彭远黔,高武平,冉志杰,等.基于浅层地震的蔚广盆地壶流河断裂第四纪活动性研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1197-1209.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240729001

PENG Yuanqian,GAO Wuping,RAN Zhijie,et al.Quaternary activity of the Huliuhe fault in the Yuguang Basin based on shallow seismic reflection[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1197-1209.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240729001

基于浅层地震的蔚广盆地壶流河断裂第四纪活动性研究

彭远黔[1], 高武平[2], 冉志杰[1], 温 超[1], 骆艳欣[3]

(1.河北省地震局,河北 石家庄 050021;
2.天津市地震局,天津 300201;
3.石家庄市地震观测站,河北 石家庄 050000)

摘要:壶流河断裂隶属张家口—渤海构造带,为京西北盆岭构造区重要断裂,其周边历史中强地震频发。现阶段该断裂专项探测研究匮乏,第四纪活动性认识不足。依托既有工程布设的3条浅层地震测线,结合数据精细化处理成果,融合区域第四纪地层及周边钻孔资料,系统剖析断裂第四纪活动特征。结果表明:壶流河断裂呈Y型组合结构,包含主、次两条断层;主断层倾向ES,上断点埋深自西南向东北由15 m增至40 m,上更新统底界断距8~20 m,断裂错断最新地层为上更新统,限定其最新活动时代为晚更新世。同时,整合蔚广盆地大地电磁测深、深地震宽角反射/折射及地震层析成像等深部探测数据,完成区域构造精细解译,明确壶流河断裂于地下约10 km深处与蔚广盆地南缘断裂交汇。结合历史地震记录、现代地震精定位、中小地震震源机制解及震源深度分布特征综合分析,判定壶流河断裂为区域性发震断层,区域地震活动受控于该断裂与蔚广盆地南缘断裂的联合构造作用。

关键词:蔚广盆地;壶流河断裂;浅层地震;第四纪活动性

中图分类号:P65 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1197-13

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240729001

Quaternary activity of the Huliuhe fault in the Yuguang Basin based on shallow seismic reflection

PENG Yuanqian[1], GAO Wuping[2], RAN Zhijie[1], WEN Chao[1], LUO Yanxin[3]

(*1.Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China;*
2.Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China;
3.Shijiazhuang Earthquake Observation Station, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: The Huliuhe fault, a component of the Zhangjiakou—Bohai tectonic belt, is a notable fault

收稿日期:2024-07-29

基金项目:中国地震局地震科技星火计划项目(XH23004YA);河北省地震科技星火计划项目(DZ2023120500004,DZ2024112400011)

第一作者简介:彭远黔(1965-),高级工程师,主要从事活动构造、工程地震等方面工作。E-mail:pengyq84531@126.com。

通信作者:高武平(1981-),博士,正高级工程师,主要从事活动断层探测、地震灾害风险评估等研究。E-mail:gwpp123@126.com。

within the basin-range tectonic region of northwestern Beijing. Several moderate-to-strong earthquakes have occurred near this concealed fault. To date, the Huliuhe fault remains underexplored, with its Quaternary activity still poorly understood. In previous projects, three shallow seismic survey lines were deployed to investigate the fault. This paper presents a detailed processing and analysis of data from these survey lines. By integrating regional Quaternary stratigraphic data, particularly Quaternary borehole data within 3.5 km of the survey lines, the Quaternary activity of the Huliuhe fault is characterized. The results show that the fault consists of a Y-shaped structure formed by a main fault, as well as a secondary fault. The main fault dips toward the southeast, with the depth of its upper breakpoint increasing from 15 m in the southwest to 40 m in the northeast. Observations also show a displacement of 8—20 m at the bottom boundary of the Upper Pleistocene. As this age represents the youngest faulted strata, the occurrence of the latest activity of the Huliuhe fault is attributed to the Late Pleistocene. This study also collected and analyzed data from magnetotelluric sounding, deep seismic wide-angle reflection/refraction, and seismic tomography profiles across the Yuguang Basin to provide a structural framework. The structural interpretation of the tomography profiles offered insights into the deep characteristics of the Huliuhe fault: the fault intersects the southern margin fault of the Yuguang Basin at a depth of approximately 10 km. Comprehensive analyses of historical earthquakes, relocated current earthquakes, focal mechanism solutions of small-to-moderate earthquakes, focal depth distribution, and the deep structure of the fault confirm that the Huliuhe fault exhibits a seismogenic structure. Earthquakes occurring near this fault are likely due to the combined activity of the Huliuhe fault and the southern margin fault of the Yuguang Basin.

Keywords: Yuguang Basin; Huliuhe fault; shallow seismic reflection; Quaternary activity

0 引言

京西北盆岭构造区位于张家口—渤海构造带西北段,是一个以半地堑-地堑构造为主的拉张断陷区,由延矾盆地、怀涿盆地、阳原盆地、蔚广盆地等多个半地堑盆地、地堑盆地构成。区内构造背景复杂,发育多组断裂构造,其中NE向断裂是区内最活动的主干断裂,其规模较大,一般长度都在几十至百余千米[1-2]。

壶流河断裂是京西北盆岭构造区内的一条重要断裂,也是张家口—渤海断裂带的重要组成部分。该断裂走向NE、长约65 km,隐伏于京西北盆岭构造区的蔚广盆地。断裂对盆地中部蔚县—西合营沉降中心的空间位置起着控制作用,使得盆地的内部结构复杂化,同时对地下泉水的运动、运移也具有重要的控制作用[3]。自有历史记载以来,在蔚广盆地发生过4次5级以上中强地震,其中的3次发生在断裂附近,近年来也不断有小震发生。目前对壶流河断裂研究较少,获得的资料有限,前人仅在遥感影像、地形地貌等宏观方面对断裂开展过研究[4-5],缺乏针对其活动性的探测研究。因此,本文基于浅层地震探测开展壶流河断裂第四纪活动性研究。

浅层地震勘探作为一种有效探测覆盖区隐伏断裂的地球物理探测方法,近年来在活动断层探测中应用广泛,在第四纪覆盖区断裂活动性判定方面可起到关键性的作用[6-8]。为了解壶流河断裂的上断点埋深和活动性,本文通过对跨壶流河断裂3条浅层地震勘探测线数据进行精细化处理。根据浅层地震剖面所揭示的信息,结合区域第四系地层资料和测线附近第四系钻孔资料对壶流河断裂的第四纪活动性进行研究,以期为蔚广盆地的活动构造研究和断裂未来的地震活动性预测提供科学依据。

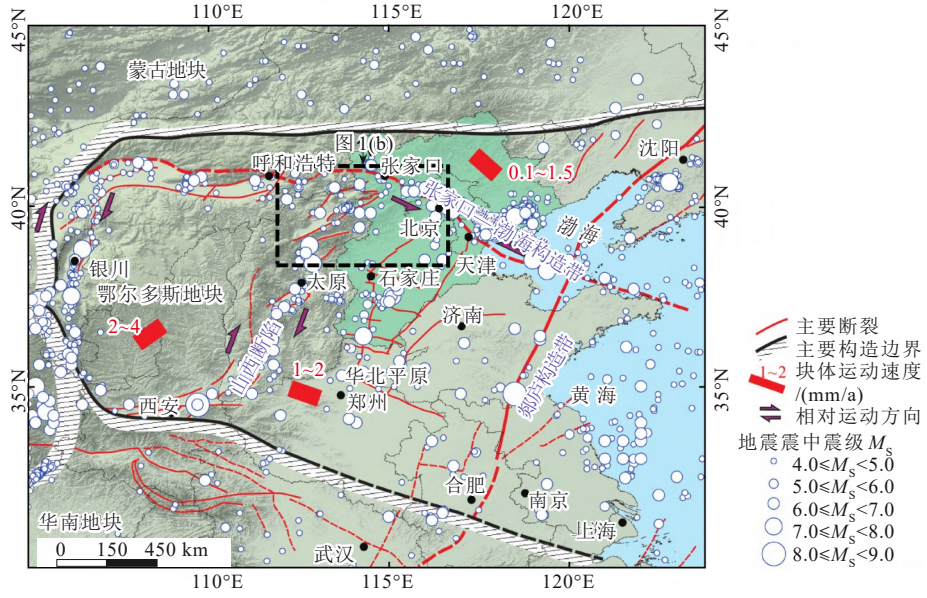
1 区域地质构造背景

京西北盆岭构造区隶属于华北克拉通中部造山带的北部,在地质构造上处于鄂尔多斯、燕山、华北平原等多个活动地块的接合部位[9][图1(a)所示方框范围],发育有怀涿、延矾、蔚广、阳原、灵丘、怀安和涞源等一系列呈斜列式展布的断陷盆地,盆地之间均以隆起相隔[2][图1(b)]。这些断陷盆地的边缘大都受到NE向活动断裂带的控制,形成了典型的盆岭构造区,而这些NE向断裂带同时也将京西

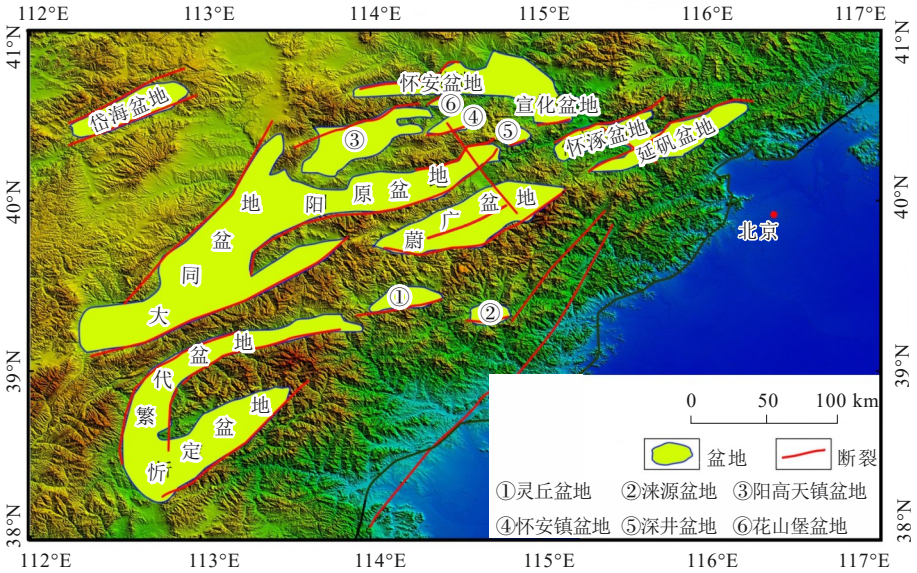
北盆岭区划分形成了一系列的活动断块[1-2]。京西北盆岭构造区在新生代拉张兼具走滑的应力作用下，发育了大量的大型山前断裂，也分布着众多规模较大的全新世活动断层[12]。区内主要发育有NNE-NE、NNW-NW 和近 EW 向三组断裂，NE 向活动断层是区内最活动的主干断裂，其次是与之近于正交的 NW 向活动断裂；另外，在北部发育规模不大的近 EW 向活动断裂。这几组断裂对区域构造地貌、第四纪地质、新构造运动起控制作用，并伴生有多次强震[1]。

蔚广盆地隶属于京西北盆岭构造区，是受南缘断裂带主控的不对称半地堑盆地，整体呈南深北浅形态，构造走向为 NE-NEE 向，东西延伸约 105 km，南北宽度 10～35 km。该盆地于新生代上新世晚期至早更新世初期开始裂陷发育。盆地形成以来，蔚广盆地南缘断裂带经历了长期构造演化，断裂南侧上升盘持续隆升，塑造为山地地貌；北侧下降盘不断沉降并持续接受沉积，最终形成盆地主体。

盆地南部为山势陡峭的小五台山，海拔普遍超 1 100 m；北部为地势和缓的月山山地，海拔 990 m 以上，亦是蔚广盆地与阳原盆地的天然分水岭；盆地中部地势平坦，海拔介于 887～984 m，整体呈现



(a) 华北地区活动构造简图（参照文献[10]）



(b) 京西北盆岭构造区简图（参照文献[11]修改）

图 1　研究区域背景

Fig. 1　Background of the study area

西高东低的地势特征。壶流河全域纵贯盆地，河道南侧广泛发育冲洪积扇地貌，北侧则以坡洪积、湖积高阶地为主。

蔚广盆地南缘断裂带为区域主控边界断裂，主导盆地的形成与演化过程[13-14]。跨断层陡坎探槽结果证实，该断裂为全新世活动断裂，已识别出3期古地震事件[15]。壶流河断裂隐伏于盆地内部，与蔚广盆地南缘断裂带平行展布、隔区相望，共同构成区域关键活动构造体系。

1.1 壶流河断裂

壶流河断裂为结合遥感解译、地球物理探测、地貌解析等多手段综合厘定的隐伏活动断裂。该断裂西起广灵县城，沿壶流河南岸及南山山前冲洪积扇前缘延展，东止于北洗翼西侧，整体总长65 km，走向N40°～50°E，断面倾向ES（图2）。断裂两侧第四系地层在厚度、物质组分与沉积结构上差异显著，卫星遥感影像中呈现出清晰的色调分区特征[4]；区域航磁数据显示，壶流河沿线磁场异常变化剧烈，北岸以正磁异常为主，南岸则转变为负磁异常[16]；断裂带沿线温泉、冷泉点状出露，呈条带状泉水溢出带分布特征[5]。

1994年，笔者与张四昌研究员完成该断裂专项野外调查。暖泉至穆家庄段以壶流河北岸为分界，南北两侧地貌形态分异显著：断裂北侧冲沟密集发

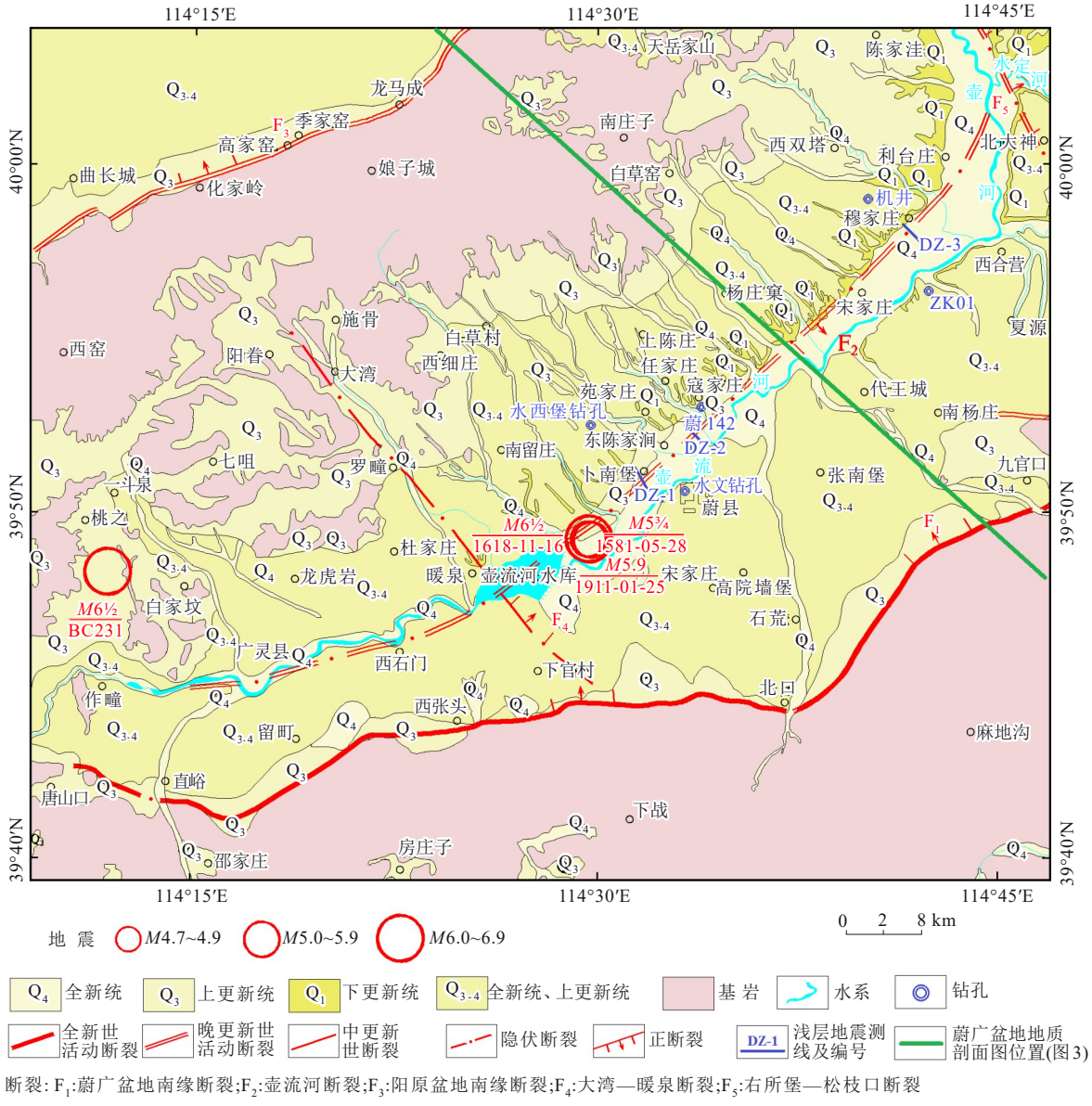


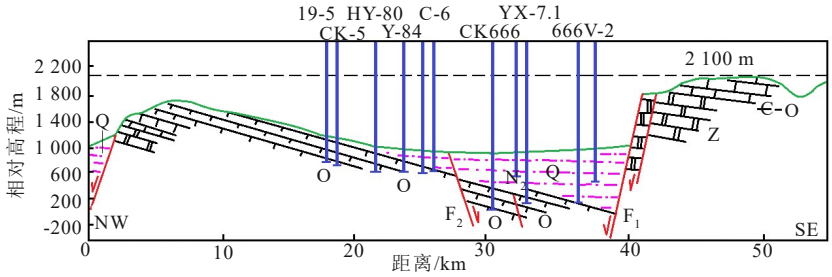
图2 壶流河断裂构造展布状况及浅层地震测线布设位置图

Fig. 2 Distribution of the Huliuhe fault and layout of shallow seismic survey lines

育，河谷下切深度可达 10～20 m，整体呈现抬升剥蚀地貌特征；南侧地势平缓微向河道倾斜，冲沟发育程度极低，为平坦堆积平原。断裂两侧地貌格局的不对称性，直观反映了断裂晚第四纪以来的新活动特性。同时，在小枣堡村西实地厘定一条 N50°E 走向正断层，断层断面清晰错切下更新统与上更新统地层，断面倾向 NW，产状与壶流河主断裂存在明显差异。

1.2　区域第四纪地层

蔚广盆地形成于上新世—早更新世（N_2—Q_1），是华北地区新生代断陷盆地的典型代表。盆地内部最老沉积地层可追溯至上新世，岩性组合以底砾岩、棕黄色泥岩及三趾马红土为主；盆地基底及周缘山地则由前寒武纪变质岩、寒武纪—奥陶纪碳酸盐岩和侏罗纪火山岩构成，为盆地沉积演化提供了物源基础与构造背景（图 3）。



注：Q 代表第四系；N_2 代表上新统；F_1 代表蔚广盆地南缘断裂；F_2 代表壶流河断裂

图 3　蔚广盆地地质剖面图（参照文献[13]）

Fig. 3　Geological profile of the Yuguang Basin (after reference [13])

河北煤田地质四队通过蔚县寇家庄蔚 142 钻孔（配套 78 块孢粉样品分析与古地磁测年数据），系统揭示了盆地中部的新生代地层序列：上新世三趾马红土（N_2）厚度 19.6 m，以假整合接触覆于侏罗系砾岩之上；下更新统泥河湾组（Q_1）厚度达 310.67 m，与下伏三趾马红土呈假整合接触，反映上新世末存在短暂的沉积间断；上更新统（Q_3）为砂卵石与黄土互层，总厚 24.33 m，其中风成黄土层厚 19.3 m，指示晚更新世气候趋于干冷[17]。

针对壶流河断裂带的专项研究显示，位于蔚县盆地西辛庄西北侧的 ZK01 标准钻孔（孔深 489.38 m）完整揭露了断裂带核心展布区的新生代地层序列[18]。该钻孔自下而上可划分为 5 个岩石地层单位：上新统石匣组（N_2s）、上新统稻地组（N_2d）、下更新统泥河湾组（Qp_1n）、上更新统郝家台组（Qp_3h）及马兰组（Qp_3m）。其中，上更新统底界埋深 90.0 m，下更新统底界埋 380.0 m，清晰记录了断裂带控制下的盆地沉降过程与地层格架（图 4）。

2　壶流河断裂探测与断裂活动性

2.1　壶流河断裂的浅层地震探测及数据处理

2.1.1　测线布设及工作方式

在系统梳理、广泛收集已有资料的基础上，初步厘定了壶流河断裂的大致展布范围。本次工作首先布设控制性 DZ-2 浅层地震测线开展探测，随后补充布设两条辅助测线，共计完成 3 条浅层地震探测剖面，各测线具体位置如图 2 所示。

2.1.2　探测设备与采集参数

本次浅层地震探测采用 DZQ48 型地震仪配合覆盖开关滚动作业，观测系统为单边激发模式。纵波信号接收选用 CDJ-Z 系列 60 Hz 检波器串，采用两串两并组合方式；地震波由 100 kg 落锤震源激发。通过现场试验对比确定最优采集参数：接收道数 48 道、单点锤击叠加次数 20 次、采样间隔 0.2 ms、记录长度 400～500 ms。各测线详细采集参数详列于表 1。

2.1.3　数据处理

地震勘探数据处理精度直接影响断层解译结果的可靠性，因此提高地震剖面信噪比是本次数据处理的核心目标。本次数据处理基于 Vista12.0 地震处理系统开展，充分利用软件实时过程监控及处理模块灵活组合的优势，同时对各项处理参数进行多次试算优选，确保获取最优处理效果，整体数据处理流程如图 5(a)所示。

高信噪比地震剖面是精确判定断裂上断点埋深、开展断裂活动性分析的重要前提。为最大程度保留有效信号、压制随机干扰噪声，本次研究采用融合去噪技术，将基于小波包分析的频率-空间域

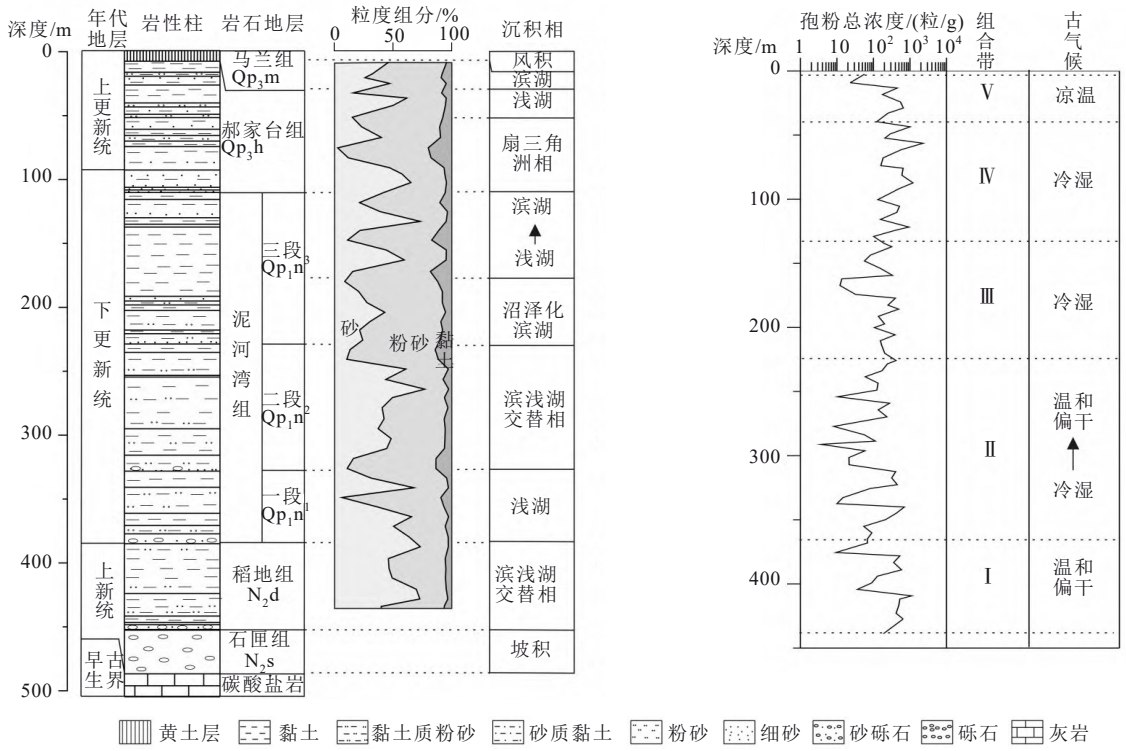


图 4 标准钻孔 ZK01 综合柱状对比图(参照文献[18])

Fig. 4 Comprehensive columnar comparison diagram of borehole ZK01 (after reference [18])

表 1 各测线采集工作参数表

Table 1 Acquisition parameters of each survey line

编号	测线位置	剖面长度/m	激发震源	炮间距/m	道间距/m	接收道数	偏移距/m	覆盖次数	激发方式
DZ-1	卜南堡村南	588	100 kg落锤	8	4	48	12	12	单边
DZ-2	东陈家涧东北	360	100 kg落锤	8	4	48	20	12	单边
DZ-3	上堡村附近	525	100 kg落锤	10	5	48	20	12	单边

(F-X)去噪方法与子波降噪(4D-DEC)方法相结合,具体去噪处理流程如图 5(b)所示。同时,为精准获取反射界面深度信息,本文依托处理所得叠加速度与各反射界面双程垂直到时,通过迪克斯公式计算得到各反射界面平均速度,并结合测线邻近钻孔资料综合厘定时深转换速度,完成地震剖面的高精度时深转换。

2.2 地震剖面特征及其断裂活动性

2.2.1 地震剖面特征

(1) DZ-1测线

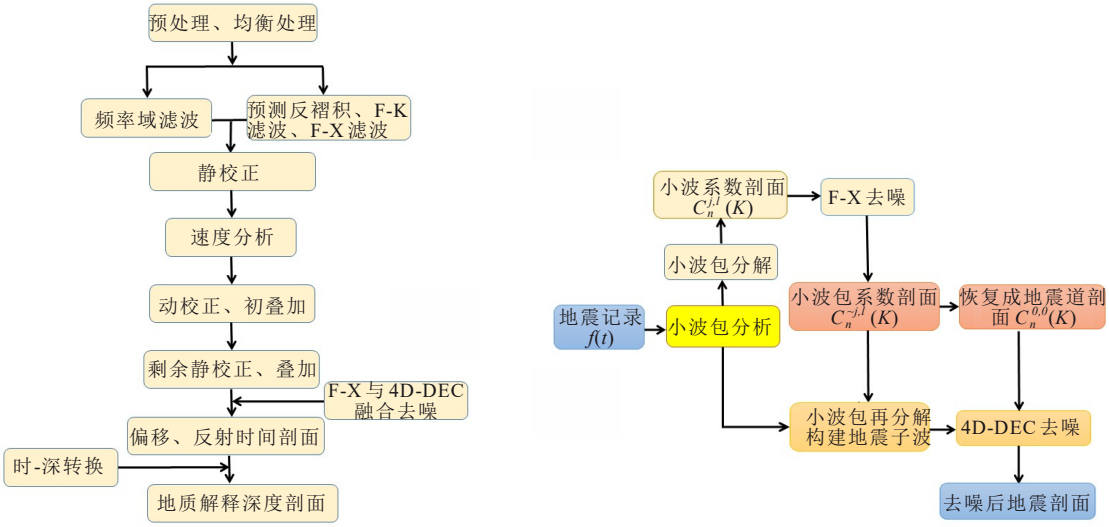
测线布设于卜南堡村南,方向由南至北。地震剖面显示,150 ms以上时段反射波信息丰富、波组能量较强、同相轴连续清晰,横向反射能量整体均匀、差异较小(图 6)。剖面自上而下可识别出 T_{Q3}、T_{11}、T_{12}、T_{13}、T_{14}共 5 组有效反射震相,其中在桩号 150 m与260 m位置,反射波同相轴发生显著错断,共解译出2条断裂构造。

$F_{2\text{-}1}$断层位于剖面桩号260 m处,错切 T_{Q3}、T_{11}、T_{12}、T_{13}、T_{14}全部反射界面,为倾向SE的高角度正断层,倾角 65°~80°。该断层 T_{Q3}界面垂直断距为 10 m,上断点埋深15 m。

$F_{1\text{-}1}$断层发育于剖面桩号 150 m处,主要错断 T_{12}、T_{13}、T_{14}反射界面,断层倾向NW,最新错断层位为 T_{12}界面,向上未错切 T_{11}界面,上断点埋深60 m。该断裂与 $F_{2\text{-}1}$断层间距110 m,二者在剖面上组成Y字形断裂组合样式。

(2) DZ-2测线

该测线布设于东陈家涧村东北侧,测线走向为自南向北。地震剖面显示,150 ms以上反射波组发育丰富、能量集中、同相轴清晰连续,横向反射震相能量分布均匀、差异较小(图 7)。剖面自上而下可识别出 T_{01}、T_{Q3}、T_{11}、T_{12}、T_{13}、T_{14}、T_{15}共 7 组反射震



(a) 数据处理流程框图　　(b) F-X与4D-DEC融合去噪技术途径

图 5　浅层地震数据处理流程和去噪途径图

Fig. 5　Shallow seismic data processing workflow and denoising approach

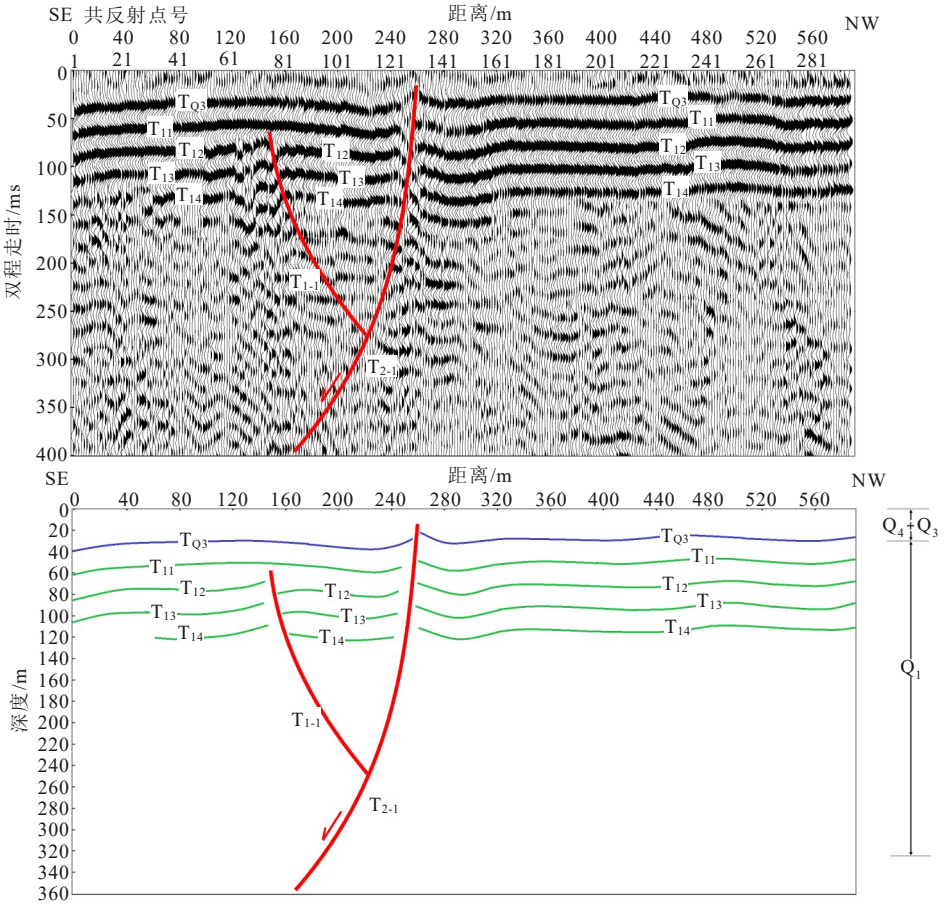


图 6　DZ-1 测线浅层地震反射时间剖面与深度解释剖面

Fig. 6　Shallow seismic reflection time profile and depth interpretation profile of survey line DZ-1

相；在剖面桩号 160 m 与 270 m 位置，反射波同相轴出现明显错断或产状畸变，据此共解译出 2 条断层。

F_{2-1} 断层位于剖面桩号 270 m 处，错断 T_{Q3}、T_{11}、T_{12}、T_{13} 反射界面，T_{14}、T_{15} 界面同步出现明显产状变化，为倾向 SE 的高角度正断层，倾角 70°～

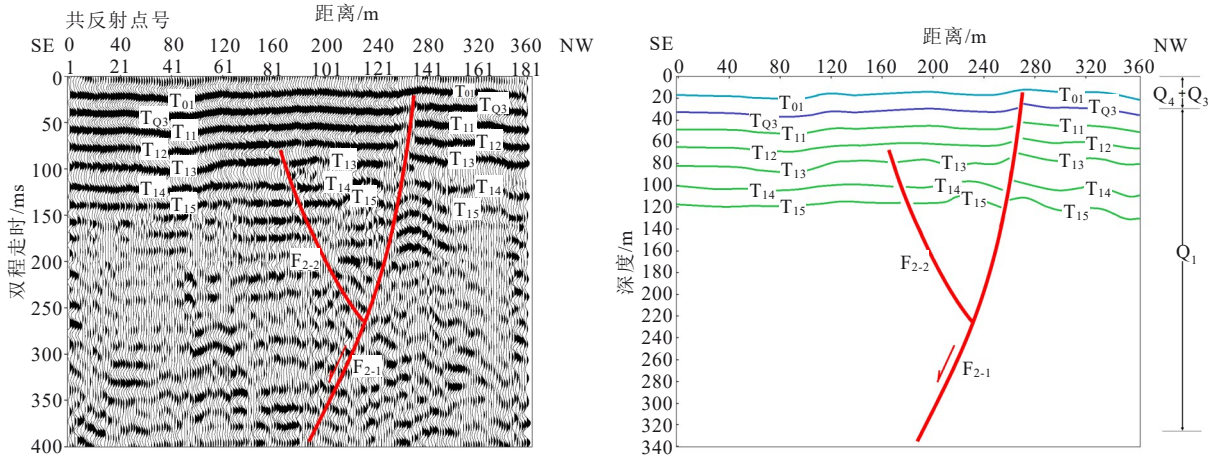


图 7 DZ-2测线浅层地震反射时间剖面与深度解释剖面

Fig. 7 Shallow seismic reflection time profile and depth interpretation profile of survey line DZ-2

80°。该断层最新错断层位为T_{Q3}界面，向上未切穿T_{01}界面，T_{Q3}界面垂直断距 8 m，上断点埋深 15 m。

F_{2-2}断层发育于剖面桩号 160 m 处，T_{13}、T_{14}、T_{15}反射界面存在错断与间断特征，断层倾向 NW，上断点埋深 68 m。该断层与F_{2-1}断层平面间距 110 m，剖面结构共同构成Y字形断裂组合。

（3）DZ-3测线

该测线布设于穆家庄上堡村附近，沿壶流河断裂北侧土坎与南侧倾斜平原之间的开阔地带自南向北延伸（图 8）。地震剖面显示，250 ms以上波组反射信息丰富、能量较强、同相轴清晰连续，剖面上部横向反射能量分布较为均匀（图 9）。剖面自上而下可识别出T_{01}、T_{02}、T_{Q3}、T_{11}、T_{12}、T_{13}共 6 组反射震相，在桩号 175 m 与 300 m 处，反射波同相轴出现明显错断、间断及消隐现象，共解译出 2 条断层构造。

F_{2-1}断层位于剖面桩号 300 m 处，错断T_{02}、T_{Q3}、T_{11}反射界面，T_{12}、T_{13}界面出现明显消隐特征，为倾



图 8 DZ-3测线（穆家庄上堡村）附近地形地貌（镜向 NW）

Fig. 8 Topography and geomorphology near survey line DZ-3 (Shangbaocun, Mujiazhuang) (view towards NW)

向 SE 的高角度正断层，倾角 70°～80°。该断层最新错断T_{Q3}界面，向上未切穿T_{01}界面，T_{Q3}界面垂直断距 20 m，上断点埋深 40 m。

F_{3-1}断层位于剖面桩号 175 m 处，T_{11}界面发生错断，T_{12}、T_{13}界面出现波组消隐，断层倾向 NW。

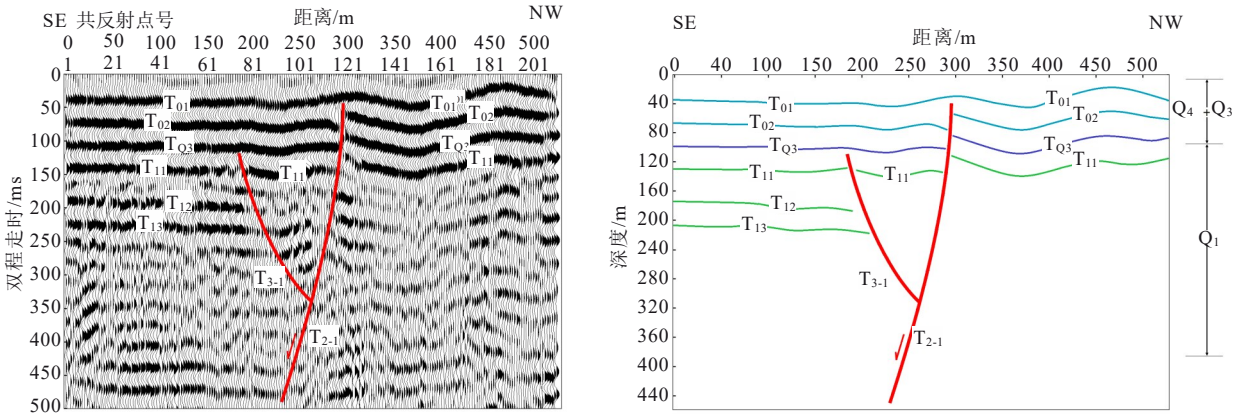


图 9 DZ-3测线浅层地震反射时间剖面与深度解释剖面

Fig. 9 Shallow seismic reflection time profile and depth interpretation profile of survey line DZ-3

该断层最新错断层位为T_{11}界面，向上终止于T_{Q3}界面，上断点埋深 110 m。$F_{3\text{-}1}$断层与$F_{2\text{-}1}$断层水平间距 125 m，剖面上共同构成Y字形断裂组合。

综合上述3条浅层地震剖面探测结果，结合区域地震构造资料分析可知，各剖面内的$F_{2\text{-}1}$断层为壶流河断裂主干断裂。壶流河断裂整体表现为Y字形构造样式，由两组次级断裂组合构成，其中主断裂倾向SE，T_{Q3}界面垂直断距为8～20 m，断层上断点埋深介于15～40 m，整体呈现西南浅、东北深的空间分布特征。

2.2.2　壶流河断裂的活动时代

通过时深转换可将时间域地震剖面转换为深度剖面，精准获取各反射界面的埋藏深度信息。本次研究搜集了各测线周边3.5 km范围内的第四纪钻孔资料，为地震反射界面层位标定与地层解译提供地质依据。其中，城关水文钻孔坐落于蔚县城区，位于DZ-1测线东南1.8 km处；水西堡钻孔位于水西堡村东，距DZ-1测线西北2.2 km；蔚142钻孔位于寇家庄村南，距DZ-2测线北侧2.4 km，水西堡钻孔与城关水文钻孔分别距DZ-2测线 2.6 km、3.5 km；ZK01标准钻孔位于西辛庄村西北，距DZ-3测线东南3.2 km；西方城村机井位于DZ-3测线西北1.8 km处。各钻孔具体位置见图2，所有钻孔的第四系地层划分成果详列于表2。

表2　浅层地震勘探测线附近钻孔第四系划分结果

Table 2　Quaternary stratigraphic division results from boreholes near the shallow seismic survey lines

地层	钻孔底界面埋深/m				
	水文钻孔（县城城关）[19]	水西堡钻孔[20]	蔚142孔（寇家庄）[17]	标准钻孔$_{ZK01}$（西辛庄西北）[18]	机井（西方城西）[3],[21]
全新统（Q_4）	8.50	-	-	-	-
上更新统（Q_3）	37.00	32.25	24.33	90.0	90.0
下更新统（Q_1）	350.42	324.45	335.00	380.0	380.0
备注	DZ-1、DZ-2、DZ-3测线				

DZ-1测线剖面共识别出T_{Q3}、T_{11}～T_{14}五组反射界面，其中T_{Q3}界面埋深约30 m，T_{11}～T_{14}界面埋深介于50～110 m。结合测线周边水文钻孔与水西堡钻孔资料标定，确定T_{Q3}界面为上更新统底界反射界面。剖面断裂错断T_{Q3}及T_{11}～T_{14}反射层，表明断裂最新活动时代为晚更新世。

DZ-2测线剖面共解译出T_{01}、T_{Q3}、T_{11}～T_{15}七组反射界面，T_{01}界面埋深约20 m，T_{Q3}界面埋深约30 m，T_{11}～T_{15}界面埋深50～130 m。依据邻近蔚142钻孔地层资料综合标定，T_{Q3}为上更新统底界反射界面。其中T_{01}界面横向连续可追踪，断裂错断T_{Q3}及T_{11}～T_{15}地层，断裂最新活动时代为晚更新世。

DZ-3测线剖面识别出T_{01}、T_{02}、T_{Q3}、T_{11}～T_{13}六组反射界面，各组界面埋深分别约为30 m、60 m、90 m，T_{11}～T_{13}界面埋深110～210 m。结合测线附近ZK01标准钻孔及机井钻孔资料标定，T_{Q3}界面对应上更新统底界。剖面T_{01}界面连续稳定，断裂错断T_{02}、T_{Q3}及T_{11}～T_{13}反射层，判定其最新活动时代为晚更新世。

综合三条浅层地震测线探测与地层标定结果可知，壶流河断裂普遍错断上更新统底界地层，断裂最新活动时代为晚更新世。

3　讨论

3.1　壶流河断裂深部特征

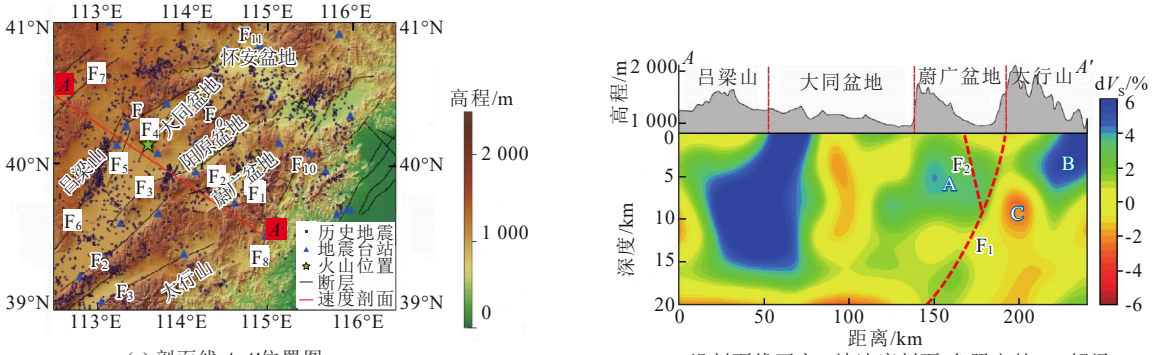
横跨蔚广盆地的大地电磁剖面、深地震宽角反射/折射剖面及地震层析成像剖面，为揭示蔚广盆地壳幔结构特征、厘清断裂深浅构造耦合关系提供了重要深部探测依据。

阳高—容城大地电磁剖面横穿蔚广盆地，探测结果显示，研究区的中—下地壳发育多条断续分布的低阻带[22]。壶流河断裂对应该剖面107号测点附近，该处存在显著电性差异带，整体呈现北侧低阻、南侧高阻的电性分区特征。该电性边界带向下延伸倾角由北西向南东由缓变陡，且在断裂下方10～40 km深度范围内发育壳内低阻体。依据剖面电性结构特征综合分析，推测壶流河断裂深部切割深度可达10 km左右。

基于海兴—阳原—丰镇深地震宽角反射/折射剖面蔚县—丰镇段壳幔二维速度结构成果[23-24]，蔚县附近上地壳（地表至C2界面以上）发育局部低速异常体，低速体顶面埋深约11 km，底面埋深约15 km。

平面上，蔚县东北部为上地幔相对凸起区，西南侧为上地幔相对凹陷区；蔚县周边为地壳厚度突变带，自东向西约 20.0 km 范围内，地壳厚度由 39.0 km 增至 42.0 km，厚度增幅达 3.0 km。壶流河断裂坐落于上地幔凹陷区，处于地壳厚度剧烈变化的构造敏感带内。

李哲等[25]利用地震双差层析成像技术，获取了横跨蔚广盆地的地壳速度结构剖面。本文基于该剖面的速度异常与构造形态特征，对蔚广盆地深部构造进行解译（图 10）。结果表明，蔚广盆地下方存在剪切波高速异常体 A，该异常与太行山下方剪切波高速异常体 B 相连。蔚广盆地南缘断裂 F_1 沿高速异常 A 与低速异常 C 的边界向下延伸，切割深度超 20 km；壶流河断裂 F_2 浅部沿高速异常 A 边缘向下延展，并在约 10 km 深度处与蔚广盆地南缘断裂 F_1 交汇。浅表构造特征显示，蔚广盆地南缘断裂全长 120 km，为全新世活动断裂，壶流河断裂总长约 65 km，为晚更新世活动断裂，二者的规模差异与活动性特征，与深部构造结构特征具有良好的对应关系。



(a) 剖面线 *A*-*A*′位置图　　(b) 沿剖面线下方 S 波速度剖面(参照文献[25]解译)

F_1:蔚广盆地南缘断裂；F_2:壶流河断裂；F_3:阳原盆地南缘断裂；F_4:采凉山东缘断裂；F_5:水峪断裂；F_6:口泉断裂；F_7:岱海南断裂；F_8:孙庄子—乌龙沟断裂

图 10　横跨蔚广盆地的地壳速度结构剖面

Fig. 10　Crustal velocity structure profile across the Yuguang Basin

3.2　壶流河断裂与地震的关系

判定震源断层、厘定发震构造的核心依据，是明确地震活动与区域先存断裂的匹配关系。通常综合地震空间分布、震源机制解及断裂深部构造特征，建立断裂构造与地震活动的成因联系。基于此，本文结合壶流河断裂的深部构造形态、区域地震活动规律及震源机制成果，深入探讨该断裂的控震作用与孕震潜力。

汶川 8.0 级、芦山 7.0 级、玛多 7.4 级等典型地震的大地电磁探测成果表明，中强地震及其余震的空间分布受地下介质电阻率结构显著控制，震源多集中于高、低阻电性过渡带的高阻介质一侧[26-28]，该规律已在国内外大量强震区电性结构研究中得到普遍验证[28]。针对华北强震区深部构造的地震测深研究指出，区域强震震源多集中于上地壳高速层与中地壳低速层的过渡带，主要分布在低速体边缘、莫霍面隆起斜坡及主干断裂周边有利构造部位[29]。结合壶流河断裂深部电性与速度结构特征分析，壶流河断裂（F_2）在深部与蔚广盆地南缘断裂（F_1）交汇，断裂坐落于显著电性差异带之上，其下伏区域发育低速异常体，表明蔚广盆地深部具备良好的中强地震孕震构造条件。

从历史地震活动来看，蔚广盆地地震活动较为活跃，史料共记载 5 次中强地震，分别为公元前 231 年平阴 6 级地震、1581 年蔚县 5 级地震、1618 年蔚县 6 级地震、1911 年蔚县 5.9 级地震及 1956 年蔚县 4 级地震[30]。其中 1581 年、1618 年、1911 年三次地震均发生于壶流河断裂沿线。1618 年蔚县 6 级地震为盆地内有史记载的最强地震之一，其地震烈度Ⅶ度区等值线长轴走向与壶流河断裂展布方向基本吻合（图 11 中黑色圆圈），进一步印证了该断裂对区域地震活动的控制作用。

已有学者对区域小震开展精确定位研究，赵博等[31]完成了 2006—2009 年华北地区地震重定位，蔡玲玲等[32]对 2008—2016 年京西北地区地震进行精细校正。重定位结果显示，区域中小地震沿壶流河断裂密集分布，形成显著的 NE 向条带状地震集群分布特征（图 12）。同时，京西北地震重定位数据表明，

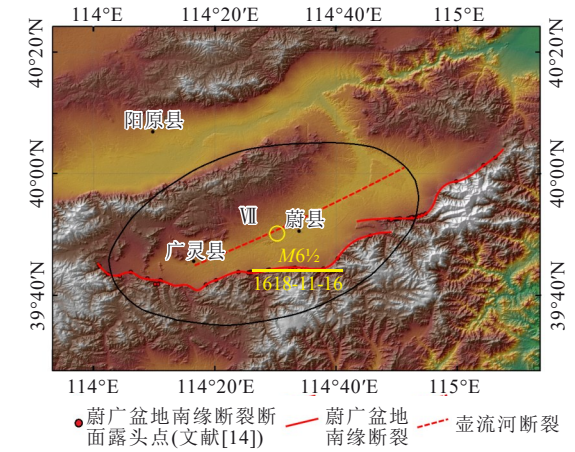


图 11　1618 年蔚县 6½ 级地震烈度Ⅶ度区等震线图

Fig. 11　Isoseismal map of the intensity Ⅶ zone for the 1618 Yuxian $M6\frac{1}{2}$ earthquake

蔚广盆地广灵震群震源深度集中分布在 5～18 km，优势深度约 10 km[32]，该深度范围与壶流河断裂和蔚广盆地南缘断裂的深部交汇深度基本一致，进一步揭示了断裂深部构造与区域地震活动的耦合关系。

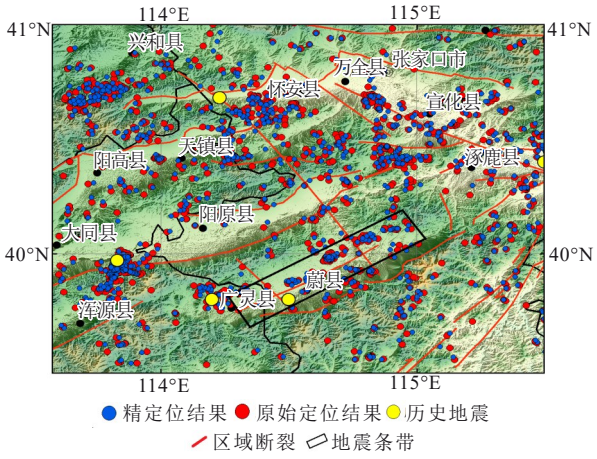


图 12　蔚广盆地及邻区重新定位前后震中分布图（参照文献[32]修改）

Fig. 12　Distribution of earthquake epicenters before and after relocation in the Yuguang Basin and adjacent areas (modified from reference [32])

虽壶流河断裂沿线历史上曾多次发生中强地震，但仅凭历史地震记录尚无法明确判定该断裂为对应发震断层。为此，本文从地震学角度进一步剖析壶流河断裂的震源断层属性特征。2013 年 8 月 22—25 日，壶流河断裂周边发生 M_L0.4～3.2 小震震群活动，本次震群共记录 13 次地震事件，其中最大两次地震震级分别为 M_L3.2 与 2.6，对应的震源机制解结果如图 13 所示[33]。震源机制解显示，该次震群以正断拉张型发震机制为主，与壶流河断裂、蔚广盆地南缘断裂的正断层构造属性高度吻合。

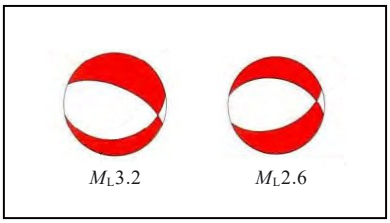


图 13　2013 年蔚县震群 M_L3.2、M_L2.6 地震震源机制解结果图（参照文献[33]）

Fig. 13　Focal mechanism solutions of the M_L3.2 and M_L2.6 earthquakes in the 2013 Yuxian earthquake swarm (after reference [33])

区域构造应力场研究成果表明，张红艳等[2]通过断层滑动数据与震源机制解计算得到的区域主应力方位，与樊文杰等[34]基于 2009 年 1 月—2017 年 11 月首都圈 8 061 次地震事件、结合小震综合断层面解反演得到的蔚广盆地及邻区最大主应力方位一致，优势方位为 N69°E。区域震源机制统计结果显示，研究区内正断型地震占比显著[34]。同时，武敏捷等[35]通过对蔚广盆地及邻区 102 组震源机制解的统计分析，得到区域平均 P 轴方位为 N64°E。综合上述应力场反演结果可以判定，蔚广盆地及邻区整体属于张性构造应力环境。

浅层地震勘探结果表明，壶流河断裂为晚更新世活动断裂，全新世活动性较弱，但断裂沿线现代中小地震活动与断裂展布具有显著的空间对应关系。断裂浅表最新活动时代为晚更新世、无明显全新世活动迹象，与区域持续发育的现代中小地震活动看似存在矛盾，其原因可通过深部构造特征予以解释：壶流河断裂与具有全新世活动特征的蔚广盆地南缘断裂在约 10 km 深度处交汇。同时，蔚广盆地多数地震的震源优势深度集中在 10 km 左右，表明区域现代中小地震活动主要由蔚广盆地南缘断裂的深部活动牵引壶流河断裂协同活动所致。从深部构造组合关系来看，壶流河断裂隶属于蔚广盆地南缘断裂，为其次级构造断裂。即便地震活动特征揭示壶流河断裂深部存在现今活动性，浅表地质与地球物理探测手段也难以识别其活动迹象，其深部现今活动本质上是蔚广盆地南缘断裂主干活动的派生响应。

综合历史地震记录、现代小震重定位结果、中

小地震震源机制解、震源深度分布规律，结合断裂性质与深部构造特征分析，可判定壶流河断裂具备震源断层属性。

结合断裂规模、晚更新世最新活动时代特征及其与蔚广盆地南缘断裂的深部构造关系综合分析，壶流河断裂并非蔚广盆地的主控发震断层。区域地震活动是蔚广盆地南缘断裂与壶流河断裂共同作用的结果，壶流河断裂作为次级活动断裂，在盆地构造活动与地震孕育过程中发挥着重要的辅助控震作用。

4 结论

综合3条壶流河断裂浅层地震探测成果，结合沿线钻孔资料及区域深部地球物理探测数据，系统剖析了壶流河断裂的第四纪活动性与深部构造特征，主要结论如下：

（1）浅层地震探测结果表明，总长约65 km的壶流河断裂整体呈Y字型构造样式，由主、次两支断层组合构成。其中北侧断层为主断裂，倾向SE；南侧为次级伴生断层，倾向NW。主断裂上断点埋深15～40 m，整体呈现西南浅、东北深的变化规律；上更新统底界T_{Q3}界面垂直断距8～20 m，断裂最新错断地层为上更新统，判定其最新活动时代为晚更新世。

（2）综合大地电磁测深、深地震宽角反射/折射及地震层析成像等深部探测剖面成果可知，壶流河断裂在10 km深度处与蔚广盆地南缘断裂交汇，而蔚广盆地南缘断裂向下延伸深度超过20 km，为区域深部主控断裂。

（3）结合历史地震烈度分布、现代小震重定位结果、中小地震震源机制解、震源深度分布特征，以及断裂浅表属性与深部构造耦合关系综合分析，判定壶流河断裂具备震源断层属性。研究区断裂附近的地震活动，为壶流河断裂与蔚广盆地南缘断裂协同作用的结果。

受探测条件与场地地层条件限制，本次采用100 kg落锤震源激发能量有限，且研究区地处山前冲洪积扇地带，第四系沉积物分选性好、磨圆度高、颗粒均匀、沉积层连续性好，波阻抗界面差异较小，导致地震剖面中深部有效反射信号较弱，未识别出清晰的基岩界面与第四系底界反射界面，对深部断裂精细解译存在一定影响。本文对壶流河断裂活动时代的判定，主要依托浅层地震探测结果，并结合区域第四系沉积特征与测线周边钻孔资料综合推断，缺乏跨断层钻探样品与地层测年等直接数据支撑，研究结果存在一定不确定性。后续可开展针对性跨断层钻探与年代学测试工作，进一步精准厘定壶流河断裂的最新活动时代，完善断裂活动性研究成果。

参考文献（References）

[1] 冉勇康，陈立春，徐锡伟. 北京西北活动构造定量资料与未来强震地点的讨论[J]. 地震学报，2001，23(5)：502-513.
RAN Yongkang，CHEN Lichun，XU Xiwei. Quantitative data about active tectonics and possible locations of strong earthquakes in the future in northwest Beijing[J]. Acta Seismologica Sinica，2001，23(5)：502-513.

[2] 张红艳，谢富仁，荆振杰. 京西北盆岭构造区现代构造应力场的非均匀特征[J]. 地球物理学报，2009，52(12)：3061-3071.
ZHANG Hongyan，XIE Furen，JING Zhenjie. Researeh on heterogeneity of the present tectonic stress field in the basin-and-range province northwest of Beiiing[J]. Chinese Journal of Geophysics，2009，52(12)：3061-3071.

[3] 李泓泉，张树胜，谢明忠，等. 冀西北蔚县盆地地热资源赋存特征及勘查开发方向[J]. 地质论评，2020，66(4)：919-932.
LI Hongquan，ZHANG Shusheng，XIE Mingzhong，et al. The occurrence characteristics and exploration and development direction of geothermal resources in Yuxian Basin，northwest Hebei Province[J]. Geological Review，2020，66(4)：919-932.

[4] 张弼斌. 数字图象处理在蔚县煤田构造研究中的应用[J]. 西安矿业学院学报，1992，12(4)：342-346.
ZHANG Bibin. Application of digital image processing to the study of geological structure in Yuxian coalfield[J]. Journal of Xi'an Mining Institute，1992，12(4)：342-346.

[5] 郝晓雨，郝文霞. 蔚县盆地水文地质条件的初步研究[J]. 工程勘察，2008，36(增刊2)：187-192.
HAO Xiaoyu，HAO Wenxia. Preliminary study on hydrogeological conditions in Yuxian Basin[J]. Geotechnical Investigation & Surveying，2008，36(Suppl02)：187-192.

[6] 顾勤平，许汉刚，晏云翔，等. 郯庐断裂带新沂段地壳浅部结构和断裂活动性探测[J]. 地震地质，2020，42(4)：825-843.
GU Qinping，XU Hangang，YAN Yunxiang，et al. The crustal shallow structures and fault activity detection in Xinyi section of Tan-Lu fault zone[J]. Seismology and Geology，2020，42(4)：825-843.

[7] 张文朋，张春丽，高武平，等. 用浅层地震勘探资料研究蓟运河断裂的第四纪活动特征[J]. 地震工程学报，2022，44(1)：183-191.
ZHANG Wenpeng，ZHANG Chunli，GAO Wuping，et al. Quaternary activity characteristics of the Jiyunhe fault revealed by shallow seismic prospecting data[J]. China Earthquake Engineering Journal，2022，44(1)：183-191.

[8] 李晓妮，杨晨艺，李高阳，等. 渭河盆地东南缘渭南塬前北侧分

支断层的浅部结构及晚第四纪活动[J]. 地震地质，2023，45(2)：484-499.
LI Xiaoni，YANG Chenyi，LI Gaoyang，et al. Shallow structure and late quaternary activities of branch faults on the northern side of the Weinan tableland in the southeastern margin of the Weihe Basin[J]. Seismology and Geology，2023，45(2)：484-499.

[9] 张培震，邓起东，张国民，等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑：地球科学)，2003，33(增刊1)：12-20.
ZHANG Peizhen，DENG Qidong，ZHANG Guomin，et al. Strong earthquake activity and active blocks in Chinese mainland[J]. Scientia Sinica(Terrae)，2003，33(Suppl01)：12-20.

[10] 王惠卿，谭成轩，丰成君，等. 京津冀协同发展区活动构造与地壳稳定性[J]. 地质通报，2022，41(8)：1322-1341.
WANG Huiqing，TAN Chengxuan，FENG Chengjun，et al. Activity structure and crustal stability in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone[J]. Geological Bulletin of China，2022，41(8)：1322-1341.

[11] 张文朋. 桑干河阳原—涿鹿段地貌演化与新构造[D]. 北京：中国地震局地震预测研究所，2011.
ZHANG Wenpeng. The geomorphic evolution and neotectonics of the Yangyuan—Zhuolu sectiont of Sanggan River[D]. Beijing：Institute of Earthquake Forecasting，China Earthquake Administration，2011.

[12] 徐锡伟，吴熙彦，于贵华，等. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用[J]. 地震地质，2017，39(2)：219-275.
XU Xiwei，WU Xiyan，YU Guihua，et al. Seismo-geological signatures for identifying $M\geqslant 7.0$ earthquake risk areas and their premilimary application in China's mainland[J]. Seismology and Geology，2017，39(2)：219-275.

[13] 徐锡伟，吴卫民，张先康，等. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震[M]. 北京：科学出版社，2002.
XU Xiwei，WU Weimin，ZHANG Xiankang，et al. Neotectonic movements and seismology in the crust of the Capital Region[M]. Beijing：Science Press，2002.

[14] 王林. 盆地边界活动正断层多尺度构造地貌研究：以京西北蔚广盆地南缘断裂带为例[D]. 北京：中国地震局地质研究所，2012.
WANG Lin. Research of basin marginal active normal faults through multi-scale tectonic geomorphology：a case study on the Yuguang Basin south margin fault[D]. Beijing：Institute of Geology，China Earthquake Administration，2012.

[15] 王林，田勤俭，李德文，等. 蔚广盆地南缘断裂带唐山口段山前断层活动性研究[J]. 震灾防御技术，2017，12(2)：319-328.
WANG Lin，TIAN Qinjian，LI Dewen，et al. The activity of the piedmont fault along the Tangshankou segment of Yuguang Basin southern marginal fault[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention，2017，12(2)：319-328.

[16] 陈江源，刘波，陈志财，等. 重磁综合解释在冀北—晋北地区油气勘探中的应用[J]. 地质找矿论丛，2022，37(3)：327-335.
CHEN Jiangyuan，LIU Bo，CHEN Zhicai，et al. Application of integrated aeromagnetic and airborne gravity data interpretation to oil-gas exploration in the North Hebei—North Shanxi area[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research，2022，37(3)：327-335.

[17] 任振纪. "泥河湾组"地层沉积物的孢粉组合特征及其地质意义[J]. 河北地质学院学报，1982，5(增刊1)：166-169.
REN Zhenji. Sporo-pollen assemblage characteristics of stratum sediments in Nihewan Formation and its geological significance[J]. Journal of Hebei GEO University，1982，5(Suppl01)：166-169.

[18] 张亚光，马梦玲，周明兴，等. 河北蔚县盆地晚上新世以来沉积古环境演化分析[J]. 地质论评，2023，69(增刊1)：37-39.
ZHANG Yaguang，MA Mengling，ZHOU Mingxing，et al. Analysis on the evolution of sedimentary paleoenvironment in the Yuxian Basin of Hebei Province since the Late Neogene[J]. Geological Review，2023，69(Suppl01)：37-39.

[19] 陈望和. 河北第四纪地质[M]. 北京：地质出版社，1987.
CHEN Wanghe. Quaternary geology of Hebei Province[M]. Beijing：Geological Publishing House，1987.

[20] 奚云，王强，高秀林. 河北省蔚县水西堡钻孔的微体古生物群及地层划分[J]. 海洋地质与第四纪地质，1987，7(3)：91-99.
XI Yun，WANG Qiang，GAO Xiulin. The micropalaeontological fauna and stratigraphic division of the drilling hole in Shuixipu，Yuxian County，Hebei Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology，1987，7(3)：91-99.

[21] 周江. 蔚县盆地地热成因分析[J]. 煤炭科技，2019，40(5)：6-10.
ZHOU Jiang. Analysis on geothermal genesis of Yuxian Basin[J]. Coal Science & Technology Magazine，2019，40(5)：6-10.

[22] 赵国泽，刘铁胜，江钊，等. 山西阳高—河北容城剖面大地电磁资料的二维反演解释[J]. 地球物理学报，1997，40(1)：38-46.
ZHAO Guoze，LIU Tiesheng，JIANG Zhao，et al. Investigation on MT data along Yanggao Rongcheng profile by two-dimensional inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics，1997，40(1)：38-46.

[23] 张成科，张先康，盖玉杰，等. 大同—阳高震区及其邻区壳幔速度结构与深部构造[J]. 地震地质，1998(4)：104-111.
ZHANG Chengke，ZHANG Xiankang，GAI Yujie，et al. The crust mantle velocity structure and deep tectonics in the Datong—Yanggao seismic region and its adjacent area[J]. Seismology and Geology，1998(4)：104-111.

[24] 张成科，张先康，张建狮. 大同—阳高震区深部构造背景[J]. 华北地震科学，1999，17(1)：1-8.
ZHANG Chengke，ZHANG Xiankang，ZHANG Jianshi. Deep tectonic background in Datong—Yanggao earthquake arer[J]. North China earthquake Sciences，1999，17(1)：1-8.

[25] 李哲，郑勇. 山西裂谷带北部地壳速度结构双差成像及其发震构造分析[J]. 地震研究，2022，45(4)：509-516.

（下转第 1217 页）