论文

青藏高原东北缘三关口-牛首山断裂的右旋走滑与弧形构造带扩展

雷启云^{①②*}, 张培震^①, 郑文俊^①, 柴炽章^②, 王伟涛^①, 杜鹏^②, 俞晶星^①^① 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;^② 宁夏回族自治区地震局, 银川 750001

* E-mail: leiqr624@163.com

收稿日期: 2015-07-27; 接受日期: 2016-01-15; 网络发表日期: 2016-05-05

中国地震局地质研究所基本科研业务费专项(编号: IGCEA1220)、地震行业科研专项(编号: 201308012)、国家自然科学基金项目(批准号: 41202158, 41372220, 41590861)和地震科技星火计划项目(编号: XH14052)资助

摘要 三关口-牛首山断裂的运动学特征对认识青藏高原东北缘弧形构造带的扩展具有重要意义。在野外调查的基础上, 通过大比例地质填图、典型地貌测量和沉积地层年代测定等方法, 确定该断裂是一条具有明显右旋走滑特征的断裂, 而非前人认为的左旋走滑断裂。研究发现, 形成于古生代、中生代、新生代的地质界线均被断层右旋错动, 断错位移相近, 消除地形效应后确定的断裂最大走滑位移为 (961 ± 6) m。断裂北段的三关口断裂具有明显的新活动特征, 一系列小冲沟跨断裂发生了同步右旋扭动, 获得的断裂晚第四纪以来平均水平滑动速率约 0.35 mm/a。而形成于上新世末的先存褶皱构造被断裂错断异位, 表明断裂的右旋走滑不早于上新世末。利用最大位移和平均滑动速率估算的断裂起始右旋走滑时间在 2.7 Ma 之后。结合前人对高原东北缘扩展的认识, 根据褶皱变形和断裂活动的先后关系分析, 在上新世末(~ 2.7 Ma), 青藏高原的北东扩展到达三关口-牛首山一带, 导致该区域地层发生广泛的褶曲变形和区域性抬升; 到第四纪初, 受青藏高原东北向推挤和鄂尔多斯地块逆时针旋转的联合作用, 三关口-牛首山断裂开始右旋走滑活动, 形成了青藏高原东北缘弧形构造带扩展的最前缘边界。

关键词 青藏高原东北缘, 三关口-牛首山断裂, 右旋走滑, 地块相互作用, 弧形构造带

1 引言

三关口-牛首山断裂带位于西藏、阿拉善、鄂尔多斯3个地块的复合交接之处(图1), 构造位置非常重要(邓起东等, 2002; 张培震等, 2003, 2013), 对该断

裂的研究, 不论是认识青藏高原东北缘弧形构造带的扩展过程, 还是探讨高原扩展对相邻构造的影响, 均具有重要意义。

前人研究认为, 三关口-牛首山断裂向南和罗山东麓断裂相连, 向北与贺兰山西麓断裂右阶斜接, 个

中文引用格式: 雷启云, 张培震, 郑文俊, 柴炽章, 王伟涛, 杜鹏, 俞晶星. 2016. 青藏高原东北缘三关口-牛首山断裂的右旋走滑与弧形构造带扩展. 中国科学: 地球科学, 46: 691-705, doi: 10.1360/N072015-00254
英文引用格式: Lei Q Y, Zhang P Z, Zheng W J, Chai C Z, Wang W T, Du P, Yu J X. 2016. Dextral strike-slip of Sanguankou-Niushoushan fault zone and extension of arc tectonic belt in the northeastern margin of the Tibet Plateau. Science China Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-016-5272-1

图1 青藏高原东北缘弧形构造带及邻区断裂分布简图

F1-海原断裂; F2-天景山断裂; F3-烟筒山断裂; F4-罗山东麓断裂; F5-三关口-牛首山断裂; F6-贺兰山西麓断裂; F7-贺兰山东麓断裂; F8-芦花台隐伏断裂; F9-银川隐伏断裂; F10-黄河断裂; F11-正谊关断裂

别冲沟扭动显示左旋走滑性质, 推测晚更新世活动(国家地震局“鄂尔多斯周缘断裂系”课题组, 1988; 国家地震局地质研究所等, 1990; 柴炽章等, 2011; 王伟涛等, 2013). 也有学者认为, 该断裂向北在元山子或吉井子转为东西向, 向西和查汗布拉格断裂相连, 最终与龙首山南缘断裂相接(霍福臣等, 1989; 汤锡元等, 1990; 李克勤, 1992; 张进等, 2004; Zhang等, 2010). 但是, 最新研究认为河西走廊北侧的合黎山-龙首山断裂以逆冲为主要特征, 是高原向北挤压扩展的前缘(Zheng等, 2013a, 2013b), 与三关口-牛首山断裂带的运动学性质存在明显的差异. 另外, 随着罗山东麓断裂右旋走滑性质的发现, 又提出三关口-牛首山断裂向南已不应和罗山东麓断裂相连的观点(闵伟等, 1992; Min等, 2003). 可见, 关于该断裂的几何结构和延伸方向存有争议, 对该断裂的活动时代和性质也未有确凿的证据.

青藏高原东北缘的弧形构造带是高原向东北扩展的前缘(Molnar等, 1975; Tapponnier等, 1982, 2001; Deng等, 1984; England等, 1985, 1997; Peltzer等, 1989; Zhang等, 2004). 关于弧形构造带晚新生代的扩展变形已开展了大量研究, 取得了一些重要进展(邓起东等, 1989; 国家地震局地质研究所等, 1990; Burchfiel等, 1989, 1991; Zhang等, 1988, 1990, 1991; 柴炽章等, 1998; Zheng等, 2006; Li等, 2009; 郑文俊等, 2009; Wang等, 2013; Zheng等, 2013b; 施伟等, 2013; 王伟涛等, 2014; 张维岐等, 2015). 但是, 以往研究多集中在海原断裂和天景山断裂上, 对最外围三关口-牛首山断裂的研究薄弱, 仅限于宏观的地震剖面解释和演化过程的间接推断(王伟涛等, 2013; 陈虹等, 2013), 对断裂自身及其附近新生代地层所反映的构造演化过程缺乏详细研究, 这影响了对青藏高原东北缘弧形构造扩展过程的完整认识.

本文通过对三关口-牛首山断裂开展野外调查, 查清了该断裂带的几何展布, 并在构造现象典型的区段开展了详细的大比例尺地质填图、冲沟错动地貌测绘和地貌面样品测试等工作, 发现了确切的断裂右旋走滑的证据, 获得了最大走滑位移和晚第四纪平均水平滑动速率. 这一发现可能改变了关于高原东北缘弧形构造带扩展的认识.

2 区域构造环境和断裂的几何展布

三关口-牛首山断裂带以南是青藏高原东北缘的弧形构造, 由三条弧形断裂组成, 从南往北, 依次为海原断裂、天景山断裂、烟筒山断裂. 海原断裂是弧形构造中的主要断裂, 经历了两期构造变形过程, 约在8~10Ma开始挤压逆冲, 在5.4Ma转化为左旋走滑, 最大水平走滑位移为14km, 走滑位移被断裂端部的褶皱变形和逆冲断裂吸收, 晚第四纪的平均走滑速率约为 (4.5 ± 1) mm/a, 其上发生了1920年海原8.5级地震(邓起东等, 1989; 国家地震局地质研究所等, 1990; Zhang等, 1991; Burchfiel等, 1991; 郑德文等, 2005; Zheng等, 2006; Li等, 2009; Wang等, 2013; Zheng等, 2013b; 王伟涛等, 2014). 天景山断裂具有相似的构造演化阶段和转换方式, 但是开始逆冲的时间可能在5.4Ma, 左旋走滑起始时间为2.6Ma, 最大水平位移为3.2km, 晚第四纪的平均走滑速率为2.29~2.86mm/a之间, 其上发生了1709年中卫7½级地震(柴焱章等, 1998; 李传友, 2005; Wang等, 2013; 张维岐等, 2015). 烟筒山断裂规模较小, 约在2.6Ma开始逆冲, 第四纪活动不明显, 最新活动时代为晚更新世中期, 未发现明显左旋走滑现象(国家地震局地质研究所等, 1990; Wang等, 2013).

银川地堑位于三关口-牛首山断裂带的北侧, 由四条正断层组合而成, 沉积了巨厚的新生代地层. 盆地南北部为极性相反的“半地堑”, 中部为“堑中堑”结构(严烈宏等, 2002). 新生代地层北厚南薄, 沉降中心也由西向东发生偏移, 新生代地层最大厚度7000m, 第四系厚度达1600m(国家地震局“鄂尔多斯周缘断裂系”课题组, 1988). 贺兰山东麓断裂为盆地的西边界, 分割了贺兰山和银川盆地, 在10~12Ma发生了强烈活动, 引起贺兰山的快速掀斜隆升(刘建辉等, 2010), 晚第四纪以来活动强烈, 垂直滑动速率约0.88mm/a,

其上发生了1739年平罗8级地震, 最大同震位移4.4m(国家地震局“鄂尔多斯周缘断裂系”课题组, 1988; Deng等, 1996). 黄河断裂为盆地的东边界, 北段晚第四纪活动偏弱, 垂直滑动速率为0.04mm/a, 而南段垂直滑动速率为0.24mm/a(廖玉华等, 2000; 雷启云等, 2013). 银川隐伏断裂全新世垂直滑动速率为0.14mm/a(雷启云等, 2008). 芦花台断裂北段全新世活动, 垂直滑动速率为0.18mm/a, 南段在晚更新世以来不活动(雷启云等, 2011).

野外调查表明, 三关口-牛首山断裂带向南和罗山东麓断裂相接, 向北和贺兰山西麓断裂右阶斜列, 由不连续的三条次级断裂组成, 自南往北依次为: 关马湖断裂、柳木高断裂、三关口断裂(图2). 关马湖断裂为银川盆地和牛首山东麓洪积台地的分界, 地貌落差明显, 但整段受人为改造严重, 地貌单元剥蚀切割较为明显, 原貌多已不复存在, 槽探揭示近地表断裂倾向东北, 显示为正断层, 具有明显走滑特征. 柳木高断裂倾向北东, 两侧地貌落差明显, 跨断层多条大冲沟出山口后向右偏转, 显示断裂具有右旋走滑性质, 并兼有倾滑分量. 三关口断裂斜切贺兰山山体, 线性特征清晰, 发育年轻的断层陡坎, 沿断层冲沟错动明显, 多处地质界线被右旋错动, 断裂向西南倾斜, 性质为右旋走滑, 兼有逆冲. 前人认为, 牛首山东麓存在一条第四纪活动断裂(国家地震局地质研究所等, 1990), 调查表明该断裂规模较小, 仅在九泉附近发育长约4km的基岩陡坎, 两端延伸均被钙质胶结的早更新世洪积砾石所压盖, 无显著陡坎地貌发育, 且红柳沟组地层直接超覆于奥陶系之上, 地层产状一致, 跨牛首山东西两侧的石油地震勘探剖面也未能显示出该断裂的存在(王伟涛等, 2013), 因此, 牛首山东麓断裂规模小, 仅局部发育, 不属于活动断裂. 罗山东麓断裂向北仍以近南北向延伸, 在接近银川盆地处和关马湖断裂左阶斜列, 并不和黄河断裂相连. 罗山东麓断裂右旋走滑特征非常明显, 晚第四纪平均滑动速率为2.15mm/a(Min等, 2003).

3 三关口-牛首山断裂右旋走滑的地质地貌证据

3.1 地质界线的右旋错动

三关口-牛首山断裂的地质界线错动在其北段三

图2 三关口-牛首山断裂几何展布图

关口断裂上表现明显, 其他两段由于断层切割地层单一, 加之地表人为破坏严重, 地貌现象保留不完

整. 在北段的三关口断裂上, 有3处不同地质时期的地层界线发生了明显右旋错动. 从老到新, 将断错的

地层界线特征简述如下:

(1) 奥陶系砂岩和灰岩界线右旋位错. 在三关口

断裂南段高石墩附近, 断裂切过中奥陶统平凉组, 该组上段和下段的界线被右旋错动(图3a、4a), 下段岩

图 3 三关口断裂地质界线右旋错动图

(a) 高石墩地区; (b) 花布山地区; (c) 错动效应示意图. A、b: 地表断点; ob: 两断点在水平面上的距离; Aa、Bb: 地层真实断错位移

图4 断裂附近不同地质时期地层界线照片

(a) 断裂西盘奥陶砂岩和灰岩界线; (b) 断裂西盘奥陶灰岩和下白垩砾岩界线; (c) 断裂西盘清水营组泥岩和红柳沟组砾岩界线; (d) 断裂东盘清水营组泥岩和红柳沟组砾岩界线

性为灰绿色薄层细粒长石砂岩, 上段岩性为灰白色泥质灰岩, 两者为整合接触关系(宁夏回族自治区地矿局, 1990)。实测断裂面产状 $230^{\circ}\angle 75^{\circ}$, 断裂西盘附近灰岩底面产状 $150^{\circ}\angle 30^{\circ}$, 东盘产状为 $170^{\circ}\angle 36^{\circ}$, 该地层界面走向与断裂呈大角度相交, 约 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$, 出露位置跨断裂后向右发生了明显偏移, 断点在地表出露清楚, 反映了断裂的右旋水平运动。通过大比例尺地质填图获得该界线错动位移1.1km左右, 用差分GPS实测两断点的落差为90m, 受地形和产状的影响, 该位移值并不是真实的位移值。通过图3c所示的校正方法, 对两盘地层产状分别计算, 得到位移值分别为965和946m, 取平均值为955m。

(2) 奥陶系灰岩和白垩系砾岩界线的右旋位错。位于上一界线南侧, 两者为角度不整合接触关系(图4b)。白垩系为紫红色砾岩, 属下白垩统庙山湖群下亚群(宁夏回族自治区地矿局, 1990), 在断裂两盘产状相近, 延伸稳定(图3a)。该界线在断裂两侧连续展布, 跨断裂出现中断并向右偏移, 灰岩和砾岩地层也整体发生了同步偏移, 反映了断裂的右旋走滑运动。该界线整体走向和上一界线相近, 与断裂大角度相交。在西盘, 断点出露清楚, 剖面上显示为上缓下陡的折面(图4b), 在东盘, 由于新生代地层覆盖, 断裂附近该界线未出露, 在断裂东侧约500m处始有出露,

将该点沿地层走向投影于断层, 获得右旋位移为1.4km。另外, 奥陶纪灰岩在断层附近出露清楚, 以灰岩岩体参照, 获得奥陶纪地层至少向右位移1.14km。由于奥陶系和白垩系之间沉积间断时隔久远, 白垩纪地层沉积之前原始地形复杂, 二者接触面不是一个简单的平面, 地形变化和差异剥蚀均会对该界线的出露位置产出较大影响, 测量所得1.4km的位移值可能要比实际位移偏大, 而以奥陶纪灰岩岩体为参照获得的1.14km位移则更接近真实值。

(3) 古近系清水营组泥岩和新近系红柳沟组砾岩界线右旋位错。位于三关口断裂的东南端小石头处, 为假整合接触界线(图4c、d)。清水营组为棕红色泥岩, 红柳沟组为灰色砾岩。两套地层在此组成花布山背斜的西翼, 断裂从此切过, 该界线沿着顺断层发生了向右的偏移, 反映了断裂的右旋走滑特征(图3b)。实测断裂西盘砾岩底面产状 $170^{\circ}\angle 30^{\circ}$, 东盘产状 $225^{\circ}\angle 35^{\circ}$, 断裂产状 $250^{\circ}\angle 75^{\circ}$ 。断点在断裂两盘出露清楚, 二者高差为15m。从大比例尺地质图上量得两断点的距离为1km。采用相似的方法进行作图计算, 根据不同产状获得真实的位移值分别为977和957m, 取均值为967m。

综上所述, 三关口断裂右旋错断了古生代、中生代、新生代的3条地层界线, 位移值均接近1km。表明

断裂右旋错动起始于红柳沟组沉积之后,且自活动以来始终保持右旋走滑,之前并未发生左旋走滑运动. 3条界线中,鉴于奥陶系和白垩系的界面为起伏的复杂形态的界面,地形高低和剥蚀差异对界线出露位置影响很大,根据地层产状难以复原断裂两侧断点的位置,因此,其位移仅为参考,没有做进一步的位移校正. 但其他2条界面为平面,经过校正后,获得的水平位移分别为955和967m,二者非常接近,取平均值(961±6)m. 该值可代表三关口断裂较可靠的最大的水平走滑位移.

3.2 冲沟的右旋错动

三关口断裂斜切了贺兰山山体,地表形迹清楚,

线性特征明显. 断裂两侧地形差别显著,西南盘为基岩山区,东北盘断裂附近则为一小规模的洪积扇. 沿着断裂,一系列冲沟发生了同步的右旋扭动(图5a、b). 冲沟扭动之处,多位于地表断层陡坎延伸的方向上,且在冲沟两壁也有断层出露,表明冲沟右旋扭动和断裂错动密切相关(图5c). 由于一些较大规模冲沟冲刷力强,出山口后又迅速展开成扇,河道不稳多变,因此,大多没有保留右旋错动的特征,而发育在洪积扇之上小冲沟,则保留了断裂错动的痕迹. 在整个断裂上,以高石墩到三关10km范围内最明显. 主要采用便携式测距仪,个别使用差分GPS,对该段具有明显右旋错动的42条小冲沟进行统计测量,位移分布见图5d. 分析发现,冲沟位错以小位移居多,

图5 三关口断裂冲沟右旋错动图

(a)、(b) 冲沟测量位置图; (c) 典型小冲沟右旋位错照片; (d) 冲沟位移分布图

其值主要分布在3和6m两档内,个别分布在9、12、15m附近. 3m档和6m档位错沿着断裂在近距离内交替分布,从冲沟发育的规模看,6m档位错的冲沟切割深,规模大,形成时间要早于3m档冲沟. 断裂力学研究和现代地震考察表明,单次破裂的位移分布呈平缓弧形并在断层端部快速衰减(Scholz, 2002; 徐锡伟等, 2008),鲜有位移大小交替起伏的波形分布. 因此,3m档和6m档位错不应是一次地震同时形成,3m档冲沟位错应该是最后一次地震错动的结果,而6m档冲沟位错则是两次地震累计错动形成,据此判断三关口断裂的水平同震位移约为3m.

在三关附近(No.1),跨断裂有3条相邻的小冲沟同步发生了右旋扭动(图6). 3条冲沟规模相当,沟深约2m,宽约4m,向上游基岩区延伸不足2km,出山口后切割了同一期洪积扇面,跨断层整体向右发生了偏移,并在下游交汇成一条冲沟,用差分GPS实测了附近的地形图. 在3条冲沟中,北冲沟的右旋错动现

象保留最好,除断层附近南壁局部受冲刷外,冲沟整体延伸笔直,较好的反映了断裂的右旋错动,以沟心线为参照,实测位移值为 $(6.1\pm0.4)\text{m}$. 在南冲沟,跨断层向下游不远,便发生了拐弯,仅有十余米长保留了和上游冲沟相同的延伸,也以沟心线为参照,实测位移值为 $(5.9\pm0.6)\text{m}$. 在中间冲沟,下游冲沟整体偏移幅度较大,但并非断裂错动所致,仔细观察发现,在断层附近,残留了该冲沟的小阶地,小阶地和洪积扇的边缘保留完整,这是冲沟早期的沟壁,以断层两侧冲沟的南沟壁为参照,实测位移为 $(6\pm0.5)\text{m}$. 在北冲沟南壁近地表1m处,采集了光释光样品TD-2,测年结果为 $(18.36\pm0.72)\text{ka}$ (图6b,表1),冲沟形成时间要晚于该年龄. 根据3条冲沟的位移值和测年结果进行估算,分别获得获得3个水平滑动速率: (0.33 ± 0.025) 、 (0.32 ± 0.035) 和 $(0.33\pm0.033)\text{mm/a}$.

在夹子沟北支沟南岸(No.2), T3阶地上发育断层陡坎,上游沟南壁出露奥陶系砂岩,上覆洪积砾石,

图6 三关附近(No.1)冲沟位错实测图

厚约1m, 沟壁在断层处发生向右偏转. 其南发育一条宽阔的冲沟, 也被右旋错动(图7a). 用差分GPS进行了详细测量, 获得南沟壁和沟心线的位移分别为 (17.9 ± 1) 和 (20.3 ± 3) m, 二者较接近. 在下游T3阶地面上开挖探坑, 在距地表0.5m处采集光释光样品TD-6(图7b), 测试结果为 (54.88 ± 4.1) ka(表1). 根据测年结果和位移, 获得断裂的2个平均水平滑动速率, 分别为 (0.33 ± 0.030) 和 (0.37 ± 0.061) mm/a.

在鹰嘴山北(No.3), 两条大冲沟之间残留T4洪积台面, 断层错断该台面, 形成高达8m的垂直陡坎. 跨断层, 台地面内的一条冲沟, 以及台地的南北边缘均同步发生了右旋错动. 对三处错动进行了差分GPS测量(图8a). 台地内的冲沟向上游跨断层后分叉成两条支沟, 南支沟的下切深度和延伸长度均要大于北支沟. 在同等的岩性条件下, 南支沟形成较早, 北支沟是后期发育演化而成. 因此, 在测量对比时, 上游参照南支沟沟心线的位移, 实测值为 (35.6 ± 2) m. 参照台地南北边缘在断裂两侧的位置, 实测北边缘位移

值为 (52.4 ± 5) m, 南边缘位移值为 (54.9 ± 5) m. 在台地上游南边缘出露天然剖面, 距地表1m, 洪积砾石层中夹有一层砂粘土透镜体, 在其中采集了OSL样品TD-7, 测试结果为 (125.36 ± 9.85) ka(图8b, 表1). 将获得的3个右旋位移值除以该年龄, 分别获得断裂在该处的滑动速率值为 (0.28 ± 0.027) 、 (0.42 ± 0.052) 和 (0.44 ± 0.053) mm/a.

由上述3处测量点的8个位移值和3个OSL样品测试结果, 估算得到了8个平均滑动速率值. 由于3个场点中冲沟及地貌面边缘界线均发育在洪积扇(或台地面)形成之后, 而所测年龄样品为洪积扇面(或台地面)之下的沉积物, 其年代要先于洪积扇面(或台面)的形成时间, 因此, 估算所用年龄比实际错动时间要偏大, 获得的滑动速率值比真实速率也要偏小, 所获得的8个平均滑动速率均是断裂滑动速率的最小值. 整体来看, 由不同位移和不同时段所获得的8个速率值均较接近, 基本处于同一数量级别之内, 取平均值为 (0.35 ± 0.040) mm/a. 古地震研究表明, 三关口断裂

表 1 OSL 样品测年结果^{a)}

样品编号	深度(m)	U(ppm)	Th(ppm)	K (%)	含水量(%)	等效剂量(Gy)	剂量率(Gy/ka)	年龄(ka)
TD-2	1	2.60	10.26	2.16	10±5	65.88±1.03	3.59±0.13	18.36±0.72
TD-6	00.4	2.29	11.09	2.20	10±5	197.74±12.87	3.60±0.13	54.88±4.10
TD-7	11	2.78	6.58	1.24	10±5	306.26±21.88	2.44±0.08	125.36±9.85

a) 由中国科学院地球环境研究所释光实验室测试

图 7 夹子沟(No.2)实测剖面图

图8 鹰嘴山北实测地貌图(No.3)

的古地震复发周期约为8000~10000a(另文论述), 同震水平位移为3m, 据此初步估算滑动速率为0.3~0.38 mm/a, 这和本文获得的速率接近, 也和三关附近场点冲沟在18.36ka内累计6m位移(2次地震错动事件)相符合。可见, 尽管受客观条件限制, 本文只获得了三关口断裂滑动速率的最小值, 但其结果和真实滑动速率较接近。由此表明, 三关口断裂在晚第四纪具有较低的水平滑动速率, 大小接近0.35mm/a。

4 断裂右旋走滑与青藏高原东北缘弧形构造带的扩展

4.1 三关口-牛首山断裂右旋走滑的起始时间

宁夏地区新生代地层分布广泛, 前人通过对比划分出寺口子组、清水营组、红柳沟组、干河沟组及第四系, 并对地层的绝对年龄开展了研究(霍福臣等, 1989; 宁夏回族自治区地质矿产局, 1990; 李克勤,

1992; 申旭辉等, 2001; Jiang等, 2007; Zhang等, 2010; Wang等, 2011), 其中以宁夏南部的寺口子剖面研究程度最为详细和可靠, 确定的各组地层年代为: 寺口子组(29~25.3Ma)、清水营组(23.8~17Ma)、红柳沟组(17~5.4Ma)、干河沟组(5.4~2.5Ma)以及第四纪的松散砾岩堆积(2.5~0.5Ma)(Wang等, 2011)。本文直接采用该时间标尺研究本区的构造变形时限。

大比例尺地质填图显示三关口断裂错断了花布山背斜的西翼(图3b), 表明背斜变形和断裂活动不同期, 断裂活动要晚于褶皱变形。花布山背斜的西翼由红柳沟组和清水营组组成, 但在其南出露的干河沟组也卷入了同期的褶皱变形, 野外调查并未发现各组地层之间存在明显的角度不整合(图2)。位于花布山之南的地震反射剖面也清晰的揭示了该地区新生代地层褶皱变形的特征(图9), 剖面中清水营组、红柳沟组、干河沟组均卷入了褶曲变形, 其中干河沟组和红柳沟组在地表有出露。除了第四系和干河沟组之间

图9 花布山地区的浅层地震剖面

界线不清之外,其他地层间界线清楚,形态相近,不存在明显的角度不整合,表明该地区的褶皱变形较晚,发生在干河沟组地层沉积之后。尽管在浅层地震剖面中不能揭示第四系是否也发生了变形,但在研究区内,不论是零星分布的早更新世已胶结的洪积砾岩,还是黄河两岸分布的中更新世冲积砂砾石,以及山麓广布的晚更新世洪积物,毫无例外的以角度不整合覆盖于新近系之上(霍福臣等,1989;宁夏回族自治区地质矿产局,1990),表明褶皱变形早于第四纪。在剖面中,除了褶皱构造外,还发育一条小规模的正断层,切割了背斜西翼的清水营组和红柳沟组,断距相近。受分辨率的影响并未揭示干河沟组和第四系是否被错断,但在该断层上延的地表位置,发育一条长约300m、走向北东的反倾断层陡坎,错断了晚更新世洪积扇(图2)。宽缓褶皱一翼发育的正断层不可能是褶皱变形的同期产物,而且正断层在晚更新世活动,而褶皱变形并未影响到第四系,表明剖面中的正断层和褶皱不同期,正断层的活动要晚于褶皱变形。从断裂的空间展布看,该正断层可能是由于三关口断裂和柳木高断裂右旋走滑拉分的结果。可见,在三关口-牛首山断裂附近经历了两期构造变形,早期发生了地层褶皱变形,这期变形发生在干河沟组沉积之后,第四系未卷入变形,后期则发生了断裂的右旋走滑活动,并伴随着拉分作用形成小规模的一次级正断层。

前已述及,三关口-牛首山地区早期的褶皱变形发生在干河沟组沉积之后,而第四系未卷入变形。地震反射剖面显示花布山地区的干河沟组向东延伸到银川盆地之内,顶底界线连续,仅在厚度上要小于盆地内部(图9)。新生代以来,银川盆地持续下沉接受沉积(李克勤,1992),在干河沟组沉积期间被剥蚀的

可能性不大,也即干河沟组一直在连续沉积。因此,推测在花布山地区的干河沟组也是连续沉积的,只是相对银川盆地沉积速率偏小而已。而寺口子剖面的干河沟组的沉积年龄在5.4~2.5Ma之间(Wang等,2011),据此判断褶皱变形应发生在上新世末。

另外,三关口-牛首山断裂的最大走滑水平位移为961m,晚第四纪以来的平均滑动速率不小于0.35mm/a,用最大位移和平均滑动速率可以估算出起始走滑的时间大约为2.7Ma。因为所估算的走滑速率是下限值,断裂开始右旋走滑的时间应该在2.7Ma之后不久。褶皱变形要早于断裂的右旋走滑,表明褶皱变形要早于2.7Ma,而区域地层对比认为褶皱变形发生在上新世末,鉴于没有其他更准确、更直接的构造变形时间的约束,分析认为褶皱变形和断裂走滑活动的间隔较短,认为褶皱变形发生的时间接近2.7Ma,而断裂的右旋走滑可能发生在第四纪初。

综合分析,在三关口-牛首山附近经历了两期构造变形过程,早期(上新世末,接近2.7Ma),以地层褶皱变形为主,表现为次级地块的缩短和区域性的抬升;后期(第四纪初),则转化为断裂的右旋走滑活动,表现为次级地块的侧向挤出。

4.2 三关口-牛首山断裂的右旋走滑与弧形构造带扩展

三关口-牛首山断裂附近的新生代地层变形影响范围较广,自南到北连续分布,在贺兰山南段的花布山、庙山湖、高石墩、牛首山东麓均有分布,多以宽缓的褶皱或缓倾的单斜构造产出,卷入的最新地层为干河沟组,第四系以角度不整合覆盖在新近系之上(霍福臣等,1989;宁夏回族自治区地质矿产局,1990;王伟涛等,2013;梁浩等,2013)。这些褶皱的

轴向为北西或北北西向, 表明受到东北-西南方向的挤压作用. 断裂东北为银川地堑, 主体构造为北东走向的正断层, 其内沉积的巨厚新生代地层反映了东南方向持续的伸展作用(国家地震局“鄂尔多斯周缘断裂系”课题组, 1988; 柴炽章等, 2011), 显然, 北东向的构造在伸展背景下是难以产生向西南的挤压作用. 而在断裂西南即为持续向外扩展的青藏高原, 不论是向东北突出的弧形断裂, 还是断裂附近北西向展布的新生代褶皱, 都反映了高原向东北的推挤作用(国家地震局地质研究所等, 1990; Zhang等, 1990;

柴炽章等, 1998). 无疑, 三关口-牛首山断裂附近的新生代褶皱是青藏高原向东北扩展推挤的结果. 而三关口-牛首山断裂的右旋走滑则可能和次级地块受挤压运动状态的调整有关.

青藏高原弧形带由若干条状次级地块组成(国家地震局地质研究所等, 1990). 这里以海原断裂、天景山断裂和三关口-牛首山断裂3条主要活动断裂为边界, 划分3个次级地块: 南华山-六盘山地块、香山-天景山地块、烟筒山-牛首山地块(图10). 这些次级地块的边界断裂附近均存在着两阶段的构造变形过程,

图 10 青藏高原东北缘弧形构造带次级地块扩展模式图

早期以断裂逆冲或地层的褶皱变形为主, 后期则转化为断裂的走滑运动(国家地震局地质研究所等, 1990; Zhang等, 1991; Burchfiel等, 1991; 王伟涛等, 2013; 张维岐等, 2015). 在构造变形时间上, 次级地块内边界断裂开始走滑的时间和外边界断裂的逆冲或褶皱变形的时间相近, 例如: 约在5.4Ma, 香山-天景山地块的内边界-海原断裂由逆冲转化为左旋走滑, 而外边界-天景山断裂开始逆冲活动(Wang等, 2013); 约2.6或2.7Ma, 烟筒山-牛首山地块的内边界-天景山断裂由逆冲转化为左旋运动(Wang等, 2013), 而外边界-三关口-牛首山断裂附近受挤压开始褶皱变形. 这种同一地块不同边界断裂不同方式的构造变形在时间上的同步性, 绝非偶然, 而是和内侧次级地块向外推挤受阻, 侧向挤出有关(图10).

具体而言, 大约在10Ma, 南华山-六盘山地块受青藏高原主体地块的推挤开始向东北运动(Zheng等, 2006; 王伟涛等, 2013; Wang等, 2013), 由于受到外围香山-天景山地块的阻挡, 引起了二者边界-海原断裂带的逆冲活动(图10c); 大约在5.4Ma(Wang等, 2013), 随着南华山-六盘山次级地块持续向外的推挤作用, 一方面香山-天景山地块受到的推挤作用越来越强烈, 另一方面南华山-六盘山地块向东北运动越来越难, 当块体间的相持达到临界状态时, 香山-天景山地块开始向东北运动, 而南华山-六盘山地块则向阻碍作用相对弱的东侧运动, 从而达到新的运动平衡(图10b); 大约在2.7或2.6Ma, 随着香山-天景山地块对烟筒山-牛首山地块的持续推挤, 地块之间相持的平衡被破坏, 有关地块发生和上一阶段相似的调整, 烟筒山-牛首地块开始向东北运动并发生了褶皱变形和缩短(Wang等, 2013), 而香山-天景山地块则开始向阻碍作用相对偏弱的东侧运动(图10c); 大约在第四纪初, 由于烟筒山-牛首山地块的外边界在走向上不呈东北突出的弧形, 且又紧邻银川盆地, 受到鄂尔多斯地块逆时针旋转的影响(Zhang等, 1998, 1999; 李万伦等, 2001; 张岳桥等, 2006; 李延兴等, 2005), 该地块已不能保持和其他地块相似的运动状态的转变, 在香山-天景山地块的东北推挤和鄂尔多斯地块逆时针旋转的联合作用下, 该地块的运动状态很快发生改变, 由东北向运动转变为西北向的挤出, 导致了三关口-牛首山断裂的右旋走滑(图10d).

可见, 青藏高原东北缘弧形构造带的扩展是通

过次级地块逐次向外推挤而实现的, 次级地块的运动状态控制了边界断裂的运动性质, 次级地块受阻后侧向挤出是导致边界断裂带性质转变的根本原因.

5 结论

三关口-牛首山断裂是现今青藏高原东北缘弧形构造带扩展的最前缘边界, 是由3条不连续的次级断裂组成的一条右旋走滑剪切带. 该断裂大约在第四纪初开始右旋走滑, 最大走滑水平位移为961m, 晚第四纪水平滑动速率接近0.35mm/a, 同震水平位移约3m, 是一条全新世活动断裂. 三关口-牛首山断裂附近经历了两期构造变形过程, 早期以地层褶曲变形为主, 表现为次级地块的缩短和区域性的抬升, 后期则转化为断裂的右旋走滑, 表现为次级地块的侧向挤出. 两期构造变形的时间较接近, 早期的褶皱变形发生在上新世末, 接近2.7Ma, 而断裂活动可能发生在第四纪初. 上新世末(~2.7或2.6Ma), 青藏高原向东北的扩展抵达三关口-牛首山断裂附近, 大约在第四纪初, 受青藏高原东北向推挤和鄂尔多斯地块逆时针旋转共同作用, 三关口-牛首山断裂开始右旋走滑. 青藏高原东北缘弧形构造带的扩展是以次级地块分阶段逐次向外推挤而实现的, 高原扩展抵达到海原断裂、天景山断裂以及三关口-牛首山断裂附近的时间分别为10、5.4、2.7 Ma, 次级地块的运动状态控制了边界断裂的运动性质, 次级地块受阻后侧向挤出是导致边界断裂带性质转变的根本原因.

致谢 审稿专家提出了宝贵的修改意见, 冉勇康研究员、郑德文研究员、李传友研究员、张会平研究员、任治坤研究员、张竹琪副研究员、吴传勇副研究员曾指导野外工作和开展相关问题讨论, 王旭龙研究员、杜金花博士、胥红强高级实验师为光释光样品测试提供有力帮助, 在此一并表示感谢.

参考文献

- 柴炽章, 张维岐, 焦德成. 1998. 天景山断裂带前锋区构造变形及成因分析. 中国地震, 14: 150-156
- 柴炽章, 孟广魁, 马贵仁. 2011. 银川市活断层探测与地震危险性评价. 北京: 科学出版社. 28-30
- 陈虹, 胡健民, 公王斌, 李利波. 2013. 青藏高原东北缘牛首山-罗山断裂带新生代构造变形与演化. 地学前缘, 20: 18-35

- 邓起东, 张维岐, 张培震, 焦德成, 宋方敏, 汪一鹏, 伯奇菲儿, 莫尔纳, 雷登, 陈社发, 朱世龙, 柴炽章. 1989. 海原走滑断裂带及其尾端挤压构造. 地震地质, 11: 1-14
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学D辑: 地球科学, 32: 1020-1030
- 国家地震局“鄂尔多斯活动断裂系”课题组. 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京: 地震出版社. 1-322
- 国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局. 1990. 海原断裂带. 北京: 地震出版社. 1-278
- 霍福臣, 潘行适, 尤国林. 1989. 宁夏地质概论. 北京: 科学出版社. 1-300
- 雷启云, 柴炽章, 孟广魁, 杜鹏, 王银, 谢晓峰. 2008. 银川隐伏断层钻孔联合剖面探测. 地震地质, 30: 250-262
- 雷启云, 柴炽章, 杜鹏, 王银, 孟广魁. 2011. 基于钻探的芦花台隐伏断层晚第四纪活动特征. 地震地质, 33: 602-614
- 雷启云, 柴炽章, 郑文俊, 杜鹏, 谢晓峰, 王银, 崔瑾, 孟广魁. 2013. 钻探揭示的黄河断裂北段活动性和滑动速率. 地震地质, 36: 464-477
- 李克勤. 1992. 中国石油地质志(卷十二). 北京: 石油工业出版社. 362-371
- 李传友. 2005. 青藏高原东北部几条主要断裂带的定量研究. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所. 1-150
- 李延兴, 张静华, 郭良迁, 张中伏, 张俊青. 2005. 鄂尔多斯的逆时针旋转与动力学. 大地测量与地球动力学, 25: 50-56
- 梁浩, 张珂, 傅建利, 李庶波, 陈俊, 路凯. 2013. 青藏高原东北缘牛首山地区新构造运动及黄河演化. 地学前缘, 20: 182-189
- 李万伦, 卢演传, 丁国瑜. 2001. 鄂尔多斯及其邻近块体相对运动的黄土古地磁证. 第四纪研究, 21: 551-559
- 廖玉华, 柴炽章, 张文孝, 许文俊. 2000. 灵武断裂晚第四纪活动特征及位移速率. 中国地震, 16: 64-71
- 刘建辉, 张培震, 郑德文, 万景林, 王伟涛, 杜鹏, 雷启云. 2010. 贺兰山晚新生代隆升的剥露特征及其隆升模式. 中国科学: 地球科学, 40: 50-60
- 闵伟, 柴炽章, 王萍, 杨平. 1992. 罗山东麓断裂带全新世活动特征的初步研究. 中国地震, 8: 49-54
- 宁夏回族自治区地质矿产局. 1990. 宁夏回族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社. 65-440
- 申旭辉, 田勤俭, 丁国瑜, 韦开波, 陈正位. 2001. 宁夏贺家口子地区晚新生代地层序列及其构造意义. 中国地震, 17: 56-66
- 施伟, 刘源, 刘洋, 陈鹏, 陈龙, 岑敏, 黄兴富, 李恒强. 2013. 青藏高原东北缘海原断裂新生代构造演化. 地学前缘, 20: 1-16
- 汤锡元, 冯乔, 李道燧. 1990. 内蒙古西部巴彦浩特盆地的构造特征及其演化. 石油与天然气地质, 11: 127-135
- 王伟涛, 张培震, 郑德文, 庞建章. 2014. 青藏高原东北缘海原断裂带晚新生代构造变形. 地学前缘, 214: 266-274
- 王伟涛, 张培震, 雷启云. 2013. 牛首山-罗山断裂带的变形特征及其构造意义. 地震地质, 35: 1-13
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 马保起, 陈杰, 周荣军, 何宏林, 田勤俭, 何玉林, 王志才, 孙昭民, 冯希杰, 于贵华, 陈立春, 陈桂华, 于慎鄂, 冉勇康, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川Ms8.0地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 30: 597-629
- 严烈宏, 王利. 2002. 银川盆地地热系统. 银川: 宁夏人民出版社. 1-169
- 张进, 马宗晋, 任文军. 2004. 贺兰山南部构造特征及其与固原-青铜峡断裂的关系. 吉林大学学报(地球科学版), 34: 187-205
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学D辑: 地球科学, 33(增刊): 12-20
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 李海兵. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学: 地球科学, 43: 1607-1620
- 张岳桥, 廖昌珍, 施伟, 胡博. 2006. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景. 高校地质学报, 12: 285-297.
- 张维岐, 焦德成, 柴炽章. 2015. 天景山活动断裂带. 北京: 地震出版社. 1-270
- 郑德文, 张培震, 万景林, 袁道阳, 张广良, 李传友. 2005. 六盘山盆地热历史的裂变径迹证据. 地球物理学报, 48: 157-164
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 郑德文. 2009. GPS观测及断裂晚第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形. 地球物理学报, 52: 2491-2508
- Burchfiel B C, Deng Q D, Molnar P, Royden L, Wang Y P, Zhang P Z. 1989. Intracrustal detachment within zones of continental deformation. *Geology*, 17: 748-752
- Burchfiel B C, Zhang P Z, Wang Y P, Zhang W Q, Song D M, Deng Q D, Molnar P, Royden L. 1991. Geology of the Haiyuan Fault zone, Ningxia Hui Autonomous Region, China, and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 10: 1091-1110
- Deng Q D, Sung F M, Zhu S L, Li M L, Wang T L, Zhang W Q. 1984. Active faulting and tectonics of Ningxia-Hui Autonomous Region, China. *J Geophys Res*, 89: 4427-4445
- Deng Q D, Liao Y H. 1996. Paleoseismology along the range-front fault of Helan Mountains, North Central China. *J Geophys Res*, 101: 5873-5894
- England P, Houseman G. 1985. Role of lithospheric strength heterogeneities in the tectonics of Tibet and neighbouring regions. *Nature*, 315: 297-301
- England P, Molnar P. 1997. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on fault. *Geophys J Int*, 130: 551-582
- Jiang H C, Ding Z L, Xiong S F. 2007. Magnetostratigraphy of the Neogene Sikouzi section at Guyuan, Ningxia, China. *Palaeogeography*, 243: 223-234
- Li C Y, Zhang P Z, Yin J H, Min W. 2009. Late Quaternary left-lateral slip rate of the Haiyuan fault, northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 28: 1-26
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189: 419-426
- Min W, Jiao D C, Chai C Z, Zhang P Z. 2003. Characteristics of the active Luoshan fault since late Pleistocene, north central China (in Italy). *Anal Geofisi*, 46: 997-1014

- Peltzer G, Tapponnier P, Armijo R. 1989. Magnitude of Quaternary left lateral displacements along the north edge of Tibet. *Science*, 246: 1285–1289
- Scholz C H. 2002. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press. 175–243
- Tapponnier P, Peltzer G, Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10: 611–616
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang J S. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Wang W T, Kirby E, Zhang P Z, Zhen D W, Zhang G L, Chai C Z. 2013. Tertiary basin evolution along the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Evidence for basin formation during Oligocene transtension. *Geol Soc Am Bull*, 142: 113–137
- Wang W T, Zhang P Z, Kirby E, Wang L H, Zhang G L. 2011. A revised chronology for Tertiary sedimentation in the Sikouzi Basin: Implications for the tectonic evolution of the northeastern corner of the Tibetan plateau. *Tectonophysics*, 505: 100–114.
- Zhang J, Cunningham D, Chen H Y. 2010. Sedimentary characteristics of Cenozoic strata in central-southern Ningxia, NW China: Implications for the evolution of the NE Qinghai-Tibetan Plateau. *J Asian Earth Sci*, 39: 740–749
- Zhang P Z, Molnar P, Burchfiel B C, Royden L, Wang Y P, Deng Q D, Song F M, Zhang W Q, Jiao D C. 1988. Bounds on the Holocene slip rate along the Haiyuan fault, north-central China. *Quaternary Res*, 30: 151–164
- Zhang P Z, Burchfiel B C, Molnar P, Zhang W Q, Jiao D C, Deng Q D, Wang Y P, Royden L, Song F M. 1990. Late Cenozoic tectonic evolution of the Ningxia-Hui Atonomous Region, China. *Geol Soc Am Bull*, 102: 1484–1498
- Zhang P Z, Burchfiel B C, Molnar P, Zhang W Q, Jiao D C, Deng Q D, Wang Y P, Royden L, Song F M. 1991. Amount and style of late Cenozoic deformation in the Liupan Shan area, Ningxia Autonomous Region, China. *Tectonics*, 10: 1111–1129
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, Gan W J, Bürgmann R, Molnar P. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System data. *Geology*, 32: 809–812
- Zhang Y Q, Mercier J L, Vergely P. 1998. Extension in the graben systems around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of south China with respect to Gobi-Mongolia. *Tectonophysics*, 285: 41–75
- Zhang Y, Vergely P, Mercier J L. 1999. Pliocene-Quaternary faulting pattern and left-slip propagation tectonics in North China. *Episodes*, 22: 84–88
- Zheng D W, Zhang P Z, Wan J L. 2006. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan plateau margin. *Earth Planet Sci Lett*, 248: 198–208
- Zheng W J, Zhang P Z, Zhang, Ge W P, Molnar P, Zhang H P. 2013a. 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 W J, Zhang H P, Zhang P Z, Molnar P, Liu X W, Yuan D Y. 2013b. Late Quaternary slip rates of the thrust faults in western Hexi Corridor (Northern Qilian Shan, China) and their implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau. *Geosphere*, 9: 342–354