

黄河黑山峡大柳树坝址若干 地震地质问题的研究

陈国星¹⁾ 田勤俭¹⁾ 周本刚²⁾ 闵伟²⁾ 刘保金³⁾ 高战武¹⁾

1) 中国地震局地震预测研究所, 2) 中国地震局地质研究所, 3) 中国地震局地球物理勘探中心

摘要 本文主要根据《黄河黑山峡河段地震地质补充论证工作报告》¹⁾, 对黄河黑山峡河段大柳树坝址区主要地震地质问题, 包括 1709 年中卫 7½级地震的地表破裂带长度, F₂₀₁ 断层的规模, 坝址区 F₃、F₇ 断层晚更新世以来是否被 F₂₀₁ 断层“牵动”, 坝址区不同级别断层的深浅构造关系等主要方面的研究进展作一概要介绍。

关键词: 黄河黑山峡 大柳树坝址 地震地质

引言

晚第三纪以来, 青藏高原在向北推挤的过程中, 由于受到阿拉善及鄂尔多斯地块的阻挡, 伴随高原的隆升, 在其东北缘形成了一系列十分醒目的弧形断裂带和相间排列的地块(图 1)。黄河黑山峡河段大柳树坝址位于海原断裂带与中卫-同心断裂带之间所夹的香山地块内, 与中卫-同心断裂带最近距离约 1.5km。

关于大柳树坝址的地震地质问题, 自上世纪 80 年代以来, 多个单位曾开展过研究工作, 所得结论分歧很大。这些分歧可以概括为以下 3 个主要方面: ①1709 年中卫南 7½级地震的地表破裂带长度是 53km 还是 110km? ②坝址区 F₃、F₇ 断层晚更新世以来是否被 F₂₀₁ 断层“牵动”? ③F₃、F₇ 断层在地壳深处是否归并于 F₂₀₁ 断层, 它们是否属同一地震构造?

对上述问题的不同认识, 直接影响到大柳树坝址的地震危险性评价, 以及坝址区是否可能产生地震地表破裂这一颠覆性问题的判断。

为解决大柳树坝址地震地质问题认识的分歧, 中国地震局震害防御司于 2003 年组织相关研究单位开展了补充论证工作。本文主要根据这次工作的结果, 对大柳树坝址区主要地震地质问题的研究进展作一综述。

1 中卫-同心断裂带的破裂分段

中卫-同心断裂带位于香山地块的东北缘, 长约 150km, 形成于加里东运动期。第三纪

1 中国地震局地球物理研究所, 分析预报中心, 地质研究所, 地壳应力研究所, 地球物理勘探中心, 2003. 黄河黑山峡河段地震地质补充论证工作报告。

[收稿日期] 2006-07-10

[作者简介] 陈国星, 男, 生于 1955 年。研究员, 博士生导师。主要研究领域: 工程地震、地震构造。

E-mail: chenguoxing@seis.ac.cn

及其以前, 断裂活动以叠瓦状向北逆冲为特征; 第四纪, 大致在早更新世末转变为逆左旋走滑活动(田勤俭等, 2001)。断裂带由东向西由北西—北北西向逐渐转为近东西走向, 活动性质也由逆左旋走滑转为正左旋走滑。断裂带地表结构复杂, 由东向西可分为: 刘岗井-碱沟、碱沟-粉石沟、粉石沟-孟家湾、麻雀湾-西梁头、孤山子-青山子、中卫小红山、沙井、罐罐岭、景泰小红山等 9 条次级断裂(图 2)。整个断裂带大致以西梁头、孤山子一带为界, 东、西两段的地貌特征明显不同。西梁头以东, 断裂位于香山、天景山北麓, 地貌特征明显, 断裂分布连续, 发生过 1709 年中卫南 $7\frac{1}{2}$ 级地震; 孤山子以西, 断裂连续性较差, 主要分布中卫小红山、罐罐岭、景泰小红山等第三系甚至第四系构成的小山包前缘; 西梁头与孤山子之间, 断裂被第四系覆盖。

对 1709 年中卫南 $7\frac{1}{2}$ 级地震地表破裂带长度一直存在不同的认识。目前, 主要有两种: ①1709 年地震破裂带东起双井子沟附近, 向西过黄河终止于大堆堆沟附近, 全长约 53km^1 ; ②1709 年地震破裂带是从红谷梁至青驼崖开始破裂, 向东、西两侧扩展, 主要是向西扩展, 分别终止于刘岗井东及小红山西, 全长约 110km^2 。

1709 年地震地表破裂带最为清楚的段落是沿中卫-同心断裂带碱沟-粉石沟、双井子-碱沟两条次级断层, 长约 27km , 宏观震中位于红谷梁一带, 但向东、西两端还断续出露一些破裂现象, 如向东在刘岗井, 向西在孟家湾、大堆堆沟等地, 这些地点的破裂特征与 1709 年地震破裂特征是一致的, 即地震破裂的垂直和水平位移是从红谷梁附近向两侧衰减的。因此, 第一种观点除了包含上述最为清楚、连续的 27km 外, 还包括震中附近向东、西两端延伸的断续破裂段, 向东延伸至刘岗井, 向西延伸到大堆堆沟。由于在中卫小红山还见有长约 6km 的地表破裂, 第二种观点就将 1709 年地震破裂带向西一直延伸到中卫小红山。但是中卫小红山地表破裂的垂直位移远远大于 1709 年地震震中的位移, 又远离 1709 年地震震中红谷梁约 80km , 这与地震破裂的衰减规律不符。因此, 第二种观点存在矛盾, 但它凸

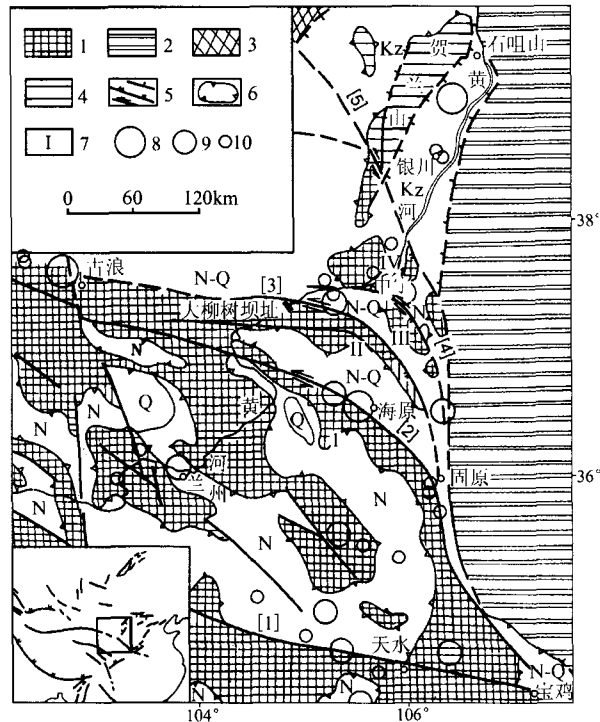


图 1 青藏高原东北缘地质构造略图

(据国家地震局地质研究所等 1990, 略有改动)

Fig. 1 Tectonic map of Northeastern Tibetan Plateau

(After Institute of Geology, CEA, 1990)

1 青藏块体; 2 鄂尔多斯块体; 3 阿拉善块体; 4 银川-吉兰泰地堑系中的地垒式山体; 5 断裂; 6 盆地; 7 条状块体编号; 8 $M \geq 8$ 级地震; 9 $7 \leq M < 8$ 级地震; 10 $6 \leq M < 7$ 级地震; I 南、西华山-六盘山地块; II 香山地块; III 烟筒山地块; IV 牛首山-罗山地块; [1] 西秦岭北麓断裂带; [2] 海原断裂带; [3] 中卫-同心断裂带; [4] 烟筒山断裂带; [5] 龙首山-牛首山断裂

1 国家地震局分析预报中心, 1991. 黄河黑山峡河段主要断裂活动及大柳树坝址地震危险性分析报告.

2 兰州地震工程研究院, 2002. 黄河黑山峡大柳树坝址及小观音坝址区域构造稳定性研究报告.

显了一个悬而未决的问题,即长约 6km 的中卫小红山地表破裂是如何形成的?2002 年,在中卫小红山以西发现了与中卫小红山地表破裂特征完全一致的长约 60km 的一条地震破裂带(柴焯章等,2003)。这一发现为合理解释中卫小红山地表破裂的归属问题,提供了新的资料。

由于对 1709 年地震破裂带长度的不同认识,关系到中卫-同心断裂带的破裂分段及震级上限问题,直接影响大柳树坝址的地震危险性评价。因此,本次工作在中卫-同心断裂带东、西两段破裂的运动学特征以及覆盖在地表破裂之上的新地层确切年代等方面开展了深入细致的研究。

1.1 断裂带同震位移分布

大地震所产生的地表破裂带往往都伴有断层陡坎的出现。新产生的陡坎自由面清楚,坡角大,随着时间流逝,受侵蚀作用,陡坎高度逐渐降低,坡角变缓,自由面消失,被碎屑坡代替。因此,越老地貌面上的陡坎形成也越老,经历的破裂事件越多,垂直位移也越大。陡坎剖面往往有多个坡折,坡折角度最大的段落一般是最新一次破裂事件所形成;最新地貌面,如最新一期洪积扇、冲沟一级阶地等面上的断层陡坎高度一般较低,陡坎剖面坡角较大,没有多个坡折的现象,往往是断裂最新一次活动形成的。

根据上述基本原理,在中卫小红山、罐罐岭、景泰小红山、骆驼水一带对中卫-同心断裂带最新一次活动所形成的断层陡坎进行识别与测量,同时利用国家地震局地质研究所¹在双井子、红谷梁、乱岔沟一带的测量资料,得到了中卫-同心断裂带最新一次破裂事件的垂直位移特征(图 3):①大致以孤山子为界,东段垂直位移普遍小于 1m,最大值为 1.1m;西段垂直位移普遍大于 2m,最大值位于中卫小红山段,为 3.4m;②东段垂直位移主要分布在 1709 年地震震中碱沟附近,向西过黄河后基本没有明显垂直位移,而西段破裂的垂直位移分布非常连续,除了在次级断裂的连接部位消失外,在每个次级段落中均见到了连续的地表破裂带;③黄河以西至孤山子,长约 30km 的段落,未见明显垂直地表位移。

中卫-同心断裂带西段水平位错明显,最大值位于罐罐岭段马家井沟中部,两个南北向延伸的小山脊之间夹持一条小冲沟,断层将两个山脊及冲沟同步左旋错动,错距 4—6m,错动处保留着清晰的眉脊面和断层陡坎。

通过对中卫-同心断裂带西段最新一次活动的水平位移测量,并与前人对东段最新一次活动的水平位移研究结果对比,得到中卫-同心断裂带东、西两段最新一次活动的水平位移特征(图 4):①大致以孤山子为界,分为东、西两个比较连续的位移分布曲线,东段最大值为 5.6m,位于红谷梁西,大部分为 5m 左右;西段最大值为 6m,位于罐罐岭马家井沟中部,大部分为 3m 左右;②西段最大位移甚至还大于东段最大位移。

由上述可见,中卫-同心断裂带大致以孤山子为界,东、西两段垂直位移与水平位移特征明显不同。1709 年地震的震中位于红谷梁附近,最大垂直位移 1.1m,水平位移 5.6m,向西其位移逐渐减小,它不可能在距离震中区红谷梁约 80km 以外的中卫小红山以西产生长约 60km、垂直位移普遍在 2m 以上、水平位移甚至还大于 1709 年震中区的地表破裂。因此,西段地表破裂带应该是另一次地震事件所造成的。

1 国家地震局地质研究所,1987.黄河大柳树坝址地震基本烈度复核报告.

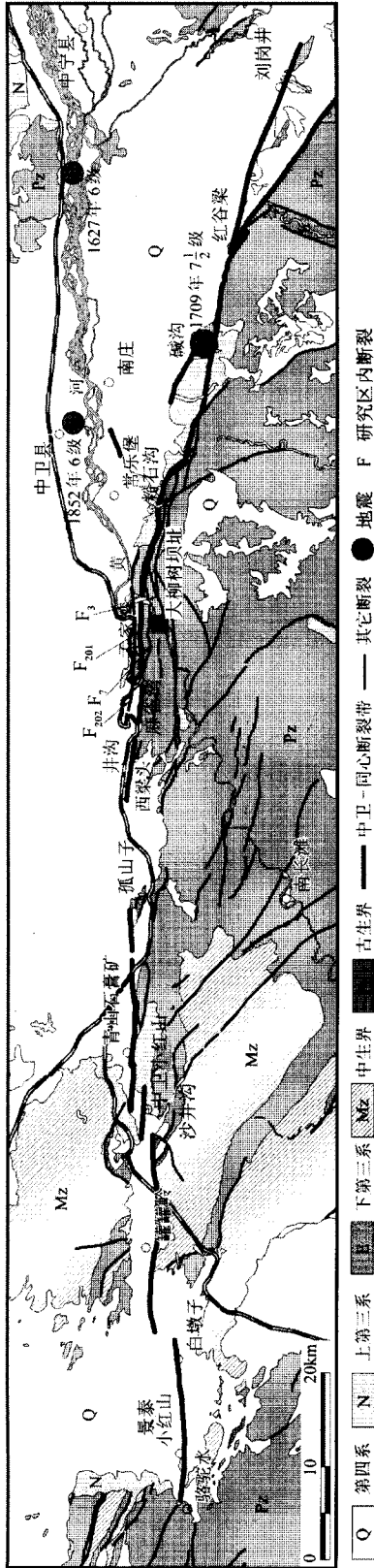


图 2 中卫-同心断裂带及邻区地质构造图

Fig. 2 Tectonic map of Zhongwei-Tongxin Fault zone and its adjacent area

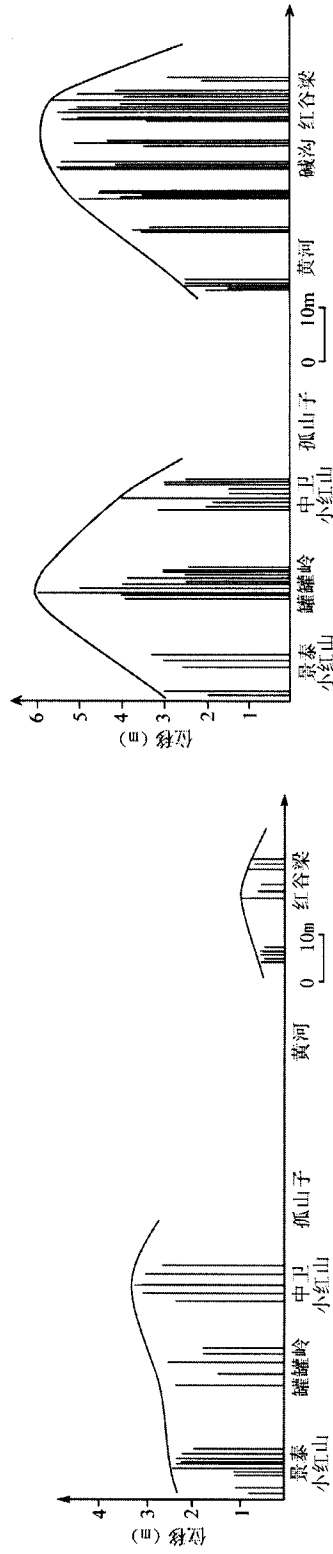


图 3 中卫-同心断裂带垂直位移分布图

Fig. 3 Distribution of vertical displacement along Zhongwei-Tongxin Fault zone

图 4 中卫-同心断裂带水平位移分布图

Fig. 4 Distribution of horizontal displacement along Zhongwei-Tongxin Fault zone

1.2 最新破裂事件年代厘定

中卫-同心断裂带东段的地表破裂是 1709 年地震所造成的, 距今不到 300a, 历史上有明确的记载。而迄今为止中卫-同心断裂带西段没有发现历史强震记载, 因此, 西段破裂可能是更早的一次地震破裂。

在地表破裂形成后, 由于后期的侵蚀堆积作用, 在比较低的地貌位置可能形成覆盖于地震断层之上的最新堆积物, 根据这些最新堆积物的年代, 可以确定地震断层最新一次活动的大致时间。通过对西段破裂带的追索, 在中卫小红山、罐罐岭和景泰小红山等地, 分别在横跨地震破裂带的最新地貌面上进行开挖, 揭露了覆盖于断层之上、厚几十厘米到 1m 的最新沉积。

在中卫小红山西端, 断裂错断一冲沟的 I 级阶地, 形成地貌陡坎, 垂直此陡坎开挖探槽 (图 5)。断层上部覆盖厚约 1m 的冲积砂, 在覆盖层的底部和被断地层的顶部分别采样进行光释光测年, 其年龄分别为距今 700a 和 1200a, 表明最新一次破裂事件发生于距今 700—1200a 之间。

在景泰小红山东侧冲洪积扇上, 沿断裂延伸线在一低洼地段开挖探槽, 揭露出两套地层 (图 6): 冲洪积砾石层和冲积黄土层。另外还揭露出 4 条断层, 分别组成宽十几厘米到三十几厘米的破裂带, 带内砾石定向排列。南侧 2 条断层组成主破裂带, 断错黄土层③和黄土层①底部, 并形成崩积楔层②, 所有断层都被黄土层①中上部所覆盖。在层①中部采样, 进行光释光测年, 结果为 $1200 \pm 100a$, 表明最新一次破裂事件发生于 $1200 \pm 100a$ 之前。

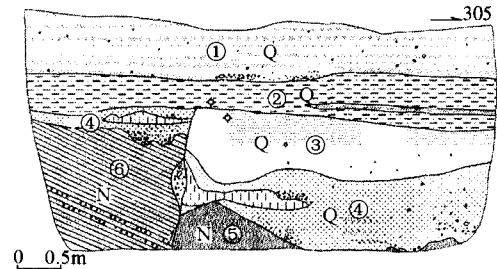


图 5 中卫小红山河漫滩探槽剖面图

Fig. 5 Sketch profile of the man-made trough at riverside of Zhongwei Xiaohongshan

- ①浅土红色细砂层, 偶含砾石, 具水平层理; ②淡红色粉细砂土, 夹土红色细砂透镜体; ③青灰色细砂层, 层理不明显;
- ④灰红色中粗砂层, 含砾石, 夹土红色粉细砂土; ⑤红色泥岩, 破碎, 层理不清; ⑥橘红-灰白色砂岩、砂砾岩, 向北缓倾, 较破碎

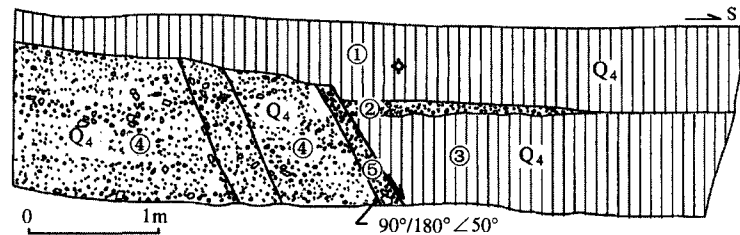


图 6 景泰小红山冲积扇上探槽剖面

Fig. 6 Sketch profile of the man-made trough in alluvium of Jingtai Xiaohongshan

- ①黄土; ②砂砾石层 (崩积楔); ③黄土, 偶含细砾及细砂砾石层;
- ④青灰色砂砾石层, 具水平层理; ⑤断裂带, 砾石顺断面定向排列

上述结果说明中卫-同心断裂带西段最新地表破裂事件应发生于距今 1200—700a 间, 而非 1709 年地震形成。

1.3 大震复发间隔确定

自上世纪 80 年代以来, 多家单位¹都曾对中卫-同心断裂带东段的古地震重复间隔进行了

1 同 187 页页下注 1 和 188 页页下注 1

研究。本次黑山峡河段地震地质补充论证工作, 通过综合研究, 认为中卫-同心断裂带东段全新世以来发生过 2 次古地震和 1709 年 1 次历史地震(表 1), 其最小重复间隔约为 3400a, 平均重复间隔约为 4300a。

中卫-同心断裂带西段的中卫小红山开展过古地震研究¹(闵伟等, 2001), 再向西的段落是 2002 年才发现的, 因此, 还没有开展过此项研究。本次工作在罐罐岭、景泰小红山等地开挖了一些探槽, 但在人力所能开挖的深度内(2.5m)只发现了最新一次事件, 即发生于距今 700—1200a 之间的一次事件。通过综合上述研究结果, 认为中卫-同心断裂带西段曾发生过 5 次古地震事件(表 2)。全新世以来最大重复间隔约 7000a, 最小重复间隔约 5500a, 平均重复间隔约 6250a。

表 1 中卫-同心断裂带东段古地震事件(单位: a) 表 2 中卫-同心断裂带西段古地震事件(单位: a)
Table 1 Paleoearthquakes on the east segment of Zhongwei-Tongxin fault zone (unit: a) Table 2 Paleoearthquakes occurred on the west segment of Zhongwei-Tongxin fault zone (unit: a)

序号	事件窗的范围 (距今)	估计发生时间 (距今)	与上次事件 间隔	序号	大致发生时间(距今)	与上次事件大致间隔
E1	(8400±600)—(9300±362)	8850±350		E ₁	30970±2450 以前	
E2	(5100±120)—(5800±460)	5450±238	3400±211	E ₂	25000	6000a 左右
E3	1709 年地震	294	5156±119	E ₃	14060±125 以前	10000a 左右
				E ₄	6750±350	7000a 左右
				E ₅	1200	5500a 左右

由上述可见, 中卫-同心断裂带东、西两段古地震事件不具可对比性, 并且东段大震频度较高, 复发间隔较短。

综上所述, 中卫-同心断裂带最新一次强震地表破裂带, 大致以孤山子为界, 可以分成活动特征明显不同的东、西两段, 东段破裂长约 74km, 是 1709 年中卫南 $7\frac{1}{2}$ 级地震形成的; 西段长 68km, 不是 1709 年地震破裂向西段的延伸, 而是另外一次地震所形成。根据在中卫小红山、罐罐岭和景泰小红山最新地震断层上覆盖的最新沉积物的年代分析, 西段最新一次破裂事件发生于距今 700—1200a 之间。

中卫-同心断裂带的破裂分段长度与由本区地震烈度长轴衰减关系计算得到 7.5 级地震 8 度区(地表明显变形, 存在可见位移)长轴尺度 66km 相当。9 度极震区 33km 与地表显著位移段(1709 年地震地表破裂带最清楚的双井子-粉石沟段)也大致吻合。说明上述破裂分段结果也符合地震学机理。

2 大柳树坝址区断裂的“牵动”问题

大柳树坝址区主要断裂有 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_7 、 F_{12} 和 F_{201} (图 7)。

F_{201} 断裂最初是由原水利电力部西北勘测设计院 20 世纪 80 年代在黄河以西的长流水沟口发现并命名的, 断裂距大柳树坝址的最近距离为 1.5km, 是指孟家湾至长流水沟口黄河西岸的一段断裂, 长约 6km, 与西侧的西梁头-麻雀湾断裂和东侧的碱沟-粉石沟断裂呈左阶错列关系, 是中卫-同心断裂带东段内的一条次级地表断裂, 1709 年地震时, 该断裂发生过左旋位错, 但位移量只有 1.5—2m, 比震中红谷梁一带的最大位移 5.6m 小得多。

1 国家地震局兰州地震研究所, 1989. 黄河黑山峡小观音坝址与大柳树坝址构造稳定性对比研究.
国家地震局分析预报中心, 1991. 黄河黑山峡河段主要断裂活动及大柳树坝址地震危险性分析报告.

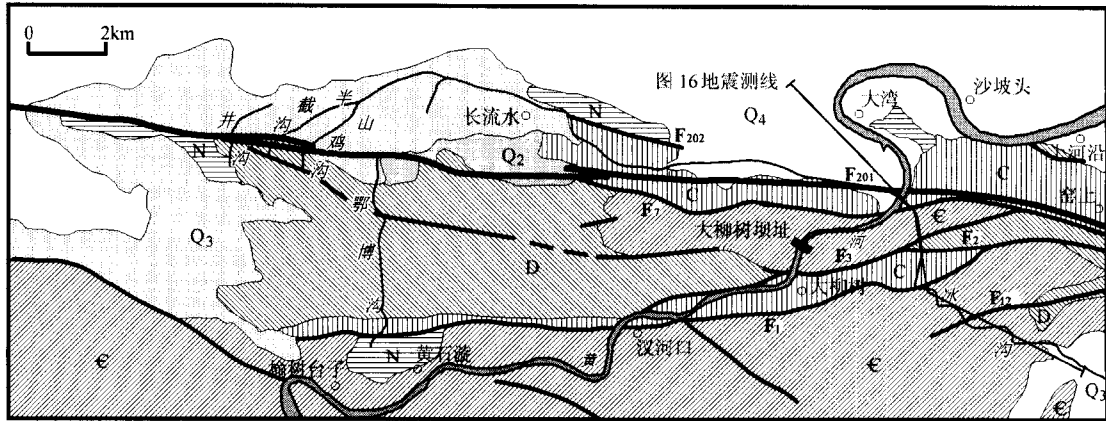


图 7 大柳树坝址区地质构造图

Fig. 7 Map of geological structure near Dalishu dam site area

粗实线为活动断裂 F₂₀₁, 细实线为其它断裂

F₃ 断裂位于大柳树坝址以南, 距坝址最近距离 600m。该断裂东起 F₇, 向西在下大柳树村北穿过黄河后, 可能与井沟一带的北西向断裂相连, 总体走向北东东, 倾向北北西, 主要发育在古生界地层中, 表现为寒武系、泥盆系逆冲于石炭系之上。

F₇ 断裂位于大柳树坝址以北, 距离坝址最近距离 800m, 西起麻雀湾, 向南经夜明山北麓, 过黄河、冰沟, 沿烟筒山北麓延伸, 在粉石沟附近被北北西向断层所截切, 总体走向近东西, 倾向南, 南盘寒武系和泥盆系逆冲于石炭系之上。

关于这些断裂的活动性, 不同单位近年来的研究结果基本一致, 即认为 F₂₀₁ 是活动断裂, 坝址区其它断裂晚更新世以来已不再活动, 不属于活动断裂。产生分歧的焦点是, 中卫-同心断裂带由于与 F₃、F₇ 在井沟、麻雀湾附近距离较近, 且可能存在交切、归并关系, 在这些部位, 中卫-同心断裂带的新活动是否对 F₇ 和 F₃ 产生“牵动”效应?

2.1 井沟附近“牵动”问题研究

井沟位于黄河以西, 距大柳树坝址约 15km。自井沟沟口向南约 200m 范围内, 发育有 5 条断层, 自北向南编号为 F_{#1}、F_{#2}、F_{#3}、F_{#4}、F_{#5} (图 8), 除 F_{#2} 外, 其它断层均错断了晚更新统以来的地层。其中 F_{#3} 位于井沟沟口以南约 150m, 走向近东西, 在井沟西岸开挖的探槽剖面 (TC2) 中, 断层错断了下部风积砂, 被 0.2—0.5m 厚的砂土和约 1m 厚的冲积砂砾石层覆盖, 沿断层向东追索, 地貌面微向北倾, 向西被风积砂覆盖。F_{#4} 位于 F_{#3} 以南 35m, 发育在泥盆系和第三系之间, 产状 260°/170°∠35—62°, 断层错断晚第四纪冲积粉砂土和砾石层, 被厚 0.3—0.7m 的冲积砂砾石层覆盖, 向东在半截子沟 III 级阶地面上开挖的探槽 (TC9) 显示 F_{#4} 错断阶地砾石层, 顶部被黄土覆盖, 向西断层走向北西西, 沿山前第三系前缘展布。F_{#5} 走向近东西, 断面向南陡倾, 南盘泥盆系向北逆冲于第三系之上, 向东沿断层地貌上存在向北倾斜的地形斜坡, 向西延伸进入第三系, 被风积砂覆盖。

从断裂发育的空间位置及最新活动性分析, F_{#3} 是中卫-同心断裂带全新世地表破裂的主断面。这是各相关研究单位均一致的认识。

上述断层均发育在山前一级台地下方, 并不同程度地切割了一级台地, 在一级台地以南, 发育山前二级台地, 相当于井沟等冲沟的 4 级阶地 (T₄), 在二级台地前缘或二级台地与一级

台地之间的斜坡地带，发育有北西向黄土陡坎。

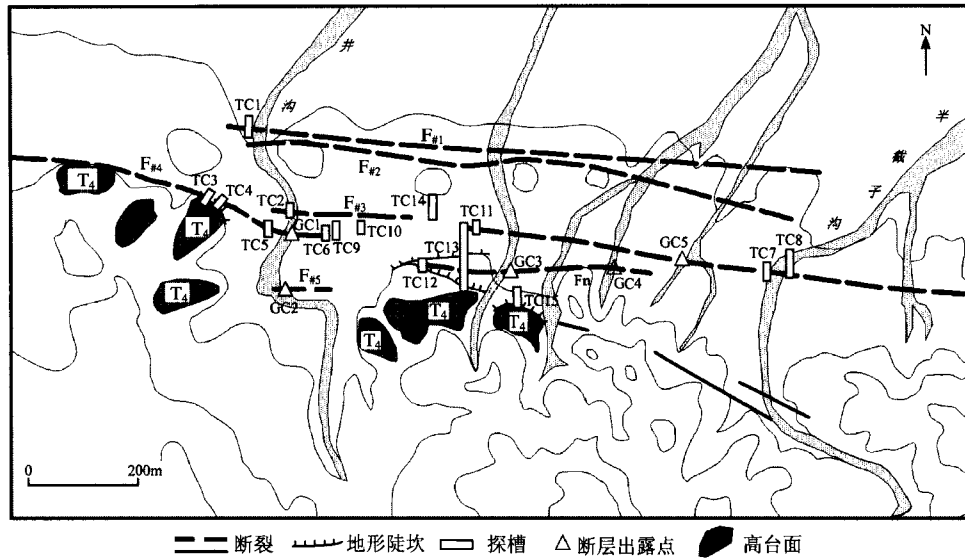


图 8 井沟一半截子沟一带断裂分布图

Fig. 8 Distribution of faults in Jinagou-Banjiezigou area

在井沟山前主活动断裂带以南，泥盆系地层强烈变形，其内发育北西向断裂。北西向断裂带在半截子沟一带、鄂博沟以东、弯脖子沟脑断续出露。一种观点认为，这些北西向断裂断续相连，向东南在大柳树坝址以南与 F_3 断裂相连，向西北，在井沟山前地带与二级台地与一级台地间发育的黄土陡坎及 $F_{\#4}$ 相连，这些黄土坎为断层陡坎，反映了北西向断裂的新活动，因此，中卫-同心断裂带对 F_3 具有“牵动”效应。由于 F_3 距大柳树坝址很近，其构造活动性直接关系到该坝址能否成立。

为了确定这些黄土坎是否为断层陡坎，本次工作在黄土坎下，布设了探槽 TC11、TC12、TC15；为了查明该区活动断裂的分布，在井沟东侧的一级台地面上，开挖了自最南侧的黄土坎至主断裂以北泥盆系山包，长约 200m 的南北向探槽 TC13、TC14，为了进一步确定断裂的走向，还开挖了探槽 TC9、TC10，清理沟壁 GC3、GC4、GC5。在半截子沟及山鸡沟对北西向断裂的展布及活动性作了详细的追踪调查。

探槽 (TC12) 开挖于距 $F_{\#4}$ 出露点东南 140m 左右的黄土坎下，揭露晚第四纪断层，产状 $85^\circ/355^\circ \angle 65^\circ$ ，正断，断错灰白色砂土层，垂直错距 30cm，上覆厚约 0.5m 的土黄色松散细砂层未断 (图 9)。

在 TC12 以东约 70m 的黄土陡坎向北开挖了长 120m 的近南北向探槽 TC13，在距黄土陡坎以北 30m 的山坡上，发现断层剖面，而在黄土陡坎下并没有发现断层。而探槽中揭露的断层发育在泥盆系地层内部，产状 $100^\circ/190^\circ \angle 70^\circ$ ，正断，断错上覆第四系砂砾石层。基岩顶面垂

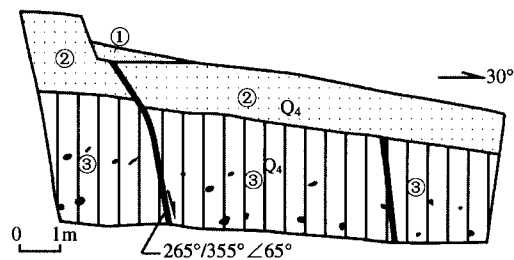


图 9 TC12 探槽剖面图

Fig. 9 Sketch profile of the man-made trough at TC12

- ① 陡坎下堆积的细沙；② 土黄色细粉砂，具近平层理；
- ③ 灰白色细粉砂土，含钙结核

直断错 0.6m, 顶部被厚 0.8m 的砂土层覆盖, 该砂层 OSL 年龄值为 $34.5 \pm 2.7\text{ka}$ (图 10)。

在 TC13 以东约 60m 的冲沟内, 冲沟东壁发现断层剖面 (GC3), 断层产状 $80^\circ/10^\circ \angle 65^\circ$, 正断, 断层发育在泥盆系破碎带内, 断错泥盆系及第四系 (图 11)。在 GC3 以东 200m 的冲沟东壁, 出露断层剖面 GC4, 断层发育于泥盆系地层内部, 产状 $100^\circ/10^\circ \angle 65^\circ$, 断错冲沟砂砾石层。该点还具有一定的地貌显示, 在山梁表现为地貌沟槽。

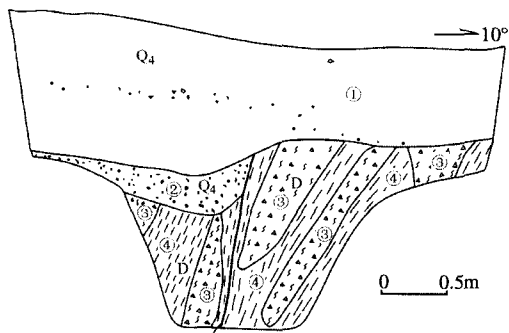


图 10 探槽 TC13 局部剖面图

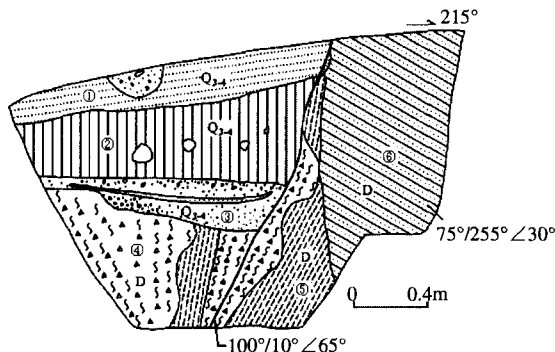


图 11 GC3 观测点断层剖面

Fig. 10 Part of sketch profile of the man-made trough at TC13

Fig. 11 Sketch profile at GC3

- ①土黄、土灰色中-细砂, 含少量灰白色棱角状碎石, 中部有断续分布的砾石层;
- ②土黄、土灰色中-细粒碎石、砂混合层;
- ③灰白色泥盆系长石英砂岩;
- ④紫红色泥盆系泥岩和粉砂岩;
- ⑤与④构成断层碎裂岩
- ①深土黄色细砂, 层理清楚, 较致密;
- ②黄土状土, 偶含砾石;
- ③土红色含砾中粗砂夹土黄色粉砂;
- ④浅灰白色细砾粗砂岩;
- ⑤紫红色泥岩破碎带;
- ⑥砖红色粉细砂岩

TC15 位于 TC13 东北约 80m 的黄土陡坎下, 未发现断层。

上述探槽及断层出露点揭示: 在主活动断裂带以南, 存在晚第四纪断裂 Fn。该断裂发育在泥盆系地层中, 总体走向近东西, 断面较陡, 以北倾为主, 局部表现为南倾, 断裂断错第四系冲沟堆积物及风成砂地层, 剖面表现为正断层性质。该断裂延伸长度约 700m, 向东交汇于主活动断裂 (图 8)。

在井沟东约 1km 的半截子沟, 沟口最新活动断裂带以南约 200m 泥盆系紫红色砂岩夹泥岩中存在多条北西向断层, 断层主要表现为沿泥岩夹层的顺层滑动, 未见断裂第四纪活动现象。

在半截子沟及山鸡沟, 均可见北西向断裂被二级阶地砾石层覆盖; 在红石梁北, 断层上覆厚 0.5m 的冲沟砾石层和厚 1m 的含砾砂土层 (图 12) 未被断错。说明北西向断裂在半截子沟一带晚第四纪无活动。

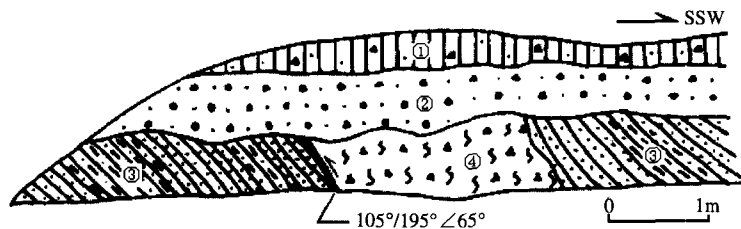


图 12 红石梁北断层剖面

Fig. 12 Sketch profile of the faults at North of Hongshiliang

- ①黄土状含砾砂土;
- ②紫红色冲积砂砾石层, 具水平层理;
- ③泥盆系紫红、灰白色砂岩、粉砂岩;
- ④泥盆系破碎带

根据上述工作结果，可以看出井沟山前主活动断裂及其以南分布的活断层近东西向分布，与黄土坎分布方向和北西断裂分布方向不一致；活断层地表表现为张性走滑活动，北西向断裂是泥盆系内部局部出露的小规模的逆断裂，二者活动性质不同。因此认为，井沟山前分布的一系列近东西向活动断裂，是中卫-同心断裂带的组成部分，与井沟以南分布的北西向断裂在展布方向、活动性质方面不同，没有地质证据表明井沟一带的最新断裂活动对坝址区 F_3 断裂产生了牵动作用，井沟山前分布的北西向黄土陡坎可能为侵蚀陡坎。

2.2 麻雀湾附近“牵动”问题研究

麻雀湾附近主要分布有 2 条断层，即 F_{201} 与 F_7 断层（图 13）。有的研究单位根据麻雀湾附近 F_7 与 F_{201} 断层的“斜接”关系，认为在斜接部位， F_{201} 断层的新活动“牵动”了 F_7 断层。

为此，在麻雀湾附近开展大比例尺（1:1 万）断裂构造填图（图 13），追踪 F_7 断层延伸状况，查明它在靠近 F_{201} 断层处的活动性。

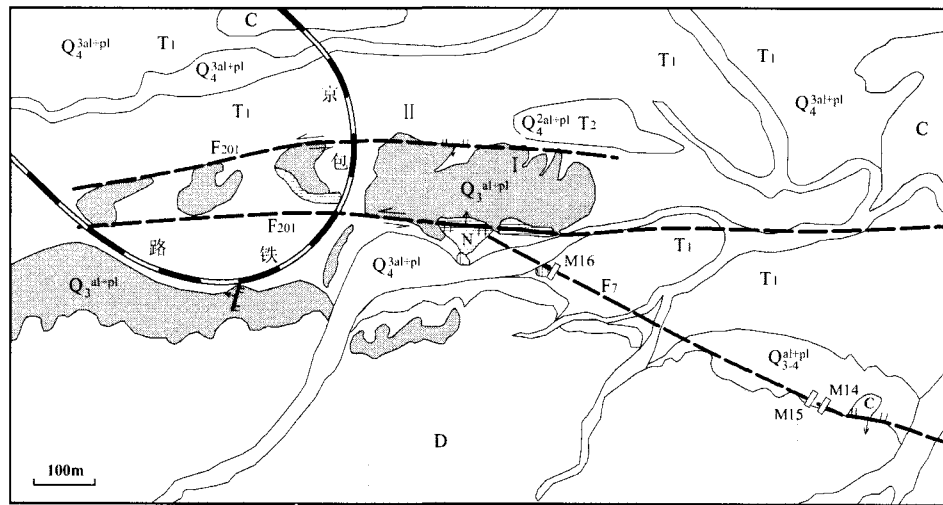


图 13 麻雀湾附近断裂形迹分布图

Fig. 13 Distribution of faults in Maquewan area

F_{201} 断层在麻雀湾附近表现为倾向相反的南、北两支，二者相距约 180m。 F_7 断层在孟家湾南一带展布清楚，表现为寒武系逆冲到石炭系之上，断层覆第四系未见错断。通过野外追踪、控制性剖面测量与探槽开挖，在制图区内追踪到了断层 F_7 的展布情况，表现为泥盆纪砾岩、砂岩逆冲到石炭纪地层上，总体走向为 290° — 305° ，其延伸方向指向前人指认的交汇点位置。

M14 点南侧为泥盆纪砾岩组成的山区，该点及北侧为山前坡积、洪积堆积，地表为裸露的泥盆纪和石炭纪基岩，没有断裂新活动的微地貌显示，经过剖面开挖，在石炭纪地层中揭示出一条宽约 2m 的断层带（图 14），该断层破碎带应是 F_7 断层破碎带的一部分。断层带上部覆盖厚约 4m 的坡积砾石、砂土层没有被断错，它们是晚更新世晚期—全新世的产物。自该点向西的断层沿线上发育冲沟阶地，阶地高度 1.5—2.0m，在阶地面上不存在断层活动的微构造地貌。

M16 点位于麻雀湾公路南、长流水沟的一条支沟 T_1 阶地上，阶地拔河高度 1.0—1.5m，阶地面平坦。阶地堆积物为冲洪积砾石、粗砂和黄土，砾石成分主要为泥盆纪砂砾岩，棱角

状。在平坦的 T₁ 阶地面上，孤立地发育一个由泥盆纪破碎的砂砾岩组成的浑圆状山丘，高出阶地面约 7m，与其南侧的基岩山地相距约 50m。在小山丘东侧开挖了一个长 11m，宽 2.5—5.0m，深 4m 左右的探槽，距 F₂₀₁ 断层直线距离为 50m 左右。探槽揭示出泥盆纪砂砾岩逆冲在石炭纪页岩、煤层之上，主断层 f₃ 断层走向 290°，没有断错上覆第四系（图 15）。距地表 2.5m 处的粉砂 OSL 年龄为 6.04±0.74 万年，说明 F₇ 断层在该处至少距今 6.04±0.74 万年以来没有活动。

由上述可见，麻雀湾附近 F₂₀₁ 断层是一条全新世活动断层，但在 F₇ 断层与之交汇附近，F₇ 断层没有新活动的地貌显示，没有断错断层上覆第四系，上覆第四系年龄为距今 6 万年前，说明在晚更新世以来的漫长地质时期内，F₂₀₁ 断层虽有多次强烈活动，但 F₇ 断层并未受其“牵动”而局部复活。

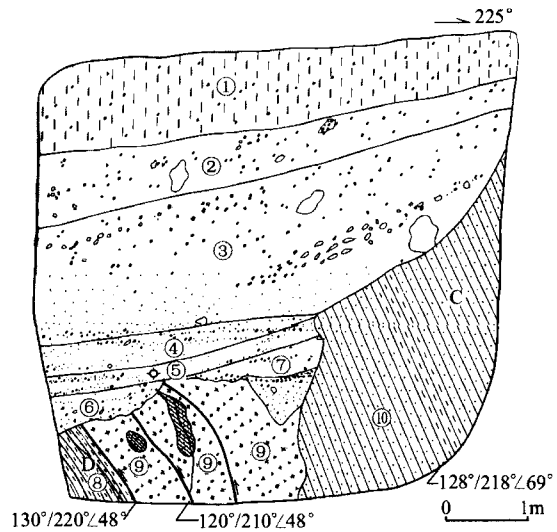


图 14 M14 点探槽东壁剖面
Fig. 14 Sketch of the east profile of the man-made trough at M14

- ①灰白色风积粉砂，含砾石；②灰褐、灰白色粉细砂，含砾石；③深灰色粉土夹砾石堆积；④灰色坚硬砂土；⑤灰色松散粉砂；⑥灰色粉砂土与砾石混合堆积；⑦灰色砂岩夹薄层泥质页岩；⑧黑灰色页岩、碳质页岩、泥岩；⑨褐红色、褐黄色、深灰色泥岩、粉砂岩团块、碳质页岩、碎裂煤层组成的断层破碎带；⑩灰色砂岩夹页岩

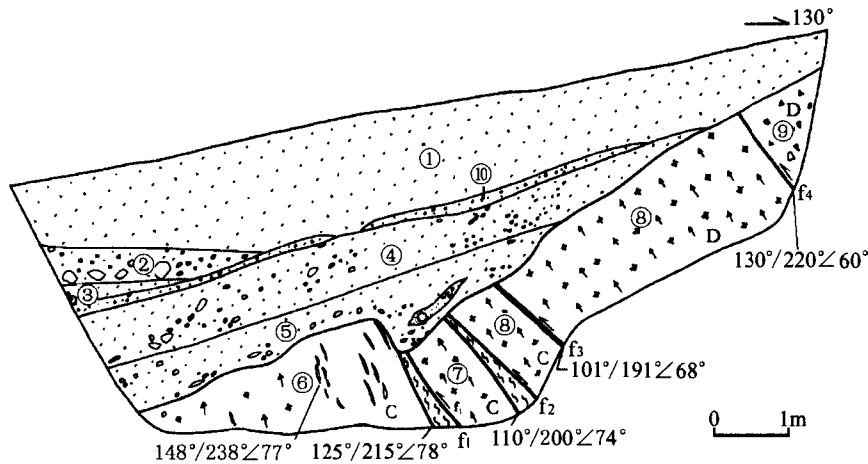


图 15 M16 点探槽剖面
Fig. 15 Sketch profile Sketch of the man-made trough at M16

- ①土黄色风积粉细砂；②浅褐灰色砾石层；③土黄色中细砂，砾石；④土红色含砾中砂，表面风化成红褐色；⑤土黄色含砾粉砂，局部夹风积砂透镜体；⑥灰黑色碎裂状碳质泥页岩夹煤层，构造透镜体及片理化强烈；⑦黑色碎裂状碳质泥页岩，夹黄灰色薄层砂岩角砾；⑧铁锈色、紫红色碎裂状砂岩；⑨紫红色弱碎裂状砂岩；⑩紫红色钙质粉砂、细砾石，部分砾石表面沉积白色钙膜

3 大柳树坝址区深浅构造关系

沿冰沟，横穿大柳树坝址区各条断裂布置了一条长 11km，探测深度约 10km 的地震反射剖面（剖面位置见图 7）。通过对地震剖面的解释，得到了大柳树坝址区各断裂的深浅构造关系。

(1) 大柳树坝址近场区内 F_{202} 、 F_7 、 F_1 、 F_{12} 等为向南倾斜的铲形逆冲（掩）断层，它们向下延伸均未与 F_{201} 断层归并，而是以较低的角度归并、终止于深约 9km 的反射界面上，该界面北高南低，向北撒开，向南汇聚，可能是香山地块新构造期向北推覆的根部滑脱带（图 16）。

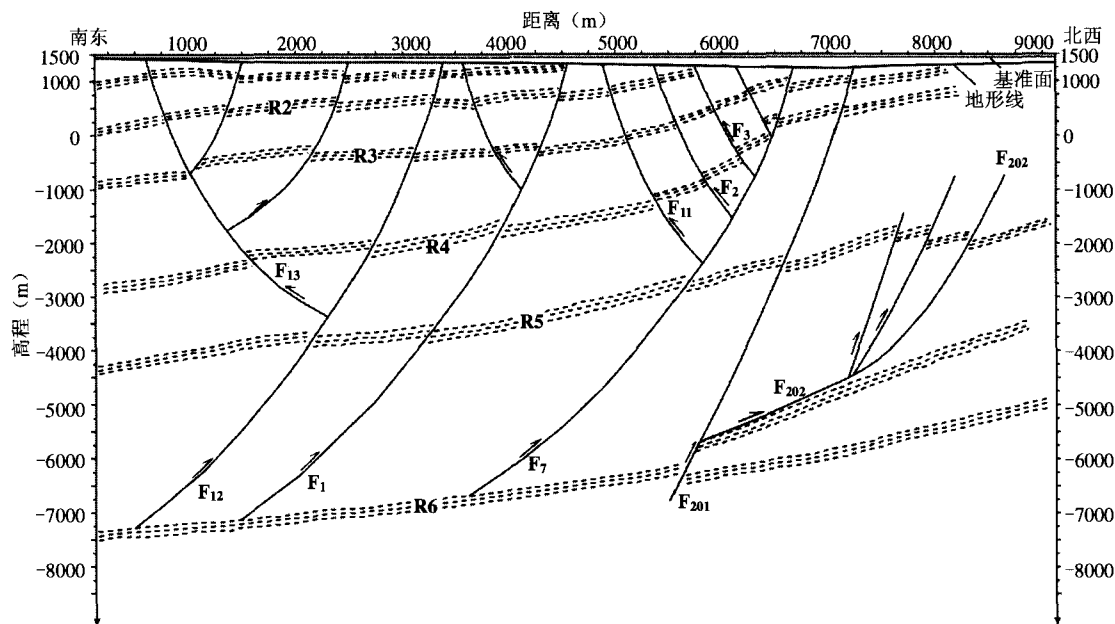


图 16 冰沟中深层地震勘探剖面线划图

Fig. 16 Sketch map of seismic exploration profile in Binggou

(2) 坝址区中 F_2 、 F_3 、 F_{11} 等诸多向北倾斜的断层，地表规模小，地下切割深度亦浅，它们均在 3km 以浅终止于 F_7 断层面上， F_7 断层限制了坝址区中诸多次级断层的切割深度，可能是一条阻隔深部震源破裂垂直向上扩张的主要断层界面。

(3) F_{201} 断层切穿了香山地块新构造运动早期形成的上述构造变形体系，在地震勘探所及的深度范围内 ($>10\text{km}$)，其倾角较陡，向下未见明显变缓，在深约 7km 和 10km 处分别切穿了香山地块北缘 F_{202} 断层和地块深部的滑脱带，并向下继续延伸。该断层南、北两侧介质物性和应力状态也有所不同。结合地面地质调查资料，可以判定： F_{201} 断层是与香山块体中先存的诸多断层形成机制不同的、以走滑活动为主的发震断层，并且它与坝址区其它断层没有空间上的联系。

4 结语

通过上述分析论证，对大柳树坝址区主要地震地质问题的认识归纳如下：

(1) 中卫-同心断裂带是进入大柳树坝址区内的一条区域性活动断裂。该断裂以孤山子

和西梁头之间的分界区为界,可分为东、西两个破裂段。东段长约 74km,是 1709 年中卫 $7\frac{1}{2}$ 级地震的发震构造;西段长 68km,也曾发生过断错地表的强震,其强度与 1709 年中卫 $7\frac{1}{2}$ 级地震基本相当。

(2)大柳树坝址区及附近发育有多条断裂,其中 F_{201} 断层为中卫-同心断裂带的组成部分,是指孟家湾至长流水沟口黄河西岸的一段断裂,长约 6km,是活动断裂,是 1709 年中卫 $7\frac{1}{2}$ 级地震的次级地表破裂带。其它断裂晚更新世以来已不再活动,也没有发现被 F_{201} 断层牵动的现象。

(3)横穿坝址区不同断裂的地震勘探资料表明: F_3 、 F_7 、 F_{202} 为上陡下缓的铲形逆冲断层,根部汇聚在深 9km 左右的滑脱带上, F_{201} 断层为相对陡倾角的断层,该断层切割 F_{202} 断层及下部滑脱带。 F_{201} 断层与 F_1 、 F_3 、 F_7 、 F_{202} 等断层形成机制不同、成生时代不同、活动性质不同,并且在空间上没有联系,是不同构造体系的断层。

致谢:黄河黑山峡河段地震地质补充论证工作中得到了张裕明研究员、汪一鹏研究员、刘光勋研究员的指导,在此表示衷心感谢,并以此文贺张裕明先生七十寿辰。

参考文献

- 柴炽章,焦德成,廖玉华等,2003.宁、蒙、甘交界罐罐岭发现地震地表破裂带.地震地质,25(1):167—168.
 闵伟,张培震,邓起东,2001.中卫-同心断裂带全新世古地震研究.地震地质,23(3):357—366.
 田勤俭,申旭辉,韦开波,陈正位,2001.中卫-同心断裂带构造演化阶段初步研究.见:卢演铸,高维明,陈国星,陈杰主编,新构造与环境.北京:地震出版社,399—406.

Some Seismo-geological Questions Regarding to Daliushu Dam Site in Heishanxia Valley of Yellow River

Chen Guoxing¹⁾, Tian Qinjian¹⁾, Zhou Bengang²⁾, Min Wei²⁾, Liu Baojin³⁾
 and Gao Zhanwu¹⁾

1) Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

3) Geophysical Prospecting Centre, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract According to “Supplement Report on Seismology and Geology of Heishan Valley of Yellow River”, some main problems regarding to selecting the site of Daliushu Dam are discussed. These problems include: the length of surface rupture caused by Zhongwei earthquake with magnitude 7.5 in A.D.1709, the size of fault F_{201} , whether F_3 and F_7 have been activated by fault F_{201} since late-Pleistocene, and relationship between faults in shallow crust and faults in deep crust under Daliushu dam site.

Key words: Heishanxia valley of Yellow River; Daliushu dam site; Seismology and geology