

甘肃北山南缘断裂的活动特征及其意义

云龙¹⁾, 张进²⁾, 徐伟³⁾, 刘志成³⁾

1) 核工业北京地质研究院, 中核高放废物地质处置评价技术重点实验室, 北京, 100029;

2) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 3) 中国地震灾害防御中心, 北京, 100029

内容提要:在河西走廊北侧, 北山南缘发现活动断裂, 称之为北山南缘断裂。该断裂位于金塔县城北侧, 距县城约 50 km。断裂全长约 18 km, 整体呈近东西向, 倾向北西, 倾角 60°~80°。该断裂晚第四纪以来的活动形成了一系列断错地貌, 断裂走滑运动使得多条冲沟发生同步肘状水平位错, 位错量 4.5~6.2 m, 平均位错量 5.2 m。断裂的北向逆冲形成清晰的线性陡坎, 陡坎落差 0.2~1.4 m。探槽揭露了至少 2 次快速滑动事件, 较老的一次发生于距今 30 ka 之前, 较新的一次发生在距今 8.4~3.3 ka。结合卫星影像、地貌和探槽等证据, 认为该断裂在晚更新世和全新世有过活动, 为一条以左旋走滑为主, 兼有逆冲分量的活动断裂。该断裂的活动可能揭示了青藏高原东北缘的扩展已穿越河西走廊, 进入北山地区。

关键词:北山; 青藏高原东北缘扩展; 北山南缘断裂; 活动特征

新生代以来, 青藏高原的形成与隆升受到地学界的广泛关注, 其应变的传递过程、分配方式及影响范围是众多学者关注的热点问题 (Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier et al., 1982; England and Houseman, 1986; Zhang Peizhen et al., 2007; Burchfiel et al., 2012; Ding Zhifeng et al., 2018; Ye Gaofeng et al., 2018)。青藏高原东北缘晚新生代以来发生了强烈的构造变形和构造隆升, 形成了一系列褶皱、逆冲断裂和走滑断裂 (Molnar and Tapponnier, 1975; Meyer et al., 1996; Yin An et al., 2002; Yuan Daoyang et al., 2013), 近几年针对高原东北缘的形变和演化开展了大量的研究 (Craddock et al., 2011; Yuan Daoyang et al., 2013; Zheng Weijun et al., 2013a, b, 2017; Zhang Huiping et al., 2012, 2014; Xiao Qibing et al., 2015; Wang Weitao et al., 2016a, b; Wang Yizhou et al., 2018), 取得了一系列的新认识。Zheng Weijun 等 (2013a, 2013b) 认为青藏高原东北缘的扩展已进入河西走廊。此后, Yu Jingxing 等 (2016, 2017) 对河西走廊内部和阿拉善地块南缘的桃花拉山、阿拉善右旗和雅布赖断裂开展了活动性调查, 认为高原东北缘的北东向扩展已影响到了阿拉善地块的南缘, 造成阿拉善南

缘先存构造的活化。Zuza 等 (2016) 提出了新生代以来高原北缘的非刚性书斜断裂模式, 认为高原东北缘的应变已深入至阿拉善地块内部, 应变分配通过一系列走滑断裂及伴生正断裂实现。在北山古生代造山带的南缘发育有一条近东西向的活动断裂 (图 1), 简称为北山南缘断裂, 这条活动断裂发育的位置特殊, 走向也与其南北地区的活动断裂不一致, 它的活动机制和特征目前也鲜有详细报道, 由于它的特殊性, 它的发育可能也是鉴别不同高原生长模型的重要条件。本文综合应用卫片解译、断错微地貌调查、探槽开挖和光释光测年等手段, 对该断裂的运动性质和活动时代开展了研究, 以期对青藏高原的生长模式提供资料。

1 北山南缘断裂概述

北山南缘断裂位于金塔盆地与北山交界位置 (疏勒河断裂) 的北侧, 据金塔县城约 50 km (图 1)。断裂西起大唐, 向东至野马井公路附近, 沿山前早中更新世的冲洪积砂砾石层分布, 全长约 18 km, 整体呈近东西向, 倾向北西, 倾角 60°~80°。断裂走向由近东西转为北西西, 又转为近东西向, 在东端又转为南东东 (图 2)。

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号: 41572190)、高放废物地质处置地下实验室工程前期科研项目 (编号: FZ1501) 和核工业北京地质研究院院长青年科技创新基金 (编号: QJ1601) 的成果。

收稿日期: 2018-09-05; 改回日期: 2019-04-26; 责任编辑: 刘志成。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.004

作者简介: 云龙, 男, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事活动构造及高放废物地质处置库选址方面的工作, Email: yunlneotectonic@126.com。

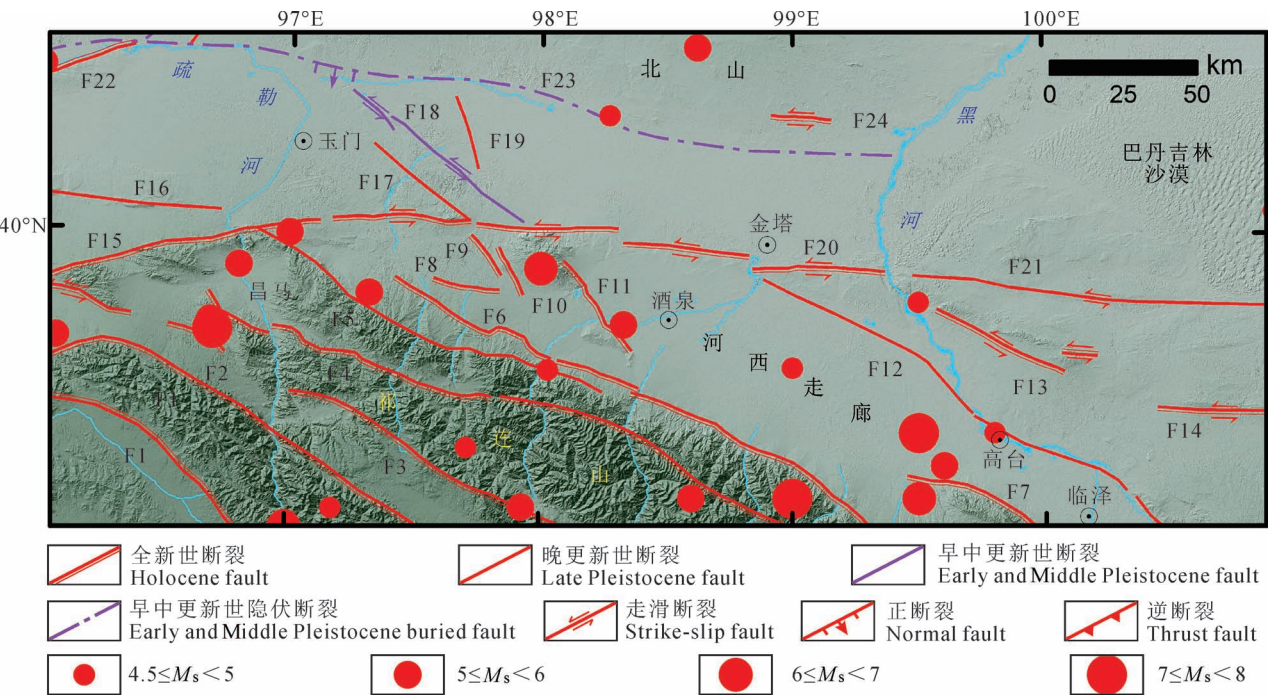


图 1 青藏高原东北缘断裂分布图

Fig. 1 Distribution of faults in the northeastern margin of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau

F1—中祁连山南缘断裂;F2—大雪山北缘断裂;F3—中祁连山北缘断裂;F4—昌马断裂;F5—早峡—大黄沟断裂;F6—玉门断裂;F7—榆木山北缘断裂;F8—白杨河断裂;F9—新民堡断裂;F10—阴洼山断裂;F11—嘉峪关断裂;F12—龙首山南缘断裂;F13—合黎山南缘断裂;F14—北大山断裂;F15—阿尔金断裂;F16—南截山断裂;F17—塔尔湾—登登山—池家刺窝断裂;F18—干峡山断裂;F19—花海断裂;F20—金塔南山北缘断裂;F21—慕少梁断裂;F22—三危山断裂;F23—疏勒河隐伏断裂;F24—北山南缘断裂;黄色虚线框代表研究区域

F1—The southern margin fault of middle Qilianshan Mountain; F2—Daxueshan fault; F3—The northern margin fault of middle Qilianshan Mountain; F4—Cangma fault; F5—Hanxia—Dahuanggou fault; F6—Yumen fault; F7—The northern margin fault of Yumushan Mountain; F8—Baiyanghe fault; F9—Xinminpu fault; F10—Yinwashan fault; F11—Jiayuguan fault; F12—The southern margin fault of Longshoushan Mountain; F13—The southern margin fault of Helishan Mountain; F14—Beidashan fault; F15—Altyn Tagh fault; F16—Nanjieshan fault; F17—Taerwan—Dengdengshang—Chijiawo fault; F18—Ganxiashan fault; F19—Huahai fault; F20—The northern margin fault of Jintananshan Mountain; F21—Mushaoliang fault; F22—Sanweishan fault; F23—Shulehe buried fault; F24—The southern margin fault of Beishan Mountain. Yellow dotted box indicated the research area

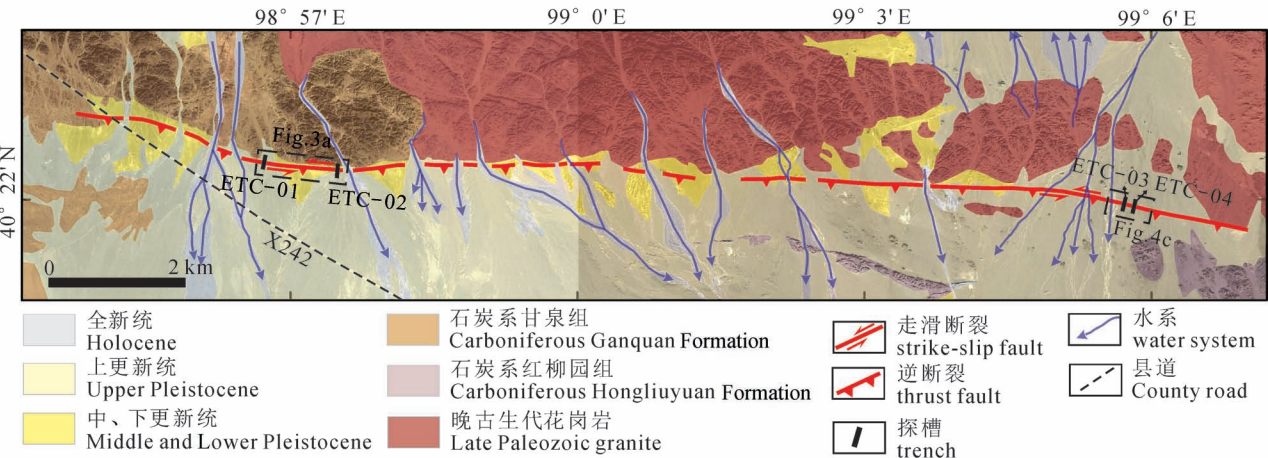


图 2 甘肃北山南缘断裂空间展布图

Fig. 2 The space layout of fault in the southern margin of Beishan, Gansu Province

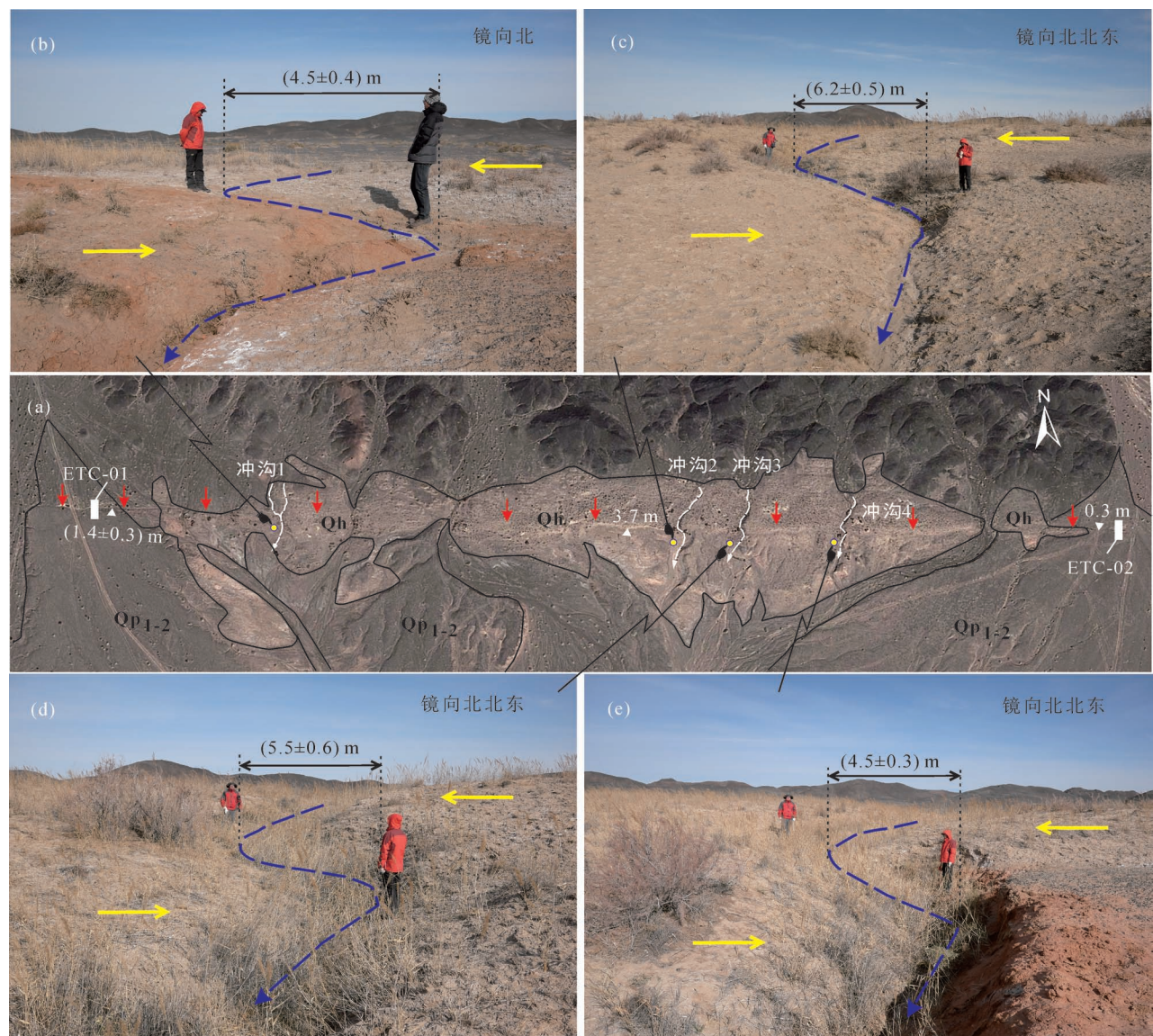


图 3 北山南缘断裂断错地貌及左旋断错水系

Fig. 3 Faulted landform and left-lateral offset drainage system of southern margin fault in Beishan

(a): 白色虚线指示断错冲沟,白色方框指示探槽的位置,白色三角形是指实测陡坎的位置,黄色实心点指示观察点位置;
(b)、(c)、(d)、(e):黄色箭头指示断裂运动方向,蓝色箭头指示水平断错冲沟
(a): white dotted line indicated the offset gullies, white box indicated the location of trenches, white solid triangles indicated the location of measured fault scarp, and yellow solid dots indicated the location of observation points; (b)、(c)、(d)、(e): yellow arrow indicated the movement direction of fault, and blue arrow indicated the offset gullies

断裂在影像上呈明显的线性分布。由于山前近代水系的侵蚀作用,断裂在地貌上呈间隔分布的线性陡坎,南高北低(图 2)。结合影像的解译结果,断裂在平面上未出现明显的几何分段。

2 断裂活动的微地貌响应

卫片解译和实地调查发现,该断裂穿过了除现代河床外的所有地貌面,断裂的垂直运动形成了不

同高度的断层陡坎,水平走滑运动在局部左旋断错了水系。

2.1 断裂两侧地层分布

断裂北侧由基岩山体构成,主要由晚古生代花岗岩、石炭系红柳园组和甘泉组变质砂岩、灰岩。断裂南侧主要分布两期冲洪积扇,较老一期被较新一期切割,在山前呈倒三角分布,以早中更新世冲洪积砂砾石为主,物源主要来源于断裂北侧基岩山体风

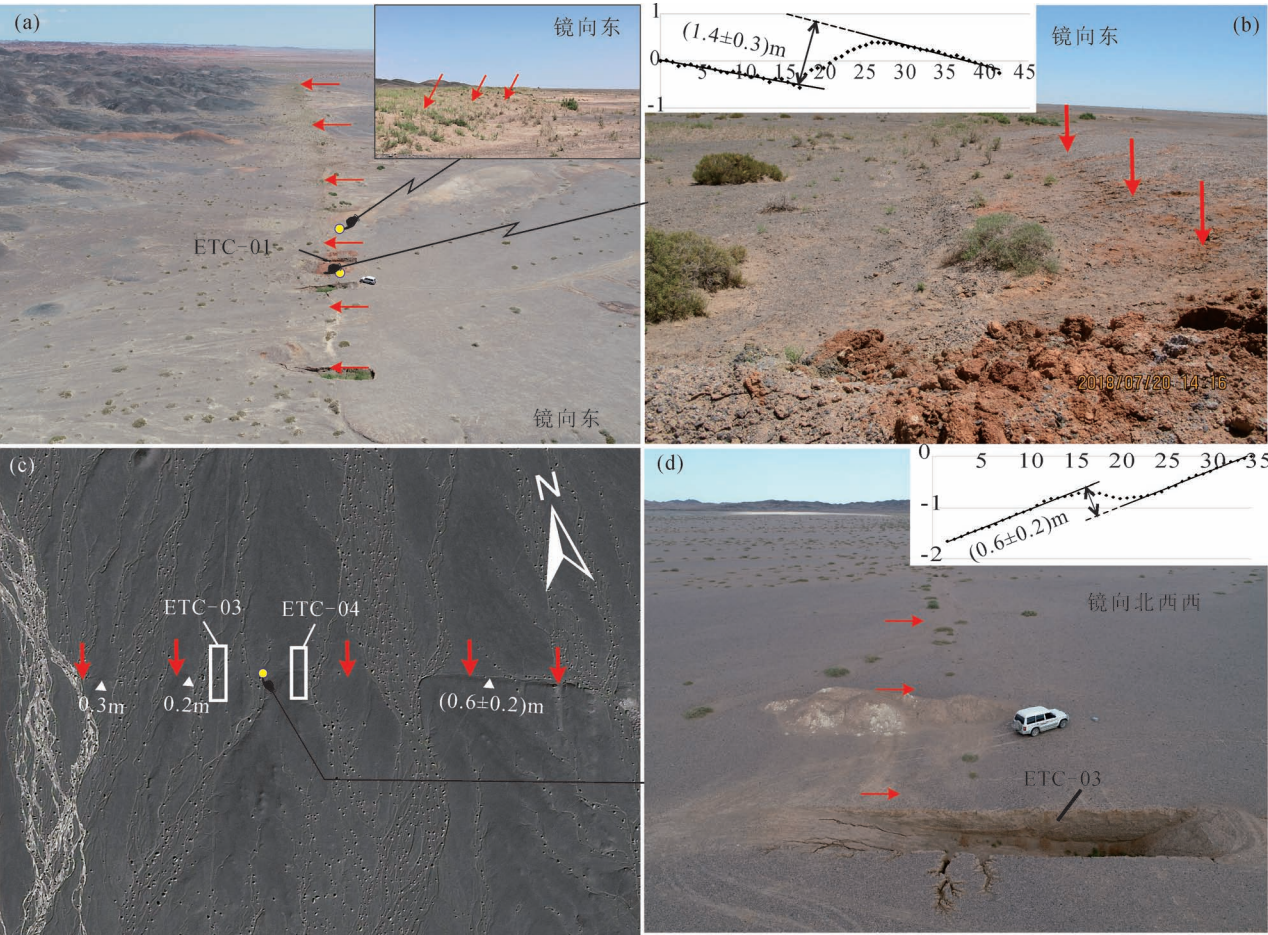


图 4 北山南缘断裂断层陡坎地貌及影像

Fig. 4 Fault scarp and satellite images of southern margin fault in Beishan

(a)、(b):探槽 ETC-01 附近断层陡坎;(c)、(d):探槽 ETC-03 和 ETC-04 附近影像(来源于 Google Earth)和无人机航拍照片
(a)、(b): the fault scarp around trench ETC-01; (c)、(d): the satellite images (from Google Earth) and Aerial photos by UAV around trench ETC-02 and ETC-03

化的砂砾石,断裂北向逆冲该期冲洪积扇,形成的断层陡坎;较新一期冲洪积扇分布于老冲洪积扇两侧,在平面上呈扇形分布,以晚更新世砾石层为主,局部夹有细砂透镜体,断层东段切穿该层,形成断层陡坎(图 2)。此外,山前局部区域还发育风积砂层(图 3,图 4a)。

2.2 断错水系

在山前发育了一套风积细砂层,断裂穿过该层。在断裂通过处,该层上发育的 4 条冲沟(由西至东分别为冲沟 1 至冲沟 4)发生同步左旋位错(图 3a),实测位错量分别为 $4.5\pm0.4\text{m}$ 、 $6.2\pm0.5\text{m}$ 、 $5.5\pm0.6\text{m}$ 和 $4.5\pm0.3\text{m}$,平均位错量 $5.2\pm0.4\text{m}$ (图 3b、c、d、e,表 1)。

2.3 断层陡坎

断裂的北向逆冲错断了山前分布的最高一级地

表 1 北山南缘断裂实测水平和垂直位移量统计表
Table 1 Statistical measured horizontal and vertical displacement along fault southern margin fault in Beishan

编号	水平位移量(m)	断错地貌单元	位置	测量方法
冲沟 1	4.5±0.4	冲沟	探槽 ETC-01 与 ETC-02 之间	激光测距
冲沟 2	6.2±0.5			
冲沟 3	5.5±0.6			
冲沟 4	4.5±0.3			
编号	垂直位移量(m)	断错地貌单元	位置	测量方法
1	1.4±0.3	断层陡坎	探槽 ETC-01 东	实测
2	3.7	疑似反向陡坎	探槽 ETC-01 西	激光测距
3	0.3	断层陡坎	探槽 ETC-01 西	
4	0.3		探槽 ETC-03 西	
5	0.2		探槽 ETC-04 东	
6	0.6±0.2			实测

貌面,形成一系列断层陡坎。在断层陡坎出露明显的位置,利用激光测距仪对陡坎的高度进行了测量,在探槽 ETC-02 附近测量的高度为 0.3 m(图 3a,表 1),在探槽 ETC-03 西侧测量的高度为 0.2 m 和 0.3 m(图 4c,表 1)。此外,在探槽 ETC-01 附近和探槽 ETC-04 东侧对陡坎进行地形实测,获得上述两处的实测高度为 1.4 ± 0.3 m 和 0.6 ± 0.2 m,见图 4b、4d 和表 1。

在探槽 ETC-01 和 ETC-02 之间分布一套全新世的风积细砂层,在断裂通过处,形成北高南低的疑似反向陡坎(图 3a 和图 4a),陡坎高约 3.7 m(图 3a,表 1)。实地调查发现,陡坎上植被发育良好,植被以保土能力较强的红柳等为主。在开挖探槽 ETC-01 后,发现探槽内断层上盘位置出现积水,几乎淹没了整个探槽,该探槽最深处不足 4 m,可见该处的地下水位埋深较浅。此外,分布于风积地层断裂两侧的植被北密南疏,我们认为该断裂为阻水

断裂,阻碍了北侧山地汇水向南的流动,使得断裂北侧的水位明显高于南侧。由于断层的阻水作用,风积地层沉积之后,断裂北盘水位较高,利于红柳等植被生长,且这类植被利于保土,而南盘地层无植被发育,地层受到风蚀减薄。形成了目前观察到的疑似反向陡坎,因此该陡坎的形成虽与断裂活动相关,但仍是侵蚀陡坎。

3 探槽揭露断裂的活动时代

结合卫片解译和野外实地调查,在断层迹线清晰、沉积条件良好的断裂西段和东段开挖了 4 个探槽(图 2,图 3a,图 4c),分别称为 ETC-01、ETC-02、ETC-03 和 ETC-04。对上述探槽的两壁进行了清理,在现象更为清晰一壁进行 1×1 m 挂网,并清绘。

3.1 探槽描述

(1)探槽 ETC-01 东壁。该探槽开挖于山前老一期冲洪积扇面上,长约 13 m,宽约 3 m,深达 4 m

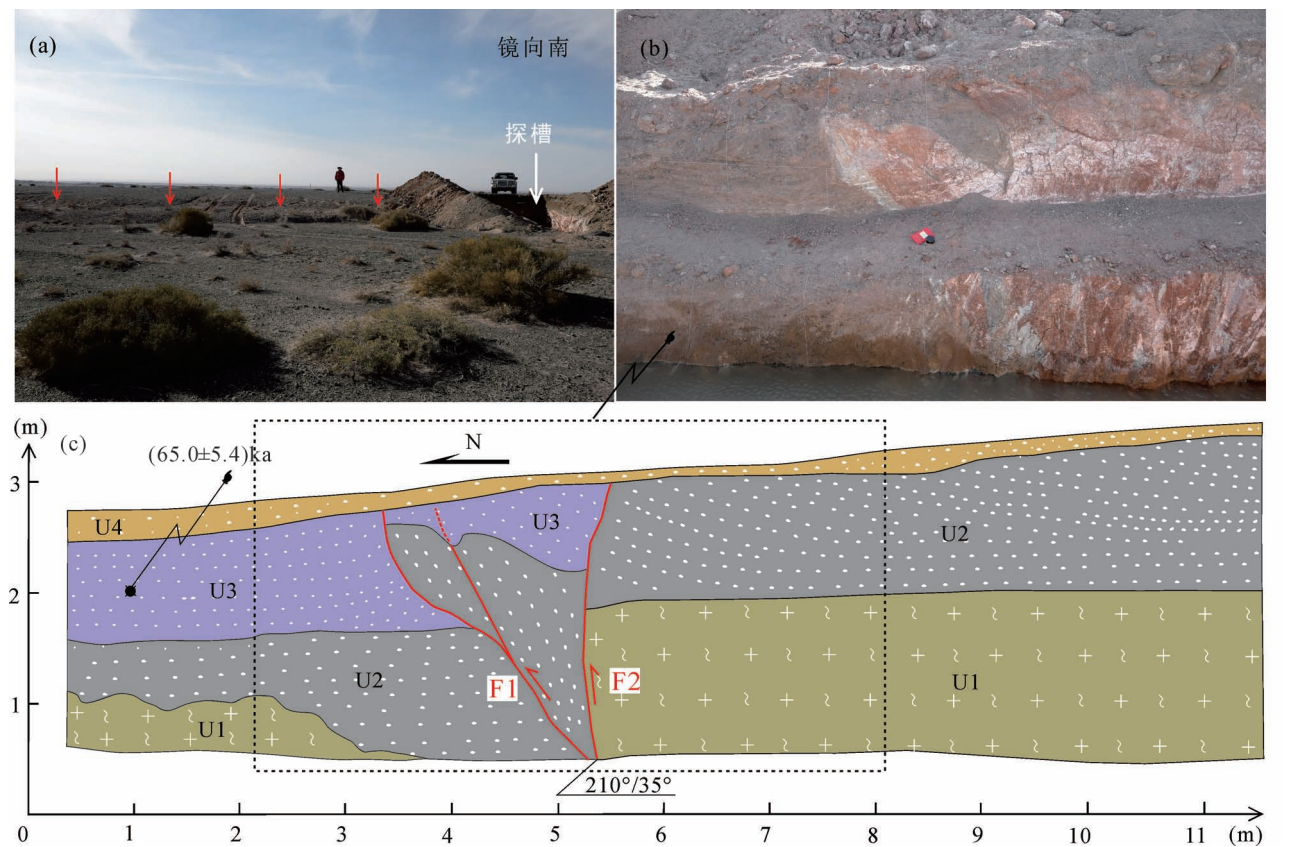


图 5 北山南缘断裂探槽 ETC-01 周边地貌及东壁解译图

Fig. 5 Surrounding landform and the interpretation of east wall of trench ETC-01 of southern margin fault in Beishan

(a) 探槽 ETC-01 及附近断层陡坎,红色箭头指示断层陡坎,白色箭头指示探槽位置;

(b) 探槽 ETC-01 东壁局部照片;(c) 探槽 ETC-01 东壁解译图

(a) the fault scarp around trench ETC-01, red arrow indicated the location of fault scarp, and white arrow indicated the location of trench;

(b) partial photo of east wall of trench ETC-01;(c) the interpretation of east wall of trench ETC-01

(图 5)。探槽东壁揭露出 4 套地层,由老至新,分别称为 U1~U4,描述如下:

U1:灰黄、灰红色基岩层,主要由砾岩、页岩及泥灰岩组成。

U2:灰绿、灰白色砾石层,砾石砾径约 2~3 cm,磨圆度差,呈一定的定向排列。由于断裂的逆冲作用,断层 F2 右侧的砾石层发生明显的上翘,而 F1 与 F2 之间的砾石层由于挤压作用,砾石层与断层近平行排布。层内有盐碱质胶结,局部发育盐碱质条带。

U3:灰白色砾石层,砾石粒径约 2~4 cm,磨圆度差,砾石层呈明显的水平排布。断层 F1 左侧的砾石层受断层的逆冲拖拽作用,略有上翘。夹与 F1 与 F2 的地层发生明显的顺时针旋转。在 F2 左侧该层中部细砂透镜体内采集光释光样品,测得的年龄为 $65\pm5.4\text{ka}$ 。

U4:黄色砂砾石盖层,厚约 10~20 cm。探槽内共揭露两条断层,分别为 F1 和 F2,均为逆冲断层,在深部收敛至一处。其中,F1 错断 U2 和 U3 地层,

被 U4 覆盖,其分支断层穿过 U2,并有延伸进入 U3 地层的迹象;F2 构成 U1、U2 和 U3 地层的边界,并切穿上述地层,被 U4 覆盖。

(2)探槽 ETC-02 东壁。该探槽位于 ETC-01 东侧约 1 km 处,探槽长约 15 m,宽约 3 m,深近 3 m (图 6)。探槽东壁揭露出 3 套地层,由老至新,分别称为 U1~U3,描述如下:

U1:灰黄、灰褐色砾石层,砾石磨圆度差,粒径 1~3 cm,个别粒径达 20 cm 左右,砾石层呈明显的水平排列,在断层通过处,砾石扁平面转为近断面排布。

U2:褐色砾石层,砾石磨圆度差,粒径约 5 cm,砾石层呈明显的水平排列,断层通过处,砾石发生逆时针旋转,与断面平行排布。该层中夹有若干细砂透镜体,在该层中部和底部采集两个光释光样品,测年结果分别为 $8.4\pm0.8\text{ka}$ 和 $67\pm3.9\text{ka}$ 。

U2-1,U2-2:层 U2 中发育两层厚约 8 cm 的中粗砂层,在断层 F1 通过处,上述两层发生明显的弯曲

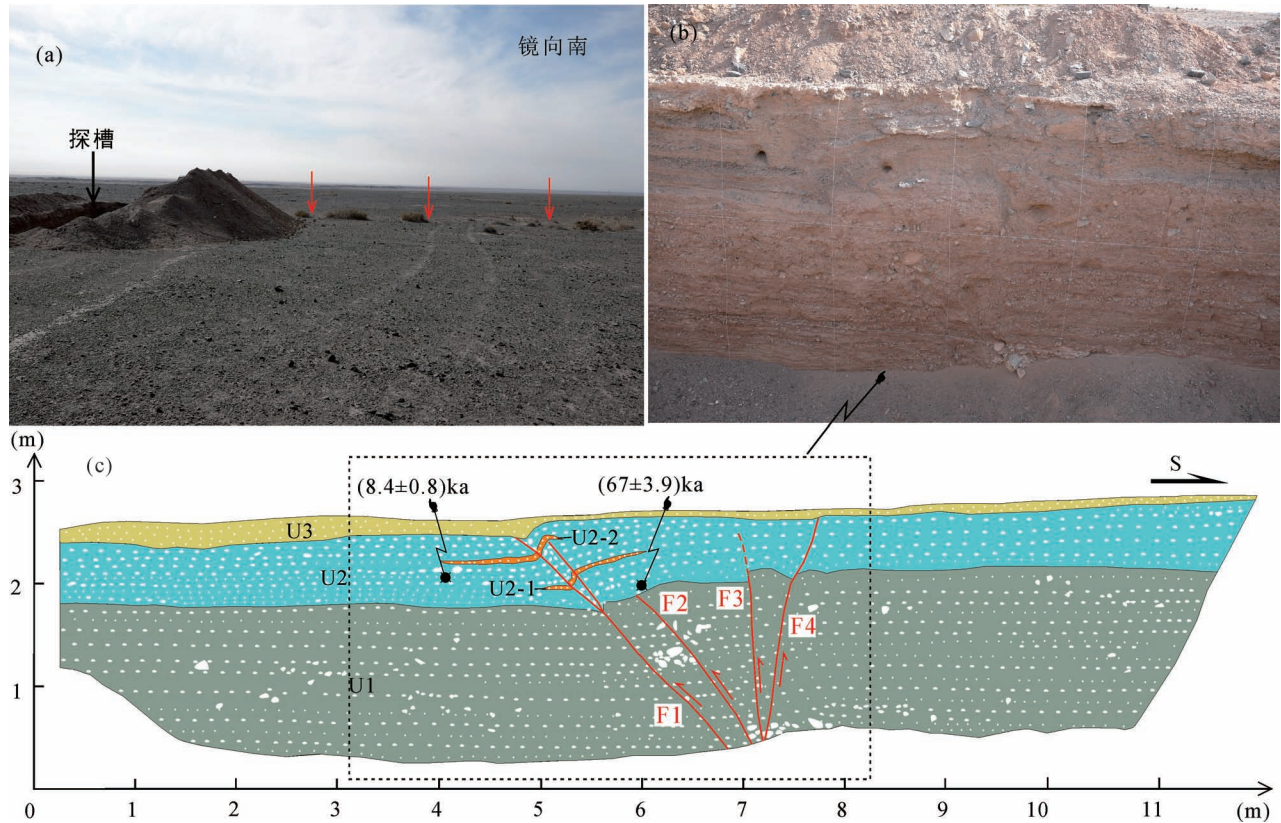


图 6 北山南缘断裂探槽 ETC-02 周边地貌及东壁解译图

Fig. 6 Surrounding landform and the interpretation of east wall of trench ETC-02 of southern margin fault in Beishan

- (a): 探槽 ETC-02 及附近断层陡坎,红色箭头指示断层陡坎,白色箭头指示探槽位置;(b): 探槽 ETC-02 东壁局部照片;
(c): 探槽 ETC-02 东壁解译图
- (a): the fault scarp around trench ETC-02, red arrow indicated the location of fault scarp, and black arrow indicated the location of trench;
(b): partial photo of east wall of trench ETC-02;(c): the interpretation of east wall of trench ETC-02

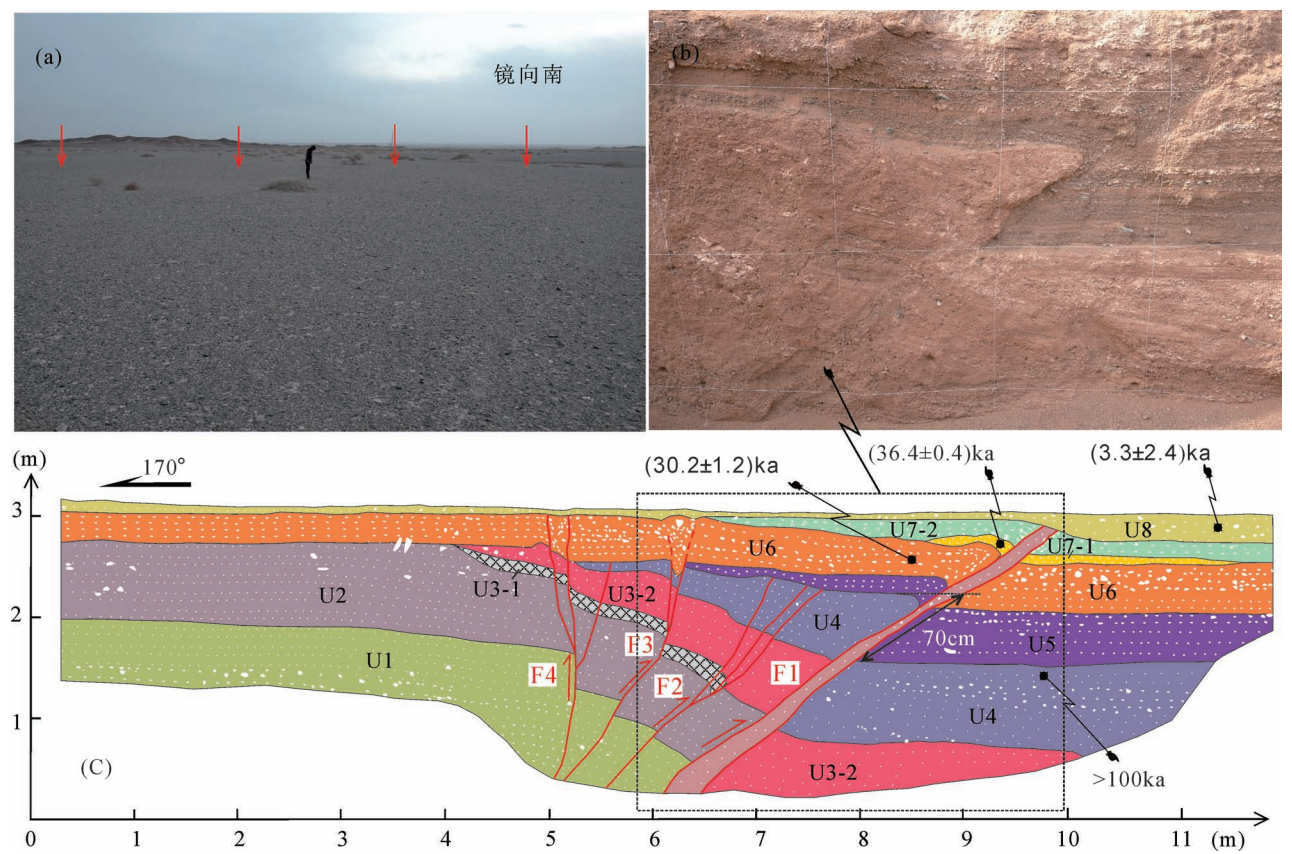


图 7 北山南缘断裂探槽 ETC-03 周边地貌及西壁解译图

Fig. 7 Surrounding landform and the interpretation of west wall of trench ETC-03 of southern margin fault in Beishan
(a): 探槽 ETC-03 及附近断层陡坎, 红色箭头指示断层陡坎; (b): 探槽 ETC-03 西壁局部照片; (c): 探槽 ETC-03 西壁解译图
(a): the fault scarp around trench ETC-03, red arrow indicated the location of fault scarp; (b): partial photo of east wall of trench ETC-03;
(c): the interpretation of west wall of trench ETC-03

褶皱。

U3: 灰黄色细砂盖层, 断层上盘出现明显减薄的现象。

探槽内共揭露 4 条断层, 分别为 F1、F2、F3 和 F4, 呈走滑断裂典型的正花状构造, 均为逆冲断层。其中, F1 和 F4 断错 U1 和 U2 地层, 被 U3 地层覆盖。F1 的上侧分支断错 U2 地层中部, 止于 U2-2 地层; F2 断错 U1 地层, 被 U2 地层覆盖, F3 断错 U1 地层, 有延伸进入 U2 地层的迹象。

(3) 探槽 ETC-03 西壁。该探槽开挖于断裂东段陡坎处, 实测开挖处的陡坎高约 0.2 m, 探槽长约 12 m, 宽约 3 m, 深约 4 m (图 7)。探槽西壁揭露出 8 套地层, 由老至新, 分别称为 U1~U8, 描述如下:

U1: 灰白、灰黄色砂砾石层, 砾石磨圆度较差, 砾石粒径多小于 1 cm, 呈现明显的水平层理, 局部有盐碱质胶结, 在靠近断层处, 砾石层向下弯曲。

U2: 棕黄色砂砾石层, 粒径多小于 1 cm, 但较层 U1 粗, 呈水平层理, 分选一般。

U3-1: U2 层顶部白色固结的钙质淋滤结核, 厚约 10 cm。

U3-2: 棕黄色砂砾石层, 粒径多在 1 cm 左右, 夹杂 2~3 cm 粒径的砾石, 呈明显水平层理, 有一定的磨圆度。

U4: 深棕黄色粗砂砾石层, 粒径多在 1 cm, 个别可达 2~3 cm, 呈明显水平层理, 有一定磨圆。该层被 F1、F2 和 F3 错断, 被 F1 断错约 70 cm。在该层顶部采集光释光样品, 测年结果为 >100 ka。

U5: 棕黄色砂砾石层, 水平层理明显, 呈二元结构, 上部为砾石层, 下部为中粗砂层。位于断层上盘的该层上部砾石已被剥蚀。

U6: 灰黄色砂砾石层, 水平层理发育, 以细砾为主, 粒径多小于 1 cm, 有一定磨圆度, 存在二元结构。靠近断层处, 砾石层发生挠曲变形。在该层中部采集光释光样品, 测年结果为 30.2±1.2 ka。

和 F5, F2 为正断层, 其他都为逆断层。其中, F1 断错 U1~U3 地层, 被 U4 覆盖; F2 受 F3 和 F4 的逆冲拖拽作用, 表现为正断, 错断 U1~U3 地层, 被 U4 覆盖; F3 错断 U1 和 U2 地层, 在 U2 顶部并入 F4; F4 断错 U1~U3 地层, 向上分为 3 支, 被 U4 覆盖; F5 错断 U1 和 U2 地层, 延伸进入 U3 地层底部。

以上探槽内采集样品的测年结果见表 2。样品由山东省地震工程研究院采用 SMAR 细颗粒石英光释光测年的方法完成。测试流程如下: ①在暗室中去除可能曝光或污染的部分, 从新鲜样品中取 30 g 测定含水量和饱和含水量, 之后将样品烘干并充分研磨, 直至全部通过 0.063 mm 的筛子, 测量²³⁸U—²³²Th—⁴⁰K 含量, 获得环境剂量; ②另一部分新鲜样品置入烧杯作为实验样, 加水约 800 ml, 洗 6~8 次 (130 min/次), 静水沉淀法除去 ≤4 μm 组分, 留存沉淀组分; ③依次用 30% H₂O₂ 除去样品中有机质, 溶液 37% HCl 溶液除去样品中碳酸盐等、直至去尽为止, 并用纯净水洗至中性; ④继续用静水沉淀法分选, 16 min/次, 取上清液中 4~11 μm 组分留存; ⑤依次用氟硅酸刻蚀样品, 去除样品中的长石成分、10% HCl 去除氟化物, 该步骤结束后将样品洗至中性; ⑥用丙酮将分离出的 4~11 μm 颗粒石英组分制成悬浊液, 沉淀至直径 9.7 mm 的小钢片上制成测片, 进行等效剂量测试。

表 2 探槽内光释光样品分析结果

Table 2 Analysis results of OSL dating samples in the trenches

野外编号	埋深 (m)	环境剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	年龄 (ka)
OSL-10	0.8	2.0±0.2	130.1±10.8	65.0±5.4
OSL-12	0.8	2.0±0.2	134.1±7.8	67.0±3.9
OSL-13	0.6	2.8±0.3	23.4±1.8	8.4±0.8
OSL-14	0.5	2.8±0.2	102.2±1.4	36.4±0.4
OSL-15	0.37	2.4±0.3	8.0±1.8	3.3±2.4
OSL-16	0.5	2.8±0.3	84.5±3.5	30.2±1.2
OSL-17	1.7	2.8±0.3	>300	>100
OSL-19	0.4	2.4±0.2	228.0±17.5	95.3±7.3

3.2 断裂的活动时代

探槽 ETC-01 揭露了一次快速滑动事件 (图 5), 表现为夹于断层 F1 和 F2 间的 U2 和 U3 地层被楔状挤出, 其中, U3 地层发生顺时针旋转, U2 地层被拖拽上翘。上述两层被 U4 地层覆盖。结合测年结果, 将该次事件限定于距今 65 ka 之后。

探槽 ETC-02 揭露了两次快速滑动事件 (图 6)。

较老一次表现为 F1~F4 逆冲错断 U1, 被 U2 覆盖, 结合测年结果, 将此次事件限定于 67 ka 之前; 较新一次表现为 F1 和 F4 逆冲断错 U1 和 U2 地层, 使得 U2 的细砂层 U2-1 和 U2-2 发生 S 状挠曲, 同时, 此次事件也使得 F3 延伸进入 U2。结合测年结果, 将此次事件限定于距今 8.4 ka 之后。

探槽 ETC-03 揭露了 3 次快速滑动事件 (图 7)。最老一次表现为 F1~F4 向上断错了 U1~U4 地层, 其中, F2~F4 向上分成两支或三支断错上述各层, 随后被 U5 覆盖; 较老一次表现为 F1~F4 断错 U5 地层, 导致位于上盘的 U5 地层被剥蚀减薄, 而位于 F3 左侧的该层已被剥蚀殆尽, 随后被 U6 地层和 U7 地层覆盖, 结合测年结果, 将本次事件限定于距今 30 ka 之前。最新一次表现为 F1 断错 U3 至 U7 地层。同时, 该次事件使得 F3 和 F4 延伸至 U6 顶部, 随后位于 F3 左侧的 U7 地层被剥蚀殆尽, 被 U8 覆盖。上述三次事件使得 F1 的总位移量达 70 cm。测年结果显示, 较新的 U7-2 地层的年龄结果 36.4±0.4ka 大于较老 U6 地层的结果 30.2±1.2ka。结合采样过程看, U7-2 地层的样品较 U6 地层的粒径粗, 导致了年龄结果偏老。因此, 本文使用 30.2±1.2ka 来限定最新一次事件。结合 U8 层的测年结果, 将最新一次事件限定于距今 30~33 ka。

探槽 ETC-04 揭露了一次快速错断事件 (图 8), 表现为断层 F1、F3 和 F4 逆冲断错 U1~U3 地层, 其中 F3 和 F4 向上合并为一条断层, 而这两条断层的拖拽作用导致 F2 断层发生局部正断, 也导致 F5 延伸进入 U3 地层。后被 U4 地层覆盖。测年结果表明该次事件发生于 95 ka 之后。

综上, 作为一条独立的破裂单元, 在北山南缘断裂发生了至少发生了两次, 可能三次快速滑动事件。将现象明显的 2 次事件由老至新分别称为事件 E1 和事件 E2。

事件 E1: 该次事件在探槽 ETC-02 和 ETC-03 探槽中均有揭露。在上述两个探槽中表现出类似的特点, 即一系列花状构造断层中的一条断错探槽底部地层, 被表土以下地层覆盖。结合光释光的测年结果, 探槽 ETC-02 内将此次事件限定在距今 76 ka 之前, 探槽 ETC-03 将此次事件限定于距今 30 ka 之前。结合采样情况及测年方法的精度, 将本次事件限定在距今 30 ka 之前。

事件 E2: 该次事件在开挖的 4 个探槽均有揭露, 表现为探槽内揭露的大多数断层断错了地表盖层以下地层, 被盖层覆盖。探槽 ETC-01 将此次事

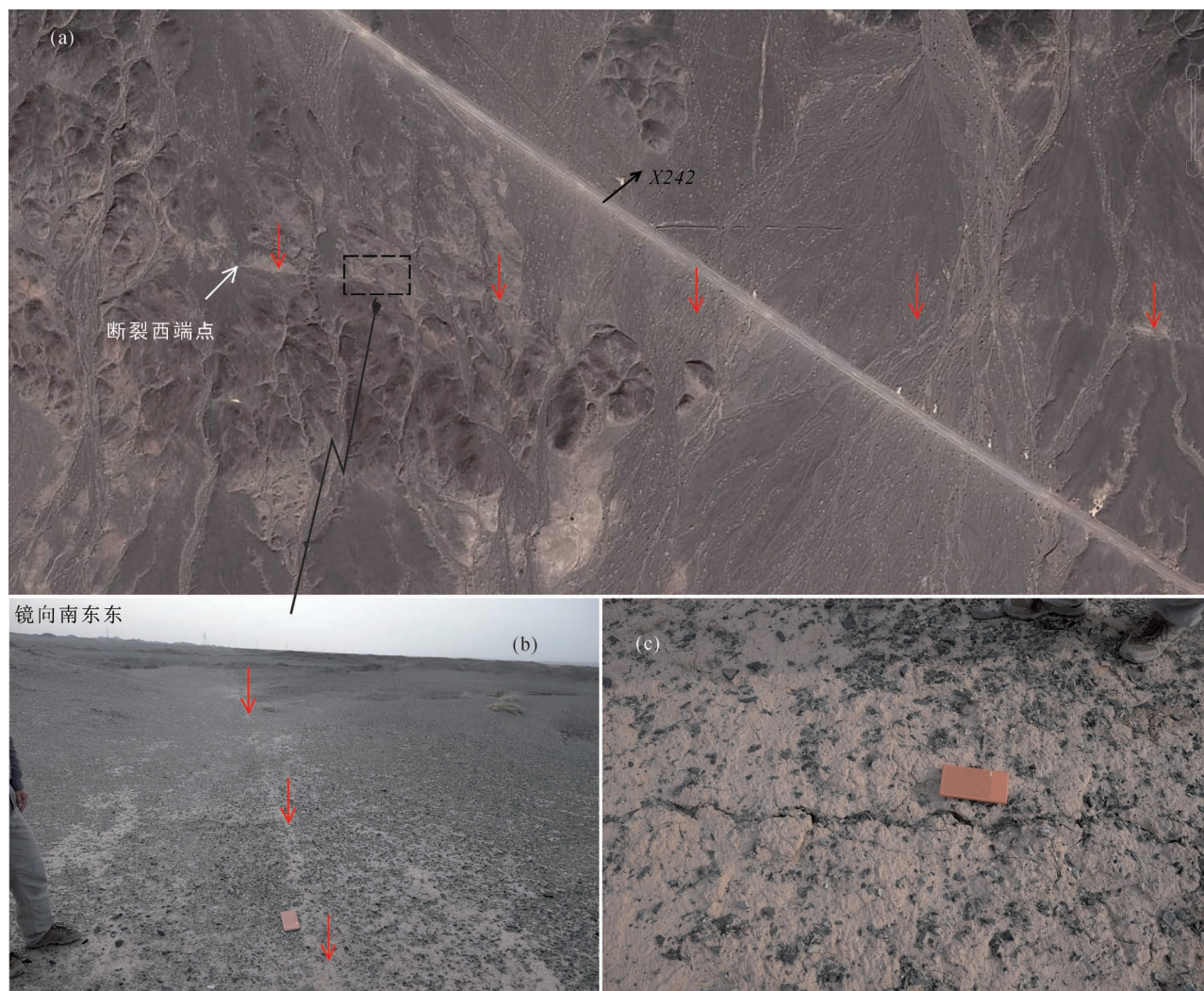


图9 北山南缘断裂断裂西端位置影像(来源于 Google Earth)及地貌

Fig. 9 The satellite image (from Google Earth) of west end point of southern margin fault in Beishan and its landform

件限定于 65 ka 之后;探槽 ETC-02 将此次事件限定于 84 ka 之后;探槽 ETC-03 将此次事件限定于 30 ka 之后,3.3 ka 之前;探槽 ETC-03 将此次事件限定于 95 ka 之后。结合采样情况及测年方法的精度,将本次事件限定在距今 84~33 ka。

4 讨论

4.1 断裂西端位置的确定

从上述探槽的解译结果看,北山南缘断裂在晚更新世和全新世有过活动,结合断裂的几何结构,认为该断裂为一独立的破裂单元,无分段。在判断断裂的发震能力时,破裂单元的长度为重要依据 (Wells and Coppersmith, 1994; 叶文华等,1996; 冉洪流,2011; Stirling et al., 2013; 赵颖等,2013)。因此,有必要确定断裂东西两端的位置。卫片解译和

野外调查显示,断裂的东端止于基岩山体与晚更新世冲洪积扇的边界(图 2)。但断裂西端是否已延伸进入基岩地区,从影像无法判断,故进行了补充调查。

调查结果显示,断裂在通过 X242 县道后,向西延伸进入晚古生代的花岗岩地区。在地貌上,由于断裂的活动导致地表产生线性分布的地裂缝(图 9b),裂缝呈波浪状,裂隙宽 3~4 cm(图 9c)。调查未发现张拉阶区,挤压鼓包等现象,可能表明断裂向西延伸至此处,活动性已趋弱。继续向西,断裂的迹象逐渐消失,在距离公路约 800 m 处(图 9a 白色箭头处)终止,将断裂的西端点定于此处。结合其他位置的调查结果,认为北山南缘断裂作为单独的破裂单元,东西向延伸的距离达 18 km。

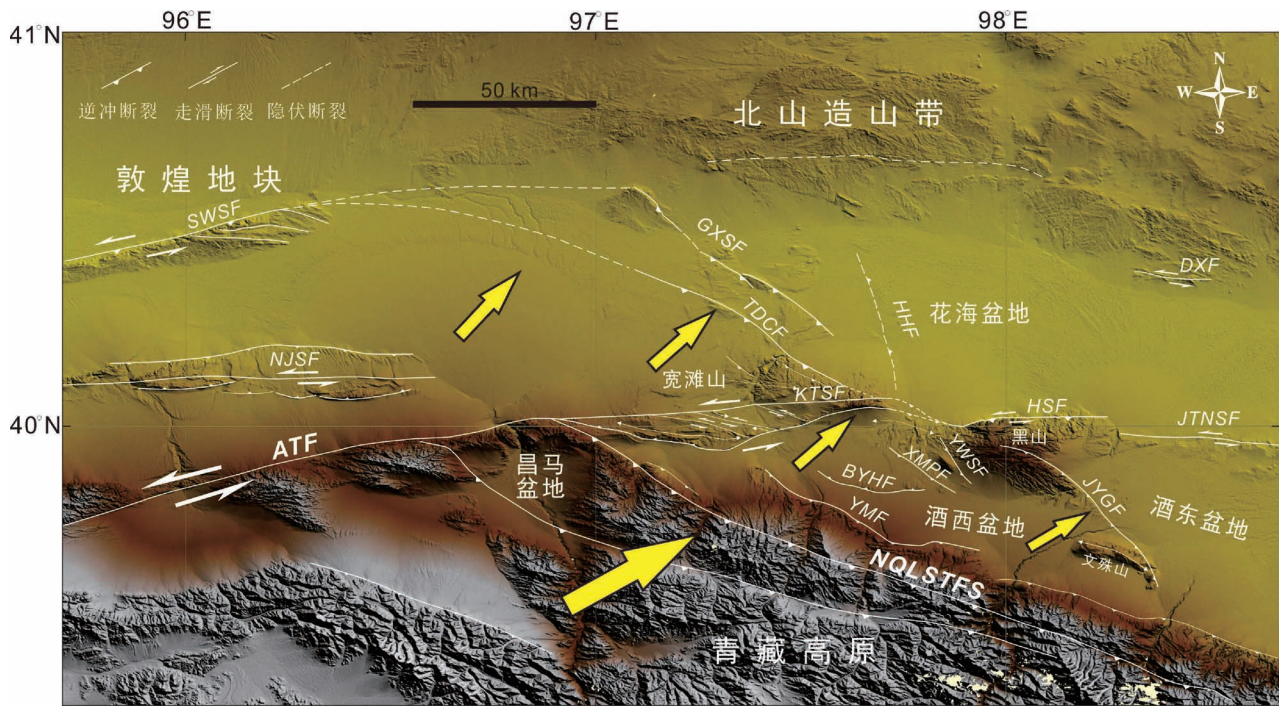


图 10 青藏高原北缘主要活动断裂分布图

Fig. 10 The main active faults distribution in northern margin of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau

NQLSTFS—北祁连逆冲断裂系;YMF—玉门断裂;XMPF—新民堡断裂;YWSF—阴洼山断裂;JYGF—嘉峪关断裂;JTNSF—金塔南山北缘断裂;TDCF—塔尔湾—登登山—池家刺窝断裂;GXSF—干峡山断裂;HHF—花海断裂;DXF—鼎新断裂;ATF—阿尔金断裂;NJSF—南截山断裂;SWSF—三危山断裂;黄色箭头指示 GPS 速度场方向

NQLSTFS—the northern Qilianshan fault thrust system; YMF—Yumen fault; XMPF—Xinminpu fault; YWSF—Yinwshan fault; JYGF—Jiayuguan fault; JTNSF—the southern margin fault of Jintananshan Mountain; TDCF—Taerwan—Dengdengshan—Chijiawo fault; GXSF—Ganxiashan fault; HHF—Huahai fault; DXF—Dinxin fault; ATF—Altyn Tagh fault; NJSF—Nanjieshan fault; SWSF—Sanweishan fault; Yellow arrow indicates GPS speed field direction

4.2 断裂活动的意义

新生代以来,青藏高原北缘、东北缘的扩展前缘位置一直引起众多学者的关注 (Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier et al., 1982; England and Houseman, 1986; Zhang Peizhen et al., 2007; Burchfiel et al., 2012; 于森等, 2017; 杨文采等, 2017, 2019; 白国典等, 2018)。近来的研究表明高原的北缘目前已扩展至三危山附近 (Cunningham et al., 2016; 云龙, 2016a, b; 刘兴旺, 2018)。然而,关于东北缘前缘的扩展位置及方式尚存有争议。主要存在以下观点:①高原东北缘的形变主要通过祁连山、大雪山等山体的隆升、缩短实现 (Zhang Peizhen et al., 2007; Tapponnier et al., 1990; Meyer et al., 1996; Meyer et al., 1998), 作为高原北边界的阿尔金断裂向东延伸至宽滩山附近;②高原东北缘的变形通过北祁连断裂及河西走廊内部的一系列北西西向的断裂的逆冲运动实现, 变形的前缘位置在龙首

山、合黎山附近 (Zheng Weijun et al., 2013a, b);③高原的东北缘的变形已传递至阿拉善块体南缘处, 形变以一束“帚”状断裂组分解 (陈文彬等, 2006; Darby et al., 2005; 张进等, 2007);④高原东北缘的北东向扩展已影响到了阿拉善地块的南缘, 造成南缘先存构造的活化 (Yu Jingxing et al., 2016; 2017)。以上观点多基于对高原北缘及河西走廊内活动断裂的活动特征和运动学的研究。然而, 以往的研究在讨论高原东北缘的形变分配中, 忽略了阿尔金断裂东北的一系列北西向断裂 (如塔尔湾—登登山—池家刺窝断裂、干峡山断裂和花海断裂等) 在其中起到的作用, 此外, 结合本次在走廊北侧新发现的北山南缘断裂。我们认为高原在北缘、东北缘的活动已跨越北祁连地区, 北北东向的三危山向东转入塔尔湾—登登山—池家刺窝断裂, 继续向东与金塔南山北缘断裂和慕少梁断裂相接, 构成了高原北缘、东北缘的最新活动边界 (图 10)。GPS 速度场

也表明在被三危山断裂、塔尔湾—登登山—池家刺窝断裂以及南侧阿尔金断裂围限的块体向北东运动,这种运动导致了位于块体东缘的宽滩山隆起,同时挤压位于北侧的北山造山带,由于是斜向挤压,而北山造山带基底总体为东西向构造(Xiao Qibing et al., 2011),因此挤压造成了基底东西向构造的再次活动,并发生左行剪切兼逆冲的活动,这也是北山南缘活动断裂的成因。而本次发现的北山南缘断裂正是高原变形继续向北扩展的表现,说明高原的变形已逐步深入至北山地区。

5 结论

北山南缘断裂晚第四纪以来的活动形成了一系列断错地貌,断裂的左旋走滑使得多条跨越断裂的冲沟发生同步肘状位错,位错量在 4.5~6.2 m,平均位错量为 5.2 m。断裂的逆冲运动形成了清晰的线性陡坎,陡坎落差 0.2~1.4 m。探槽揭露了至少 2 次快速滑动事件,较老的一次发生于距今 30 ka 之前,较新的一次发生在距今 8.4 ka 之后,3.3 ka 之前,说明该断裂为一条晚更新世和全新世有过活动,以左旋走滑为主,兼有逆冲分量的活动断裂。该断裂的活动是青藏高原北东向扩展,并挤压北山造山带的结果。

致谢:谨以此文纪念因病去世的马瑾院士。马瑾先生正派的学风、脚踏实地、严谨求实、兴致勃勃的科研精神值得我学习一生。此外,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

白国典,吕根根,翟文芳,李瑞强,李兰兰,郭晓燕. 2018. 青藏高原北部晚第四纪应力场在遥感影像上的响应. 地质学报, 92(12): 2534~2549.

陈文彬, 徐锡伟. 2006. 阿拉善地块南缘的左旋走滑断裂与阿尔金断裂带的东延. 地震地质, 28(2): 319~324.

刘兴旺, 袁道阳, 邹小波, 柳煜. 2018. 青藏高原北缘三危山断裂晚更新世活动特征. 地震地质, 40(1): 121~132.

冉洪流. 2011. 中国西部走滑型活动断裂的地震破裂参数与震级的经验关系. 地震地质, 33(3): 577~585.

杨文采,侯遵泽,徐义贤,颜萍. 2017. 青藏高原下地壳热变形和管道流研究. 地质论评, 63(5): 1141~1152.

杨文采,瞿辰,任浩然,黄连捷,胥颐,于常青. 2019. 青藏高原地壳地震纵波速度的层析成像. 地质论评, 65(1): 2~14.

叶文华, 徐锡伟, 汪良谋. 1996. 中国西部强震地表破裂规模与震级、复发时间间隔关系的研究. 地震地质, 18(1): 37~43.

于森,丰成友,何书跃,赵梦琪,赵一鸣,李大新,瞿泓滢,刘建楠,王

辉,周建厚. 2017. 钟世华祁漫塔格造山带——青藏高原北部地壳演化窥探. 地质学报, 91(4): 703~723.

云龙, 杨晓平, 王驹, 宋方敏, 陈献程. 2016a. 青藏高原北缘三危山断裂东北段的古地震事件. 震灾防御技术, 11(2): 186~198.

云龙, 杨晓平, 宋方敏, 王驹. 2016b. 青藏高原北缘三危山断裂晚第四纪以来的左旋走滑活动. 地震地质, 38(2): 434~446.

张进, 李锦轶, 李彦峰, 马宗晋. 2007. 阿拉善地块新生代构造作用——兼论阿尔金断裂新生代东向延伸问题. 地质学报, 81(1): 1481~1497

赵颖, 郭恩栋, 王琼, 刘智. 2013. 走滑断层地震地表断裂位错估计方法研究. 岩土力学, 34(5): 1403~1408.

Bai Guodian, Lu Jigen, Zhai Wenfang, Li Ruiqiang, Li Lanlan, Guo Xiaoyan. 2018&. Response on remote sensing images of the Late Quaternary stress field in the Northern-Tibetan Plateau, Qinghai. Acta Geologica Sinica, 92(12): 2534~2549.

Burchfiel B C and C Zhiliang. 2012. Tectonics of the southeastern Tibetan Plateau and its adjacent foreland. Memoir of the Geological Society of America, 210: 1~164.

Chen Wenbing, Xu Xiwei. 2006&. Sinistral strike-slip faults along the Southern Alashan margin and Eastwards extending of the Altun Fault. Seismology and Geology, 28(2): 319~324.

Craddock W, Kirby E, Zhang H. 2011. Late Miocene—Pliocene range growth in the interior of the northeastern Tibetan Plateau. Lithosphere, 3(6): 420~438.

Cunningham D, Zhang J, Li Y. 2016. Late Cenozoic transpressional mountain building directly north of the Altyn Tagh Fault in the Sanweishan and Nanjieshan, North Tibetan Foreland, China. Tectonophysics, 687: 111~128.

Darby B J, Ritts B D, Yue Y J. 2005. Did the Altyn Tagh fault extend beyond the Tibetan Plateau? Earth and Planetary Science Letters, 240: 425~435.

Ding Zhifeng, Guo Huili, Wang Xingchen C, Chang Lijun, Zhang Fengxue, Yuan Songyong, Zheng Chen. 2018. Crustal and Upper mantle structures in the eastern margin of Tibetan Plateau by using ChinArray data. Acta Geological Sinica, 92(z1): 6.

Donald L. Wells and Kevin J. 1994. Coppersmith, 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.

England P, Houseman G. 1986. Finite strain calculations of continental deformation; comparison with the India—Asia collision zone. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 91(91): 3664~3676.

Liu Xingwang, Yuan Daoyang, Zou xiaobo, Liu Yu. 2018&. Active characteristics of the Sanweishan Fault in the northern margin of the Tibetan Plateau during Late Pleistocene. Seismology and Geology, 40(1): 121~132.

Meyer B, Tapponnier P, Gaudemer Y, G. Peltzer G, Guo Shunmin , Chen Zhitai. 1996. Rate of left-lateral movement along the easternmost segment of the Altyn Tagh fault, east of 96°E (China). Geophysical Journal International, 124(1): 29~44.

Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. Science, 189(4201): 419~426.

Ran Hongliu. 2011&. Empirical relations between earthquake magnitude and parameters of strike-slip seismogenic active faults associated with historical earthquakes in Western China. Seismology and Geology, 33(3): 577~585.

Stirling M, Goded T, Berryman K, Litchfield N. 2013. Selection of earthquake scaling relationships for seismic-hazard analysis. Bulletin

- of the Seismological Society of America, 103(6): 2993~3011.
- Tapponnier P, Meyer B, Avouac J P, Peltzer G, Gaudemer Y, Guo S M, Xiang H F, Yin K L, Chen Z T, Cai S H, Dai H G. 1990. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 97(3): 382~403.
- Tapponnier P, Peltzer G, Dain A Y L, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(10): 611.
- Wang Weitao, Zhang Peizhen, Liu Cacao, Chen Xiyuan. 2016b. Pulsed growth of the West Qiling at ~ 30 Ma in northeastern Tibet: Evidence from Lanzhou Basin magnetostratigraphy and provenance: Cenozoic growth of the West Qinling. *JGR*.
- Wang Weitao, Zhang Peizhen, Yu Jingxing, Wang Yizhou, Zheng Dewen, Zheng Wenjun, Zhang Huiping, Pang Jianzhang. 2016a. Constraints on mountain building in the northeastern Tibet: detrital zircon records from synorogenic deposits in the Yumen Basin. *Scientific Reports*, 6: 8.
- Wang Yizhou, Zheng Dewen, Pang Jianzhang, Zhang Huiping, Wang Weitao, Yu Jingxing, Zhang Zhuqi, Zheng Wenjun. Zhang Peizhen, Li Youjuan. 2018. Using slope-area and apatite fission track analysis to decipher the rock uplift pattern of the Yumu Shan: New insights into the growth of the NE Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 308: 118~128.
- Wells D L, Coppersmith K J. 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.
- Xiao Qibing, Shao Guihang, Liu Zengjing, Michael E, Zhang Jin, Zhao Guoze, Wang Jijun. 2015. Eastern termination of the Altyn Tagh Fault, western China: constraints from a magnetotelluric survey. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 120(5): 2838~2858.
- Xiao Qibing, Zhao Guoze, Dong Zeyi. 2011. Electrical resistivity structure at the northern margin of the Tibetan Plateau and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 116, B12401, doi: 10.1029/2010JB008163.
- Yang Wencai, Hou Zunze, Xu Yixian, Yan Ping. 2017&. A study in thermal deformation and lower crust channel flows in Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. *Geological Review*, 63(5): 1141~1152.
- Yang Wencai, Qu Chen, Ren Haoran, Huang Lianjie, Xu Yi, Yu Changqing. 2019&. Crustal P-wave seismic tomography of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. *Geological Review*, 65(1): 2~14.
- Ye Gaofeng, Zhao Yuancheng, Jin Sheng, Wei Wenbo, Dong Hao, Zhang Letian, Xie Chengliang, Yin Yaotian. 2018. Three-Dimensional Lithospheric Resistivity Structure of the NE Tibetan Plateau and the Western North China Block and its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 92(z1): 38~39.
- Ye Wenhua, Xu Xiwei, Wang Liangmou. 1996&. Quantitative relationship between surface rupture parameter, earthquake magnitude and recurrence interval for surface rupturing earthquakes in West of China. *Seismology and Geology*, 18(1): 37~43.
- Yin A, Rumelhar P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T, Foster D, Ingersoll R, Zhang Q, Zhou X, Wang X, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *GSAB*, 114(10): 1257~1295.
- Yu Jingxing, Zheng Wenjun, Kirby E, Zhang Peizhen, Lei Qiyun, Ge Weipeng, Wang Weitao, Li Xinnan, Zhang Ning. 2016. Kinematics of Late Quaternary Slip along the Yabrai Range-front fault: Implications for Cenozoic tectonics across the Gobi Alashan Block, China. *Lithosphere*, 8(3): 199~218.
- Yu Jingxing, Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, Lei Qiyun, Wang Xulong, Wang Weitao, Li Xinnan, Zhang Ning. 2017. Late Quaternary strike-slip along the Taohuala Shan—Ayouqi fault zone and its tectonic implications in the Hexi Corridor and the southern Gobi Alashan, China. *Tectonophysics*, 721: 28~44.
- Yuan Daoyang, Ge Weipeng, Chen Zhenwei, Li Chuanyou, Wang Zhicai, Zhang Huiping, Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Zheng Wenjun, Craddock W. Dayem K, Duvall A, Hough B, Lease R, Champagnac J, Burbank D. 2013. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: a review of recent studies. *Tectonics*, 32(5): 1358~1370.
- Yun Long, Yang Xiaoping, Song Fangmin, Wang Ju. 2016b&. Late Quaternary sinistral strike-slip activities of Sanwei Shan fault in the north of Tibetan Plateau. *Seismology and Geology*, 38(2): 434~446.
- Yun Long, Yang Xiaoping, Wang Ju, Song Fangmin, Chen Xiangcheng. 2016a&. Paleo-earthquake events along northeastern segment of the Sanweishan Mountain Fault, Northern Tibetan Plateau. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 11(2): 186~198.
- Zhang Huiping, Craddock W H, Lease R O, Wang Weitao, Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Molnar P, Zheng Dewen, Zheng Wenjun. 2012. Magnetostratigraphy of the Neogene Chaka basin and its implications for mountain building processes in the north-eastern Tibetan Plateau. *Basin Research*, 24(1): 31~50.
- Zhang Huiping, Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Zheng Wenjun, Chen Zhengwei, Wang Weitao. 2014. Transforming the Miocene Altyn Tagh fault slip into shortening of the north-western Qilian Shan: insights from the drainage basin geometry. *Terra Nova*, 26(3): 216~221.
- Zhang Jin, Li Jinyi, Li Yanfeng, Ma Zongjin. 2007&. The cenozoic deformation of the Alxa Block in Central Asia—Question on the northeastern extension of the Altyn Tagh Fault in cenozoic time. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 1481~1497.
- Zhang Peizhen, Molnar P, Xu Xiwei. 2007. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 26(26): 1~8.
- Zhao Ying, Guo Endong, Wang Qiong, Liu Zhi. 2013&. Estimate method of dislocation to seismic surface rupture under strike-slip fault. *Rock and Soil Mechanics*, 34(5): 1403~1408.
- Zheng Dewen, Wang Weitao, Wan Jinglin, Yuan Daoyang, Liu Chunru, Zheng Wenjun, Zhang Huiping, Pang Jianzhang, Zhang Peizhen. 2017. Progressive northward growth of the northern Qilian Shan—Hexi Corridor (northeastern Tibet) during the Cenozoic. *The geological Society of America, Lithosphere*, doi: 10.1130/L587.1:1~9.
- Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, Ge Weipeng, Molnar P, Zhang Huiping, Yuan Daoyang, Liu Jianhui. 2013b. Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 32: 271~293.
- Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, He Wengui, Yuan Daoyang, Shao Yanxiu, Zheng Dewen, Ge Weipeng, Min Wei. 2013a. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: evidence

from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults. Tectonophysics, 584: 267~280.

Zuza A V, Yin A. 2016. Continental deformation accommodated by non-rigid passive bookshelf faulting: an example from the Cenozoic tectonic development of northern Tibet. Tectonophysics, s (677 ~ 678): 227~240.

The active characteristics and its significance of the southern margin fault of Beishan area in Gansu Province

YUN Long¹⁾, ZHANG Jin²⁾, XU Wei³⁾, LIU Zhicheng³⁾

- 1)Key Laboratory on Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, Beijing, 100029;
- 2)Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 100037;
- 3) China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing, 100029

Obiective: On the north side of the Hexi Corridor, southern edge of the Beishan area, an active fault was discovered and we named it as Beishan southern margin fault. However, the movement pattern and activity age of this fault are unknown. Meanwhile, the special location of this fault may be important for understanding and identifying the northern growth pattern of Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau.

Methods: Based on interpretation of satellite images, investigation of fault geomorphology, trench and OSL dating method, this study gave the activity characteristics of this fault.

Results: A series of ruptured landforms were formed because of the fault activities since the Late Quaternary, including synchronous elbow displacement of gullies that cross the fault due to the left-lateral strike-slip movement of fault, the amount of displacement is 4.5~6.2 m, and the average value is 5.2 m. The northward thrust of the fault forms a clear linear fault scarp with height of 0.2~1.4 m. In addition, four trenches along the fault revealed at least two sudden quick displacement events, the older one occurred in 30 ka ago, and the newer one occurred between 8.4 ka and 3.3 ka.

Conclusions: Beishan southern margin fault is located on the north side of Jinta County, about 50 km from the county seat. The length of the fault is about 18 km. Strike of fault is near east—west direction, dip is northwest, and the dip angle is 60°~80°. Combined with the evidence from satellite imagery, geomorphology and trenches, it is believed that the fault has been active in the Late Pleistocene and Holocene, and is an active fault with left-lateral strike-slip and thrust property. The activities of this fault may reveal that the extension of the northeastern margin of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau has crossed the Hexi Corridor and entered the Beishan area.

Keywords: Beishan;the expansion of northeastern margin, the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau ;Beishan southern margin fault;activity characteristic

Acknowledgements: This study was supported by the Nature Science Foundation of China (No. 41572190) , Pre-engineering research project of URL for HLW geological disposal (No. FZ1501), and Youth technology Innovation Foundation of CNNC Beijing Research institute of Uranium Geology (No. QJ1601)

First author: YUN Long, male, born in 1985, Senior engineer, engaged in activity tectonic and site selection of HLW geological disposal, Email:yunlneotectonic@126.com

Manuscript received on: 2018-09-05; Accepted on: 2019-04-26; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.004