Stuiver M, Brillinger D. 1989. A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in southern California. *J Geophys Res*, **94**: 603~623
- Sieh K E, Zachariasen J, Taylor F W, et al. 1995. Paleoseismology of the Sumatran Subduction Zone: Unusual Opportunities for Understanding the Complexities of Earthquake Cycles. International School of Solid Earth Geophysics 11th Course: Active Faulting Studies for Seismic Hazard Assessment, Erice, Italy
- Wallace R E. 1987. Variations in slip rates, migration, and grouping of slip events on faults in the Great Basin province. *Bull Seism Soc Amer*, **77**: 868~876
- Yeats R S. 1995. Thin-Skinned vs Thick-Skinned Interpretation of Seismogenic Reverse Faults. International School of Solid Earth Geophysics 11th Course: Active Faulting Studies for Seismic Hazard Assessment. Erice, Italy
- Zhang P Z. 1995. Application of Active Faulting Information to Seismic Hazard Assessment. International School of Solid Earth Geophysics 11th Course: Active Faulting Studies for Seismic Hazard Assessment, Erice, Italy