叶欣玲,司富生,冀康.哈密盆地北缘断裂东段—口子村东断裂空间发育特征研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1447-1457.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250227001

Ye Xinling, Si Fusheng, Ji Kang. Spatial distribution characteristics of the Kouzicun East fault in the eastern segment of the northern margin fault of the Hami Basin[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1447-1457. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250227001

哈密盆地北缘断裂东段—口子村东断裂空间发育特征研究

叶欣玲[1], 司富生[1], 冀 康[2]

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710100;
2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西 西安 710000)

摘要:针对哈密盆地北缘断裂东段研究薄弱、制约重大工程选址的突出问题,以新发现的口子村东断裂为研究对象,旨在查明其精确空间展布、产状特征与构造规模。综合运用地质地貌调查、地球物理探测、钻孔联合剖面勘探、探槽开挖、平洞岩体结构分析及洞壁弹性波测试等多技术手段开展系统研究。结果表明:该断裂隶属哈密盆地北缘断裂东段,为逆冲型活动断裂;断裂走向5°~15° NE、倾向SE、倾角40°~50°,核心破碎带宽约60 m,上、下盘影响带宽度分别约为60 m和30 m。研究成果可为哈密盆地北缘断裂东段后续研究提供关键数据支撑与理论参考,为活动断裂工程地质勘察提供方法借鉴,同时为拟建电站的设计方案提供可靠的可行性依据。

关键词:哈密盆地北缘断裂东段;口子村东断裂;空间发育特征;活动断裂地质勘察方法

中图分类号:P315 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1447-11

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250227001

Spatial distribution characteristics of the Kouzicun East fault in the eastern segment of the northern margin fault of the Hami Basin

Ye Xinling[1], Si Fusheng[1], Ji Kang[2]

(*1.PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710100, Shaanxi, China*;
2.CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Given the limited understanding of the eastern segment of the northern margin fault of the Hami Basin and its implications for major infrastructure siting, this study focuses on the newly identified Kouzicun East Fault to determine its precise spatial location, geometric characteristics, and tectonic scale. A comprehensive investigation was conducted using multiple techniques, including geological and geomorphological surveys, geophysical exploration, integrated drilling and trenching, tunnel rock mass structural analysis, and elastic wave testing of tunnel walls. The results indicate that the

收稿日期:2025-02-27

第一作者简介:叶欣玲(1995-),女,硕士,工程师,主要从事工程地质勘察工作。E-mail: 271952494@qq.com。

Kouzicun East Fault forms part of the eastern segment of the northern margin fault of the Hami Basin and is an active thrust fault. The fault strikes NE5°－15° and dips SE at 40°－50°. Its fault core is approximately 60 m wide, while the hanging wall and footwall damage zones extend approximately 60 and 30 m, respectively. These findings provide new geological evidence and a theoretical basis for future studies of the eastern segment of the northern margin fault of the Hami Basin, offer a valuable reference for engineering geological investigations of active faults, and support the feasibility assessment and engineering design of the proposed power.

Keywords: eastern segment of the northern margin fault of the Hami Basin; Kouzicun East fault; spatial distribution characteristics; geological investigation methods for active faults

0 引言

天山是典型的大陆内部挤压造山带,其地壳变形主要集中于山前逆冲断裂与大型走滑断裂带[1-3]。西天山与西南天山现今山体前缘及山间盆地边缘的活动断裂,均以逆冲作用为主[4-6]。东天山的变形机制则与天山其他区段存在显著差异,呈现逆冲与左旋走滑共同控制的转换挤压抬升特征,山体通过山前逆冲断裂向盆地内部逆冲扩展[7-9]。因此,系统厘清东天山断裂的空间发育特征,对揭示东、西天山变形机制差异具有重要意义。

哈密盆地北缘断裂位于东天山巴里坤山与喀尔力克山南麓,是东天山断块隆起带与吐鲁番—哈密拗陷带的分界断裂。断裂整体近EW走向、倾向N,全长约200 km,以逆冲活动为主,地貌上表现为发育于山前洪积扇面之上的右行雁列陡坎[10](图1)。前人在德外里乡东侧洪积扇开展的探槽研究表明,该断裂具有较长的强震复发周期;基于^{10}Be测年结果可知,其近50 ka以来断裂的垂直滑动速率为0.1～0.18 mm/a,缩短速率为0.17～0.31 mm/a;宇宙成因核素测年数据也证实,断裂在晚第四纪具有显著活动性[11-12]。

哈密盆地北缘断裂在哈密市附近发育明显阶区,据此可划分为东、西两段。西段展布于山前上更新统洪积、冲积及冰碛地层中,近EW走向、北倾逆冲,多以顺坡陡坎(局部反坡)切割上更新统沉积物。东段整体呈右行雁列展布,由3条断续次级断裂组成(图2),总长度超80 km;次级断裂均错断山前冲洪积扇与高台地,形成清晰陡坎地貌,晚第四纪活动迹象明确,但目前尚未发现全新世活动证据[10](表1)。

以往对哈密盆地北缘断裂的研究多聚焦于整体及西段[13-14],东段研究相对薄弱,研究成果多零散见于东天山区域构造,且以遥感解译几何展布与变形机制为主,缺乏对其产状、结构及空间分布的系统论证。某拟建抽水蓄能电站场址内发现一条近南北向断裂,经野外地质调查与区域地质资料对比,初步判定为哈密盆地北缘断裂东段第2分段$f_{2\text{-}2}$,因其位于口子村东侧,命名为口子村东断裂(图2)。该断裂的准确位置与展布特征,直接制约电站规划选址。本文综合采用地质地貌调查、地球物理探测、钻孔联合剖面、探槽开挖、平洞岩体结构分析及洞壁弹性波测试等手段,旨在查明口子村东断裂在工程区的空间位置、产状与规模,为哈密盆地北缘断裂东段后续研究提供科学依据,为活动断裂工程勘察提供方法借鉴,同时为电站选址规划提供可行性支撑。

1 地质地貌特征

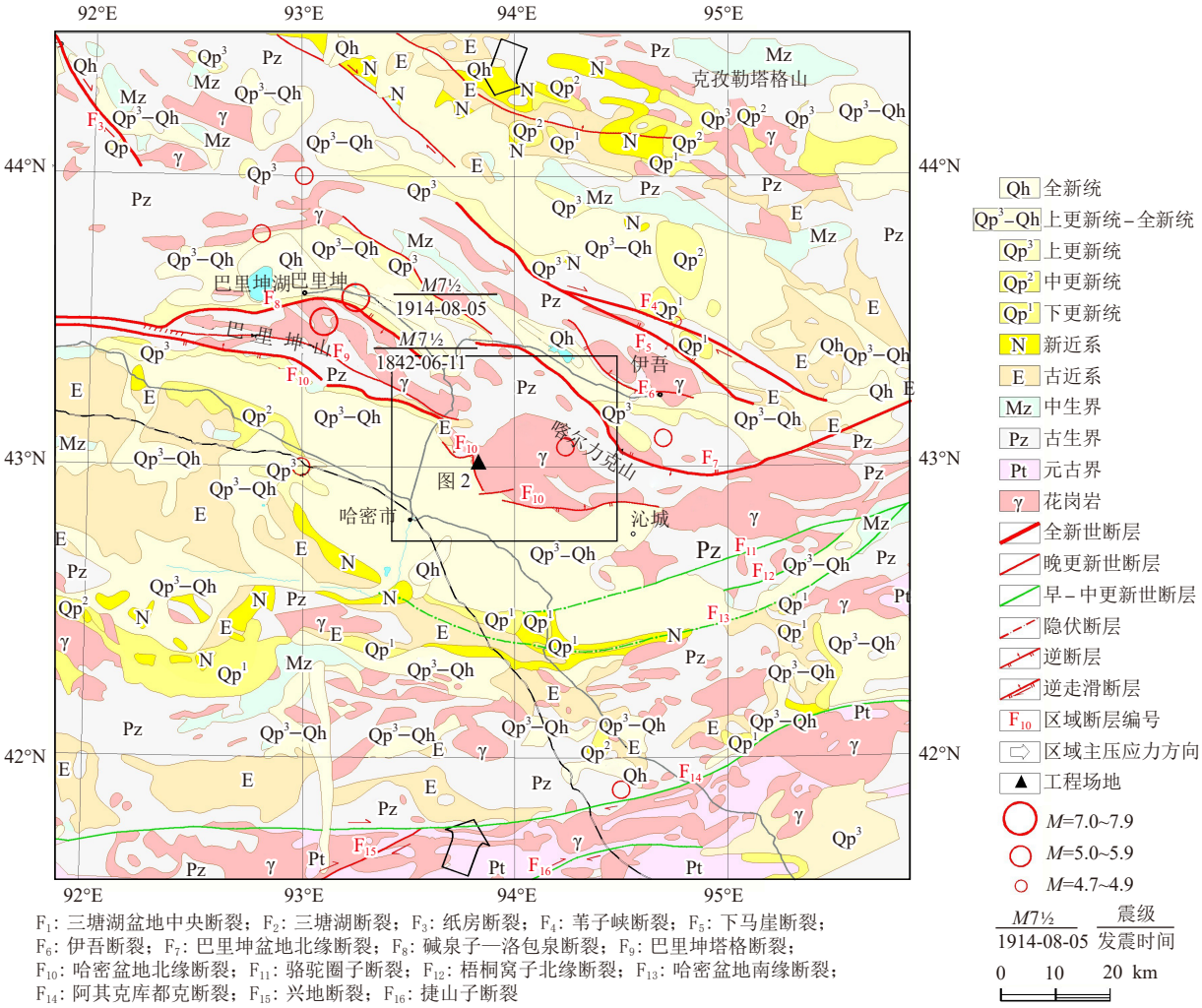
1.1 区域地质地貌特征

研究区自北向南可划分为天山东脉喀尔力克山与哈密盆地两大地貌单元。喀尔力克山隆升强烈,发育多级夷平面,主要河流出山口处普遍形成Ⅲ～Ⅳ级基座阶地。哈密盆地内部呈现隆凹相间的构造格局,晚更新世晚期以来构造活动显著减弱,整体由缓慢抬升转为趋于稳定。盆山过渡带为断裂活动最强烈区域,历史上多次发生6级以上地震,是区域强震的主要孕育场所。

1.2 研究区地质地貌特征

现场地质调查表明,口子村东断裂沿山麓近NS向展布,北端隐伏于榆树沟沟口附近晚更新世—全新世(Qp^3—Qh)冲洪积砾石层之下,构成古生代基岩(花岗岩)与山前晚第四纪高台地的分界;地貌上表现为断续延伸的断层陡坎与陡崖(图3),揭示断裂具有显著的垂直活动特征。

现场多处断层露头清晰揭示:花岗岩逆冲于全



F_1：三塘湖盆地中央断裂；F_2：三塘湖断裂；F_3：纸房断裂；F_4：苇子峡断裂；F_5：下马崖断裂；F_6：伊吾断裂；F_7：巴里坤盆地北缘断裂；F_8：碱泉子—洛包泉断裂；F_9：巴里坤塔格断裂；F_{10}：哈密盆地北缘断裂；F_{11}：骆驼圈子断裂；F_{12}：梧桐窝子北缘断裂；F_{13}：哈密盆地南缘断裂；F_{14}：阿其克库都克断裂；F_{15}：兴地断裂；F_{16}：捷山子断裂

图 1　区域地震构造图

Fig. 1　Regional seismic tectonic map

新统崩坡积砾石层之上，断裂倾角 25°～45°（图 4）；但断裂邻近冲沟与地貌面未见明显水平错动迹象，表明该断裂以逆冲运动为主、水平活动微弱，运动性质与哈密盆地北缘断裂一致。进一步将本次调查获取的口子村东断裂空间位置及产状，与区域地质资料对比分析，发现其与哈密盆地北缘断裂东段第 2 分段的展布特征高度吻合，据此确认该断裂为哈密盆地北缘断裂东段 $f_{2\text{-}2}$ 分段。

2　断裂空间发育特征探测

2.1　地球物理探测

由于受断裂影响的岩体具有显著的波速各向异性特征，因此可通过识别波速各向异性异常区开展断裂探测[15-16]。

为初步厘定口子村东断裂的空间展布，结合野外地质调查初步判定的断裂位置，垂直断裂走向布设 3 条地球物理探测剖面。采用天然源面波法，道间距 10～20 m、采样率 1 m/s，利用扩展空间自相关法提取频散曲线，反演获得地下视横波速度结构。结果表明：3 条剖面均发育显著的横波速度低值异常区，速度等值线呈水平不连续转折，垂向形成密集梯度带，并向深部延伸（图 5、表 2）。

根据以上典型特征，推测该横波速度低值异常区域（图 5 红色虚线位置）为断裂核心带，给出 3 条测线横波速度异常区域位置，结合山体走向及断裂地面露头位置，据此初步推测出口子村东断裂核心带大致位置及展布方向如图 6 所示，走向为 NE5°～15°。

2.2　钻孔勘探

为进一步查明断裂位置，结合地球物理探测初步解译的断裂带范围，于断裂带内部及上下盘边界外侧，自北向南、由高至低布设 12 个钻孔（图 7）。

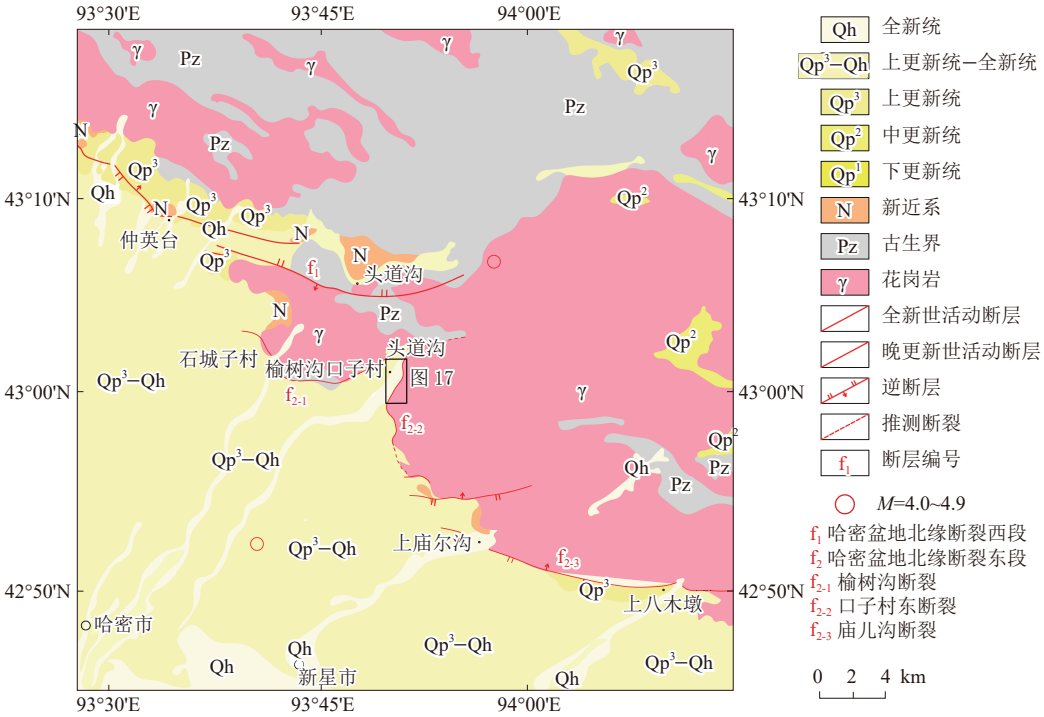


图 2 研究区地震构造图

Fig. 2 Seismic tectonic map of the study area

表 1 断裂特征一览表

Table 1 List of fault characteristics

断裂名称	编号	长度/km	产状			运动性质	地质活动证据	活动时代
			走向	倾向	倾角/(°)			
哈密盆地北缘断裂西段	f_1	>100	近 EW	N	35~45	逆冲	断错全新统	Qh
哈密盆地北缘断裂东段	f_{2-1}	(25,30]	NWW-NEE	N	25~63		断错上更新统	Qp^3
	f_{2-2}	(20,25]	近 NS	E	20~70		断错晚更新世洪积扇	
	f_{2-3}	约 60	EW	N	40~65			

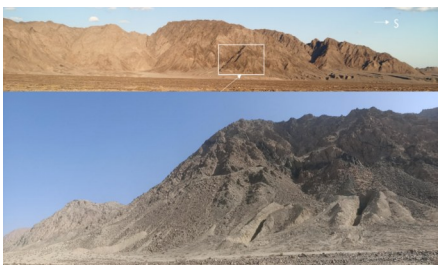


图 3 断裂地貌特征

Fig. 3 Geomorphic features of the fault

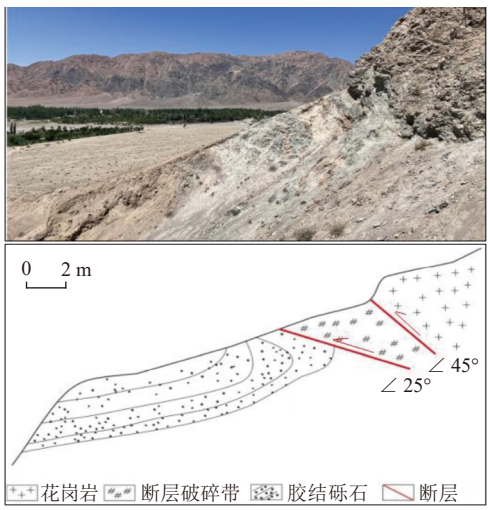


图 4 断裂露头

Fig. 4 Fault outcrop

钻孔深度依据物探解译的断裂地表位置及野外露头产状向地下反推,终孔深度均穿透断裂下盘界面以下 100 m。通过钻孔岩芯编录,结合孔壁成像与结构面特征对比,识别断裂核心带及上下盘影响带的标志层位,联合多孔资料绘制勘探剖面[17],最终

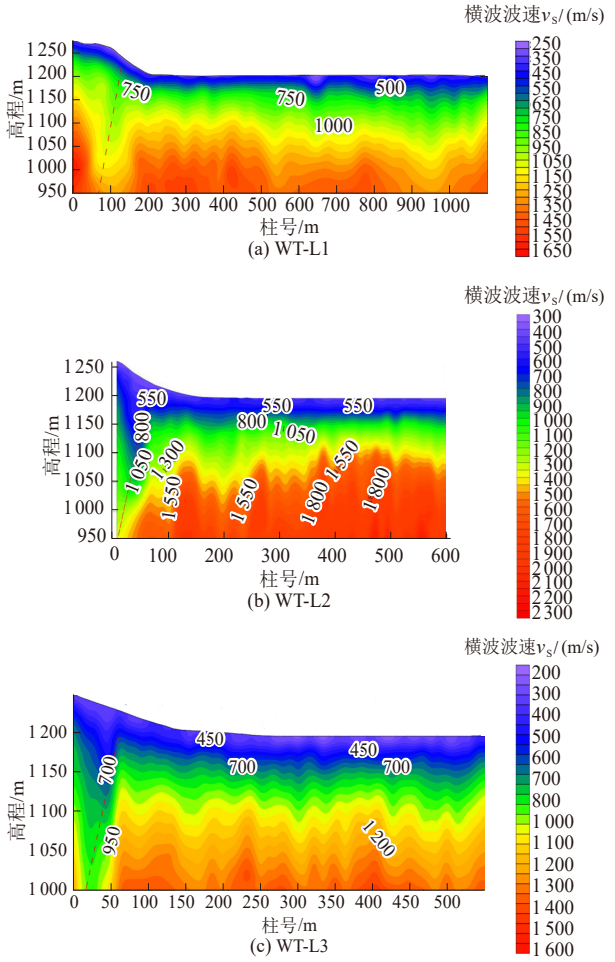


图 5　地球物理成果剖面图

Fig. 5　Geophysical profiles

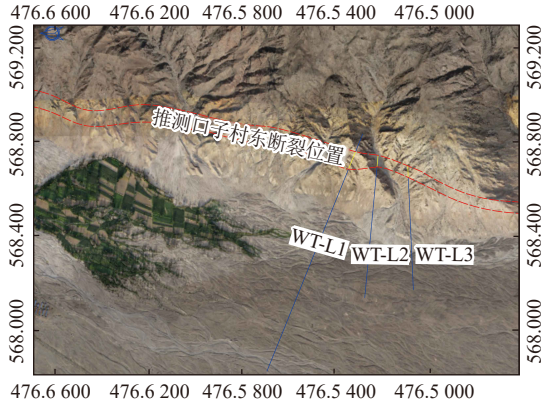


图 6　地球物理探测测线推测断裂位置图

Fig. 6　Inferred fault locations from geophysical survey lines

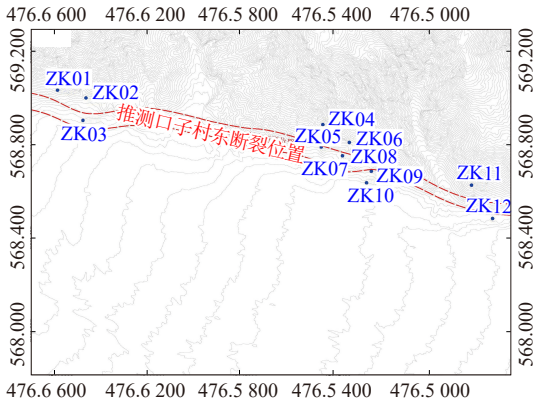


图 7　钻孔布置图

Fig. 7　Layout of boreholes

表 2　地球物理测线剖面图解译结果表

Table 2　Interpretation results of geophysical survey line profiles

测线编号	桩号/m	测线剖面图解译结果	备注
WT-L1	0 550 1 090	桩号 80～160 m 存在陡倾横波速度低速异常	
WT-L2	0 610	桩号 0～50 m 存在陡倾横波速度低速异常	受地形地貌影响，测线起点未能延长
WT-L3	0 530	桩号 0～50 m 存在陡倾横波速度低速异常	

综合确定断裂的精确产状与空间位置。

钻孔资料显示，ZK03、ZK10 全孔均为砂卵砾石，平面上位于断裂下盘，据此推断口子村东断裂地表位置应位于两孔东侧。ZK04 孔 18.0～50.0 m、ZK11 孔 10.0～51.0 m 段为完整坚硬的弱风化花岗岩，其下岩芯完整性显著变差；两孔位于断裂上盘影响带外侧，断裂地表位置应在两孔西侧，岩芯劣化界面即为上盘影响带边界。综合判断，断裂核心带位于 ZK03、ZK10 与 ZK04、ZK11 之间。

沿断裂走向自高至低选取 ZK06、ZK07 钻孔，成功揭露断裂核心带及上下盘影响带（图 8）。结合各钻孔揭示的断裂边界、物探与露头确定的走向及倾向，反推断裂地表出露位置（图 9），并结合地形条件，最终厘定断裂核心带、上下盘影响带的空间分布及产状特征。

2.3　探槽揭露

为精准揭露断裂位置与产状，在 ZK03、ZK10 西侧滩地陡坎前缘，跨断裂及陡坎开挖探槽（图 17），同时验证山前陡坎地貌是否由断裂活动形成。

探槽剖面显示，花岗岩逆冲于第四系洪冲积砂砾石层之上；断裂走向 NE5°～15°、倾向 SE，断面形态复杂，倾角 20°～70°，平均约 45°。

探槽进一步揭示，断裂仅错断陡坎下部晚更新

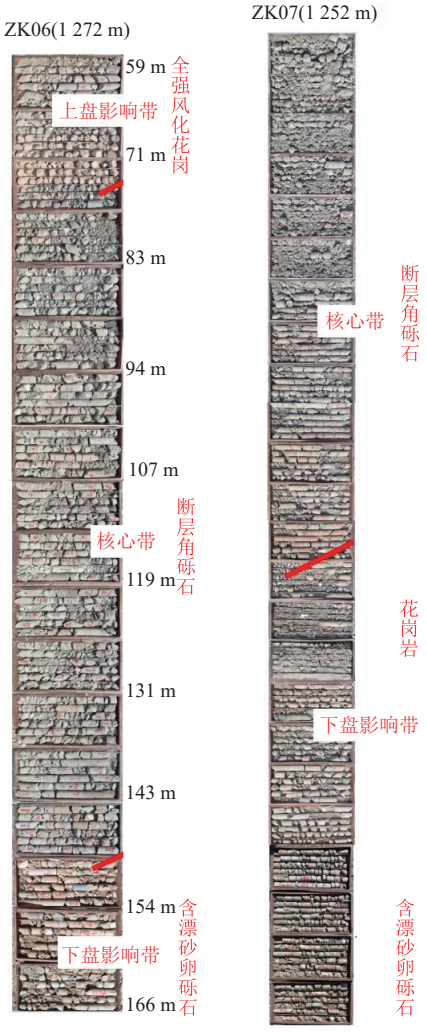


图 8 ZK06、ZK07 钻孔岩芯照片

Fig. 8 Photographs of borehole cores from ZK06 and ZK07

世中晚期砾石层，上覆全新世洪积砂砾石层及地表坡积层未受扰动；断裂上断点之上覆盖 1.0～1.5 m 厚、层理发育（倾角约 25°、倾向 NW）的密实砂砾石层（图 10）。据此判定，山前陡坎为断裂活动形成，断裂具晚更新世活动特征。

2.4 平洞开挖

为进一步核准钻孔勘探及探槽开挖查明的断裂位置及产状，结合地形条件及工程实际，在物探和钻孔查明的断裂核心带内开洞，跨断裂开挖一平洞，洞向 NE85°。

2.4.1 平洞揭露

依据水电工程围岩分级标准[10]，对平洞岩体开展综合编录评价：洞口 0～3 m 为含漂石砂卵石层；3～91 m 为强风化花岗岩（局部夹辉绿岩条带），蚀变疏松、破碎严重，呈散体结构（图 11、图 12），围岩等级为Ⅴ类。

平洞 91～97 m 处，洞壁发育主断层 F_1，产状 NW350°∠42°，核心带宽 15～30 cm，充填岩块、岩屑、岩粉及灰白色泥质，影响带宽 1～2 m，贯通三壁、胶结较弱[图 12(b)]。该断层位置与物探、钻孔推断的断裂核心带上盘面基本吻合，产状与探槽揭露一致，故将 F_1 定为核心带上盘边界，0～97 m 段为断裂核心带。

平洞 97～200 m 段岩体以碎裂结构为主（图 11、图 12），次级小断层发育，围岩属Ⅳ类。195～200 m 处发育断层 f_{12}[图 12(d)]，产状 NW327°∠42°，贯通三壁，核心带宽 5～10 cm，充填泥夹岩屑，两侧岩石破碎、局部蚀变强烈。该位置与钻孔推测的上盘影响带边界一致，产状与核心带上盘边界相近，故将 f_{12} 定为上盘影响带边界，97～200 m 段为断裂上盘影响带。

平洞 200～1 230 m 段岩体完整性显著提升：200～515 m 围岩为Ⅳ～Ⅲ$_2$类，以镶嵌结构为主、局部碎裂结构[图 12(e)]；515～1 230 m 围岩为Ⅲ$_1$类，以镶嵌结构为主、局部次块状—碎裂结构[图 11、图 12(f)]，该段为上盘影响带以外的正常岩体。

对平洞内断裂所处段 0～200 m 发育的长大结构进行统计如图 13 所示。由图 13 可知，平洞主要发育断层产状与主控断层 F_1 断层近似，与探槽揭露断裂产状基本相同。

2.4.2 洞壁物探波速测试

为再证明上述确定的断裂带位置划定准确，对平洞中洞壁岩体进行了弹性波测试，将波速测试结果分析，可分为三段（图 14）。平洞 0～90 m，岩体波速度变化范围为 790～1 290 m/s，平均值为 896 m/s，完整性系数为 K_v 为 0.4～0.42，岩体破碎，动弹模量变化范围为 0.6～2.11 GPa，平均值为 0.97 GPa，划定该段为口子村东断裂核心带；平洞 90～200 m，岩体波速度变化范围为 930～2 350 m/s，平均值为 1 417 m/s，完整性系数为 K_v 为 0.33～0.41，岩体破碎—较破碎，动弹模量变化范围为 0.93～17.87 GPa，平均值为 3.47 GPa，划定该段为口子村东断裂上盘影响带；平洞 200～400 m，弱风化花岗岩，岩体波速度变化范围为 1 850～4 700 m/s，平均值为 3 206 m/s，完整性系数为 K_v 为 0.1～0.61，整体岩体较破碎～较完整，局部破碎，动弹模量变化范围为 4.97～48.08 GPa，平均值为 21.21 GPa，该段位于口子村东断裂影响带以外。平洞洞壁物探波速成果骤变位

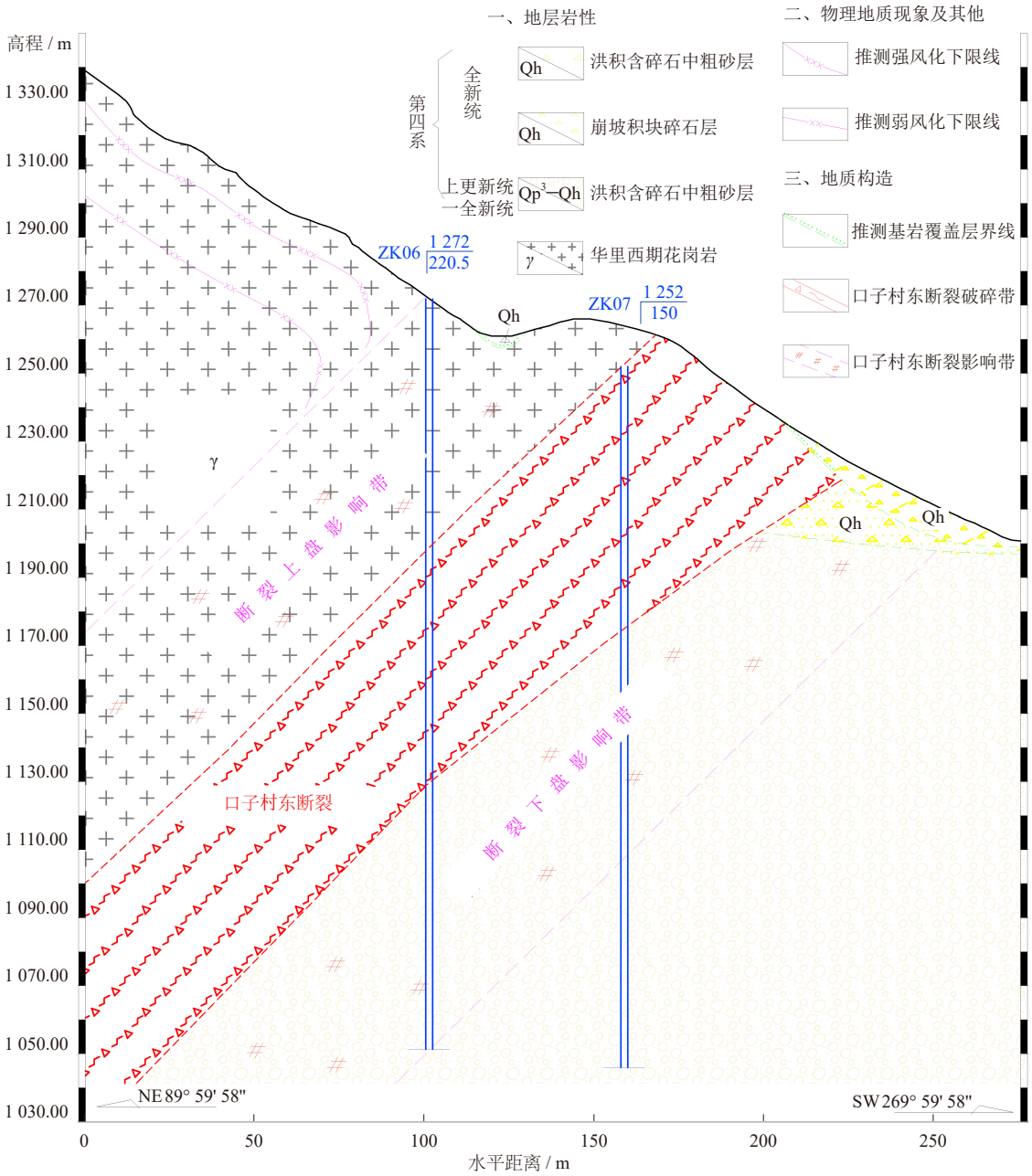


图 9　ZK06、ZK07 钻孔岩芯揭露的断裂示意图

Fig. 9　Schematic diagram of faults revealed by borehole cores from ZK06 and ZK07

置与洞内岩体揭露划分的断裂各边界位置基本相符，印证平洞确定的断裂位置准确。

3　断裂空间发育特征确定

3.1　断裂产状

综合地质地貌调查、物探剖面解译、探槽揭露、钻孔勘探联合剖面、平洞编录、主断层发育统计、平洞洞壁弹性波测试等结果相互印证分析，综合判定口子村东断裂整体产状 NE5°～15°/SE∠40°～50°，平均倾角 45°。

3.2　断裂带宽度

物探剖面解译口子村断裂影响带及核心带地表总宽度约为 150 m，其中核心带宽度约 60 m（图 15）。按断裂平均产状 NE10°/SE∠45°，将钻孔、平洞分析出的断裂各边界位置在剖面图上反推至地表，得断裂上盘影响带宽约 60 m（图 16），则下盘影响带宽度约为 30 m。用平洞及其他各处钻孔进行剖面切图与实际编录结果对比验证，得上述断裂核

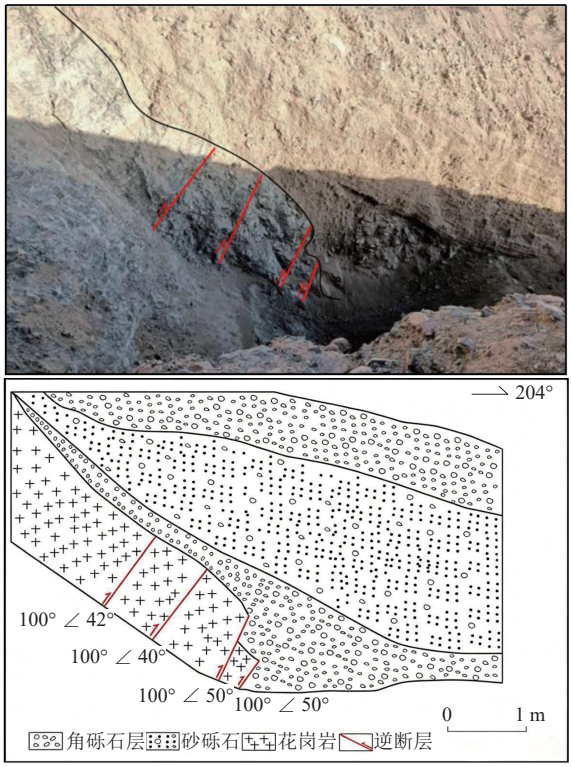


图 10 探槽 TC1 照片(镜向 S)及素描图

Fig. 10 Photograph and sketch of trench TC1 (view towards S)

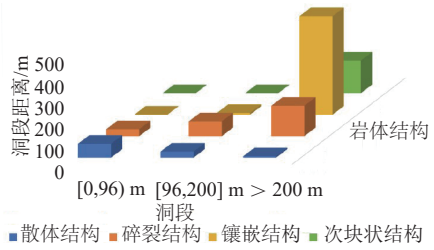
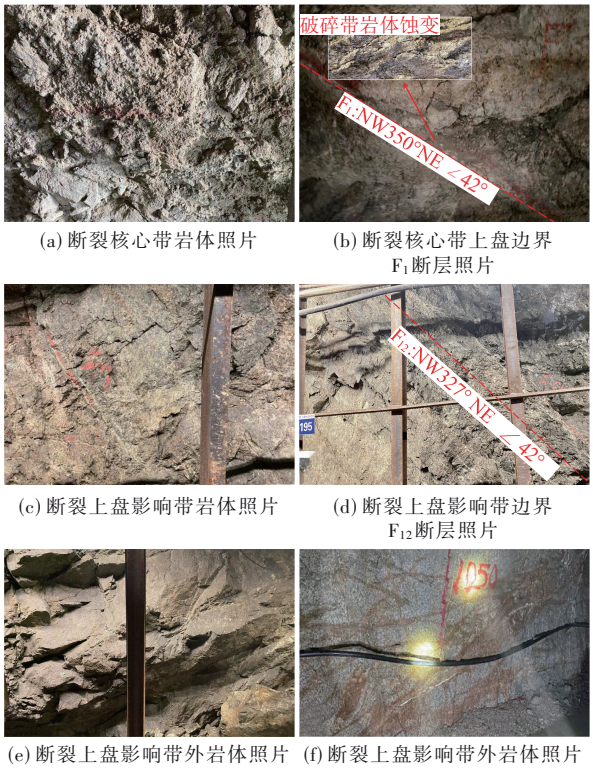


图 11 平洞岩体结构分级统计

Fig. 11 Statistical classification of rock mass structure in the adit

心带、影响带边界位置与钻孔、平洞实际编录位置基本相符,印证上述断裂带宽度准确。



(a) 断裂核心带岩体照片 (b) 断裂核心带上盘边界 F_1 断层照片

(c) 断裂上盘影响带岩体照片 (d) 断裂上盘影响带边界 F_{12} 断层照片

(e) 断裂上盘影响带外岩体照片 (f) 断裂上盘影响带外岩体照片

图 12 平洞揭露口子村东断裂特征

Fig. 12 Characteristics of the Kouzicun East fault exposed in the adit

3.3 断裂平面位置

基于已查明的断裂产状与宽度,将断裂各边界投影至剖面地表,结合山体地形形态,初步厘定断裂平面分布。再综合钻孔、物探、探槽及平洞等实测资料,对断裂平面位置进行局部校正,最终确定口子村东断裂的平面展布形态(图 17)。

4 结论

(1) 探槽成果表明,花岗岩逆冲于晚更新世中晚期洪冲积砂砾石层之上。断裂仅错断该套地层,上覆全新世洪积扇砂砾石层与地表坡积层未发生扰动。依据地层接触关系判定,口子村东断裂的最

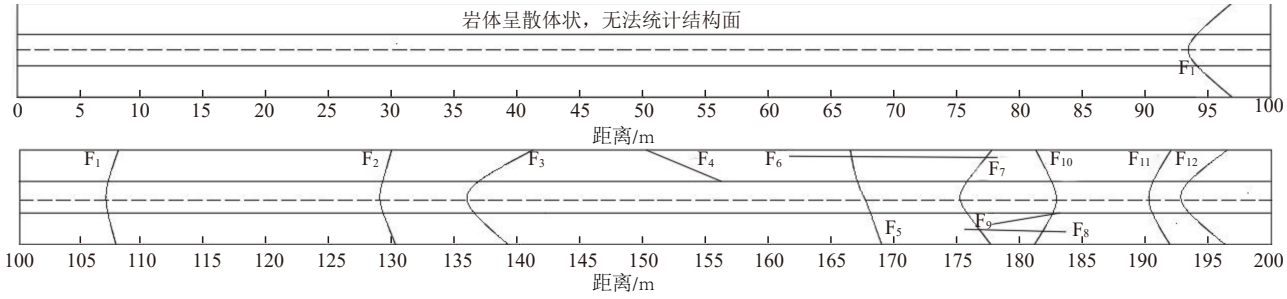
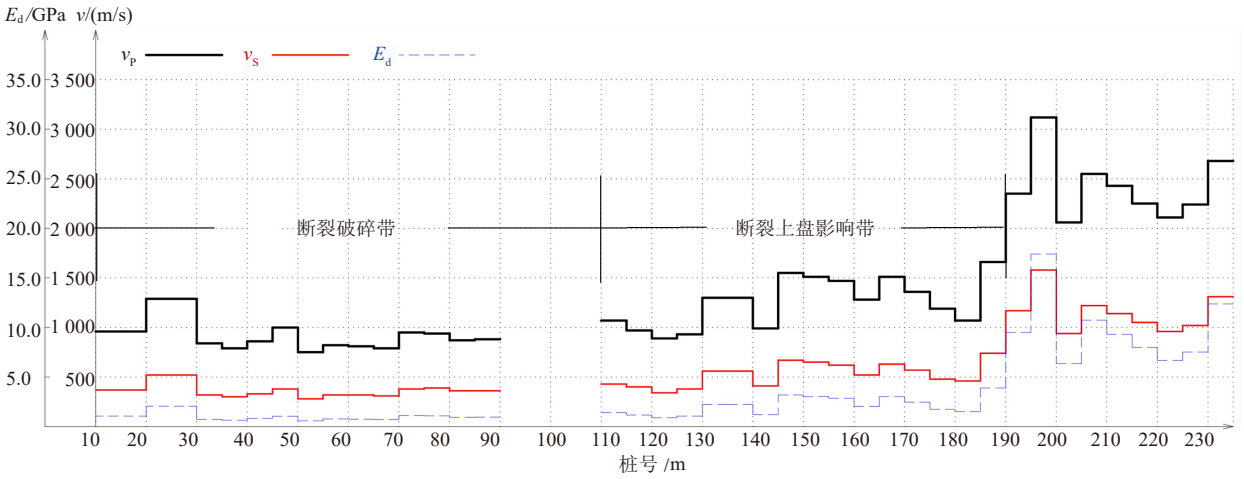


图 13 平洞 0~200 m 段长大结构面展布图

Fig. 13 Distribution of major discontinuities along the 0—200 m section of the adit



起始桩号 /m	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	发育F，断层，产状NW320°NE ∠ 42°，泥夹岩屑岩块填充，厚度为5 ～ 10 cm，破碎带为15 ～ 30 cm，影响带为1 ～ 2 m，胶结性较差，此段岩石破碎，支护处理	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230
结束桩号 /m	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90		115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
纵波速度/(m/s)	960	1 290	840	790	860	1 000	750	820	810	790	950	940	870	880		1 070	970	890	930	1 300	1 300	990	1 550	1 510	1 470	1 280	1 510	1 360	1 190	1 070	1 660	2 350	3 120	2 060	2 550	2 430	2 250	2 110	2 240	2 680
横波速度/(m/s)	370	520	320	300	330	380	280	320	320	310	380	390	360	360		430	400	340	380	560	560	410	670	650	620	520	630	570	480	460	740	1 170	1 580	940	1 220	1 140	1 050	960	1 020	1 310
泊松比	00.41	00.40	00.42					00.41				00.4				00.4				00.39										00.38	00.34	00.33	00.37	00.35	00.36		00.37		00.34
动弹模量 /GPa	1.05	2.06	0.73	0.65	0.84	1.04	0.58	0.77	0.75	0.71	1.12	1.09	0.94	0.96		1.42	1.16	0.90	1.07	2.25	2.25	1.21	3.19	3.03	2.87	2.03	3.03	2.46	1.75	1.52	3.90	9.51	17.41	6.36	10.74	9.31	7.98	6.67	7.52	12.37
完整程度评价	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎		破碎	破碎	破碎	较破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	破碎	较破碎	较破碎	破碎	较破碎	较破碎	较破碎	破碎	破碎	较破碎	较破碎
其他描述	本测线纵波速度变化范围为 750 ～ 3 120 m/s，平均值为1 390 m/s；动弹模量变化范围为0.58～17.41 GPa，平均值为3.47 GPa。																																						

图 14　平洞弹性波测试结果

Fig. 14　Elastic wave test results in the adit

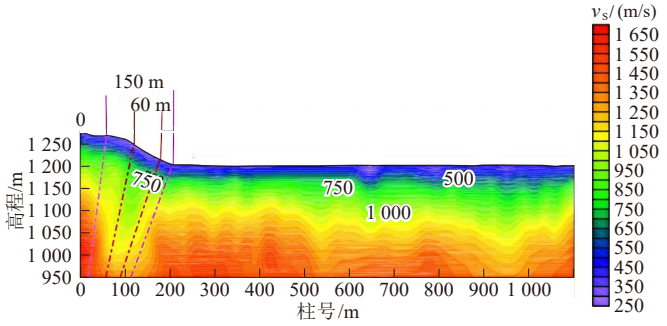


图 15　断裂倾角及宽度分析图

Fig. 15　Analysis of fault dip angle and width

新活动时代为晚更新世中晚期。建议后续结合测年手段，进一步精准限定断裂活动年代。

（2）综合野外露头测量、探槽观测、钻孔联合剖面及平洞编录等实测资料，查明口子村东断裂产状（走向：NE5°～15°；倾角：∠40°～50°，平均倾角45°）。断裂核心带宽约60 m，上、下盘影响带宽度分别约为60 m、30 m。本次成果可为哈密盆地北缘断裂东段的后续研究提供基础数据支撑。

（3）哈密盆地北缘断裂东段第2分段（$f_{2\text{-}2}$）为晚更新世逆冲断裂，整体近SN走向、倾向E，倾角20°～70°。口子村东断裂与其在空间位置、产状特征、活动时代及运动性质上高度吻合，据此确认口子村东断裂隶属于$f_{2\text{-}2}$分段。该认识有效提升了哈密盆地北缘断裂东段的构造解析精度。

（4）本文建立了一套活动断裂多尺度综合勘察技术体系：①依托地质地貌解译与区域构造对比，初步圈定断裂发育范围；②采用地球物理探测，根据波速异常区预判断裂核心带；③利用钻孔联合剖面约束断裂各分带空间位置，反演断裂产状；④结合浅层探槽与深层平洞勘察，确定断裂产状及分带边界；⑤通过洞壁弹性波测试校核分带范围。该体系弥补了单一勘察手段的不足，可为同类活动断裂勘察工作提供参考。

参考文献（References）

[1] 吴传勇，阿里木江，戴训也，等. 西南天山迈丹断裂东段晚第四纪活动的发现及构造意义[J]. 地震地质，2014，36(4)：976-990.

Wu Chuanyong，Alimujiang，Dai Xunye，et al. Discovery of the Late-Quaternary activity along the eastern segment of Maidan fault in southwest Tianshan and its tectonic implication [J]. Seismology and Geology，2014，36(4)：976-990.

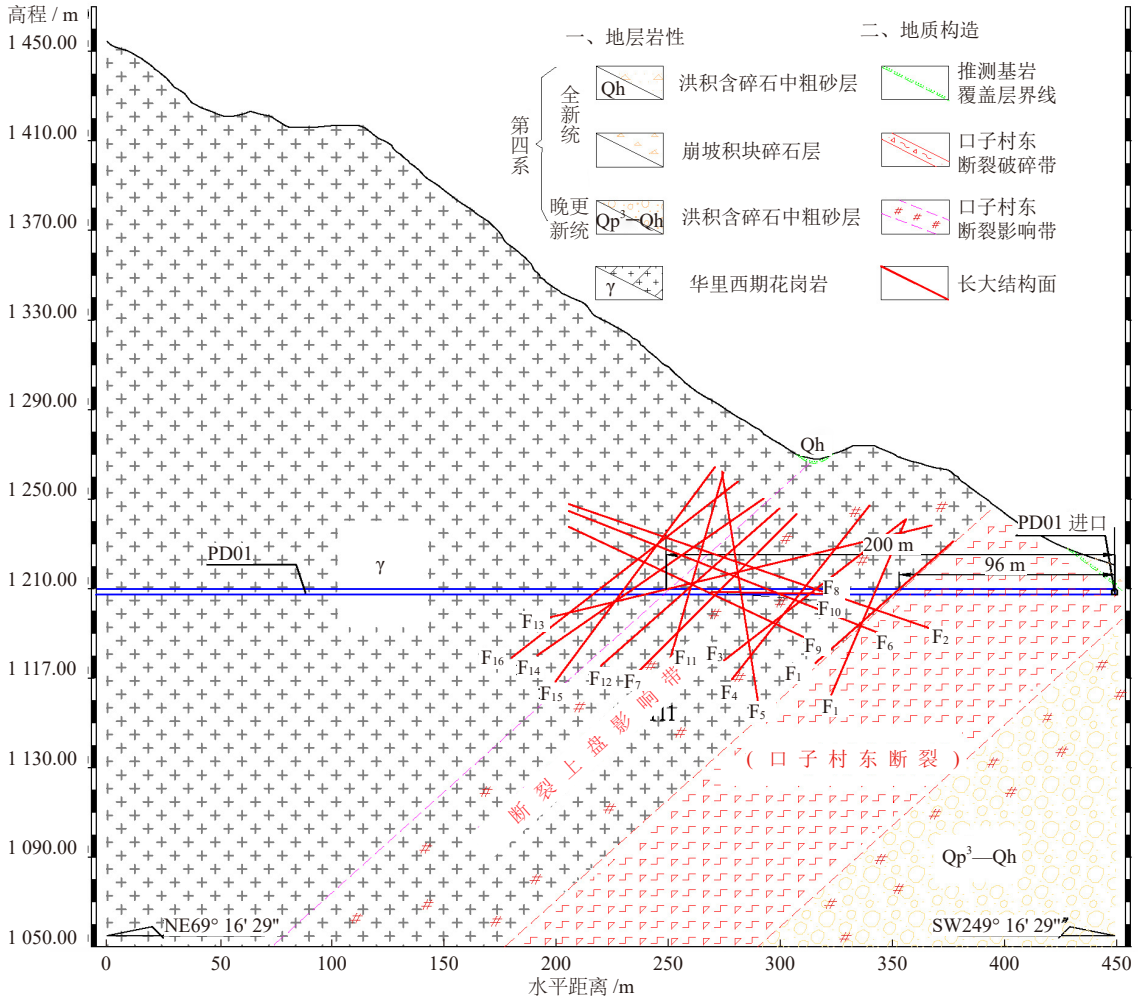


图 16 平洞断裂示意图

Fig. 16 Schematic diagram of faults in the adit

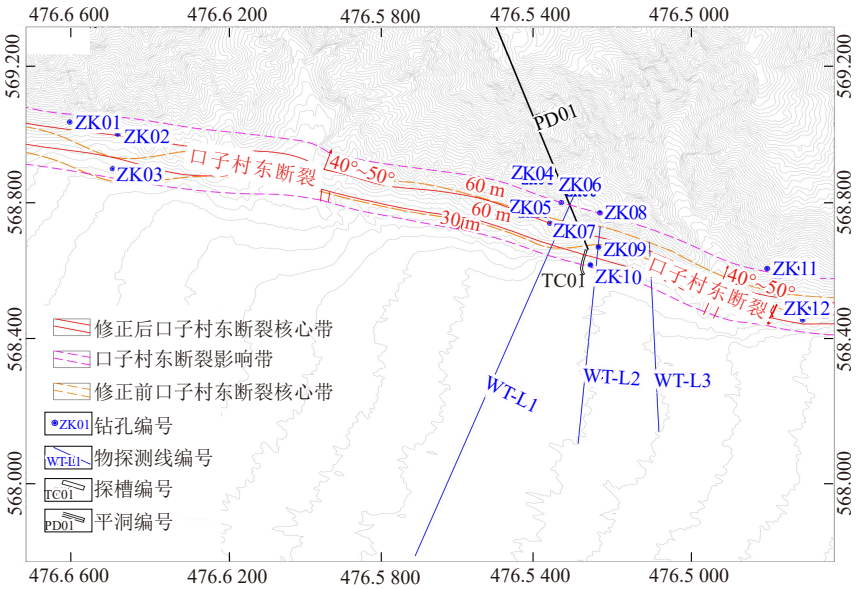


图 17 修正后断裂平面位置图

Fig. 17 Revised plan view of fault locations

[2] 沈军，汪一鹏，李莹甄，等．中国新疆天山博阿断裂晚第四纪右旋走滑运动特征[J]．地震地质，2003，25(2)：183-194.
Shen Jun，Wang Yipeng，Li Yingzhen，et al. Late Quaternary right-lateral strike-slip faulting along the Bolokenu—Aqikekuduke fault in Chinese Tian Shan[J]. Seismology and Geology，2003，25(2)：183-194.

[3] Avouac J P，Tapponnier P，Bai M，et al. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan[J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，1993，98(B4)：6755-6804.

[4] Burbank，McLean，Bullen，et al. Partitioning of intermontane basins by thrust-related folding，Tien Shan，Kyrgyzstan[J]. Basin Research，1999，11(1)：75-92.

[5] Cording A，Hetzel R，Kober M，et al. ^{10}Be exposure dating of river terraces at the southern mountain front of the Dzungarian Alatau (SE Kazakhstan) reveals rate of thrust faulting over the past ~400 ka[J]. Quaternary Research，2014，81(1)：168-178.

[6] Huang W L，Yang X P，Li A，et al. Late Pleistocene shortening rate on the northern margin of the Yanqi Basin，southeastern Tian Shan，NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2015，112：11-24.

[7] 江娃利．航片判读新疆东天山巴里坤活动断裂带展布及变位地形特征[J]．内陆地震，1993，7(4)：350-355.
Jiang Wali. The distribution and active characteristics of the Balikun active fault zone in the east Tianshan area of Xinjiang from interpretation of aerophone[J]. Inland Earthquake，1993，7(4)：350-355.

[8] 罗福忠，柏美祥，张斌，等．新疆哈密地区东盐池、七角井、托莱泉活动断裂微地貌及新活动特征[J]．内陆地震，2002，16(1)：40-47.
Luo Fuzhong，Bai Meixiang，Zhang Bin，et al. Microrelief and new activity features of Dongyanchi，Qijiaojing and Tuolaiquan active faults in Hami，Xinjiang[J]. Inland Earthquake，2002，16(1)：40-47.

[9] 任光雪．东天山左旋走滑断裂晚第四纪活动与构造转换[D]．北京：中国地震局地质研究所，2021.
Ren Guangxue. Late Quaternary activity and tectonic transition of the sinistral slip faults，eastern Tian Shan[D]. Beijing：Institute of Geology，China Earthquake Administration，2021.

[10] 柏美祥，罗福忠，李军，等．哈密盆地北缘活动断裂带微地貌[J]．内陆地震，1999，13(2)：162-168.
Bai Meixiang，Luo Fuzhong，Li Jun，et al. Microtopography of active fault zone in the northern fringe of Hami Basin[J]. Inland Earthquake，1999，13(2)：162-168.

[11] 吴富峣．东天山东段几条主要断裂晚第四纪活动证据与变形机制[J]．国际地震动态，2017，47(10)：46-48.
Wu Fuyao. Evidence of Late Quaternary activity and deformation mechanism of several main faults in the eastern part of East Tianshan Mountains[J]. Recent Developments in World Seismology，2017，47(10)：46-48.

[12] 吴富峣，冉勇康，陈立春，等．东天山三条地震地表破裂带的展布及其与两次历史地震的关系[J]．地震地质，2016，38(1)：77-90.
Wu Fuyao，Ran Yongkang，Chen Lichun，et al. Distribution of 3 earthquake rupture zones in Eastern Tien Shan and its relationship with 2 historical earthquakes[J]. Seismology and Geology，2016，38(1)：77-90

[13] Sun H，Yuan D Y，Su R H，et al. The seismic surface rupture zone in the western segment of the northern margin fault of the Hami Basin and its causal interpretation，eastern Tianshan[J]. Remote Sensing，2024，16(22)：4200.

[14] 任光雪，李传友，孙凯，等．东天山哈密盆地北缘断裂晚第四纪构造变形特征[J]．地球物理学报，2025，68(4)：1315-1328.
Ren Guangxue，Li Chuanyou，Sun Kai，et al. Late Quaternary tectonic deformation characteristics of the Hami Basin north fault，Eastern Tian Shan[J]. Chinese Journal of Geophysics，2025，68(4)：1315-1328.

[15] 彭建兵，范文，李喜安，等．汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]．工程地质学报，2007，15(4)：433-440.
Peng Jianbing，Fan Wen，Li Xi′an，et al. Some key questions in the formation of ground fissures in the Fenwei Basin[J]. Journal of Engineering Geology，2007，15(4)：433-440.

[16] 姚晨辉，李钰强．渭河盆地北缘断裂东段将军山—白水断裂活动性研究[J]．地震工程学报，2023，45(1)：199-208.
Yao Chenhui，Li Yuqiang. Activity of Jiang Junshan—Baishui fault in the eastern segment of the northern margin fault of Weihe Basin[J]. China Earthquake Engineering Journal，2023，45(1)：199-208.

[17] 潘容清，陈立春，李彦宝，等．江苏新沂高新区钻孔联合剖面揭示的郯庐断裂带F5几何结构特征[J]．华南地震，2024，44(3)：11-22.
Pan Rongqing，Chen Lichun，Li Yanbao，et al. Geometric structural features of the F5 in Tanlu fault zone revealed by drilling joint profile in high-tech district of Xinyi City，Jiangsu Province[J]. South China Journal of Seismology，2024，44(3)：11-22.

（本文编辑：任　栋）