第 30 卷第 2 期
2024 年 4 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 30 No. 2
Apr. 2024

引用格式：刘广英，梁宽，李志鹏，等，2024. 华北平原中南部聊城-兰考断裂的第四纪晚期活动性探测：兼论 1937 年菏泽 7.0 级地震发震机制［J］. 地质力学学报，30（2）：242-259. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023088

Citation：LIU G Y，LIANG K，LI Z P，et al.，2024. Detection of the Late Quaternary activity of the Liaocheng-Lankao Fault in the south-central part of the North China Plain：Discussion on the seismogenic mechanism of the 1937 Heze *M* 7.0 earthquake［J］. Journal of Geomechanics，30（2）：242-259. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023088

华北平原中南部聊城-兰考断裂的第四纪晚期活动性探测——兼论 1937 年菏泽 7.0 级地震发震机制

刘广英[1]，梁　宽[2,3]，李志鹏[1]，马保起[2,3]，龙　焘[1]，李　磊[1]，谭　鑫[2,4]，李浩洋[5]
LIU Guangying[1]，LIANG Kuan[2,3]，LI Zhipeng[1]，MA Baoqi[2,3]，LONG Tao[1]，LI Lei[1]，TAN Xin[2,4]，LI Haoyang[5]

1. 中国铁路设计集团有限公司，天津 300308；
2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京 100085；
3. 复合链生自然灾害动力学应急管理部重点实验室，北京 100085；
4. 中国科学院大学应急管理工程与科学学院，北京 100049；
5. 四川水利职业技术学院，四川 成都 611231

1. *China Railway Design Corporation*，*Tianjin* 300308，*China*；
2. *National Institute of Natural Hazards*，*Ministry of Emergency Management of China*，*Beijing* 100085，*China*；
3. *Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards Dynamics*，*Ministry of Emergency Management of China*，*Beijing* 100085，*China*；
4. *University of Chinese Academy of Sciences*，*School of Emergency Management Science and Engineering*，*Beijing* 100049，*China*；
5. *Sichuan Water Conservancy College*，*Chengdu* 611231，*Sichuan*，*China*

Detection of the Late Quaternary activity of the Liaocheng-Lankao Fault in the south-central part of the North China Plain：Discussion on the seismogenic mechanism of the 1937 Heze *M* 7.0 earthquake

Abstract：［**Objective**］The North China Plain（NCP）is one of the most populated and economically developed areas in China and is a region with a high level of seismic hazards. Studying the Quaternary activity of the faults and the seismogenic mechanism of the large earthquakes in NCP is conducive to exploring the seismogenic pattern of intraplate earthquakes and reducing the damage caused by seismic hazards. The Liaocheng-Lankao fault（LLF）is an important buried deep major fault in the south-central part of the NCP. The activity of the LLF and its relationship with the 1937 Heze *M* 7.0 earthquake is still highly controversial.［**Methods**］In this study，the activity of the Liaocheng-Liaokao fault is finely studied by combining shallow seismic exploration，drilling，and Quaternary dating methods.［**Results**］Shallow seismic reflection profile ZF-2 reveals that the strata below 145 m are obviously displaced，and the strata above 145 m are disturbed. The Bachengsi drilling profile reveals 16 sets of marker layers and three west-dipping normal faults Fa，Fb，and Fc；they form a "compound Y" structure in the

基金项目：国家自然科学基金项目（42202253）；应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务专项（ZDJ2019-28，ZDJ2019-21）；中国铁路设计集团有限公司科技开发计划（2020YY340411）

This research is financially supported by the National Science Foundation of China（Grant No. 42202253），the Basic Research Funds of the National Institute of Natural Hazards，Ministry of Emergency Management of China（Grants No. ZDJ2019-28 and ZDJ2019-21），and the Science and Technology Development Project of the China Railway Design Corporation（Grant No. 2020YY340411）.

第一作者：刘广英（1970—），男，正研级高级工程师，水文地质专业，主要从事铁路勘察设计工作。Email：liuguangying@crdc.com

通讯作者：梁宽（1988—），男，博士，副研究员，构造地质学专业，主要从事活动构造研究。Email：liangkuan18@126.com

收稿日期：2023-08-01；**修回日期**：2023-09-07；**录用日期**：2023-10-24；**网络出版日期**：2023-11-23；**责任编辑**：范二平

profile, of which Fa displaces the bottom boundary of the Holocene (burial depth of approximately 38.9 m) and is an early Holocene active fault. It also reveals four paleoseismic events since the Late Pleistocene, with vertical displacement of 1.2±0.2 to 3.7±0.2 m for a single event. Based on the stratigraphic offsets in the boreholes, the average vertical slip rate of this fault is calculated to be about 0.1±0.05 mm/a for the early Late Pleistocene and 0.35±0.04 mm/a for the late Late Pleistocene-middle Holocene. The fitted age-depth curves by the test results of seven 14C samples and four OSL samples can be divided into two segments. Within the depth range of 0 to 86.0 m (approximately 21 to 0 ka), the age and depth of the strata conform to the formula $y=(253.69\pm16.56)x+(924.72\pm681.36)$, from which the average deposition rate of this section is calculated to be 3.94±0.26 mm/a. Within the depth range of 102.9 to 145.4 m (approximately 128 to 59 ka), the age and depth of the strata conform to the formula $y=(1470.67\pm259.91)x+(-95061.92\pm30190.73)$, from which the average deposition rate of this section is calculated to be 0.68±0.12 mm/a. The vertical slip rate of the LLF and the sedimentation rate of the Dongpu Sag have increased significantly since the late Late Pleistocene. The intensity lines of the Heze *M* 7.0 earthquake show an asymmetric butterfly shape. [**Conclusion**] The 1937 Heze *M* 7.0 and *M* 6¾ earthquakes formed "Z"-shaped ground fissure zones, which can be divided into three sections: the southeastern section (section A), the middle section (section B), and the northwestern section (section C). The long axis of the intensity lines and the distribution of the surface rupture of the 1937 Heze *M* 7.0 coincide with the NNE-striking Xiaoliu-Xieyuanjie and NWW-striking Dongming-Chengwu faults in location and striking. The analysis of the intensity lines, surface rupture distribution, focal mechanism solution of the 1937 Heze *M* 7.0 earthquake and *M* 6¾ earthquakes, and regional stress implies that the Xiaoliu-Xieyuanji fault and the Dongming-Chengwu fault are the seismogenic faults of the 1937 Heze *M* 7.0 earthquake. The LLF, as the deep major fault in the region, controlled the accumulation of stress, stimulated the earthquake with its deep movement, and reduced the effect of the seismic energy westward, acting as the regional seismic controlling fault of the 1937 Heze *M* 7.0 earthquake. [**Significance**] This article proposes a method for fine detection of the localization, structure, latest activity age, sliding rate, and paleoseismic sequences of the buried fault and also proposes a pattern of seismicity in which seismogenic faults do not coincide with the regional seismic controlling fault. It provides new insights into the characterization of seismicity within the NCP and can provide the geological basis for urban and rural planning, high-speed railway design, and earthquake prevention and disaster reduction project construction in this region.

Keywords: North China Plain; Liaocheng-Lankao fault; shallow seismic detection profile; composite drilling geological profile; 1937 Heze *M* 7.0 earthquake

摘　要：华北平原是中国人口最多、经济最为发达的地区之一，也是受地震灾害影响最为严重的地区之一。对于该地区断裂活动性和大地震发震机制的研究有利于探索板内地震的发震规律、减轻地震灾害所造成的损失。聊城-兰考断裂是华北平原中南部一条重要的隐伏深大断裂。结合浅层地震勘探、钻孔勘探和第四纪测年方法，对聊城-兰考断裂的活动性进行了精细的研究。坝城寺钻孔揭示聊城-兰考断裂南段错断了全新统底界，为全新世早期活动断裂，揭露出该断裂晚更新世以来造成了 4 次古地震事件，单次事件的垂直位错为 1.2±0.2~3.7±0.2 m。根据钻孔揭示的地层落差计算出该断裂晚更新世早期的平均垂直滑动速率约为 0.1±0.05 mm/a，晚更新世晚期—全新世中期的平均滑动速率为 0.35±0.04 mm/a。根据 1937 年菏泽 7.0 级和 6¾ 级地震的等震线和地表破裂分布特征认为，小留-解元集断裂和东明-成武断裂为该地震的发震断裂；聊城-兰考断裂对于该地区应力的积累、地震的发生具有很好的控制和约束作用，为区域控震构造。

关键词：华北平原；聊城-兰考断裂；浅层地震探测剖面；钻孔联合剖面；1937 年菏泽 7.0 级地震

中图分类号：P65　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-6616（2024）02-0242-18

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023088

0　引言

新生代以来，在印度-欧亚板块陆陆碰撞体系、西太平洋-印度尼西亚板块俯冲消减体系两大动力系统的作用下，华北克拉通的稳定性遭到破坏（Wu et al.，2005；朱日祥等，2011；He，2015），华北板块内部地震多发（张培震等，2003；林向

东等，2017；尹晓菲等，2020）。其中，华北平原是构造变形最为复杂、受地震灾害最为严重的地区之一。对于华北平原内部断裂活动性和大地震发震机制的研究有利于探索板内地震的发震规律、减轻地震灾害对人民的生产生活造成的损失。

有历史记载以来，华北平原共发生 8 级地震 1 次、7 级地震 8 次、6 级地震 25 次。其中，7 级以上地震包括：1679 年三河-平谷 M 8.0 地震（江娃利，1999；冉勇康等，1997；毛昌伟等，2010），1830 年磁县 M 7.5 地震（江娃利等，1994；江娃利和张英礼，1996；张路等，2020），1937 年菏泽 M 7.0 地震（赵宪超和黄保起，1981；赵宪超和许坤福，1984；李建华，1988；王华林和耿杰，1995），1966 年邢台 M 7.2 地震（刘万琴，1983；徐杰等，1988；左兆荣等，1995；赵希俊等，1997；解用明等，2006），1969 年渤海 M 7.4 地震（魏光兴，1980；黄雪香和丁鉴海，1990；徐杰等，2001；苗庆杰等，2010）。以及 1976 年唐山 M 7.8 地震和滦县 M 7.1 地震（Nábělek et al.，1987；Shedlock et al.，1987；宋惠珍等，1998；Guo and Zhao，2019）。

1937 年 8 月 1 日 4 时 30 分（北京时间），山东省菏泽西南解元集发生 7.0 级地震（35°12′N，115°18′E），14 个小时后（当日下午 18 时 41 分），在该次地震震中北东方向约 16 km 的小留村又发生了 6¾级地震（35°23′N，115°23′E），此次地震造成人员伤亡 16051 人，房屋倒塌 320061 间，给人民的生产、生活造成了极大的伤害（李善邦和賈連亨，1940；李群，1987；李建华，1988；胡长和，1991；赵宪超，1991；王瑞田等，1994；王华林和耿杰，1995）。该次地震也是 20 世纪华北平原发生的一系列大地震的开端（李善邦和賈連亨，1940）。然而，由于该次地震发生时地震学家未能第一时间进入地震现场进行考察，目前对于该次地震的发震机制尚有疑惑（李群，1987；胡长和，1991）。该次地震发生于聊城-兰考断裂南段，作为区域内的深大断裂，聊城-兰考断裂的活动性怎么样？是否为该次地震的发震构造？或者与地震的发生有什么关系？

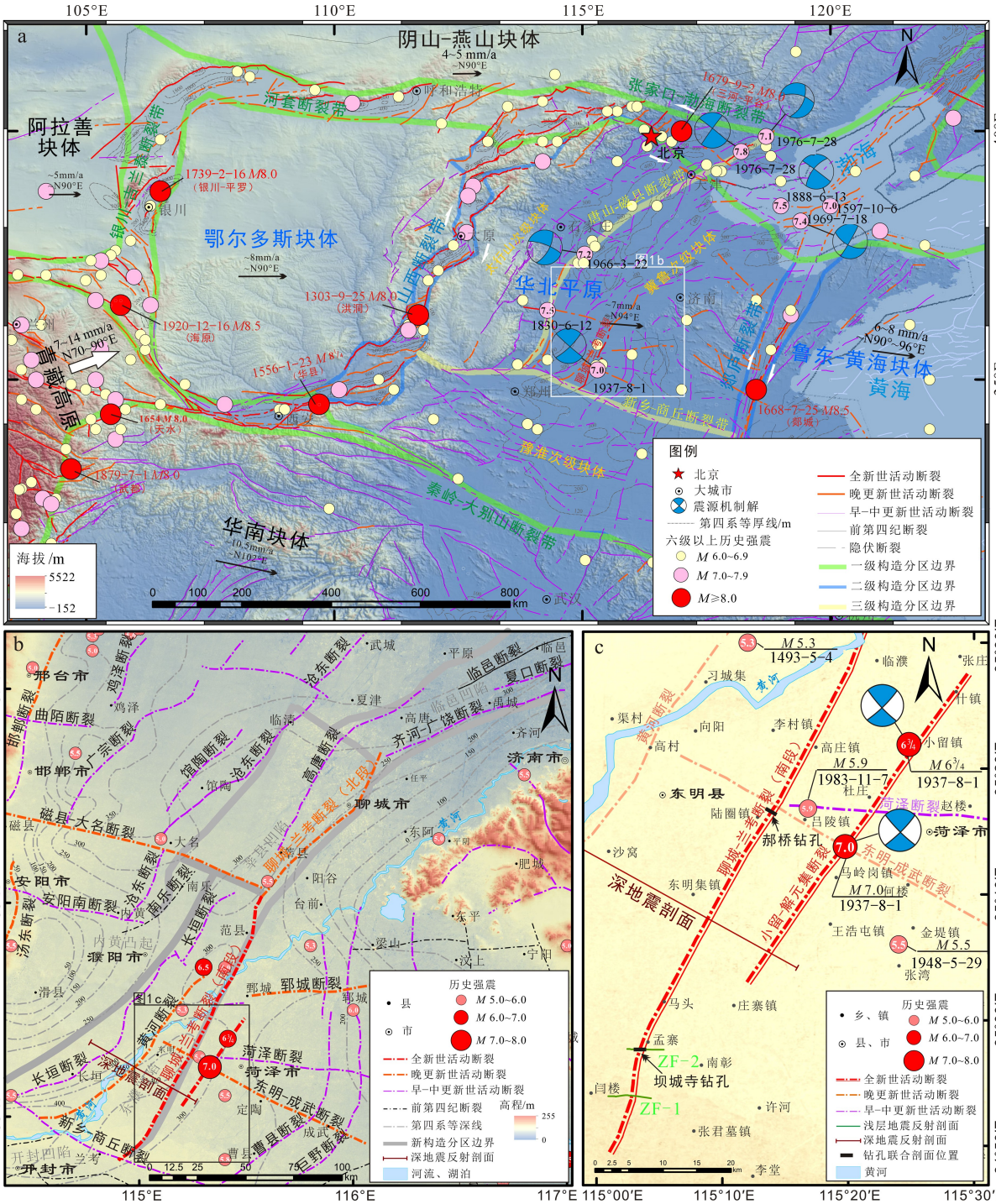
向宏发等（2000）在考察聊城-兰考断裂南段的郝桥钻孔联合剖面时认为，聊城-兰考隐伏断裂南段错断了晚更新世地层，并向上影响到全新世早期地层。李涛等（2022）认为聊城-兰考断裂南段构造样式为伸展走滑断裂尾端“马尾扇”结构，其最新活动时代为中更新世中—晚期。因此，目前对于聊城-兰考断裂南段的活动性尚存在较大争议。

聊城-兰考断裂为隐伏断裂，在地表没有出露痕迹，很难通过地貌确定断层的位置以及断层的活动性参数。此次研究采用浅层地震勘探、钻探和第四纪年代学相结合的方法，分析聊城-兰考隐伏断裂南段的活动时代、古地震序列和同震位错等活动性参数，并结合 1937 年菏泽地震的研究资料探讨该次地震的发震机制，以及聊城-兰考断裂在该次地震发生过程中所扮演的角色。研究结果对华北块体内部地震活动特征具有新的启示，可为该地区城乡规划、铁路设计和防震减灾工程建设提供地质依据。

1 区域地质概况

华北活动地块（Ⅰ级活动块体）以山西地堑断裂带和郯庐断裂带为界，可分为鄂尔多斯块体、华北平原和鲁东-黄海块体 3 个Ⅱ级活动地块（图 1a）。华北平原是由张家口-渤海断裂带、山西断裂带、秦岭-大别山断裂带和郯庐断裂带共同围限的区域。新生代早期，在强烈的拉张和断陷作用下，华北平原形成一系列北北东向的断层和地堑（Ye et al.，1985；Ma and Wu，1987）。上新世断陷作用停止，新生代晚期华北平原整体下沉，并沿早期北北东向断裂形成一系列右旋走滑断裂（Chen and Nábelek，1988；张培震等，2003；尹晓菲等，2020）。

聊城-兰考断裂走向北北东（图 1b），倾向北西，倾角 50°~75°，是华北平原中南部的一条重要的隐伏断裂（向宏发等，2000；张建伟等，2010）。该断裂位于鲁西隆起西部，是鲁西隆起和华北地台坳陷的分界线，也是东濮凹陷和莘县凹陷的控凹断裂，断裂南起河南兰考，向东北经鄄城、菏泽范县到山东聊城以北，全长约 270 km（向宏发等，2000；于平等，2003）。断裂西盘第四系厚度约为 300~400 m，东盘厚度小于 200 m，东西盘第四系厚度差大于 100 m，表现出东升西降的正断层活动特征（向宏发等，2000）。断裂中部被磁县-大名断裂分为南、北两段，断裂北段控制着莘县凹陷的发育，断裂南段和黄河断裂、长垣断裂一起控制着东濮凹陷的形成和发育。聊城-兰考断裂周围分布着平行和垂直于断裂的隐伏断裂，



a—华北块体及其邻区地震构造图（地震及断层数据引自邓起东，2007；黑色箭头为 GPS 观测的地块运动速率，相对于稳定的西欧和西伯利亚地盾的运动，引自张培震等，2003）；b—华北平原中南部地震构造图（地震及断层数据引自邓起东，2007，第四系等深线引自向宏发等，2000）；c—钻孔及物探资料分布位置（深地震反射剖面引自徐翰，2018）

图 1　区域地震构造图

Fig. 1　Regional seismotectonic map

(a) Seismotectonic map of the North China block and its adjacent areas (Fault and seismic data are from Deng, 2007, black arrows are GPS-derived rates of block motion, movements relative to the stable Western European and Siberian shields are modified from Zhang et al., 2003); (b) Seismic map of the south-central part of the North China Plain (Seismic and fault data are modified from Deng et al., 2007, and Quaternary isobaths from Xiang et al., 2000); (c) Distribution of drilling profiles and shallow seismic detection lines (Deep seismic reflection profile from Xu, 2018)

宏观上形成了北北东、北东、北西西、北西走向为主的构造格局。长恒断裂、黄河断裂、曹县断裂、巨野断裂走向皆为北北东向，与聊城-兰考断裂近平行。东明-成武断裂、菏泽断裂、郓城断裂、磁县-大名断裂走向北西西，与聊城-兰考断裂近垂直或大角度相交（图 1b）。

2 研究方法

2.1 浅层地震勘探

此次研究在聊城-兰考断裂的南段布设了 2 条浅层地震反射剖面——ZF-1 和 ZF-2（图 1c）。其中，浅层地震测线 ZF-1 布设于兰考县郭庄边 002 县道上，测线长度为 5276 m。浅层地震测线 ZF-2 布设在兰考县坝城寺村北侧 200 m，韩西寨村至虎羊寨村乡村道路上，测线长度为 4436 m。数据采集工作设备为 S-land 地震勘探系统与可控震源，配套检波器采用 S-Geophone（SG）数字检波器，采样率为 0.5 ms，采样长度为 2500 ms，道距为 4 m，炮间距为 12 m，每炮 180 道接收，满覆盖 30 次。激发方式采用美国莫茨 M18/612 型车载可控震源。该震源的最大振动出力为 180 kN，振动频率范围为 6~150 Hz。通过浅层地震反射剖面特征，可以识别断裂的位置、上断点埋深和倾向，进而为钻孔联合剖面的钻孔布设提供依据（何正勤等，2001，2007；刘保金等，2008；Liang et al.，2018）。

2.2 钻孔联合剖面

钻孔施工采用逐步加密法，即先跨断裂实施 2 个间隔较大的钻孔，若根据标志层能确定断层在 2 孔之间，则在 2 孔间继续加密钻孔，以此类推（雷启云等，2011）。此次钻孔采用文登 200 型液压钻机，开孔直径为 110 mm；钻机取出岩芯后，采用 1 m 长的硬铁皮半圆管承装 1 m 的岩芯，并沿着铁皮壁将岩芯对半切开，保持岩芯的内部结构完整清晰；最后将岩芯按顺序放入 1 m×5 岩芯盒。采芯率要求：黏土和粉砂采芯率不低于 90%，中—细砂应达到 80%，松散粗砂不低于 40%，钻进回次不大于 2 m；不遗漏层厚大于或等于 0.2 m 的地层单元；对岩芯柱进行完整拍照，并根据钻孔岩芯反映的岩性、颜色、物质组成、沉积结构和接触面形态等确定基本编录单元，进行要素图文描述。

2.3 第四纪测年分析

为获得断裂的最新活动时间、滑动速率和古地震序列等参数，从钻孔岩芯中分别采集了光释光（OSL）和碳十四（^{14}C）测年样品。其中 OSL 测年是通过将不锈钢管插入取芯筒底部进行取样，并用黑色塑料袋将两边出口封住、保证样品不见光，样品的测试工作在应急管理部国家自然灾害防治研究院完成。^{14}C 测年样品取自岩芯中含碳量多的部分，用小刀取出并装在密封袋中，测试工作在美国 Beta 实验室完成。

3 研究结果

3.1 浅层地震反射探测结果和钻孔布设

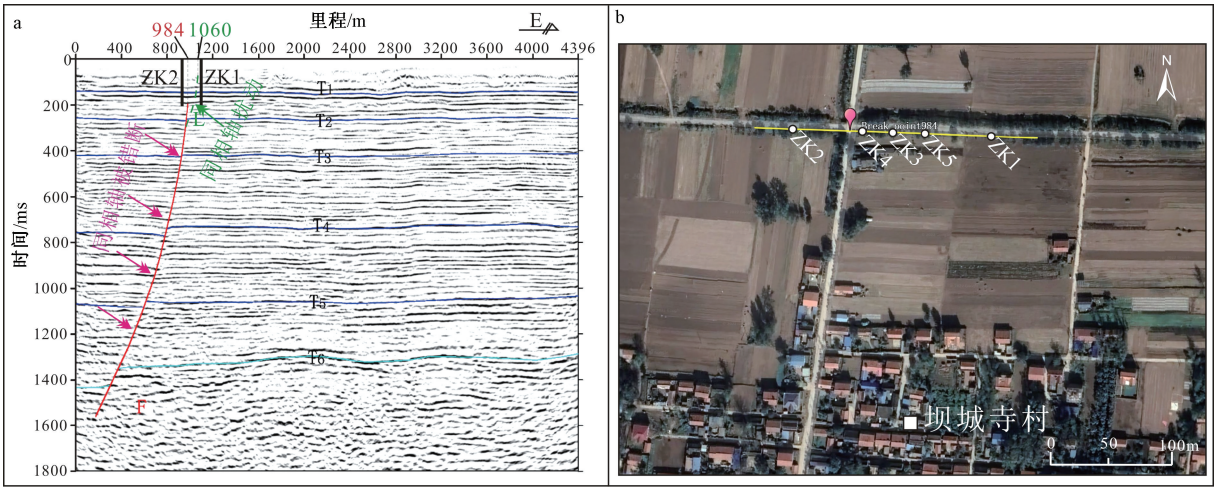
ZF-2 地震时间反射剖面的信噪比较高，能较好地揭示出地层连续且呈由西至东逐渐抬升的趋势。剖面共识别出 6 个有效波组，分别记为 T_1、T_2、T_3、T_4、T_5、T_6。在时间 1350 ms 附近（埋深约 1285~1435 m）存在一个明显的强反射层，推测为基岩基底反射界面（图 2a）。

从横向上看，反射波同相轴整体较为连续，在里程 984 m 附近存在明显的断层 F，基岩面直至浅部地层 145 m 均发生明显错断，具有较为明显的正断层性质，断层浅部倾角较陡，至深部倾角变缓，断层西侧为下降盘，东侧为上升盘（图 2a）。在 200 ms 以上，反射波同相轴仍存在同步的西侧相对下降的扰动，但同相轴并未被错开。将这些同步绕曲的同相轴坡折点相连形成线段 *L*（图 2a 中绿色虚线），倾角较断层 F 略缓，上端点地表投影在里程 1060 m 附近。由于 100 ms 以上地震反射波同相轴较少且不清晰，较难判断该分支断层的上端点的埋深。

根据浅层地震反射剖面解译结果，设计钻孔 ZK1 位于线段 *L* 地表投影点（里程 1060 m）的东侧 40 m 处（里程 1100 m），钻孔 ZK2 位于断层 F 上断点在地表投影点（里程 984 m）的西侧 50 m 处（里程 934 m），钻孔深度设计为 150 m（图 2a）。根据野外实地情况、施工条件以及钻孔地层初步对比情况，共实施了 5 个钻孔（其中 4 个钻孔深度为 150 m，1 个钻孔深度为 140 m），从西到东依次为 ZK2、ZK4、ZK3、ZK5、ZK1，钻孔间间距分别为 65 m、21 m、31 m 和 54 m，剖面总长度为 171 m（图 2b）。

3.2 样品测年结果和地层对比

7 个 ^{14}C 样品和 4 个 OSL 样品采自坝城寺钻孔



T_1—T_6—有效波组；ZK1—ZK4—钻孔；红色线为解译断层 F，绿色虚线为扰动同相轴连线 *L*，断层 F 上断点地表投影位于里程 984 m 处，*L* 顶端点在地表的投影位于里程 1060 m 处

a—坝城寺浅层地震反射剖面；b—坝城寺钻孔（ZK1—ZK5）平面分布图

图 2　坝城寺浅层地震反射剖面解译结果与钻孔布设

Fig. 2　Interpretation results of shallow seismic reflection profile and borehole layout at Bachengsi

(a) Interpreted results of shallow seismic reflection profile at Bachengsi; (b) Plan distribution of boreholes at Bachengsi (ZK1-ZK5) T1-T6 represent effective wave groups; ZK1-ZK4 represent boreholes; The red line represents interpreted Fault F, and the green dashed line represents the disturbed line *L*. The surface projection of the upper breakpoint on Fault F is located at 984 m. The projection of the top point of *L* on the surface is located at 1060 m.

中，样品信息和测年结果见表 1、表 2。利用 Origin 软件对测出的地层年龄和深度进行线性拟合，结果如图 3 所示。拟合结果可分为两段，0~86.0 m 深度范围内（约 21 ka 以来）地层年龄和深度符合关系式：$y = (253.69 \pm 16.56)x + (924.72 \pm 681.36)$，由此可计算出该段的平均沉积速率为（3.94±0.26）mm/a。102.9~145.4 m 深度范围内（约 59~128 ka）地层年龄和深度符合关系式：$y = (1470.67 \pm 259.91)x + (-95061.92 \pm 30190.73)$，由此可计算出该段的平均沉积速率为（0.68±0.12）mm/a。由此可见，坝城寺剖面地层的沉积速率存在明显的变化，在晚更新世早中期地层的沉积速率较慢，而在晚更新世晚期—全新世地层的沉积速率明显增加。

表 1　^{14}C 样品测年结果

Table 1　Test results of ^{14}C samples

取样钻孔	埋深/m	年龄/a
ZK2	6.0	2750±30
ZK4	16.8	4110±30
ZK4	38.4	12270±40
ZK4	52.0	14500±40
ZK4	69.6	18800±60
ZK5	77.4	19980±70
ZK4	86.0	21150±70

表 2　光释光（OSL）样品测试结果

Table 2　Test results of OSL samples

取样钻孔	埋深/m	U/（μg/g）	Th/（μg/g）	K/%	环境剂量率（Gy/ka）	等效剂量（Gy）	年龄/ka
ZK5	102.9	0.771±0.03	3.68±0.04	2.26±0.02	2.32±0.09	137.11±5.51	59.22±3.37
ZK4	115.4	2.650±0.11	13.10±0.03	1.92±0.02	2.96±0.11	207.12±9.19	69.97±4.08
ZK4	131.8	1.570±0.01	10.30±0.21	2.22±0.01	2.81±0.11	258.33±13.31	92.09±5.91
ZK4	145.4	2.530±0.01	12.00±0.20	1.75±0.02	2.55±0.09	328.40±12.97	128.73±6.84

根据钻孔现场编录的地层特征，绘制了坝城寺钻孔联合剖面图（图 4），并在每个钻孔岩性柱右侧绘制了对应的粒度柱，沉积物粒度的变化规律能够很好地辅助地层对比（张世民等，2007；Liang et al.，2018）。钻孔剖面揭示沉积物主要为黄河沉积物，粒度较细，多为细砂、粉砂和黏土，含少量的中砂、粗砂和砾石等粗颗粒。一般细—粉砂呈灰黄色，黏土层呈紫红色、灰绿色、蓝绿色等，标志层较易识别。从坝城寺钻孔联合剖面的地层对比中，可识别出了 16 套标志层和 3 条断

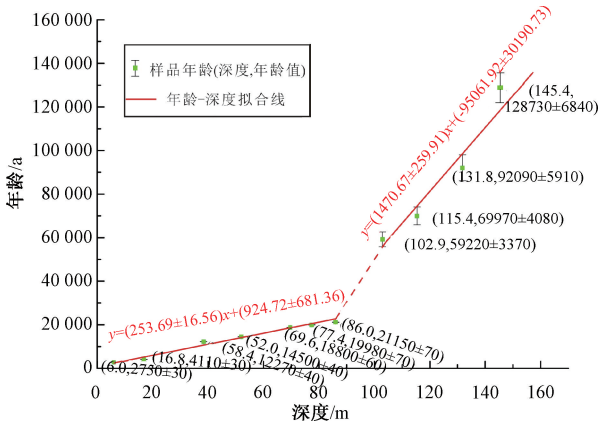


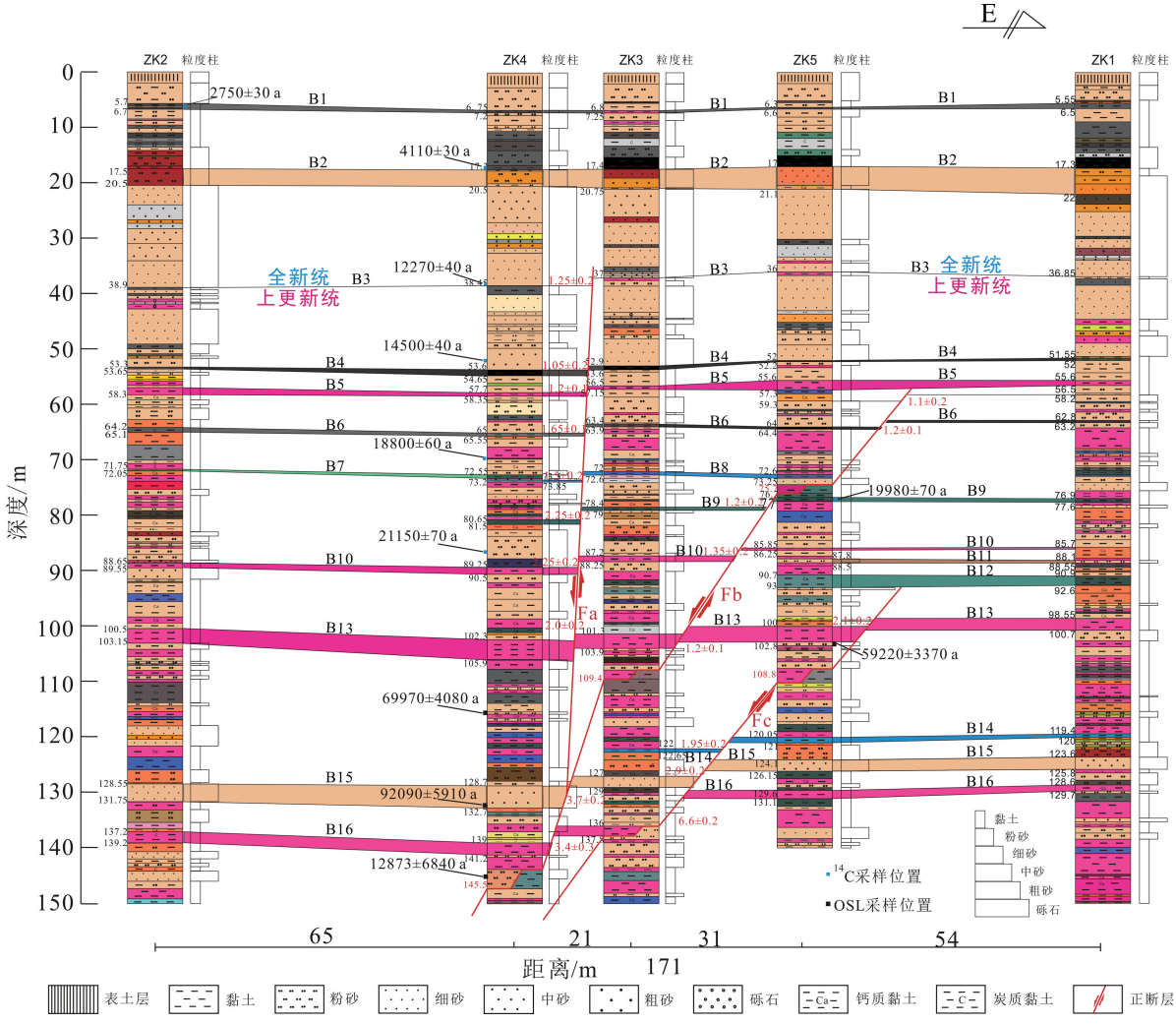
图 3 坝城寺钻孔样品地层年龄-深度关系

Fig. 3 Diagram showing the relationship between the age and depth of strata samples from the Bachengsi borehole

层 Fa、Fb 和 Fc，其特征如下。

（1）标志层 B1：为一套灰黑色炭质黏土层，在所有钻孔中都有出现（图 4，图 5a，表 3）。在钻孔 ZK2 中深度为 5.7～6.7 m，厚约 1.0 m。在 6.0 m 处取的 ^{14}C 样品所得年龄为 2750±30 a；在钻孔 ZK4 中深度为 6.75～7.20 m，厚约 0.45 m；在钻孔 ZK3 中深度为 6.70～7.25 m，厚约 0.45 m；在钻孔 ZK5 中深度为 6.3～6.6 m，厚约 0.3 m；在钻孔 ZK1 中深度为 5.55～6.50 m，厚约 0.95 m。该标志层底界深度基本一致且未被断层所错断。

（2）标志层 B2：为一套砖红色—橘黄色粉细砂层，在所有钻孔中都有出现，为厚层细砂层的顶部沉积（图 4，图 5b，表 3）。在钻孔 ZK2 中深



B1—B16 为标志层；岩芯柱左侧数字为地层埋深，红色数字为断层的垂直落差

图 4 坝城寺钻孔联合剖面图

Fig. 4 Combined cross-section of boreholes in Bachengsi

B1–B16 represent marker layers, with the depth of the strata indicated on the left side of the core column, and the vertical displacement of the fault is indicated by the red numbers.

a—标志层 B1；b—标志层 B2；c—标志层 B3；d—标志层 B4；e—标志层 B5；f—标志层 B6；g—标志层 B7；h—标志层 B8

图 5　钻孔 ZK4 中 B1—B8 标志层的岩芯特征

Fig. 5　Photographs of marker layers B1 to B8 in ZK4

(a) Photograph of marker layer B1; (b) Photograph of marker layer B2; (c) Photograph of marker layer B3; (d) Photograph of marker layer B4; (e) Photograph of marker layer B5; (f) Photograph of marker layer B6; (g) Photograph of marker layer B7; (h) Photograph of marker layer B8

度为 17.5~20.5 m，厚约 3.0 m；在钻孔 ZK4 中深度为 17.3~20.5 m，厚约 3.2 m；在钻孔 ZK3 中深度为 17.40~20.75 m，厚约 3.35 m；在钻孔 ZK5 中深度为 17.0~21.1 m，厚约 4.1 m；在钻孔 ZK1 中深度为 17.3~22.0 m，厚约 4.7 m。该层在剖面中从西到东厚度略有增加，未发现断层错断。在 ZK4 的 16.8 m 处取得的^{14}C 样品所测年龄为 4110±30 a，说明该层沉积年龄为全新世中期。

（3）标志层 B3：为剖面内同一套青灰—灰黄色巨厚细砂层的底界面（图 4，图 5c）。该细砂层在钻孔 ZK2 中深度为 20.5~38.9 m，厚约 18.9 m；在钻孔 ZK4 中深度为 20.50~38.45 m，厚约 17.95 m；在钻孔 ZK3 中深度为 20.75~37.00 m，厚约 16.25 m；在钻孔 ZK5 中深度为 21.1~36.0 m，厚约 14.9 m；在钻孔 ZK1 中深度为 22.00~36.85 m，厚约 14.85 m。该层底界面在钻孔 ZK2、ZK4 中位于 38.9 m 和 38.45 m 深度，在钻孔 ZK3、ZK5 和 ZK1 中分别位于 37.0 m、36.0 m 和 36.75 m 深度，在断层 Fa 两侧存在 1.25±0.2 m 的垂直落差。在 ZK4 的 38.4 m 处取的^{14}C 样品所得年龄为 12270±40 a，说明该界面为全系统与上更新统的分界面。

（4）标志层 B4：为剖面内的一套灰黑色炭质黏土层（图 4，图 5d，表 3）。该层在钻孔 ZK2 中深度为 53.30~53.65 m，厚约 0.35 m；在钻孔 ZK4 中深度为 53.60~54.65 m，厚约 1.05 m；在钻孔 ZK3 中深度为 52.9~53.6 m，厚约 0.7 m；在钻孔 ZK5 中深度为 52.0~52.2 m，厚约 0.2 m；在钻孔 ZK1 中深度为 51.55~52.00 m，厚约 0.45 m。该底界面在断层 Fa 两侧的垂直落差为 1.05±0.20 m。在 ZK4 中该层之上的 38.4 m 处取得的^{14}C 样品所测年龄为 14500±40 a。

（5）标志层 B5：为剖面内的一套紫红色黏土层（图 4，图 5e，表 3）。该层在钻孔 ZK2 中深度为 57.0~58.3 m，厚约 1.3 m；在钻孔 ZK4 中深度为 57.70~58.35 m，厚约 0.65 m；在钻孔 ZK3 中深度为 56.50~57.15 m，厚约 0.65 m；在 ZK5 中

深度为 55.6~57.3 m，厚约 1.7 m；在钻孔 ZK1 中深度为 55.6~56.5 m，厚约 0.9 m。该顶、底界面在断层 Fa 两侧的垂直落差皆为 1.2±0.1 m。

（6）标志层 B6：为剖面内的一套灰黑—深灰色炭质黏土层（图 4，图 5f，表 3）。该层在钻孔 ZK2 中的深度为 64.2~65.1 m，厚约 0.9 m；在钻孔 ZK4 中的深度为 65.00~65.55 m，厚约 0.55 m；在钻孔 ZK3 中的深度为 63.4~63.9 m，厚约 0.5 m；在钻孔 ZK5 中的深度为 64.0~64.4 m，厚约 0.4 m；在钻孔 ZK1 中深度为 62.8~63.2 m，厚约 0.4 m。该顶、底界面在断层 Fa 两侧的垂直落差为 1.65±0.10 m，在断层 Fb 两侧的垂直落差为 1.2±0.1 m。

（7）标志层 B7：为深灰绿色黏土层（图 4，图 5g，表 3）。该层在钻孔 ZK2 中深度为 71.75~72.05 m，厚约 0.3 m；在钻孔钻孔 ZK4 中深度为 72.55~73.20 m，厚约 0.65 m；该层由于断层活动出现了反向倾斜。在标志层 B6 与 B7 之间，钻孔 ZK4 的 69.6 m 处取得的^{14}C 样品所测年龄为 18800±60 a。

（8）标志层 B8：为蓝灰—黄灰色黏土层，该层颜色较为特殊（图 4，图 5h，表 3）。在钻孔 ZK4 中深度为 73.50~73.85 m，厚约 0.35 m；在钻孔 ZK3 中深度为 72.0~72.6 m，厚约 0.6 m；在钻孔 ZK5 中深度为 72.60~73.25 m，厚约 0.65 m；该层顶、底界面在断层 Fa 两侧的垂直落差约为 1.5±0.2 m。

（9）标志层 B9：剖面内为一套灰绿色黏土层（图 4，图 6a，表 3）。该层在钻孔 ZK4、ZK3、ZK5、ZK1 中的深度分别为 80.65~81.50 m、78.4~79.0 m、76.7~77.8 m 和 76.9~77.6，厚度分别约为 0.85 m、0.6 m、1.1 m 和 0.7 m。该顶、底界面在断层 Fa 两侧的垂直落差为 2.25±0.20 m，在断层 Fb 两侧的垂直落差为 1.2±0.2 m。在钻孔 ZK5 的 77.4 m 处取得的^{14}C 样品所测年龄为 19980±70 a。

（10）标志层 B10：剖面内为一套紫红色黏土层（图 4，图 6b，表 3）。该层在钻孔 ZK2、ZK4、ZK3 和 ZK5 中的深度分别为 88.65~89.55 m、89.25~90.50 m、87.20~88.25 m 和 85.85~86.25 m，厚度分别约为 0.9 m、1.25 m、0.95 m 和 0.4 m；在钻孔 ZK1 中深度可能为 85.7 m。该层岩性变化较快，含一些紫红色黏土团块和夹层，较难确定其顶底界面。该顶、底界面在断层 Fa 两侧的垂直落差为 2.25±0.20 m，在断层 Fb 两侧的垂直落差为 1.35±0.20 m。在钻孔 ZK4 中，该层之上的 86.0 m 处取得的^{14}C 样品所测年龄为 21150±70 a。

（11）标志层 B11：为钻孔 ZK5 和 ZK1 中一套灰黄色粉砂层。该层上、下皆为黏土层，在粒度柱上比较突出（图 4）。在钻孔 ZK5 中深度为 87.8~88.5 m，厚约 0.7 m；在钻孔 ZK1 中深度为 88.10~88.55 m，厚约 0.45 m。该层在 2 个钻孔中埋深一致，没有被断层错断。

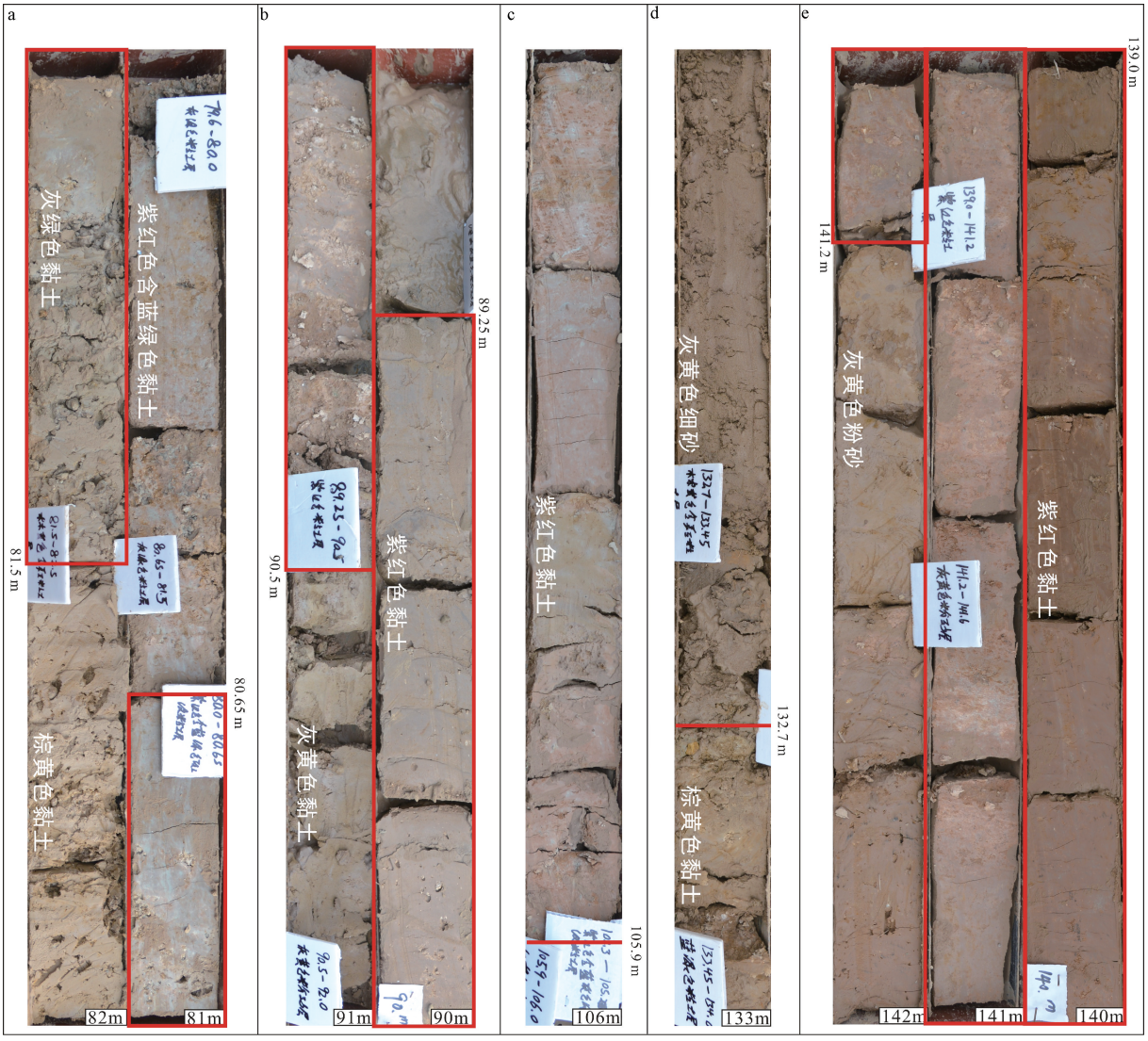
（12）标志层 B12：为钻孔 ZK5 和 ZK1 中一套灰绿色含钙结核黏土层（图 4，表 3）。该层颜色较特殊、较易于识别。在钻孔 ZK5 中深度为 90.7~93.0 m，厚约 2.3 m；在钻孔 ZK1 中深度为 90.9~92.6 m，厚约 1.7 m。该层未被断层 Fc 错断。

（13）标志层 B13：剖面内为一套紫红色含蓝灰色网纹黏土层（图 4，图 6c，表 3）。该层在钻孔 ZK2、ZK4、ZK3、ZK5 和 ZK1 中的深度分别为 100.50~103.15 m、102.3~105.9 m、101.3~103.9 m、100.0~102.8 m 和 98.55~100.70 m，厚度分别约为 2.65 m、3.6 m、2.6 m、2.8 m 和 2.15 m。该层被断层 Fa、Fb 和 Fc 错断，顶、底界面在断层两侧的垂直落差分别为 2.0±0.2 m、1.2±0.1 m 和 2.1±0.2 m。在钻孔 ZK5 中，该层之下的 102.9 m 处取得的 OSL 样品所测年龄为 59220±3370 a。

（14）标志层 B14：为钻孔 ZK3、ZK5 和 ZK1 中的一套灰绿色黏土层（图 4，表 3）。该层在 3 个钻孔中的深度分别为 122.00~122.65 m、120.05~121.00 m 和 119.4~120.0 m，厚度分别约为 0.65 m、0.95 m 和 0.6 m。该层被断层 Fc 错断，顶、底界面在断层两侧的垂直落差为 1.95±0.20 m。

（15）标志层 B15：剖面内为一套灰黄色细砂层（图 4，图 6d，表 3）。该层在钻孔 ZK2、ZK4、ZK3、ZK5 和 ZK1 中深度分别为 128.55~131.75 m，128.7~132.7 m、127.0~129.0 m、124.10~126.15 m 和 123.6~125.8 m，厚度分别约为 3.2 m、4.0 m、2.0 m、2.05 m 和 2.2 m。该层被断层 Fa、Fb 和 Fc 错断，顶、底界面在断层 Fa、Fb 两侧的垂直落差为 3.7±0.2 m，在断层 Fc 两侧的垂直落差为 2.9±0.2 m。在钻孔 ZK4 中的 131.8 m 处取得的 OSL 样品所测年龄为 92090±5910 a。

（16）标志层 B16：剖面内为一套紫红色黏土层（图 4，图 6e，表 3）。该层在钻孔 ZK2、ZK4、ZK3、ZK5 和 ZK1 中深度分别为 137.2~139.2 m、



a—标志层 B9；b—标志层 B10；c—标志层 B13；d—标志层 B15；e—标志层 B16

图 6　钻孔 ZK4 中标志层 B9、B10、B13、B15 和 B16 的岩芯特征

Fig. 6　Photographs of marker layer B9, B10, B13, B15 and B16 in BCS-ZK4

(a) Photograph of marker layer B9; (b) Photograph of marker layer B10; (c) Photograph of marker layer B13; (d) Photograph of marker layer B15; (e) Photograph of marker layer B16

表 3　标志层错断位移

Table 3　The displacement information of the mark layers

标志层	岩芯特征	埋深/m	Fa 位移/m	Fb 位移/m	Fc 位移/m	总位移/m
B1	灰黑色炭质黏土层	7.2	/	/	/	/
B2	砖红色—橘黄色粉细砂层	20.5	/	/	/	/
B3	青灰—灰黄色巨厚细砂层的底界面	38.9	1.25±0.20	/	/	1.25±0.20
B4	灰黑色炭质黏土层	54.65	1.05±0.20	/	/	1.05±0.10
B5	紫红色黏土层	58.35	1.2±0.1	/	/	1.2±0.1
B6	灰黑—深灰色炭质黏土层	65.55	1.65±0.10	1.2±0.1	/	2.8±0.2
B8	蓝灰—黄灰色黏土层	73.5	1.5±0.2	/	/	/
B9	灰绿色黏土层	81.5	2.25±0.20	1.2±0.2	/	3.95±0.20
B10	紫红色色黏土层	90.5	2.25±0.20	1.35±0.20	/	4.25±0.20
B13	紫红色含蓝灰色网纹黏土层	105.9	2.0±0.2	1.2±0.2	2.1±0.2	6.2±0.3
B14	灰绿色黏土层	124.5	/	/	1.95±0.20	/
B15	灰黄色细砂层	132.7	3.7±0.2	3.7±0.2	2.9±0.2	6.6±0.3
B16	紫红色黏土层	141.2	3.4±0.3	3.4±0.3	6.6±0.2	10.0±0.4

139.0~141.2 m、136.0~137.8 m、129.6~131.1 m 和 128.6~129.7 m，厚度分别约为 2.0 m、2.2 m、1.8 m、1.5 m 和 1.1 m。该层被断层 Fa、Fb 和 Fc 错断。顶、底界面在断层 Fa、Fb 两侧的垂直落差为 3.4±0.3 m，在断层 Fc 两侧的垂直落差为 6.6±0.2 m。在钻孔 ZK4 中，该层 145.5 m 处取得的 OSL 样品所测年龄为 128730±6840 a，说明该层接近上更新统的底界。

4 讨论

4.1 聊城-兰考断裂活动性、古地震分析及滑动速率计算

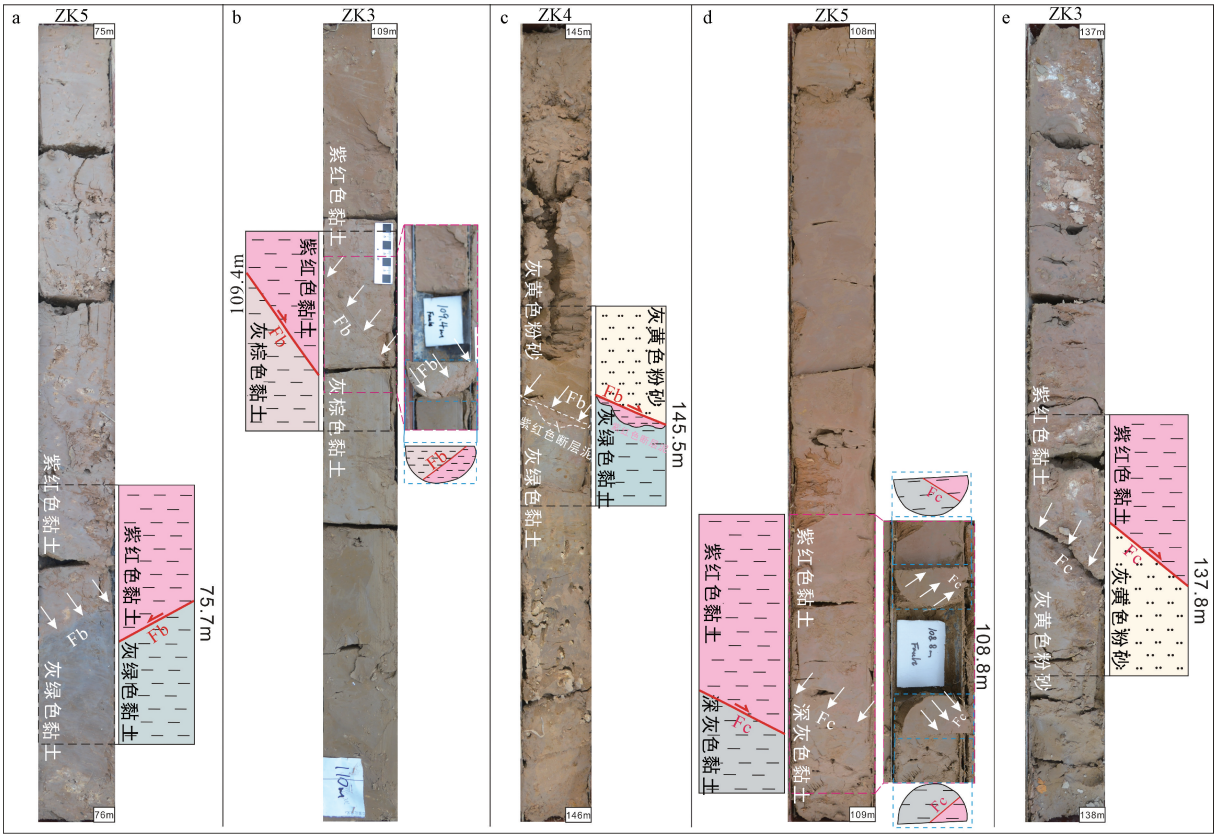
坝城寺联合钻孔剖面解译出的 3 条断层 Fa、Fb 和 Fc 皆为向西倾的正断层（图 4）。其中，断层 Fa 位于钻孔 ZK4 与 ZK3 之间，倾角大于 75°，大约在 130 m 左右终止于倾角更缓的断层 Fb 上（倾角大约为 54°），二者组成了一个“Y”字型的结构。同时，断层 Fc 倾角约为 45°，推测其位于 150 m 深度以下，将与合并后的断层 Fb 相交，二者也形成一个“Y”字型的结构。因此，坝城寺钻孔揭示聊城-兰考断裂的浅部结构为“复合 Y”字型结构。

断层 Fa 错断了标志层 B3 及其以下地层。其中标志层 B3—B5 在 Fa 两侧的垂直落差分别为 1.25±0.20 m、1.05±0.10 m 和 1.2±0.1 m；标志层 B6 和 B8 在 Fa 两侧的垂直落差分别为 1.65±0.10 m 和 1.5±0.2 m；标志层 B9、B10、B13 在 Fa 两侧的垂直落差分别为 2.25±0.20 m、2.25±0.20 m 和 2.0±0.2 m；标志层 B15、B16 在断层 Fa 两侧的垂直落差皆为 3.7±0.2 m 和 3.4±0.3 m。标志层 B3 之上为一套厚度约为 18 m 的巨厚细砂层，断层 Fa 错断了该层的底界（深度为 38.9 m），而砂层顶界面和标志层 B2 则保持了很好的水平性。根据测年结果，标志层 B3 的底界面为全新统与上更新统的分界面。这说明断层 Fa 为全新世早期活动断层，而全新世中期以来断裂垂直差异活动已不明显。

标志层 B4 和标志层 B5 在钻孔 ZK5 和 ZK1 之间近水平展布，说明断层 Fb 并未错断标志层 B4 和标志层 B5。而标志层 B6 及其以下地层，皆被断层 Fb 错断。其中标志层 B6、B9、B10、B13 在断层 Fb 两侧的垂直落差分别为 1.2±0.1 m、1.2±0.2 m、1.35±0.20 m 和 1.2±0.1 m；标志层 B15、B16 在断层 Fb 两侧的垂直落差分别为 3.7±0.2 m 和 3.4±0.3 m。钻孔 ZK5 在深度 75.7 m 处揭露断层 Fb，断层的上盘为紫红色黏土层，下盘为灰绿色黏土层，断面较清晰，断层面倾角约为 35°（图 7a）。钻孔 ZK3 在深度 109.4 m 处穿过 Fb 断层面，断层上盘为紫红色黏土层，下盘为灰棕色黏土层，两侧地层在颜色上有明显的差异（图 7b）。断层面倾角约为 60°，断层迹线较清晰。垂直岩芯的横切面上，紫红色黏土与灰棕色黏土的含量约为 30% 和 70%，分界线为断层面，较清晰。钻孔 ZK4 在深度 145.5 m 处穿过 Fb 断层面，该处发育一斜面，上盘为灰黄色粉砂层，下盘为灰绿色黏土层，并逐渐过渡为棕黄色黏土层，断层面上发育红色的断层泥，断层倾角较缓，约 35°（图 7c）。断层 Fb 错断了标志层 B6，而未错断标志层 B5，说明断层 Fb 的上断点位于 56.5~62.8 m 之间；同时，标志层 B6 上的粉砂层顶界面在断层两侧仍有 1.1 m 的落差，因此，可将断层 Fb 的上断点进一步约束到 56.5~58.2 m。在钻孔 ZK4 深度 69.6 m 取得的样品的 ^{14}C 测年结果为 18800±60 a，因此，判断断层 Fb 为晚更新世晚期活动断层。

标志层 B10、B11、B12 在钻孔 ZK5 和 ZK1 之间皆为近水平分布，未被断层 Fc 所错断。而标志层 B13 及其以下地层被 Fc 所错断。其中，标志层 B13—B15 在断层 Fc 两侧的垂直落差为 2.1±0.2 m、1.95±0.20 m 和 2.9±0.2 m。标志层 B16 在断层 Fc 两侧的垂直落差为 6.5±0.2 m。钻孔 ZK5 在深度 108.8 m 处揭露断层 Fc，将该处岩芯切开，可以看到紫红色黏土层和深灰色黏土层的分界面非常清晰、平直（图 7d）。钻孔 ZK3 在深度 137.8 m 处揭露断层 Fc，断层上盘为紫红色黏土层，下盘为灰黄色粉砂层，沿断面发育一倾角约为 55°的斜裂缝（图 7e）。断层 Fc 错断了标志层 B13，而被标志层 B12 覆盖，由此推断，断层 Fc 的上断点埋深为 92.6~98.55 m，最新活动时间为 21550±70~59220±3370 a，为晚更新世中—晚期活动断层。

断层 Fa 的垂直落差大致可以分为 3 个阶段：标志层 B3、B4、B5 的 1.25±0.20 m、1.05±0.10 m、1.2±0.1 m（均值为 1.2±0.2 m），标志层 B6、B8 的 1.65±0.10 m、1.5±0.2 m（均值为 1.6±0.2 m）和标志层 B9、B10、B13 的 2.25±0.20 m、2.25±0.20 m、2.0±0.2 m（均值为 2.2±0.2 m），说明



a—钻孔 ZK5 75.7 m 深度处断层 Fb 出露；b—钻孔 ZK3 109.4 m 深度处断层 Fb 出露；c—钻孔 ZK4 145.5 m 深度处断层 Fb 出露；d—钻孔 ZK5 108.8 m 深度处断层 Fc 出露；e—钻孔 ZK3 137.8 m 深度处断层 Fc 出露

图 7　聊城-兰考断裂在坝城寺钻孔中出露特征

Fig. 7　The outcrops of the Liaocheng-Lankao fault revealed by the Bachengsi boreholes

(a) ZK5 reveals fault Fb at 75.7 m; (b) ZK3 reveals fault Fb at 109.4 m; (c) ZK4 reveals fault Fb at 145.5 m; (d) ZK5 reveals fault Fc at 108.8 m; (e) ZK3 reveals fault Fc at 137.8 m

断层 Fa 可能发生了 3 次古地震事件。断层 Fb 的垂直落差在标志层 B6—B13 上表现较为一致，皆为 1.2±0.2～1.35±0.20 m（可信值为 1.2±0.2 m），说明断层 Fb 仅发生了 1 次古地震事件。由于标志层 B15、B16 在断层 Fa 和 Fb 两侧的垂直落差大致为标志层 B13 在断层 Fa 和 Fb 两侧落差之和，因此认为断层 Fa 和 Fb 在该处合并为一条断层。断层 Fc 在标志层 B13、B14 和 B15 中的垂直落差为 2.1±0.2 m、1.95±0.20 m、2.9±0.2 m，而在标志层 B16 中的垂直落差为 6.6±0.2 m，推测可能为断层 Fc 引发多次地震事件所致。因此，文章识别出聊城-兰考断裂南段共发生过 4 次古地震事件。

（1）事件一：为断层 Fc 活动，发生在标志层 B16 沉积之后，标志层 B15 沉积之前，错断了标志层 B16，垂直错距约为 3.7±0.2 m。事件发生时间为距今 12873±6840～92090±5910 a，为晚更新世早期，可能为 1～2 次地震事件所致。

（2）事件二：为断层 Fc 和 Fa 活动，断层 Fc 错断了标志层 B13 及其以下地层，垂直落差为 2.1±0.2～2.9±0.2 m。断层 Fa 活动，错断了标志层 B9 及其以下地层，垂直错距约为 0.6±0.2 m。因此，此次事件发生的时间应在标志层 B9 沉积之后，标志层 B8 沉积之前，即 18800±60～19980±70 a。

（3）事件三：为断层 Fb 和 Fa 活动，错断了标志层 B6 及其以下地层，断层 Fb 垂直错距为 1.2±0.2 m，断层 Fa 垂直错距约为 0.4±0.2 m，此次事件发生时间为 18800±60～14500±40 a，为晚更新世晚期。

（4）事件四：断层 Fa 活动，错断了标志层 B3 及其以下地层，垂直落差为 1.2±0.2 m，事件发生时间为 12270±40～4110±30 a，为全新世早期。

综合以上分析认为，聊城-兰考断裂南段的上断点埋深约为 38.5～20.5 m，其由 Fa、Fb 和 Fc 共 3 条断层组成；晚更新早期，断层活动主要集中在

倾角较缓的 Fc 断层上，晚更新世晚期，断层活动往倾角更陡的断层 Fb 和 Fa 转移；单次地震所形成的垂直落差约为 1.2±0.2～3.7±0.2 m。坝城寺钻孔联合剖面揭露出的 4 次古地震事件中只有 1 次事件发生在晚更新世早期（85～120 ka），垂直落差为 3.7±0.2 m，由此计算的断层晚更新世早期的平均垂直滑动速率约为 0.1±0.05 mm/a。3 次地震事件发生于晚更新世晚期—全新世中期（4～21 ka），垂直落差总和约为 5.95±0.30 m，由此计算断层晚更新世晚期—全新世中期的平均滑动速率为 0.35±0.04 mm/a。由此可见，晚更新世以来，东濮凹陷的沉积作用与聊城-兰考断裂南段的活动性存在较好的正相关耦合关系。

4.2 1937 年菏泽 7.0 级地震

1937 年菏泽发生 7.0 级地震，但当时现场考察难度较大。胡长和（1991）综合多份现场调查报告（李善邦和贾連亨，1940；李群，1987）绘出了菏泽 7.0 级（图 8 中绿色虚线）和 6¾级地震的地震等烈度线（图 8 中蓝色虚线）。菏泽 7.0 级地震极震区烈度为Ⅸ度，极震区呈不对称蝶状，北西向和北东向两共轭长轴交点位于震中解元集附近，两长轴长度皆约为 20 km，面积约为 140 km^2；7.0 级地震Ⅷ度区环Ⅸ度区分布，其形状同为不对称蝶形，北东向长轴长约为 32 km，北西向长轴长约为 36 km，面积约为 440 km^2。6¾级地震极震区烈度为Ⅷ度，极震区为一北东向不规则的长圆形，北东向长轴长约为 22 km，北西向短轴长约为 9 km，面积约为 135 km^2；该烈度区内可能存在 2 次地震的叠加效应。

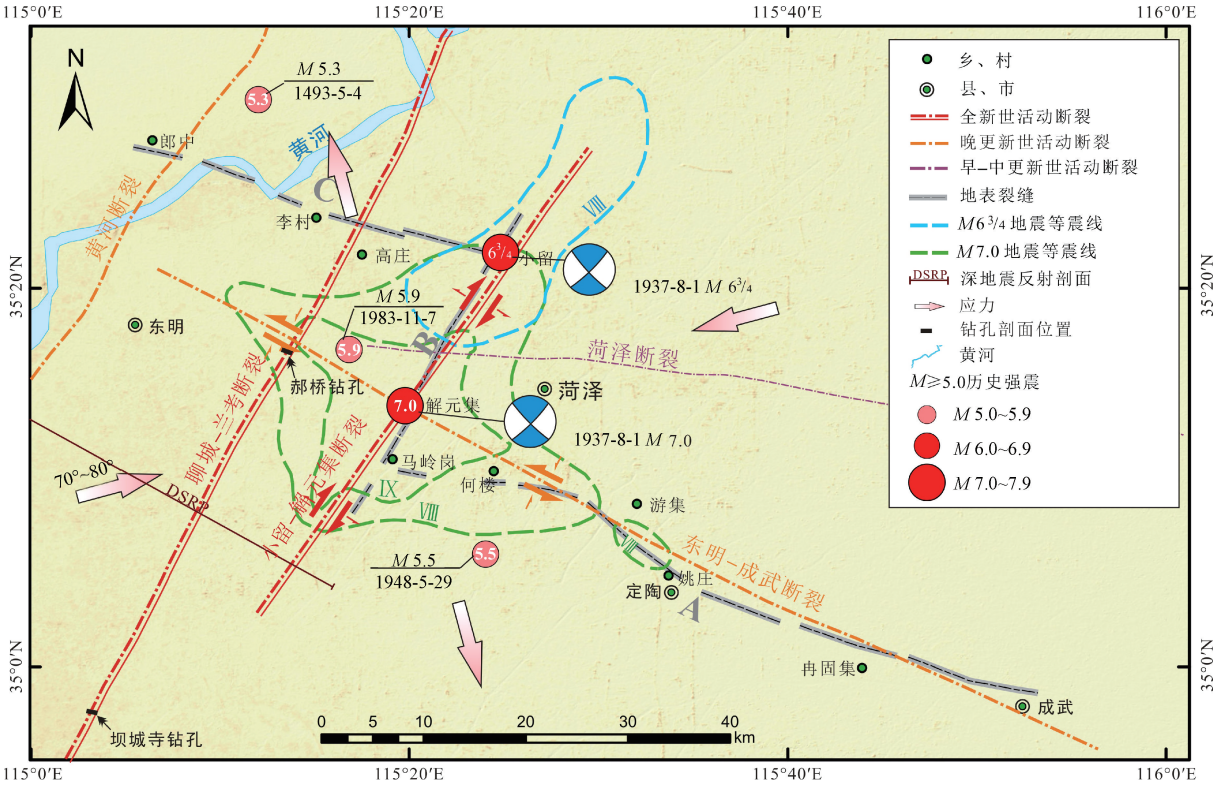
大地震地表破裂的分布对判别地震的发震断层有较强的指示作用（哈广浩和吴中海，2021；常祖峰等，2022；梁宽等，2022）。1937 年菏泽 7.0 级和 6¾级地震形成了一个“Z”字型的地裂缝带（赵宪超，1991）。根据地裂缝带的展布方向可以分为 3 段：东南段（A 段）、中间段（B 段）和西北段（C 段）（图 8 中灰黑色线段）。

东南段（A 段）为北西西走向，从成武北开始，向北西方向经定陶北的姚庄、何楼南至马岭岗南，长约 60 km；裂缝带宽约几米至数百米；单条裂缝一般长十几米，宽为 2～3 cm，呈斜裂状分布；A 段地裂缝带显示强烈挤压和左旋走滑特征。中间段（B 段）为北东走向，从马岭岗西南开始，向北东方向经解元集东、至小留北东，长约 19.6 km；裂缝带宽 1～2 km，单条地裂缝最宽为 1.3 m，长 2.3 km；B 段地裂缝呈地堑状且规模较大，沿地裂缝形成多个串珠状排列的喷砂冒水点，是 2 次地震形成的主要裂缝带；其中骡车王庄东北东向地裂缝长约 1.5 km，将菏泽至东明的公路右旋错断了约 40 cm，这表明 B 段地裂缝具有拉张和右旋走滑特征。西北段（C 段）为北西西走向，从小留向北西西方向延伸，经过李村，跨越黄河至郎中，长约 29.3 km；东明县芳园乡黄庄至铁庄间北东向的黄河大堤被北西西向的地裂缝切断，两盘垂直落差约为 1.2 m，并且具有左旋走滑特征，表明 C 段地裂缝具有张裂性质和左旋走滑特征。

将震中区附近已探明的断裂与地震等烈度线以及地表裂缝相对比发现（图 8）：①7.0 级地震等震线北西向长轴和 A 段地表裂缝带大体沿东明-成武断裂分布；②7.0 级地震等震线北东向长轴、6¾级地震等震线长轴和 B 段地表裂缝带，与小留-解元集断裂的位置和走向几乎一致。郭增建和姜秀娥（1965）根据国际多个地震台记录的 2 次地震的 16 个 P 波初动符号，反演了 2 次地震的震源机制解，显示其都以走滑为主。其中，7.0 级地震节面 A 走向为 42°，倾角为 80°，节面 B 走向为 132°，倾角为 82°，分别与小宋-解元集断裂和东明-成武断裂走向相近（王华林和耿杰，1995）。因此，根据 1937 年菏泽 7.0 级和 6¾级地震等震线的几何特征、地裂缝的分布位置和运动特征认为此次地震的发震构造很可能为北北东走向的小留-解元集断裂和北西西走向的东明-成武断裂。

4.3 菏泽地震发震机制

区域控震构造是指对区域内地震起到控制和约束作用的断裂或者断裂带；发震构造是指直接引起地震的断层，往往规模小于区域控震构造，并与其呈一定夹角或处于其特殊部位（李天昭和王光弟，1981）。从构造体系来看，区域控震构造是体系中的主干断裂，而发震构造可以是派生断裂、或者与主干断裂相交的其他体系的成分，也可以是区域控震构造本身。从地应力状态来看，区域控震构造是控制地应力集中和变化的破裂性结构面，而发震构造则是地应力释放的通道，即地应力可以通过派生断裂进行释放，也可以通过主干断裂释放；当地震发生在主断裂本身时，这条断裂既是区域控震构造又是发震构造。



图中 70°~80°为地应力的方位角

图 8　1937 年菏泽 7.0 级和 6¾级地震等震线和地裂缝分布图（烈度线引自胡长和，1991；地裂缝分布引自赵宪超，1991）

Fig. 8　Map showing intensity lines and ground fissure distribution of the 1937 Heze *M* 7.0 and *M* 6¾ earthquakes (intensity lines from Hu, 1991; ground fissure distribution from Zhao, 1991)

The direction of the ground stress is indicated by 70°-80° in the figure.

横跨东濮凹陷的深地震反射剖面显示（图 9），东濮凹陷呈“两凹夹一凸”结构。聊城-兰考断裂为东濮凹陷的东边界断裂，分割了东濮凹陷与鲁西隆起（康海亮等，2021）。在聊城-兰考断裂往东约 7~8 km 处可见与其近平行、同为倾向西的小留-解元集断裂。石炭—二叠系（C—P）在聊城-兰考断裂两侧的垂直落差约为 3.8~4.0 km，在小留-解元集断裂两侧的垂直落差约为 0.7 km。这说明聊城-兰考断裂在规模和运动幅度上均远大于小留-解元集断裂。

1937 年菏泽 7.0 级和 6¾级地震等震线和地裂缝分布图（图 8）表明，该次地震震中区位于聊城-兰考断裂以东约 10 km、并与其呈约 15°夹角、沿小留-解元集断裂分布。华北平原现今构造应力场的主压应力方向为北东东—南西西向（70°~80°；胡幸平和崔效锋，2013；Hu et al.，2017）。作为区域内深大断裂的聊城-兰考断裂对菏泽地震的影响表现为：①聊城-兰考断裂和东濮凹陷是多次构造活动所形成的复杂构造带，在区域应力场作用下活动强烈，易沿固有的断裂形成滑动，并在分支断裂的特殊构造部位形成局部应力集中的闭锁地段；②聊城-兰考断裂由一系列的密集成网的断裂系组成，当邻区分支断裂产生位移时，聊城-兰考断裂可提供累积变形的空间，为应力的释放和断层的活动提供让位空间；③聊城-兰考断裂带有明显的深部活动背景，当区域应力增加过程中附加有深部热液活动时，很容易破坏原有的应力平衡，成为大震的激发因素；④当应力释放时，聊城-兰考断裂这一破碎结构体又成为减震带，使地震动在穿过断裂带时快速衰减。

因此，1937 年菏泽 7.0 级和 6¾级地震的发震机制：①在北东东—南西西向区域主压应力作用的控制下，内黄凸起作逆时针旋转，对其西北和东南边界施加派生的挤压作用，致使北西向的东明-成武断裂发生左旋压扭性运动，其旁侧的聊城-兰考断裂可以提供让位空间；②在区域应力的作用下，北北东向的聊城-兰考断裂产生了右旋的滑动，牵动了北东走向的小留-解元集断裂，并在与北西西向断裂交汇的解元集、小留一带形成闭锁地段；③随着区域应力的持续增加，以及外围

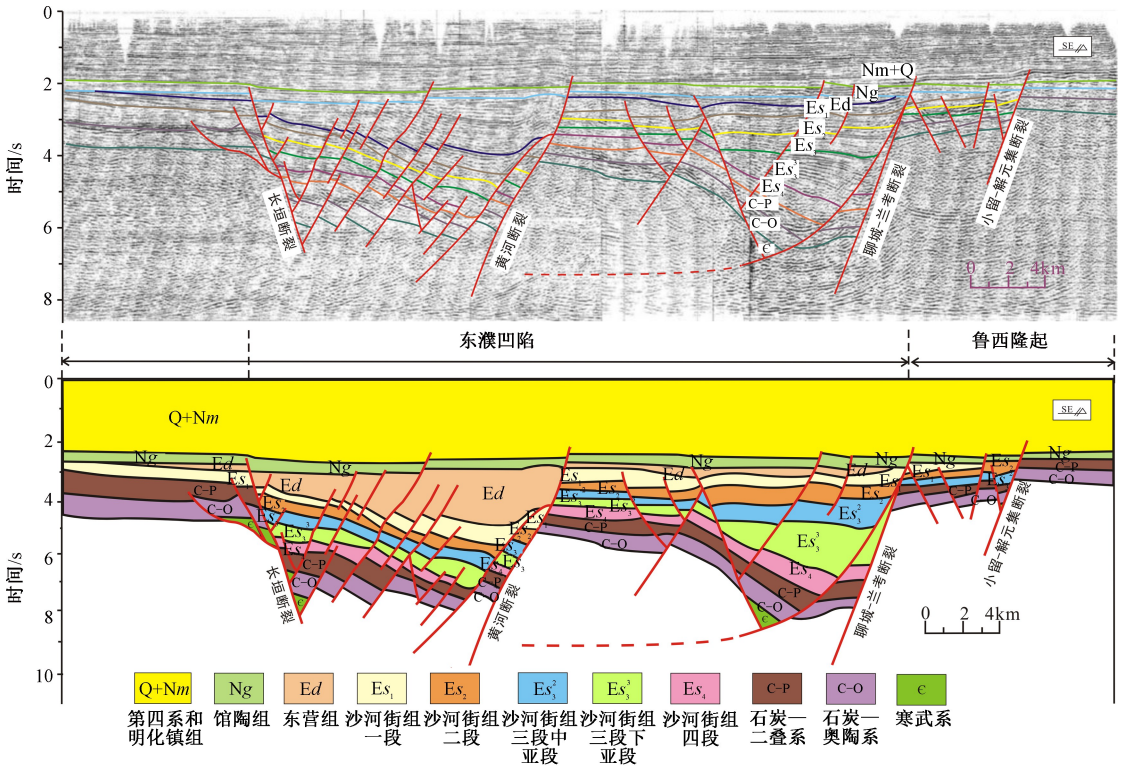


图 9 深地震反射剖面及其解译结果（剖面位置见图 1；徐翰，2018）

Fig. 9 Deep seismic reflection profile and its interpretation results (profile location refer to Fig. 1; Xu, 2018)

地震的发生，在闭锁地段形成地震空区，区域应力场逐渐接近临界平衡状态，这时聊城-兰考断裂内的深部调整活动很可能成为大地震发生的激发因素；④北西西向的东明-成武断裂与北东向的小留-解元集断裂同时作双向错断时，导致 7.0 级地震发生；⑤7.0 级地震发生后，小留-解元集断裂北东方向上的闭锁段提前释放应力，进而形成了 6¾级地震；⑥强震发生后，地震能量沿着发震断裂方向传播，形成北东方向的极震区，当通过附近的聊城-兰考断裂时，烈度衰减十分显著。

由此可见，小留-解元集断裂和东明-成武断裂为 1937 年菏泽 7.0 级和 6¾级地震的发震构造，但聊城-兰考断裂对于该地区地震的发生有着很好的控制和约束作用，为区域控震构造。同时，坝城寺钻孔和郝桥钻孔（向宏发等，2000）剖面揭示出聊城-兰考断裂为全新世早期活动断裂，并且晚更新世以来发生了多次错断到地表的地震事件，说明聊城-兰考断裂也可能作为发震断裂、发生破坏性的大地震事件。

5 结论

（1）坝城寺钻孔联合剖面特征揭示出聊城-兰考断裂由 3 条向西倾的正断层 Fa、Fb 和 Fc 组成，上断点埋深为 38.5~20.5 m，为全新世早期活动断裂；同时，联合剖面揭示出该断裂晚更新世以来发生了 4 次古地震事件，单次地震事件的同震垂直位错介于 1.2±0.2~3.7±0.2 m。

（2）根据地层垂直落差和形成年代得出，聊城-兰考断裂晚更新世早期的平均垂直滑动速率约为 0.1±0.05 mm/a，晚更新世晚期—全新世中期的平均滑动速率为 0.35±0.04 mm/a。

（3）1937 年菏泽 7.0 级和 6¾级地震等震线长轴方向以及形成的地表破裂与小留-解元集断裂和东明-成武断裂的位置和走向相吻合，说明北北东走向的小留-解元集断裂和北西西走向的东明-成武断裂为该地震的发震断裂。聊城-兰考断裂作为区域的深大断裂，对应力的积累、地震的激发都起着控制和约束作用，为区域大地震的控震断裂；同时，聊城-兰考断裂也可以作为发震断裂、发生破坏性的大地震事件。

致谢：本文光释光样品测年实验由应急管理部国家自然灾害防治研究院的赵俊香博士负责完成，在此表示感谢。

References

CHANG Z F, ZHANG J G, SHEN C Y, et al., 2022. The 2012 Thabeikkjin (Myanmar) *M* 7.0 earthquake and its surface rupture characteristics [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 169-181. (in Chinese with English abstract)

CHEN W P, NÁBELEK J, 1988. Seismogenic strike-slip faulting and the development of the North China Basin [J]. Tectonics, 7 (5): 975-989.

DENG Q D, 2007. Map of active tectonics in China [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

GUO H, ZHAO J X, 2019. The surface rupture zone and paleoseismic evidence on the seismogenic fault of the 1976 M_S 7.8 Tangshan earthquake, China [J]. Geomorphology, 327: 297-306.

GUO Z J, JIANG X E, 1965. Discussion of modern tectonic movements in China using information on earthquake source mechanisms [M] //Chinese Geophysical Society. Proceedings of the 1963 academic conference of the Chinese geophysical society. Beijing: Science Press. (in Chinese)

HA G H, WU Z H, 2021. Discussion of the seismogenic structure of the 1901 *M* 6¾ Nyemo earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 27 (2): 218-229. (in Chinese with English abstract)

HE L J, 2015. Thermal regime of the North China Craton: implications for craton destruction [J]. Earth-Science Reviews, 140: 14-26.

HE Z Q, YE T L, DING Z F, et al., 2001. The application of shallow seismic prospecting methods to active fault dectection in cities [J]. Recent Developments in World Seismology (3): 1-6. (in Chinese with English abstract)

HE Z Q, CHEN Y K, YE T L, et al., 2007. Application of shallow seismic exploration in detection of buried fault in coastal areas [J]. Seismology and Geology, 29 (2): 363-372. (in Chinese with English abstract)

HU C H, 1991. Heze earthquake in 1937 [M]. Beijing: Earthquake Press. (in Chinese)

HU X P, CUI X F, 2013. Study on earthquake relocation and tectonic stress field in central North China [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 8 (4): 351-360. (in Chinese with English abstract)

HU X P, ZANG A, HEIDBACH O, et al., 2017. Crustal stress pattern in China and its adjacent areas [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 149: 20-28.

HUANG X X, DING J H, 1990. Anomalous variation of regional geomagnetic field before the Bohai sea earthquake (7.4*Ms*) [J]. Journal of Seismology (3): 45-52. (in Chinese with English abstract)

JIANG W L, ZHANG Y L, HOU Z H, 1994. The discovery of the freshest surface fracture zone in the west mountain of Cixian County of Hebei Province related to the 1830 Cixian earthquake of *M*7.5 [J]. Earthquake Research in China (4): 357-362. (in Chinese with English abstract)

JIANG W L, ZHANG Y L, 1996. Characteristics of the WNW trending Nanshancun-Chakou Active Fault in Cixian, Hebei Province and relationship with 1830 Cixian Earthquake [J]. Seismology and Geology, 18 (4): 349-357. (in Chinese with English abstract)

JIANG W L, 1999. Estimation of right-lateral strike-slip offset of the Xiadian Seismic Fault Zone Produced at the 1679 Sanhe-Pinggu *M*=8 earthquake [J]. Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics (1): 1-6. (in Chinese with English abstract)

KANG H L, LIN C S, NIU C M, 2021. Ancient landform of the Dongying formation in the Shadongnan structural zone, western Bohai Sea area and its control on the sedimentation [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 19-30. (in Chinese with English abstract)

LEI Q Y, CHAI C Z, MENG G K, et al., 2011. Method of locating buried active fault by composite drilling section doubling exploration [J]. Seismology and Geology, 33 (1): 45-55. (in Chinese with English abstract)

LI J H, 1988. Discussion on the structural background of Heze earthquake [J]. Journal of Seismology (2): 19-23. (in Chinese with English abstract)

LI Q, 1987. The August 1, 1937 Shandong Heze earthquake investigation report [J]. China Earthquake Investigation (Volume 1), 105-120. (in Chinese)

LI S B, JIA L H, 1940. A summary of the earthquake in Heze, Shandong [J]. Geological Review (5): 431-436. (in Chinese)

LI T, WANG Z S, GAO J Y, et al., 2022. Structural style and latest activity analysis of the southern segment of the Lanliao fault [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 17 (2): 278-293. (in Chinese with English abstract)

LI T Z, WANG G D, 1981. A preliminary analysis of the earthquake-controlling and the earthquake-generating tectonics [J]. Journal of Seismological Research, 4 (3): 312-317. (in Chinese with English abstract)

LIANG K, SUN C B, MA B Q, et al., 2018. Investigation of the Yellow River buried fault in the Wuhai basin, northwestern Ordos Block, China, using deep/shallow seismic reflection and drilling techniques [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 163: 54-69.

LIANG K, HE Z T, JIANG W L, et al., 2022. Surface rupture characteristics of the Menyuan M_S6.9 Earthquake on January 8, 2022, Qinghai province [J]. Seismology and Geology, 44 (1): 256-278. (in Chinese with English abstract)

LIN X D, YUAN H Y, XU P, et al., 2017. Zonational characteristics of Earthquake focal mechanism solutions in North China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 60 (12): 4589-4622. (in Chinese with English abstract)

LIU B J, CHAI C Z, FENG S Y, et al., 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. (in Chinese with English abstract)

LIU W Q, 1983. On a possible barrier along the rupture direction of the M=7.2 Xingtai earthquake of 1966 [J]. Acta Seismologica Sinica, 5 (1): 116-125. (in Chinese with English abstract)

MA X Y, WU D N, 1987. Cenozoic extensional tectonics in China [J]. Tectonophysics, 133 (3-4): 243-255.

MAO C W, DING R, GONG Z, et al., 2010. GPS survey of the surface fault scarp of 1679 Sanhe-Pinggu M8 earthquake [J]. Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics (1): 11-18. (in Chinese with English abstract)

MIAO Q J, ZHOU C Y, MA Y X, et al., 2010. A review of researches on 1969 Bohai M_b7.4 earthquake [J]. North China Earthquake Sciences, 28 (1): 8-15. (in Chinese with English abstract)

NÁBĚLEK J L, CHEN W P, YE H, 1987. The Tangshan Earthquake Sequence and its implications for the evolution of the North China Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 92 (B12): 12615-12628.

RAN Y K, DENG Q D, YANG X P, et al., 1997. Paleoearthquakes and recurrence interval on the seismogenic fault of 1679 Sanhe-Pinggu *M* 8 earthquake, Hebei and Beijing [J]. Seismology and Geology, 19 (3): 193-201. (in Chinese with English abstract)

SHEDLOCK K M, BARANOWSKI J, XIAO W W, et al., 1987. The Tangshan aftershock sequence [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 92 (B3): 2791-2803.

SONG H Z, YUAN Y G, HUANG L R, et al., 1988. Analysis on the 1976 Tangshan earthquake process [J]. Seismology and Geology, 10 (4): 98-108. (in Chinese with English abstract)

WANG H L, GENG J, 1995. Study on the seismogenesis of Heze earthquake MS=7.0 in 1937 [J]. Plateau Earthquake Research, 7 (3): 1-8. (in Chinese with English abstract)

WANG R T, ZHAO X C, BI G X, 1994. Tracing research on geofractures due to the Heze earthquake in 1937 [J]. Northwestern Seismological Journal, 16 (4): 70-75. (in Chinese with English abstract)

WEI G X, 1980. A discussion on the source fault plane of Bohai sea earthquake with *M*=7.4 [J]. Seismology and Geology, 2 (3): 64. (in Chinese)

WEI G X, ZHOU C Y, XU K F, 1985. The 1983 Heze earthquake of magnitude 5.9 [J]. Acta Seismologica Sinica, 7 (1): 118-123. (in Chinese with English abstract)

WU F Y, LIN J Q, WILDE S A, et al., 2005. Nature and significance of the early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 233 (1-2): 103-119.

XIANG H F, WANG X C, GUO S M, et al., 2000. Integrated survey and investigation on the quaternary activity of the Liaocheng-Lankao buried fault [J]. Seismology and Geology, 22 (4): 351-359. (in Chinese with English abstract)

XIE Y M, HAN H P, JU Y, et al., 2006. The seismogenic background of Xingtai *M*7.2 earthquake [J]. North China Earthquake Sciences, 24 (2): 55-57. (in Chinese with English abstract)

XU H, 2018. Numerical simulation and structural analysis on the formation and evolution of the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

XU J, FANG Z J, YANG L H, 1988. Tectonic background and causative fault of 1966 Xingtai *M*s7.2 earthquake [J]. Seismology and Geology, 10 (4): 51-59. (in Chinese with English abstract)

XU J, GAO Z W, SUN J B, et al., 2001. Analysis of structures in 1969 Bohai Sea M_S 7.4 earthquake area and discussion about the causative structure [J]. Earthquake Research in China, 17 (2): 121-133. (in Chinese with English abstract)

YE H, SHEDLOCK K M, HELLINGER S J, et al., 1985. The north China basin: an example of a Cenozoic rifted intraplate basin [J]. Tectonics, 4 (2): 153-169.

YIN X F, ZHANG G M, SHAO Z G, et al., 2020. Research on activity characteristics of strong earthquakes in North China [J]. Earthquake, 40 (1): 11-33. (in Chinese with English abstract)

YU P, YANG D, YANG B J, 2003. The basic character of geophysical field and the tectonic significance of Liaocheng-Lankao fault in Northern China platform [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 33 (1): 106-110. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H Z, DIAO G L, CHEN Q F, et al., 2008. Focal mechanism analysis of the recent earthquakes in Tangshan seismic region of *M*7.6 in 1976 [J]. Journal of Seismological Research, 31 (1): 1-6. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J W, ZHAO Q S, GUO X Y, et al., 2010. The Liaocheng-Lankao fault and its mercury and radon anomalies [J]. Geology in China, 37 (5): 1419-1425. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L, XIE X S, GUO H, 2020. Study of the activity since Late Pleistocene of west section of Cixian-Daming Faults Zone [J]. Earthquake, 40 (3): 83-98. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46 (2): 13-24.

ZHANG S M, WANG D D, LIU X D, et al., 2007. Sequence stratigraphy study of late quaternary activities of Nankou-Sunhe fault in its northern segment, Beijing [J]. Seismology and Geology, 29 (4): 729-743. (in Chinese with English abstract)

ZHAO X C, HUANG B Q, 1981. The 1937 Heze M7 earthquake [J]. Earthquake (6): 28-30, 30. (in Chinese)

ZHAO X C, XU K F, 1984. Macroscopic precursor of the 1937 Heze M7.0 earthquake [J]. North China Earthquake Sciences, 2 (3): 49-52. (in Chinese)

ZHAO X C, 1991. Fissures and its characteristics of Heze earthquake M 7.0 in 1937 [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 11 (1): 93-96. (in Chinese with English abstract)

ZHAO X J, LIU X D, HOU J J, 1997. A dynamic model of 1996 Xingtai M_S 7.2 earthquake [J]. North China Earthquake Sciences, 15 (3): 9-17. (in Chinese)

ZHU R X, CHEN L, WU F Y, et al., 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton [J]. Science China Earth Sciences, 54 (6): 789-797.

ZUO Z R, WU J P, WU Z L, 1995. Foreshock sequence analysis of the Xingtai M_S 7.2 earthquake in 1966 [J]. North China Earthquake

Sciences, 13 (2): 7-15. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

常祖峰，张建国，申重阳，等，2022. 2012 年缅甸德贝金 M 7.0 地震及其地表破裂特征［J］. 地质力学学报，28（2）：169-181.

邓起东，2007. 中国活动构造图［M］. 北京：地震出版社.

郭增建，姜秀娥，1965. 用震源机制资料讨论中国境内的现代构造运动［M］//中国地球物理学会. 中国地球物理学会 1963 年学术会议论文集. 北京：科学出版社.

哈广浩，吴中海，2021. 西藏尼木 1901 年 M 6¾地震的发震构造探讨［J］. 地质力学学报，27（2）：218-229.

何正勤，叶太兰，丁志峰，等，2001. 城市活断层探测中的浅层地震勘探方法［J］. 国际地震动态（3）：1-6.

何正勤，陈宇坤，叶太兰，等，2007. 浅层地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的应用［J］. 地震地质，29（2）：363-372.

胡长和，1991. 1937 年菏泽地震［M］. 北京：地震出版社.

胡幸平，崔效锋，2013. 华北地区中部地震精定位与构造应力场研究［J］. 震灾防御技术，8（4）：351-360.

黄雪香，丁鉴海，1990. 渤海 7.4 级地震前区域地磁场的异常变化［J］. 地震学刊（3）：45-52.

江娃利，张英礼，侯志华，1994. 河北磁县西部山区最新地表破裂带的发现与 1830 年磁县 7.5 级地震的关系［J］. 中国地震（4）：357-362.

江娃利，张英礼，1996. 河北磁县北西西向南山村-岔口活动断裂带活动特征与 1830 年磁县地震［J］. 地震地质，18（4）：349-357.

江娃利，1999. 1679 年三河-平谷 8 级地震夏垫地震破裂带右旋走滑位移量计算［J］. 地壳构造与地壳应力文集（1）：1-6.

康海亮，林畅松，牛成民，2021. 渤海西部沙东南构造带东营组古地貌特征及对沉积的控制作用［J］. 地质力学学报，27（1）：19-30.

雷启云，柴炽章，孟广魁，等. 2011. 隐伏活断层钻孔联合剖面对折定位方法［J］. 地震地质，33（1）：45-55.

李建华，1988. 1937 年菏泽 7 级地震地质构造背景的讨论［J］. 地震学刊（2）：19-23.

李群，1987. 1937 年 8 月 1 日山东菏泽地震调查报告［J］. 中国地震考察报告（第一卷），105-120.

李善邦，賈連亨，1940. 山東菏澤地震述要［J］. 地质论评（5）：431-436.

李涛，王志铄，高家乙，等，2022. 兰聊断裂南段构造样式与最新活动性分析［J］. 震灾防御技术，17（2）：278-293.

李天昭，王光弟，1981. 浅析控震构造与发震构造［J］. 地震研究，4（3）：312-317.

梁宽，何仲太，姜文亮，等，2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 M_S6.9 地震的同震地表破裂特征［J］. 地震地质，44（1）：256-278.

林向东，袁怀玉，徐平，等，2017. 华北地区地震震源机制分区特征［J］. 地球物理学报，60（12）：4589-4622.

刘保金，柴炽章，酆少英，等，2008. 第四纪沉积区断层及其上断点探测的地震方法技术：以银川隐伏活动断层为例［J］. 地球物理学报，51（5）：1475-1483.

刘万琴，1983. 1966 年邢台地区 7.2 级地震前地震破裂方向上的可能障碍物［J］. 地震学报，5（1）：116-125.

毛昌伟，丁锐，龚正，等，2010. 1679 年三河-平谷 8 级地震地表断层陡坎的 GPS 测量［J］. 地壳构造与地壳应力文集（1）：11-18.

苗庆杰，周翠英，马玉香，等，2010. 1969 年渤海 7.4 级地震研究述评［J］. 华北地震科学，28（1）：8-15.

冉勇康，邓起东，杨晓平，等，1997. 1679 年三河-平谷 8 级地震发震断层的古地震及其重复间隔［J］. 地震地质，19（3）：193-201.

宋惠珍，袁岩光，黄立人，等，1988. 1976 年唐山 7.8 级地震震源过程的研究［J］. 地震地质，10（4）：98-108.

王华林，耿杰，1995. 关于 1937 年菏泽 7 级地震成因的探讨［J］. 高原地震，7（3）：1-8.

王瑞田，赵宪超，毕桂香，1994. 1937 年菏泽地震地裂缝追踪研究［J］. 地震工程学报，16（4）：70-75.

魏光兴，1980. 关于渤海 7.4 级地震震源断层面的讨论［J］. 地震地质，2（3）：64.

向宏发，王学潮，虢顺民，等，2000. 聊城-兰考隐伏断裂第四纪活动性的综合探测研究［J］. 地震地质，22（4）：351-359.

解用明，韩和平，鞠永，等，2006. 邢台 7.2 级地震的发震背景特征［J］. 华北地震科学，24（2）：55-57.

徐翰，2018. 渤海湾盆地东濮凹陷形成与演化的数值模拟与构造分析［D］. 北京：中国地质大学（北京）.

徐杰，方仲景，杨理华，1988. 1966 年邢台 7.2 级地震的构造背景和发震构造［J］. 地震地质，10（4）：51-59.

徐杰，高战武，孙建宝，等，2001. 1969 年渤海 7.4 级地震区地质构造和发震构造的初步研究［J］. 中国地震，17（2）：121-133.

尹晓菲，张国民，邵志刚，等，2020. 华北地区强震活动特点研究［J］. 地震，40（1）：11-33.

于平，杨冬，杨宝俊，2003. 华北地台聊城—兰考断裂地球物理场基本特征及其构造意义［J］. 吉林大学学报（地球科学版），33（1）：106-110.

张建伟，赵全升，郭秀岩，等. 2010. 聊城—兰考断裂及其土壤汞、氡气异常［J］. 中国地质，37（5）：1419-1425.

张路，谢新生，郭慧，2020. 磁县—大名断裂带西段晚更新世以来活动性研究［J］. 地震，40（3）：83-98.

张培震，邓起东，张国民，等，2003. 中国大陆的强震活动与活动地块［J］. 中国科学（D 辑），33（S）：12-20.

张世民，王丹丹，刘旭东，等，2007. 北京南口-孙河断裂带北段晚第四纪活动的层序地层学研究［J］. 地震地质，29（4）：729-743.

赵希俊，刘锡大，侯建军，1997. 1966 年邢台 7.2 级地震的动力学模型［J］. 华北地震科学，15（3）：9-17.

赵宪超，黄保起，1981. 1937 年菏泽 7 级地震［J］. 地震（6）：28-30，30.

赵宪超，许坤福，1984. 一九三七年菏泽 7.0 级地震的宏观前兆［J］. 华北地震科学，2（3）：49-52.

赵宪超，1991. 1937 年菏泽 7.0 级地震的地裂缝特征［J］. 地壳形变与地震，11（1）：93-96.

朱日祥，陈凌，吴福元，等，2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制［J］. 中国科学：地球科学，41（5）：583-592.

左兆荣，吴建平，巫志玲，1995. 1966 年邢台 M_S 7.2 级地震的前震序列分析［J］. 华北地震科学，13（2）：7-15.