

宁河地区地震探测结果与桐城断裂浅部 结构特征初探

尹海权,何庆龙,王生文,徐玉健,常明

中国地震局第一监测中心,天津,300180

内容提要:桐城断裂是一条对唐山地震有地壳形变反映的活动断裂,是沧县隆起与黄骅凹陷北部的分界线。本次研究在桐城断裂宁河跨断层场地采用浅层地震探测方法,布设了两条近南北向的浅层人工地震物探剖面,获得了两条反映不同深度的高质量叠加时间-深度剖面图,查明了目标断裂的结构特征。本次工作在研究区探测出7条断裂,发现桐城断裂是由多条主断裂和次级断裂组成的断裂带,但本次工作测线布设相对较短且探测深度有限,因此,通过总结相关部门专家和学者在研究区周边的地震探测成果,初步认为断裂带在浅部呈“花状”,并向下呈汇聚趋势。另外,结合前人学者对研究区及周边的钻孔和地层研究工作,通过钻孔地层对比,认为桐城断裂是一条中更新世活动断裂。根据断裂上断点的准确坐标位置以及桐城断裂产状特征,发现宁河跨断层监测场地有效的对F2、F3和F4三条断裂进行了监控,并根据前人对研究区应力应变研究结果,认为宁河跨断层监测场地的巨幅形变反映了F2和F3两条断裂的垂直运动特征。但其形变特征与唐山地震的关系是需要进一步探索的。

关键词:桐城断裂;断层形变;浅层地震探测;唐山地震

宁河跨断层监测场地(一种利用水准和基线等观测手段,直接对断裂两盘的相对运动进行观测的大地测量方法。薄万举,2010;徐东卓等,2017)位于天津市宁河区芦台农场,其目标断裂为走向近E—W向的桐城断裂。桐城断裂为隐伏断裂,现有资料认为宁河跨断层监测场地可能布设在桐城断裂拐弯部位附近(曹利德,1982)。桐城断裂位于宁河6.9级地震的极震区内,又处于唐山7.8级地震的震中区,此断裂是引起唐山大地震的四条主要断裂(沧东断裂、唐山断裂、宁河—张家口断裂、宁河—昌黎断裂)的交汇部位(魏顺民等,1977),且宁河跨断层场地水准数据对唐山大地震有明显的异常反应(曹利德,1982)。因此,可以看出桐城断裂在唐山地区为一条较为重要的断裂,且具备一定的地壳形变监测意义。

但有关桐城断裂的研究较少,关于断裂分布、断裂产状、断裂组合等特征目前还没有明确的文献资料。另外,宁河跨断层监测场地第四纪覆盖层较厚,可达数百米,地表无断裂出露的地形地貌特征,传统地质学方法难以识别,地质雷达、地球化学探测等手段难以找出断裂的精确信息。因此,本次工作进一

步利用浅层人工地震勘探手段来获取断裂信息,确定桐城断裂的产状及组合特征等,完善了跨断层场地形变监测基础资料,确保监测数据的物理意义相对明确,提高跨断层场地数据的观测质量,为地区强震中长期危险地点及震情的短临判定提供重要的监测信息。

1 地震地质概况

研究区在大地构造位置上位于华北地台中东部,隶属于冀中—冀东微陆块,是本区及华北陆块早前寒武纪变质基底的主要组成部分之一(河北省区域地质矿产调查研究所,2017),燕山至喜马拉雅构造旋回阶段位于冀渤断块拗陷中北部和燕山断块隆起南部(图1)。桐城断裂的走向从西到东由NE向急转成EW向,并与大坨断裂、南涧沽断裂和岭头断裂组成帚状压扭性构造(曹利德,1982)。在宁河地区,桐城断裂呈近东西走向,倾向南,为一高角度(60°~70°)正断裂(李志义等,1979),其走向与区域构造走向一致。从新生代沉积特征来看,桐城断裂的西北是沧县隆起,东南为黄骅凹陷,研究区位于两断块交汇部位,所以它也是位于新生代以来隆起与

注:本文为全国跨断层场地优化改造项目(编号:15230010)的成果。

收稿日期:2017-12-27;改回日期:2018-07-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.007

作者简介:尹海权,男,1990年生。博士,主要从事大地构造及地震科研等方面工作。Email:742946697@qq.com。

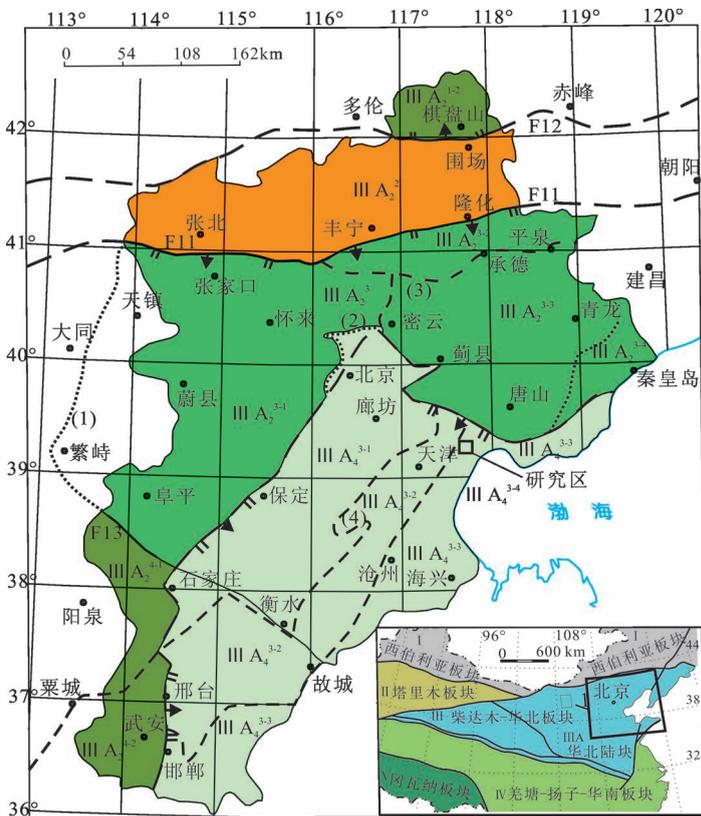


图1 宁河地区大地构造位置图
(据河北省区域地质矿产调查研究所, 2017)

Fig. 1 Schematic tectonic map showing location of Ninghe area (modified from Hebei Institute of Regional Geological and Mineral Resource Survey, 2017)

F11: 尚义—隆化区域断裂; F12: 康宝—围场区域断裂; F13: 岔头—新乐区域断裂; F20: 太行山—燕山山前区域断裂; (1)、(2): 三级单元界线; (3)、(4): 一四级单元界线

F11: Shangyi—Longhua regional fault; F12: Kangbao—Weichang regional fault; F13: Chatou—Xinle regional fault; F14: Taihang—Yanshan piedmont regional fault; (1)、(2): Tertiary tectonic unit boundary; (3)、(4): Four-level tectonic unit boundary

凹陷转折变化的地方。这个转折带形成了构造上的薄弱地区,为唐山断裂带向西南的继续破裂或延伸提供了有利条件(魏顺民等, 1977; 李志义等, 1979)。

根据重力资料,有一条近东西向和一条北东向的重力高值带在唐山—宁河地区交汇,并且宁河地区和唐山地区均位于重力高值的边缘部位。重力高值带反映了研究区可能存在有地壳或上地幔局部上隆的现象。近十几年华北地区的一些强震很多都发生在这种局部上隆的部位。因此,在深部构造背景方面,研究区也处于重力转换地带(李志义等, 1979)。

自1970年9月开展的宁河地区跨桐城断裂地

壳形变监测工作取得了很好的监测效果,相关数据显示宁河场地水准数据在唐山地震前有巨幅变化异常表现(图3),表现出较好的映震效能。

2 数据采集方法和测线位置

本次工作部署了2条地震测线,目的是探测桐城断裂在目标区域的分布、浅部特征以及宁河跨断层监测场地的有效性。为了了解工作区内地震地质条件、有效波和干扰波的发育情况,在工作正式开展前进行了试验,并通过实验数据采集,选择了最佳激发、接收条件和施工参数,确保了高标准、高质量完成地质任务。本次工作采用美国进口的大吨位可控震源进行激发,240道接收,道间距5m,叠加次数30次,CDP点距2.5m,炮点距20m,采样间隔1ms,记录长度1.5s。测线采用测绳布设检波点和炮点,检波点点距5m,炮点点距20m。数据后期处理使用Promax地震处理软件,完成地震时间叠加剖面图。

如图4所示,NH1测线位于村镇东约200m处,沿着农田道路布设,测线长度约1.9km。NH2测线紧邻村镇东,沿农田布设,测线长约1.4km。两条测线间距800m。

3 地震反射剖面特征

2017年12月4日,华北地质勘查局五一九大队组织施工队伍进入工区并进行了试验工作,获得试验物理点13个,确定工作参数后开始施工。截止2017年12月6日,野外数据采集工作结束,完成浅层地震测线2条,测线间距800m,测线总长度3.320km,获得线上物理点169个,详细工作结果如下。

3.1 NH1测线

该测线沿宁河区芦台农场二分厂东侧的南北向道路布设(图4),测线方向近南北,长度为1.945km。

图5为NH1测线的时间、深度剖面。从图5的时间剖面图中可以看出,该剖面反射震相丰富,反射能量较强,由于受断裂构造的作用,整条剖面上反射能量存在明显差异,在剖面的南部以及剖面北部的浅部(600ms以上)反射能量较强,反射震相较多,同相轴连续性较好;但在剖面北部的深部(600ms以下)反射能量明显变弱,同相轴连续性变差。根

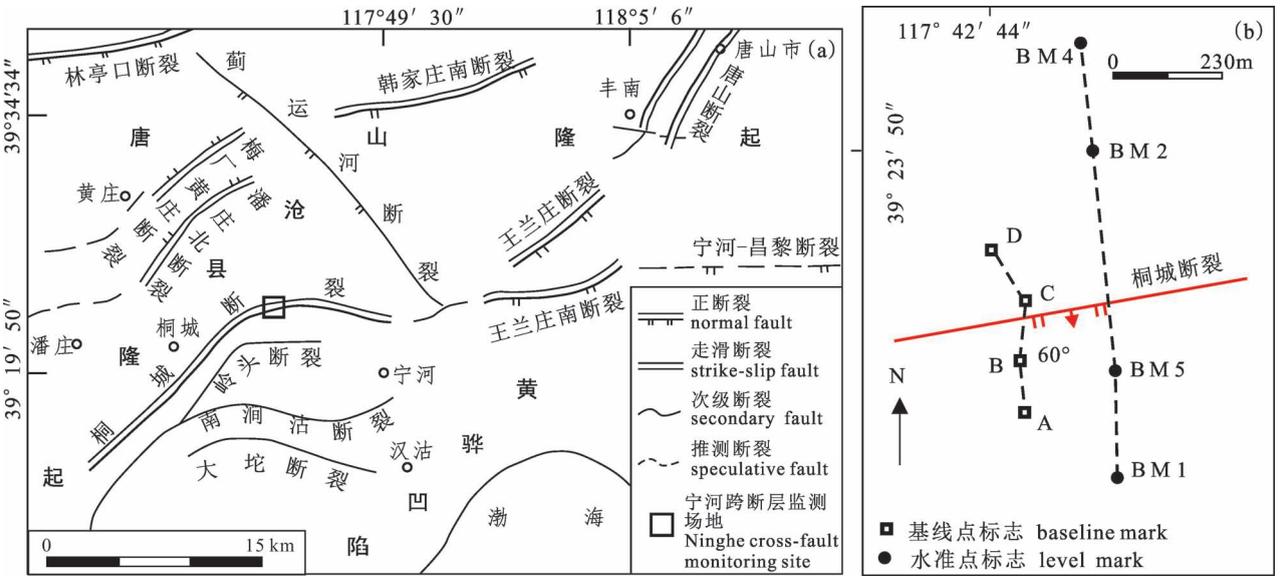


图2 宁河地区断层分布图(据曹利德,1982),图中方框内为宁河跨断层监测场地及测线位置

Fig. 2 Faults distribution map of Ninghe area (modified after Cao Lide, 1982), figure box for the Ninghe cross-fault monitoring site and the location of the reflected seismic profile

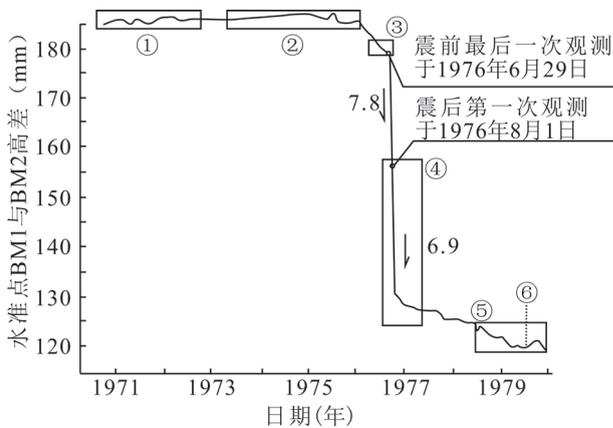


图3 宁河跨断层监测场地水准曲线图 (据曹利德,1982)

Fig. 3 The leveling curve of Ninghe cross-fault monitoring site (after Cao Lide, 1982&)

- ① 台站观测,一天一周期,最大幅值 2 mm;
- ② 流动观测 3~6月一周期,最大幅值 3 mm;
- ③ 震前向北倾,最大幅值 9 mm;异常监测 7天一周期;
- ④ 定点观测,一天一周期,继续北倾 29 mm;
- ⑤ 流动观测,15天一周期;
- ⑥ BM1点受重物影响,曲线上升 2 mm,重物搬走后,曲线下降

- ① Station observation, one day cycle, the maximum amplitude of 2 mm;
- ② Flow observation, 3~6 month cycle, the maximum amplitude of 3 mm;
- ③ Pre-earthquake dumping to the north, the maximum amplitude of 9 mm, anomaly monitoring 7 days a cycle;
- ④ Fixed point observation one day cycle, continue to northward dump 29 mm;
- ⑤ Flow observation, 15 days cycle;
- ⑥ The curve rises 2mm for S point affected by heavy objects, curve down after heavy objects move away

据该剖面纵向和横向的波组特征,从上到下可以识别出 10 组反射震相(T1~T10)。从这 10 组反射震相的横向展布特征和图 5 地震深度剖面图上的地层变化形态来看,该剖面地层基本呈水平展布,相对起伏变化不大,仅存在因断裂构造作用造成的地层错

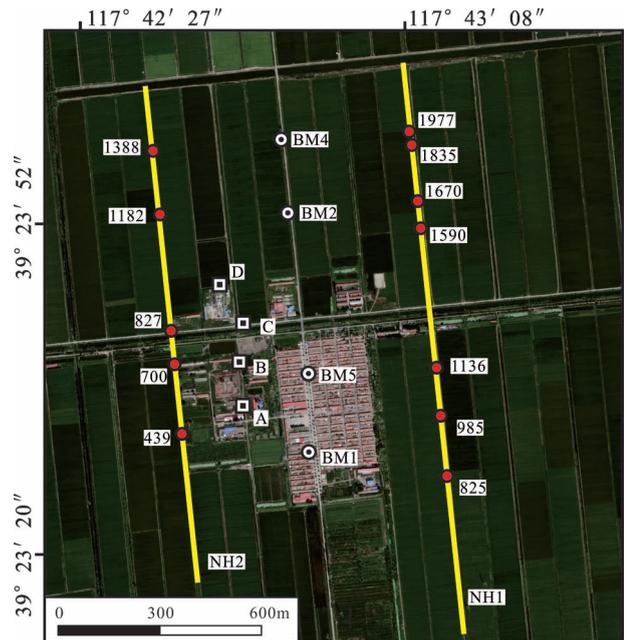


图4 测线位置、断裂上断点位置(图中红点,数字代表桩号)以及宁河跨断层监测场地布设图

Fig. 4 The location of the reflected seismic profile, fault breakpoint position (red dot in the figure, the number represents the pile number) and the Ninghe cross-fault monitoring site

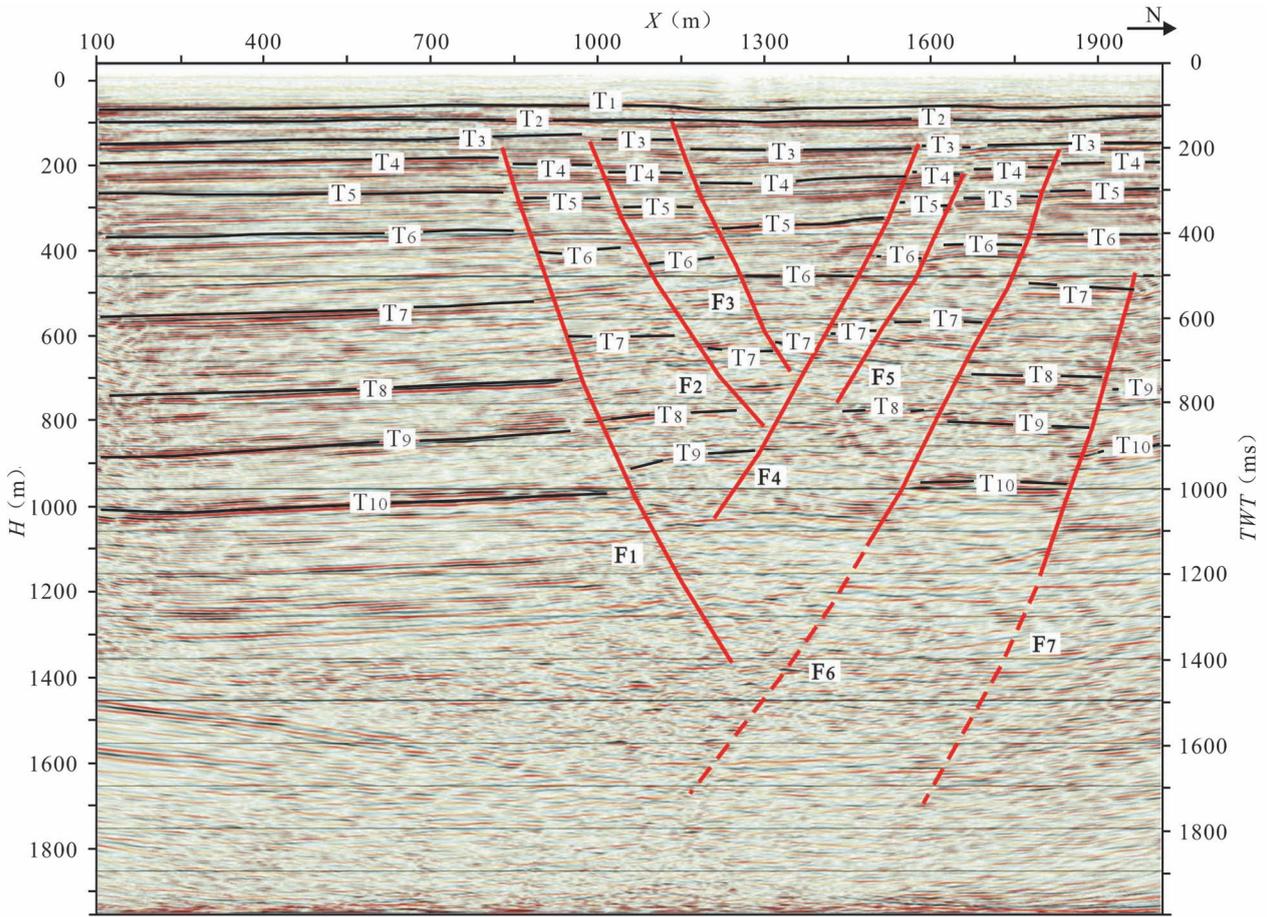


图 5 宁河地区桐城断裂 NH1 测线地震反射剖面

Fig. 5 High-resolution seismic reflection profile of the NH1 line of the Tongcheng Fault in Ninghe area

断和变形现象。从时间和深度剖面上各反射同相轴的横向连续性来看,分别在剖面桩号 825、985、1136、1590、1670、1835 和 1977 七处的 T2 及以下反射震相存在明显的错断现象,表明在这七处存在断层(F1~F7)。这 7 条断层为一组断层,其中 F1~F3 断层视倾向北,F4~F7 断层视倾向南,视倾角上陡下缓,为正断层。在这组断层中,倾向南的断层(F4~F7)为主断层,倾向北的断层(F1~F3)为次级断层,这些次级断层分别在不同深度都归并到主断层面上并继续向下延伸。这些断层错断的最浅地层分别为:F1、F6 向上错断 T4 地层,F2、F4 和 F5 向上错断 T3 地层,F3 向上错断 T2 地层,F7 由于测线较短,上断点没有反映出来,它的上断点应该位于 T7 以上。

3.2 NH2 测线

该测线沿宁河区芦台农场二分厂西侧的南北向道路布设(图 4),测线方向近南北,长度为 1.375 km。

图 6 为 NH2 测线的时间、深度剖面图。从图中可以看出,该剖面与图 5 相似,反射震相丰富,反射能量较强,也因受断裂构造的作用在整条剖面上反射能量存在明显差异,在剖面南部以及剖面北部的浅部(500 ms 以上)反射能量较强,反射震相较多,同相轴连续性较好,在剖面北部的深部(500 ms 以下)反射能量明显变弱,同相轴连续性变差。根据该剖面纵向和横向的波组特征,从上到下也可以识别出 10 组反射震相(T1~T10)。根据这 10 组反射震相的横向展布特征和地震深度剖面上的地层变化形态,该剖面地层基本呈水平展布,相对起伏变化不大,并且也存在因断裂构造作用造成的地层错断和变形现象。根据图 6 中的时间和深度剖面上各反射同相轴的横向连续性,与 NH1 剖面相同,该剖面也存在 7 个断点(F1~F7),其中 5 个断点(F1~F5)的上断点分别位于剖面桩号 493、700、827、1182 和 1308,2 个断点(F6~F7)的上断点可能位于剖面之

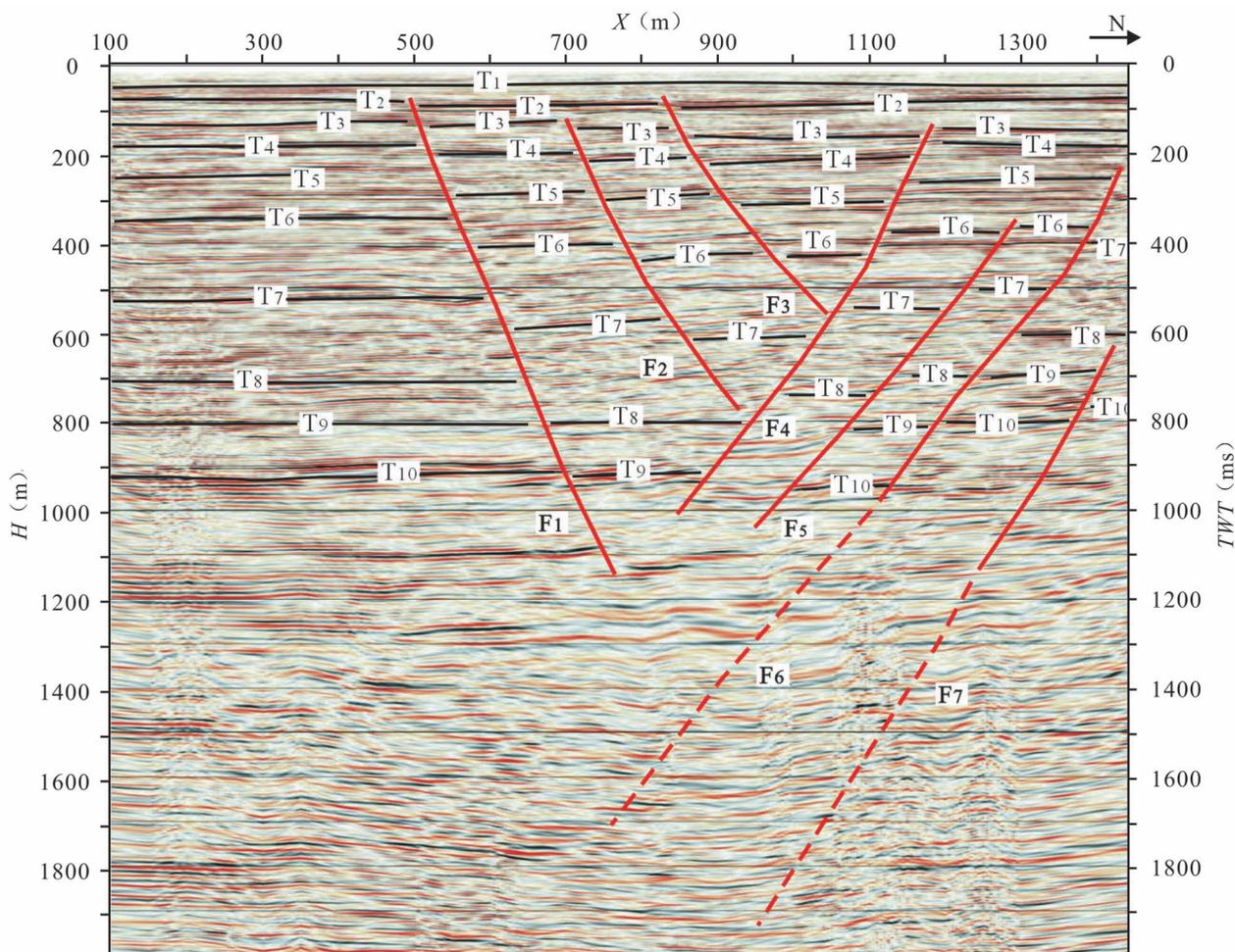


图6 宁河地区桐城断裂 NH2 测线地震反射剖面

Fig. 6 High-resolution seismic reflection profile of the NH2 line of the Tongcheng Fault in Ninghe area

外,它们分别错断了 T2 及以下反射震相。其中 F1~F3 断层视倾向北, F4~F7 断层视倾向南, 视倾角上陡下缓, 为正断层。这 7 条断层的形态和组合方式与图 5 相似, 也是一组断层, 其中倾向南的断层 (F4~F7) 为主断层, 倾向北的断层 (F1~F3) 为次级断层, 这些次级断层分别在不同深度都归并到主断层上并继续向下延伸。这些断层错断的最浅地层分别为: F1、F3 向上错断 T2 地层, F2、F4 向上错断 T3 地层, F5 向上错断 T6 地层, F6、F7 的上断点可能位于剖面之外, 因此无法确定其上断点位置。

3.3 桐城断裂浅部构造特征

本次浅层地震勘查工作采用地震反射方法在天津市宁河区共完成了浅层地震勘查测线 2 条, 总长度为 3.32 km, 获得了较好的原始记录和探测结果 (表 1), 查明了地下 50~2000 m 范围内的地层结构和断裂构造特征。

本次工作在每条剖面上确定了 10 个能在探测范围内连续追踪的反射地层 (T1~T10), 并解释断点 7 个 (F1~F7)。根据各剖面上断点的形态、组合关系以及各断点的位置, 这 7 条断层应该属于一个断裂带, 该断裂带的总体走向北西西, 其中倾向南南西的一组断裂应为主断裂, 倾向北北东的一组断裂应为次级断裂, 它们在深部可能归并到一起成为一条大断裂。由于在这 2 条剖面内断裂较多也较复杂, 因此在深度 700~1400 m 范围内在多条断裂的交汇部位存在明显的破碎带, 但在 400 m 以上的浅部则难以分辨出破碎带。在这 7 条断裂中, F4~F7 断裂形成的较早, F1~F3 断裂形成的相对较晚, 但这些断裂都经过了多期的活动才形成了现在的形态和组合关系。

本次探测工作在宁河跨桐城断裂布设了两条浅层地震勘查测线用以控制桐城断裂的位置及走向,

每条测线不足 2 km, 而桐城断裂是一条由多条断裂组成的规模较大的断裂, 不足 2 km 的测线难以控制整条断裂, 致使 F6 和 F7 都位于剖面的边界和界外, 而且在 F7 以北是否还存在断裂不得而知, 应进一步加强相关工作。

4 讨论

4.1 断裂活动性

石油部门(毛可等, 1989)、中国地震局地球物理勘探中心(赖晓玲等, 2006)以及其他学者在研究区周边开展了大量的地震探测工作, 包括唐山及黄骅凹陷等地区(吴涛和李志文, 1994; 郝书检等, 1998; 高战武等, 2000; 彭海艳, 2010; 闫成国等, 2014; 赵泽龙, 2016), 发现研究区所在的黄骅凹陷内发育了一系列的 NWW—NW 向、NNE—NE 向和近 EW 向的断裂。在近 EW 向断裂中, 规模比较大的有海河断裂、汉沽断裂、塘北断裂、长芦—歧北断裂等, 这些断裂在形态上均呈花状, 组成了黄骅凹陷内一系列的正断裂系统。而研究区内的桐城断裂是沧东断裂北段被燕山隆起截断并向东转折的部分, 根据勘探规模和断裂性质, 其可能为沧东断裂的分支断裂。而由于本次工作勘探剖面较短, 通过对黄骅凹陷内一系列断裂分析, 初步认为桐城断裂呈花状。

同时, 前人对研究区内进行大量的钻孔和地层研究工作(彭海艳, 2010; 郭慧等, 2011; 叶琳, 2013; 闫成国等, 2014)。陈宇坤等(2008)利用古地磁和光释光等测年手段, 以第四纪地质钻孔为基础, 辅

岩石地层和生物地层学方法, 建立了天津地区黄骅拗陷的第四纪年代地层剖面; 其研究表明, 天津地区黄骅拗陷全新统底界埋深约 19 m, 上更新统底界埋深约 45 m, 中更新统底界埋深约 103 m。闫国成等(2014)在对汉沽断裂进行活动性调查时, 利用地质钻孔和光释光等测年方法研究了汉沽断裂的活动性, 其中, 汉沽断裂大八亩坨剖面钻孔地层对比剖面显示全新统埋深约 15.35 m。而本次工作结果显示, 研究区各个次级断裂上断点埋深最浅为 70~80 m, 最深为 152~1162 m。因此, 桐城断裂可能并未错段全新世地层, 其错断的最新地层为中更新统, 故而认为桐城断裂为一条中更新世活动断裂, 在中更新世以来活动并不明显, 在唐山地震前出现的巨幅形变可能与唐山断裂活动有关。

4.2 地震监测意义

20 世纪 70 年代, 宁河跨断层场地仅有 S、N 以及 N' 三个水准点, 其中 S 点对应现在的 BM1 点, N 点对应 BM2 点(薄万举, 2010)。在唐山地震前, 宁河跨断层水准测量的巨幅形变发生在 N 点和 S 点之间, 对应现在 BM1 和 BM2 之间, 因此, 唐山地震前宁河跨断层水准场地所反应的形变是由 F2、F3 和 F4 三条断裂运动所产生的。根据宁河水准数据观测曲线, 以及断裂剖面结构特征, 发现在唐山地震前, 桐城断裂北盘相对下降, 南盘相对上升。但是, 目前并不知道 F2、F3 以及 F4 的运动关系, 如果本次形变以 F2 和 F3 活动为主, 那么本区域为拉张应力状态; 如果本次形变以 F4 活动为主, 那么本区域

表 1 宁河地区桐城断裂 NH1 和 NH2 测线断层参数

Table1 The fault parameters of NH1 and NH2 lines in Tongcheng fault, Ninghe area

测线名称	断层编号	对应反射层位	断点位置 (桩号)	可分辨的上断点 埋深(m)	上断点断距 (m)	视倾角	视倾向	断层性质	可靠性	
NH1	F1	T4	825	175~185	10~20	71°~76°	N	正断层	可靠	
	F2	T3	985	122~132	8~15	68°~72°	N	正断层	可靠	
	F3	T2	1136	90~100	5~10	70°~72°	N	正断层	可靠	
	F4	T3	1590	152~1162	3~7	67°~70°	S	正断层	可靠	
	F5	T3	1670	148~158	2~5	67°~70°	S	正断层	较可靠	
	F6	T4	1835	186~196	10~20	66°~70°	S	正断层	可靠	
	F7	T7	1977	440~460	30~50	73°~77°	S	正断层	较可靠	
NH2	F1	T2	493	70~80	5~10	72°~75°	N	正断层	可靠	
	F2	T3	700	115~125	15~25	67°~72°	N	正断层	较可靠	
	F3	T2	827	90~100	5~10	60°~70°	N	正断层	可靠	
	F4	T3	1182	132~142	15~25	65°~70°	S	正断层	可靠	
	F5	T6	1388	345~365	10~20	59°~62°	S	正断层	较可靠	
	F6						63°~66°	S	正断层	可靠
	F7						67°~69°	S	正断层	可靠

为挤压应力状态。

万永革等(2008)对唐山—宁河地区进行了库伦破裂应力变化分析,通过对比认为跨断层监测场地处于库伦应力负值相对较高的地区,总体处于一个应力拉伸的应力状态,这种拉伸状态伴随着唐山断裂右旋应力累计的作用持续进行(蔡永恩等,1999;张之立等,1980;黄立人,1981;黄立人等,1988;尤惠川等,2002;刘启元等,2007;刘桂萍等,2010;武艳强等,2016)。因此,认为宁河场地形变所反映的是F2和F3的垂直运动特征。

另外,值得指出的是,宁河跨断层形变监测场地仅在唐山地震时映震效能好,在后续的1976滦县 M_s 7.1余震及宁河 M_s 6.9余震均无监测作用,因此,是否可以认为桐城断裂不在滦县地震和宁河地震的断裂体系中,从而不能反映出形变异常?如果对发生大地震的地区的断裂体系有一个清晰的了解,有详细的大震区断层及其运动特征资料,是否有助于了解断裂体系与地震之间的关系?后续应该加强相关问题的研究。

5 结论

(1)桐城断裂是一条由主断裂和次级断裂组成的断裂带,在剖面上大致呈花状,断裂倾角整体较陡,地表浅层的多条断裂存在随深度汇聚的趋势。

(2)根据桐城断裂上断点和宁河跨断层监测场地的分布,发现宁河跨断层监测场地准确的跨越了桐城断裂,其巨幅形变反映了F2和F3的垂直运动。

(3)根据钻孔和地层资料对比,认为桐城断裂为一条中更新世活动断裂。

致谢:感谢两名匿名审稿专家提出的宝贵修改意见,另外成文过程、制图等过程中编辑老师也提供了不少的帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献 / References

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

薄万举. 2010. 形变异常与干扰关系的再认识. 大地测量与地球动力学, 30(1): 1~8.

蔡永恩, 何涛, 王仁. 1999. 1976年唐山地震震源动力过程的数值模拟. 地震学报, 21(5): 467~477.

曹利德. 1982. 跨断层位移测量与地震预报. 地震研究, 5(4): 428~441.

河北省区域地质矿产调查研究所. 2017. 中国区域地质志: 河北志. 北京: 地质出版社: 1~1272.

陈宇坤, 李振海, 邵永新, 王志胜, 高武平, 杨绪连. 2008. 天津地区第四纪年代地层剖面研究. 地震地质, 30(2): 383~399.

陈运泰, 林邦慧, 王新华, 黄立人, 刘妙龙. 1979. 用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式. 地球物理学报, 22(3): 201~217.

杜晨晓, 谢富仁, 张扬, 史保平. 2010. 1976年 M_s 7.8唐山地震断层动态破裂及近断层强地面运动特征. 地球物理学报, 53(2): 290~304.

高战武, 徐杰, 宋长青, 孙建宝. 2000. 华北沧东断裂的构造特征. 地震地质, 22(4): 395~404.

郭慧, 江娃利, 谢新生. 2011. 钻孔与探槽揭示1976年河北唐山 M_s 7.8地震发震构造晚第四纪强震活动. 中国科学: 地球科学, 41(7): 1009~1028.

骞顺民, 李志义, 程绍平, 陈献程, 陈孝德, 杨主恩, 李如成. 1977. 唐山地震区域构造背景和发震模式的讨论. 地质科学, 12(4): 305~321.

郝书检, 李建华, 于之水, 储宝贵. 1998. 唐山地震发震构造的浅层地震探测. 中国地震, 14(4): 78~84.

黄立人. 1981. 用广义逆法分析唐山地震的水平位移场及其与经典方法的比较. 地壳形变与地震, 1(3): 1~11.

黄立人, 王学忠, 刘天奎. 1988. 唐山地震前后的水平形变. 地震学报, 10(4): 375~384.

赖晓玲, 孙译, 刘志. 2006. 华北强震区地震测深研究. 大地测量与地球动力学, 26(1): 55~62.

李志义, 骞顺民. 1979. 从地震构造看宁河6.9级余震与唐山主震的关系. 地震地质, 1(4): 27~35.

刘桂萍, 傅征祥. 2000. 1976年7月28日唐山7.8级地震触发的区域地震活动和静应力场变化. 地震学报, 22(1): 17~26.

刘启元, 王峻, 陈九辉, 李顺成, 郭飏. 2007. 1976年唐山大地震的孕震环境: 密集地震台阵观测得到的结果. 地学前缘, 14(6): 205~213.

毛可, 冯德益, 敖雪明, 郭瑞芝. 1989. 石油地震勘探资料在地震研究中的应用——唐山地震前后震源附近浅层波速异常的初步探讨. 地震, 1: 32~38.

彭海艳. 2010. 黄骅拗陷孔南地区孔店组盆地结构与盆地演化研究. 导师: 刘家铎. 成都: 成都理工大学, 博士论文: 1~125.

万永革, 沈正康, 刁桂苓, 王福昌, 胡新亮, 盛书中. 2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用. 地球物理学报, 51(3): 793~804.

王俊国, 姚兰予, 卞真付, 李文栋, 吴晓芝, 何巧云, 庞群英. 2004. 2003年宁河地震序列特征的分析. 地震, 24(2): 103~108.

吴涛, 李志文. 1994. 关于沧东断裂性质的分析. 石油学报, 15(3): 19~25.

武艳强, 黄立人, 陈长云, 朱爽, 金涛, 刘辛中. 2016. 1976年唐山 M_s 7.8地震同震及现今形变特征. 地震学报, 38(4): 609~617.

徐东卓, 焦守涛, 朱传宝, 孙非非, 管见, 尹海权. 2017. 芦山 M_s 7.0地震前龙门山断裂带西南段区域形变特征分析及发震模型探讨. 地质学报, 91(10): 2175~2184.

闫成国, 王志胜, 陈宇坤, 任峰, 高武平. 2014. 天津汉沽断裂准确位置及活动性的综合探测研究. 中国地震, 30(4): 501~513.

叶琳. 2013. 黄骅拗陷孔南地区新生代构造—地层格架与演化过程分析. 导师: 任建业. 武汉: 中国地质大学, 博士论文: 1~128.

尤惠川, 徐锡伟, 吴建平, 何正勤. 2002. 唐山地震深浅构造关系研究. 地震地质, 24(4): 571~582.

张之立, 李钦祖, 谷继成, 靳雅敏, 杨懋源, 刘万琴. 1980. 唐山地震的破裂过程及其力学分析. 地震学报, 2(2): 111~129.

赵泽龙. 2016. 天津近海海域隐伏断层地球物理探测资料处理与解释. 导师: 李山有. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 硕士论文: 1~58.

Bo Wanju. 2010. Study on relation between crust deformation anomaly

- and disturbances. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(1): 1~8.
- Cai Yongen, He Tao, Wang Ren. 1999. Numerical simulation of epicenter dynamic process of Tangshan earthquake in 1976. *Acta Seismologica Sinica*, 21(5): 467~477.
- Cao Lide. 1982. Measurement of Cross-fault Displacement and the Earthquake Prediction. *Journal of Seismological Research*, 5(4): 428~441.
- Chen Yukun, Li Zhenhai, Shao Yongxin, Wang Zhisheng, Gao Wuping, Yang Xulian. 2008. Study on the Quaternary chronostratigraphic section in Tianjin area. *Seismology and Geology*, 30(2): 383~399.
- Chen Yuntai, Lin Banghui, Wang Xinhua, Huang Liren, Liu Miaolong. 1979. A dislocation model of the Tangshan earthquake of 1976 from the inversion of geodetic data. *Acta Geophysica Sinica*, 22(3): 201~217.
- Du Chenxiao, Xie Furen, Zhang Yang, Shi Baoping. 2010. 3D modeling of dynamic fault rupture and strong ground motion of the 1976 M_s 7.8 Tangshan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(2): 290~304.
- Gao Zhanwu, Xu Jie, Song Changqing, Sun Jianbao. 2000. Structural characters of the Cangdong fault in north China. *Seismology and Geology*, 22(4): 395~404.
- Guo Hui, Jiang Wali, Xie Xinsheng. 2011. Late-Quaternary strong earthquakes on the seismogenic fault of the 1976 M_s 7.8 Tangshan earthquake, Hebei, as revealed by drilling and trenching. *China Earth Sci.*, 2011, doi: 10.1007/s11430-011-4218-x.
- Guo Shunmin, Li Zhiyi, Cheng Shaoping, Chen Xiancheng, Chen Xiaode, Yang Zhuen, Li Rucheng. 1977. Discussion on the regional structural background and the seismogenic model of the Tangshan earthquake. *Scientia Geologica Sinica*, 12(4): 305~321.
- Hao Shujian, Li Jianhua, Yu Zhishui, Chu Baogui. 1998. Shallow seismic exploration of the seismogenic structures of Tangshan earthquake. *Earthquake Research in China*, 14(4): 78~84.
- Huang Liren. 1981. The horizontal displacement field of Tangshan earthquake and its comparison with the classical method by using the generalized inverse method. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1(3): 1~11.
- Huang Liren, Wang Xuezhong, Liu Tiankui. 1988. Horizontal deformation before and after the Tangshan earthquake of 1976. *Acta Seismologica Sinica*, 10(4): 375~384.
- Lai Xiaoling, Sun Yi, Liu Zhi. 2006. Study of deep seismic sounding in strongly seismic regions of North China. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 26(1): 55~62.
- Li Zhiyi, Guo Shunmin. 1979. On the relationship between the Ninghe 6.9 aftershock and the Tangshan earthquake from the viewpoint of seismotectonics. *Seismology and Geology*, 1(4): 27~35.
- Liu Guiping, Fu Zhengxiang. 2000. Regional seismicity triggered by the M_s = 7.8 Tangshan event on July 28, 1976 and the static stress field change. *Acta Seismologica Sinica*, 13(1): 19~28.
- Liu Qiyuan, Wang Jun, Chen Jiuhui, Li Shuncheng, Guo Biao. 2007. Seismogenic tectonic environment of 1976 great Tangshan earthquake: Results given by dense seismic array observations. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 205~213.
- Mao Ke, Feng Deyi, Ao Xueming, Guo Ruizhi. 1989. The application of Seismic prospecting data from petroleum industry to earthquake research—a preliminary discussion on the wavevelocity anomaly in the shallow vicinity of the source region before and after the Tangshan Earthquake. *Earthquake*, 1: 32~38.
- Peng Haiyan. 2010. The Research of Basin Structure and Evolution of Basin of Kongdian Formation of Kongnan Area in Huanghua Depression. Tutor: Liu Jiaduo. Chengdu: Chengdu University of Technology, Doctor's Degree Thesis: 1~125.
- Wan Yongge, Shen Zhengkang, Diao Guiling, Wang Fuchang, Hu Xinliang, Sheng Shuzhong. 2008. An algorithm of fault parameter determination using distribution of small earthquakes and parameters of regional stress field and its application to Tangshan earthquake sequence. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(3): 793~804.
- Wang Junguo, Yao Lanyu, Bian Zhenfu, Li Wendong, Wu Xiaozhi, He Qiaoyun, Pang Qunying. 2004. Analysis on the characteristics of Ninghe earthquake sequence occurred in 2003. *Earthquake*, 24(2): 103~108.
- Wu Tao and Li Zhiwen. 1994. An analysis of property of Cangdong Fault. *Acta Petrolei Sinica*, 15(3): 19~25.
- Wu Yanqiang, Huang Liren, Chen Changyun, Zhu Shuang, Jin Tao, Liu Xinxin. 2016. Coseismic and contemporary deformation features of the M_s 7.8 Tangshan earthquake in 1976. *Acta Seismologica Sinica*, 38(4): 609~617.
- Xu Dongzhuo, Jiao Shoutao, Zhu Chuanbao, Sun Feifei, Guan Jian, Yin Haiquan. 2017. Regional deformation characteristics in the southwest segment of Longmen Mountain fault zone before Lushan M_s 7.0 Earthquake and possibly induced earthquake model. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2175~2184.
- Yan Guocheng, Wang Zhisheng, Chen Yukun, Ren Feng, Gao Wuping. 2014. Comprehensive survey and investigation on the exact spatial location and activity of the Hangu fault in Tianjin. *Earthquake Research in China*, 30(4): 501~513.
- Ye Lin. 2013. Cenozoic Structure-stratigraphic Framework and Evolution in the Kongnan Area, Huanghua Depression. Tutor: Ren Jianye. Wuhan: China University of Geosciences, Doctor's Degree Thesis: 1~128.
- You Huichuan, Xu Xiwei, Wu Jianping, He Zhengqin. 2002. Study on the Relationship between shallow and deep structures in the Tangshan earthquake area. *Seismology and Geology*, 24(4): 571~582.
- Zhang Zhili, Li Qinzuo, Gu Jicheng, Jin Yamin, Yang Miaoyuan, Liu Wanqin. 1980. The fracture processes of the Tangshan earthquake and its mechanical analysis. *Acta Seismologica Sinica*, 2(2): 111~129.
- Zhao Zeilong. 2016. Detection of buried active faults in offshore sea of Tianjin. Tutor: Li Shanyou. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Master's Degree Thesis: 1~58.

Seismic Survey Result of Ninghe Area and Characteristics of Tongcheng Fault in Shallow Lateral Structure

YIN Haiquan, HE Qinglong, WANG Shengwen, XU Yujian, CHANG Ming

First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin, 300180

Objectives: Tongcheng fault is located between the Jixian uplift and the Huanghua depression. Before the Tangshan $M_s7.8$ earthquake in 1976, the strong crustal deformation of the Tongcheng fault has been observed. We use shallow seismic exploration methods to identify structural features of the Tongcheng fault. It is believed that the large deformation of the Ninghe cross-fault monitoring site reflects the vertical motion characteristics of the F2 and F3.

Methods: In this study, shallow seismic exploration methods are used in the study area, and two shallow artificial seismic geophysical profiles near the north—south direction are laid. We obtain two high-quality superposition time and depth profiles and the structural characteristics of the target fault are identified.

Results: According to the stratigraphic characteristics of the study area and the structural characteristics of the Tongcheng fault, the fault is considered to be a mid-Pleistocene active fault. It is preliminarily believed that the fault zone is “flower-like” in the shallow part and tends to converge downward.

Conclusions: The Tongcheng fault is an active fault that reflects the crustal deformation of the Tangshan earthquake and is the dividing line between the Cangxian uplift and the northern part of the Huanghua depression. In this study, two shallow artificial geophysical prospecting sections are arranged at the cross-fault site of Ninghe according to the shallow seismic exploration methods. And the structural characteristics of the target fracture are identified on the basis of two high-quality superposition time and depth profiles which are reflecting different depths of the Tongcheng fault. In this work, seven faults are detected in the study area. It is found that the Tongcheng fault is a fault zone composed of multiple primary faults and secondary faults. However, the work line is relatively short and the detection depth is limited. Therefore, by summarizing the results of seismic exploration around the study area by experts and scholars from relevant departments, it is preliminarily believed that the fault zone is “flower-like” in the shallow part and tends to converge downward. In addition, combined with previous scholars’ research on borehole and stratum in the study area and surrounding areas, through the comparison of borehole strata, Tongcheng fault is considered to be a mid-Pleistocene active fault. According to the exact coordinates of the breakpoint on the fault and characteristics of the Tongcheng fault, it is found that F2, F3 and F4 are effectively monitored in the cross-fault monitoring sites in Ninghe. According to previous studies on the stress in the study area, the large deformation in Ninghe Field reflects the vertical movement characteristics of two faults F2 and F3. However, the relationship between its deformation characteristics and the Tangshan earthquake needs further exploration.

Keywords: Tongcheng Fault; Fault deformation; High-resolution seismic reflection profiling; Tangshan earthquake

Acknowledgements: This study is the result of national cross-fault site optimization and reconstruction project. The authors would like to thank the two referees and editors for the valuable suggestions and comments that greatly improved the manuscript

First author: YIN Haiquan, male, born in 1990. PHD, mainly engaged in tectonics and earthquake research. Email: 742946697@qq.com

Manuscript received on: 2017-12-27; Accepted on: 2018-07-20; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.007