

东昆仑活动断裂带东段古 地震活动特征^{*}

李春峰¹⁾ 贺群禄²⁾ 赵国光²⁾

1) 中国上海 200092 同济大学海洋地质教育部重点实验室

2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

摘要 东昆仑活动断裂带托索湖—玛曲以东肯定那一带, 可据阿尼玛卿玛积峰为界再分为花石峡段和玛沁段两个在几何上不连续的段落. 两段在表征断层全新世活动特征的古地震事件方面有明显差异, 花石峡段的地震活动性明显高于玛沁段的地震活动性. 古地震研究表明, 花石峡段上 3 次强震活动相邻两次地震发生的时间间隔分别约为 500 a 和 640 a, 玛沁段上最近两次古地震事件间大致有 1 000 a 左右的时间间隔. 根据断层平均滑动速率计算的花石峡段 7.5 级地震的平均复发间隔为 411~608 a, 相对应的同震平均水平位错约为 (5.75 ± 0.57) m. 虽然玛沁段的地震活动性较弱, 但由于该段上最近一次地震事件离现在较为久远, 已经积累的应变能应该使我们对其未来地震危险性的分析有足够重视.

关键词 昆仑断裂带 全新世滑动速率 古地震 地震复发间隔 强震危险性分析

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A

引言

东昆仑活动断裂带是印度板块向欧亚板块俯冲过程中在青藏高原内部沿东昆仑古构造缝合线形成的以左旋走滑运动为主的一条大断裂带. 它西起青海省可可西里湖北侧的布喀达坂峰以西, 向东经库赛湖、西大滩、东大滩、阿拉克湖、托索湖、阿尼玛卿峰、玛沁, 止于四川省境内的玛曲一带, 总体走向北西西向(图 1). 新构造运动时期, 断裂带有较强的活动, 它控制了第四纪断裂谷及断陷盆地的发育, 沿断裂第四纪断陷盆地、断裂谷、断陷湖呈串珠状展布. 东昆仑活动断裂带上存在长达 700 km 以上的复合地震地表破裂形变带(肖振敏等, 1988), 实属罕见. 对这样一条极具代表性的断裂带的详尽研究具有理论和实际上的重要意义.

对东昆仑断裂带活动特征的研究始于 20 世纪 70 年代, 研究人员先后对断裂带上不同地段的不同问题进行了调查研究, 获得了一些很有价值的成果(崔中元, 杨斌, 1979; 李龙海, 贾云鸿, 1981; Kidd, Molnar, 1988; 肖振敏等, 1988; 劳雄, 1989; 任金卫等, 1993). 80 年代中期开始了断裂带的定量研究, 主要成果是东西大滩段第四纪以来的滑动速率的初步确定(Kidd, Molnar, 1988, 任金卫等, 1993)和花石峡段的古地震事件及强震复发间隔的初步确定(肖振敏等, 1988). 1986~1990 年青海省地震局和中国地震局地壳应力研究

^{*} 中法合作“东昆仑岩石圈缩短机制研究”课题资助.

2003-11-21 收到初稿, 2004-03-01 收到修改稿, 2004-04-12 决定采用.

所以对东昆仑断裂带进行了较系统的研究(肖振敏等, 1988; 刘光勋, 1996; 刘光勋等, 1996; 张瑞斌等, 1996, 2002; 青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所, 1999). 1993~1994年中法合作“东昆仑岩石圈缩短机制研究”课题组对整条断裂带进行了比较详细的定量研究(Zhao *et al*, 1994; 李春峰, 1995; Van der Woerd *et al*, 1998, 2000, 2002). 笔者与中法两方成员一起对断裂带托索湖—玛沁东肯定那长约 250 km 的地段进行了一个月的野外考查研究, 取得了一大批断裂位错实测数据和 ^{14}C 及 TL 测年样品. 本文以该次野外考查成果为基础, 针对研究地段尚存在的问题并结合前人资料, 研究了断裂带托索湖—肯定那一带的全新世水平滑动速率和古地震活动特征, 进而初步分析了花石峡段和玛沁段的强震复发间隔与未来地震危险性.

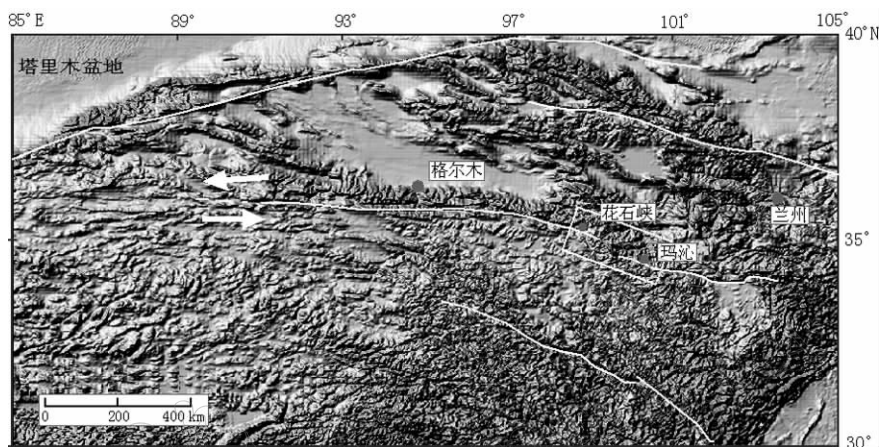


图1 东昆仑断裂带区域展布及本文研究区范围(方框表示)

1 花石峡段全新世古地震活动特征

本文研究了古地震所产生的地表和沉积物剩余变形的地质标志, 并估计了古地震发生的大致时间. 我们发现断裂带花石峡段与玛沁段的古地震活动特征有较大差别, 花石峡段的古地震活动相对活跃, 造成明显的地貌标志. 古地震地表形变带线性影像清晰, 平面展布宽度为数米至数十米, 最宽处可达 50 m. 它由一系列规模不等的地震裂缝、地震鼓包、地裂槽、断层陡坎、断错阶地和冲沟等构成. 花石峡段古地震活动的主要地貌标志有:

地震断层. 花石峡段地震断层面比较平直, 倾角较大, 一般为 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$. 在年扎河西岸, 晚第三纪湖相粉砂岩夹泥岩层被快速剪切. 全新统砾石层被断错位移, 其中砾石有被剪断的现象.

断层陡坎. 断层陡坎在地那染山中段北坡、谁家码南山中段北坡向东至格拉后沟一带最为明显. 在年扎河西岸, 不同时代的阶地上断层陡坎的高度明显不同, 阶地越老, 其上断层陡坎的高差越大, 表明地震断层有多期活动的特点, 每次活动都伴有一定的垂直位移分量.

地裂缝. 花石峡段的地裂缝主要分布于托索湖至年扎河一带. 单一裂缝宽度多在 1 m 以内, 最大宽度可达 2 m. 裂缝的延伸性较好, 长度可达 30 多米. 地裂缝主要可分为两组. 肖振敏等(1988)发现同期形成的地震鼓包和裂缝的分布有一定的规律, 裂缝多出现在相邻

两鼓包首尾衔接的部位。后期形成的地裂缝与早期的地裂缝重合或在原来的基础上再发展,有的则发育在早期鼓包之上,使鼓包表面产生许多与鼓包长轴近于直交的沟槽。

地震鼓包。地震鼓包在花石峡段非常发育,其规模不等,最大者长度大于 50 m,宽度大于 20 m,其上一般发育后期的地裂缝或新的鼓包。

断错地貌标志。断错地貌标志在花石峡段主要有断错阶地、断错冲沟及断错山脊等。

地裂槽。在花石峡地震断层带内,地裂槽是与鼓包共生的一种地震构造形变现象。在谁家玛南山以西,左行排列的挤压鼓包与右行排列的地震凹坑相间排列,构成特征的串珠状地貌现象。地裂槽多呈椭圆形,其长轴与鼓包的长轴斜交。地裂槽的规模一般较其相邻的鼓包的规模小,长一般在 10 m 以内。有许多凹坑积水成塘。另外,在与地震断层展布方位近于一致的鼓包同时形成的长条形洼地内,不但有后期的小型鼓包发育,而且发育有小型凹坑。

从以上分析可以看出,各类不同的古地震地貌和构造标志都反映了花石峡地震断层的多次活动的特点。断层的多次活动造成了相同或不同类地貌与构造标志之间的相互叠加及晚期地貌和构造对早期地貌和构造的改造。这样,在较新的地貌面上,地震地表破裂带的形变规模小,地貌和构造标志的结构也较简单;而在较老的地貌面上,地震地表破裂带的形变规模较大,结构也变得较复杂。

为了更准确地确定花石峡段古地震的活动期次及其时代,除了上述地表地貌和构造标志的研究外,对探槽剖面的研究也是重要的。肖振敏等(1988)通过探槽研究,并结合地震断层活动的期次与多期古地震地貌和构造标志的出现,认为库玛断裂全新世以来至少经历了 4 次古地震事件,其中包括 1937 年在托索湖发生的 7.5 级地震。通过绝对年龄测量及古地震地貌标志间的切割、叠加和再改造关系,确定花石峡段最近的 3 次强震活动分别发生于 1988 年以前约 $(1\ 198 \pm 50)$ a、 (693 ± 62) a 和 51 a,相邻两次地震发生的时间间隔分别约为 500 a 和 640 a(肖振敏等,1988),本文不再详述。

2 玛沁段全新世古地震活动特征

古地震构造形变遗迹的广泛存在表明玛沁段不仅是一条活动断层,而是一条多次发生强震的断层。强震的发生导致在地表形成地震地表破裂带。古地震活动的地貌和构造标志有:

地震鼓包。受地震断层通过地段岩土物理性质及地貌形态的影响,玛沁段的地震鼓包主要在东倾沟乡北东科何河西岸Ⅱ级阶地面上和桑曲河Ⅱ级阶地面上发育。东科何河西岸Ⅱ级阶地面上的鼓包个体较大,一般为 $25\text{ m} \times 15\text{ m} \times 5\text{ m}$,各鼓包间呈左行斜列。该点鼓包类型较单一,未见相互叠加现象。大武滩西桑曲河北岸Ⅱ级阶地面上的鼓包组合较复杂,个体大小不均一,可分为两类:①分布密度低、个体大,长轴可达 60 m,长轴方位角约 130° 。这类鼓包普遍受后期地震活动改造,其上不但发育有后期地裂缝,同时多遭到地震断层的切截,其中一鼓包形成约 12 m 的左旋位错和 2.5 m 的垂向位错;②分布密度高、个体较小,相互间呈左行排列。鼓包之间为低洼地形。鼓包长轴方位角约 $135^\circ \sim 140^\circ$,总体构成一走向为 295° 的地震鼓包带。但是相对于花石峡段而言,玛沁段的地震鼓包组合形式相对简单,反映了玛沁段相对较弱的地震活动性。

地裂缝。地裂缝在玛沁段很少见到,这一点与花石峡段有明显差异。这一方面可能反

映了玛沁段最近一次地震发生的时间离现在已很久远，地震所形成的地裂缝很难再有保存；另一方面也可能反映了该段相对较弱的地震活动性。

坡中槽与边坡脊. 在大武滩以东，断裂主要发育在断裂谷地的北缘谷坡上，断裂通过处地形北高南低。由于断层两侧块体的差异升降运动，南侧块体相对抬升，这样就会在原来相对平滑的坡地上形成一对相互平行的槽和脊(图 2)。它们是一对共生的古地震活动地貌标志。

断塞塘与断塞沼泽. 断塞塘及断塞沼泽在玛沁段较多见。在断层两侧垂直运动形成坡中槽与边坡脊的同时，水平运动使冲沟壁、山脊位错而堵塞上游水道，从而会在断层靠近山体的一侧形成断塞塘或断塞沼泽(图 2)。

从玛沁段古地震活动的地貌标志可以看出玛沁段曾有过多次强震活动。为了确定玛沁段上古地震活动各期次的时代及最近一次地震事件发生的时间，我们在桑曲河北岸Ⅱ级阶地阶地面上开挖了一条深约 2 m、长 7 m 的探槽(图 3)。探槽揭露出两个古地震充填楔(②和③)。楔体③内充填物为灰褐色砂土夹细粒砾石，砾石粒径 1~3 cm，在楔体边缘偶夹有粒径 10 cm 左右的大砾石；楔体②由砾石夹灰褐色砂土所充填，砾石粒径 4~6 cm。上述两楔体发育在桑曲河Ⅱ级阶地河床河漫滩相沉积层④中，河床相砾石层呈黄褐色，砾石分选程度较低，粒径在 1~15 cm 间，磨圆度中等，略具定向性排列；河漫滩相为砂土夹砾石，砂砾粒径在 1~10 mm 间。剖面最上部为厚 30~50 cm 的灰色现代土壤层①。

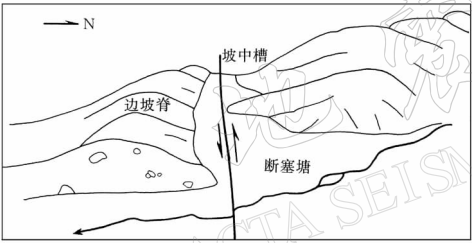


图 2 军牧场北断塞塘、坡中槽及边坡脊素描图

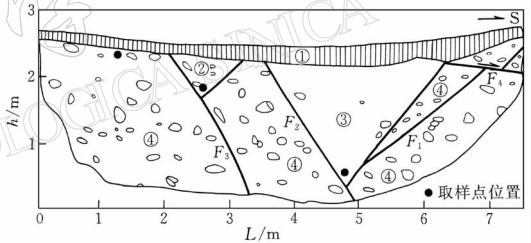


图 3 桑曲河北岸Ⅱ级阶地上探槽东壁素描图
① 灰色现代土壤层；②，③ 楔体；④ 沉积层

剖面揭露出 4 条断层， F_1 产状为 $344^{\circ}/42^{\circ}$ ，切割河床及河漫滩相砾石层； F_2 产状为 $140^{\circ}/61^{\circ}$ ，构成充填楔③一侧与河床河漫滩相的边界； F_3 产状为 $147^{\circ}/66^{\circ}$ ，该断层上部构成充填楔②的一侧边界，下部切割河床河漫滩相砾石层； F_4 产状为 $173^{\circ}/14^{\circ}$ ，该断层明显切割 F_1 断层及楔体③，表明其形成时间较 F_1 ， F_2 要晚。

在楔体③堆积层的底部取一 TL 测年样品，其年龄值为 $(2\ 150 \pm 330)\text{a}$ ，代表一次古地震事件发生的时刻，形成 F_2 断层及楔体③。从剖面看 F_1 断层的形成应在 F_2 断层形成之前和桑曲河Ⅱ级阶地地面形成之后。在阶地河床河漫滩相砾石层近顶部取一 TL 测年样品，其测年结果为距今 $(4\ 593 \pm 330)\text{a}$ ，表明 F_1 断层的形成时刻应在距今 $(4\ 593 \pm 330)\text{a} \sim (2\ 150 \pm 156)\text{a}$ 之间。楔体②底的 TL 样品的测年结果为距今 $(1\ 070 \pm 180)\text{a}$ ，代表又一次古地震事件的发生时刻，形成 F_3 断层及楔体②。 F_4 断层应形成于 F_2 之后，推测它可能是与 F_3 断层同期形成。综上所述，探槽共揭露出至少 3 次古地震事件：第一次古地震事件发生于距今 $(4\ 593 \pm 330)\text{a} \sim (2\ 150 \pm 156)\text{a}$ 间；第二次发生于距今 $(2\ 150 \pm 156)\text{a}$ ；第三次发生于距今 $(1\ 070 \pm 180)\text{a}$ ，为探槽所揭露的最近一次古地震事件。最近两次地震事件间大致

有1 000 a左右的时间间隔.

3 全新世强震复发间隔与未来地震危险性分析

Wallace(1970)提出用 $\Delta T=D/(S-R)$ 来计算地震的原地平均复发间隔. 式中, D 是在断层上由一次地震产生的位错量, 或称为同震位错; S 是由地质或地貌体的位错量除以位错的起始距今年龄得到的长期平均的断层水平滑动速率; R 是断层的长期平均蠕动速率. 在应用 Wallace 公式时, 重要的问题是如何获得及怎样去估计与震级 M 的大小对应的同震位错量 D . 为了遵循 Wallace 公式的物理假定, 最理想的情况是 $(S-R)$ 值是断层某一点上的长期(例如全新世以来)的平均, 同时地震位错 D 也是同一地点上历次给定大小的地震的平均位错值. 然而在实际研究中往往难以满足上述要求, 因为在野外的一个具体的断层点上很难满足同时获得这两个量的条件, 尤其是要想获得历次地震位错的平均值, 面临的困难更大. 由于这些困难, 国内外学者曾在不同程度上对 Wallace 公式的使用方法加以推广, 力图使用一些近似的量来代替 Wallace 公式中的 D . 例如, 使用一次地震的最大同震位错 D_{\max} 去代替 Wallace 公式中的 D . 闻学泽(1989)认为, 使用一次地震的最大同震位错 D_{\max} 代替 D 值存在一些问题, 主要有: 不能保证在获得平均滑动速率的那一个断层点上, 在每一次地震时都产生最大的同震位错; 也不能证实测得 D_{\max} 值的点就是在整个发震的断层上滑动速率达到最大的地方. 因此, 用 D_{\max} 代替 D 估算出来的 ΔT 值往往比实际偏大, 从而用其对未来的地震潜势进行评价时, 很可能潜伏了较大的不安全因素.

目前, 常用的方法是采用给定大小地震在其地表地震断层长度上的同震平均位错 D_c 代替 Wallace 公式中的 D . 同时, $(S-R)$ 值也采用同一段断层上不同部位、不同距今时间的平均值. 同震平均位错即一次伴有明显地表破裂的地震发生时, 沿地表地震断层长度上各点位错的平均值. 在实际操作中, 通常只能利用在野外测得的某次给定大小地震的一些零散的地表位错量对 D_c 值进行估计. 下面我们利用花石峡段上 1937 年托索湖 7.5 级地震所形成的位错近似估计该段 7.5 级地震的同震平均位错 D_c , 进而求得该段上 7.5 级地震的平均复发间隔. 我们发现, 1937 年托索湖 7.5 级地震形成的地表位错一般在 4~8 m 之间(表 1).

表 1 托索湖 7.5 级地震地表水平位错量统计表

编号	位错地点	位错标志	水平位错幅度/m	测量方法
1	地那染山北西段	地震鼓包	7±1	实测
2	青康公路东约 2 km	地震鼓包	6.5±0.5	实测
3	谁家玛南山东段北坡	冲沟	3~7.15	实测
4	年扎河	T ₁ 前缘	4.1±0.5	实测
5	年扎河	T ₁ 面上古河道	8.0±0.5	实测
6	年扎河东约 4 km	冲沟洪积扇	6.0±1.0	实测
7	格拉后沟北西约 1 km	冲沟 T ₁ 前缘	3.6±0.5	实测

根据表 1 求得花石峡段上一次 7.5 级地震的同震位错的算术平均值为 (5.75 ± 0.57) m. 研究发现, 花石峡段全新世平均水平滑动速率值为 (11.5 ± 1.1) mm/a(李春峰, 1995; Van der Woerd *et al.*, 1998, 2000, 2002), 由此应用 Wallace 公式求得花石峡段上 7.5 级强震的平均复发间隔为 411~608 a. 古地震研究得出花石峡段上最近 3 次强震间的复发间隔

分别为 500 a 和 640 a(肖振敏等, 1988), 这两个值都与由 Wallace 公式求得的 7.5 级强震的平均复发间隔(411~608 a)很接近. 花石峡段上最近一次强震的发生时刻离现在只有 60 多年, 远不及平均复发间隔值, 所以花石峡段上未来较长一段时间内发生 $M \geq 7.5$ 强震的可能性不大.

从古地震探槽研究得知全新世以来玛沁段至少发生过 3 次古地震事件: 第一次发生在距今 $(4\,593 \pm 330)\text{a}$ ~ $(2\,150 \pm 156)\text{a}$ 之间; 第二次发生在距今 $(2\,150 \pm 156)\text{a}$; 第三次发生于距今 $(1\,070 \pm 180)\text{a}$. 最近两次古地震事件间大致有 1 000 a 左右的时间间隔. 前面确定玛沁段上最近一次古地震事件发生于距今约 $(1\,070 \pm 180)\text{a}$. 由于该段上长期平均水平滑动速率值在 6~8 mm/a 之间, 在 $(1\,070 \pm 180)\text{a}$ 的时间范围内玛沁段可以积累 5.5~9.5 m 的潜在位错值. 从目前地震的最大同震水平位错 D_{\max} 与震级 M 的统计关系看, 这一位错值与一次 7 级以上强震的最大同震位错量相当. 从这一角度看, 玛沁段上已具备发生 $M \geq 7$ 地震的可能性. 因此, 对这一段的未来地震危险性的研究应给予足够重视(李春峰, 1995; 张瑞斌等, 1996; 涂德龙等, 2000; 都昌庭, 杨广华, 2001).

4 讨论和结论

本文研究了东昆仑断裂带托索湖—肯定那一带长约 250 km 地段的全新世古地震活动特征, 进而初步分析了托索湖—肯定那一带不同断层段上的强震复发间隔与未来地震危险性.

以阿尼玛卿玛积峰为界, 花石峡段的地震活动性明显高于玛沁段的地震活动性. 花石峡段曾发生过多古地震活动, 在地表形成规模较大、各类相同或不同类古地震地貌和构造标志之间相互切割、叠加及晚期地貌标志对早期地貌和构造标志再改造的复合地震形变带. 从古地震活动地貌和构造标志的切割、叠加和再改造关系及探槽的分析, 可以确定花石峡段全新世以来至少经历过 4 次强震活动, 其中最近相邻两次地震发生的时间间隔分别约为 500 a 和 640 a(肖振敏等, 1988). 从古地震活动地貌标志及探槽研究得知, 玛沁段在全新世至少发生过 3 次古地震事件: 第一次发生在距今 $(4\,593 \pm 330)\text{a}$ ~ $(2\,150 \pm 156)\text{a}$ 之间; 第二次发生在距今 $(2\,150 \pm 156)\text{a}$; 第三次发生在距今 $(1\,070 \pm 180)\text{a}$. 最近两次古地震事件间大致有 1 000 a 左右的时间间隔.

利用花石峡段上 1937 年托索湖 7.5 级地震所形成的位错量, 近似估计该段 7.5 级地震的同震平均水平位错 D_c 为 $(5.75 \pm 0.57)\text{m}$. 结合该段平均水平滑动速率值 $(11.5 \pm 1.1)\text{mm/a}$, 应用 Wallace 公式求得花石峡段 7.5 级地震的平均复发间隔为 411~608 a. 古地震研究得出花石峡段上最近 3 次强震间的复发间隔分别为 500 a 和 640 a, 这两个值都与 Wallace 公式求得的 7.5 级强震的平均复发间隔(411~608 a)很接近. 由于花石峡段上最近一次强震发生的时刻离现在只有 60 多年, 这一时间远小于该段 7.5 级强震的平均复发间隔, 估计花石峡段在未来较长的一段时间内发生 $M \geq 7.5$ 地震的可能性不大; 对于玛沁段, 目前尚无很好的办法求得相应震级的平均同震位错量 D_c , 所以无法应用 Wallace 公式求得该段的相应于某一大小的地震的平均复发间隔. 玛沁段上最近一次强震活动发生于距今约 $(1\,070 \pm 180)\text{a}$, 由于该段上全新世长期平均水平滑动速率值在 6~8 mm/a(李春峰, 1995), 在 $(1\,070 \pm 180)\text{a}$ 的时间范围内玛沁段可以积累 5.5~9.5 m 的潜在位错值. 从目前地震的最大同震水平位错 D_{\max} 与震级 M 的统计关系看, 这一位错值与一次 7 级以上

强震的最大同震位错量相当. 这表明玛沁段可能已具备发生 $M \geq 7$ 地震的可能性, 因此, 对玛沁段的未来地震危险性分析应有足够的重视.

探槽的规模和数量还不能满足古地震研究的要求, 因而无法确定全新世以来的所有古地震事件及所有相邻地震事件间的实际的时间间隔. 而且对于玛沁段来说, 目前尚无很好的方法求得相应于某一震级地震的同震平均水平位错, 无法应用 Wallace 公式求得该段的相应于某一震级地震的平均复发间隔, 这给玛沁段未来地震危险性的分析增加了一定的难度.

样品年龄由中国地震局地壳应力研究所和中国社会科学院考古研究所测定. 感谢审稿专家对本文初稿提出的宝贵的修改意见.

参 考 文 献

- 崔中元, 杨斌. 1979. 托索湖—玛曲活动断裂带[J]. 西北地震学报, **1**(2): 57~61
- 都昌庭, 杨广华. 2001. 青海省河南 $M_s 5.1$ 和玛沁 $M_s 5.0$ 地震后库玛断裂带的地震活动趋势研究[J]. 西北地震学报, **23**(2): 155~159
- 劳雄. 1989. 秀沟—玛沁断裂[J]. 中国地质科学院院报, **19**: 1~7
- 李春峰. 1995. 库玛活动断裂带东段全新世滑动速率及古地震活动特征分析[D]. [学位论文]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所与中国科学院研究生院, 29
- 李龙海, 贾云鸿. 1981. 一九三七年青海托索湖 7.5 级地震形变带特征[J]. 西北地震学报, **3**(3): 61~65
- 刘光勋. 1996. 东昆仑活动构造带及强震活动[J]. 中国地震, **12**(2): 119~126
- 刘光勋, 肖振敏, 谢新生, 等. 1996. 1937 年花石峡 7.5 级地震地表破裂带及有关问题[A]. 见:《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(5)[C]. 北京: 地震出版社, 136~153
- 青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所. 1999. 东昆仑活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1~186
- 任金卫, 汪一鹏, 吴章明, 等. 1993. 青藏高原北部库玛断裂带东、西大滩段全新世地震形变带及其位移特征和水平滑动速率[J]. 地震地质, **15**(3): 285~288
- 涂德龙, 孙洪斌, 许勤. 2000. 青海省玛沁县 5.0 级地震的烈度分布及其构造环境[J]. 高原地震, **12**(1): 22~28
- 闻学泽. 1989. 地震的平均重复周期、可预报复发模式及其应用中的有关问题[J]. 四川地震, (2): 8~16
- 肖振敏, 刘光勋, 王焕贞, 等. 1988. 青海花石峡地震形变带的初步研究[J]. 中国地震, **4**(1): 68~75
- 张瑞斌, 张晓梅, 王赞军, 等. 2002. 东昆仑断裂带强震构造条件研究[J]. 高原地震, **14**(1): 26~31
- 张瑞斌, 赵培林, 陈玉华. 1996. 东昆仑活动断裂带的强震构造条件及未来强震危险区分析[J]. 高原地震, **8**(3): 12~21
- Kidd W S F, Molnar P. 1988. Quaternary and active faulting observed on the 1985 Academia Sinica-Royal Society Geotraverse of Tibet[J]. *Phil Trans R Soc Lond*, **A**, **327**: 337~363
- Van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, *et al.* 2002. Uniform post-glacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from ^{26}Al , ^{10}Be and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology[J]. *Geophys J Int*, **148**: 356~388
- Van der Woerd J, Ryerson F J, Tapponnier P, *et al.* 1998. Holocene left-slip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun fault (Qinghai, China)[J]. *Geology*, **26**: 695~698
- Van der Woerd J, Ryerson F J, Tapponnier P, *et al.* 2000. Uniform slip-rate along the Kunlun fault: Implications for seismic behavior and large-scale tectonics[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 2 353~2 356
- Wallace R E. 1970. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault[J]. *Bull Geol Soc Amer*, **81**: 2 875~2 890
- Zhao Guoguang, Liu Dequan, Wei Wei, *et al.* 1992. The Late Quaternary slip rate and segmentation of the Xianshuihe active fault zone[A]. *Proceedings of the PRC—USA Bilateral Symposium on the Xianshuihe Fault Zone*[C]. Beijing: Seismological Press, 41~57

PALEO-EARTHQUAKE STUDIES ON THE EASTERN SECTION OF THE KUNLUN FAULT

Li Chunfeng¹⁾ He Qunlu²⁾ Zhao Guoguang²⁾

1) MOE Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract: Roughly along the Animaqing Maji peak, the Kunlun fault section between the Tuosuo Lake and Kendingna (east Maqin) can be subdivided into two geometric segments: the Huashixia and the Maqin segments. These two segments behave differently in their Holocene slip rates and paleo-earthquake activities, with obviously higher paleo-seismic activity on the Huashixia segment than on Maqin segment. As many as four strong Holocene earthquakes are identified on the Huashixia segment from trenching and geomorphic studies. The recurrent interval for the latest three earthquakes are at about 500 a and 640 a, respectively. On the Maqin segment, at least three paleo-earthquake events can be defined from trenching, with a recurrent interval for the latest two events at about 1 000 a. $M=7.5$ earthquakes on Huashixia segment recur at every 411 to 608 years with a characteristic slip at 5.75 ± 0.57 m. Although the Maqin segment is less active, its accumulated strain energy during the long time period since last earthquake occurred (about 1 070 a BP) deserves enough notice on its future earthquake probabilities.

Key words: Kunlun fault zone; Holocene slip rate; paleo-earthquake; earthquake recurrent interval; risk estimation of strong earthquake