

文章编号: 1006-6616 (2010) 02-0176-13

鲜水河断裂带全新世活动性研究进展综述

熊探宇^{1,2}, 姚 鑫^{1,2}, 张永双^{1,2}

(1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 鲜水河断裂带是中国西南山区一条现今活动强烈的大型地震断裂。本文在系统总结前人研究成果的基础上, 结合野外地质调查, 综述了鲜水河断裂带空间展布特征、活动性质及强度、历史地震地表破裂特征、地震危险性等方面的研究进展。前人研究结果表明, 鲜水河断裂带以惠远寺为界可分为两段, 进一步可细分为八段; 断裂带全新世以来以左旋走滑为主, 兼具逆冲性质; 整条断裂现今走滑活动速率约为 10mm/a 左右, 垂向变形在 2mm/a 以内; 其中断裂带北西段活动速率为 10~20mm/a, 南东段则小于 10mm/a, 一般为 5mm/a 左右; 断裂带地震活动频繁, 地震活动性北西段明显高于南东段, 强震迁移呈明显的跳跃式特征并具有原地复发性质; 断裂带历史地震地表破裂特征与玉树地震所报道的地表破裂特征一致; 断裂带地震危险性评价具很多不确定因素, 研究程度相对较低。

关键词: 鲜水河断裂; 活动速率; 地震活动; 地震危险性; 地表破裂

中图分类号: P642

文献标识码: A

0 引言

近年相继发生昆仑山口西地震 (2001 年 $M_s 8.1$)、汶川地震 (2008 年 $M_s 8.0$)^[1-8]和玉树地震 (2010 年 $M_s 7.1$)^[9-11]后, 进一步引起人们对鲜水河地震活动带的关注。鲜水河断裂带是中国西南山区一条现今活动强烈的大型左旋走滑断裂带, 具有规模大、活动性强、地震频度高等特点。通常所说的鲜水河断裂带主要是指北起甘孜东谷附近, 大体呈 NW-SE 向展布, 经炉霍、道孚、康定延伸至泸定的磨西以南的部分, 全长约 350km^[12-13]。广义的鲜水河断裂带则包括鲜水河断裂和甘孜-玉树断裂^[14-15], 二者在甘孜附近呈左阶斜列, 在区域上共同构成中国西南川滇活动地块的北边界和巴颜喀拉地块的西南边界^[16] (图 1)。

实际上, 国内外关于鲜水河断裂带的相关研究成果非常丰富。在 20 世纪 80 年代以前, 鲜水河断裂带研究程度相对较低, 对其缺乏系统的认识。自 1967 年炉霍侏倭 $M_s 6.8$ 级地震、1973 年炉霍 $M_s 7.9$ 级地震特别是 1981 年道孚 $M_s 6.9$ 级地震发生以来, 我国许多单位和相关学者在该地区开展了系统的地震地质调查及大比例尺填图工作, 取得了丰硕的成果,

收稿日期: 2010-05-17

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目 (编号: 1212010914025, 1212011014035) 资助。

作者简介: 熊探宇 (1985-), 男, 博士研究生, 地质工程专业。E-mail: xiongtanyu@126.com。

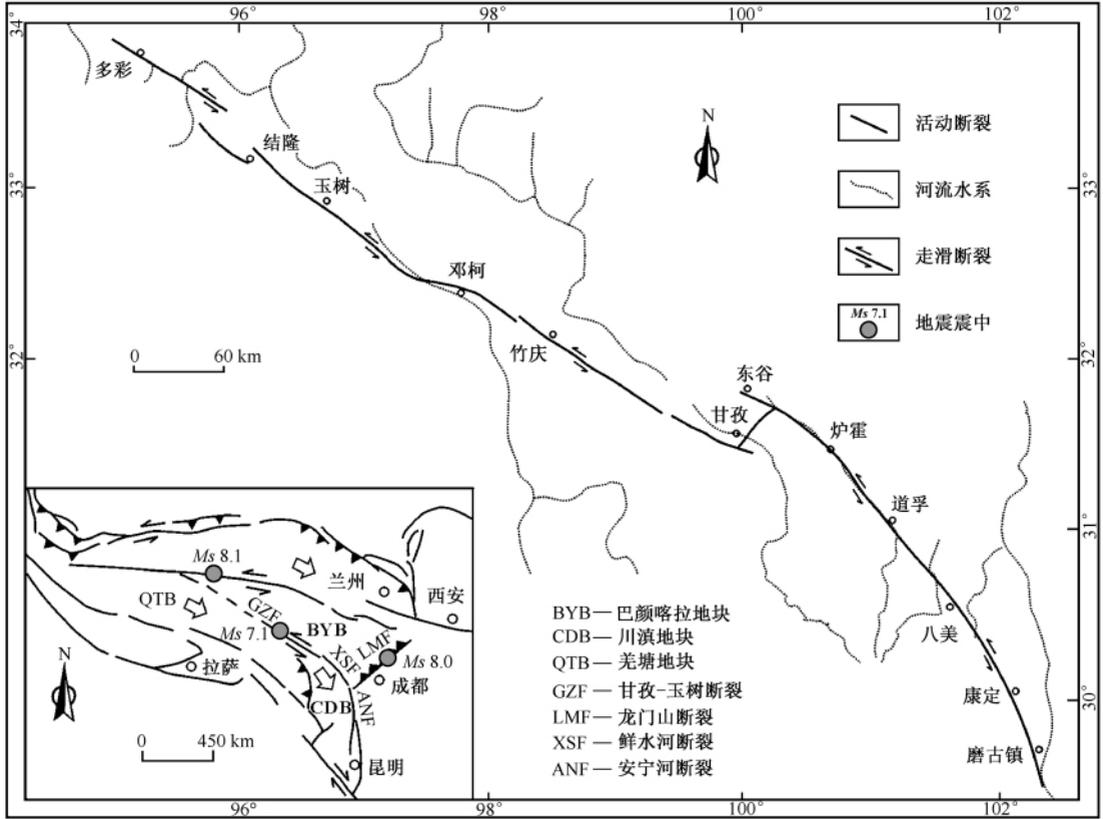


图 1 广义的鲜水河断裂带空间展布图 (据文献 [14] 修改)

Fig. 1 A sketch map showing distribution of generalized Xianshuihe fault zone

研究内容主要涉及鲜水河断裂带的地震地质条件、古地震研究、地壳形变监测、地震危险性等方面。国外研究学者也对鲜水河断裂充满了兴趣，如 20 世纪 30 年代美国地质学家 Amord · Heim 对鲜水河断裂带乾宁-炉霍一带进行了地质调查，并考察了 1923 年道孚 M_s 7.3 级地震^[17]；80 年代中期，美国加利福尼亚理工学院 C. R. Allen 教授与四川地震局罗灼礼、钱洪等人合作对鲜水河断裂带进行了系统地研究，并发表了相关研究论文^[18-20]。近年来，研究人员主要借助跨断层形变监测和 GPS 等技术，对鲜水河断裂带运动特征及形变场等进行了研究^[21-29]。

本文试图以断裂带沿线人口相对密集的康定至炉霍段为重点，通过总结前人在鲜水河断裂带空间展布、活动特征及地震危险性等方面的研究成果，为当前地壳运动趋于活跃的态势下，进一步研究与鲜水河断裂带相关的地震地质问题提供基础性依据。

1 鲜水河断裂带空间展布特征

鲜水河断裂带在空间上由一系列次级断裂组成。钱洪等 (1988)^[18]、闻学泽等 (1989)^[19]认为该断裂大体可分为 2 个大段和 5 个小段：以惠远寺为界，北西段可称为鲜水河断裂，结构较为单一；南东段则由 4 条大致平行斜列的断层组成，分别为雅拉河断裂、色拉哈断裂（又称康定断裂）、折多塘断裂及磨西断裂。

四川地震局李天昭等(1997)^[13]在地震地质调查及大比例尺活动断裂填图工作的基础上,对鲜水河断裂空间展布特征进行了较系统的研究,以惠远寺为界将鲜水河断裂划分为北西和南东两段。北西段由炉霍断裂、道孚断裂、乾宁断裂3条次级剪切断裂呈左阶羽列组合而成,几何形态和内部结构都比较单一。南东段由雅拉河断裂、中谷断裂、色拉哈-康定断裂、磨西断裂、折多塘断裂5条次级断裂组成,其几何形态和内部结构比较复杂(图2)。

总体而言,鲜水河断裂带北西段较为单一,南东段较为复杂,整体呈一略向北凸出的弧形。北西段各次级断裂长度分别为:炉霍断裂约90km,道孚断裂约85km,乾宁断裂约62km;南东段各次级断裂长度分别为:雅拉河断裂约31km,中谷断裂21km,色拉哈-康定断裂约80km、磨西断裂约40km,折多塘断裂约30km^[13]。各次级断裂由一系列的更次一级的断裂左行右阶组合而成。断裂总体倾向北东,局部倾向南西,倾角大致在55~80°之间^[30]。

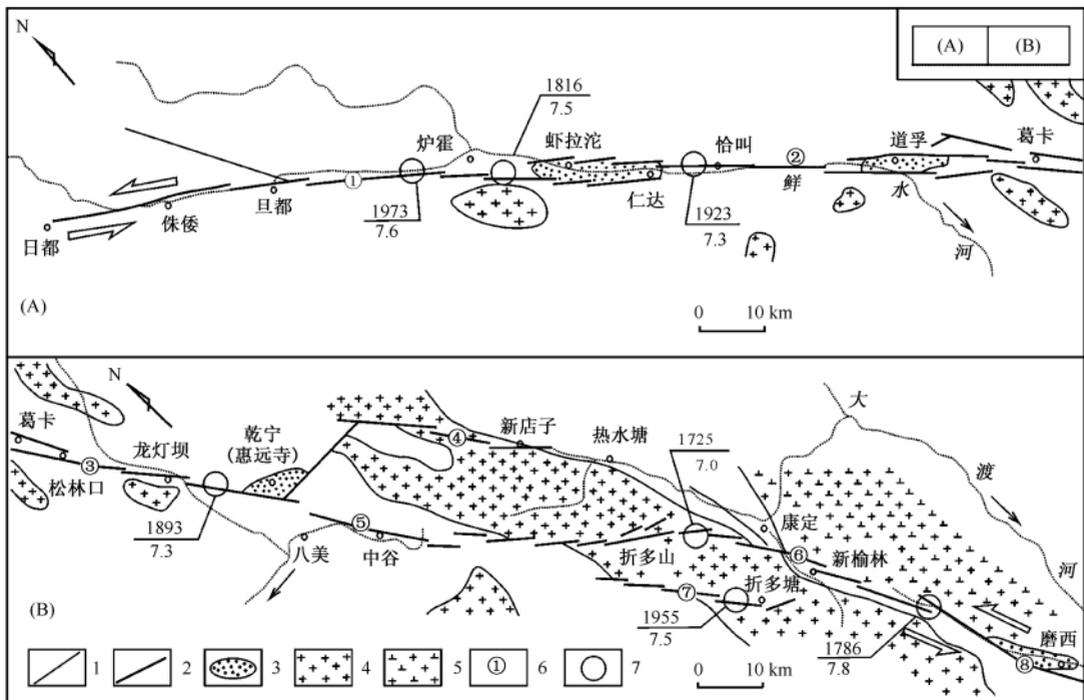


图2 鲜水河断裂带空间展布特征(据文献[13])

Fig. 2 A sketch map showing stretch of the Xianshuihe active fault zone

1. 活动断裂; 2. 前第四纪活动断裂; 3. 第四纪盆地; 4. 燕山晚期花岗岩; 5. 澄江-晋宁期斜长花岗岩; 6. 断裂编号: ①炉霍断裂; ②道孚断裂; ③乾宁断裂; ④雅拉河断裂; ⑤中谷断裂; ⑥色拉哈-康定断裂; ⑦折多塘断裂; ⑧磨西断裂; 7. 7.0级及以上地震震中和时间

2 鲜水河断裂带全新世活动特征

2.1 断裂活动性质

鲜水河断裂带全新世强烈的左旋走滑运动,在地貌上留下了非常醒目的痕迹。在航片上亦呈现明显的线性特征。沿断裂带水系、冲沟、洪积扇、河流阶地、冰碛垄岗、山脊及倒石

堆等常被左旋错断, 并且沿断裂带发育断塞塘、拉分盆地、构造石林等地貌^[13, 18, 30-33]。

松林口东南阶地被左旋断错现象^[18]、康定南洪积扇被主干断裂左旋错动 25m^[18]、炉霍附近鲜水河南西侧 9 条 I 级支流被断裂断错并发生同步左旋扭曲现象^[32]、道孚附近 10 条 I 级冲沟同步左旋“肘”状转折现象^[33]等等, 雄辩地证明了鲜水河断裂全新世以来强烈的左旋走滑运动。此外, 唐文清等 (2005)^[25]依据近年 GPS 监测数据, 判定鲜水河断裂带现今活动以左旋走滑为主, 局部具挤压性质。

事实上, 作者在野外地质调查过程中也发现, 鲜水河断裂带沿线地貌左旋错动特征非常明显, 在部分基岩断面上见最新一期擦痕侧伏角为 30°左右, 显示左旋压扭性质, 断面上挤压特征较明显。综上所述, 鲜水河断裂带全新世以左旋走滑运动为主, 局部具挤压性质。

2.2 断裂活动速率

断裂活动速率既是反映断裂活动强度的标志, 又是求取地震平均复发间隔的重要依据之一, 因此开展断裂活动速率研究具有十分重要的意义^[13]。多年来, 不少研究者采用地质学方法 (年代学及地貌学相结合)、地震矩张量反演法、跨断层形变监测以及 GPS 监测等对鲜水河断裂带现今活动速率进行了研究。

李天昭等 (1997)^[13]依据年代学及地貌学方法, 推算出鲜水河断裂带各分支断裂平均滑动速率分别为: 炉霍断裂 13 ± 5 mm/a, 道孚断裂 10 ± 2 mm/a, 乾宁断裂 10 ± 2 mm/a, 色拉哈-康定断裂 $6 \sim 7$ mm/a, 折多塘断裂 5 ± 1 mm/a, 中谷断裂 3 ± 1 mm/a, 雅拉河断裂 3 ± 1 mm/a; 磨西断裂 12 ± 2 mm/a。

钱洪等 (1988)^[18]利用地质学方法, 推算出鲜水河断裂带乾宁 (八美) 以北滑动速率为 15 ± 5 mm/a, 乾宁以南为 5.5 mm/a。闻学泽等 (1989)^[19]推算鲜水河断裂带北西段近代滑动速率为 15 ± 5 mm/a; 在南东段康定附近的色拉哈断裂为 5 mm/a; 在惠远寺南东的雅拉河断裂约为 1 mm/a。Allen et al. (1991)^[20]推算整个鲜水河断裂带滑动速率约为 10 ~ 20 mm/a。

程方正等 (2002)^[22]利用短水准观测资料, 分析计算了鲜水河断裂带垂向变形变化范围在 2 mm/a 内。在 GPS 监测方面, 乔学军等 (2004)^[23]计算得出其活动速率为 10.4 ± 0.2 mm/a。徐锡伟等 (2003)^[24]得出活动速率为 9.6 ± 1.7 mm/a; 唐文清等 (2005a, 2005b, 2007)^[25-27]先后得出活运动速率为 7.9 ~ 8.8 mm/a、 9.3 ± 2.8 mm/a、 8.67 ± 2.65 mm/a; 彭晋川等 (2007)^[28]得出活动速率为 12.3 ± 1.2 mm/a。

此外, 唐荣昌等 (1993)^[34]推算鲜水河断裂带全新世滑动速率为 $(9 \pm 1) \sim (15 \pm 5)$ mm/a。邓天岗等 (1989)^[35]推算出鲜水河断裂带炉霍段全新世 (Q_4) 以来滑动速率为 15 ~ 17 mm/a, 道孚段晚更新世 (Q_{3-4}) 以来活动速率为 11 ~ 12.5 mm/a, 康定段全新世 (Q_4) 以来滑动速率大于 10 mm/a。周荣军等 (2001)^[36]在断错地貌和年代学研究的基础上, 推算鲜水河断裂带乾宁-康定段各分支断裂晚第四纪以来的平均水平滑动速率分别为: 雅拉河断裂 (2.0 ± 0.2) mm/a, 色拉哈-康定断裂 (5.5 ± 0.6) mm/a, 折多塘断裂 (3.6 ± 0.3) mm/a, 磨西断裂 (9.9 ± 0.6) mm/a。孙建中等 (1994)^[37]利用地震矩张量反演, 得出鲜水河断裂带以 10.9 mm/a 速率发生左旋剪切运动。

综上所述, 依据地质学方法推算的鲜水河断裂带北西段滑动速率明显高于南东段活动速率, 北西段活动速率约为 10 ~ 20 mm/a, 南东段活动速率小于 10 mm/a, 一般为 5 mm/a 左右。这可能与断裂的展布特征有关, 北西段断裂较为单一, 而南东段由多条次级断裂分担了活动速率。利用仪器监测得出鲜水河断裂带整体上全新世平均走滑速率约为 10 mm/a 左右, 垂向

变形在 2mm/a 之内。

3 鲜水河断裂带地震活动特征

根据历史地震记录统计, 1700 年以来, 在鲜水河断裂带沿线共发生 $M_s \geq 5.0$ 级地震 48 次, 其中 $M_s = 6.0 \sim 6.9$ 级为 17 次, $M_s \geq 7.0$ 级为 9 次, 最大震级为 1786 年康定 8.0 级^[13, 35, 38]。距今最近的一次强震为 1981 年道孚 6.9 级地震。在 9 次 $M_s \geq 7.0$ 级的地震中, 位于断裂带南东段 3 次、北西段 6 次。如果包括 6.0 级地震在内, 则南东段发生 8 次 $M_s \geq 6.0$ 级地震, 而北西段发生 18 次。说明鲜水河断裂北西段地震活动性明显高于南东段。

3.1 强震活动的时间特点

自 1700 年至 2009 年, 鲜水河断裂带的地震活动性可明显地划分为 2 个活跃期和 1 个平静期^[35, 39]。第一活跃期从 1700 年康定 $M_s > 6.0$ 级地震开始到 1816 年炉霍俄米 7.5 级结束, 历时 116 年, 共发生 6.0 级以上地震 14 次, 该活跃期又可划分为 2 个小的活动段和 1 个小的平静段 (图 3)。之后 1817 年至 1892 年为平静期, 历时 85 年, 该期间未有 5.0 级以上地震记载^[35]。

第二活跃期从 1893 年乾宁 7¼ 级地震开始至今, 历时 117 年, 发生 6.0 级以上地震 12 次。同样地, 邓天岗等 (1989)^[35]认为该活跃期也可划分为 2 个活动段和 1 个平静段。考虑到 1988 年道孚县八美镇 5.0 级地震后至 2009 年该断裂带未发生过 5.0 级以上地震, 可认为 1988 年至 2009 年为第二活跃期的平静段。值得指出的是, 2010 年 4 月 14 日玉树 $M_s 7.1$ 级地震发生后, 4 月 28 日在八美镇附近又发生了 $M_s 4.5$ 级地震, 这是否意味着鲜水河断裂带地震活动将进入一个新的活动段, 还需要进一步研究。

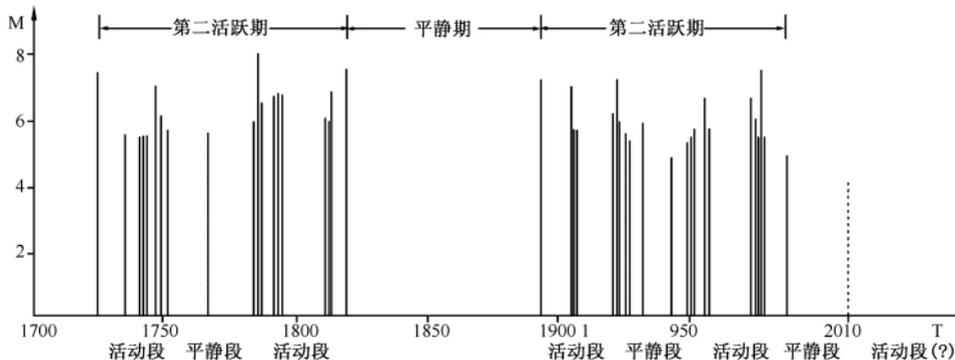


图 3 鲜水河断裂带强震 $M-T$ 图 (据文献 [35] 修改)

Fig. 3 A sketch map showing $M-T$ of earthquakes ($M \geq 5.0$) in Xianshuihe active fault zone

3.2 强震活动迁移规律

鲜水河断裂带强震具有明显的迁移规律, 主要表现为沿断裂带往复迁移活动和交替活动, 其中有的重复, 有的填空 (图 4), 呈跳跃式的迁移^[35]。说明一个地震活跃期未必造成鲜水河断裂带的全面断开, 而是相邻两个地震之间可以存在一个未破裂的地段^[39]。此外, 从 1967 年侏倭 $M_s 6.8$ 级地震、1973 年炉霍 $M_s 7.6$ 级地震、1981 年道孚 6.9 级地震可以看出, 强震沿着鲜水河断裂带具有往南迁移的规律; 下一次强震是否仍向南迁移应予以关注。

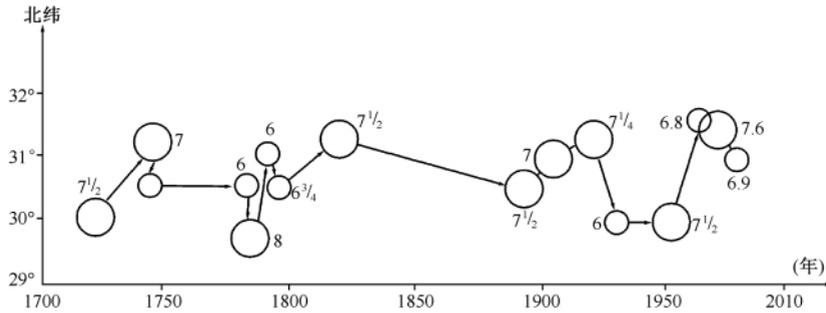


图 4 鲜水河断裂带 $M \geq 6$ 地震时空关系图 (据文献 [26] 修改)

Fig. 4 A map showing the tempo-spatial relationship of earthquakes ($M \geq 6.0$) in Xianshuihe fault zone

3.3 强震原地复发性

钱洪等 (1988, 1990)^[18, 40]通过对地震地表破裂野外调查认为, 鲜水河断裂带同等大小的强震明显存在原地重演性质, 即所谓的特征地震^[41]。如在炉霍西南尤斯附近, 鲜水河断裂带炉霍段使小山脊左旋位错 8m, 1973 年炉霍 $M_s 7.6$ 级地震使该山脊左旋错开 2m, 显然, 炉霍地震前沿断层已有 6m 错开, 可能是三次类似地震重复断错的结果^[40]。此外, 道孚万木卡处的山脊 5m 的左旋位错、炉霍格鲁附近的阶地多次累积断错, 均能说明强震的原地复发性^[40]。

钱洪等 (1990)^[40]对特征地震重复间隔进行了推算, 得出 1973 年炉霍 $M_s 7.6$ 级地震重复间隔为 150 年左右, 道孚、乾宁段 7 级地震重复间隔约为 100 年。

李天昭等 (1997, 1989)^[13, 42]通过古地震研究, 同样认为鲜水河断裂带强震活动具有原地复发性。并且依据探槽资料, 推算近 5000 年来, 鲜水河断裂带古地震 ($M_s > 7.6$ 级) 重复间隔在 250 ~ 500 年之间^[13]。

综上所述, 鲜水河断裂带强震具有原地复发性, 但是对于特征地震的确定及其重复间隔还待进一步研究。特别是, 特征地震震中位置是否一致, 特征地震发生对断错位移的影响以及鲜水河断裂带特征地震发生的内在机制等等仍待解决。

4 强震地表破裂特征

鲜水河断裂带沿线高频度的强震活动, 形成了一系列地表破裂。从前人研究结果来看, 鲜水河断裂带的地震地表破裂类型主要有: 单一直线型、斜列型、雁列型、鼓包型、锯齿型、羽状型、反“多”字型、“X”型等^[13, 32, 35, 43-44]。然而, 由于历史地震造成的地表破裂在后期常会由于人工改造或风化、剥蚀作用的影响, 现今在地表难以见到地震当时的破裂特征, 在野外地质调查中较为常见的是残留的地震陡坎及地震沟槽等。在地貌上, 还表现为断错水系、断错冲积扇、断错阶地、断错山脊和沟谷、断层崖、边坡脊、断塞塘、拉分断陷、构造石林等断层地貌 (图 5)。

前已述及, 甘孜-玉树断裂带和鲜水河断裂带同属大型左旋走滑断裂带, 根据前人描述的鲜水河断裂带地震地表破裂特征, 鲜水河断裂带历史地震造成的地表破裂与近期报道的玉树地震地表破裂特征是一致的^[45] (图 6)。

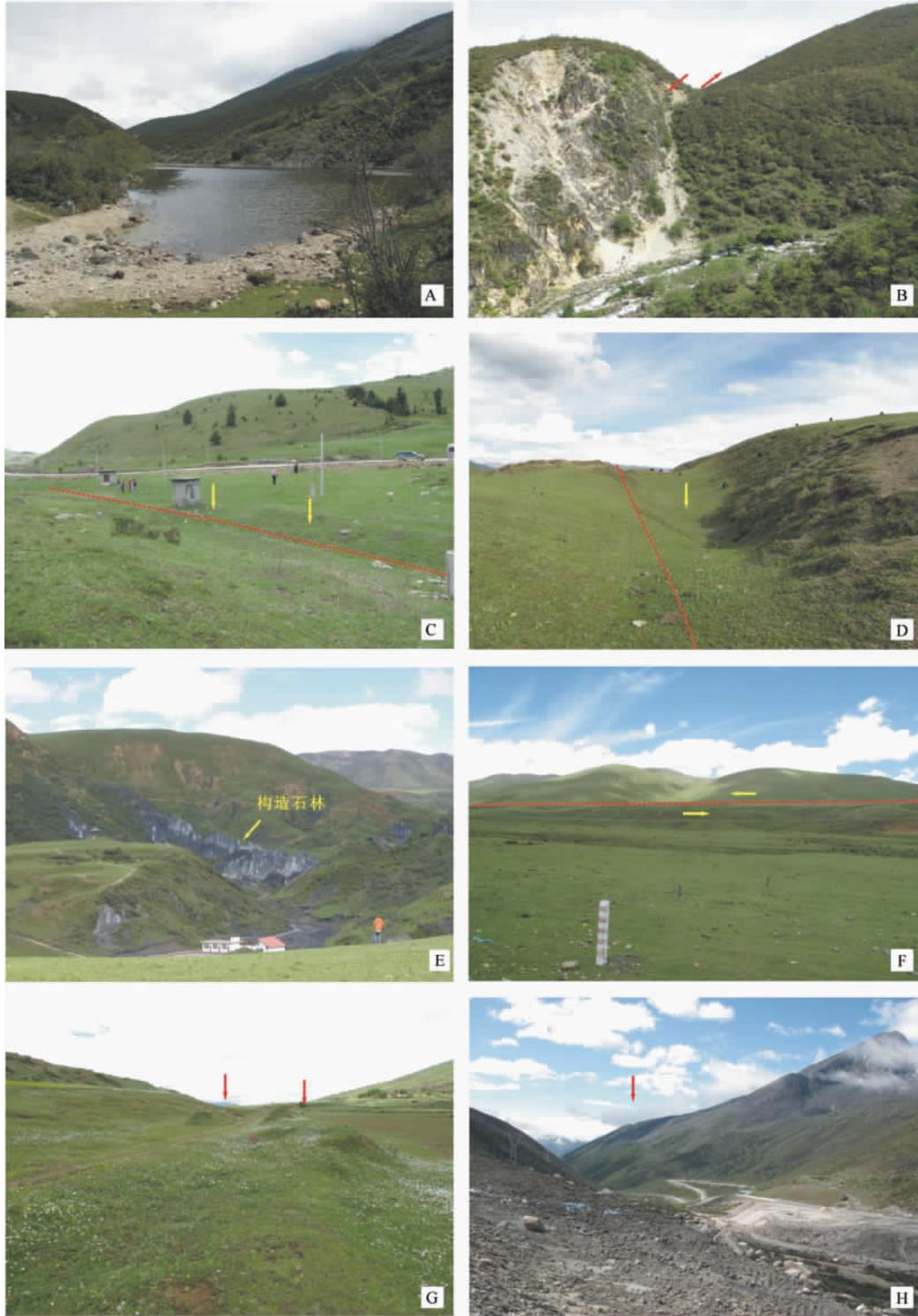


图 5 鲜水河断裂带地貌特征

Fig. 5 A sketch map showing the geomorphology of Xianshuihe active fault zone
 A-榆林乡南侧堰塞塘 (NW); B-新榆林南侧石灰窑沟山脊左旋错动 (NW); C-道孚南四十道班南东侧 1981 年道孚地震震槽及鼓包地貌 (SE); D-惠远寺北西侧沟槽地貌 (SE); E-八美镇南侧构造石林地貌 (E); F-松林口南东侧支沟左旋错动达 290m (NE); G-道孚县恰叫村北 1923 年 7.3 级地震陡坎及鼓包 (NW); H-折多山二台子道班南侧坡中槽地貌 (SE)

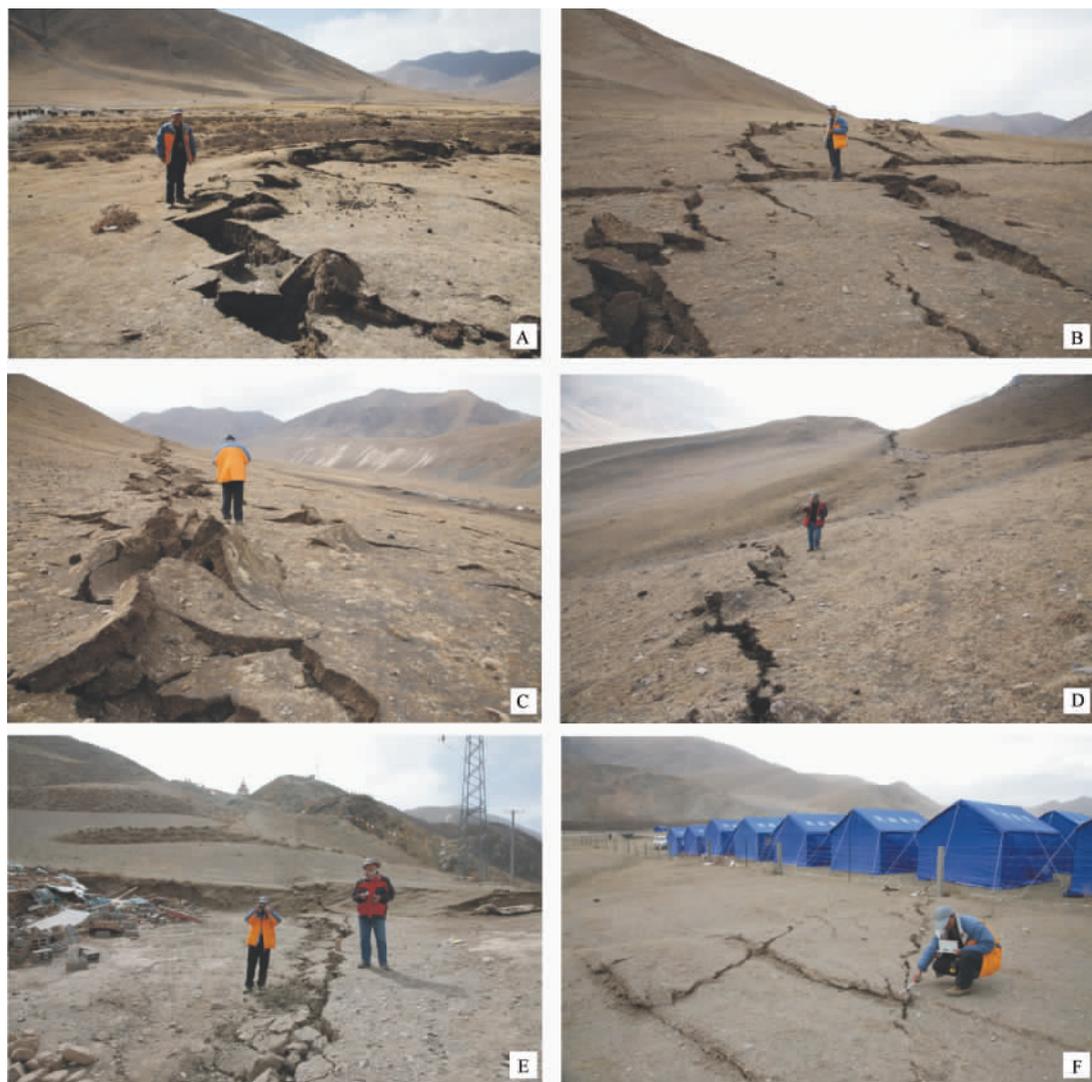


图 6 甘孜-玉树断裂带玉树地震地表破裂特征 (据文献 [45])

Fig. 6 A sketch showing the surface rupture characteristics left in Yushu earthquake along Garzê-Yushu fault

A-连续延伸的地震破裂 (NW); B-右阶排列的地震地表破裂 (NW); C-帐篷状构造 (NW);

D-地表破裂沿反向断坎发育 (SE); E-禅古村逆冲走滑型断坎 (SE); F-玉树县城区南部“X”型地裂缝 (NE)

5 鲜水河断裂带地震危险性评价

通常,地震危险性评价主要包括潜在震源区的划分和强震复发周期研究。李天昭等(1997)^[13]利用历史地震和统计学方法对鲜水河断裂带各段进行了地震危险性评估,得出以下结论:①鲜水河断裂带各段都具有发生6~6.5级地震的潜势,未来百年断裂带内地震平均复发间隔约为15年。未来三十年在雅拉河断裂上发生一次6.2级左右地震的可能性比较大,保守的最大概率值为56%;②乾宁断裂未来30年内有可能发生一次7.0级左右地震率为90%;③色拉哈-康定断裂未来30年内可能发生7.3级左右地震的概率为30%左右;

④断裂带的南东段未来 30 年内发生 7.5 级以上大震的最大概率为 52%。

钱洪等 (1988)^[18]采用地质学方法对鲜水河断裂带潜在震源区进行了划分,认为乾宁断裂在松林口-惠远寺一带具备发生 7.0 级左右地震的潜势。周荣军等 (2001)^[36]利用历史地震地表破裂、同震位错和古地震资料,对鲜水河断裂带乾宁-康定段进行研究认为,雅拉河、色拉哈-康定以及折多塘断裂,未来百年均不存在强震复发的可能性;而磨西断裂未来百年正处于新一轮的强震复发背景之中。

李坪等 (1993)^[38]采用模式识别法分别对鲜水河断裂带沿线 $M_s \geq 6.0$ 级和 $M_s \geq 7.0$ 级潜在震源区进行了划分。冉洪流等 (2006)^[46]运用地震矩方法,认为鲜水河断裂带北西段 $M_s \geq 6.7$ 级地震复发间隔约为 100~150 年。

可以看出,由于研究者知识背景和所掌握资料详尽程度的不同,所提出的预测结果有较大的差异。并且,将上述预测结果与现实对比可以发现,有些预测结果并未在现实中出现。但是从历史地震分析来看,未来 7.0 级左右地震最有可能发生于鲜水河断裂乾宁段。总体而言,地震危险性评价是一项非常复杂的工作,带有很多不确定因素,需要今后进一步研究。

6 结语

鲜水河断裂带是中国西南山区一条现今活动强烈的大型左旋走滑断裂带,具有规模大、活动性强、地震频度高等特点。本文在综合分析鲜水河断裂带相关研究成果的基础上,较系统地阐述了鲜水河断裂带的空间展布特征、活动特征及地震危险性等。

通过文献综述可以看出,尽管当前鲜水河断裂带全新世活动性研究取得了诸多进展,但是在很多方面还存在不足,不能满足国家重大工程建设规划的需要。例如,我国现行的强制性国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)在城镇与重大工程抗震设计中普遍采用。但是在西部构造活动强烈区,由于地质条件极其复杂,仅凭借地震动参数开展选址、建设是远远不够的^[47],必须加强区域地壳稳定性、山体稳定性研究,从而为城镇与重大工程规划提供合理的地震工程地质评价结果。

此外,鲜水河断裂带不仅是中国西南川滇活动地块的北边界和巴颜喀拉地块的西南边界,也是“Y 字型”构造带的重要组成部分,由于该区高山峡谷地貌占据很大比例,内外动力耦合作用加剧了地质灾害的发育强度,因此必须高度重视地震诱发地质灾害问题,加强活动断裂带灾难性地质灾害风险控制技术研究。

参 考 文 献

- [1] 王连捷,崔军文,周春景,等. 汶川 5.12 地震发震机理的数值模拟 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 105~113.
WANG Lianjie, CUI Junwen, ZHOU Chunjing, et al. Numerical Modeling for Wenchuan Earthquake Mechanism [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 105~113.
- [2] 王连捷,周春景,孙东升,等. 汶川 5.12 地震引起的库仑应力变化及其对周边地震活动的影响 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (3): 193~200.
WANG Lianjie, ZHOU Chunjing, SUN Dongsheng, et al. Coulomb stress changes caused by Wenchuan earthquake and its influence on seismic activity in the adjacent areas [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (3): 193~200.
- [3] 张永双,雷伟志,石菊松,等. 四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (2):

- 109 ~ 116.
- ZHANG Yongshuang , LEI Wei-zhi , SHI Ju-song , et al. General characteristics of 5. 12 earthquake-induced geohazards in Sichuan [J]. *Journal of Geomechanics* , 2008 , 14 (2) : 109 ~ 116.
- [4] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2) : 131 ~ 141.
- ZHANG Yongshuang , SHI Jushong , SUN Ping , et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geohazards [J]. *Journal of Geomechanics* , 2009 , 15 (2) : 131 ~ 141.
- [5] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应 [J]. *地质力学学报*, 2008, 14 (2) : 97 ~ 108.
- PENG Hua , MA Xiumin , JIANG Jingjie , et al. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress monitoring station [J]. *Journal of Geomechanics* , 2008 , 14 (2) : 97 ~ 108.
- [6] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2) : 114 ~ 130.
- PENG Hua , MA Xiumin , JIANG Jing-jie. Stability and stress measurement near the Qinchuan fault in the north Longmen Mountains [J]. *Journal of Geomechanics* , 2009 , 15 (2) : 114 ~ 130.
- [7] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. “5. 12” 汶川 $M_s 8.0$ 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2) : 142 ~ 150.
- TAN Cheng-xuan , SUN Ye , WU Shu-ren , et al. A consideration on regional crustal stability assessment after $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake in China [J]. *Journal of Geomechanics* , 2009 , 15 (2) : 142 ~ 150.
- [8] 姚鑫, 张永双. 基于差分干涉雷达的汶川地震同震形变特点 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2) : 151 ~ 161.
- YAO Xin , ZHANG Yongshuang. Co-seismic deformation of “5. 12” Wenchuan earthquake based on D-InSAR [J]. *Journal of Geomechanics* , 2009 , 15 (2) : 151 ~ 161.
- [9] 马寅生, 张永双, 胡道功, 等. 玉树地震地表破裂与宏观震中 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2) : 115 ~ 124.
- MA yinsheng , ZHANG Yongshuang , HU Daogong , et al. The Surface Ruptures And The Macroscopical Epicenter Of Yushu $M_s 7.1$ Earthquake [J]. *Journal of Geomechanics* , 2010 , 16 (2) : 115 ~ 124.
- [10] 姚鑫, 张永双, 杨农, 等. 玉树地震地表变形 InSAR 观测及初步分析 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2) : 129 ~ 136.
- YAO Xin , ZHANG Yong-shuang , Yang Nong , et al. D-InSAR Deformation Observation and Preliminary Analysis of the $M_s 7.1$ Yushu Earthquake [J]. *Journal of Geomechanics* , 2010 , 16 (2) : 129 ~ 136.
- [11] 王连捷, 崔军文, 王薇, 等. 青海玉树 $M_s 7.1$ 地震发震过程的数值模拟. *地质力学学报*, 2010, 16 (2) : 137 ~ 145.
- WANG Lianjie , CUI Junwen , WANG Wei , et al. Numerical modeling for Yushu $M_s 7.1$ earthquake mechanism [J]. *Journal of Geomechanics* , 2010 , 16 (2) : 137 ~ 145.
- [12] 罗灼礼, 钱洪, 闻学泽. 鲜水河断裂与圣安德列斯断层的地震地质对比研究 [J]. *四川地震*, 1987, (4) : 1 ~ 10.
- QIAN Hong , LUO zhuoli , WEN xuezi. Comparisons study between the Xianshuihe fault and San Andres fault [J]. *Earthquake research in Sichuan* , 1990 , 12 (1) : 22 ~ 29.
- [13] 李天招主编. 鲜水河断裂带及强震危险性评估 [M]. 四川: 四川科学技术出版社, 1997.
- LI Tiantiao , et al. The Xianshuihe fault zone and assessment of strong earthquake risk [M]. Sichuan: Science and Technology Press of Sichuan , 1997.
- [14] 周荣军, 闻学泽, 蔡长星, 等. 甘孜~玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计 [J]. *地震地质*, 1997, (2) : 115 ~ 124.
- ZHOU Rongjun , WEN Xueze , CAI Changxing , et al. Recent earthquakes and assessment of seismic tendency on the Ganzi-Yushu fault zone [J]. *Seismology and geology* , 1997 , (2) : 115 ~ 124.
- [15] Tapponnier. P. , P. Molnar. Active faulting and tectonics of China [J]. *J. G. R.* , 1977 , 82 , 2905 ~ 2930.
- [16] WEN Xueze , JIA Jinkang , PAN Mao , et al. Recent slip rates , earthquake recurrence intervals and strong seismic hazards on the northwestern segment of the Xianshuihe fault zone. *Earthquake Research in China* , 1988 , 2 (4) : 432 ~ 451.
- [17] Arnold Heim. Earthquake region of Taofu , Chinese Tibet [J]. *Geological Society of America Bulletin* , 1934 , 45 : 1035 ~ 1049.
- [18] 钱洪, C. R. 艾伦, 罗灼礼, 等. 全新世以来鲜水河断裂的活动特征 [J]. *中国地震*, 1988, 4 (2) : 9 ~ 18.
- QIAN Hong , C. R. Allen , LUO zhuoli , et al. The active characteristics of xianshuihe fault in Holocene [J]. *Earthquake*

- research in China ,1988 ,4 (2) : 9 ~ 18.
- [19] 闻学泽, C. R. 艾伦, 罗灼礼, 等. 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义 [J]. 地震学报, 1989, 11 (4) : 362 ~ 371.
WEN Xueze , C. R. Allen , LUO Zhuoli. Segmentation , Geometric features and their seismotectonic implications for the Holocene Xianshuihe fault zone [J]. Acta Seismologica Sinica ,1989 ,11 (4) : 362 ~ 371.
- [20] Allen. C. R , LUO Zhuo li , QIAN Hong et al. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China [J]. *Geol Soc Amer Bull* ,1991 ,1 (103) : 1178 ~ 1199.
- [21] 吕弋培, 廖华. 鲜水河断裂形变场、重力场、磁场动态演化特征与地震 [J]. 四川地震, 2001, (3) : 11 ~ 16.
LV Yi-pei , LIAO Hua. Dynamic evolution characteristic of deformation , gravity and geo-magnetism fields [J]. Earthquake research In Sichuan ,2001 , (3) : 11 ~ 16.
- [22] 程万正, 杨永林. 川滇地块边界构造带形变速率变化与成组强震 [J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22 (4) : 21 ~ 25.
CHENG Wanzheng , YANG Yongling. Deformation rate changes of tectonic belts along boundaries of Yunnan-Sichuan block and their relation to grouped strong earthquakes [J]. Crustal deformation and earthquake ,2002 ,22 (4) : 21 ~ 25.
- [23] 乔学军, 王琪, 杜瑞林. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征 [J]. 地球物理学报, 2004 (5) : 805 ~ 811.
QIAO Xuejun , WANG Qi , DU Ruilin. GPS; Characteristics of current crustal deformation of active blocks in the sichuan-yunnan region [J]. Chinese Journal of Geophysics ,2004 (5) : 805 ~ 811.
- [24] 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 川滇地区活动块体最新构造样式及动力学来源 [J]. 中国科学 (D 辑), 2003, 33 (s) : 151 ~ 162.
XU Xiwei , WEN Xueze , ZHENG Rongzhang , et al. Pattern of latest tectonic motion and dynamics of faulted blocks in Yunnan and Sichuan [J]. Science in Chian (Serise D) ,2003 ,33 (sup) : 151 ~ 162.
- [25] 唐文清, 刘宇平, 陈智梁, 等. 鲜水河断裂及两侧地块的 GPS 监测 [J]. 西南交通大学学报, 2005a, 40 (3) : 313 ~ 317.
TANG Wen qing , LIU Yu ping , CHEN Zhi liang. GPS monitoring of Xianshuihe fault and blocks on Its both sides [J]. Journal of southwest Jiaotong University ,2005a ,40 (3) : 313 ~ 317
- [26] 唐文清, 陈智梁, 刘宇平, 等. 青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交会区现今的构造活动 [J]. 地质通报, 2005b, 24 (12) : 1169 ~ 1172.
TANG Wenqing , CHEN Zhiliang , LIU Yuping , et al. Present-day tectonics activity in the intersection area of the Xianshuihe fault and Longmenshan fault on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Regional geology of China ,2005b ,24 (12) : 1169 ~ 1172.
- [27] 唐文清, 刘宇平, 陈智梁, 等. 基于 GPS 技术的活动断裂监测——以鲜水河、龙门山断裂为例 [J]. 山地学报, 2007, 25 (1) : 103 ~ 107.
TANG Wenqing , LIU Yuping , CHEN Zhiliang , et al. Monitoring of faults activity based on GPS [J]. Journal of Mountain Science ,2007 ,25 (1) : 103 ~ 107.
- [28] 彭晋川, 廖华, 顾铁, 等. 基于 GPS 连续站观测资料的鲜水河断裂运动特征研究 [J]. 四川地震, 2007, (4) : 14 ~ 17.
PENG Jin-chuan , LIAO Hua , GU Tie. Motion characteristics of the Xianshuihe fault based on observation data of GPS continuing-run reference stations [J]. Earthquake research in Sichuan ,2007 , (4) : 14 ~ 17.
- [29] 杨永林, 苏琴. 鲜水河断裂带现今活动特征研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27 (6) : 22 ~ 27.
YANG Yonglin , SU Qin. Study on present activity characteristics of Xianshuihe fault zone [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics ,2007 ,27 (6) : 22 ~ 27.
- [30] 唐荣昌, 韩渭宾, 黄祖智, 等. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
TANG Rongchang , HAN Weibin , HUANG Zuzhi. Active fault of Sichuan and Earthquake [M]. Beijing: Earthquake Press ,1993.
- [31] 潘懋, 梁海华, 蔡永恩, 等. 中国川西地区鲜水河断裂和则木河断裂几何学、运动学特征及地震活动性对比研究 [J]. 中国地震, 1994, 10 (1) : 28 ~ 37.
PAN Mao , Liang Haihua , Cai Yongen , et al. Comparision between the Xianshuihe fault zone and Zemuhe fult zone [J].

- Earthquake research in China, 1994, 10 (1): 28~37.
- [32] 唐荣昌, 文德华, 邓天岗, 等. 1973 炉霍 7.9 级地震的地裂缝特征及地震原因的初步探讨 [J]. 地球物理学报, 1976, 19 (1): 28~37.
TANG Rongchang, WEN Dehua, DENG Tiangan. Preliminary study on characteristics of crack and causation of 1973 Luhuo M_s 7.9 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 10 (1): 28~37.
- [33] 唐荣昌, 钱洪, 张文甫, 等. 道孚 6.9 级地震的地质构造背景与发震构造条件分析 [J]. 地震地质, 1984, 6 (2): 28~37.
TANG Rongchang, QIAN Hong, ZHANG Wenfu, et al. Analysis on tectonic background and earthquake structural conditions of Daofu M_s 6.9 earthquake [J]. Seismology and Geology, 1984, 6 (2): 28~37.
- [34] 唐荣昌, 韩涓宾. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
TANG Rongchang, HAN Weibin, et al. Active fault of Sichuan and Earthquake [M]. Beijing: Earthquake Press, 1993.
- [35] 邓天岗主编. 鲜水河活动断裂带 [M]. : 四川科学技术出版社, 1989.
Deng Tiangan, et al. The Xianshuihe active fault zone [M]. Sichuan: Science and Technology Press of Sichuan, 1997.
- [36] 周荣军, 何玉林, 黄祖智. 鲜水河断裂带乾宁-康定段的滑动速率与强震复发间隔 [J]. 地震学报, 2001b, 23 (3): 22~29.
ZHOU Rongjun, HE Yulin, HUANG Zuzhi, et al. The slip rate and strong earthquake recurrence interval on the Qianning-Kangding segment of the Xianshuihe fault zone [J]. Acta seismologica sinica, 2001b, 23 (3): 22~29.
- [37] 孙建中, 施顺英, 周硕恩等. 利用地震矩张量反演鲜水河断裂带现今运动学特征 [J]. 地壳形变与测量, 1994, 14 (4): 9~14.
SUN Jianzhong, SHI Shunying, ZHOU Shuoyu, et al. Inversion of the present kinematic characteristics of Xianshuihe fault zone from seismic moment tensor [J]. Crustal deformation and earthquake, 1994, 14 (4): 9~14.
- [38] 李坪. 鲜水河-小江断裂带 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
LI Ping, et al. the Xianshuihe-Xiaojiang fault zone [M]. Beijing: Earthquake Press, 1993.
- [39] 钱洪. 鲜水河断裂带上潜在震源区的地质学判定 [J]. 四川地震, 1988, 2: 20~28.
QIAN Hong. Identification of potential seismic area along the Xianshuihe zone [J]. Earthquake research in Sichuan, 1988, 2: 20~28.
- [40] 钱洪, 罗灼礼, 闻学泽, 等. 鲜水河断裂带上特征地震的初步研究 [J]. 中国地震, 1990, 12 (1): 22~29.
QIAN Hong, LUO zhuoli, WEN xuezi. Preliminary study of characteristic earthquakes in the Xianshuihe fault zone [J]. Acta Seismologica Sinica, 1990, 12 (1): 22~29.
- [41] Schwartz, D. P. ant Coppersmith K. J. , Fault behavior and characteristic earthquakes: example from the Wasatch and San Andreas fault zones [J]. J. Geophys. Res. 1984, 89, B7, 5681~5698.
- [42] 李天招, 杜其方. 鲜水河断裂带炉霍段的水平运动及地震的重复性研究 [J]. 地震地质, 1989, 11 (4): 31~42.
LI Tiantiao, DU Qifang. Horizontal displacement and earthquake recurrence along Luhuo segment of the Xianshuihe fault zone [J]. Seismology and Geology, 1989, 11 (4): 31~42.
- [43] 钱洪. 鲜水河断裂反“多”字型地裂缝带的成因机制 [J]. 地震地质, 1983, 5 (3): 75~80.
QIAN Hong. The formation of anti xi-type (ξ -type) ground crack zones along the Xianshuihe fault [J]. Seismology and Geology, 1983, 5 (3): 75~80.
- [44] 王新民, 裴锡瑜. 康定-泸定地区主要活断层与地震裂缝 [J]. 四川地震, 1998, 1~2: 46~56.
WANG Xinmin, PEI Xiyu. Main active faults and seismic fractures of the Kangding-Luding area [J]. Earthquake research in Sichuan, 1998, 1~2: 46~56.
- [45] 张永双, 马寅生, 胡道功, 等. 玉树地震地表破裂调查与灾后重建避让选址研究 [J]. 地质学报, 2010, 84 (5): 593~605.
ZHANG Yongshuang, MA Yinsheng, HU Daogong, et al. Investigation and Research on the Surface Rupture of the Yushu Earthquake and Reconstruction Site Selection [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84 (5): 593~605.
- [46] 冉洪流, 何宏林. 鲜水河断裂带北西段不同破裂源强震震级 ($M_s \geq 6.7$) 及复发间隔研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49 (1): 153~161.
RAN Hongliu, HE Honglin. Research on the magnitude and recurrence interval of characterized earthquakes with Magnitude

- $M_s \geq 6.7$ along the northwestern portion of the Xianshuihe fault zone in western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49 (1): 153 ~ 161.
- [47] 殷跃平, 张永双, 马寅生, 等. 青海玉树 $M_s 7.1$ 级地震地质灾害主要特征 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (3): 289 ~ 296.
- YIN Yueping, ZHANG Yongshuang, MA Yinsheng, et al. Research on major characteristics of geohazards induced by the Yushu $M_s 7.1$ earthquake. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (3): 289 ~ 296.

A REVIEW ON STUDY OF ACTIVITY OF XIANSHUIHE FAULT ZONE SINCE THE HOLOCENE

XIONG Tan-yu^{1,2}, YAO Xin^{1,2}, ZHANG Yong-shuang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The Xianshuihe fault zone is a large active seismic-genetic zone in mountainous regions of southwest China. Based on previous studies, in combination with field investigation, the authors systemically summarized the research status about Holocene activity of Xianshuihe fault zone. The fault zone is divided by the Huiyuan Temple into two segments, the northwestern and southeastern segments, which are sub-divided into eight parts. Since the Holocene, the fault has occurred as a strike slip fault with thrust characteristic. The whole strike-slip generally displays an activity rate of about 10mm/a and a vertical deformation of 2mm/a or less. The activity rate is changeable in the fault, e. g., 10 ~ 20mm/a in the northwestern segment but smaller than 10mm/a in the southeastern segment. Accordingly the seismic activity is significantly stronger in the northwestern segment than in the southeastern segment. The earthquakes occurred with skip metastasis and have recurrent nature *in situ*. The surface rupture characteristics recorded in the historical earthquakes are consistent with those reported in the earthquake surface rupture. The research on seismic risk assessment along the Xianshuihe fault zone needs to be greatly improved.

Key words: Xianshuihe fault zone; activity rate; seismic activity; seismic risk; surface rupture