



论文

钻孔与探槽揭示 1976 年河北唐山 $M_s7.8$ 地震发震构造晚第四纪强震活动

郭慧, 江娃利*, 谢新生

中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

* 联系人, E-mail: walijianghdc@vip.sina.com

收稿日期: 2010-11-09; 接受日期: 2011-02-14

中央级公益性科研院所基本科研业务专项中国地震局地壳应力研究所(编号: ZDJ2007-1)资助

摘要 钻孔联合剖面探测匹配探槽开挖是获取平原区隐伏活动断裂多次活动地质依据的有效途径. 本项研究跨唐山市 1976 年唐山地震地表破裂带实施了 3 条钻孔联合剖面探测及 1 个大探槽开挖, 取得以下 3 点主要认识: (1) 1976 年唐山 $M_s7.8$ 地震的地表破裂带长度大于 47 km, 自唐山市市区南部向南过丰南县稻地镇孙家楼西侧至丰南县西河. (2) 该地震地表破裂带的几何展布分为南支和北支. 北支以右旋走滑为主, 地表垂直位移为西升东降; 南支地表垂直位移表现为东升西降, 兼具右旋走滑. 这种断层活动方式无法用单一的正断层或逆断层的活动给予解释, 而与断裂带右旋走滑活动产生的垂直位移场吻合. 研究获得的钻孔和探槽资料证实晚第四纪时期唐山断裂存在这种持续的活动方式. (3) 探槽揭示的断面和钻孔揭示的地层断错现象表明, 晚第四纪时期唐山断裂带曾发生多次断层活动事件. 在 1976 年唐山地震之前 3 次断层活动的时间分别为距今 7.61~8.13, >14.57 和 24.21~26.57 ka, 连同 1976 年唐山地震在内这 4 次强震的时间间隔约为 6.7~10.8 ka. 在 3 条钻孔测线中, 牛马库钻孔测线距今 75.18 ka 以来 9 次事件断层活动的平均间隔为 8.4 ka. 同时文中根据地层测年结果讨论了唐山市南北侧晚第四纪沉积环境的差异.

关键词唐山地震
地表破裂带
多期活动
活动间隔
探槽
钻孔测线

1976 年中国华北平原北部唐山 $M_s7.8$ 地震造成当地 24.2 万人死亡. 该次地震是中国东部近 300 年来发生的最大地震. 在 1957 年公布的第一张全国地震烈度区划图上^[1], 唐山地区位于Ⅷ度区边界. 但在冀东地区的抗震设防中, 未来被关注的地点放在历史记载中曾发生过 2 次 $M6\frac{1}{4}$ 地震的滦县地域. 在历史记载中唐山市曾发生的最大地震为 1935 年的 $M4\frac{1}{4}$. 1976 年发生的唐山 $M_s7.8$ 地震造成唐山市众多没有抗震设防的建筑物遭受到Ⅺ度地震烈度的摧毁. 唐

山市地处燕山南麓. 在第三纪时期该地区处于隆起. 在这种构造背景的地区发生接近 8 级的强震, 致使该次地震的发震构造倍受国内外学者的关注.

对唐山地震发震构造的研究大体可分为两个阶段. 第一阶段是在唐山地震之后, 根据现场考察和唐山地震前后的观测资料涌现出多种讨论. 这些对发震构造讨论的认识主要归为以下几点: (1) 多方学者根据现场调查指出, 地震时在唐山市南部出现一条走向 NE30°、长 8~11 km、最大右旋走滑 1.5~2.3 m、

垂直位移 0.2~0.7 m 的地表破裂带^[2-5]。(2) 多位学者运用唐山地震地表形变和地震活动资料反演该次地震发震构造^[6-12], 认为该次地震震源破裂方向 $NE30^\circ\sim49^\circ$, 破裂面倾角 $76^\circ\sim90^\circ$, 破裂长度 84~140 km, 最大右旋走滑位移 1.36~4.59 m, 垂直位移 0.5~0.7 m。(3) 在深部构造探测方面, 人工地震测深显示唐山附近莫霍面和上地幔存在结构异常^[13], 造成壳内介质界面东侧约 2.5 km 落差^[14,15]; 地震反射剖面显示唐山下部 18~22 km 存在断坡之上的扩展背斜及陡立断层^[16]; 瞬变磁场探测显示唐山市南侧地面以下 2 和 6~8 km 分别存在 200 与 800 m 断错^[17]。(4) 一些学者对唐山古地震现象、唐山地区第四纪断裂活动和发震构造展开讨论^[18-21]。王挺梅和李建平^[18]根据探槽中的液化现象及地层 ^{14}C 测年和沉积速率, 推定唐山地区曾发生过 2 次古强震, 其时间分别距今 7 和 14 ka。唐山地震研究第二阶段起始于 20 世纪 90 年代后期。随着唐山市城市建设的开展, 浅层人工地震探测揭示出更多唐山断裂信息, 获知唐山断裂断错更新统一全新统多个层位, 断裂北段为逆断层, 断裂南段为正断层, 地表以下 175~193 m 地层断错 18 m, 地表以下 20 m 地层断错 2.4 m^[22-24]。在此期间, 有学者依据唐山地震出现的地表形变提出更大范围内唐山发震断裂的存在^[25], 以及相关问题的讨论^[26]。迄今为止, 尽管唐山地震已过去 35 年, 鉴于其发震构造的复杂性及隐蔽性, 目前对其发震构造的认识仍主要来自唐山地震的地表破裂调查和深浅层人工地震探测资料。当前仍缺少有关唐山地震发震构造晚第四纪活动有说服力的地质依据。

基于上述, 为了推进对唐山地震发震构造的剖析, 本项研究在野外调查的基础上, 对唐山地震的地表破裂带实施了 3 个地点的钻孔联合剖面探测和一个地点的探槽开挖。

1 地质构造背景及唐山地震地表破裂带展布

1.1 地质构造背景

唐山地处燕山南缘与华北平原接壤之处, 地形特点北高南低。展布于唐山市北侧的长山-巍山是燕山南缘的低山, 构成唐山市南部冲洪积平原北界。唐山市内分布的大城山和凤凰山等基岩残山是北面长

山-巍山向西南延伸的余脉。在水系格局方面, 发源于燕山南缘的 NNE 流向的陡河自北向南从唐山市穿过, 向南汇入渤海湾(图 1)。

唐山的地质构造背景隶属于燕山褶皱带开滦凹褶束。该区的基岩构造是燕山期形成的 NE 向开平复式向斜, 该向斜核部由古生界组成。上古生代时期该区得天独厚地发育了滨海平原型含煤建造, 形成开平煤田。与华北平原内隐伏的众多中生代晚期至新生代早期的断陷不同, 唐山市在中生代及新生代早期是隆起区, 区内缺失中生代和新生代古近系与新近系沉积。区内几十米至上百米厚的第四系直接覆盖在上古生界之上。唐山市位于开平复式向斜的西翼, 发育有多条平行展布、由西向东逆冲的 NNE 向断裂。在唐山市周边展布的区域大断裂是其南侧控制沧州隆起和黄骅拗陷边界的 NNE 向沧东断裂带。

1.2 唐山地震地表破裂带展布

1976 年唐山 $M_s7.8$ 地震之后, 多方学者对唐山市南部出现的地表破裂带展开了调查。从发表的调查结果可见, 虢顺民等^[2]、杨理华^[4]和杜春涛等^[5]对地表破裂带展布的认识大体相同。即该地表破裂带北端起至唐山市胜利路, 以多级左阶雁行的方式向南延至安机寨附近, 长约 8~11 km, 以右旋走滑为主, 最大右旋走滑位移 1.5~2.3 m, 多数地段的垂直位移 0.2~0.7 m。在王景明等^[3]的调查结果中, 其地表主破裂带与上述唐山市胜利路-安机寨的地表破裂展布完全一致。但王景明等^[3]认为该地表破裂带可断续延伸 90 km, 其东西两侧有垂直位移几厘米的次级地表破裂带分布。

本项研究对 1976 年唐山地震的地表破裂进行了调查。原唐山十中和唐柏路牛马库 2 个地点在唐山地震时形成的地表破裂已作为地震遗址保留(图 2(a), (b))。至今还可见到唐山市吉祥路、女织寨乡礼尚庄稻地镇孙家楼西北、以及丰南县西河村的地表破裂遗迹(图 2(c))。在此需要特别提及以下 2 点。一是前人资料^[3,5]和本项调查均表明唐山市胜利路-安机寨的地表破裂带在礼尚庄以南分为东支和西支。其东支从礼尚庄向南过 205 国道之后从孙家楼西北通过, 地表破裂的垂直位移是东升西降; 西支从安机寨以北向南延伸, 垂直位移是西升东降。在这 2 条分支断裂中, 东支地表破裂 NW 侧出现 0.7~0.8 m 下降, 并出现 0.9 m 右旋位移^[3]; 而西支地表破裂右旋位移为 0.7 m^[3],

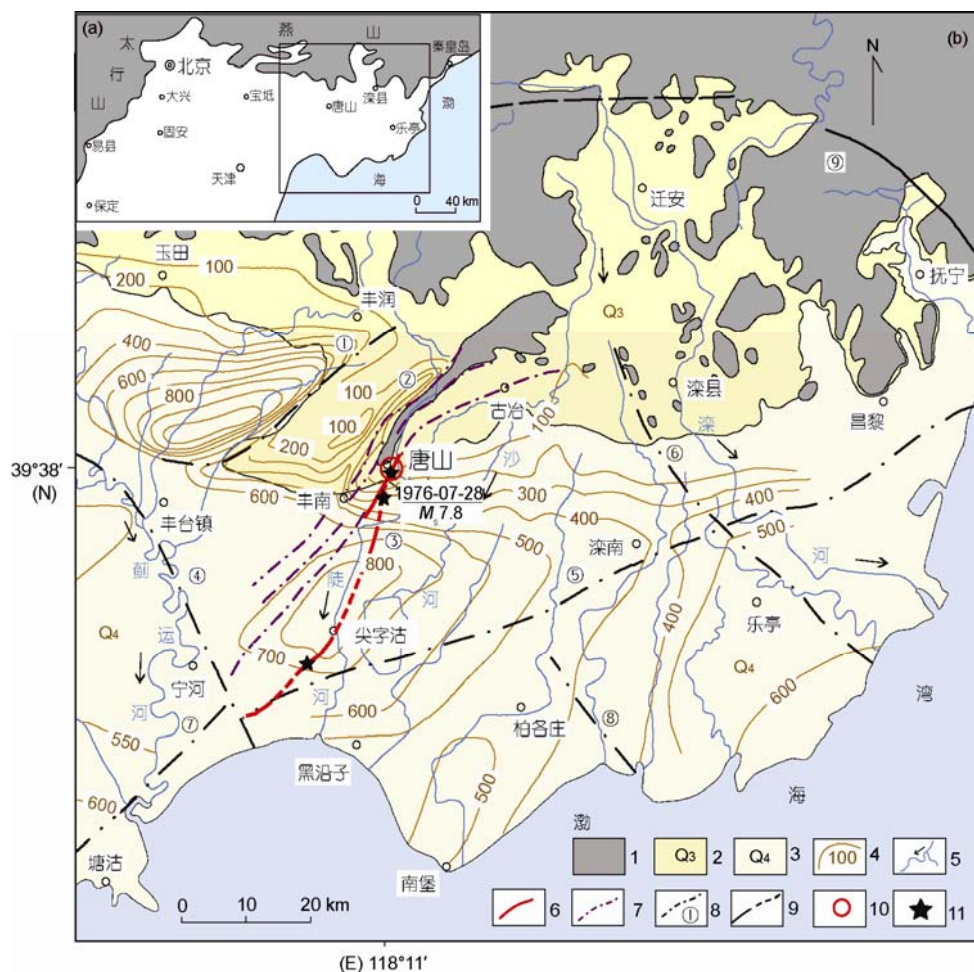


图 1 唐山地区第四系分布及断裂展布

引自刘国栋等^[27], 断层展布略加修改. (a) 研究地点的区域位置; (b) 唐山地区第四系分布和断裂展布. 1, 基岩; 2, 上更新统沉积物; 3, 全新统沉积物; 4, 第四系等值线(单位: m); 5, 河流及流向; 6, 唐山断裂带 1976 年 $M_s7.8$ 地震地表破裂带; 7, 唐山断裂带; 8, 隐伏断裂及断层编号; 9, 地表断裂及推测断裂; 10, 1976 年唐山 $M_s7.8$ 地震震中; 11, 本项研究实施的钻孔联合探测剖面; ① 野鸡坨断裂; ② 唐山断裂带; ③ 1976 年唐山 $M_s7.8$ 地震地表破裂带; ④ 蓟运河断裂; ⑤ 宁河-昌黎断裂带; ⑥ 滦县-乐亭断裂带; ⑦ 塘沽断裂带; ⑧ 柏各庄断裂带; ⑨ 迁安北断裂

SE 侧下降约 0.15 m. 二是本项研究将前人提及唐山地震时出现的西河、付庄地表破裂与孙家楼、西礼尚地表破裂连为一条^[3,5,28], 其共同的地面位移特征均是东升西降, 其展布细节有可能是斜列方式, 像礼尚庄至孙家楼一带的左阶展布. 由此可知, 1976 年唐山地表破裂带长度大于 47 km, 其几何特征主要由北支和南支组成. 北支展布在唐山市复兴路西侧, 穿过十中、牛马库, 断续延至安机寨北侧, 长约 11 km, 以右旋走滑为主, 兼有西升东降垂直位移; 南支展布在西礼尚庄、孙家楼、西河、付庄一线, 长约 41 km, 以

东升西降为主, 兼有右旋走滑. 这 2 条地表破裂在孙家楼-礼尚庄一带左阶平行展布, 重叠区长度约 5 km, 相距约 1 km. 该地表破裂带的重叠区也是 1976 年唐山地震地表破裂带垂直位移的枢纽点. 该次地震的微震中邻近该点展布. 表 1 是该地表破裂带的部分点位分布.

本项研究实施的 3 条钻孔联合剖面探测分别在唐山地震地表破裂带的北支唐山市康柏路牛马库、南支稻地镇孙家楼及丰南县西河村布设, 探槽地点在孙家楼布设(图 3).



图 2 唐山地震遗址及钻孔探测岩芯-1

(a) 原唐山十中地震遗址, 地表破裂带将小路右旋扭错, W 侧抬升, 镜向 E; (b) 唐山市康柏路牛马库地震遗址, 地表破裂带将树行扭错, W 侧抬升, 镜向 N; (c) 唐山市礼尚庄南地震地表陡坎, 镜向 NE; (d) 牛马库钻孔测线 DZK1-7 孔岩芯景观, 地层颜色以黄色和黄灰为主, 地层岩性中亚砂和亚黏与粉细砂的比例为 1:1; (e) 牛马库钻孔测线 DZK1-10 孔 17.4~19.2 m 岩芯, 亚黏土中含碳点, 其右侧为粉细砂; (f) 牛马库钻孔测线 DZK1-8 孔 33.4~33.9 m 的棕色黏土出现平直断面, 倾角 75° , 断面上有一层薄砂

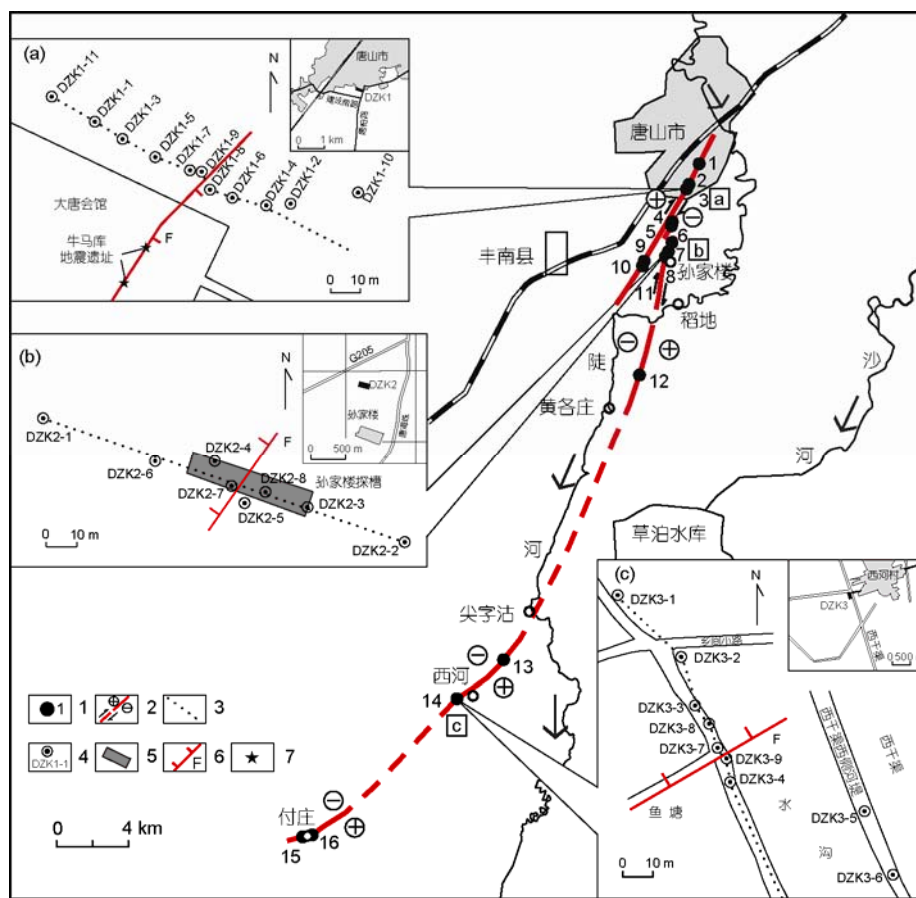


图3 1976年唐山地震地表破裂带展布、钻孔测线和探槽分布平面位置

(a) 牛马库测线钻孔分布; (b) 孙家楼测线钻孔与探槽分布; (c) 西河测线钻孔分布。1, 1976年唐山地震地表破裂点, 编号与表1相同; 2, 断层活动方式, 加号代表上升盘, 减号代表下降盘; 3, 钻孔测线; 4, 钻孔编号; 5, 孙家楼探槽; 6, 钻孔或探槽确认的断裂; 7, 1976年唐山地震遗址

2 钻孔联合剖面探测

2.1 研究方法简介

近年日趋重视在平原区活断层探测中运用钻孔联合剖面探测隐伏断裂活动^[29~34]。钻孔探测是地质调查常用的方法。由于活断层调查的研究对象为松散沉积, 要求钻孔联合剖面中钻孔之间的孔距要小, 以及钻孔的岩芯取芯率要高。以下简介一些活断层钻孔研究中的重要理念。

在地层剖面上, 依据地层恢复断层活动的基本原理是地层形态及新老地层关系的堆积学及层序学^[35]。以往在描述盆地正断层活动特征时, 将沉积环境中一边断错一边沉积的断裂称之为同沉积断裂^[36]。本项研究中断层下降盘的地层出现增厚以及断距随深度加大的现象与同沉积断层的特征相同。在活断

层研究中, 在关注地层断错的同时, 还要关注不同深度地层位移量的差异, 以便帮助判断多期断层活动事件的存在, 并依据不同地层的年代推断断层活动的时间。

在活断层研究中, 经常提及的断层活动“事件”, 是指根据断错地层和地形对断层活动的形迹可以从时代上进行分离和区别得到的断层活动。在地层剖面上, 对事件期次的分辨能力受到可分辨变位基准数目的制约。指示单个事件的变位基准称为“事件标志层”。“事件标志层”是指有别于后来事件影响的单次事件断错的最新层位。在一个包含断层多期活动的地层剖面上, 层位的垂直位移量在空间上由上向下、在时间上由新至老呈现跳跃式增加。即在断层不活动的平静期间沉积的地层与其后断层活动时断错的最新地层的断距是相同的, 而与断层早期活动断

表 1 1976 年唐山地震地表破裂带野外调查点位^{a)}

序号	地点	经纬度	地表变形现象	备注
1	十中旧址	39°36.418'N, 118°11.846'E	小路右旋 1.2 m, SE 侧下降 0.5 m	唐山市地震遗址
2	吉祥路	39°35.791'N, 118°11.453'E	树行右旋扭错 1.25 m	现今仍可看到
a	牛马库北	39°35.664'N, 118°11.364'E	钻孔出现空洞, 地层存在断错	本项钻孔测线断层通过之处
3	牛马库	39°35.653'N, 118°11.360'E	树木右旋 1.2 m, 垂直位移 0.3 m	唐山市地震遗址
4	西礼尚庄	39°34.649'N, 118°10.801'E	地表陡坎 NE40°, NW 侧下降 1 m	虢顺民等 ^[2] 提及东升西降现象, 现今仍可看到
5	西礼尚庄南	39°34.532'N, 118°10.776'E	地表破裂 NE40°, NW 侧下降 2.0 m	现今仍可看到
6	205 国道	39°34.034'N, 118°10.777'E	地表陡坎 NE20°, 当时 NW 下降 0.5 m	当地老乡指认, 现今已看不到
7	孙家楼	39°33.736'N, 118°10.638'E	地表变形 NE40°~50°, NW 下降 0.8 m	王景明等 ^[3] 提及地表破裂现象, 现今可见缓坡地形
b	孙家楼探槽	39°33.758'N, 118°10.657'E	断层产状 NE40°/NW $\angle$ 69°	本项孙家楼探槽及钻孔测线断层通过之处
8	孙家楼西	39°33.594'N, 118°10.533'E	震时有北东向陡坎, 玉米地现有缓坡	孙家楼村长杨贺成指认
9	玉丰钢铁厂	39°33.460'N, 118°09.722'E	猪圈右旋扭错 15 cm, SE 下降 15 cm	现今已看不到
10	安机寨村北	39°33.322'N, 118°09.638'E	裂缝 SE 侧下降 20 cm, 现今已看不到	虢顺民等 ^[2] 、杨理华 ^[4] 、杜春涛等 ^[5] 和王景明等 ^[3] , 当地老乡指认
11	安机寨北街	39°33.315'N, 118°09.649'E	土路 NE30°右旋 70 cm,	现今仍可辨认
12	黄各庄镇郝庄子	39°30.010'N, 118°09.540'E	地震时喷砂、裂缝, 隆起	当地老乡指认
13	丰南县西河一村	39°21.355'N, 118°04.288'E	地面陡坎, SE 侧抬升 1.7 m	
14	丰南县西河三村	39°20.187'N, 118°02.487'E	NE65°延伸, SE 侧抬升大于 1 m	王景明等 ^[3] 、邱泽华等 ^[25] 、吴忱 ^[28] , 现今仍可见地表遗迹, 本项钻孔测线断层通过之处
c	丰南县西河三村	39°20.187'N, 118°02.487'E	钻孔证实断面存在	
15	付庄村委会	39°16.063'N, 117°56.901'E	地面隆起和沉降分界	杜春涛等 ^[5] 、王景明等 ^[3] 、邱泽华等 ^[25] , 当地老乡指认
16	付庄村东	39°15.999'N, 117°56.534'E	北侧沉降 2.5 m	

a) 序号中的 a、b 和 c 表示本项研究钻孔实施地点, b 同时为探槽实施地点

错的地层位移量不同^[35]。依据对事件层位由新至老垂直位移的剥离和相同位移量断错的最新地层及盖层的时间, 得到剖面上断层活动的期次及推定的活动年代。简言之, 在地层剖面上倾滑断层的活动期次约等于地层累积变位量与断层活动事件单位变位量的比值。

2.2 测线概况

本项研究在唐山市南的康柏路牛马库、孙家楼西北及丰南县境内实施的 3 条钻孔测线之间分别相距 4 和 27.5 km。这 3 条钻孔测线共实施钻孔 28 个, 总进尺 1217 m。钻孔取芯孔径 97~110 mm, 单次取芯长度 2.0 m。这些地层的取芯率, 粉砂、亚砂土及黏土类达到 90% 以上, 细砂、中砂约 60%~80%, 粗砂及砾石不足 40%。

牛马库钻孔测线布设在牛马库地震遗址北侧(图 3(a))。测线方向 NW65°, 101 m 距离内实施了 11 个钻

孔, 孔深 25.4~35.4 m 不等, 最大孔距 17 m, 最小孔距 4.0 m, 总进尺 333 m。孙家楼钻孔测线在开挖孙家楼探槽之前实施。该测线方向 NW55°, 124 m 距离内实施了 8 个钻孔, 孔深 30.0~61.5 m 不等, 最大孔距 39 m, 最小孔距 6.0 m, 总进尺 436 m。其中钻孔编号 DZK2-4、7、5、8 孔位于探槽所在地(图 3(b))。西河钻孔测线位于西河村西侧(图 3(c)), 测线方向 NW15°, 128 m 距离内实施了 9 个钻孔, 孔深 31.0~61.4 m 不等, 最大孔距 32 m, 最小孔距 5.0 m, 总进尺 448 m。上述 3 条测线均跨 1976 年唐山地震地表破裂带布设。

2.3 地层分层与测年

2.3.1 牛马库钻孔测线

该测线揭示的地层分为粗细相间的 5 大套、13

层, 各个钻孔之间的地层可大体对比(图 4)。地表向下 0.9~1.4 m 为耕植土及回填土。其下, 第 I 套地层以亚砂土为主, 底部出现亚黏土, 包含层②、层③, 厚约 4~8 m。第 II 套地层为粉细砂或中细砂, 厚约 5~6 m, 由层④组成。第 III 套地层为亚黏土、黏土夹粉砂, 厚约 5~7 m, 由层⑤、⑥和⑦组成。第 IV 套地层以粉细砂为主, 测线 NW 段夹有亚砂土, 测线 SE 段亚砂土增多。该套地层厚约 7~9.5 m, 包含层⑧和⑨。第 V 套地层由亚黏、黏土、亚砂、粉砂地层组成, 只在测线 NW 段出露, 厚度约 5~9 m。该套地层包含层⑩~⑬。在该测线中, 亚黏土、亚砂土与粉细砂、中粗砂的厚度比例约为 1:1(图 2(d))。该测线实测 15 个地层年代样品。

牛马库钻孔测线地层分层如下:

层① 地表耕植土;

层② 亚砂土, 局部钻孔含亚黏土; 2 个热释光(TL)样品的测年结果分别距今(46.76±3.97)和(49.79±4.23) ka;

层③ 亚黏土及黏土, 多个钻孔见灰褐色黏土团块混杂现象; 2 个 TL 样品测年结果分别距今(41.43±3.53)和(54.49±4.63) ka;

层④ 中细砂, 个别钻孔为粉细砂及中粗砂, 夹薄层亚砂土、亚黏土; 1 个 TL 样品测年结果距今(52.40±4.15) ka;

层⑤ 亚砂土, 个别钻孔为亚砂土、亚黏土及粉细砂; 2 个 TL 样品测年结果分别距今(49.50±4.21)和(57.60±4.89) ka;

层⑥ 中细砂, 粉细砂;

层⑦ 黏土及亚黏土(图 2(e));

层⑧ 粉细砂及中细砂; 2 个 TL 样品测年结果分别距今(59.64±5.07)和(67.90±5.77) ka;

层⑨ 上部为亚砂土, 下部粉细砂; 2 个 TL 样品测年结果分别距今(75.18±6.30)和(74.75±6.35) ka;

层⑩ 黏土及亚黏土; 1 个 TL 样品测年结果距今(75.95±6.46) ka;

层⑪ 粉细砂, 个别钻孔为亚砂土含黏土; 1 个 TL 样品测年结果距今(103.60±8.81) ka;

层⑫ 黏土及亚黏土, 夹亚砂土及粉砂; 1 个 TL 样品测年结果距今(114.99±9.77) ka;

层⑬ 亚砂土, 部分钻孔为亚黏土; 1 个 TL 样品测年结果距今(110.17±9.36) ka。

该测线地层测年结果列入表 2。

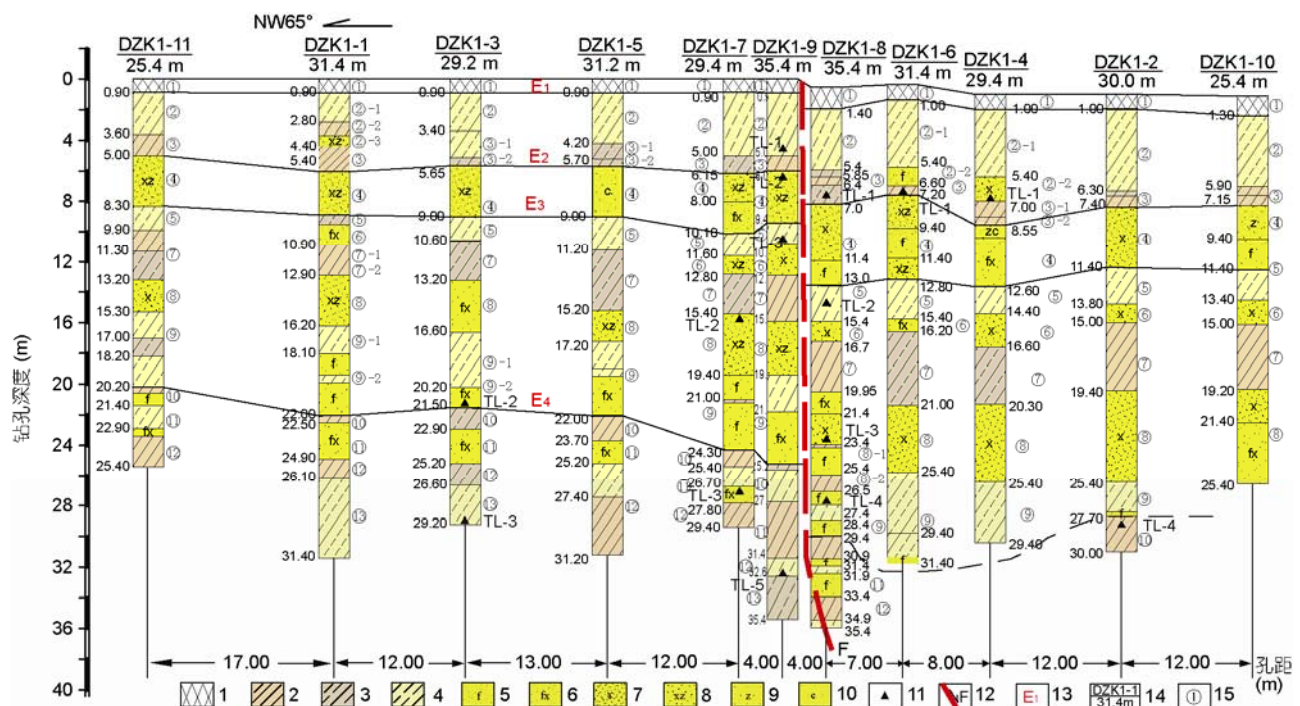


图 4 牛马库钻孔联合探测剖面

1, 地表人工扰动土; 2, 黏土; 3, 亚黏土; 4, 亚砂土; 5, 粉砂; 6, 粉细砂; 7, 细砂; 8, 中细砂; 9, 中砂; 10, 粗砂; 11, TL 取样点; 12, 断裂带; 13, 地震事件分期; 14, 钻孔编号及终孔深度; 15, 地层编号

表 2 唐山 3 个地点钻孔及探槽样品测年结果^{a)}

序号	钻孔或探槽编号	样品编号	深度(m)	层位编号	岩性	测年结果(ka BP)
牛马库测线						
1	Dzk1-4	TL-1	6.8	层②	黄色亚砂土	49.79±4.23
2	Dzk1-9	TL-1	4.4	层②	褐红色亚砂土	46.76±3.97
3	Dzk1-8	TL-1	6.9	层③	黄褐色亚粘土	41.43±3.53
4	Dzk1-6	TL-1	6.8	层③	灰褐色混杂粘土	54.49±4.63
5	Dzk1-9	TL-2	6.3	层④	黄色亚砂土	52.40±4.15
6	Dzk1-9	TL-3	10.5	层⑤	黄色亚砂土	49.50±4.21
7	Dzk1-8	TL-2	14.2	层⑤	黄色亚粘土	57.60±4.89
8	Dzk1-7	TL-2	15.6	层⑧	黄灰色斑状亚砂	59.64±5.07
9	Dzk1-8	TL-3	23.0	层⑧	黄色细砂	67.90±5.77
10	Dzk1-8	TL-4	27.0	层⑨	黄色粉砂	74.75±6.35
11	Dzk1-3	TL-2	21.5	层⑨	黄灰色亚砂土	75.18±6.30
12	Dzk1-2	TL-4	28.2	层⑩	黄褐色粘土	75.95±6.46
13	Dzk1-7	TL-3	26.8	层⑪	灰黄色粉细砂	103.60±8.81
14	Dzk1-9	TL-5	32.6	层⑬	灰黄色亚砂土	114.99±9.77
15	Dzk1-3	TL-3	29.1	层⑬	褐灰色粉细砂	110.17±9.36
孙家楼测线						
16	Dzk2-1	TL-3	11.3	层③	黄灰色粉细砂	55.59±4.72
17	Dzk2-4	TL-2	10.5	层③	灰色粉砂	41.62±3.54
18	Dzk2-7	TL-1	13.8	层⑥	黄色亚砂土	63.25±5.38
19	Dzk2-6	TL-2	15.1	层⑥	灰黄色亚砂土	59.05±5.02
20	Dzk2-7	TL-3	29.0	层⑩	黄褐色粉砂	92.22±7.84
21	Dzk2-4	TL-4	31.3	层⑩	黄灰色粉细砂	79.96±6.79
22	Dzk2-6	TL-5	41.2	层⑬	黄灰色粉细砂	79.58±6.67
23	Dzk2-4	TL-5	38.8	层⑬	黄灰色粉细砂	109.47±9.30
24	Dzk2-7	TL-4	40.9	层⑬	黄色亚砂土	103.97±8.84
25	Dzk2-5	TL-5	44.2	层⑬	粉砂夹亚砂土	132.94±11.30
26	Dzk2-4	TL-6	50.8	层⑮	灰色粉细砂	114.92±9.77
27	Dzk2-4	TL-7	57.9	层⑮	黄灰色中细砂	126.64±10.76
28	Dzk2-7	TL-5	56.5	层⑮	黄色中细砂	117.22±9.96
西河测线						
29	Dzk3-6	TL-1	5.1	层③	灰黑色亚砂土	6.12±0.52
30	Dzk3-8	TL-1	5.2	层③	灰黑色亚砂土	8.13±0.69
31	Dzk3-1	^{14}C -1	5.25	层③	灰黑色亚砂土	11.625±0.13
32	Dzk3-2	B^{14}C -1-AMS-O	7.0	层③	灰黑色粉砂	8.07±0.04
33	Dzk3-2	B^{14}C -1-AMS-P	7.0	层③	灰黑色粉砂	6.54±0.04
34	Dzk3-4	^{14}C -1	12.5	层④	灰黑色黏土	11.92±0.12
35	Dzk3-8	TL-2	17.0	层⑤	灰色亚砂土	13.51±1.15
36	Dzk3-4	TL-2	18.7	层⑤	灰色亚黏土	14.57±1.24
37	Dzk3-6	TL-3	22.9	层⑥	黄色亚砂土	23.88±2.03
38	Dzk3-8	TL-3	27.2	层⑥	黄色亚砂土	24.21±2.06
39	Dzk3-3	TL-1	33.0	层⑦	褐黄色黏土	26.57±2.26
40	Dzk3-2	^{14}C -3	33.0	层⑦	灰黑色黏土	28.11±0.535
41	Dzk3-4	TL-4	35.8	层⑧	黄灰色粉细砂	47.58±4.04
42	Dzk3-5	TL-2	37.0	层⑧	黄色细砂	48.83±4.15
43	孙家楼探槽	TL-6	0.65	层②	黄色亚黏土含微小钙核	7.61±0.65
44	孙家楼探槽	^{14}C -2	2.15	层③	灰褐色黏土	5.734-6.215
45	孙家楼探槽	TL-8	2.4	层③	灰黄色亚黏土	17.62±1.50
46	孙家楼探槽	ESR	2.1	层④	灰白色钙核	25±2
47	孙家楼探槽	TL-9	3.1	层④	黄色亚黏土	27.57±2.34
48	孙家楼探槽	TL-3	3.0	层④	黄色亚黏土含大量钙核	31.45±2.67
49	孙家楼探槽	B^{14}C -1-AMS-O	2.9	层⑤	灰色夹桔黄色亚砂土	12.56±0.05
50	孙家楼探槽	TL-2	3.5	层⑥	黄褐色亚砂土	33.53±2.85
51	孙家楼探槽	TL-1	4.5	层⑦	浅黄色细砂	34.91±2.97

a) 表中 ^{14}C 样品和 ESR 样品测年由 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成; TL 样品由中国地震局地壳应力研究所地质年代实验室完成; B^{14}C -1-AMS 由美国 BETA ^{14}C 实验室完成, 其中 B^{14}C -1-AMS-O 为 AMS 有机质沉积测年, B^{14}C -1-AMS-P 为 AMS 植物材料测年

2.3.2 孙家楼钻孔测线

该测线揭示的地层分为粗细相间的 4 大套、20 层, 各个钻孔之间的地层大体可对比(图 5). 在地表以下 4~5 m 以上为第 I 套地层, 以亚黏亚砂为主, 包含层①和②. 第 II 套地层为粉细砂含中粗砂, 厚约 14 m, 由层③~⑦组成, 其中层⑥为亚砂土. 第 III 套地层为亚黏、亚砂与粉细砂互层, 以亚黏为主, 厚约 20 m, 由层⑧~⑩组成. 第 IV 套地层是该钻孔测线中颗粒最粗的地层, 以中细砂及粗砂含砾为主, 由层⑪~⑮组成, 厚约 25 m, 其中层⑬, ⑯和⑮为薄层亚黏土、亚砂土. 该测线亚黏、亚砂与粉细砂、中粗砂的厚度比例约为 1:2(图 6(a)). 该测线实测 13 个 TL 测年样品.

孙家楼钻孔测线地层分层如下:

层① 地表耕植土;

层② 亚砂亚黏, 含钙核;

层③ 细砂夹粉砂, 2 个 TL 样品测年结果分别距

今(41.62±3.54), (55.59±4.72) ka;

层④ 薄层亚黏土、亚砂土, 多数钻孔可见该层;

层⑤ 中粗砂及细砂;

层⑥ 亚砂土; 2 个 TL 样品测年结果分别距今(59.05±5.02), (63.25±5.38) ka;

层⑦ 粉细砂, 局部中砂;

层⑧ 亚黏土, 局部为黏土、亚砂土;

层⑨ 粉细砂, 局部中砂;

层⑩ 黏土、亚黏土;

层⑪ 粉细砂, 局部亚砂土; 2 个 TL 样品测年结果分别距今(79.96±6.79)和(92.22±7.84) ka; 与上下层位对比, 后者的测年结果偏老;

层⑫ 黏土, 局部亚砂土;

层⑬ 粉细砂, 局部中粗砂; 2 个 TL 样品测年结果分别距今(109.47±9.30)和(79.58±6.67) ka; 与上下层位对比, 前者的测年结果偏老;

层⑭ 卵石层, 大者直径 5 cm, 磨圆好, 夹亚砂土(图 6(b)); 1 个 TL 样品测年结果距今(103.97±8.84)

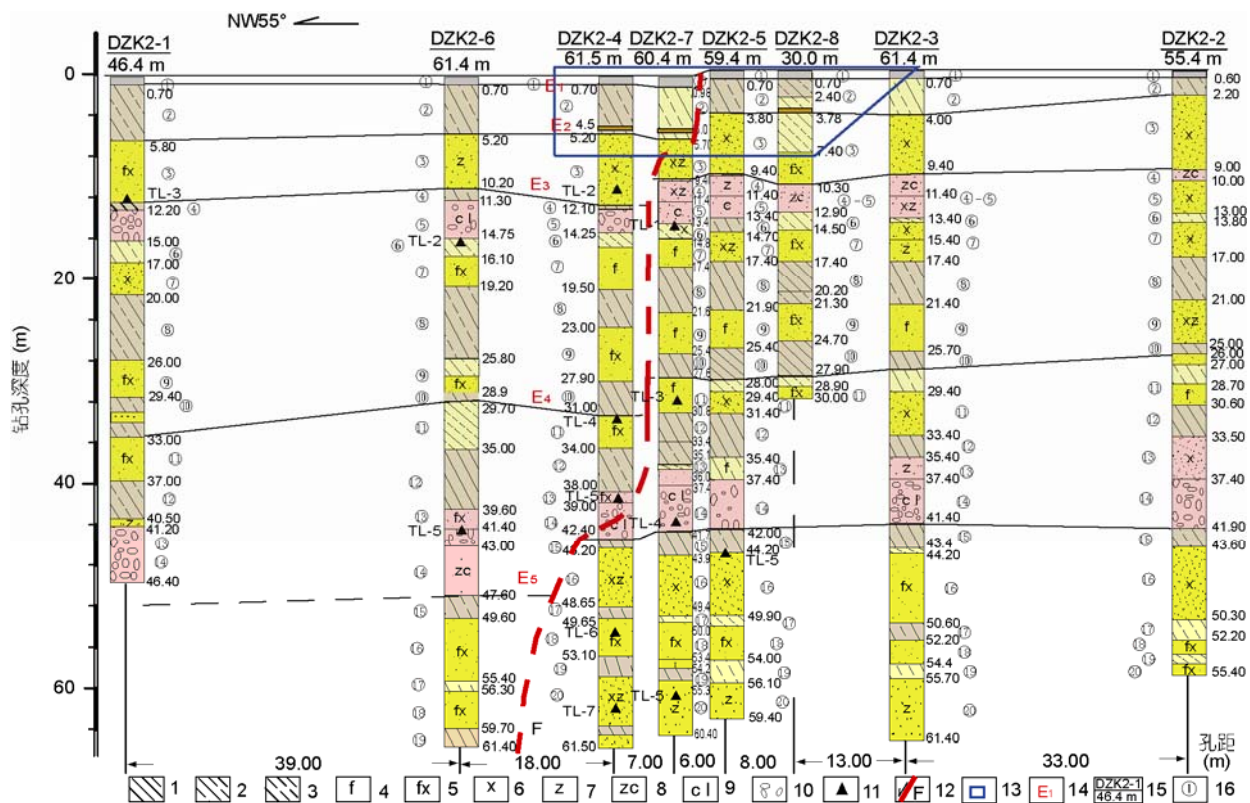


图 5 孙家楼钻孔联合探测剖面

1, 黏土; 2, 亚黏土; 3, 亚砂土; 4, 粉砂; 5, 粉细砂; 6, 细砂; 7, 中砂; 8, 中粗砂; 9, 粗砂砾石; 10, 砾石层; 11, TL 取样点; 12, 断裂带; 13, 探槽位置; 14, 地震事件分期; 15, 钻孔编号及终孔深度; 16, 地层编号



图 6 唐山地震后航空照片及钻孔探测岩芯-2

(a) 孙家楼钻孔测线 DZK2-7 孔岩芯景观, 地层颜色以黄土色和黄灰为主, 地层岩性中亚砂亚黏与粉细砂的比例为 1:2; (b) 孙家楼钻孔测线 DZK2-7 孔 35.4~39.0 m 岩芯, 图中中部箭头所指为亚砂土与细砂之间地层界限, 上部箭头所指细砂含砾中的砾石, 磨圆好, 砾石成分多样; (c) 孙家楼钻孔测线 DZK2-5 孔 53.4~59.4 m 岩芯; (d) 1976 年唐山地震之后拍摄的丰南县西河村 1:1 万航空照片, 图中箭头所指为西河村西形成的地表陡坎, 加号一侧为上升盘, 减号一侧为下降盘; (e) 西河钻孔测线 DZK3-5 孔岩芯景观, 地层颜色为灰黑色与黄色相间, 地层岩性中亚砂亚黏与粉细砂的比例为 1:1; (f) 西河钻孔测线 DZK3-5 孔 27.4~29.4 m 褐黄色亚砂土中含大量生物碎屑

ka;

层⑤ 黏土, 局部亚黏亚砂; 1 个 TL 样品测年结果距今(132.94 ± 11.30) ka; 与下面层位测年结果对比, 该测年结果偏老;

层⑥ 粉细砂, 局部中细砂;

层⑦ 亚砂土, 局部黏土;

层⑧ 粉细砂; 1 个 TL 样品测年结果距今(114.92 ± 9.77) ka;

层⑨ 亚砂土含淤泥层;

层⑩ 粉细砂、中细砂(图 6(c)); 2 个 TL 样品测年结果分别距今(126.64 ± 10.76)和(117.22 ± 9.96) ka.

2.3.3 西河钻孔测线

西河钻孔侧线跨唐山地震形成的地表陡坎布设(图 6(d)). 该测线揭示的地层分为 4 大套、11 层, 各

个钻孔之间的地层大体可对比(图 7). 与前 2 个钻孔剖面不同, 该钻孔测线存在多层灰色淤泥质地层. 这种灰色淤泥质地层反映了炭质丰富的静水沉积环境. 在该剖面的地层对比标志中考虑了地层颜色. 这 4 套地层的颜色是灰黄与灰色相间. 在地表以下 5~6 m 为第 I 套地层, 以褐色黏土为主, 个别孔为灰褐色, 由层①和②组成. 第 II 套地层是灰黑色黏土、亚黏土, 含灰黑色粉细砂及亚砂, 由层③~⑤组成, 厚 14~18 m. 第 III 套地层为黄色粉砂、黄灰色黏土、亚砂土, 由层⑥~⑧组成, 地层厚约 20~28 m. 第 IV 套地层以灰色粉细砂为主, 含亚砂、亚黏及黏土, 由层⑨~⑩组成, 厚度约为 10~16 m. 该剖面灰色地层与黄色地层的厚度比例及亚砂、亚黏等细粒地层与粉细砂的厚度比例均约为 1:1(图 6(e)). 该测线实测 14 个地层测年样品.

西河钻孔测线地层分层如下:

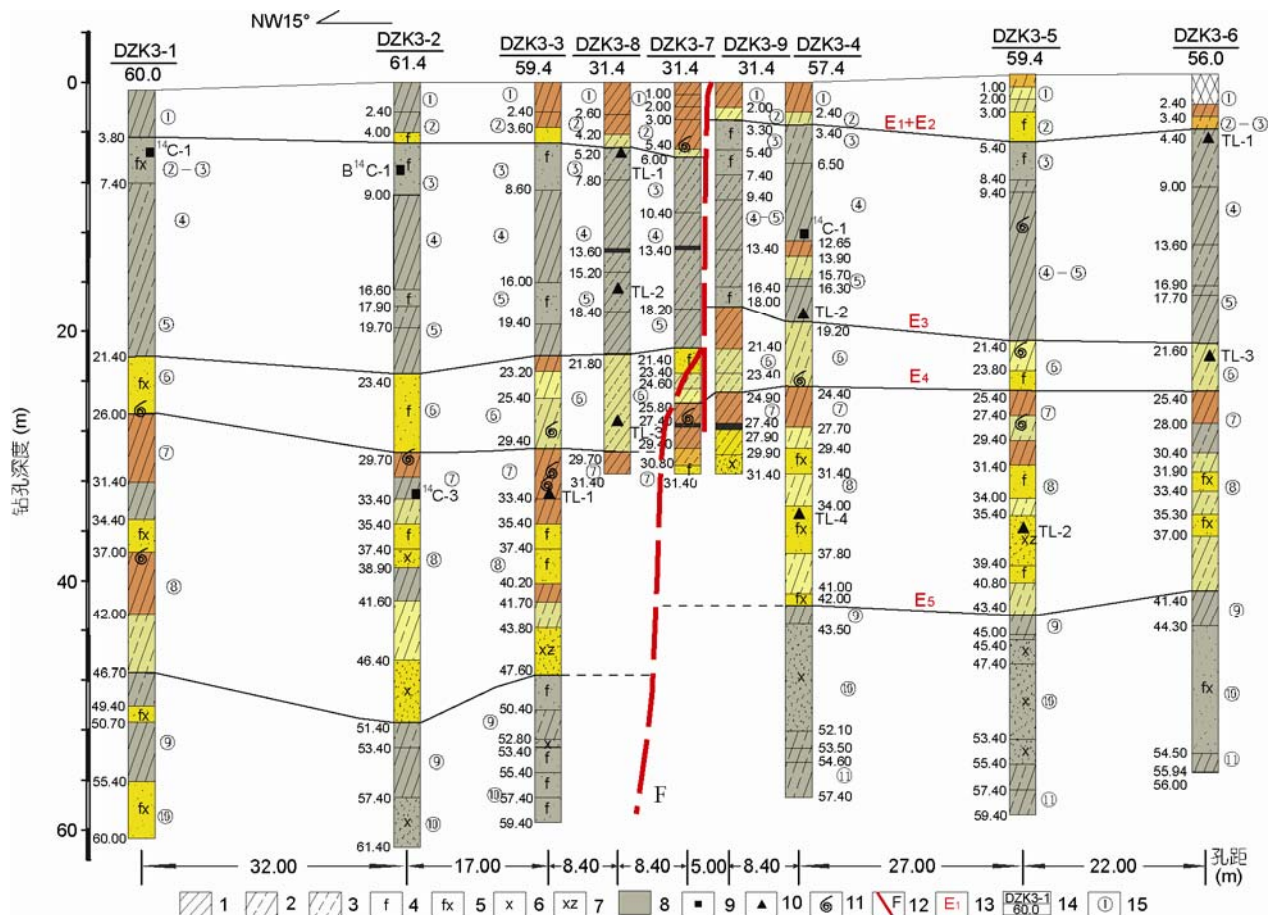


图 7 西河钻孔联合探测剖面

1, 黏土; 2, 亚黏土; 3, 亚砂土; 4, 粉砂; 5, 粉细砂; 6, 细砂; 7, 中细砂; 8, 黑色泥炭和深灰或灰绿色黏土; 9, ^{14}C 取样点; 10, TL 取样点; 11, 生物钙质碎片; 12, 断裂; 13, 地震事件分期; 14, 钻孔编号及终孔深度; 15, 地层编号

层① 灰褐色、褐色黏土, 部分钻孔 0.5 m 以上为回填土;

层② 灰黄-黄灰色亚砂土, 局部含粉细砂;

层③ 灰黑色粉砂、亚砂, 2 个 TL 样品测年结果分别距今 (6.12 ± 0.52) , (8.13 ± 0.69) ka; 该层 1 个 ^{14}C 样品测年距今 (11.625 ± 0.13) ka; 该层另一个 ^{14}C 样品实施了加速器质谱测试(AMS), 得到 2 个测年结果, 一个来自有机物沉积测年, 其年代距今 (8.07 ± 0.04) ka; 另一个来自植物材料测年, 其年代距今 (6.54 ± 0.04) ka;

层④ 灰黑色淤泥质亚黏土、黏土; 1 个 ^{14}C 样品测年结果距今 (11.92 ± 0.12) ka;

层⑤ 灰黑色淤泥质亚黏土、黏土, 部分钻孔含粉砂、亚砂土; 个别钻孔中含生物碎片; 2 个 TL 样品测年结果分别距今 (14.57 ± 1.24) 和 (13.51 ± 1.15) ka;

层⑥ 黄色粉砂、亚砂土, 多个钻孔中见到生物碎片; 2 个 TL 样品测年结果分别距今 (23.88 ± 2.03) 和 (24.21 ± 2.06) ka;

层⑦ 褐色黏土、亚黏土, 局部为灰色, 多个钻孔中见到生物碎片(图 6(f)); 1 个 TL 样品和一个 ^{14}C 样品测年结果分别距今 (26.57 ± 2.26) 和 (28.11 ± 0.535) ka;

层⑧ 灰黄色粉细砂, DZK3-1, 2, 3 孔夹黏土; 2 个 TL 样品测年结果分别距今 (47.58 ± 4.04) 和 (48.83 ± 4.15) ka;

层⑨ 部分钻孔为灰色粉细砂及亚砂土, 部分钻孔为亚黏土及黏土;

层⑩ 灰色粉细砂, 中细砂, 局部夹亚砂土;

层⑪ 仅在剖面 SE 段出现, 亚砂、亚黏及黏土。

2.3.4 沉积环境及地层年代讨论

从上述 3 条钻孔测线的地层岩性可知, 位于唐山市南侧的牛马库测线(DZK1)和孙家楼测线(DZK2)的地层沉积属于冲洪积平原地层, 以粉细砂、亚砂和亚黏土组成。位于丰南县南端西河测线(DZK3)属于滨海平原沉积。牛马库测线和孙家楼测线相距 4 km。尽管孙家楼钻孔测线第 II 套地层的厚度是牛马库测线该层厚度的 3 倍, 但这 2 条测线自地表以下第 I 套地层亚砂土和第 II 套地层粉细砂均可对比。再向下, 牛马库测线的第 III, IV, V 套地层与孙家楼测线的第 III 套地层可对比, 两者均是粉细砂与亚砂、黏土互层。

只是孙家楼测线第 III 套地层顶部有一套含砾粗砂在牛马库测线未见到。西河测线的第 III 套地层为粉细砂与亚砂、亚黏互层。该套地层含大量生物碎屑, 有可能反映了晚更新世晚期渤海一次较大规模的海侵。

唐山地区的第四系等厚线总体呈近东西向展布, 由北至南第四系厚度由 100 m 增至 600 m^[27]。前人对该地区晚第四纪地层的年代有不同的认识。陈望和和倪明云^[37]认为唐山市以南全新统厚度大于 20 m, 唐山市以北则不足 20 m; 在唐山市以南上更新统厚约 75~150 m。而唐山幅区域地质图¹⁾以唐山市为界, 南北分别标为全新统和上更新统。本项钻孔地层的测年结果与区域地质图的标注接近。即邻近唐山市南侧, 地表 4~6 m 以下为晚更新世中期地层。但在丰南县西河一带, 全新统厚度达到 10~13 m。

2.4 断错事件

2.4.1 牛马库钻孔测线

在牛马库钻孔联合剖面图中, 由亚砂、亚黏和粉细砂组成的 13 层地层, 代表冲积平原的沉积。该剖面的地层分布证实这些层位的原始分布形态在几米至几十米的距离内可以视为近水平分布。从图 4 可见, 该剖面这种本应近水平分布的地层, 在 DZK1-9 孔与 DZK1-8 孔之间的所有层位均出现东侧下降。落差幅度 0.5~6.2 m 不等(表 3)。如果考虑 DZK1-5 孔与 DZK1-8 孔之间的同层落差, 则该剖面地层落差的最大位移达到 8.7 m。

在地层组成的变位基准中, 事件标志层的确定直接关联到所确定事件的活动年代。理论上同沉积断层的位移特征是倾滑断层上部层位小于下部层位的落差, 但考虑到钻孔施工、提取岩芯过程形成的孔深误差, 或是走滑断层位移的复杂性, 也可在个别层位中出现上部层位大于下部层位落差的现象。这种个别层位中的现象不影响总体事件的分析。依据事件标志层是有别于后来事件影响的单次事件断错的最新层位, 在牛马库剖面中, 层①的顶面(地表)、层③、层④和层⑨的底面为断层 4 次活动的事件标志层。对这些断层活动事件分析从新至老如下:

在该钻孔测线 DZK1-9 孔与 DZK1-8 孔之间的地

1) 河北省地质局. 唐山幅 1: 20 万区域地质图. 1977

表 3 唐山 3 个地点钻孔测线地层孔深断错与垂直位移^{a)}

牛马库 DZK1 测线		孙家楼 DZK2 测线		西河 DZK3 测线	
断错层位孔深 ^①	落差及事件	断错层位孔深	落差及事件	断错层位孔深	落差及事件
DZK1-9~DZK1-8 层①底 0.9~1.9 m	1976 $M_s7.8$ E_1 , $D_1=0.5$ m	DZK2-5~DZK2-7 层①底 0.7~1.0 m	1976 $M_s7.8$ E_1 , $D_1=0.8$ m	层①底 DZK3-9~DZK3-7	1976 $M_s7.8$ E_1+E_2 , $D_{1+2}=2.7$ m
层②底 5.0~5.9 m				*层②底 3.3~6.0 m	E_1 , $D_1=1.3$ m E_2 , $D_2=1.4$ m
DZK1-9~DZK1-8 *层③底 6.0~7.5 m	E_2 , $D_{2+1}=1.5$ m $D_2=1.0$ m	DZK2-5~DZK2-7 *层②底 3.8~5.7 m	E_2 , $D_{1+2}=1.9$ m $D_2=1.1$ m		
DZK1-9~DZK1-8 *层④底 9.4~13.5 m	E_3 , $D_{1+2+3}=4.1$ m $D_3=2.6$ m	DZK2-7~DZK2-4 *层③底 9.4~12.1 m	E_3 , $D_{1+2+3}=2.7$ m $D_3=0.8$ m	DZK3-9~DZK3-7 *层④和⑤底 18.0~21.4 m	E_3 , $D_{1+2+3}=3.4$ m $D_3=0.7$ m
DZK1-9~DZK1-8 *层⑤底 25.2~29.9 m	E_4 , $D_{1+2+3+4}=4.7$ m $D_4=0.6$ m	DZK2-7~DZK2-4 *层⑥底 27.6~31.0 m	E_4 , $D_{1+2+3+4}=3.4$ m $D_4=0.7$ m	DZK3-9~DZK3-8 *层⑥底 24.9~29.7 m	E_4 , $D_{1+2+3+4}=4.8$ m $D_4=1.4$ m
DZK1-5~DZK1-8 层⑨底 22.0~29.9 m	$D_{1+2+3+4}=7.9$ m $D_4=3.8$ m				
DZK1-9~DZK1-8 层⑩底 25.6~31.4 m	$D=5.8$ m	DZK2-4~DZK2-6 *层⑨底 42.4~47.6 m	E_5 , $D_{1+2+3+4+5}=5.2$ m $D_5=1.8$ m	DZK3-4~DZK3-3 *层⑧底 42.0~47.6 m	E_5 , $D_{1+2+3+4+5}=5.6$ m $D_5=0.8$ m
DZK1-5~DZK1-8 层⑩底 23.7~30.9 m	$D=7.7$ m			DZK3-4~DZK3-2 层⑧底 42.0~51.4 m	$D_5=4.6$ m
DZK1-9~DZK1-8 层⑩底 27.7~33.9 m	$D=6.2$ m	DZK2-4~DZK2-6 层⑩底 43.2~49.6 m	$D=6.4$ m	DZK3-4~DZK3-3 层⑨底 43.5~52.8 m	$D=9.3$ m
DZK1-5~DZK1-8 层⑩底 25.2~33.9 m	$D=8.7$ m	DZK2-4~DZK2-6 层⑩底 48.7~55.4 m	$D=6.7$ m	DZK3-4~DZK3-2 层⑨底 43.5~57.4 m	$D=13.9$ m

a) *为事件标志层位, ^①代表该测线断层下降盘(DZK1-8 以东)钻孔各层的孔深加 0.5 m, 将该钻孔的孔口标高调到一水平线

表存在 0.5 m 垂直落差. 该垂直落差是 1976 年唐山地震形成的地表位移(E_1). 表 1 标出的该测线南面 30 m 牛马库地震遗址在 1976 年唐山地震形成的垂直位移 0.3 m. 这 2 个点位在 1976 年唐山地震的垂直位移较接近. 将 DZK1-9 孔与 DZK1-8 孔的孔高放在同一坐标尺下, 这两个钻孔之间另外 3 次事件标志层位垂直位移的跳跃是: 孔深 6~7.5 m 层③底界存在 1.5 m 落差、孔深 9.4~13.5 m 层④底界存在 4.1 m 落差和孔深 25.2~29.9 m 层⑤底界存在 4.7 m 落差. 这些落差均包含 1976 年唐山地震 E_1 事件在地表造成的落差. 这些落差不仅在这 2 个钻孔之间存在, 并向两侧继续延伸贯穿整个测线. 作为 E_2 事件标志层的层③, E_2 事件发生在层③底界沉积之后, E_2 事件的垂直位移为 1.0 m. 并在其后位于下降盘的 DZK1-8 孔中堆积了亚黏土和在 DZK1-6, 4 孔中堆积了周边钻孔没有的粉细砂. E_3 事件标志层层④底界 4.1 m 落差包含了 E_3 , E_2 和 E_1 事件的垂直位移. 在扣除了上 2 次事件的垂直位移之后, E_3 事件的垂直位移 2.6 m. E_4 事件标志层层⑩顶界 4.7 m 落差包含了 E_4 ~ E_1 四次事件的垂直位移. 在扣除了前 3 次事件的垂直位移之后, E_4 事件的垂直位移 0.6 m. 在该钻孔剖面 DZK1-9 孔 NW 侧, 层⑩在 DZK1-5 孔抬升了 3.2 m 后大体近水平展布. 而在 DZK1-8 孔 SE 侧, 未见层⑩黏土层出现. 说明在 DZK1-8 孔 SE 侧钻孔中层⑩埋深更深. 若对比

DZK1-5 孔与 DZK1-8 孔层⑩的落差, 该次事件的垂直位移达到 3.8 m. 再向下 DZK1-9 孔与 DZK1-8 孔之间层⑩、层⑨落差达到 5.8 和 6.2 m, DZK1-5 孔与 DZK1-8 孔之间层⑩、层⑨落差达到 7.7 和 8.7 m, 但因 DZK1-8 以东 DZK1-6 和 DZK1-4 孔未出现层⑨以下的地层, 对此不再讨论.

除上述地层落差外, 在 DZK1-8 孔孔深 33.6 m 的黏土岩芯中, 出现倾角 70°的平直裂面. 裂面上展布有薄层细砂(图 2(f)). DZK1-8 孔孔深 33.6 m 断层裂面的出现与上述两个钻孔之间断层的不连续现象相互吻合, 表明断层从 DZK1-8 通过, 展布在 DZK1-9 孔与 DZK1-8 孔之间. 因为 DZK1-9 孔与 DZK1-8 孔之间孔距仅 4 m. 由此显示在地表 33 m 以上断裂的倾角大于 80°, 近于直立.

除上述钻孔外, 在该测线施工时, 还曾在 DZK1-9 与 DZK1-8 之间连续布设了 2 个钻孔, 以期钻遇断面. 但这 2 个钻孔在钻至地表以下 7.4 m 时, 孔壁发生严重漏浆, 无法继续施工. 这与断层从该点通过有关.

2.4.2 孙家楼钻孔测线

该钻孔剖面图的 20 层地层以粉细砂为主, 含中粗砂, 并与亚砂、黏土相间分布, 显示了冲积平原沉积特征. 该剖面中各个钻孔的地层岩性大体可相互对比, 剖面中的地层近水平分布. 但在 DZK2-6 至

DZK2-4, DZK2-4 与 DZK2-7, DZK2-7 与 DZK2-5 孔之间, 下部和上部层位均出现向西的落差, 显示高角度向西倾斜断层的存在. 在该剖面中, 层①顶面, 层②底界、层③底界、层⑩底界及层⑭底界为该剖面 5 次断层活动事件标志层位(图 5), 其中层①落差是 1976 年唐山地震形成.

在该剖面 DZK2-5 孔与 DZK2-7 孔之间, 层②底界出现西侧 1.9 m 落差. 这种落差向东西两侧继续延伸. 该测线 DZK2-8 孔于孔深 3.65~3.78 m 见到一薄层桔黄色与灰黑色亚砂土的混杂. 在 DZK2-7 孔及 DZK2-4 孔分别于孔深 5 m 和 4.3~4.38 m 见到该层. 考虑到 DZK2-8 孔与 DZK2-7 孔孔口约 0.5 m 的高差, 则这两个钻孔之间薄层桔黄色与灰黑色亚砂土 1.85 m 的落差与层②底界 1.9 m 落差大体吻合. 断错层②的断层活动事件为 E_2 . 扣除 1976 年唐山地震该点 0.8 m 垂直位移, E_2 事件垂直位移 1.1 m. 位于 DZK2-7 孔与 DZK2-4 孔之间层③底界、层⑩底界与 DZK2-4 孔与 DZK2-6 孔之间层⑭的底界分别出现 2.7, 3.4 m 和 5.2 m 的垂直位移. 在扣除其后事件的落差之后, E_3 事件、 E_4 事件和 E_5 事件的垂直位移分别是 0.8, 0.7 和 1.8 m. 位于 DZK2-4 孔与 DZK2-6 孔之间层③和层⑩的落差分别为 6.4 和 6.7 m. 考虑到 DZK2-6 孔以西的 DZK2-1 孔因粗砂砾石层漏浆严重, 未能继续提取层⑭以下地层, 对此不再讨论.

从图 5 及上述描述可见, 该测线的断面自下而上从 DZK2-6 孔与 DZK2-4 孔之间、DZK2-4 孔与 DZK2-7 孔之间及 DZK2-7 孔与 DZK2-5 孔之间通过. 断面倾向 NW, 断层倾角约 60° .

2.4.3 西河钻孔测线

西河钻孔剖面划分为 11 层, 其特点是近半数厚度的地层为灰黑色淤泥质, 岩性包含亚砂、亚黏及粉砂、中细砂. 在灰黑色淤泥质地层之间灰黄色的亚砂及黏土中含大量生物碎屑. 在该剖面的地层对比中, 以灰黑色淤泥质地层为标志层. 从图 7 可知, 图中各个钻孔中的地层岩性可大体对比. 该剖面的断层自下而上在 DZK3-3 与 DZK3-4, DZK3-8 与 DZK3-7 及 DZK3-7 与 DZK3-9 之间通过, 断面西倾, 倾角约 $70^\circ\sim 80^\circ$. 该剖面显示断层曾发生 5 次活动事件的标志层位分别为层①顶面(地面)、层②底界、层⑤底界、层⑥底界及层⑧底界.

该测线所在地表在 1976 年唐山地震以后经历过

多次挖塘整地, 现今地面已显现不出唐山地震时的地面落差. 但在该钻孔测线西侧几百米, 地表仍可看到唐山地震留下高约 1.1 m 的残留陡坎. 据当地人介绍, 钻孔测线所在地在 1976 年唐山地震时形成的地表垂直落差约为 1.3 m. 在图 7 中可见, DZK3-7 孔与 DZK3-9 孔之间层②底界、层⑤底界, DZK3-8 与 DZK3-9 之间层⑥底界及 DZK3-3 孔与 DZK3-4 孔之间层⑧底界分别出现西侧 2.7, 3.4, 4.8 与 5.6 m 落差. 在扣除上一次标志层的落差之后, 得到 $E_2\sim E_5$ 各次事件的垂直位移分别是 1.4, 0.7, 1.4 与 0.8 m. 此外, DZK3-4 孔与 DZK3-3 孔及 DZK3-4 孔与 DZK3-2 孔层⑨底之间分别存在 9.3 与 13.9 m 落差, 在此不再讨论.

除上述以外, 该剖面地层出现的落差还有两点特征. 一是夹有较多生物碎屑层⑥和层⑦的黄色亚砂土和粘土作为该剖面的一个标志层同其他地层一同被断错. 二是在 DZK3-7 孔 24.6~25.8 m 的层⑥底部出现黄灰色粉砂与亚黏土混杂, 亚黏土中含有粉砂团块. 这与该孔 SE 侧断层 E_4 事件的活动有关, 被推测为是该次事件断层下降盘的混杂堆积.

2.5 三条钻孔测线断层活动事件对比

2.5.1 事件标志层展布深度与事件期次

从前述可见, 如果仅从断错地层的事件标志层位的展布深度对本项研究开展的 3 条测线的事件进行对比, 则牛马库钻孔测线孔深 30 m 揭示的唐山断裂 4 次活动事件, 可与孙家楼和西河钻孔测线孔深 60 m 揭示的唐山断裂 5 次断层活动事件中前 4 次事件进行对比. 其中, 1976 唐山地震在牛马库及孙家楼钻孔测线的顶部地层均有显示. 西河测线地表则因人工影响已看不出唐山地震的影响. 在这 3 条测线中, 1976 年唐山地震之前的一次断层活动事件(E_2)均发生在地表以下 5~7 m 处. 在这之前的更早的一次断层活动事件(E_3)在牛马库测线及孙家楼测线发生在地表以下 9~13 m; 在西河测线则发生在地表以下 18~21 m. E_4 断层活动事件在牛马库测线中发生在地表以下 25~29 m, 与孙家楼测线及西河测线 E_4 事件 27~31 m 和 25~30 m 的深度吻合. E_5 事件在孙家楼与西河测线的深度均为 42~47 m(图 8(a)). 这些资料展示了 3 条钻孔测线事件标志层的深度与断层活动期次之间存在一定对应.

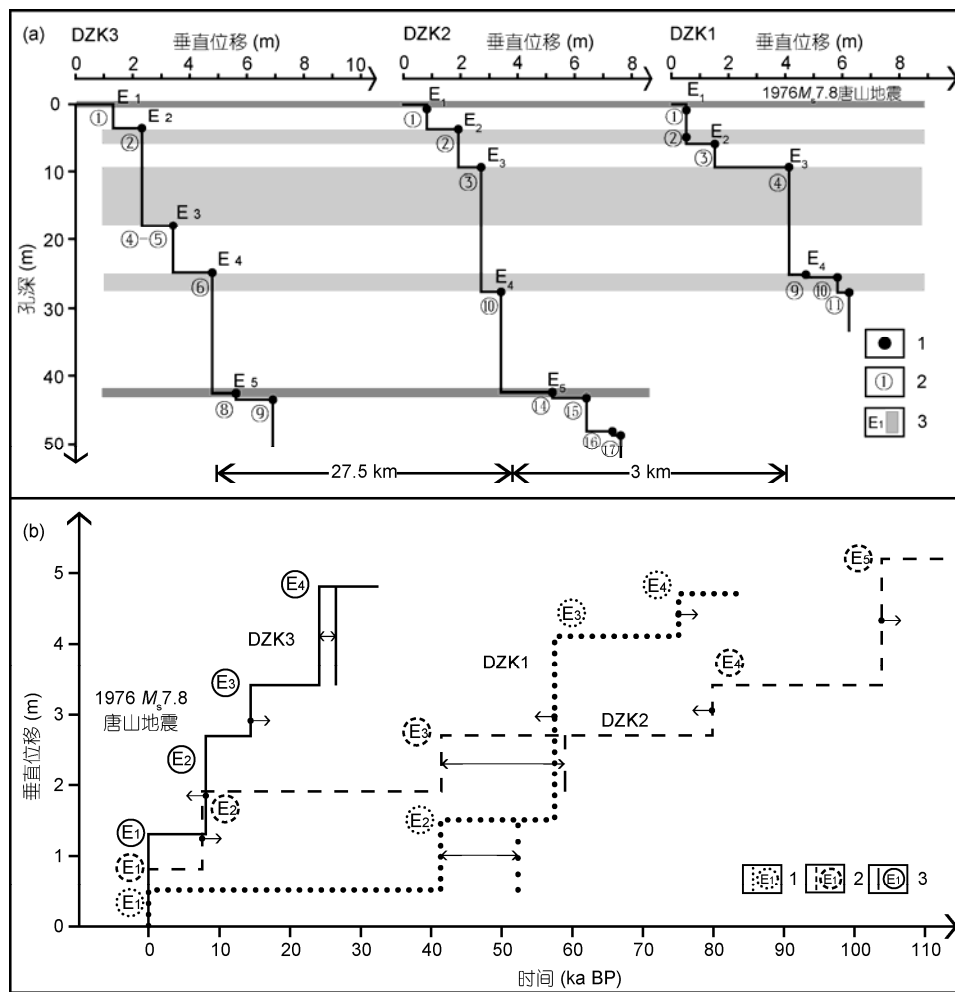


图8 唐山钻孔测线事件标志层位深度、事件年代与垂直位移关系

(a) 标志事件层位深度与垂直位移关系: 1, 各次事件的深度与垂直位移; 2, 事件标志层位; 3, 事件的分期; (b) 断层活动事件年代与垂直位移关系: 1, DZK1 测线事件划分; 2, DZK2 测线事件划分; 3, DZK3 测线事件划分

2.5.2 地层测年与活动时代

依据西河测线地层落差及地层测年可知, 唐山地震之前事件 E₂ 断错层③的顶面, 在测线的两端及中部有 3 个地层样品测年. 取 ¹⁴C 测年结果, 或取靠近断面的地层 TL 测年, 该次地震发生在距今 11.6 ka 之后、或距今 8.13 ka 之后, 记作距今 8.13~11.6 ka 以后. E₃ 事件发生在层⑥之后及层⑤之前, 即距今 14.57 ka 之前与 23.88 ka 之后, 记作 14.57~23.88 ka, 应该更靠近 14.57 ka. E₄ 事件发生在层⑥之前及层⑦之后, 依据一个 ¹⁴C 和 3 个 TL 地层测年, 得到的时间分别在距今 28.11 和 26.57 ka 之后, 及 24.21 和 23.88 ka 之前, 记作距今 24.21~26.57 ka. 从这些测年结果可见, 无论是以各次事件的最小年代计算, 还是以上

述各次事件时间跨度的中值进行计算, 得到包含 1976 年唐山地震在内共计 4 次地震事件的活动间隔如下, E₁-E₂ 事件的时间间隔为 8.13 或 9.86 ka, E₂-E₃ 事件的时间间隔为 6.44 或 9.365 ka, E₃-E₄ 事件的时间间隔为 9.64 或 6.165 ka. 即唐山断裂晚第四纪最新 4 次断层活动事件的时间间隔约为 6.165~9.86 ka.

在牛马库及孙家楼测线中, E₁ 事件是 1976 年唐山地震地表变形. E₂ 事件是 1976 年唐山地震之前的断层活动. 在牛马库测线, 如果仅以各次事件断错的地层年代考虑, E₂ 事件断错的地层年代距今 41.43~52.40 ka, E₃ 事件断错的地层年代距今 52.40~57.60 ka, E₄ 事件断错的地层年代距今 75.18~103.60 ka. 取其中值, E₂-E₃ 事件的间隔为 8.08 ka, E₃-E₄ 事件的间隔

为 34.39 ka. 因孙家楼测线的探槽剖面另有地层测年, 该文后面对孙家楼测线 E_2 事件的年代进行讨论. 孙家楼测线 E_3 - E_5 事件的断错层位年代分别距今 55.59~59.05, >79.96 和 103.97~114.92 ka. 其中 E_3 - E_4 事件与 E_4 - E_5 事件最小地层时代的时间间隔为 24 或 20~30 ka. 如果从断错地层的累积同震垂直位移与单次事件垂直位移的比值考虑断层活动的平均时间间隔, 牛马库测线距今 75.18 ka 层⑨断错 4.7 m(E_4), 显示了曾经约有 9 次 0.5 m 垂直位移事件, 得到的断层活动事件的平均间隔为 8.4 ka. 孙家楼测线距今 103.97 ka 层⑩断错 5.2 m(E_5), 显示单次 0.7~0.8 m 垂直位移事件的平均间隔约为 14.9 ka. 西河测线显示晚更新世晚期以来最近 4 次断层活动时间间隔为 6.165~9.86 ka. 上述 3 条测线各次事件的最小年代及垂直位移展示在图 8(b).

上述资料表明, 在晚更新世末期唐山市一带处于地表剥蚀状态. 如果仅以地层年代划定地震的期次, 则牛马库与孙家楼测线 E_2 - E_4 事件发生在距今 4 万年以前. 像图 8(b)所示. 但从同震位移量分析, 作者认为图 8(a)所展示的地震事件归属更接近真实情况. 即, 这 3 条钻孔测线揭示的最新 4 次古地震事件是同步活动. 因为牛马库和孙家楼钻孔没有晚更新世晚期以后的沉积, 这 2 条测线在这一时期的活动隐含在早期地层的落差中. 即当晚第四纪地表处于剥蚀状态时, 断层活动虽断错了最新的地貌面, 但所断错的地层时代明显比地貌面年代偏老. 从上述资料可看出, 在本文分析中, 以断错事件地层的深度和同震位移量进行地震事件的比对, 更为合理.

2.5.3 活动强度

上述资料表明 1976 年唐山 $M_s7.8$ 地震在牛马库测线、孙家楼测线和西河测线地表垂直位移分别为 0.5, 0.8 和 1.3 m. 1976 年唐山地震之前, 牛马库测线 3 次断层活动事件的单次垂直位移为 0.6~2.6 m, 孙家楼测线 4 次断层活动事件的单次同震垂直位移为 0.7~1.8 m, 西河测线 4 次断层活动事件的单次垂直位移为 0.7~1.4 m, 均大于或接近各地点 1976 年唐山 $M_s7.8$ 地震所出现的地表垂直位移, 显示产生这些位移事件的地震震级与 1976 年唐山地震相当.

3 孙家楼探槽

孙家楼探槽位于唐山市南侧稻地镇孙家楼村西

北约 500 m, 地处唐山市南侧的冲洪积平原. 该处地表可见到 NE45°走向、南东高出北西约 70 cm 的缓坡. 这是唐山地震之后人工种地将地表陡坎平缓所致. 孙家楼探槽的布设既考虑到 1976 年唐山地震地表破裂带的展布(图 9(a)), 也考虑了该项实施的钻孔探测结果. 探槽所在地跨越了孙家楼钻孔测线 DZK2-4, 7, 5, 8 孔位, DZK2-3 孔位于探槽东端(图 5). 该探槽走向 NW65°, 长 35 m, 上宽 7 m, 下宽 1.5 m, 深 6.2 m(图 9(b)). 前面已述, 在这 4 个钻孔中 3 个钻孔有探槽剖面层⑤桔黄色地层记录, 钻孔剖面中层②的落差与探槽剖面揭示探槽下部地层的落差量值吻合.

3.1 地层及测年

该探槽共揭示出 7 层地层(图 10), 均属于细颗粒沉积. 探槽底部为细砂和亚砂土; 中部和上部地层为含钙核亚粘土. 考虑到与钻孔地层编号的对应, 探槽地层自上向下编号. 该探槽实测 ^{14}C 样品 2 个, TL 样品 6 个, 电子自旋共振(ESR)样品 1 个.

探槽地层分层如下:

层① 灰黑色垆土, 地表耕植土; 局部有黄色砂土块混杂堆积;

层② 黄色亚黏土, 含 0.5 cm 及更小直径钙核; 位于探槽 SE 段该层顶部 TL-6 样品测年结果距今 (7.61 ± 0.65) ka;

层③ 灰黄色亚粘土, 不含钙核, 含灰褐色粘土团块, 样品 ^{14}C 测年结果距今 (5.21 ± 0.24) ka, 其校正值为 5.734~6.215 ka; 底部 TL-8 样品测年距今 (17.62 ± 1.50) ka; 该层仅在探槽 NW 段出现, 仅分布在断层下降盘, 该层底面在断面附近呈斜坡状分布;

层④ 灰黄色亚粘土, 含大量钙质结核, 一般直径 1~3 cm; 大者 10~15 cm; 底部含大量微小碳粒; 该层底部 TL-3 样品测年结果距今 (31.45 ± 2.67) ka; 在断层上升盘该层厚 1.8 m, 在断层下降盘厚 2.2 m, 靠近断面一带含零星粘土团块; 钙核样品 ESR 测年距今 (25 ± 2) ka;

层⑤ 灰色与桔黄色薄层亚砂土, 一般厚 5~7 cm, 个别地段厚 10 cm; B ^{14}C -1-AMS-O 样品为 AMS 测试, 测年结果距今 (12.56 ± 0.05) ka;

层⑥ 黄褐色亚砂土, 含一层断续灰色薄层亚砂土, 厚约 5 cm; 不含钙核; 层中含大量微小碳点或锰点; 该层顶部 TL-2 样品测年距今 (33.53 ± 2.85) ka;

层⑦ 浅黄色细砂, 纯净; 水平层理清晰; 顶部

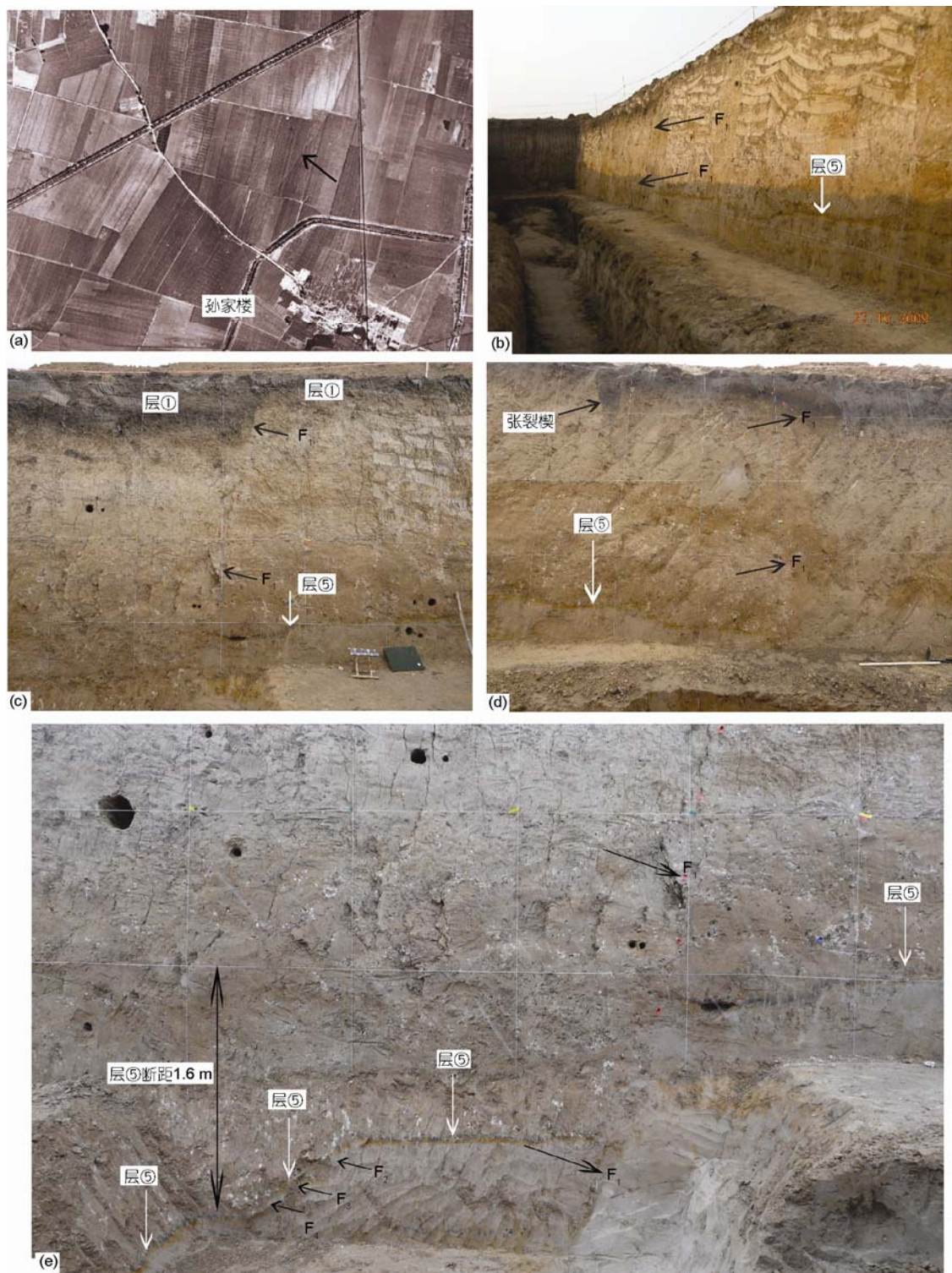


图 9 唐山地震后孙家楼航空照片及孙家楼探槽

(a) 1976 年唐山地震后拍摄的 1:1 万航空照片显示孙家楼地表破裂带; (b) 孙家楼探槽景观, 镜向 NW; (c) 探槽北壁断错耕植土及下部地层的断面, 图中标出的层⑤为上升盘展布的薄层灰色及桔黄色亚砂土, 镜向 NE; (d) 探槽南壁上部张裂楔及断错层位断面, 图中标出的层⑤为上升盘展布的薄层灰色及桔黄色亚砂土, 镜向 SW; (e) 探槽北壁下部断面及两侧的地层落差, 该图下部标出的层⑤的垂直落差为 1.6 m, 图中网格为米格挂网, 镜向 NE

TL-1 样品测年距今 (34.91 ± 2.97) ka;

层⑧ 灰色亚粘土, 靠近断面分布, 形状像张裂缝中的充填; 该层 TL-9 样品测年距今 (27.57 ± 2.34) ka.

3.2 断错现象

孙家楼探槽揭示的断错现象如下:

(1) 位于探槽北壁剖面下部中段在 3 m 宽度范围内可见到 4 条断面平行展布. 其中, 东面断面(F_1)产状 $NE46^\circ/NW \angle 69^\circ$, 该断面从探槽下部一直向上延伸至探槽顶部, 除去现今的地表耕植土外, 断面断错所有的地层(图 9(c), (d)). 其中, 该断面 NW 侧层①底界落差 0.7~0.8 m; 层⑤落差 0.8 m. 西面 3 条断面($F_2 \sim F_4$)的产状 $NE15^\circ/NW \angle 73^\circ$, 这 3 条断面只断错探槽下部层⑤~⑦, 造成层⑤自东向西错落分布, 落差 0.7 m(图 9(e)). 探槽南壁剖面的断错形态与北壁大体相同, 也是在 3 m 范围内出现了 4 条断面. 但该剖面下部的 3 条平行断面($F_2 \sim F_4$)不是位于主断面的西侧而是位于主断面的东侧(图 10).

(2) 该探槽南北壁面近地面处, 均出现张性开裂, 其内充填黑色垆土. 探槽北壁的张性开裂位于主断面(F_1), 南壁张性开裂位于断层上升盘, 距离主断面约 2 m. 此外, 位于探槽中部 2 个壁面主断面的下降

盘分布有宽约 5 cm、近垂向分布的黏土条带. 该黏土条带有可能是早期张扭裂隙面(图 10(a), (b)), 断面摩擦将亚黏土变为黏土^[38,39]; 也有可能是主断面附近的微裂隙造成的色调差异条带^[40].

(3) 探槽剖面中断层带东侧层④厚度约为 1.8 m, 断层西侧层④厚约 2.2 m, 两者相差 0.4 m. 探槽中的层③只在断层西侧出现, 厚约 0.4 m. 即断层西侧较东侧层④增加的厚度加上层③的厚度等于主断面西侧 F_{2-3} 断面对层⑤形成的垂直位错.

从上述孙家楼探槽的断错现象, 可知该剖面断层曾有 2 次活动. 最新一次活动为 1976 年唐山地震(E_1). 从探槽剖面可见断层西侧层①底面较断层的东侧厚约 0.7~0.8 m. 在 1976 年的唐山地震发生 30 多年之后, 位于断层两侧的地面陡坎已减缓, 致使断层西侧昔日地面形成的黑色垆土被其上的混杂地层覆盖. 在探槽剖面中, 地面之下的张裂楔、主断面的断距均是 1976 年唐山地震活动的结果.

该断层早期活动(E_2)表现在以下几点. 一是该探槽下部层位层⑤的垂直位移是上部层位层①、层②垂直位移的 2 倍. 根据下部地层断距大于上部地层断距进行事件剥离, 必有一次断层活动事件发生在这 2 套地层之间. 此外, 断裂带西侧层④加厚、层③出现,

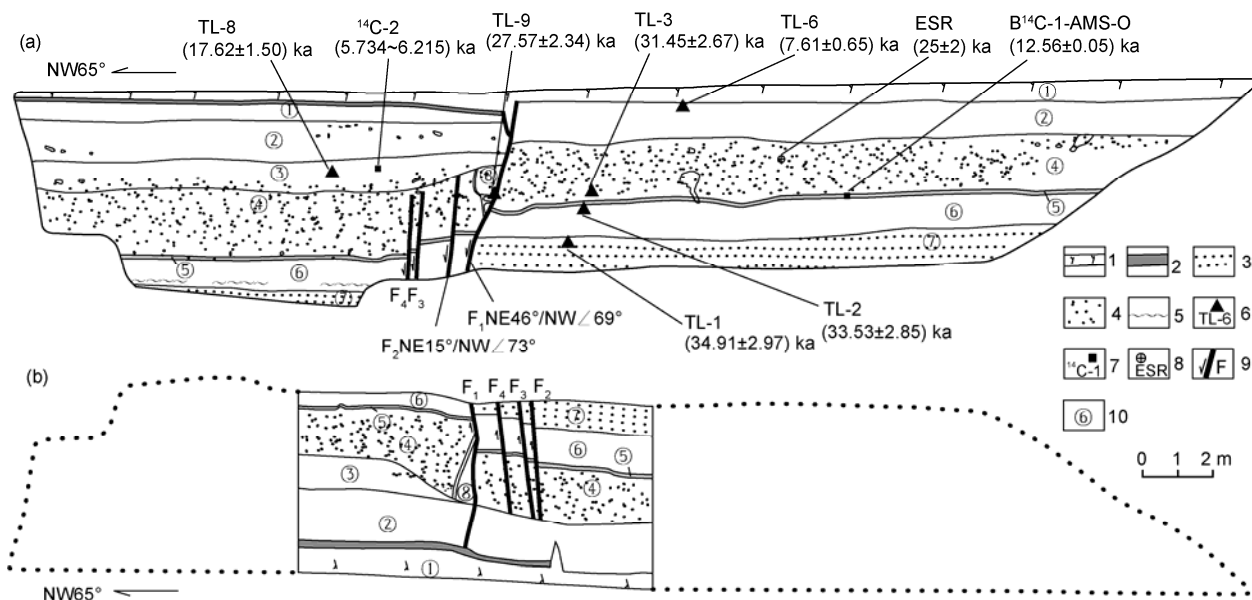


图 10 孙家楼探槽剖面

(a) 探槽北壁; (b) 探槽南壁; 1, 现今地表; 2, 古地面; 3, 细砂; 4, 含钙质结核亚黏土; 5, 潜土层; 6, TL 样品测年; 7, ^{14}C 样品测年; 8, ESR 样品测年; 9, 断面及编号; 10, 地层分层编号

层⑤上部地层出现混杂堆积现象; 以及 F_{2-4} 向上未延伸至层③以上的地层, 均与依据断距进行剥离获得的断层活动事件相吻合. 即在层④沉积之后断层活动, F_{2-4} 及 F_1 西侧近垂直的黏土条带形成, 层④及其以下地层发生垂直位错, 随后该点又遭受剥蚀堆积了层④上部的混杂堆积及层③.

此外还需说明, 根据探槽两侧 F_1 与 F_{2-4} 的展布及断层产状, 可见早期事件(E_2) F_{2-4} 断裂带走向 $NE15^\circ$, 在晚期断层活动事件(E_1)中, F_1 走向 $NE46^\circ$, 切割 F_{2-4} 展布.

3.3 断错年代

除 1976 年唐山地震之外, 该探槽还揭示了早一期断层活动事件. 在该剖面, 层⑤与层④顶面的落差大体一样, 显示了早一期事件发生在层④之后. 层④的 TL 和 ESR 测年结果分别距今 (31.45 ± 2.67) 和 (25 ± 2) ka. 层⑤样品 ^{14}C 的 AMS 测年得到年代距今 (12.56 ± 0.05) ka. 在探槽剖面断层下降盘层④之上的堆积地层应大体反映事件的盖层年龄. 层③中灰褐色黏土团块 ^{14}C 测年结果的校正值距今 $5.734 \sim 6.215$ ka; TL-8 样品测年结果距今 (17.62 ± 1.50) ka. 层②作为盖层 TL-6 样品测年结果距今 (7.61 ± 0.65) ka. 这些样品测年结果不一致的现象有可能和层④形成之后有一个较长时间的剥蚀有关. 但考虑到层③堆积形态得以保留, 说明该次断错事件发生的时间并不久远. 为此, 本项研究取该剖面早一期断层活动的时间为距今 (7.61 ± 0.65) ka 以前. 结合前面所述西河钻孔测线 E_2 事件发生的时间是距今 8.13 ka 之后, 则该次事件的活动时间约为 7.61~8.13 ka.

4 主要认识及讨论

(1) 通过唐山市南侧 3 条钻孔联合剖面及一个探槽开挖获得的资料表明, 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 地震的地表地震断层向南通过丰南县稻地镇孙家楼西侧、延伸

至丰南县西河, 长度大于 47 km.

(2) 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 地震调查表明, 该地表破裂带北支自唐山市胜利路起, 向南通过市内复兴路西侧的唐山十中及康柏路牛马库, 向南延续到望马台, 地表的垂直位移表现为西升东降. 该地表破裂带的南支自礼尚庄向南, 过孙家楼、西河, 地表的垂直位移表现为东升西降. 这种断层活动方式无法单独用正断层或逆断层的活动给予解释, 而与断裂带右旋走滑活动产生的垂直位移场吻合. 本项研究实施的钻孔和探槽调查依据地层落差证实了该断裂晚第四纪时期这种活动方式的持续.

(3) 本项研究表明晚第四纪时期唐山断裂带曾发生多次断层活动. 在 1976 年唐山地震之前 3 次活动事件的时间分别距今 7.61~8.13, >14.57 和 24.21~26.57 ka, 连同 1976 年唐山地震在内 4 次地震的时间间隔以中值计算得出约为 6.7~10.8 ka. 其中牛马库钻孔测线距今 75.18 ka 地层 9 次断层活动事件的平均间隔为 8.4 ka. 这些数据表明唐山断裂晚第四纪活动接近准间隔的大震原地复发模式. 其强震的复发时间是同是位于华北平原北部、曾发生 1679 年河北三河 M_8 级地震夏垫断裂 3.3 ka 大震间隔的 2.5 倍^[41].

(4) 本项研究开展的 3 条钻孔联合剖面调查表明, 测线剖面断层活动事件的时间分辨能力受到地层沉积环境的制约. 对于断层两侧均处于整体沉降的沉积环境, 分辨事件及确定活动年代需要依据事件标志层位确定. 对于其后处于剥蚀状态的早期松散地层, 无法获知其后的断层活动事件的时间, 只能依据同震垂直位移和累积位移的比值及累积位移层位的年代推断断层平均活动间隔.

(5) 依据钻孔测线及探槽剖面地层垂直位移累积位错量的分级对唐山断裂带晚第四纪活动期次进行了讨论. 唐山断裂只是走滑断裂的一个实例, 对于不同的走滑断裂而言, 其断层活动的期次是否都能从垂直位移量的差异分辨出来, 有待研究实例举证.

致谢 在该项野外工作中, 黄伟参加了钻孔实施过程中的岩芯编目和取样; 黄伟和孙昌斌参与了探槽开挖; 盛强参与了探槽清壁工作. 在此感谢邓起东院士, 杨主恩、尹功明、邱泽华、雷建设、李德文、马保起研究员等人在孙家楼探槽现场给予的指导和开展的讨论. 感谢王挺梅、魏顺民研究员及审稿人对稿件提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 李善邦. 中国地震区域划分图及其说明. 地球物理学报, 1957, 6: 127~158

- 2 魏顺民, 李志义, 程绍平, 等. 唐山地震区域构造背景和发展模式的讨论. 地质科学, 1977, 12: 3–19
- 3 王景明, 郑文俊, 陈国顺, 等. 唐山地震断面主断裂带及地震成因. 地震研究, 1981, 4: 427–450
- 4 杨理华. 烈度与震害. 见: 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 编. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社, 1982. 1–32
- 5 杜春涛, 孟宪梁, 陈书贤. 唐山地震的地裂缝. 见: 刘恢先, 主编. 唐山大地震震害(一). 北京: 地震出版社, 1985. 174–189
- 6 陈运泰, 林邦慧, 王新华, 等. 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, 1979, 22: 3–19
- 7 Butler R, Stewart G S, Kanamori H. The July 27, 1976 Tangshan, China Earthquake——A complex sequence of intraplate events. Bull Seism Soc Am, 1979, 69: 207–220
- 8 李钦祖, 张之立, 靳雅敏, 等. 唐山地震的震源机制. 地震地质, 1980, 2: 61–69
- 9 张之立, 李钦祖, 谷继成, 等. 唐山地震的破裂过程及其力学分析. 地震学报, 1980, 2: 3–21
- 10 黄立人. 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. 大地测量与地球动力学, 1981, 1: 3–13
- 11 张祖胜, 谢觉民, 徐峰壮, 等. 唐山 7.8 级地震的地壳垂直形变. 地球物理学报, 1981, 24: 58–67
- 12 谢觉民. 唐山地震地壳弹性回跳的某些特征. 地震研究, 1984, 7: 28–37
- 13 邵学钟, 张家茹, 章思亚, 等. 唐山大地震区深部构造的初步研究. 地球物理学报, 1986, 29: 30–43
- 14 李祥根. 燕山南麓平原的某些构造特征和唐山地震. 见: 中国科学院地质研究所, 国家地震局地质研究所, 编. 华北断块区的形成和发展. 北京: 科学出版社, 1980. 261–273
- 15 国家地震局物探队. 乐亭-张家口测深剖面. 地震战线, 1977, 2: 13–14
- 16 曾融生, 陆涵行, 丁志峰. 从地震折射和反射剖面结果讨论唐山地震成因. 地球物理学报, 1988, 31: 383–398
- 17 刘国栋. 唐山地震震源构造及动力学过程研究. 见: 国家地震局地质研究所, 编. 现今地球动力学研究及其应用. 北京: 地震出版社, 1994. 70–83
- 18 王挺梅, 李建平. 唐山大地震的重复间隔. 地震地质, 1984, 6: 79–85
- 19 马瑾, 张渤涛, 袁淑荣. 唐山地震与地震危险区. 地震地质, 1980, 2: 45–56
- 20 强祖基, 张立人. 唐山地震与第四纪活动断裂. 见: 中国地震学会地震地质专业委员会, 编. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社, 1982. 67–71
- 21 桂焜长, 耿世昌. 值得再三思考的唐山地震构造. 中国地震, 1987, 3(增刊): 79–84
- 22 李建, 郝书俭, 胡玉台, 等. 1976 年唐山地震发震断裂的活动性研究. 地震地质, 1998, 20: 28–34
- 23 郝书俭, 尤惠川. 唐山活动断层的浅层地震精细探测. 地震地质, 2001, 23: 93–97
- 24 尤惠川, 徐锡伟, 吴建平, 等. 唐山地震深浅构造关系研究. 地震地质, 2002, 24: 104–115
- 25 邱泽华, 马瑾, 刘国玺. 新发现的唐山地震大断层. 地震地质, 2005, 27: 669–677
- 26 江娃利. 有关 1976 年唐山地震发震断层的讨论. 地震地质, 2006, 28: 312–318
- 27 刘国栋, 魏顺民, 刘昌铨. 地震地质背景. 见: 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 编. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社, 1982. 71–130
- 28 吴忱. 地震震害考察. 见: 刘恢先, 主编. 唐山大地震震害(一). 北京: 地震出版社, 1985. 203–209
- 29 邓起东, 闻学泽. 活动构造研究——历史、进展与展望. 地震地质, 2008, 30: 1–30
- 30 徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 等. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列——河北夏垫断裂古地震研究. 地震地质, 2000, 22: 9–19
- 31 江娃利. 北京平原夏垫断裂潘各庄钻孔晚更新世以来古地震事件分析. 见: 活动断裂研究编委会, 中国地震局科技发展司, 编. 活动断裂研究(8). 北京: 地震出版社, 2001. 140–148
- 32 张世民, 王丹丹, 刘旭东, 等. 北京南口-孙河断裂晚第四纪古地震事件的钻孔剖面对比与分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 881–895
- 33 杨晓平, 郑荣章, 张兰凤, 等. 浅层地震勘探资料地质解释过程中值得重视的问题. 地震地质, 2007, 29: 282–293
- 34 雷启云, 柴炽章, 孟广魁, 等. 银川隐伏断层钻孔联合剖面探测. 地震地质, 2008, 30: 250–263
- 35 松田時彦. 地層から古地震を読む. 地球(日文), 2000, 28(号外): 10–15
- 36 朱志澄, 宋鸿林. 构造地质学. 北京: 中国地质大学出版社, 1990. 181–182
- 37 陈望和, 倪明云. 河北第四纪地质. 北京: 地质出版社, 1987. 1–186
- 38 谢新生, 赵晋泉, 江娃利, 等. 山西交城断裂带西张探槽全新世古地震研究. 地震地质, 2007, 29: 744–755
- 39 林传勇, 陈孝德, 史兰斌. 山西太原交城断裂西张探槽的显微构造和显微沉积学分析. 地震地质, 2007, 29: 294–310
- 40 江娃利, 侯治华, 谢新生. 北京平原南口-孙河断裂带昌平旧县探槽古地震事件研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31: 501–509
- 41 江娃利, 侯治华, 肖振敏, 等. 北京平原夏垫断裂齐心庄探槽古地震事件分析. 地震地质, 2000, 22: 413–422