段琳琳,刘雷,赵德军,等.天景山断裂带前锋区庙山山前断裂南段活动性研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1228-1239. DOI:10.20000/j.1000-0844.20250606001

DUAN Linlin,LIU lei,ZHAO Dejun,et al.Activity of the southern segment of the Miaoshan piedmont fault in the forward area of the Tianjingshan fault zone[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(5): 1228-1239. DOI: 10.20000/j. 1000-0844.20250606001

天景山断裂带前锋区庙山山前断裂南段活动性研究

段琳琳[1], 刘 雷[2], 赵德军[1], 徐一五[1]

(1. 成都理工大学 地球与行星科学学院,四川 成都 610059;
2. 中国建筑材料工业地质勘查中心宁夏总队,宁夏 银川 750021)

摘要: 天景山断裂带前锋区发育一套由逆冲走滑断裂与褶皱构成的庙山断褶带。庙山山前断裂作为该断褶带的重要组成部分,其南段的构造特征及第四纪活动性尚缺乏系统研究。浅层地震勘探揭示,该断裂在地表深部错断反射波组T_1与T_2,为一条倾向SW的铲形逆断层;高分辨率遥感解译显示,该断裂线性地貌特征不明显,主体被黄土覆盖,指示其新构造活动性较弱;野外地质调查与光释光(OSL)测年结果表明,断层将老地层逆冲至晚更新统上段地层之上。综合研究表明,庙山山前断裂南段为一条走向NW-SE、倾向SW的逆走滑断层,具上陡下缓的铲式结构,最新活动时代厘定为晚更新世晚期。该断裂是香山—天景山断裂向东扩展引发的构造转换作用的产物,晚更新世晚期以来未发生活动,未来发生中强地震的可能性较低。

关键词: 庙山山前断裂;天景山断裂;第四纪活动性;浅层地震勘探;光释光测年

中图分类号: P315.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2026)05-1228-12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250606001

Activity of the southern segment of the Miaoshan piedmont fault in the forward area of the Tianjingshan fault zone

DUAN Linlin[1], LIU lei[2], ZHAO Dejun[1], XU Yiwu[1]

(*1.College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*
2.Ningxia Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: In the forward area of the Tianjingshan fault zone, a well-defined Miaoshan fault-fold belt has developed, comprising reverse strike-slip faults and associated folds. The Miaoshan piedmont fault, a key structural component within this belt, remains poorly understood in terms of its detailed architecture and Quaternary deformation history in its southern segment. Shallow seismic profiling

收稿日期:2025-06-06

基金项目:宁夏回族自治区自然资源厅地质勘查项目(SSGDZTB2024068)

第一作者简介:段琳琳(2001-),女,硕士研究生,主要从事活动构造与构造地质学研究。E-mail:936311818@qq.com。

通信作者:刘 雷(1984-),男,高级工程师,主要从事区域地质调查、固体矿产勘查方面的研究。E-mail:1035746098@qq.com。

reveals that the fault displaces the subsurface reflection horizons T_1 and T_2, confirming it as a SW-dipping listric reverse fault. High-resolution remote sensing analysis indicates a lack of distinct linear geomorphic features along the fault trace, with extensive loess cover obscuring surface features—evidence consistent with limited neotectonic activity. Field geological investigations, combined with optically stimulated luminescence dating, demonstrate that older strata have been thrust over the upper Late Pleistocene deposits. Integrated analysis thus indicates that the southern Miaoshan piedmont fault is a NW-SE-striking, SW-dipping reverse strike-slip fault with a listric geometry that flattens with depth. The most recent tectonic activity of this fault is constrained to the late Late Pleistocene. This structure likely formed due to tectonic strain transfer associated with the eastward expansion of the Xiangshan—Tianjingshan fault system. Furthermore, it has not been active since the late Late Pleistocene, indicating a low potential for generating moderate-to-strong earthquakes in the future.

Keywords: Miaoshan piedmont fault; Tianjingshan fault; Quaternary activity; shallow seismic exploration; optically stimulated luminescence dating

0　引言

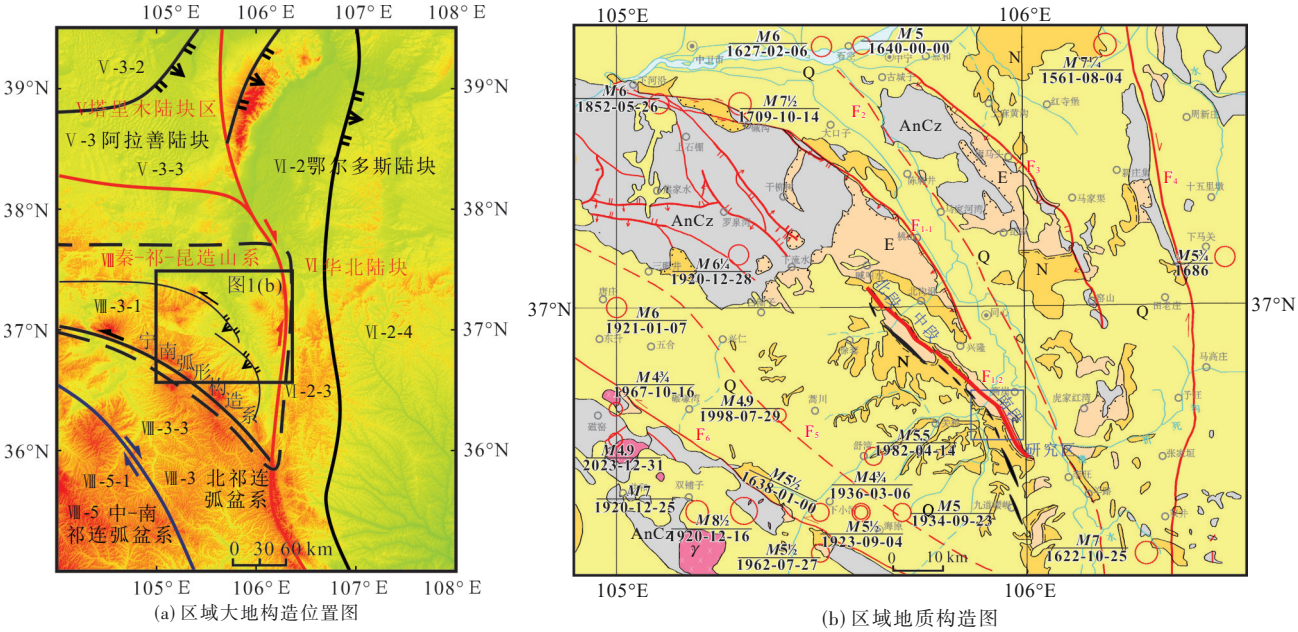
天景山活动断裂带是青藏高原东北缘弧形构造带的关键组成部分，前人已建立较完善的构造解析框架[1-3]。其南缘前锋区发育的庙山弧形断褶带为一走滑-逆冲褶皱隆起构造，由庙山背斜带与庙山山前断裂组成。研究发现，庙山断褶带的构造属性及成因机制与天景山主断裂带存在密切关联：第四纪以来，天景山次级构造单元向东滑移约 3.2 km，其中约 1.4 km 的位移量被庙山断褶带以褶皱和斜向冲断作用所吸收[1]，反映天景山南缘前锋区存在显著的构造转换，具有典型的构造边缘效应特征[1,4]。同时，天景山断裂带在全新世持续向东逆冲走滑，平均滑动速率为 0.41～1.62 mm/a[1,5-6]。鉴于庙山山前断裂与天景山断裂之间密切的构造联系，部分研究将其划归为天景山断裂带东南段[7-8]，属晚更新世断层。为进一步明确庙山山前断裂的构造特征及活动性，本文将其与天景山断裂分开论述。

庙山山前断裂全长约 50 km，可分为北、中、南三段，其中南段长约 39 km[1]。柴炽章等[4]对庙山山前断裂的构造性质已形成初步认识；张维歧等[1]则针对该断裂的分布、性质及活动时代开展研究，但主要集中于断裂北、中段。目前，庙山山前断裂南段的几何结构、活动时代及发震能力等尚缺乏系统研究，其成因机制及与香山—天景山断裂的构造关系仍需深入探讨。该断裂南段邻近高崖乡等人口聚集区，明确其活动性可为区域地震危险性评价与防灾规划制定提供基础依据。为此，本研究聚焦庙山山前断裂南段，综合运用浅层地震勘探、高分辨率遥感解译、野外地质调查及光释光（Optically Stimulated Luminescence，OSL）测年等方法，揭示其几何结构特征并探讨其活动性。研究成果有助于深化对庙山断褶带活动性与构造机制的认识，厘清其与香山—天景山断裂带响应关系，对探讨宁南弧形构造带的构造变形与转换过程，以及青藏高原东北缘的运动特征具有较重要的科研意义。

1　区域构造与历史地震

研究区位于宁南弧形构造系中南部，地处鄂尔多斯陆块与北祁连弧盆系交接带，西邻阿拉善陆块，北接贺兰山与银川地堑[9-13]，整体处于中国东、西部构造域之间南北向构造带的北延部位（图 1）[11,14-15]。宁南弧形构造系内发育一系列活动断裂，自北东向南西依次为：三关口—牛首山—罗山断裂带、烟筒山断裂、清水河断裂、天景山断裂带、香山南麓断裂，以及海原断裂。它们共同构成放射状弧形构造格局。该区域构造演化具有多阶段特征：始新世—渐新世期间，处于伸展构造背景，拉张断裂形成宁南盆地；古近纪末，区域地球动力学环境发生转变，宁南盆地受青藏—喜马拉雅构造域 NE 向挤压而闭合消亡[11,14-16]；中新世后，喜马拉雅运动驱动六盘山及地块西缘隆升，奠定宁南弧形构造带雏形；早更新世，随着青藏块体向 NEE 方向推挤作用增强，六盘山进入快速隆升阶段，叠加后期黄河及其支流的切割侵蚀，最终塑造出盆-山相间的弧形构造格局[9-11,16-18]。

该区域构造活动强烈，地震活动频繁。截至 2025 年 7 月 23 日，区域内共记录到 $M\geqslant4.7$ 地震 20



一级构造单元界线断层 二级构造单元界线断层 三级构造单元界线断层 Ⅵ-2-4 构造单元代号 逆断层 正断层
走滑断层 隐伏断层 研究区 庙山褶皱区及背斜轴 Q 第四系 N 新近系 E 古近系 AnCz 前新生界 γ 花岗岩
○ *M*4.7~4.9 ○ *M*5.0~5.9 ○ *M*6.0~6.9 ○ *M*7.0~7.9 ○ *M*8.0~8.9 F_{1-1}:香山—天景山断裂;F_{1-2}:庙山山前断裂;F_2:清水河断裂;F_3:烟筒山断裂;F_4:三关口—牛首山—罗山断裂带;F_5:香山南麓断裂;F_6:海原断裂带;V-3-2:阿拉善右旗—迭布斯格基底杂岩;V-3-3:民勤—阿拉善左旗坳陷盆地;Ⅵ-2-3:贺兰山被动陆缘地相;Ⅵ-2-4:鄂尔多斯陆表海盆地;Ⅷ-3-1:走廊弧后盆地;Ⅷ-3-3:走廊南山岛弧;Ⅷ-5-1:中祁连—湟源地块

图 1 区域大地构造位置及区域地质构造图(据文献[14-15]修改)

Fig. 1 Regional tectonic location and regional geological map (modified after References [14-15])

次。其中,*M*4.7~4.9 地震 4 次,*M*5.0~5.9 地震 7 次,*M*6.0~6.9 地震 4 次,*M*7.0~7.9 地震 4 次,*M*8.0~8.9 地震 1 次。历史强震包括 1920 年海原 8½ 级地震、1709 年中卫 7½ 级地震及 1561 年中宁鸣沙 7¼ 级地震,分别发生于海原—六盘山弧形断裂带、香山—天景山—庙山弧形断裂带和三关口—牛首山—罗山弧形断裂带。最新记录为 2023 年 12 月 31 日甘肃白银市平川区 4.9 级地震。区域地震活动明显受控于宁南弧形断裂带的空间展布[15][图 1(b)]。

天景山活动断裂带在空间分布上主要由大、小两条次级构造带组成[1][图 1(b)]。北侧为主构造,即通常所指的天景山活动断裂及其伴生的新生代褶皱;南侧为次一级构造带,总体呈 NNW 向展布,主要由新生代褶皱及局部逆断层构成,称为庙山弧形断褶带。该断褶带经历了两期构造变形:古近纪期间,受天景山次级条块 N-NE 向推挤,其东部边缘庙山地区发育了一组近 NS 向展布的右旋剪切雁行褶皱构造[1,4];第四纪早更新世以来,随着天景山次级条块沿北缘天景山活动断裂带向 E-SE 方向滑移,在庙山地区早期剪切褶皱的基础上,叠加发育了 NW 向挤压褶皱和左旋走滑逆冲断裂[1,2,4],即位于庙山山体东北侧的庙山山前断裂。

2 浅层地震勘探约束下的断裂带深部构造产状解析

2.1 测线位置

为揭示庙山山前断裂南段深部三维几何结构特征,在研究区内垂直断裂构造走向(SW-NE 方向)布设了一条浅层地震反射测线 DZ1(图 2)。采用北奥特车生产的 28 t 平原型可控震源激发,观测系统采用对称排列,偏移距 0 m,道间距 3 m,激发点距 18 m。数据处理后获得的有效剖面长度为 2 146 m。

2.2 数据采集和处理方式

数据采集采用深圳面元智能科技有限公司(DTCC)的 SmartSolo 地震采集系统,核心采集单元为 SmartSolo IGU-16HR 单分量节点地震仪和 DT-SOLO 高灵敏度 10 Hz 检波器。采集参数设置为:采样间隔 1 ms,接收道数 400 道,覆盖次数 33 次,记录长度 2 s。采用点式接收方式,使用 1 串 1 支自然频率为 10 Hz 的检波器。数据处理采用水平多

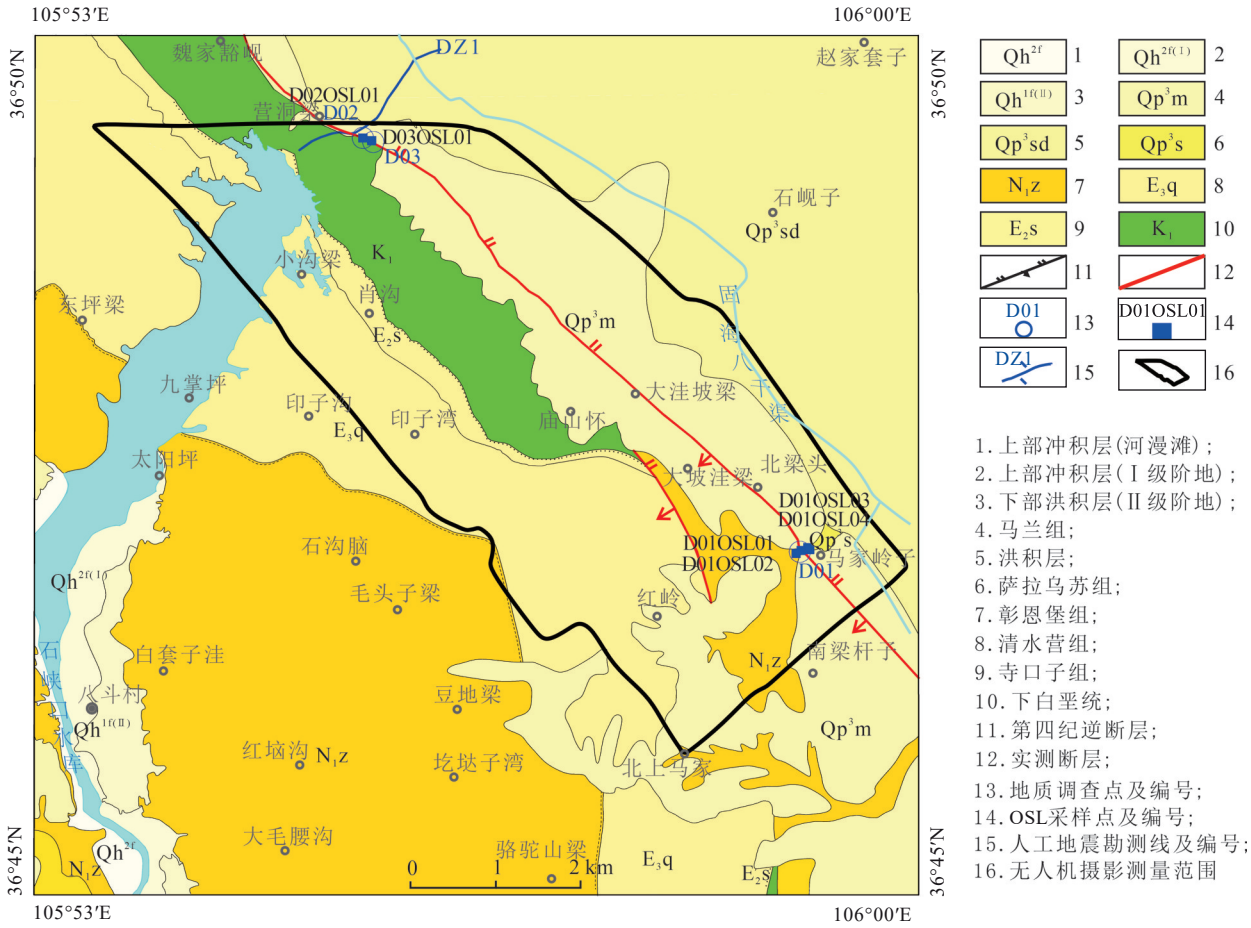


图 2　研究区工作部署图

Fig. 2　Work deployment map of the study area

次叠加方法，主要包括数字滤波、反褶积、速度分析、叠加、偏移等[19]，最终获得反映测区地下地层分布及构造形态的水平时间叠加剖面[图 3(a)]。在此基础上，基于速度分析获取的各层地震波速度，利用时-深转换公式计算地层厚度，将时间剖面转换为深度剖面[图 3(b)]。

2.3　庙山山前断裂南段深部构造几何特征

基于 DZ1 测线反射地震深度剖面[图 3(b)]的综合解译分析，在剖面桩号 500 位置(水渠隔振沟)处干扰较轻，信噪比相对较高，在有效探测范围内总体层位清晰。通过对比追踪地震剖面中连续稳定或较稳定、能量较强的反射波组，识别出 T_1 与 T_2 两组具有强反射震相特征的反射波组。据此将该测线浅部地质结构解译为三级物性层序单元：Ⅰ级物性层反射波场能量衰减显著，受地表波干扰效应明显，同相轴呈不连续-断续展布；Ⅱ级物性层反射波反射能量强，同相轴横向连续性好；Ⅲ级物性层空间分异明显，北东部反射能量较强、同相轴连续，而南西部反射波能量较弱、同相轴断续分布。

在 DZ1 测线剖面桩号 534 m 附近识别出一处断点异常。该异常在Ⅱ级物性层表现清晰，反射波组 T_1、T_2 发生错断，形成约 80 m 的落差，呈现北东侧低、南西侧高的特征，指示断层上盘上升、下盘下降，为逆断层性质。在桩号 300～500 m 区间内，Ⅱ、Ⅲ级物性层的反射同相轴倾角由南西向北东方向逐渐变缓。位于 DZ1 测线东南侧的 D02、D03 露头点观测结果显示，断层将三桥组地层逆冲至马兰组黄土之上，进一步证实该处为一条逆冲断层。剖面上该断层向下倾角逐渐变缓，呈铲状形态。综合断点空间位置、相邻露头点断层几何形态及研究区构造特征，推断该断点处为庙山山前断裂南段所在位置。该断裂在地表深部表现为一条倾向 SW、具铲式形态的逆断层，其上段视倾角较陡(约 55°)，向下逐渐变缓。

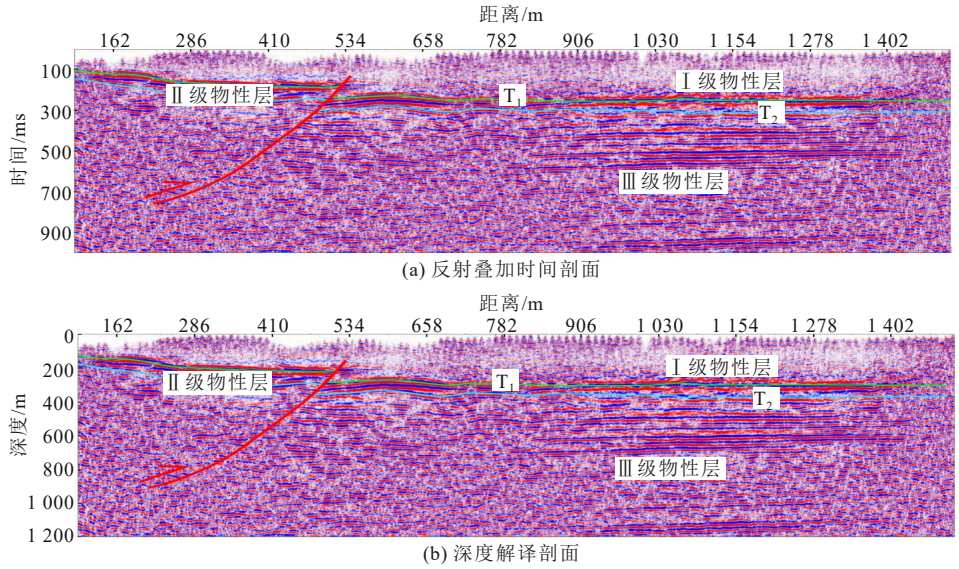


图 3 DZ1 测线反射叠加时间剖面及深度解译剖面

Fig. 3 Reflection stack time profile and interpreted depth profile along survey line DZ1

3 断裂浅部构造特征及活动时代鉴定

3.1 断裂空间展布

为查明庙山山前断裂南段的空间展布与活动性特征，在野外调查中采用无人机摄影测量技术（图 2），借助 Agisoft Metashape 和 ESRI ArcMap 软件生成高分辨率数字正射影像（Digital Orthophoto Map，DOM）与数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM），如图 4 所示。

研究区内，庙山山前断裂南段总体呈 NW-SE 走向，自石峡口水库东北侧向 SE 延伸，经井沟、海子窝及沙葱沟一带（图 4）。遥感解译显示，断裂线性地貌特征不明显。结合地质与地层资料分析，断裂主体被黄土覆盖，且覆盖层未发生明显扰动，指示其自覆盖以来构造活动微弱。综合分析表明，该断裂晚第四纪以来无明显活动迹象，为晚更新世断裂。

在遥感解译与野外调查基础上，选取庙山山前断裂南段沙葱沟及石峡口两处作为详细调查点，以核查遥感解译结果并寻找可能的断层露头。

3.2 野外剖面证据

本次对庙山山前断裂南段的野外调查共识别出三处断层面露头点，分别为沙葱沟剖面（点 D01）、石峡口Ⅰ号剖面（点 D02）及石峡口Ⅱ号剖面（点 D03）。在点 D01 处，断层将中新世彰恩堡组（N_1z）逆冲至晚更新世水洞沟组（Qp^3sd）之上；点 D02 与 D03 处，断层将早白垩世三桥组（K_1s）逆冲至晚更新

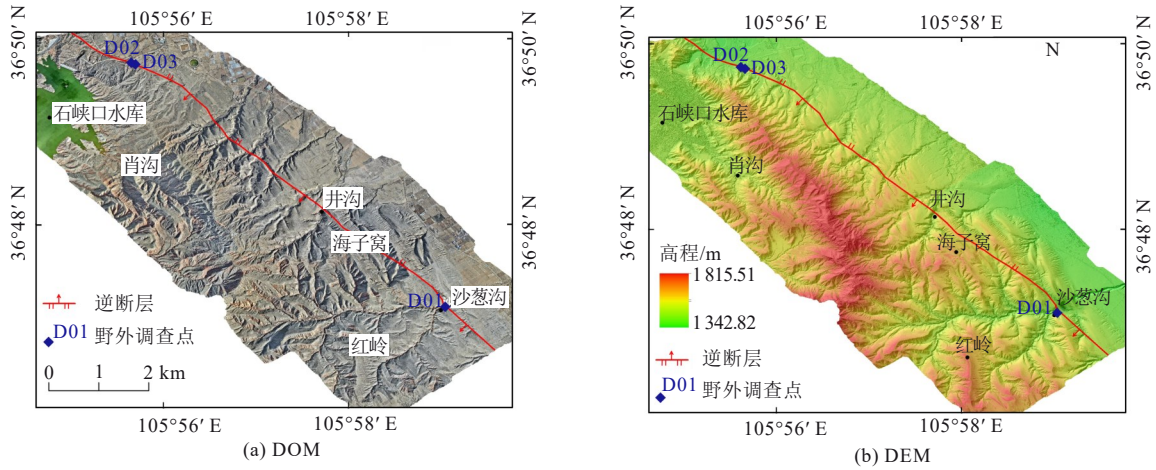


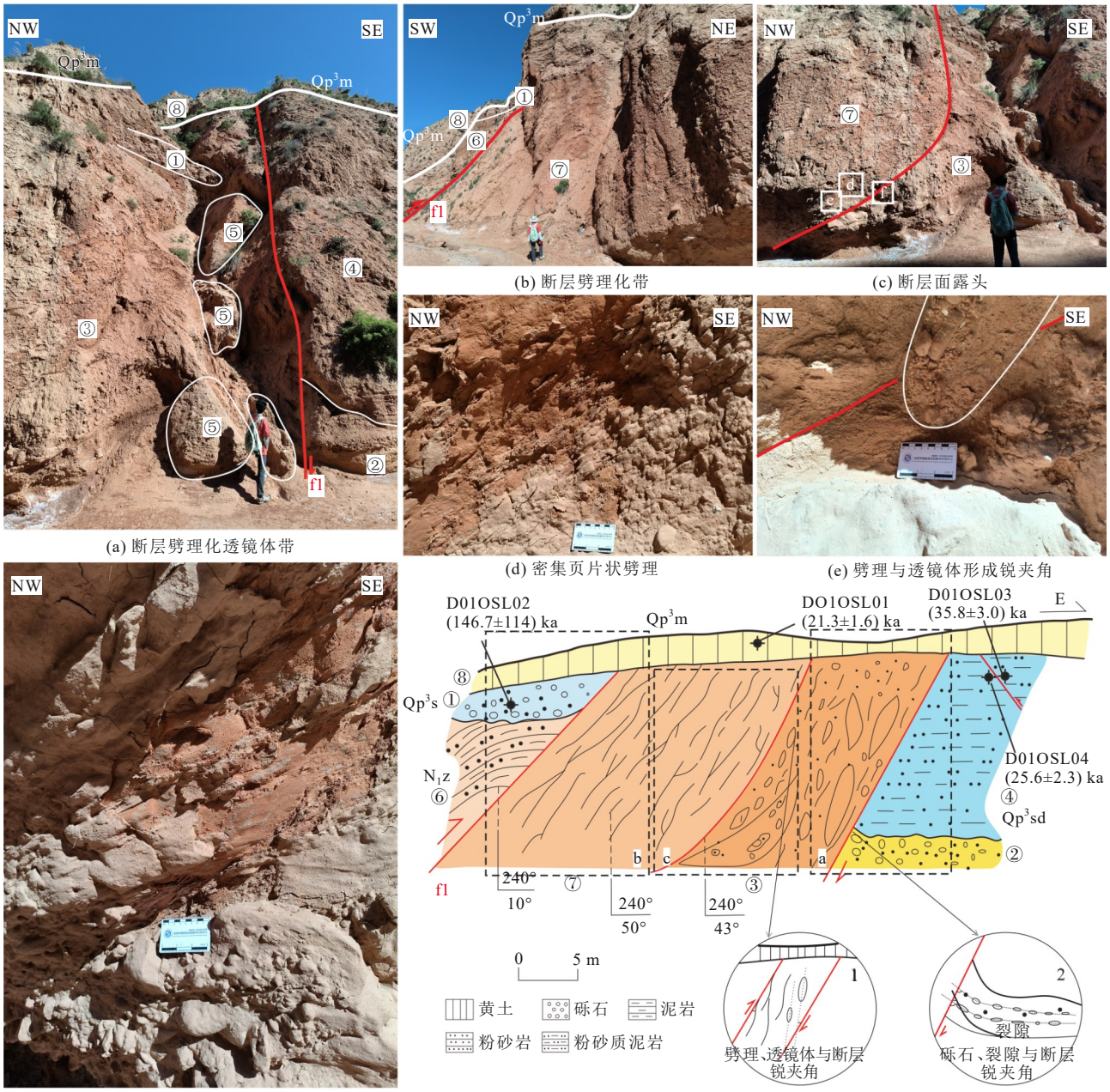
图 4 庙山山前断裂南段 DOM 与 DEM

Fig. 4 DOM and DEM of the southern segment of Miaoshan piedmont fault

世马兰组黄土(Qp^3m)之上。三处观测点的构造现象一致，共同揭示庙山山前断裂在地表浅部表现为一条走向 NW-SE、倾向 SW 的逆冲断层，剖面上呈上陡(25°～63°)下缓的铲形形态。

3.2.1　沙葱沟剖面(点 D01)

沙葱沟剖面(点 D01)位于马家岭子西侧约 400 m 处沙葱沟沟谷内，地处红岭背斜东北翼黄土台地前缘。断层错断水洞沟组地层(Qp^3sd)，将彰恩堡组(N_1z)推覆至其上。断层带宽约 25 m，主要由劈理化带与劈理化透镜体带组成[图 5(a)、(b)、(c)]。劈理化带宽约 14 m，劈理密集发育，呈叶片状[图 5(d)]，整体产状 240°∠50°。带内发育不规则石膏，呈脉状、团块状及揉皱状[图 5(f)]，反映其经历了相对远距离搬运及后期挤压变形；石膏主要富集于下部邻近断层主断面处，含量约 10%，向上逐渐减少。断层面产状为 240°∠43°，底部逐渐变缓。



(a) 断层劈理化透镜体带　(b) 断层劈理化带　(c) 断层面露头

(d) 密集页片状劈理　(e) 劈理与透镜体形成锐夹角

(f) 脉状、团状、揉皱状石膏　(g) D01 主断层面剖面图

①萨拉乌苏组底部砾石层；②砾石层；③劈理化透镜体带；④水洞沟组：灰绿色、桔黄色泥岩，粉砂质泥岩，粉砂岩；⑤大块透镜体；⑥彰恩堡组：紫红色薄层泥岩，粉砂质泥岩；⑦劈理化带；⑧马兰组黄土

图 5　D01 野外调查照片及断层剖面图

Fig. 5　Field photographs and interpreted fault profile at site D01

劈理化透镜体带[图 5(a)]宽约 11 m，透镜体陡立分布，直径 1 cm 至 2 m 不等。透镜体、劈理与断层面呈锐夹角[图 5(e)、(g)]；断层下盘发育砾石层，砾石陡倾定向排列，亦与断层面呈小角度相交[图 5(g)]。上述构造现象一致指示断层上盘上升、下盘下降，为逆断层。

为限定断层活动时代，在剖面①、②、③层位内采集 OSL 样品，编号为 D01OSL01～D01OSL04，测年结果依次为(21.3±1.6) ka、(146.7±11.4) ka、(25.6±2.3) ka 和(35.8±3.0) ka[图 5(g)、表 1]。据此将断层最新活动时代限定为晚更新世晚期。

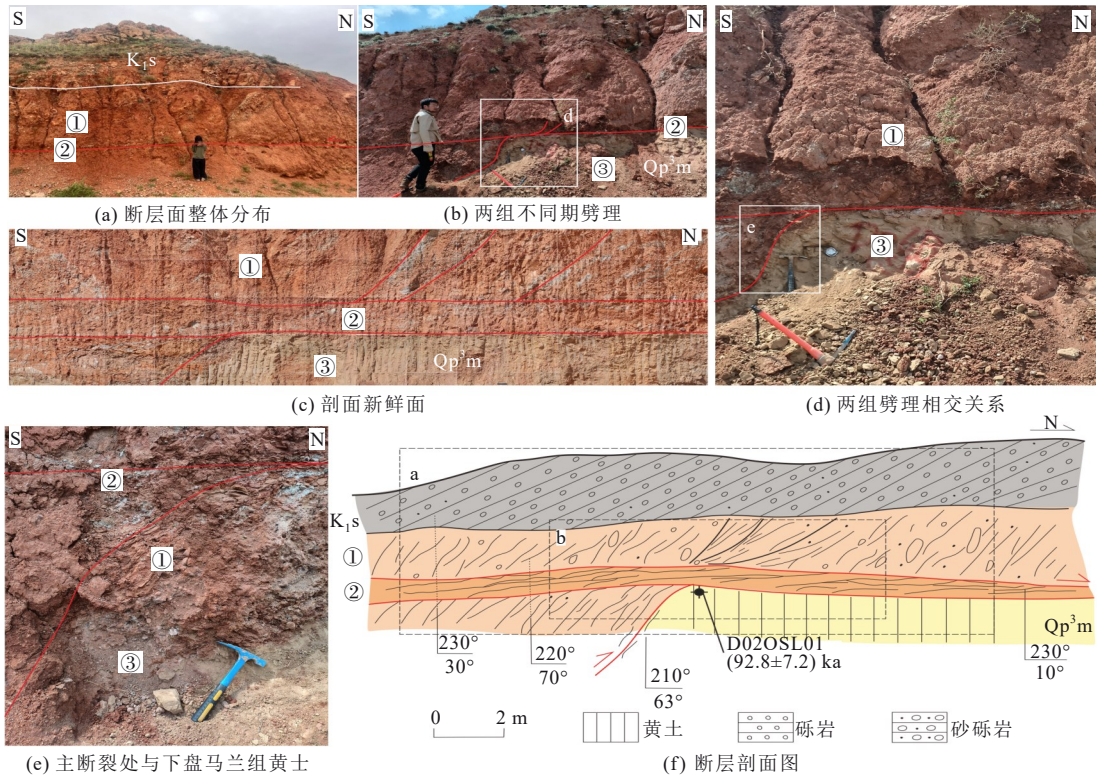
3.2.2　石峡口Ⅰ号剖面(点 D02)

石峡口Ⅰ号剖面(点 D02)位于石峡口水库北东约 2.8 km 处，地处石峡口背斜北翼。地表风化严重，构造特征不明显[图 6(a)]。清除地表风化物后，清晰观测到两期劈理构造[图 6(b)]，断层劈理带整体宽约 15 m。早期劈理①产状为 220°∠70°，后期劈理②产状近水平，为 230°∠10°[图 6(c)、(f)]。劈理②上部可见早期劈理①受后期应力作用，形成上陡下缓的发散型花状构造[图 6(b)、(c)、(d)]，该构造样式指示劈理②具有右行走滑性质[图 6(d)、(e)]。断层下盘发育马兰组黄土(Qp^3m)；上盘出露三桥组砾石层(K_1s)，且被逆冲推覆于马兰组黄土

表 1　OSL 样品测年结果

Table 1　OSL dating results of samples

序号	样品编号	剖面	U /(×10⁻⁶)	Th /(×10⁻⁶)	K /%	含水量 /%	环境剂量 /(Gy/ka)	等效剂量 D_e/Gy	年龄 /ka
1	D01OSL01	沙葱沟	2.51±0.13	18.48±0.92	1.83±0.09	5±5	3.81±0.27	81.3±2.6	21.3±1.6
2	D01OSL02	沙葱沟	2.44±0.12	7.98±0.4	1.21±0.06	7±5	2.65±0.19	388.0±12.4	146.7±11.4
3	D01OSL03	沙葱沟	3.03±0.15	10.56±0.53	1.71±0.09	1±5	3.71±0.27	95.1±5.2	25.6±2.3
4	D01OSL04	沙葱沟	2.56±0.13	11.62±0.58	1.95±0.1	3±5	3.80±0.28	136.1±5.6	35.8±3.0
5	D02OSL01	石峡口Ⅰ号	4.58±0.23	12.22±0.61	1.82±0.09	5±5	4.22±0.30	391.3±10.8	92.8±7.2
6	D03OSL01	石峡口Ⅱ号	4.19±0.21	13.56±0.68	1.82±0.09	3±5	4.30±0.31	346.0±23.9	80.5±8.0



(a) 断层面整体分布　(b) 两组不同期劈理　(c) 剖面新鲜面　(d) 两组劈理相交关系　(e) 主断裂处与下盘马兰组黄土　(f) 断层剖面图

①前期纵向劈理；②后期横向劈理；③马兰组黄土

图 6　D02 野外调查照片及断层剖面图

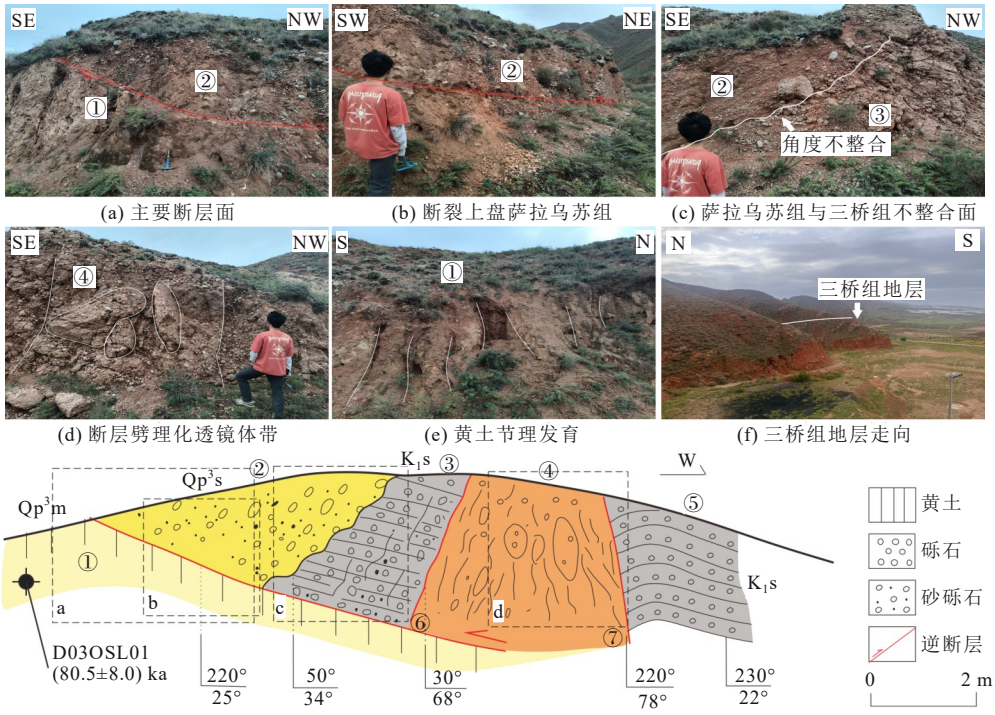
Fig. 6　Field photographs and interpreted fault profile at site D02

(Qp^3m)之上，其产状为 230°∠30°，指示主断裂形成时期。主断层为逆断层，产状为 210°∠63°。

为限定断层活动时代，在断层下盘马兰组黄土中采集 OSL 样品（编号 D02OSL01），测年结果为（92.8±7.2）ka[图 6(f)、表 1]，故将其最新活动时代限定为晚更新世早期。

3.2.3　石峡口Ⅱ号剖面（点 D03）

石峡口Ⅱ号剖面（点 D03）位于石峡口水库北东方向约 2.8 km 处，点 D02 东南侧，可见萨拉乌苏组（Qp^3s）和早白垩统三桥组（K_1s）地层逆冲至新生界第四系更新统马兰组黄土（Qp^3m）之上[图 7(a)、(g)]。断层产状为 220°∠25°，下盘为马兰组（Qp^3m），无明显层理构造，发育多条节理[图 7(e)]；上盘为萨拉乌苏组（Qp^3s），宽约 7 m，主要由紫红色砾石、砂土及黏土组成[图 7(b)]。萨拉乌苏组（Qp^3s）与南侧早白垩统三桥组（K_1s）呈角度不整合接触[图 7(c)]，产状为 50°∠34°。三桥组内部节理大量发育，同时发育劈理化透镜体带，宽 5～6 m，主要由两组倾向相反的节理控制[图 7(d)]，产状分别为 30°∠68°与 220°∠78°。三桥组内砾石形成陡立分布的透镜体，直径 1～50 cm 不等。劈理化透镜体带西侧，三桥组岩层受向下运动影响，形成小型牵引背斜褶皱[图 7(g)]。该点北西方可见三桥组地层倾斜出露，断层沿三桥组发育，表明断层与三桥组地层均为 NW-SE 走向[图 7(f)]。



①黄土，内发育多条节理；②萨拉乌苏组底部砾石层，岩性主要为砾石、砂土、粉土、泥；③三桥组，岩性主要为灰白色厚层状-块状砾岩、粗-中砾岩；④断裂劈理化透镜体带，含较大块透镜体，节理发育；⑤牵引褶皱；⑥NE 倾节理；⑦SW 倾节理

图 7　D03 野外调查照片及断层剖面图

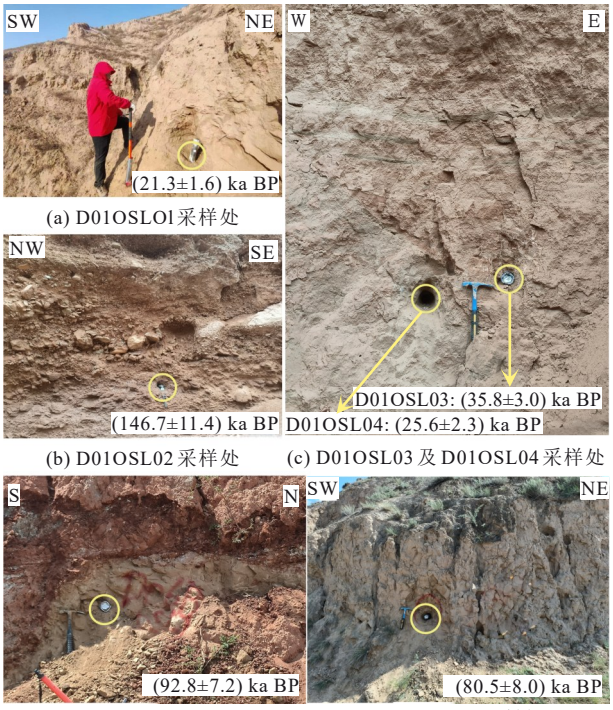
Fig. 7　Field photographs and interpreted fault profile at site D03

石峡口Ⅱ号剖面点处，主断裂切割至三桥组内透镜体带，而劈理化透镜体带仅发育于三桥组地层内，未延伸至萨拉乌苏组，指示该处存在两期构造运动：第一期发生于萨拉乌苏组沉积之前，使三桥组内形成劈理；第二期发生于马兰组沉积后，表现为显著逆冲活动，导致萨拉乌苏组与三桥组地层逆冲至马兰组之上。为限定主断层形成时代，于断层下盘马兰组黄土中采集 OSL 样品，测年结果为（80.5±8.0）ka[图 7(g)、图 8 和表 1]，故推断该断裂于晚更新世早期后形成。

4　讨论

4.1　区域构造环境讨论

张维岐等[1]于西山洼村西阶地（天然露头与探槽揭露）及南泥沟北背斜核部附近均识别出正断层。然而，这些正断层均位于本次研究的庙山山前



(a) D01OSLO1采样处 (b) D01OSL02采样处 (c) D01OSL03及D01OSL04采样处

(d) D02OSL01采样处 (e) D03OSL01采样处

图8 OSL样品野外采集照片及结果

Fig. 8 Field photographs and results of OSL samples

断裂上升盘(西盘),系主断裂斜向逆冲过程中派生的浅层次级构造,不反映区域构造应力环境[1]。此类兼具走滑分量的逆断层区发育正断层的现象,在国内外不乏相关实例,如海原断裂东段月亮山逆走滑断层[1]、塔北隆起轮台断隆带[20]及阿尔卑斯造山带格拉鲁斯断层[21-23]。

早更新世中晚期之前,该区域发育一系列向北东突出的弧形逆冲断裂,古近纪-新近纪地层普遍发生褶皱变形,形成桃山、庙山、田子塘等走向320°的背斜构造[1,4],指示当时区域主压应力方向为NNE-NE;早更新世中晚期以来,弧形断裂的活动性质由挤压逆冲转变为左旋走滑,其中NW-NWW向断裂段以左旋走滑为主,而近SN向段则表现为挤压逆冲[1-2,4,7,16],反映区域主应力方向逐渐转变为NE-NEE向。1920年海原8½级与1709年中卫南7½级地震产生的地表破裂带、左旋水平位移及挤压鼓包等构造现象,一致指示该时期构造应力场以N80°E向水平挤压为主[1-3]。现代全球定位系统(Global Positioning System, GPS)观测与震源机制解进一步表明,青藏高原东北缘主压应力P轴平均方位为NEE向,倾角近水平,反映宁夏南部地区处于NEE-SWW向水平挤压构造环境[1,24-26],该应力状态亦得到原位地应力测量结果的直接验证[1]。综上,研究区位于香山—天景山断裂东南前锋区,整体处于NEE向水平挤压作用主导的区域构造环境中。

4.2 庙山山前断裂南段构造特征及活动性讨论

关于庙山山前断裂南段的构造特征,张维岐等[1]基于断裂上盘褶皱显示的断坡型特征,提出该断裂剖面呈SW倾并向下渐趋平缓的铲形形态。本次浅层地震勘探结果及三处野外露头揭示的断层几何形态,均支持并进一步验证了该铲式构造模型。本次调查中,断裂的左旋走滑特征表现不显著,但庙山山前断裂北、中、南段整体呈左阶羽列展布,且前人在草场南约2 km处识别出河流两次改道现象,指示该断裂存在长期左旋走滑位移[1]。此外,詹慧丽等[26]对2015年2月5日庙山山前断裂带*M*3.6地震的震源机制解分析显示,其P轴优势方向为NE-SW(倾角4.3°),T轴为NW-SE(倾角14.1°),表明该地震具有走滑特征。综上,庙山山前断裂南段走向NW、倾向SW,为左旋走滑兼具逆冲的运动性质,剖面上呈上陡下缓的铲形形态。

本次野外露头调查显示,沙葱沟剖面(D01)中断层下盘的水洞沟组地层为该断层错开的最新地层,其内部发育小型逆断层,两侧OSL测年结果分别为(25.6±2.3) ka和(35.8±3.0) ka[图5(g)、图8(c)]。柴炽章等[4]在石峡口南侧探槽中揭露典型的逆掩特征,表现为西盘白垩系沿断层向东逆掩于距今(42 040±1 750) a的上更新统之上。张维岐等[1]在西山洼村西侧露头观测到该断层错开的最新地层为距今(35 130±1 130) a的风成马兰黄土。上述结果表明,庙山山前断裂南段的最新活动时代为晚更新世晚期。

4.3 庙山山前断裂成因与发震能力讨论

庙山断褶带的形成与演化主要受控于新生代中晚期青藏高原的持续隆升与侧向扩展[16-17]。在此背景下,宁南弧形构造系发生阶段性前展式扩展,驱动香山—天景山次级块体持续向东或南东方向滑移。其北部边界天景山断裂发生左旋走滑,积累大量水平位移,而庙山地区位于该次级条块前端,且上覆中-新生代盖层塑性较强。当前缘遭遇阻挡时,构造应变难以继续以纯走滑形式向东传递,从而发生明显的构造转换:天景山活动断裂带的左旋走滑位移量被庙山断褶带以褶皱和逆冲缩短的形式吸收[1,4,8]。与此同时,海原断裂在六盘山部位也发生了性质类似的运动转换[7,16,27-31]。该现象具有构造必然性。自新生代以来,青藏块体向北东方向

的挤压扩展持续受到阿拉善与鄂尔多斯两个刚性块体的阻挡，构造应变遂沿先存 NWW 或近 EW 向复背斜及逆冲断裂系，发生东南向的侧向滑移和顺时针旋转（图 9）。在此构造框架下，香山—天景山断裂带与海原断裂带的东延部分均在前缘受阻背景下发生走滑-挤压转换，共同协调高原物质的东向逸出。

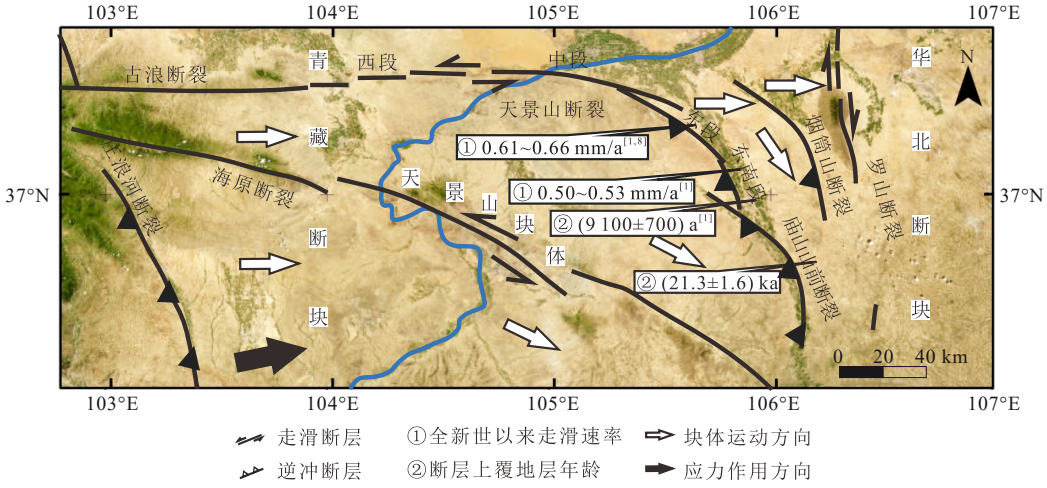


图 9　天景山块体运动图解及天景山断裂分段示意图

Fig. 9　Schematic diagram of Tianjingshan block movement and segmentation map of the Tianjingshan fault

香山—天景山断裂的活动性具有显著的分段特性，整体上表现出自西向东逐渐衰减的趋势[1,8,32-33]。本文依据张维岐等[1]提出的分段方案（图 9），并结合庙山断褶带的构造演化过程，认为香山—天景山断裂东段及东南段在活动性与发震能力方面，与庙山山前断裂存在较密切的构造关联。香山—天景山断裂东段的地质证据表明，该断裂在晚更新世晚期至全新世早期仍有活动，共记录 5 次古地震事件，最新断错地层年龄为（8 550±80）a，全新世中期以来的滑动速率为 0.61～0.66 mm/a[1,8]。东南段未见全新世断错证据，上覆地层年龄为（9 100±700）a，表明该段主体活动时代为晚更新世中晚期，但依据水系位移推断全新世中期以来滑动速率为 0.50～0.53 mm/a[1]，显示其活动强度较东段进一步减弱。这一自西向东活动性递减的特征表明，位于其东南延伸方向的庙山山前断裂应具有更低的构造活动水平。本次研究在庙山山前断裂南段沙葱沟处获得的覆盖层 OSL 年龄为（21.3±1.6）ka，指示该断裂自晚更新世晚期以来未发生明显活动。2010 年以来，香山—天景山地区地震活动整体偏弱，地震时间间隔较大，地震视应力相对较低[34]，历史地震记录亦表明该断裂及邻区无 M≥4.7 地震事件。综上所述，庙山山前断裂南段未来发生强震的可能性较低。

5　结论

（1）综合浅层地震勘探剖面与野外露头调查结果，揭示庙山山前断裂南段为一条长约 39 km、走向 NW-SE、倾向 SW 的逆走滑断层，剖面上呈上部略陡、向下趋于平缓的铲形形态。

（2）野外露头观测与 OSL 测年数据表明：沙葱沟剖面处，庙山山前断裂南段错断了年龄为（25.6±2.3）ka BP 的水洞沟组地层；石峡口Ⅰ号剖面处，断裂错断了下盘年龄为（92.8±7.2）ka BP 的马兰组黄土层；石峡口Ⅱ号剖面处，断裂错断了下盘年龄为（80.5±8.0）ka BP 的马兰组黄土。这表明该断裂最新活动时代为晚更新世晚期。

（3）庙山断褶带本质上是香山—天景山断裂东延过程中端部发生构造转换的产物，其断裂活动性与香山—天景山断裂东段及东南段密切相关。香山—天景山断裂东段活动时代集中于晚更新世晚期至全新世初期，东南段集中于晚更新世中晚期，整体活动性较弱。本次研究在庙山山前断裂南段沙葱沟处测得覆盖层测年为（21.3±1.6）ka，表明该断裂自晚更新世晚期以来无明显活动。同时，研究区内无 M≥4.7 破坏性地震记录。综上，庙山山前断裂南段未来发生强震的可能性较低。

参考文献(References)

[1] 张维歧, 焦德成, 柴炽章, 等. 天景山活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 2015.
ZHANG Weiqi, JIAO Decheng, CHAI Chizhang. Tianjingshan active fault zone[M]. Beijing: Seismological Press, 2015.

[2] 宁夏回族自治区地质调查院. 中国区域地质志:宁夏志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region. Regional geology of China: Ningxia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.

[3] 宁夏回族自治区地震局. 宁夏回族自治区地震历史资料汇编[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region. Compilation of historical earthquake data of Ningxia Hui Autonomous Region[M]. Beijing: Seismological Press, 1988.

[4] 柴炽章, 张维岐, 焦德成. 天景山断裂带前锋区第四纪构造变形及成因分析[J]. 中国地震, 1998(2): 52-58.
CHAI Chizhang, ZHANG Weiqi, JIAO Decheng. Quaternary structure feature in forward area of Tianjingshan fault zone and its contributing factor analysis [J]. Earthquake Research in China, 1998(2): 52-58.

[5] 肖骏, 陈汉林, 林秀斌, 等. 海原—六盘山地区活动构造的活动时间厘定: 来自光释光测年的限定[J]. 地球科学, 2011, 36(6): 993-998.
XIAO Jun, CHEN Hanlin, LIN Xiubin, et al. Determination of the timing of active structures in Haiyuan—Liupan Shan area: constraints from OSL dating[J]. Earth Science, 2011, 36(6): 993-998.

[6] 尹功明, 江亚风, 俞岗, 等. 晚第四纪以来香山—天景山断裂左旋走滑量研究[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 472-479.
YIN Gongming, JIANG Yafeng, YU Gang, et al. The study of the left-lateral displacement on the Xiangshan—Tianjingshan fault in Late Quaternary[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(3): 472-479.

[7] 董金元, 罗全星, 李新男, 等. 天景山断裂带晚第四纪左旋走滑运动速率确定及其空间分布特征[J]. 地球学报, 2021, 42(4): 527-536. .
DONG Jinyuan, LUO Quanxing, LI Xinnan, et al. Determination and spatial pattern of the Late Quaternary left-lateral slip rate of the Tianjingshan fault [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2021, 42(4): 527-536.

[8] LI X N, LI C Y, PIERCE I K D, et al. New slip rates for the Tianjingshan fault using optically stimulated luminescence, GPS, and paleoseismic data, NE Tibet, China[J]. Tectonophysics, 2019, 755: 64-74.

[9] 房建军, 刘池阳, 韩鹏, 等. 宁南盆地构造演化探讨[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 813-816.
FANG Jianjun, LIU Chiyang, HAN Peng, et al. A discussion on structural evolution of Ningnan Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2008, 38(5): 813-816.

[10] 王东, 张快乐, 李伟. 六盘山弧形构造带几何学、运动学及年代学研究[J]. 西部资源, 2013(6): 84-86.
WANG Dong, ZHANG Kuaile, LI Wei. Study on geometry, kinematics and chronology of Liupanshan arc tectonic belt[J]. Westrn Resources, 2013(6): 84-86.

[11] 邓辉. 宁南盆地新生代沉积-构造面貌及其演化[D]. 西安: 西北大学, 2014.
DENG Hui. Cenozoic sedimentary-tectonic features and evolution in Ningnan Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.

[12] 刘兴旺, 袁道阳, 吴赵, 等. 六盘山断裂带活动性差异及其对六盘山隆升的影响[J]. 第四纪研究, 2016, 36(4): 898-906.
LIU Xingwang, YUAN Daoyang, WU Zhao, et al. Differetial acticeties along the Liupanshan Mountain fault zone and its influence on uplift of the Liupanshan Mountain[J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(4): 898-906.

[13] 曾建平, 安百州, 虎新军, 等. 六盘山盆地构造解释及特征分析[J]. 宁夏工程技术, 2020, 19(2): 185-192.
ZENG Jianping, AN Baizhou, HU Xinjun, et al. Structural interpretation and characteristic analysis of Liupanshan Basin [J]. Ningxia Engineering Technology, 2020, 19(2): 185-192.

[14] 李明涛, 李黎明, 梁志荣. 宁夏同心地区古近纪—新近纪沉积岩地球化学特征及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(2): 304-318.
LI Mingtao, LI Liming, LIANG Zhirong. Geochemical characteristics and their significances of the Paleogene—Neogene sedimentary rocks in the Tongxin area, Ningxia, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(2): 304-318.

[15] 武治群, 雷启云, 杜鹏, 等. 银川盆地东南缘面子山—清水营断裂活动性[J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 45-56.
WU Zhiqun, LEI Qiyun, DU Peng, et al. Activity of the Mianzishan—Qingshuiying fault in the southeast margin of the Yinchuan Basin[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 45-56.

[16] 郑文俊, 袁道阳, 张培震, 等. 青藏高原东北缘活动构造几何图像、运动转换与高原扩展[J]. 第四纪研究, 2016, 36(4): 775-788.
ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, ZHANG Peizhen, et al. Tectonic geometry and kinematic dissipation of the active faults in the northeastern Tibetan Plateau and their implications for understanding northeastward growth of the plateau[J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(4): 775-788.

[17] 董晓朋, 李振宏, 井向辉, 等. 青藏高原东北缘弧形构造带新生代地层沉积序列及年代学研究进展[J]. 地质力学学报, 2023, 29(4): 465-484.
DONG Xiaopeng, LI Zhenhong, JING Xianghui, et al. Stratigraphic sequence characteristics and geochronology research progress of the Cenozoic in the arcuate tectonic belt on the northeastern margin of the Tibet Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(4): 465-484.

[18] 雷启云. 青藏高原东北缘弧形构造带的扩展与华北西缘银川

盆地的演化[J]. 国际地震动态，2017，47(10)：44-46.
LEI Qiyun. Expansion of the arc-shaped structural belt in the northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau and evolution of Yinchuan Basin in the western margin of North China[J]. Recent Developments in World Seismology，2017，47(10)：44-46.

[19] 尹军杰，吴子泉，李文慧. 叠前深度偏移技术在活动断层探测中的应用[J]. 地震研究，2004，27(2)：191-197.
YIN Junjie，WU Ziquan，LI Wenhui. Application of pre-stack-depth-migration technique in active-fault exploration[J]. Journal of Seismological Research，2004，27(2)：191-197.

[20] 崔泽宏，汤良杰. 一种挤压构造背景下正断层的成因模式[J]. 新疆石油地质，2007，28(2)：254-256.
CUI Zehong，TANG Liangjie. A genetic model of normal fault under compressive tectonic setting[J]. Xinjiang Petroleum Geology，2007，28(2)：254-256.

[21] ERICKSON S G. Mechanics of deformation in thrust fault zones[D]. College Station：Texas A&M University，1990.

[22] HERWEGH M，HÜRZELER J P，PFIFFNER O A，et al. The Glarus thrust：excursion guide and report of a field trip of the Swiss Tectonic Studies Group[J]. Swiss Journal of Geosciences，2008，101(2)：323-340.

[23] RING U，BRANDON M T，RAMTHUN A. Solution-mass-transfer deformation adjacent to the Glarus Thrust，with implications for the tectonic evolution of the Alpine wedge in eastern Switzerland[J]. Journal of Structural Geology，2001，23(10)：1491-1505.

[24] 曾宪伟，苇海亮，陈春梅，等. 利用小震震源机制解研究宁夏南部及邻区构造应力场[J]. 地震研究，2015，38(1)：51-57.
ZENG Xianwei，XIN Hailiang，CHEN Chunmei，et al. Characteristics research of tectonic stress in southern Ningxia and its adjacent areas by focal mechanisms of small earthquakes[J]. Journal of Seismological Research，2015，38(1)：51-57.

[25] 许英才，高原，石玉涛，等. 鄂尔多斯块体西缘地壳介质各向异性：从银川地堑到海原断裂带[J]. 地球物理学报，2019，62(11)：4239-4258.
XU Yingcai，GAO Yuan，SHI Yutao，et al. Crustal seismic anisotropy in the west margin of the Ordos Block：from the Yinchuan graben to the Haiyuan fault zone[J]. Chinese Journal of Geophysics，2019，62(11)：4239-4258.

[26] 詹慧丽，张冬丽，何骁慧，等. 基于地震活动特征的鄂尔多斯西缘现今构造变形模式的限定[J]. 地震地质，2020，42(2)：346-365.
ZHAN Huili，ZHANG Dongli，HE Xiaohui，et al. Limitation of current tectonic deformation modes in the western margin of Ordos based on seismic activity characteristics[J]. Seismology and Geology，2020，42(2)：346-365.

[27] 郑文俊，孙鑫，雷启云，等. 鄂尔多斯活动地块边界带第四纪晚期构造活动特征及强震孕育机制[J]. 地质力学学报，2024，30(2)：206-224.
ZHENG Wenjun，SUN Xin，LEI Qiyun，et al. Late Quaternary tectonic activity and strong earthquake generation mechanism around the boundary zone of the Ordos active-tectonic block，central China[J]. Journal of Geomechanics，2024，30(2)：206-224.

[28] ZHENG W J，ZHANG P Z，HE W G，et al. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau：evidence from decadal GPS measurements and Late Quaternary slip rates on faults[J]. Tectonophysics，2013，584：267-280.

[29] ZHANG P Z，BURCHFIEL B C，MOLNAR P，et al. Amount and style of Late Cenozoic deformation in the Liupan Shan area，Ningxia Autonomous Region，China[J]. Tectonics，1991，10(6)：1111-1129.

[30] WANG W，KIRBY E，PEIZHEN Z，et al. Tertiary basin evolution along the northeastern margin of the Tibetan Plateau：evidence for basin formation during Oligocene transtension[J]. Geological Society of America Bulletin，2013，125(3-4)：377-400.

[31] LIU J R，REN Z K，ZHANG H P，et al. Slip rates along the Laohushan fault and spatial variation in slip rate along the Haiyuan fault zone[J]. Tectonics，2022，41(2)：e2021TC006992.

[32] LI X N，LI C Y，WESNOUSKY S G，et al. Paleoseismology and slip rate of the western Tianjingshan fault of NE Tibet，China[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2017，146：304-316.

[33] 李新男. 香山—天景山断裂带西段晚第四纪运动学特征与古地震研究[D]. 北京：中国地震局地质研究所，2014.
LI Xinnan. Late Quaternary kinematics and paleoearthquakes in the western segment of Xiangshan—Tianjingshan fault zone[D]. Beijing：Institute of Geology，China Earthquake Administration，2014.

[34] 罗恒之，曾宪伟，李文君，等. 宁夏地区地震视应力时空变化特征分析[J]. 地震工程学报，2025，47(1)：178-188，198.
LUO Hengzhi，ZENG Xianwei，LI Wenjun，et al. Temporal and spatial variation characteristics of seismic apparent stress in the Ningxia region[J]. China Earthquake Engineering Journal，2025，47(1)：178-188，198.

（本文编辑：赵乘程）