

云南西南部黑河断裂晚第四纪分段活动特征*

方良好^{1,2}, 袁道阳^{1,3}, 邵延秀^{1,3}, 何文贵^{1,3}, 刘兴旺^{1,3}, 王爱国^{1,3}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 安徽省地震局, 安徽 合肥 230031;
3. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过野外活动断裂地质填图, 获得了云南西南部黑河断裂的断错微地貌、断错地层、最新活动时代及滑动速率等定量参数。对比分析表明, 黑河断裂具有较明显的分段活动特征, 根据断层几何特征大致可划分3条次级断裂段, 自西向东分别为沧源—木戛段、木戛—南代段和南代—勐往段, 各段晚第四纪以来新活动形成了丰富的断错地貌现象。由断层剖面及断错地貌特征分析, 黑河断裂全新世晚期具分段破裂特征, 其中沧源—木戛段存在古地震形变带, 其年代介于 (242 ± 44) a B. P. 和 $(1\ 714 \pm 49)$ a B. P. 之间, 木戛—南代段是1988年澜沧7.6级地震的主破裂带之一, 南代—勐往段全新世晚期有过活动, 最晚离逝时间介于 (550 ± 30) a B. P. 和 $(1\ 290 \pm 30)$ a B. P. 之间。根据对断错冲沟及台地的差分GPS测量和相应年代测试, 得到沧源—木戛段全新世以来的右旋走滑速率为 (4.0 ± 0.7) mm/a, 木戛—南代段全新世的右旋走滑速率为 (3.5 ± 0.8) mm/a。

关键词: 黑河断裂; 断裂分段; 最新活动时代; 滑动速率

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)04-0558-10

0 前言

1988年11月6日, 云南省西南部的澜沧县附近发生了一次7.6级地震, 根据震后灾害损失评估和科学考察结果, 该区的黑河断裂(也称木戛断裂)是本次地震的发震构造之一, 与北北西向的澜沧断裂共同导致了地震的发生(毛玉平, 张俊昌, 1991; 王凯等, 1991; 王辉等, 1991; 俞维贤等, 1994)。黑河断裂是滇西南地区一条规模较大的晚第四纪活动断裂, 在卫星影像上线性特征清晰, 新活动性强, 前人曾对该断裂沿线1988年澜沧7.6级地震地表形变带及震害特征进行过调查(谷一山等, 1990; 王辉等, 1991; 俞维贤等, 1991), 对黑河断裂中西段最新构造活动初步研究结果进行过介绍(方良好等, 2013), 对1988年澜沧7.6级地震前震源区的应力状态进行过分析(易桂喜等, 2014)。本文在对黑河断裂1:5万地质填图与综合研究的基础上, 根据全段断裂所获得的几何学特征、断错地质地貌特征及滑动速率的差异等, 探讨其分段活动特征。

1 断裂的几何分段特征

云南西南部发育了北西向的红河断裂、北北西向的腾冲—澜沧新生断裂带和近南北向的石皆断裂等多条规模较大的右旋走滑活动断裂带。其中, 腾冲—澜沧新生断裂带的最新构造活动切割了一系列北东向的左旋走滑断裂, 如大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、南汀河断裂、孟连断裂、打洛断裂等(虢顺民等, 2000; 向宏发等, 2000; 徐锡伟等, 2003; 程佳等, 2012)(图1a)。本文所研究的北西向黑河断裂与北北西向的腾冲—澜沧新生断裂带以小角度相交(图1b), 处在保山—普洱块体和密支那—西盟块体的交接部位, 共同构成这两个块体的边界断裂(徐锡伟等, 2003; 程佳等, 2012; 骆佳驥等, 2012)。

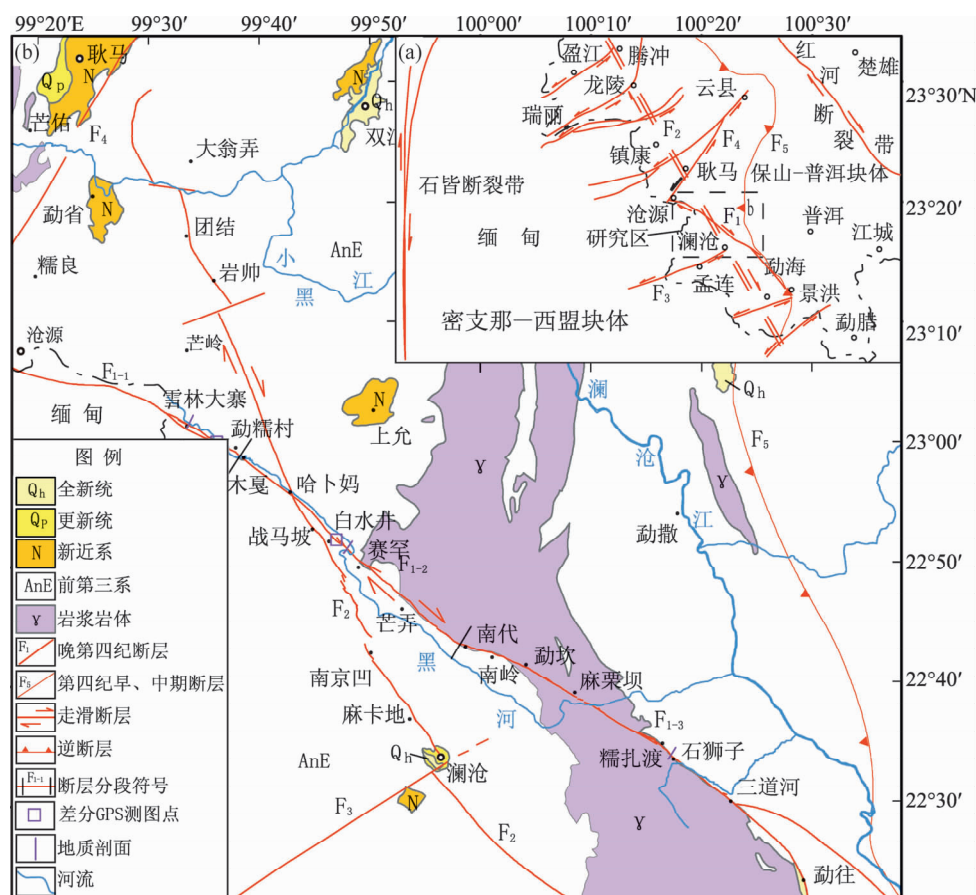
根据卫星影像解译和野外地质填图, 黑河断裂西起沧源附近, 沿雪林大寨、木戛、战马坡、芒弄、南岭、麻栗坝、糯扎渡、三道河一线, 东南端止于澜沧江断裂附近, 全长约168 km, 性质以右旋走滑为主, 走向 $280^{\circ} \sim 310^{\circ}$, 倾向南西或

* 收稿日期: 2014-12-29.

基金项目: 公益性行业科研专项《中国地震活断层探索—南北地震带中南段》(201108001)资助.

北东, 倾角 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 在战马坡村哈卜妈附近与北北西向的澜沧断裂 (区域上称为腾冲—澜沧新生断裂带) 相交 (图 1b)。黑河断裂的几何结构较为清晰, 分段特征明显, 由多条不连续的次级走滑断裂段组成, 在不连续段之间往往形成相应层次的阶区或其它分段标志, 主要有梭状构造、挤

压隆起、断裂分叉、拐弯和交汇等结构特征。其中断裂拐弯以及 1988 年澜沧 7.6 级地震分段破裂特征构成黑河断裂带分段的主要依据。据此可将该断裂划分为沧源—木戛 (F_{1-1})、木戛—南代 (F_{1-2})、南代—勐往 (F_{1-3}) 西、中、东 3 条次级断裂段 (图 1b)。



F_1 : 黑河断裂; F_2 : 澜沧断裂 (腾冲—澜沧新生断裂带); F_3 : 孟连断裂; F_4 : 南汀河断裂; F_5 : 澜沧江断裂

图 1 黑河断裂及邻区构造地质图 (据方良好等 (2013) 修改)

Fig. 1 Tectonic map of Heihe Fault and its adjacent area (modified by Fang *et al.* (2013))

沧源—木戛段 (F_{1-1}) 西起沧源以南, 经雪林大寨, 止于木戛盆地北侧; 在雪林大寨附近, 断裂呈长约 9 km、宽约 1 km 的梭状, 该段断裂长约 43 km, 走向 $280^{\circ} \sim 300^{\circ}$, 其线性影像极为清晰, 连续性好, 错断了一系列山脊、冲沟、阶地和台地等, 形成延伸性好的断裂沟槽、坡中谷和断层陡坎等 (方良好等, 2013)。

木戛—南代段 (F_{1-2}) 西起木戛盆地以南, 向南东经哈卜妈、战马坡、赛罕、芒弄, 止于南代以西, 全长约 45 km, 走向 $300^{\circ} \sim 310^{\circ}$; 该段断裂虽为 1988 年澜沧 7.6 级地震的主地表破裂带, 但

是断裂连续性较差, 多为断续分布。该段断裂与东段的南代—勐往段 (F_{1-3}) 之间走向发生了较大变化 (断裂拐弯), 由 310° 左右变成 285° 左右, 在南代形成一长约 1 km、宽约 300 m 的北西西向挤压隆起。

南代—勐往段 (F_{1-3}) 西起南代以西, 向东经南岭、麻栗坝、糯扎渡、三道河一线, 东南止于澜沧江断裂, 全长约 80 km, 走向 $285^{\circ} \sim 305^{\circ}$ 。该段断裂晚第四纪新活动性有所减弱, 主要表现为较宽阔的断裂谷地、断层垭口和一系列山脊、冲沟右旋位错等。

②层)及表土层(图2中①层)未被错动,表明其最新活动时代介于层②和层③之间,二者的¹⁴C树轮校正年龄分别为(242±44)a. B. P. 和(1714±49)a. B. P.,为时间早于1988年的另外一次地震地表破裂事件。实际上,在该断层剖面上还隐约可见1988年澜沧7.6级地震形成的地裂缝,但是并无位错显示。

2.2 木戛—南代段

该段断裂的地貌表现形式主要有:断层沟槽、断层垭口、断层陡坎以及山脊、冲沟右旋等断错地貌现象。如在战马坡村白水井一带,由于断层的右旋错动,使得小上河南岸山坡上的小冲沟发生右旋位错,位错量约9~14 m。这些小冲沟规模

相当,长约300 m,因形成时间较晚,尚未发育阶地等伴生地貌,属于纹沟级别的小冲沟(图3a、b)。紧邻其东侧还发育了一条较新鲜的断裂沟槽,走向305°,长约60 m,宽约10 m,沟槽两壁较陡,内有断层泉(图3c)。

本段断裂也是1988年澜沧7.6级地震的主破裂带之一。如在小上河南岸就残留了多条1988年澜沧7.6级地震的破裂带,其中一条破裂带走向约325°、长约40 m,断错了田埂,形成高约0.8 m的断层陡坎,陡坎倾向北东;另一条破裂带走向320°左右,长约30 m,致使多条田埂被一致性地右旋断错,最大右旋断错量1.5 m左右,垂直断错量0.3 m左右,陡坎倾向南西(图4)。

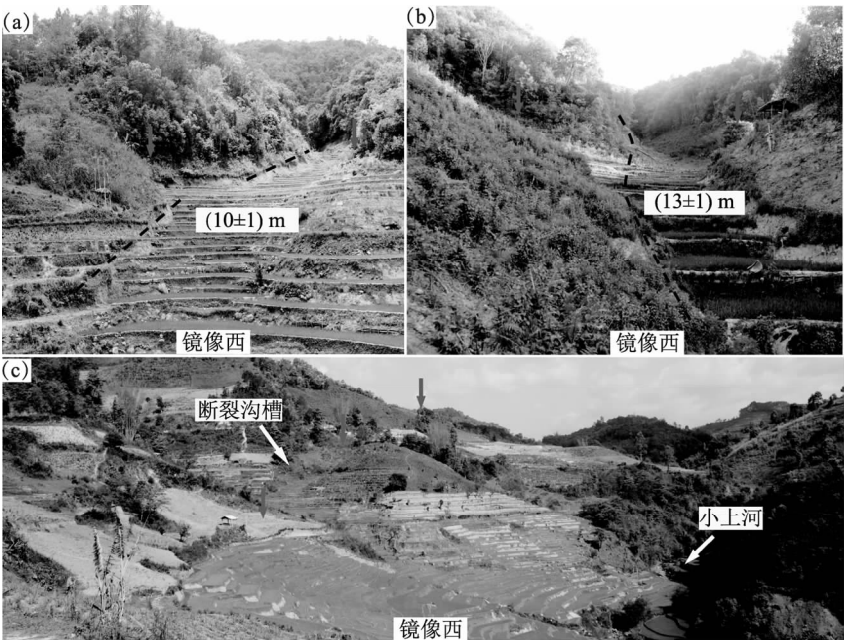


图3 白水井附近断层地貌
(a) 冲沟右旋位错; (b) 冲沟右旋位错; (c) 断层沟槽

Fig. 3 Fault landfor ms near Baishuijing
(a) dextral dislocation of gully; (b) dextral dislocation of gully; (c) fault trench



图4 白水井附近1988年临沧7.6级地震陡坎

Fig. 4 Seismic scarp formed in Lancang M7.6 earthquake in 1988 near Baishuijing

由上述断错地貌可见,黑河断裂中段(木夏—南代段)晚第四纪,尤其是全新世新活动明显,除了1988年澜沧7.6级地震形变带外,最小的位错值约10 m,并形成低矮的断层陡坎。

2.3 南代—勐往

该段断裂在地貌上主要表现为:基岩山与山前缓坡的分界线、宽缓的断层沟谷、沟槽、断层垭口以及位错量较大的山脊和冲沟右旋等断错地貌。如在石狮子以东的卢山老寨附近,就表现为一系列较宽阔的断层垭口以及中高山与山前台地的分界线,断裂从两套不同岩性地层的分界线处通过,北侧为土灰色砂土,南侧为红色粘土、砂土(图5a)。同时,断裂通过处使两个山脊发生同步右旋,右旋量分别为 (70 ± 5) m(图5b)和 (22 ± 2) m(图5c)。

在糯扎渡东省道309公路边一小饭店(孟连饭店)对面断层切过一小山坡,造成明显的右旋断错地貌和断层沟槽(图6),横跨断层沟槽开挖了一个探槽(图7,位置见图1b)。

在探槽剖面上,沿断面可见清晰的断层泥,呈土黄色、灰红色,新鲜、松软,厚约0.3 m,如图7所示;断层性质表现出一定的正断分量,断裂切穿深灰绿色砂、碎石层(④层),垂直错距大于0.5 m,其上覆土褐色粘土层(⑤层)及土灰色至深灰色残坡积层(⑥层)未被错动,表明其最新断错的活动时代介于层④和层⑤之间。经采样测试,层③的光释光样品测年结果为 (2.3 ± 1.5) ka B. P.,层④和层⑤的 ^{14}C 树轮校正年龄分别为 (1290 ± 30) a B. P. 和 (550 ± 30) a B. P.,表明该段断层全新世晚期以来有过活动。

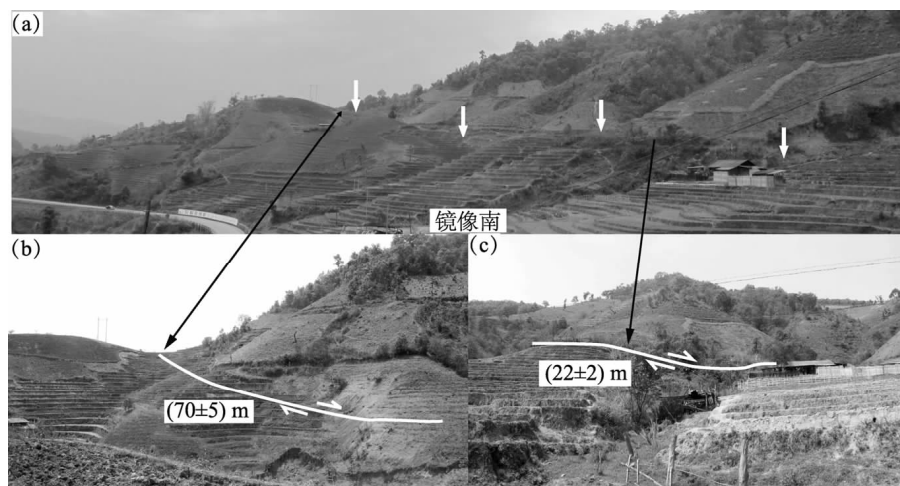


图5 卢山新寨附近断层地貌

(a) 断层地貌; (b) 右旋山脊; (c) 右旋山脊

Fig. 5 Fault landforms near Xinzhai, Lushan

(a) fault landforms; (b) dextral dislocation of ridge; (c) dextral dislocation of ridge

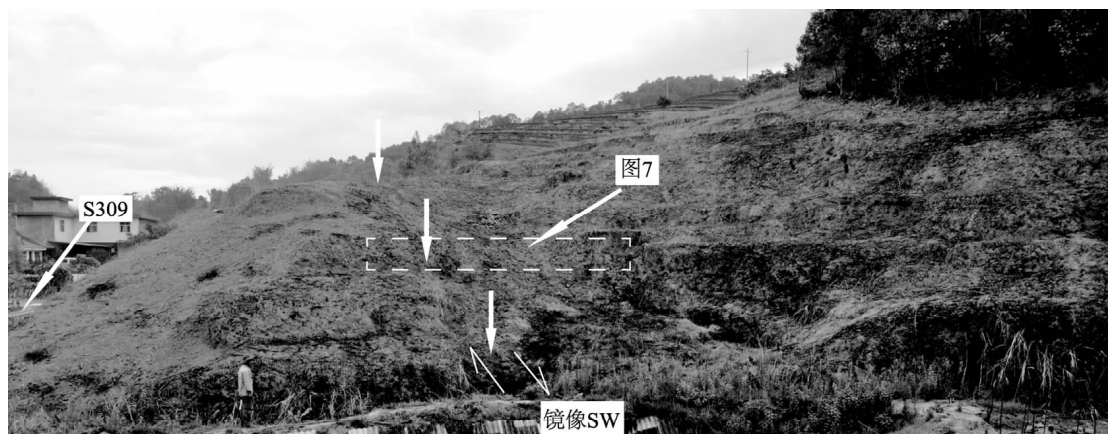


图6 孟连饭店附近断层地貌

Fig. 6 Fault landforms near Mengliang Restaurant

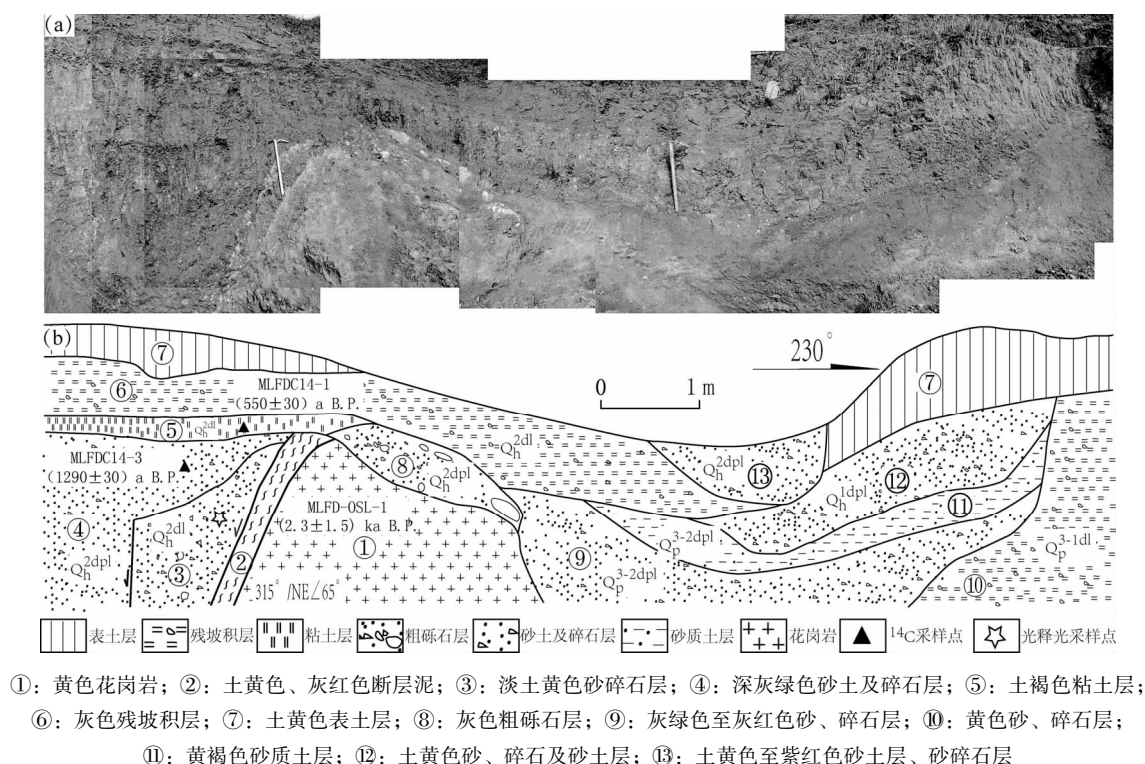


图7 孟连饭店附近断层剖面

(a) 断层剖面照片；(b) 断层剖面

Fig. 7 The fault profile near Mengliang Restaurant

(a) the picture of fault profile; (b) fault profile

3 断裂右旋走滑活动特征分析

3.1 断裂沿线右旋走滑特征

黑河断裂的右旋走滑活动造成了断裂沿线一系列冲沟、山脊、阶地等右旋位错。根据断裂沿线卫片解译和实地测量得到了不同地貌单元的水平断错值，其量值从1 m左右到几百米不等。通过实测和对比分析发现，本区冲沟的位错量与跨过断裂后冲沟上游的长度呈正相关。该地区的冲沟大致可划分为3个级别，即长度2.5~5 km冲沟、1.5~2.5 km冲沟、小于1 km纹沟。

图8为黑河断裂沿线水平位错值分布图，从图中可见，沿断裂冲沟的水平位错量具有明显的分组和分段现象。不同规模的冲沟在相同断裂段内位错量不同，总体来说冲沟越长位错量越大；同一级别的冲沟在不同断裂段之间位错量具有一定的差异，总体表现为北西段位错量较大、南东段位错量较小的趋势，这与地貌上北西段最清晰、构造活动强，向南东断错地貌变差、构造活动减

弱的现象相吻合。其中，在沧源—木戛段内最小级别的断错量为雪林大寨附近1 m左右的田埂位错（图8中方形），这与中段1988年澜沧7.6级地震在震中战马坡附近形成的1 m左右田埂右旋位错量（图8中星形）相当（俞维贤等，1991）。

3.2 断裂右旋滑动速率

研究区由于受人类耕种活动、降雨侵蚀等影响，地貌改造极为严重，加之红土发育，年代样品测试困难，给断裂滑动速率研究带来了极大困难，难以获得地貌既典型而样品又满足要求的理想地点。为了确定黑河断裂较可靠的右旋走滑速率，我们选择了勐糯村采石场南和战马坡村白水井两处相对较典型阶地断错地貌进行差分GPS测量（位置见图1b），并在相应的地貌面上采集了年代样品，进而分析确定其右旋走滑速率。

(1) 勐糯村采石场南

在沧源—木戛段（ F_{1-1} ）的勐糯村采石场南，黑河断裂在地貌上较为清晰，断裂活动造成山前一条较大冲沟发生右旋位错，致使冲沟两侧发育不对称的阶地（或台地），尽管有耕种活动影响，

但其地貌轮廓仍可分辨,可划分出 T_1 、 T_2 两级。其中冲沟西侧因断裂右旋走滑使其下游阶地陡坎被错离河道而免遭后期侵蚀(或相对较弱),其阶地发育较为典型,位错标志明显,可满足确定断裂滑动速率的要求;而沟的东侧下游阶地陡坎被错入河道而遭受强烈的侵蚀和改造,致使阶地面变狭窄,位错标志存在较大的不确定性(图9)。张培震等(2008)通过众多实例对比分析了河流阶地发育与断裂走滑活动之间的关系,认为山前被错离河道一侧阶地陡坎的位移在上阶地形成时

就已开始积累,因此,该阶地面的暴露年龄相当于位移积累的起始年代。另外,被错离河道一侧的阶地陡坎在下阶地停止侧蚀时也已开始累积位移,因此下阶地的初始沉积年代也代表阶地陡坎位移开始累积的时间。进而提出了3种利用河流阶地确定山前走滑断裂滑动速率的方法:①利用上下阶地年龄限定;②利用上阶地废弃年代限定错离河道一侧陡坎位移的起始年龄;③是利用下阶地初始沉积年龄限定错离河道一侧陡坎位移的起始年龄。Zhang等(2007)重新分析了阿尔金断裂

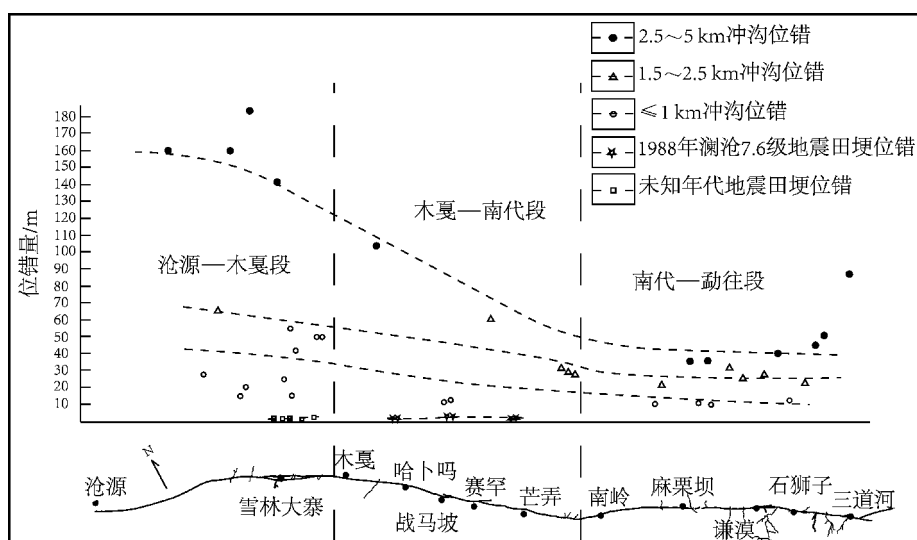


图8 黑河断裂水平位错值分布图

Fig. 8 The distribution map of horizontal displacement value along the Heihe Fault

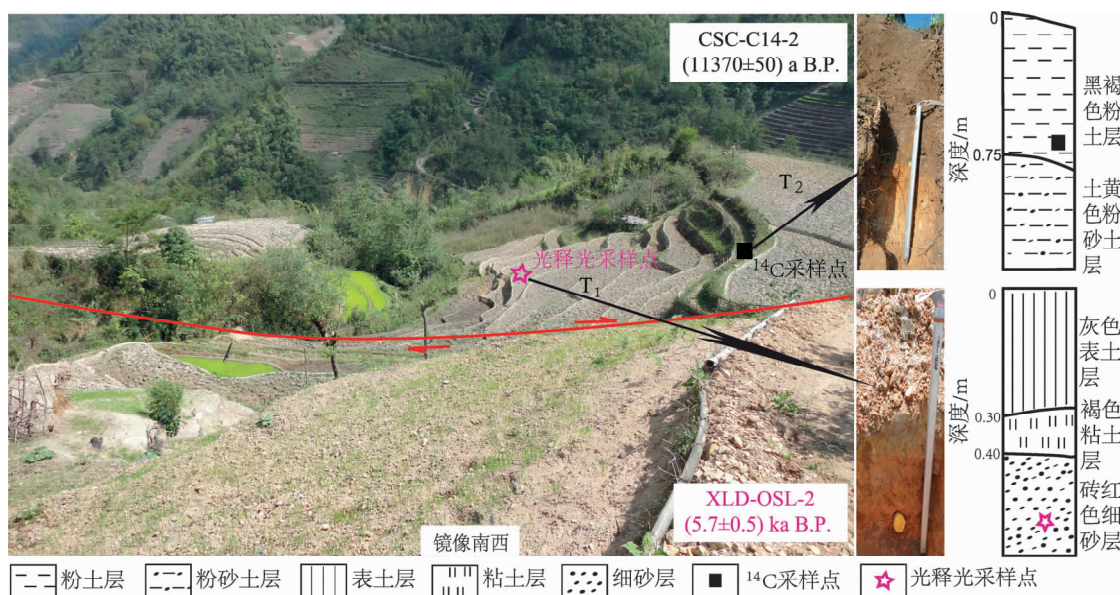


图9 勐糯村采石场南断错地貌及采样剖面

Fig. 9 Fault landforms and sample profile in the south of quarry near Mengnuo Village

车尔臣河的阶地演化和左旋位移的关系, 提出应该用高阶地 T_2 的废弃年代作为陡坎 T_1/T_2 的起始年龄, 得到了滑动速率为 $(10.0 \pm 2.4) \text{ mm/a}$ 。根据对河流阶地演化的分析, Eric (2007) 提出, 如果阶地陡坎的位移量大于河道位移量, 位移的起始时间就应该相当于陡坎之上阶地的废弃时间。利用这一判据, 并重新分析了车尔臣河阶地陡坎 T_1/T_2 的位移量, Eric (2007) 给出的滑动速率是 $(9.4 \pm 2.3) \text{ mm/a}$, 与 Zhang 等 (2007) 利用 T_2 阶地暴露年龄得到的速率一致, 上述结果与跨阿尔金断裂的 GPS 观测结果非常吻合。因此。上述方法②应是最接近断裂真实滑动速率的可选方法。

经过差分 GPS 测量和位错标志对比, 得到采石场南冲沟西侧 (被错离一侧) T_2 阶地前缘右旋断错 $(48 \pm 5) \text{ m}$, T_1 阶地前缘右旋断错 $(21 \pm 3) \text{ m}$, 同时, 在沟底还可见 $(7 \pm 3) \text{ m}$ 的右旋断错值 (图 10)。与此同时, 我们选择该冲沟西侧阶地面较完整宽阔的 T_2 阶地, 在其前缘距顶约 0.7 m 处, 岩性为含较多炭质的黑褐色粉土 (该层属于阶地被废弃后上部新的堆积物, 而下部沉积的土黄色粉砂土, 才真正属于 T_2 阶地自身的堆积物) 中采集了 ^{14}C 样品, 其树轮校正年龄为 $(11\,370 \pm 50) \text{ a B.P.}$, 该年代代表了 T_2 阶地形成后因断裂走滑活动被错离而逐渐废弃的暴露年代; 同时, 在 T_1 阶地前缘距顶约 0.6 m 处呈砖红色细砂层 (该层属 T_1 阶地形成过程中的堆积物) 中采

集了光释光样品, 其年龄为 $(5.7 \pm 0.5) \text{ ka B.P.}$, 该年代代表了 T_1 阶地开始堆积的初始年代。本区地貌发育过程及其与走滑断裂的关系类似于阿尔金断裂及其山前冲沟的发育过程, 因此, 我们采用张培震等 (2008) 提出的利用上阶地废弃年代作为限定错离河道一侧陡坎位移的起始年龄的方法 (方法②)。即采用 T_2/T_1 阶地前缘的位错量 $(48 \pm 5) \text{ m}$ 和 T_2 阶地废弃后的暴露年代 $(11\,370 \pm 50) \text{ a B.P.}$, 得到其走滑速率为 $(4.22 \pm 0.45) \text{ mm/a}$, 该结果应接近其真实值; 同样, 我们采用 T_1/T_0 阶地前缘的位错量 $(21 \pm 3) \text{ m}$ 和 T_1 阶地堆积的初始年代 $(5.7 \pm 0.5) \text{ ka B.P.}$ (未获得 T_1 阶地上部的暴露年代), 得到走滑速率为 $(3.76 \pm 0.86) \text{ mm/a}$, 该结果可能略小于其真实值; 综合分析可以得到其全新世以来右旋滑动速率为 $(4.0 \pm 0.7) \text{ mm/a}$ 。

(2) 战马坡白水井

在木戛—南代段 (F_{1-2}) 战马坡村白水井一带断错地貌较清晰, 由于断层的右旋走滑活动, 使得该区的小上河南岸东侧山坡上 4 条小冲沟发生同步右旋位错, 位错量 $9 \sim 14 \text{ m}$ 左右。我们选择其中一条右旋位错较典型的小冲沟进行了差分 GPS 测图 (图 3b), 结合 ^{14}C 年龄数据, 可以综合得到全新世以来右旋走滑速率为 $(3.5 \pm 0.8) \text{ mm/a}$ (方良好等, 2013)。该滑动速率与勐糯村采石场南利用冲沟阶地位错得到的滑动速率大体相当。

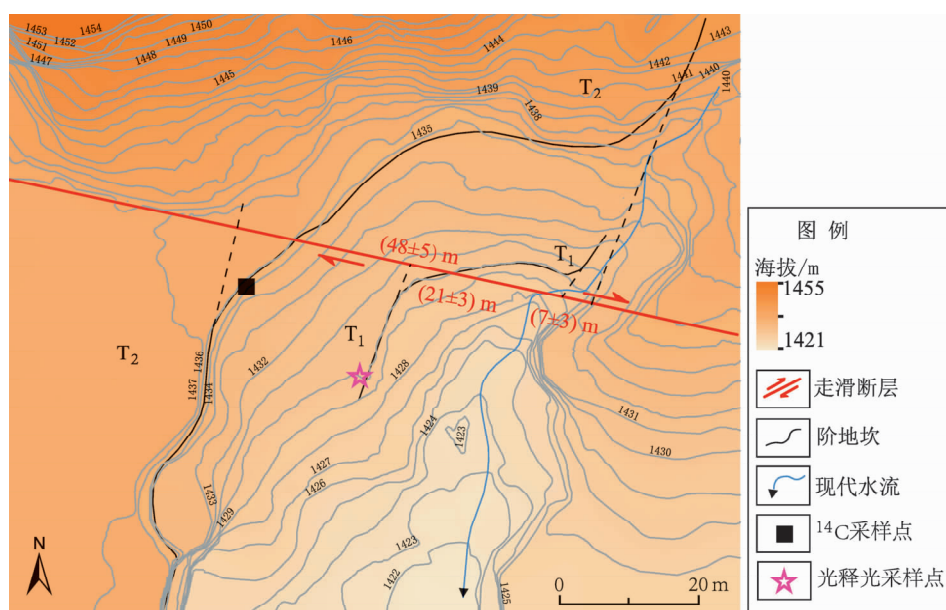


图 10 勐糯村采石场南差分 GPS 测图

Fig. 10 The differential GPS measurement map in the south of quarry near Mengnuo Village

(3) 断裂滑动速率分析

根据上述 2 处较为典型断错地貌的研究, 得到沧源—木戛段 (F_{1-1}) 勐糯村采石场南右旋滑动速率为 $(4.0 \pm 0.7) \text{ mm/a}$, 而木戛—南代段 (F_{1-2}) 战马坡村白水井的右旋滑动速率大致为 $(3.5 \pm 0.8) \text{ mm/a}$, 具有从西向东衰减的特征, 这与断裂沿线从西向东位错幅度 (图 8) 逐渐递减的特征相一致。在区域上, 黑河断裂位于红河断裂以西的滇西南地区, 该区内发育有 NE—NEE 和 NW—NNW 向两组活动断裂带, 在 SW—NE 向挤压构造应力作用下 (崔效锋等, 2006; 钱晓东等, 2011), 这些 NE—NEE 向的走滑断裂均以左旋水平滑动为主 (Anne, Manuel, 2005; Morley, 2007), 而 NW—NNW 向的断裂则以右旋水平滑动为主。该区内的 NE 向断裂多为继承性活动断裂, 相对区内 NW、NNW 向活动断裂的晚第四纪活动速率偏小 (杜义等, 2012), 如 NE 向大盈江断裂晚更新世以来北东段左旋滑动速率为 $1.5 \sim 2.5 \text{ mm/a}$, 南西段左旋滑动速率为 $1.2 \sim 1.6 \text{ mm/a}$ (常祖峰等, 2011; 安晓文等, 2009), NE 向的龙陵—瑞丽断裂 (南支) 北段晚更新世以来左旋滑动速率为 2.2 mm/a , 全新世以来左旋滑动速率为 $1.8 \sim 3.0 \text{ mm/a}$ (杜义等, 2012), 而 NW 向的红河断裂晚更新世以来右旋滑动速率为 3.3 mm/a (虢顺民等, 2001), NW 向腾冲—澜沧断裂带晚更新世以来右旋滑动速率为 $4 \sim 6 \text{ mm/a}$ (向宏发等, 1999; 徐锡伟等, 2003)。对比发现, 本文所得到的黑河断裂沧源—木戛段和木戛—南代段全新世以来的右旋滑动速率 $3.5 \sim 4.0 \text{ mm/a}$, 与该区域 NW 向主要断裂的滑动速率大致吻合, 反映了其区域构造活动的整体性和协调性。

4 结论

(1) 黑河断裂总体走向 $280^\circ \sim 310^\circ$, 性质以右旋走滑为主, 兼少量倾滑分量, 倾向南西或北东, 倾角 $60^\circ \sim 75^\circ$, 总长度约 168 km, 根据断层几何特征可将该断裂分为沧源—木戛 (F_{1-1})、木戛—南代 (F_{1-2})、南代—勐往 (F_{1-3}) 3 条次级断裂段。

(2) 由断层剖面及断错地貌特征分析, 黑河断裂全新世具分段破裂特征, 其中沧源—木戛段存在

古地震地表破裂带, 其年代介于 $(242 \pm 44) \text{ a B. P.}$ 和 $(1\ 714 \pm 49) \text{ a B. P.}$ 之间; 木戛—南代段是 1988 年澜沧 7.6 级地震的主破裂带之一; 南代—勐往段全新世晚期有过活动, 最晚离逝时间介于 $(550 \pm 30) \text{ a B. P.}$ 和 $(1\ 290 \pm 30) \text{ a B. P.}$ 之间。

(3) 黑河断裂是一条晚第四纪以来较活跃的断裂, 其各段滑动速率有一定差异, 总体表现出北西段滑动速率较大, 南东段减小的特点, 这与地貌上北西段清晰, 向南东断错地貌变差的现象相吻合。其中, 沧源—木戛段全新世以来右旋滑动速率为 $(4.0 \pm 0.7) \text{ mm/a}$; 木戛—南代段全新世以来综合右旋滑动速率大致为 $(3.5 \pm 0.8) \text{ mm/a}$ 。

文中 ^{14}C 样品由美国 BETA 放射性碳实验室和北京大学第四纪年代实验室测定, OSL 样品由山东省土力学及年代学试验室测定, 在此一并感谢。

参考文献:

- 安晓文, 常祖峰, 石静芳. 2009. 大盈江断裂西南段晚第四纪活动研究[J]. 地震研究, 32(2): 193—197.
- 常祖峰, 陈刚, 余建强. 2011. 大盈江断裂晚更新世以来活动的地质证据[J]. 地震地质, 33(4): 877—888.
- 程佳, 徐锡伟, 甘卫军, 等. 2012. 青藏高原东南缘地震活动与地壳运动所反映的块体特征及其动力来源[J]. 地球物理学报, 55(4): 1198—1212.
- 崔效锋, 谢富仁, 张红艳. 2006. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义[J]. 地震学报, 28(5): 451—461.
- 杜义, 张效亮, 黄学猛, 等. 2012. 龙陵—瑞丽断裂北段晚第四纪活动性特征及强震复发间隔[J]. 震灾防御技术, 7(3): 215—226.
- 方良好, 袁道阳, 邵延秀, 等. 2013. 滇西南地区黑河断裂中西段晚第四纪构造活动特征[J]. 地震工程学报, 35(2): 342—353.
- 谷一山, 周瑞琦, 俞维贤. 1990. 1988 年 11 月 6 日澜沧—耿马地震灾害[J]. 灾害学, 11(1): 53—60.
- 虢顺民, 计凤桔, 向宏发. 2001. 红河活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1—172.
- 虢顺民, 向宏发, 徐锡伟, 等. 2000. 滇西南龙陵—澜沧第四纪新生断裂带特征和形成机制研究[J]. 地震地质, 22(3): 277—284.
- 骆佳骥, 崔效锋, 胡幸平, 等. 2012. 川滇地区活动块体划分与现代构造应力场分区研究综述[J]. 地震研究, 35(3): 309—317.
- 毛玉平, 张俊昌. 1991. 澜沧—耿马地震发震构造初步研究[J]. 地震研究, 14(1): 9—15.
- 钱晓东, 秦嘉政, 刘丽芳. 2011. 云南地区现代构造应力场研究[J]. 地震地质, 33(1): 91—95.
- 王凯, 高莉萍, 姚振兴, 等. 1991. 澜沧—耿马地震的震源机制研究[J]. 地球物理学报, 34(5): 569—580.
- 王辉, 强祖基, 袁著忠, 等. 1991. 1988 年云南澜沧—耿马地震的烈度分布及地表破裂[J]. 地震学报, 13(3): 344—353.

- 向宏发, 徐锡伟, 虢顺民, 等. 1999. 滇西地区两组交叉型活动断裂及其地震地质意义[A]//中国地震局地质研究所. 活动断裂研究(7)[M]. 北京: 地震出版社, 81-87.
- 向宏发, 徐锡伟, 虢顺民, 等. 2000. 川滇南部地区活动地块划分与现今运动特征初析[J]. 地震地质, 22(3): 253-264.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学(D辑), 33(增刊): 151-162.
- 易桂喜, 付虹, 王思维, 等. 2014. 1988年澜沧—耿马地震前震源区应力状态分析[J]. 地震研究, 37(3): 332-338.
- 俞维贤, 柴天俊, 侯学英. 1991. 澜沧7.6级地震形变带[J]. 地震地质, 13(4): 343-352.
- 俞维贤, 周瑞琦, 侯学英, 等. 1994. 澜沧—耿马地震的成因机制[J]. 地震学报, 16(2): 160-166.
- 张培震, 李传友, 毛凤英. 2008. 河流阶地演化与走滑断裂滑动速率[J]. 地震地质, 30(1): 44-57.
- Anne, Manuel. 2005. Cenozoic deformation in western Yunnan (China - Myanmar border) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 495-515.
- Eric C. 2007. Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting; Revisiting the Chermen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 254: 239-255.
- Morley C. K. 2007. Variations in late Cenozoic-recent strike-slip and oblique-extensional geometries, within Indochina; The influence of pre-existing fabrics [J]. Journal of Structural Geology, 29: 36-58.
- Zhang P. Z., Molnar P., Xu X. W. 2007. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonics, 26, TC5010, doi: 10.1029/2006TC002014.

Late Quaternary Active Characteristic of Segmentation of the Heihe Fault in Southwest Yunnan

FANG Liang-hao^{1,2}, YUAN Dao-yang^{1,3}, SHAO Yan-xiu^{1,3}, HE Wen-gui^{1,3},
LIU Xing-wang^{1,3}, WANG Ai-guo^{1,3}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(2. Anhui Earthquake Administration, Hefei 230031, Anhui, China)

(3. Lanzhou National Geophysical Observatory, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

Through field geological investigation, we obtained the quantity factor of Heihe Fault in southwest Yunnan, such as the dislocation microrelief, displaced stratum, the newest active age and slip rate etc. It turns out that the Heihe fault zone has the obvious characteristics of the segmented activities by comparing and analyzing. Basing on the geometrical features of the Heihe Fault, we divided it into three secondary fault segments: Cangyuan-Muga, Muga-Nandai, Nandai-Mengwang, and a variety of dislocation landforms had been formed in the new fault activities of each segment since the late Quaternary. We analyzed the fault section and fault landform characteristic, and obtained that the Heihe Fault had the characteristic of segmentation rupture in late Holocene. The deformation zones of paleoseismic were discovered on the Cangyuan-Mujia segment. The carbon dates of faulted and un-faulted deposit showed that some earthquake had occurred between (242 ± 44) a. B. P. and (1714 ± 49) a. B. P.. The Mujia-Nandai segment was one of the main rupture zones of Lancang $M_s 7.6$ earthquake in 1988. The Nandai-Mengwang segment was active during the late Holocene, and its elapsed time was between (550 ± 30) a. B. P. and (1290 ± 30) a. B. P. at the latest. According to the differential GPS measurement and the corresponding sample dating of dislocation gully and terrace, we obtained that the right-lateral strike slip rate of Cangyuan-Mujia segment and Mujia-Nandai segment were (4.0 ± 0.7) mm/a and (3.5 ± 0.8) mm/a respectively during the late Holocene.

Key words: Heihe Fault; segmentation of fault; the recent active time; slip rate