2019 年 7 月 地 球 学 报 Jul. 2019
第 40 卷 第 4 期: 614-628 Acta Geoscientica Sinica Vol.40 No.4: 614-628
www.cagsbulletin.com

银川盆地东缘黄河断裂第四纪活动与分段性研究

包国栋[1, 2)], 陈 虹[1, 2)*], 胡健民[1, 2)], 朱桂繁[3)]

1)中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2)自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;
3)中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北三河 065201

摘 要: 银川盆地位于南北地震带的北段, 是一个典型的新生代断陷盆地, 自西向东发育贺兰山东麓山前断裂、芦花台断裂、银川隐伏断裂和黄河断裂等四条主要活动断裂。该盆地中记载的历史最大地震是 1739 年平罗 8 级地震, 其发震断裂一直存在争议, 最近研究认为可能是黄河断裂, 但是缺乏直接的古地震证据。本文通过对黄河断裂的地貌特征、几何分布、构造变形序列和地震活动等方面的研究, 发现黄河断裂可以划分为红崖子段、陶乐段、滨河段和灵武段。断裂总体经历了早期由东向西逆冲变形向晚期西倾正断层的转换, 构造应力场由 NW–SE 向挤压转变为 EW 向伸展, 转换时间为晚更新世末。通过断裂不同位置活动性分析发现, 黄河断裂在晚更新世末—全新世期间至少经历了 5 次古地震事件, 其地震活动间隔约为 3 000 a。其中滨河段的最新活动是在 4 000 a 以前, 而陶乐段的最新活动可能在(330±30) a BP 之后, 对研究 1739 年平罗 8 级地震的发震断裂具有重要的意义。

关键词: 银川盆地; 黄河断裂; 第四纪; 活动性; 古地震序列

中图分类号: P542; P65 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2019.010501

Quaternary Activity and Segmentation of the Yellow River Fault of the Eastern Margin of Yinchuan Graben

BAO Guo-dong[1, 2)], CHEN Hong[1, 2)*], HU Jian-min[1, 2)], ZHU Gui-fan[3)]

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081;
2) *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing* 100081;
3) *Cores and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Sanhe, Hebei* 065201

Abstract: The Yinchuan Graben is located in the northern segment of the South-North Seismic Belt. It is a typical Cenozoic fault basin. It develops four major active faults: the Helan piedmont fault, the Luhuatai fault, the Yinchuan buried fault and the Yellow River fault from the west to the east. The largest earthquake recorded in the basin is the Pingluo *M*8.0 earthquake of 1739, and its seismogenic fault has been controversial. Recent studies suggested that the seismogenic fault may be the Yellow River fault, but there is no direct paleoseismic evidence. Based on the study of the geomorphological characteristics, geometric distribution, tectonic deformation sequence and seismic activity of the Yellow River fault, the authors hold that the Yellow River fault could be divided into Hongyazi section, Taole section, Binhe section and Lingwu section. The faults underwent an transformation from the early thrust deformation from east to west to the late westward dipping normal faults. The tectonic stress field changed from NW–SE compression to nearly EW extension, and the transformation time was the end of late Pleistocene. According to the activity analysis of different locations of the fault, the Yellow River fault experienced at least 5 paleoseismic events during the Late Pleistocene–Holocene period, and the interval of

本文由中国地质科学院基本科研业务费专项经费“贺兰山东麓山前断裂活动性调查研究与监测”(编号: YYWF201616)和中国地质调查局地质调查项目“特殊地质地貌区填图试点”(编号: DD20160060)联合资助。

收稿日期: 2018-10-31; 改回日期: 2018-12-05; 网络首发日期: 2019-01-07。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 包国栋, 男, 1994 年生。硕士研究生。主要从事构造地貌与活动构造研究工作。通讯地址: 100081, 北京市海淀区民族大学南路 11 号。E-mail: 464935568@qq.com。

*通讯作者: 陈虹, 男, 1982 年生。副研究员, 硕士生导师。主要从事区域构造、大陆变形与活动构造研究。通讯地址: 100081, 北京市海淀区民族大学南路 11 号。E-mail: chhzxm8281@163.com。

CAGS

seismicity was about 3 000 years. The latest activity time of the Binhe section was 4 000 years ago, and the latest activity of the Taole section occurred later than (330±30) a BP, it is of great significance to study the seismogenic faults of the Pingluo *M*8.0 earthquake of 1739.

Key words: Yinchuan Graben; Yellow River fault; Quaternary; activity; paleoseismic sequence

银川盆地是青藏高原东北缘典型的新生代断陷盆地，该盆地正好位于中国大陆中部地震活动频繁的南北地震带内(白铭学和焦德成，2005; Bai et al., 2010; 柴炽章等, 2011; 酆少英等, 2011)。在该盆地中发生了1739年平罗8级地震，该地震是由典型正断层引发的8级大震，然而在陆内由正断层引起的超过7级的大型地震较为罕见(Lee et al., 1976; Tapponnier and Molnar, 1977; Deng et al., 1984; Middleton et al., 2016)，故众多学者对这次地震的发震断裂展开了详细研究。20世纪60年代，石油地震勘探揭示了银川隐伏断裂的存在，由于银川隐伏断裂在空间展布上与1739年平罗地震极其吻合，有学者认为该断裂可能是平罗地震的发震断裂(李梦銮等, 1984; 郭增建, 1988; 宁夏回族自治区地质调查院, 2017)。自20世纪80年代以来，大量研究者通过红果子沟明长城的几何特征，以及断裂的地表破裂和活动性等方面研究认为，平罗地震的发震断裂是贺兰山东麓山前断裂，该断裂最新活动时代主要通过断层错断明长城来限定(张维岐等, 1982; 邓起东和尤惠川, 1985; 杨景春等, 1985; 国家地震局“鄂尔多斯活动断裂系”课题组, 1988; 崔黎明等, 1990; 雷启云等, 2015; Liu et al., 2017)，但是最近也有学者通过红果子沟明长城及附近的断层变形的精细测量与研究发现，红果子沟长城并未发生位移和断裂错断，明长城是在先前的断层陡坎上建造的(Lin et al., 2013)，同时通过对贺兰山东麓山前断裂变形与黄河断裂北段的综合研究表明，贺兰山东麓山前断裂与黄河断裂的最新活动均发生在过去2 570年内，并推测平罗地震的发震构造可能为黄河断裂(Lin et al., 2015)，但是并没有直接的证据表明黄河断裂在1739平罗地震发生时活动过。而且目前研究显示黄河断裂在不同位置的活动速率差异较大(雷启云等, 2014; Lin et al., 2015)。所以黄河断裂是否为平罗地震的发震断裂仍需要进一步研究，尤其是该断裂往南的构造变形、地貌和活动性等特征。

银川盆地的深部地震反射剖面研究结果表明，银川盆地内发育四条主要断裂带，自西向东依次为贺兰山东麓山前断裂、芦花台断裂、银川隐伏断裂和黄河断裂，四条断裂在深部均汇聚到黄河断裂(柴炽章等, 2006; Liu et al., 2008; Huang et al., 2016)。通过震源深度与地震剖面的综合发现，1739年平罗地震的震源投影正好位于贺兰山东麓山前断裂和黄河断裂在深部的相交位置(Lin et al., 2015)，这可能是目前对于平罗地震发震断裂存在争议的主要原因。

本文详细调查了黄河断裂的中段和南段，通过野外构造变形与地貌调查、探槽挖掘等方法(李梦銮等, 1984; 邓起东和尤惠川, 1985; 王熙和王明镇, 2013; Lin et al., 2015)，详细分析了黄河断裂的活动和分段性特征，对重新认识平罗地震的发震断裂具有重要意义。

1　区域地质背景

银川盆地位于贺兰山构造带与鄂尔多斯地块之间，盆地北至石嘴山惠农区，南到吴忠市青铜峡(图1)，总体呈NNE向，是典型的新生代断陷盆地(国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组, 1988; 酆少英等, 2011)。盆地最初断陷时代为中元古代—早古生代(酆少英等, 2011)，后经历了多期构造叠加，沉积了巨厚的新生代沉积物，总厚为4 000~7 000 m，最厚达8 000 m(杨承先, 2002; 宁夏回族自治区地质调查院, 2017)。盆地基底为寒武系—奥陶系及白垩系地层，新生代沉积物自下而上可划分为渐新统清水营组(E_3q)、中新统彰恩堡组(N_1z)、上新统干河沟组(N_2g)和第四系(Q)(Chen et al., 2015; 宁夏回族自治区地质调查院, 2017)。清水营组厚度为1 000~1 300 m，岩石组成为中厚层状紫红色粉砂岩、泥岩，紫红色、橘红色夹灰绿色粉砂质泥岩，含石膏晶体和石膏晶体细脉；彰恩堡组厚度为840~1 800 m，岩石组成为厚层状桔红色-橘黄色砂岩、砂质泥岩、黏土质粉砂岩夹灰白色长石石英砂岩；干河沟组厚度达2 500 m，岩石组成下部为厚层状灰白、褐黄色中-粗砂、细砾与砖红色黏土质粉砂互层，上部为厚层状中-粗粒砾石夹褐黄色斑杂铁锈色中-细砂透镜体(杨承先, 2002; 黄兴富等, 2013; 梁浩等, 2013)。第四系沉积物厚度为800~1 000 m，主要由黄河冲积和贺兰山洪积物组成，沉积物由南向北颗粒变细，层次增多，层厚减薄，分选性逐渐变好(童国榜等, 1995; 杨振京和童国榜, 2001; 宁夏回族自治区地质调查院, 2017; 白雪等, 2017)，而且盆地内第四系沉积物厚度明显受盆地边界断裂所控制(柴炽章等, 2011)。

银川盆地中发育四条主要断裂，由西向东依次为贺兰山东麓山前断裂、芦花台断裂、银川隐伏

CAGS

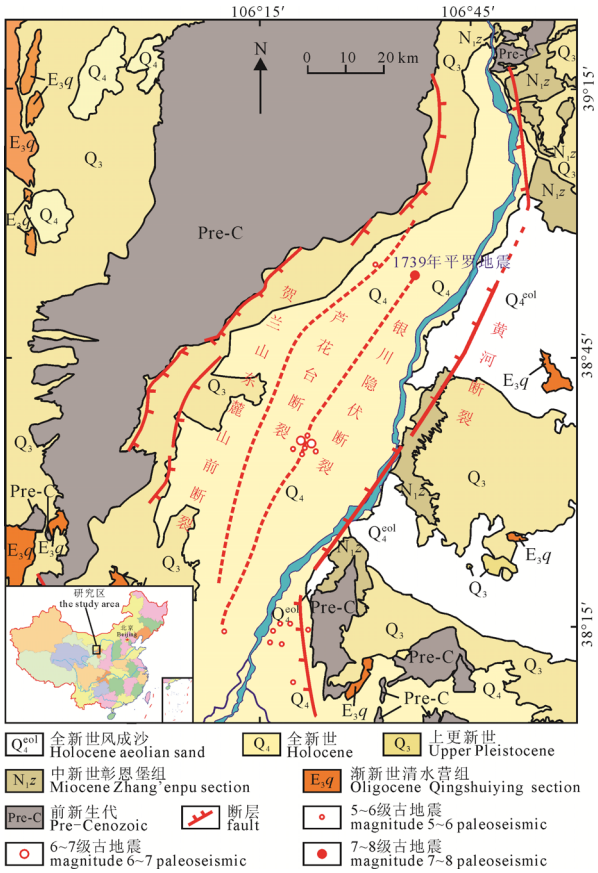

图 1 银川盆地地质地貌格架图

Fig. 1 Geology and geomorphology of the Yinchuan basin

断裂、黄河断裂(图 1)。银川盆地西缘主要受控于贺兰山东麓山前断裂，新生代以来控制着整个银川盆地的沉降，在遥感影像上呈现明显的线性影像，由多条正断层组合而成的锯齿状断裂带(杜鹏等, 2009; 黄兴富等, 2013; 雷启云等, 2015)。芦花台断裂是一条长约 80 km 的一条向东倾的铲形断层，为一条隐伏断裂，南起东大滩，从银川西夏区西部穿过，向北依次经过军马场、金山、暖泉，该断层的活动性由北向南逐渐增强(雷启云等, 2011)。银川隐伏断裂走向 NE，全长 66 km，分为南北两段，从第四纪到近代仍有持续活动(罗国富等, 2013)，由于其顶部受到巨厚松散地层的吸收和消减，银川隐伏断裂的破裂未抵达地表(柴炽章等, 2011)。黄河断裂是银川盆地东缘的一条断裂，控制了早期银川盆地的发育，是盆地内展布最长、切割最深的一条深大断裂(雷启云等, 2014; 黄兴富等, 2016)。

银川盆地中有记录的 5 级以上的地震共计 17 次，这些地震主要沿黄河断裂和银川隐伏断裂分布在银川盆地的中南部，而沿贺兰山东麓山前断裂的古地震记录较少(图 1)。其中 1739 年发生在平罗的 8 级大震，是银川盆地有史以来发生的最大一次破坏性地震，地震造成了大量的房屋倒塌，地面有多处发生破裂，伴随有黑水涌出，引起严重的砂土

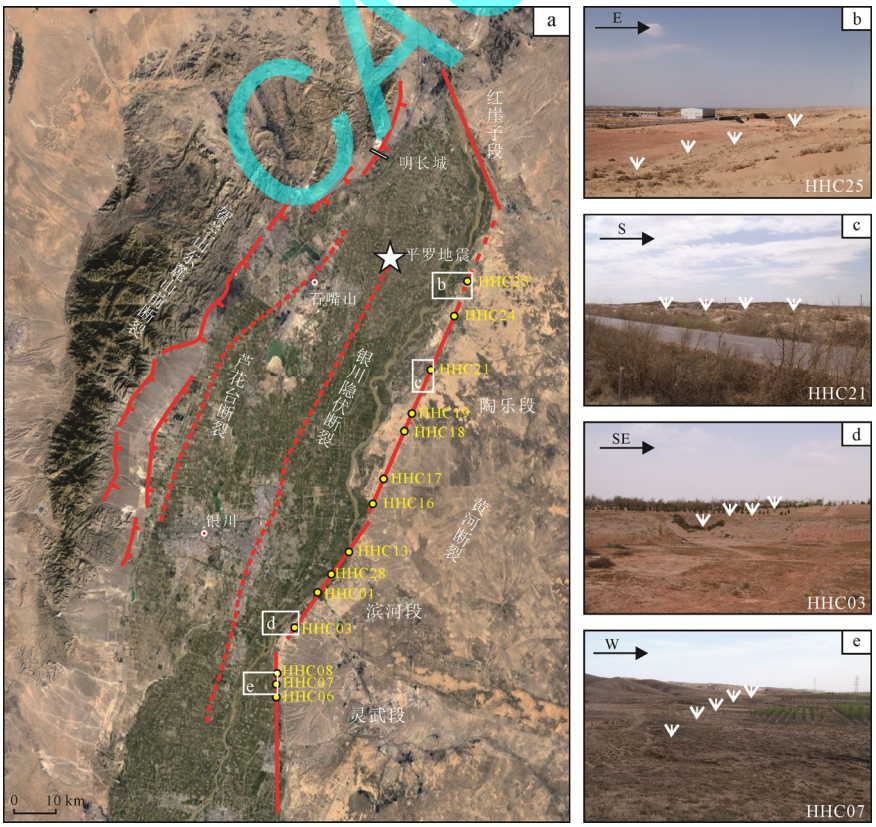

图 2 黄河断裂分段性及其地貌特征

Fig. 2 Segmentation and geomorphological features of the Yellow River fault

a-黄河断裂分段性及其主要点位; b-陶乐段地貌特征; c-陶乐段地貌特征; d-滨河段地貌特征; e-灵武段地貌特征

a-the segmentation of the Yellow River fault and position of the main points; b-Taole section geomorphological features; c-Taole section geomorphological features; d-Binhe section geomorphological features; e-Lingwu section geomorphological features

CAGS

液化，有近 5 万人丧生，并导致位于银川市西北 2 km 的海宝塔及与其相对的承天塔完全倒塌(雷启云等, 2015; Lin et al., 2015)。

黄河断裂位于银川盆地东缘，总体呈南北向沿黄河东侧延伸，北起石嘴山惠农区，南至灵武南，全长大于 180 km，是距离因平罗地震而倒塌的海宝塔最近的断裂带。通过人工地震深反射剖面揭示，黄河断裂切割深度大于 40 km，切割了壳幔边界，与贺兰山山前断裂在约 19 km 的深处相交(崔瑾, 2014; 刘保金等, 2017)。根据断裂走向、地表位置及地貌等特征，可将黄河断裂划分为红崖子段、陶乐段、滨河段和灵武段(图 2a)。其中红崖子段北起惠农区，南至红崖子乡，呈 NNW 延伸约 35 km; 陶乐段北起三棵柳村，南至三道墩，呈 NNE 向延伸约 60 km; 滨河段分布在红墩子至二道沟，呈 NNE 向延伸约 40 km; 灵武段主要分布在红柳湾村至大泉，呈 NNW 向延伸约 40 km。

2　地貌特征

黄河断裂是鄂尔多斯地块的西部边界，断裂中部沿黄河东岸呈 NNE 向延伸，但是在南北两端的走向有一定差异(图 2a)。黄河断裂在地貌上主要表现为陡立的陡坎，特别是发育在冲积扇中的部分，陡坎高度为 10~30 m，陡坎总体为 NNE 向延伸，陡坎总体倾向西。但是受黄河河流冲刷以及风成沙覆盖的影响，黄河断裂不同位置的地表地貌特征差异明显。

红崖子段的断层坎被黄河侵蚀严重，主要以发育黄河阶地为特征。根据黄河河道的分布和高程，其中 T2 阶地与黄河断裂的断层坎近平行(Lin et al., 2015)。断层坎东侧均为第三系基岩。

陶乐段的断层陡坎被风成沙覆盖严重(图 2b, c)，沙丘下伏基岩为第三系砂岩和泥岩。其中北段受耕地开发的影响，仅残留了沙丘覆盖基岩与耕地之间的地貌陡坎，高差约 20~30 m(图 2b); 南段断层坎依然被风成沙覆盖，但是可以观察到沙丘顶面约 10 m 的高差(图 2c)。

滨河段断层陡坎主要发育于第四系冲洪积物中，局部被现今黄河河道侵蚀或风成沙覆盖，在冲积扇发育地区断层坎高差约为 10 m(图 2d)。

灵武段主要表现为山前陡坎，其东侧为前新生代陡坎高差一般为 30~50 m。但是受后期冲积扇冲刷的影响，局部地区仅残留 5~10 m 的地貌陡坎(图 2e)。

3　构造特征

3.1　红崖子段

黄河断裂红崖子段主要错动了泥砂层和砂砾石层，断裂的走向主要为 NNW，倾向 SW，倾角为 32°~56°。断裂发育的位置有砂土液化现象，砂土液化主要呈脉状分布于地层中，并被断裂所切割，断裂形成的破碎带和砂土液化的宽度约为 5 m，且冲积扇发生了向西 20°~30°的倾斜(Lin et al., 2015)。

3.2　陶乐段

黄河断裂陶乐段主要发育于中新统彰恩堡组和第四系河流冲积物中，断裂东侧为彰恩堡组泥岩，并且大部分被风成沙所覆盖; 西侧为黄河河流冲积物。

该断裂地表地貌和断裂特征总体以正断层为主，主断层面产状为 290°∠70°，断裂错断彰恩堡组泥岩及上部晚更新世以来的松散砂砾石层，断层活动形成宽 5~10 cm 的裂缝，并充填有松散砂砾石，断层顶部被风成沙覆盖，未见错断(图 3a, b)。

而在断层东盘彰恩堡组泥岩中，可见倾向西的正断层错断了早期逆断层。逆断层总体产状为 85°∠46°，其上盘为彰恩堡组桔红色泥岩，下盘为灰白色泥岩(图 3c)。该断层发育宽约 2 m 的破碎带，破碎带内发育构造透镜体，其长轴方向与断层面形成宏观 S-C 组构，也可以指示逆冲变形特征(图 3d)。晚期倾向西的正断层错断早期逆断层面，断距大约为 0.5~3 m(图 3a, e, f)，图 3a 中断裂错断砾石层及彰恩堡组地层，断距约为 3 m，上覆被风成沙所覆盖。

通过晚期正断层擦痕测量，反演其构造应力场为 σ_1: 184°∠50°, σ_2: 344°∠49°, σ_3: 85°∠05°，指示了 ENE–WSW 向伸展应力场特征(图 3g)。

3.3　滨河段

黄河断裂滨河段主要发育于中新统彰恩堡组和第四系冲积物中，断裂东侧为前新生代地层和彰恩堡组泥岩夹砂岩，局部被砂砾石夹砂土层覆盖，西侧为黄河河流冲积物。

该断裂地表地貌特征和断裂特征总体以正断层为主，主断层面产状为 338°∠73°，断裂错断彰恩堡组泥岩夹砂岩，并发育宽 2~3 m 的破碎带，并充填有上新统干河沟组的灰色砂岩残留体，部分层位有牵引变形(图 4a)。断裂下盘彰恩堡组和干河沟组地层中发育一系列近平行的次级断裂，断距一般为 0.5~1.5 m(图 4b, c)。断层顶部被厚度为 0.5~5 m 的砂砾石层覆盖，未被错断(图 4a, b, c, d)，错断了下部的 Q_3 地层，断距至少为 10 m。

而在第四系砂砾石层中，可见早期逆冲断层，逆冲断层总体产状为 132°∠70°，其上盘下部以砾石层为主，上部为厚度 3~4 m 的晚更新世次生黄土层夹砂砾石层，砾石层钙质含量较高，下盘以晚更新世钙质较高的砾石层为主，断面平直，可见垂直走向的擦痕线理，指示了逆冲断层的特征(图 4f, g)。通过对该逆冲断层擦痕测量，反演其构造应力场为 σ_1: 170°∠1°, σ_2: 75°∠64°, σ_3: 259°∠25°，指示了

CAGS

NNW–SSE 向挤压与 ENE–WSW 向伸展的转换构造应力场(图 4f)。

3.4 灵武段

黄河断裂灵武段主要发育于前新生代地层、中新统彰恩堡组及第四系砂砾石层中，断裂带东侧为前新生代的基岩，西侧主要以山前冲积扇为主。

该断裂地表地貌特征和断裂特征总体以正断层为主，断层控制了彰恩堡组与第四系之间的分界。在断裂最北端可见彰恩堡组泥岩与第四系含砾泥土层之间的断层，断层主体产状为 242°∠30°(图 5a)，断层面擦痕线理清晰，指示了左行走滑特征(图 5b)，断层带内还发育次级左行走滑正断层(图 5c)，总体具有 C-C’宏观构造特征，均指示了左行走滑运动特征。

同时，该断层的正断层特征明显，主体产状为 285°∠50°，断裂错断了第四系砂砾石层，并形成了宽约 3 m 的破碎带(图 5d)，靠近断裂两侧的岩层发生了明显的牵引变形，指示了正断层特征(图 5e)。断层上部被最新的冲积扇覆盖，指示断层后期没有活动(图 5d)。

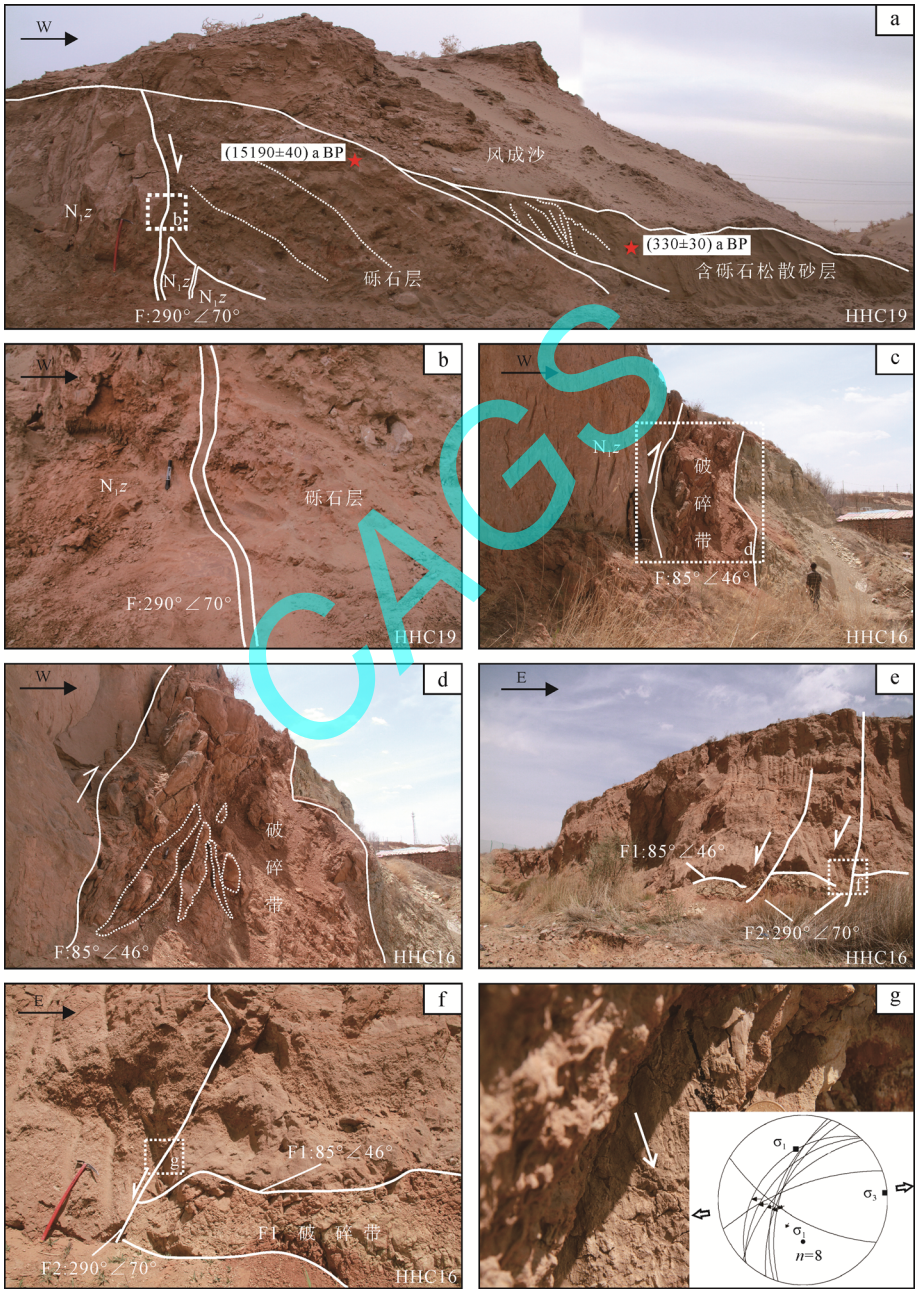

图 3 陶乐段断裂变形特征

Fig. 3 Characteristics of fracture deformation of Taole section

a-断层宏观特征; b-断裂形成的 5~10 cm 裂缝; c-逆冲断层面及破碎带; d-破碎带及其透镜体; e-逆冲断层面被正断层错断; f-正断层错断逆冲断层破碎带; g-正断层擦痕及其应力场特征

a-fault macroscopic features; b-5~10 cm crack formed by fault; c-thrusting fault plane and crush zone; d-crushing zone and lenses; e-the reverse fault plane interrupted by a normal fault; f-normal fault cutting thrust fault crushing belt; g-normal fault scratches and stress field characteristics

CAGS

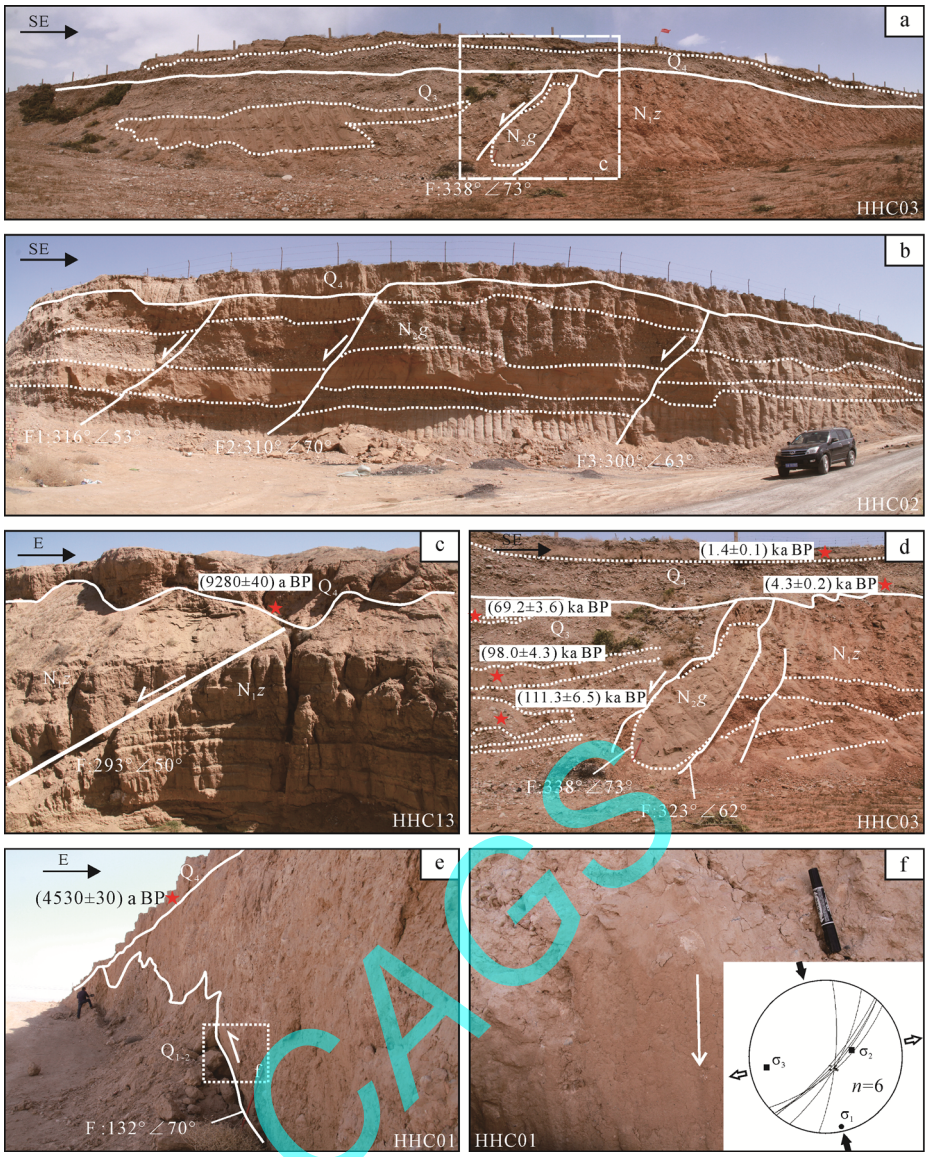

图 4　滨河段构造变形特征

Fig. 4　Structural deformation characteristics of the Binhe section

a-主断裂宏观构造特征; b-断裂东盘基岩地层中的次级断裂系; c-断裂东盘地层中的次级正断层; d-断裂带及其样品特征; e-逆冲断层构造特征; f-逆冲断层面擦痕及其应力场特征

a-macrostructure characteristics of main fault; b-a secondary fault system in the fault east plate bedrock formation; c-secondary normal fault in the fault east plate Formation; d-fault zone and its sample characteristics; e-thrust fault structure; f-thrust plane scratches and their stress field characteristics

通过对早期左行走滑断层的擦痕测量，反演其构造应力场为 σ_1: 66°∠29°, σ_2: 184°∠39°, σ_3: 310°∠35°，指示了 NE–SW 向挤压与 NW–SE 向伸展的转换构造应力场(图 5b)。

4　古地震活动特征

黄河断裂为一条活动断裂带，断裂总体在地表的出露比较明显，但是在陶乐等地区受沙丘覆盖的影响，地表出露并不是很清楚，本文通过不同位置挖掘探槽和探槽剖面的剖析，获取了该断裂古地震期次信息，并采集相关的年代学样品，通过光释光和 ^{14}C 测年，获取了相关样品的准确时代。光释光样品是在国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心测试实验室分析，测试结果见表 1。^{14}C 年龄样品由美国 Beta 实验室测试，测试结果见表 2。

4.1　陶乐段

陶乐段地貌陡坎较明显，但是受风成沙覆盖的影响，并未发现有明显断裂活动的痕迹。本文在两个地点分别进行了剖面揭露和探槽挖掘。

在该断裂段中部(HHC19)的剖面揭露发现，断裂带在该处错断了彰恩堡组的桔红色泥岩夹粉砂岩和上覆的砾石层和松散含砾砂层，砾石层中砾石主要为桔红色泥岩，可能与断裂活动有关。该断裂形成了 5~10 cm 的裂缝，内部填充了与上盘松散砂层一样的松散砂砾石，而且松散砂层与下伏砾石层产状一致，具有较大的地层倾角(图 3a)，另外顶部被

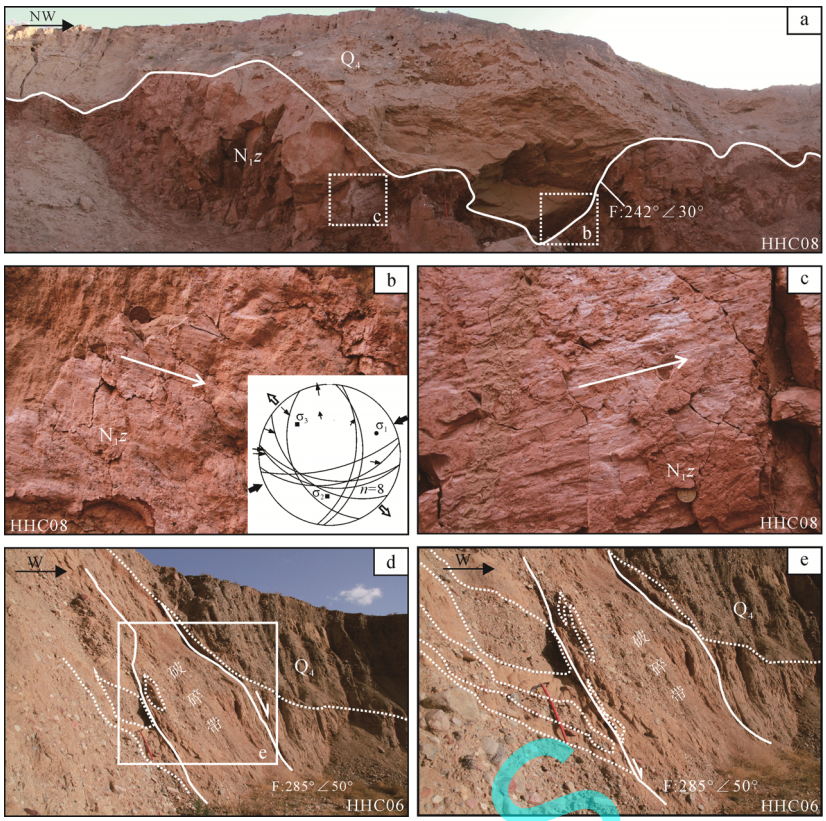

图 5 灵武段构造变形特征

Fig. 5 Structural deformation characteristics of Lingwu section

a-左行走滑断层宏观构造特征; b-主断层擦痕及其应力场特征; c-次级断层擦痕; d-正断层破碎带及其与地层的接触关系; e-断层带附近地层牵引变形

a-sinistral strike-slip faulting macroscopic structural features; b-main fault scratch and stress field characteristics; c-secondary fault scratch; d-normal fault crushed zone and contact relationship with the formation; e-traction deformation near the fault zone

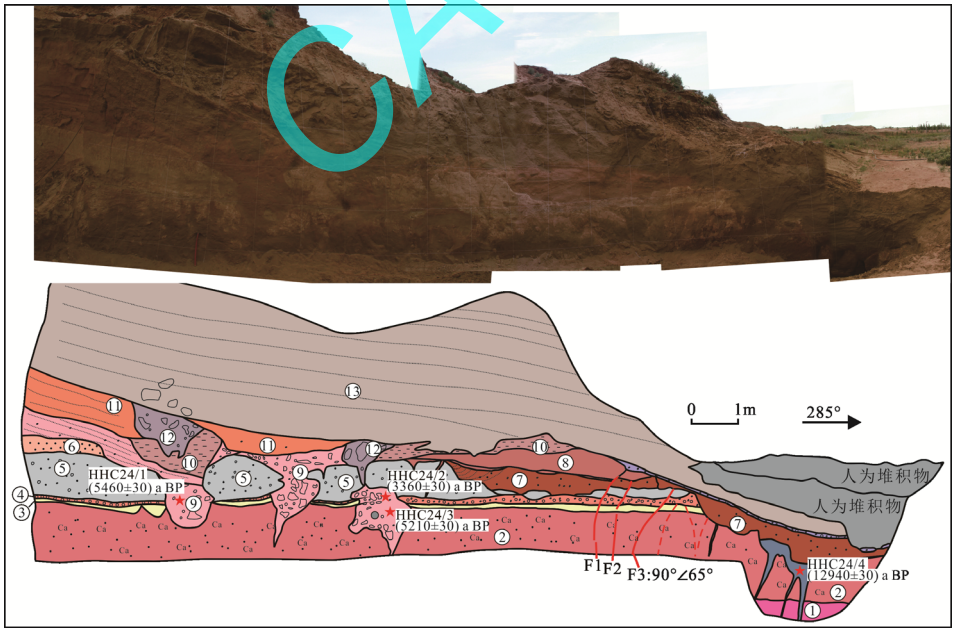

图 6 黄河断裂陶乐段(HHC24)探槽剖面图

Fig. 6 The trench profile of Taole section in the Yellow River fault (HHC24)

①-紫红色泥岩(N_1z); ②-肉红色、砖红色含钙质结核粉砂岩(N_1z); ③-黄绿色、灰白色砂岩(N_1z); ④-砖红色细砾岩, 顶部为灰绿色砾岩(N_1z); ⑤-灰白色细砾岩(N_1z); ⑥-砖红色砂岩(N_1z); ⑦-褐红色含砾粗砂层, 含斜层理, 夹 1~2 cm 厚泥岩层(Q); ⑧-砖红色中-细粒砂层, 水平层理(Q); ⑨-中-细砾石层, 砾石以砖红色泥岩为主(Q); ⑩-砖红色粉砂质泥岩; ⑪-中-细砾石层, 砾石为砖红色泥岩; ⑫-粗砾石、砂组成的楔状体; ⑬-风成沙

①-fuchsia mudstone(N_1z); ②-flesh red, brick- red siltstone with calcareous tuberculous (N_1z); ③-yellow-green, off-white sandstone(N_1z); ④-brick red fine conglomerate with gray-green conglomerate at the top(N_1z); ⑤-off- white fine conglomerate(N_1z); ⑥-brick red sandstone(N_1z); ⑦-Brown-red gravel coarse sand layer with oblique layering, 1~2 cm thick mudstone layer(Q); ⑧-brick red medium-fine grain sand layer, horizontal bedding(Q); ⑨-medium-fine gravel layer, gravel is mainly brick red mudstone(Q); ⑩-brown red silty mudstone; ⑪-medium-fine gravel layer, gravel is brick red mudstone; ⑫-wedge composed of coarse gravel and sand; ⑬-wind sand

CAGS

风成沙覆盖, 未见错断, 表明该断裂错断的最新地层是上部松散砂层。在断裂上盘的砾石层和砂层中分别采集了炭屑样品进行 ^{14}C 测年, 其年龄结果分别为(15 190±10) a BP 和(330±30) a BP(图 3a)。表明该断裂在(15 190±10) a BP 时期发生过构造活动(E2), 且在(330±30) a BP 之后也有过一次古地震事件(E5)。

在断裂北部庙庙湖北侧约 1 km 处(HHC24)挖掘探槽(图 6)。该探槽深度大约 6 m, 长度约 20 m, 走向为 285°, 探槽共揭露出 3 次古地震事件, 并采集了 4 个 ^{14}C 样品。

探槽揭露出的地层主要为彰恩堡组(N_1z)、第四系(Q)地层, 总体可划分为 13 层, 其中与地震活动相关的主要标志层有 3 层:

标志层 1: 第②层中发育的灰色有机质层, 呈楔状贯入下部地层中, 可能代表较早一期地震活动的地震楔, 在其中采集样品测得年龄为: (12 940±30) a BP(图 6, 表 2), 表明在 12 940 a BP 之后, 黄河断裂发生过活动, 造成了地震并形成了地震楔, 限定了古地震活动事件的上限时间(E2)。

标志层 2: 第⑨层主要为地震楔, 是由于断裂活动引发地震而形成的楔状体贯入地层之中, 分别在⑨中和有机质中采了 ^{14}C 样品, 在地震楔中主要采了炭屑, 采样位置如图 6, 其结果为: HHC24-1: (5 460±30) a BP(表 2), HHC24-2: (3 360±30) a BP(表 2), HHC24-3: (5 210±30) a BP(表 2), 表明断裂在(5 460±30) a BP–(3 360±30) a BP 之间曾经发生过活动, 第⑨层的地震楔则为较晚的地震事件 E3 形成的。

标志层 3: 第⑫层, 为晚于第⑨层地震楔的最新地震楔沉积, 在第⑨层中测得年龄最小为(3 360±30) a BP, 表明黄河断裂在 E3 事件之后还有一期地震事件(E4), 并形成了第⑫层地震楔。

在该断面出露有 3 条倾向东的断裂, 其倾向与黄河断裂主断裂相反, 可能均为黄河断裂伴生的次级断裂。由于后期人为改造, 该探槽并没有揭露出黄河断裂主断裂位置, 其主断裂位置应该位于剖面西侧。已经揭露的剖面反映该断裂发育至少有三期的古地震活动, 并伴生有地震楔。

4.2　滨河段

滨河段的点 HHC13 处, 黄河断裂错断了下部彰恩堡组泥岩与上部第四系砂砾石互层, 但是未错断顶部覆盖的砾石层, 在顶部砾石层中采了样品(图 4c), 其结果为(9 280±40) a BP(表 2), 表明在(9 280±40) a BP 之前发生过一期古地震事件(E2), 在点 HHC01 断层面顶部地层中采集了蜗牛样品(图 4e), 其年龄结果为: (4 530±30) a BP(表 2), 断裂未错断顶部地层, 表明断裂在(4 530±30) a BP 之前发生过一期古地震事件(E2)。

在 HHC03 点处可以观察到有五个断层面, 在剖面出露位置采集了 5 个光释光样品(图 7), 断层上盘地层中的年龄为: (111.3±6.5) ka BP, (98.0±4.3) ka BP, (69.2±3.6) ka BP(表 1), 表明在(69.2±3.6) ka BP 之后断裂发生过活动, 其顶部被砂砾石层与泥层覆盖, 其中样品年龄为: (4.3±0.2) ka BP, (1.4±0.1) ka BP, 表明该段断裂带在(4.3±0.2) ka BP 之后未发生过活动。

在 N 38°21′54.0″, E 106°27′5.32″, H 1 119 m, 明长城南侧 100 m 处挖掘探槽(HHC28)。探槽深度约 1 m, 宽度 2 m, 长度约 2.5 m, 走向为 335°, 探槽揭露了 2 次古地震事件, 并在探槽中共采集 2 个光释光样品, 一个 ^{14}C 样品。

探槽揭露出的地层主要为彰恩堡组(N_1z)、第四系(Q)地层, 总体可划分为 10 层, 其中与地震活动相关的主要标志层有 4 层:

标志层 1: 第③层主要为灰色中砂, 含有水平纹层, 该标志层被断裂 F3 错断, 代表了在沉积了①②③层后, 发生了一期断裂活动将三套地层全部错断(图 7)。在第③层中采了光释光样品, 测试年龄结果为: (82.9±6.7) ka BP(表 1)。表明 F3 在(82.9±6.7) ka BP–(18 270±60) a BP 之间发生过活动, 为探槽中最早一期的地震事件, 其累积位移量约为 1.13 m, 故其滑动速率约为 0.02 mm/a。

标志层 2: 第⑥层主要为灰色砾石层(图 7), 粒径以 < 2 cm 为主, 最大粒径为 10 cm, 砾石成分主要以石英岩、石英砂岩为主, 砾石磨圆较好, 无分选。从图中可以看出, 该岩层为 F1 错断的主要标志层位, 位移量为 1 m, F1 为黄河断裂的主断裂, 表明在岩层⑥沉积之后, 黄河断裂有经历了一期构造活动将第⑥层错断, 在岩层⑤中采集了 ^{14}C 样品, 年龄结果为: (18 270±60) a BP(表 2), 表明该断裂在(18 270±60) a BP 之后及其之前均发生过古地震事件(E1, E2)。

标志层 3: E_1 层为早期的地震楔, 主要为灰色中粗砂, 呈楔状, 其代表了较老的古地震事件形成的地震楔(图 7)。

标志层 4: E_2 层为晚期的地震楔, 主要岩性为: 中粗砂及其砂土液化组成, 该地震楔覆盖于①–⑦层之上, 代表了在第⑦层沉积之后的一期地震事件形成的地震楔(图 7)。

CAGS

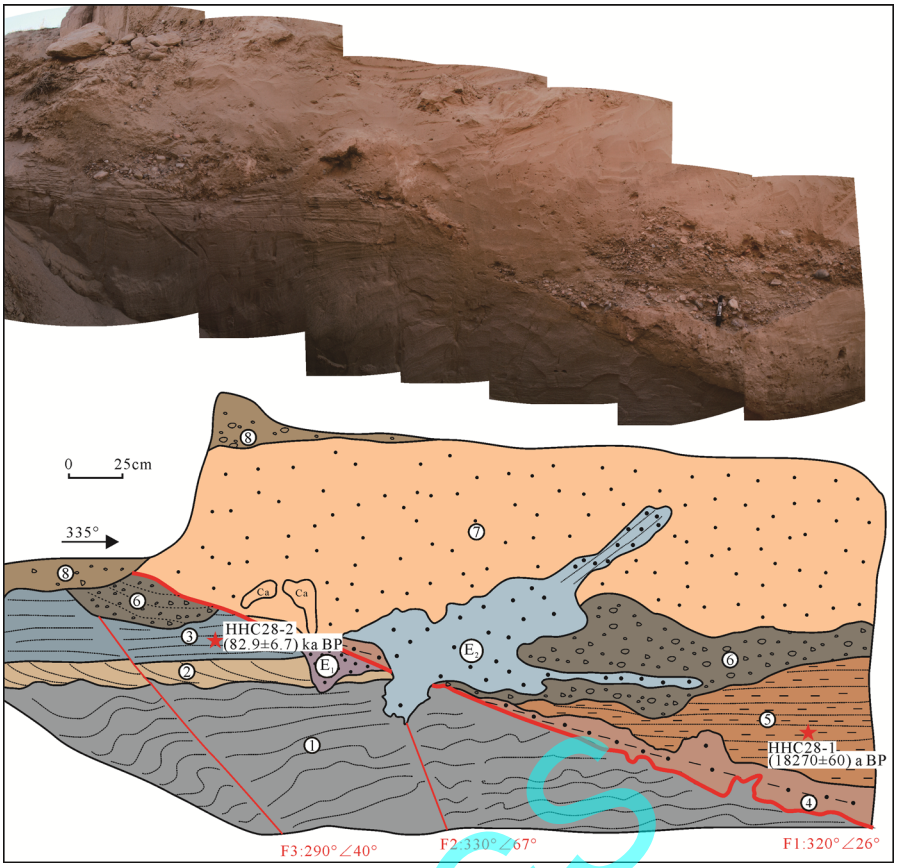

图 7 黄河断裂滨河段(HHC28)探槽剖面图

Fig. 7 The trench profile of Binhe section in the Yellow River fault (HHC28)

①-深灰色中粗砂，有细纹层；②-灰色粗砂，有纹理；③-灰色中砂，有水平纹层；④-灰褐色含泥质砂层，含砾石；⑤-黄灰、黄褐色泥层与粉砂层，夹砂层；⑥-灰色砾石层，粒径以 < 2 cm 为主，最大为 10 cm；⑦-黄灰色松散细砂层；⑧-表层褐色黏土及砂层；E_1-早期地震楔，有灰色中粗砂组成；E_2-晚期地震楔及砂土液化，为中粗砂

①-dark gray medium coarse sand with fine lines; ②-gray coarse sand with texture; ③-grey medium sand with horizontal grain layer; ④-taupe-containing muddy sand layer containing gravel; ⑤-yellow ash, yellow-brown mud layer and silt layer, sand layer; ⑥-gray gravel layer, the particle size is mainly <2 cm, the maximum is 10 cm; ⑦-yellow gray loose sand layer; ⑧-surface brown clay and sand layer; E_1-earth seismic wedge, composed of gray medium coarse sand; E_2-late seismic wedge and sand liquefaction, medium coarse sand

5 讨论

5.1 构造变形序列与转换机制

早期通过地层褶皱、活动断裂、地震形变、震源机制解和地形变测量资料反映的应力状态表明，第三纪末以来，宁夏地区的构造应力状态并没有大的变化，其中北部银川盆地区总体处于 NNW–SSE 到 NW–SE 方向的水平拉张构造应力状态(周特先等，1985)。而通过沉积-构造历史分析表明银川盆地构造应力场转换主要发生于中新世或上新世，其转换的构造背景与古太平洋板块向亚洲大陆俯冲、西太平洋边缘海盆地的近南北向扩张和青藏高原的快速隆升和向东构造挤出等多方面因素对该地区影响的相关(邓起东和尤惠川，1985; Zhang et al., 1998; 邓起东等，1999; 张培震，2003)。尤其是中新世以来，银川盆地区构造应力场演化与青藏高原隆升的关系更加紧密，而与太平洋板块向西运动的关系并不明显(赵知军等，2001; 施炜等，2013; Shi et al., 2015; Chen et al., 2015)。

第四纪以来，受青藏高原东北缘边缘扩展的影响，银川盆地区总体处于 NE–SW 构造应力场环境，该地区断裂活动主要以逆断层为主(谢富仁等，2000; Chen et al., 2015)，后期仍然经历了构造应力场转换，最新一期构造应力场转换发生在中晚更新世(张岳桥等，2006)，但是对于转换的时限和方式有不同的认识。有学者认为主应力方位转变为 NEE–SWW 向，其转变时代为中更新世(谢富仁等，2000)；也有学者认为在中更新世时期，银川盆地的构造应力场转变为 NW–SE 向(李吉均等，1996)；而在晚更新世晚期以来，其应力场则转变为 NE–SW 向挤压，黄河断裂则转变为具有右行走滑特征的正断层(黄兴富等，2013)，也有研究显示是以左行走滑为主(崔瑾，2014)。

本文通过构造变形特征研究发现，黄河断裂经历了早期逆冲变形与晚期正断层的叠加。早期逆冲变形以倾向东的逆断层为特征，错断了彰恩堡组、

CAGS

表 1　光释光年龄结果

Table 1　The age results of OSL

序号	样号	位置	岩性	埋深/m	$U/10^{-6}$	$Th/10^{-6}$	K/%	等效剂量 E.D/Gy	年剂量 Dy/(Gy/ka)	含水量/%	年龄/ka
1	HHC03-1	N38°18′24.36″, E106°23′17.32″	砂质透镜体	1.2	2.63	11.90	1.41	15.71±0.55	3.64±0.15	5	4.3±0.2
2	HHC03-2	N38°18′24.36″, E106°23′17.32″	砂质透镜体	1.0	2.07	8.07	1.57	4.50±0.41	3.24±0.13	5	1.4±0.1
3	HHC03-3	N38°18′24.36″, E106°23′17.32″	砂质透镜体	9.0	2.18	7.51	1.50	339.55±9.73	3.05±0.12	5	111.3±6.5
4	HHC03-4	N38°18′24.36″, E106°23′17.32″	砂质透镜体	7.5	2.73	10.40	1.46	341.91±3.70	3.49±0.14	5	98.0±4.3
5	HHC03-5	N38°18′24.36″, E106°23′17.32″	砂质透镜体	5.0	2.24	8.62	1.56	226.85±5.35	3.28±0.13	5	69.2±3.6
6	HHC28-2	N38°21′51.23″, E106°26′53.29″	灰色砂	1.0	2.66	7.21	1.23	250.26±12.64	3.02±0.12	5	82.9±6.7

注：样品在 Daybreak 2200(美国)光释光仪上测定，所有样品采用细颗粒简单多片再生法获得等效剂量值，用饱和指数方法进行拟合，从生长曲线图可以看出，生长曲线没有明显饱和，可以认为本批样品测试数据基本可信。

表 2　^{14}C 年龄结果

Table 2　The age results of ^{14}C

序号	样品号	位置	样品类型	测试方法	碳类型	水类型	年龄/a	可信年份
1	HHC01-1	N38°19′48.61″, E106°24′55.57″	蜗牛	AMS	无机碳	淡水	4 530±30	3 241–3 103 cal BC
2	HHC13-1	N38°25′40.90″, E106°31′37.31″	炭屑	AMS	有机碳	淡水	9 280±40	—
3	HHC19-1	N38°40′07.34″, E106°38′16.99″	碳质砂	AMS	有机碳	淡水	15 190±40	16 648–16 377 cal BC
4	HHC19-2	N38°40′07.34″, E106°38′16.99″	碳质砂	AMS	有机碳	淡水	330±30	1 477–1 642 cal AD
5	HHC24-1	N38°51′14.73″, E106°49′34.69″	炭屑	AMS	有机碳	淡水	5 460±30	4 356–4 258 cal BC
6	HHC24-2	N38°51′14.73″, E106°49′34.69″	炭屑	AMS	有机碳	淡水	3 360±30	1 700–1 607 cal BC
7	HHC24-3	N38°51′14.73″, E106°49′34.69″	炭屑	AMS	有机碳	淡水	5 210±30	4 055–3 960 cal BC
8	HHC24-4	N38°51′14.73″, E106°49′34.69″	碳质砂	AMS	有机碳	淡水	12 940±30	13 700–13 326 cal BC
9	HHC28-1	N38°21′51.23″, E106°26′53.29″	碳质砂	AMS	有机碳	淡水	18 270±60	20 397–19 959 cal BC

CAGS

干河沟组和晚更新世地层，表明其形成时代为晚更新世以来。晚期正断层变形错断了早期逆冲断层面，以及最新的全新世地层，表明断层的形成时代为全新世。通过断层擦痕反演的应力场特征显示，早期逆冲变形的构造应力场为 NW–SE 向挤压，这与昆—黄运动的时间一致(李吉均等，1996)；而晚期正断层则处于近东西向伸展的构造环境，这与 GPS 资料分析得出的晚期应力场方向一致(刘雷等，2017)。在黄河断裂滨河段可见大量全新世冲洪积物覆盖于正断层之上，未被错断，表明该位置正断层开始活动的时间至少在全新世初(图 3a，图 4a, b, c, d，图 5a, d)。而在滨河段出露的逆冲断层发育于中—晚更新世地层中，从而表明黄河断裂由挤压逆冲变形转变为伸展的时间应该是晚更新世末，这与前人研究获得的区域应力场转换特征一致(李吉均等，1996；张岳桥等，2006；黄兴富等，2013)。这种构造应力场转变可能是由于在晚更新世时期，太平洋板块俯冲作用的减弱，而印度板块向北的挤压占据主导，导致应力场方向转变为以 NE–SW 向挤压为主造成的。

5.2 古地震活动特征

对于黄河断裂的活动性，前人通过人工浅层地震勘探及钻孔联合剖面调查分析，将该断裂可总体划分南北两段，断裂北段在晚更新世末期或全新世有过活动，在(28.16±0.12) ka BP 之后有过一次古地震事件(E1)，其累积位移为 0.96 m，平均滑动速率为 0.04 mm/a(雷启云等，2014)。在红崖子段采集的 ^{14}C 样品限定了一期古地震事件(E3)是在(6 230±30) a BP—(2 650±30) a BP 之间(Lin et al., 2015)。

本文在前人研究的基础上，结合探槽挖掘等手段，共发现了 5 次古地震事件，并依据前人古地震次序图的绘制方法(张培震等，2003)，绘制了古地震次序图(图 8)，各次古地震事件的时间信息如下：

事件 E1 由钻孔联合剖面(雷启云等，2015)和 HHC28 探槽所限定，钻孔联合剖面揭示出了该次古地震事件的下限时代，年龄为(28 160±200) a BP。通过探槽的挖掘发现断裂错断了③层并被⑥层覆盖，在断裂处的⑤层被剥蚀，但是在断裂的上盘有⑤层的沉积且年龄为(18 270±60) a BP，所以表明在(18 270±60) a BP 之前有过一次古地震事件，限定了该次地震事件的上限时代。事件 E1 可以限定在(18 270±60) a BP—(28 160±200) a BP(图 8)。

事件 E2 由两个探槽及两个野外揭露的剖面限定，其中探槽 HHC24 将事件限定在(5 460±30) a BP—(12 940±30) a BP，探槽 HHC28 揭露了事件的下限时代为(18 270±60) a BP，HHC19 处的野外剖面也揭露了该事件的下限时代为(15 190±40) a BP，HHC13 的野外剖面揭露了该次事件的上限时代为(9 280±40) a BP，点 HHC01 处揭露的剖面限定了该次事件的上限时代为(4 530±30) a BP，点 HHC03 处的剖面也限定了该次事件的上限时代为(4 300±200) a BP。事件 E2 可以限定在(9 280±40) a BP–(12 940±30) a BP(图 8)。

事件 E3 由一个探槽、两个野外揭露的剖面以及 Lin et al.(2015)的剖面限定，在红崖子段挖掘的探槽将该次事件限定在(2 650±30) a BP–(6 230±30) a BP (Lin et al., 2015)，在探槽 HHC24 中将该次事件限定在(3 360±30) a BP–(5 460±30) a BP。事件 E3 可以限定在(3 360±30) a BP– (5 460±30) a BP(图 8)。

事件 E4 由一个探槽和一个剖面限定，探槽 HHC24 中地震楔⑨之上存在一个较年轻的地震楔，

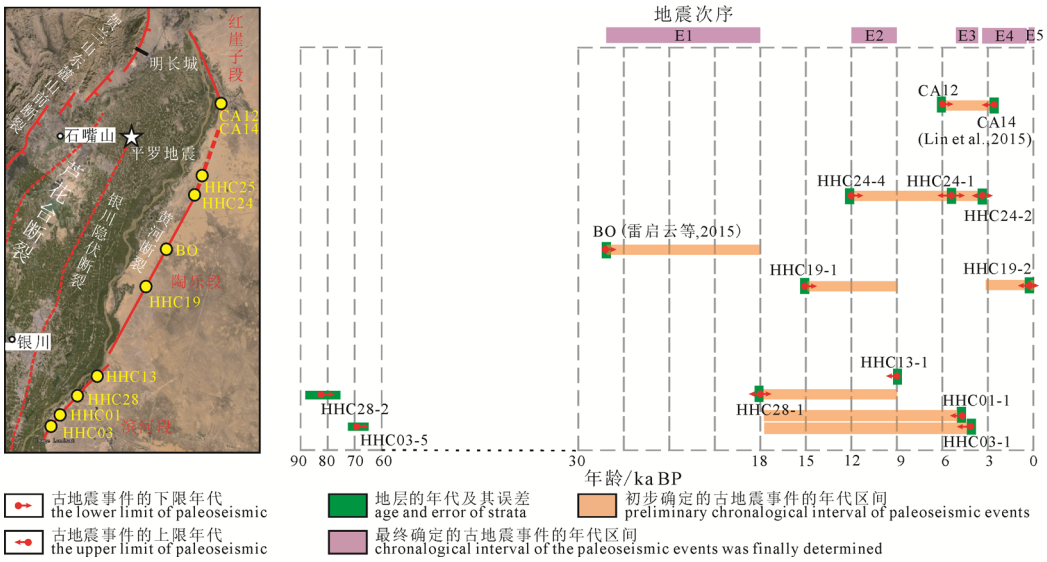

图 8 黄河断裂古地震次序图

Fig. 8 Sequence diagram of the paleoseismic activities of the Yellow River fault

表明在其之后仍有一期地震事件，故限定了该次事件的下限时代为(3 360±30) a BP，在 HHC19 剖面处可以明显观察到风成沙之前至少存在一期古地震事件。事件 E4 可以限定在(330±30) a BP—(3 360±30) a BP(图 8)。

事件 E5 由一个野外揭露的剖面限定，HHC19 处顶部风成沙已发生变形，可能为一期古地震事件造成的，其地层时代为(330±30) a BP，限定了该次古地震时间的下限，但是未找到该事件上限时代。事件 E5 可以限定在 0—(330±30) a BP(图 8)。

通过古地震序列图可以发现自 30 000 a BP 以来，构造活动主要集中在陶乐段。其中古地震事件 E3 可能是(3 360±30) a BP—(5 460±30) a BP 期间发生的一次沿黄河断裂的大规模古地震活动，该地震在陶乐段(HHC24)及红崖子段(Lin et al., 2015)均有古地震活动的表现，其发生的时间基本吻合(图 8)。对于发生在(330±30) a BP 之后的古地震事件 E5，美国 Beta 实验室提供的地层可信年份为 1 477—1 642 cal AD(表 2)。

通过对各个探槽及剖面的讨论与分析，将其古地震活动时间综合整理后发现(图 8)，自 15 000 a BP 之后，黄河断裂的活动周期基本维持在 3 000 a 左右，在全新世之后，黄河断裂的构造活动仍很明显，而且主要集中在陶乐段，其最新一期古地震事件发生在(330±30) a BP 之后，与 1739 年平罗 8 级地震的时间非常吻合。本文通过古地震序列可以看出，在 15 000 a BP 之后的古地震事件 E2 发生的时间(9 280±40) a BP—(12 940±30) a BP 左右，E3 可能发生在(3 360±30) a BP—(5 460±30) a BP，E4 发生在(330±30) a BP—(3 360±30) a BP，E5 时间发生在 0—(330±30) a BP，故黄河断裂的古地震周期约为 3 000 a。前人在红崖子和陶乐段确认的古地震活动可能代表了早期地震活动(雷启云等，2014; Lin et al., 2015)。滨河段在 4 000 a BP 之后明显没有断层活动，明显超过了古地震活动的周期，而且目前灵武段有记录的 5 级以上地震已经发生了 8 次(图 1)，表明黄河断裂南段可能是未来地震活动的危险地段。

5.3　黄河断裂的分段性

通过黄河断裂不同构造位置地貌特征研究显示，该断裂在地貌上可以划分为红崖子段、陶乐段、滨河段和灵武段等四段。

而通过构造变形分析表明，在主要研究的陶乐段和滨河段均发现有早期的逆冲变形，由于断裂走向与应力场方向的关系，而在红崖子段和灵武段未发现具有逆冲变形的特征，仅观察到正断层的变形特征，且灵武段伴随有左行走滑的特征。在晚更新世末，由于构造应力场的转变，黄河断裂整体均表现为正断层的性质。

另外通过古地震活动性分析表明，活动周期与活动速率差异明显。通过探槽挖掘等手段得到红崖子段的滑移速率为 2~3 mm/a，该段的古地震活动周期为 1 500 a(Lin et al., 2015)；依据雷启云等(2014)钻孔联合剖面可得到陶乐段黄河断裂的滑移速率为 0.04 mm/a，通过古地震次序图可以看出本段断裂的活动周期约为 3 000 a；本文通过滨河段的探槽挖掘得到该段断裂的滑移速率为 0.02 mm/a，断裂的活动周期为 3 000 a；灵武段晚第四纪以来发生过多次古地震事件，同震位移量最大可达 2.4 m，断裂平均滑移速率为 0.24 mm/a 该段的活动周期不均一，在 13 000 a BP 前，断裂的活动周期为 7 000 a，在 13 000—6 000 a BP 期间，断裂的活动周期为 2 500 a，6 000 a BP 之后，断裂的复发周期为 4 600 a(柴炽章等，2001)。

所以黄河断裂在晚更新世以前均经历了逆冲变形过程，而在晚更新世—全新世阶段的活动性差异明显，依据断裂的几何学、地貌特征、运动学及地震活动性(邓起东等，2004)，总体可以划分为红崖子段、陶乐段、滨河段和灵武段等四段。

6　结论

(1)黄河断裂可以划分为红崖子段、陶乐段、滨河段和灵武段等四段。

(2)黄河断裂第四纪以来经历了由东向西逆冲变形向西倾正断层的转换，构造应力场由北西—南东向挤压转变为近东西向伸展，转换时间可能为晚更新世末。

(3)黄河断裂在晚更新世末—全新世期间至少经历了 5 次古地震事件，其地震活动间隔约为 3 000 a。其中滨河段的最新活动是在 4 000 a 以前，而陶乐段的最新活动是在(330±30) a BP 以后。

致谢：感谢审稿人对本文提出的建设性意见。

Acknowledgements:

This study was supported by Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. YYWF201616), and China Geological Survey (No. DD20160060).

参考文献:

白铭学，焦德成. 2005. 1739 年银川-平罗 8 级地震灾害的历史辨析[J]. 西北地震学报, 27(02): 135-140.

白雪，杨振京，毕志伟，孙玉芳，刘林敬. 2017. 银川盆地第四

纪沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 山地学报, 35(6): 874-881.

柴炽章, 廖玉华, 张文孝. 2001. 灵武断裂晚第四纪古地震及其破裂特征[J]. 地震地质, 23(1): 15-23.

柴炽章, 孟广魁, 杜鹏, 王银, 刘保金, 沈卫华, 雷启云, 廖玉华, 赵成斌, 酆少英, 张学辉, 谢晓峰. 2006. 隐伏活动断层的多层次综合探测—以银川隐伏活动断层为例[J]. 地震地质, 28(4): 536-546.

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[M]. 北京: 科技出版社.

崔瑾. 2014. GIS 支持下银川盆地地震与活动断裂关系研究[J]. 地震研究, 37(3): 385-389.

崔黎明, 王萍, 潘祖寿. 1990. 贺兰山东麓冲沟裂点溯源迁移速率及其形成年龄的讨论[J]. 地震地质, 24(1): 89-91.

杜鹏, 柴炽章, 廖玉华, 宋方敏, 孟广魁, 雷启云, 王银. 2009. 贺兰山东麓断裂南段套门沟—榆树沟段全新世活动与古地震[J]. 地震地质, 31(02): 256-264.

邓起东, 尤惠川. 1985. 断层崖研究与地震危险性估计—以贺兰山东麓断层崖为例[J]. 西北地震学报, 7(1): 29-38.

邓起东, 程绍平, 闵伟, 杨桂枝, 任殿卫. 1999. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. 地质力学学报, 12(03): 13-21.

邓起东, 陈立春, 冉永康. 2004. 活动构造定量研究与应用[J]. 地学前缘, 11(4): 383-392.

酆少英, 高锐, 龙长兴, 方盛明, 赵成彬, 寇昆朋, 谭雅丽, 何和英. 2011. 银川地堑地壳挤压应力场: 深地震反射剖面[J]. 地球物理学报, 54(03): 692-697.

国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组. 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社.

郭增建. 1988. 中国特大地震研究[M]. 北京: 地震出版社.

黄兴富, 施炜, 李恒强, 陈龙, 岑敏. 2013. 银川盆地新生代构造演化—来自银川盆地主边界断裂运动学的约束[J]. 地学前缘, 20(4): 199-210.

黄兴富, 酆少英, 高锐, 李文辉. 2016. 银川盆地构造发展—深地震反射剖面揭示浅部地质与深部构造的联系[J]. 地质科学, 51(1): 53-66.

罗国富, 贺永忠, 师海阔. 2013. 银川盆地有感地震活动特征及其震感强烈原因分析[J]. 防灾减灾学报, 29(4): 19-24.

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[J]. 地学前缘, 20(4): 182-189.

李吉均, 方小敏, 马海洲. 1996. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学 D 辑, 26(4): 316-322.

刘雷, 朱良玉, 蒋峰云. 2017. 基于 GPS 资料分析银川盆地地壳运动特征[J]. 地震工程学报, 39(1): 7-13.

李孟銮, 万自成. 1984. 1739 年平罗 8.0 级地震的发震构造及其孕育特征[J]. 地震地质, 6(3): 23-28.

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[J]. 地震地质, 33(3): 602-614.

雷启云, 柴炽章, 郑文俊, 杜鹏, 谢晓峰, 王银, 崔瑾, 孟广魁. 2014. 钻探揭示的黄河断裂北段活动性和滑动速率[J]. 地震地质, 36(2): 464-477.

雷启云, 柴炽章, 杜鹏, 俞晶星, 王银, 谢晓峰. 2015. 1739 年平罗 8 级地震发震构造[J]. 地震地质, 37(3): 413-429.

宁夏回族自治区地质调查院. 2017. 中国区域地质志・宁夏志[M]. 北京: 地质出版社: 307-320.

施炜, 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带新生代构造演化[J]. 地学前缘, 20(4): 1-17.

童国榜, 石英, 范淑贤. 1995. 银川盆地晚第四纪环境特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 20(4): 421-426.

王熙, 王明镇. 2013. 皖北新元古界软沉积物液化变形-塌落叠合构造的古地震成因研究[J]. 地球学报, 34(3): 318-324.

谢富仁, 舒塞兵, 窦素芹, 张世民, 崔效锋. 2000. 海原-六盘山断裂带至银川断陷第四纪构造应力场分析[J]. 地震地质, 22(02): 139-146.

杨承先. 2002. 第三纪银川断陷主干断裂的活动性[J]. 地壳构造与地壳应力文集, (14): 55-62.

杨景春, 郭正堂, 曹家栋. 1985. 用地貌学方法研究贺兰山山前断层全新世活动状况[J]. 地震地质, 6(4): 25-33.

杨振京, 童国榜. 2001. 银川盆地中更新世以来的孢粉组合与古环境变化[J]. 地球学报, 22(4): 369-374.

周特先, 王利, 曹明志. 1985. 宁夏构造地貌格局及其形成与发展[J]. 地理学报, 40(03): 215-224.

张培震, 闵伟, 邓起东, 毛凤英. 2003. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学 D 辑, 33(8): 705-713.

张岳桥, 廖昌珍, 施炜, 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[J]. 高校地质学报, 12(3): 285-297.

张维岐, 廖玉华, 潘祖寿. 1982. 初论贺兰山前洪积扇断层陡坎[J]. 地震地质, 4(2): 32-34.

赵知军, 刘秀景, 任雪梅, 谢晓峰. 2001. 宁夏南部地区地震活动特征[J]. 西北地震学报, 23(2): 142-149.

References:

BAI Deng-hai, UNSWORTH MARTYN J, MEJU M A, MA Xiao-bing, TENG Ji-wen. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. Nature Geoscience, 3(5): 358-362.

BAI Ming-xue, JIAO De-cheng. 2005. The Historical Analysis for M=8 Earthquake in 1739 at Yinchuan-Pingluo Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 27(02): 135-140(in Chinese with English abstract).

BAI Xue, YANG Zhen-jing, BI Zhi-wei, SUN Yu-fang, LIU Lin-jing. 2017. Grain Size Characteristics and Its Depositional Environment of Quaternary Sediments in Yinchuan Plain, Northwest China[J]. Mountain Research, 35(6): 874-881(in Chinese with English abstract).

CHAI Chi-zhang, LIAO Yu-hua, ZHANG Wen-xiao. 2001. Late Quaternary paleoearthquake and their rupture features along the Lingwu fault[J]. Seismolagy and Geology, 23(1): 15-23(in Chinese with English abstract).

CHAI Chi-zhang, MENG Guang-kui, DU Peng, WANG Yin, LIU

CAGS

Bao-jin, SHEN Wei-hua, LEI Qi-yun, LIAO Yu-hua, ZHAO Cheng-bin, QI Shao-ying, ZHANG Xue-hui, XIE Xiao-feng. 2006. Comprehensive Multi-level exploration of buried active faults: an example of Yinchuan buried active fault[J]. Seismolagy and Geology, 28(4): 536-546(in Chinese with English abstract).

CHAI Chi-zhang, MENG Guang-kui, MA Gui-ren. 2011. Active fault detection and seismic hazard evaluation in Yinchuan City[M]. Beijing: Science and Technology Press(in Chinese).

CHEN Hong, HU Jian-min, GONG Wang-bing, LI Li-bo. 2015. Characteristics and transition mechanism of late Cenozoic structural[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 73-88.

CUI Jin. 2014. Study on the relationship between earthquake and active fault in Yinchuan Basin Based on GIS[J]. Journal of Earthquake Research, 37(3): 385-389(in Chinese with English abstract).

CUI Li-ming, WANG Ping, PAN Zu-shou. 1990. The headward migration rate and age of knickpoints of the gullies at eastern piedmont of HeLanShan MT[J]. Seismolagy and Geology, 24(1): 89-91(in Chinese with English abstract).

DU Peng, CHAI Chi-zhang, LIAO Yu-hua, SONG Fang-min, MENG Guang-kui, LEI Qi-yun, WANG Yin. 2009. Study on Holocene activities of the southern section of the southern section of the eastern piedmont fault of Helan Mountains Taomengou and Yushugou[J]. Seismology and Geology, 31(02): 256-264(in Chinese with English abstract).

DENG Qi-dong, SUN Feng-min, ZHU Shi-long, LI Meng-luan, WANG Tie-lin, ZHANG Wei-qi, BURCHFIEL B C, PETER M, ZHANG Pei-zhen. 1984. Active faulting and tectonics of the Ningxia-Hui autonomous region, China[J]. Journal of Geophysical Research, 89(B6): 4427-4445.

DENG Qi-dong, YOU Hui-chuan. 1985. Fault scarps Research and Earthquake risk Estimation-Example in eastern Holanshan Fault scarps[J]. Northwestern Seismological Journal, 7(1): 29-38(in Chinese with English abstract).

DENG Qi-dong, CHENG Shao-ping, YAN Wei, YANG Gui-zhi, REN Dian-wei. 1999. Discussion on Cenozoic tectonic and dynamics of the Ordos block[J]. Journal of Geomechanics, 12(03): 13-21(in Chinese with English abstract).

DENG Qi-dong, CHEN Li-chun, RAN Yong-kang. 2004. Quantitative studies and applications of active tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 11(4): 383-392(in Chinese with English abstract).

FENG Shao-ying, GAO Rui, LONG Chang-xing, FANG Shen-ming, ZHAO Cheng-bin, YAN Kun-peng, TAN Ya-li, HE He-ying. 2011. The compressive stress field of the Yinchuan garben: Deep seismic reflection profile[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(03): 692-697(in Chinese with English abstract).

Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region. 2017. The Regional Geology of China · Ningxia[M]. Beijing: Geological Publishing House: 307-320(in Chinese).

GUO Zeng-jian. 1988. China's mega-earthquake research[M]. Beijing: Earthquake Press(in Chinese).

HUANG Xing-fu, SHI Wei, LI Heng-qiang, CHEN Long, CHEN Min. 2013. Cenozoic tectonic evolution of the Yinchuan Basin: Constraints from the deformation of its boundary fault[J]. Earth Science frontiers, 20(4): 199-210(in Chinese with English abstract).

HUANG Xing-fu, FENG Shao-ying, GAO Rui, LI Wen-hui. 2016. High-resolution crustal structure of the Yinchuan basin revealed by deep seismic reflection profiling implications for deep processes of basin[J]. Earthquake Science, 29(2): 83-92.

HUANG Xing-fu, YAN Shao-ying, GAO Rui, LI Wen-hui. 2016. Development of the Yinchuan Basin: Deep seismic reflection profile revealed the linkages between shallow geology and deep structures[J]. Chinese Journal of Geology, 51(1): 53-66(in Chinese with English abstract).

LIN Ai-ming, RAO Gang, HU Jian-min, GONG Wang-bin. 2013. Reevaluation of the offset of the Great Wall associated with the ca. M8.0 Pingluo earthquake of 1739, Yinchuan graben, China[J]. Journal of Seismology, 17(4): 1281-1294.

LIN Ai-min, HU Jian-min, GONG Wang-bin. 2015. Active normal faulting and the seismogenic fault of the 1739 M8.0 Pingluo earthquake in the intracontinental Yinchuan Graben, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 155-173.

LIU Bao-jin, CHAI Chi-zhang, FENG Shao-ying, ZHAO Cheng-bin, YUAN Hong-ke. 2008. Seismic exploration method for buried fault and its up-breakpoint in quaternary sediment area—An example of Yinchuan buried active fault[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(5): 1475-1483.

LIU Bao-jin, FENG Shao-ying, JI Ji-fa, WANG Shuai-jun, ZHANG Jian-shi, YUAN Hong-ke, YANG Guo-jun. 2017. Lithospheric structure and faulting characteristics of the Helan Mountains and Yinchuan Basin Results of deep seismic reflection profiling[J]. Science China Earth Sciences, 60(3): 589-601.

LUO Guo-fu, HE Yong-zhong, SHI Hai-kuo. 2013. Yinchuan Basin have feeling earthquake activity Characteristics and felt its strong reason analysis[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 29(4): 19-24(in Chinese with English abstract).

LI Ji-jun, FANG Xiao-min, MA Hai-zhou. 1996. Geomorphological evolution of the upper reaches of the Yellow River in the Late Cenozoic and the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in Chinese (Series D), 26(4): 316-322(in Chinese).

LIANG Hao, ZHANG Wei, FU Jian-li, LI Yi-bo, CHEN Jun, LU Kai. 2013. The neotectonics in the Niushoushan mountains, the northeastern margin of the Tibet Plateau, China and its impact on the evolution of the Yellow River[J]. Earth Science Frontiers, 20(4): 182-189(in Chinese with English abstract).

LIU Lei, ZHU Liang-yu, JIANG Feng-yun. 2017. Study of crustal movement features in Yinchuan Basin based on GPS data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 39(1): 7-13(in Chinese with English abstract).

LI Meng-luan, WAN Zi-cheng. 1984. Characteristics of the earth-

CAGS

quake-generating structure for magnitude 8.0 Pingluo earthquake of 1739 and the process of its preparation[J]. Seismology and Geology, 6(3): 23-28(in Chinese with English abstract).

LEI Qi-yun, CHAI Chi-zhang, DU Peng, WANG Yin, MENG Guang-kui. 2011. Activity characteristics of Luhuatai buried fault since late quaternary revealed by drilling[J]. Seismology and Geology, 33(3): 602-614(in Chinese with English abstract).

LEI Qi-yun, CHAI Chi-zhang, ZHENG Wen-jun, DU Peng, XIE Xiao-feng, WANG Yin, CUI Wei, MENG Guang-kui. 2014. Activity and slip rate of the northern segment of the Yellow River fault revealed by drilling[J]. Seismology and Geology, 36(2): 464-477(in Chinese with English abstract).

LEI Qi-yun, CHAI Chi-zhang, DU Peng, YU Jing-xing, WANG Yin, XIE Xiao-feng. 2015.The seismogenic structure of the M8.0 Pingluo earthquake in 1739[J]. Seismology and Geology, 37(2): 413-429(in Chinese with English abstract).

LEE W H K, WU F T, JACOBSEN C. 1976. A catalog of historical earthquakes in China complied from recent Chinese publications[J]. Bull. Seismol, Soc. Am., 66(6): 2003-2016.

MIDDLETON TIMOTHY A, WALKER RICHARD T, PARSONS BARRY, LEI Qi-yun, ZHOU Yu, REN Zhi-kun. 2016. A major, intraplate, normal-faulting earthquake The 1739 Yinchuan event in northern China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(1): 293-320.

SHI Wei, LIU Yuan, LIU Yang, CHEN Peng, CHEN Long, CEN Min, HUANG Xing-fu, LI Heng-qiang. 2013. Cenozoic evolution of the Haiyuan fault zone in the northeastern margin of the Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 20(4): 1-17(in Chinese with English abstract).

SHI Wei, DONG Shu-wen, LIU Yuan, HU Jian-min, CHEN Xuan-hua, CHEN Peng. 2015. Cenozoic tectonic evolution of the South Ningxia region, northeastern Tibetan Plateau inferred from new structural investigations and fault kinematic analyses[J]. Tectonophysics, 649: 139-164.

TAPPONNIER P, MOLNAR P. 1977. Active faulting and tectonics of China[J]. Geophys. Res., 82(20): 2905-2930.

TONG Guo-bang, SHI Ying, FAN Shu-xian. 1995. Environmental Characteristics of Yinchuan Basin in Late Quaternary period[J]. Journal of Earth Sciences-China University of Geosciences, 20(4): 421-426(in Chinese with English abstract).

WANG Xi, WANG Ming-zhen. 2013. A Study of Paleoseismic Causes of Neoproterozoic Soft-sediments Liquefaction Deformation and Slump Composite Structures in Northern Anhui Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(3): 318-324(in Chinese with English abstract).

XIE Fu-ren, SHU Sai-bing, DOU Su-qin, ZHANG Shi-min, CUI Xiao-feng. 2000. Quaternary tectonic stress field in the region of Haiyuan-Liupanshan fault zone to Yinchuan fault-depression[J]. Seismology and Geology, 22(02): 139-146(in Chinese with English abstract).

YANG Cheng-xian. 2002. Tertiary major fault activities of the Yinchuan depression[J]. Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics, (14): 55-62(in Chinese with English abstract).

YANG Jing-chun, GUO Zheng-tang, CAO Jia-dong. 1985. Investigation on the Holocene activity of the Helanshan piedmont fault by use of geomorphological method[J]. Seismology and Geology, 6(4): 25-33(in Chinese with English abstract).

YANG Zhen-jing, TONG Guo-bang. 2001. Pollen assemblages and paleoenvironment changes in Yinchuan Basin since Mid-Pleistocene[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(4): 369-374(in Chinese with English abstract).

ZHANG Pei-zhen, YAN Wei, DENG Qi-dong, MAO Feng-ying. 2003. Ancient earthquakes and recurrence of strong earthquakes in the Haiyuan active fault zone[J]. Science in Chinese (Series D), 33(8): 705-713(in Chinese).

ZHOU Te-xian, WANG Li, CAO Ming-zhi. 1985. Morphotectonic patterns of Ningxia Hui-Autonomous region and its formation and evolution[J]. Acta Geographica Sinica, 40(3): 215-224(in Chinese with English abstract).

ZHANG Yue-qiao, LIAO Chang-zhen, SHI Wei, HU Bo. 2006. Neotectonic Evolution of the Peripheral Zones of the Ordos Basin and Geodynamic Setting[J]. Geological Journal of China Universities, 12(3): 285-297(in Chinese with English abstract).

ZHANG Yue-qiao, JACQUES L M, 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[J]. Tectonophysics, 285(1): 41-75.

ZHANG Wei-qi, LIAO Yu-hua, PAN Zu-shou. 1982. On the piedmont scarp in alluvial fan of Mt.Helanshan[J]. Seismology and Geology, 4(2): 32-34(in Chinese with English abstract).

ZHAO Zhi-jun, LI Xiu-jing, REN Xue-mei, XIE Xiao-feng. 2001. The seismicity features in south NingXia[J]. Northwestern Seismological Journal, 23(2): 142-149(in Chinese with English abstract).

CAGS