

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.235>



祁连山西端大雪山北山断裂晚第四纪构造变形特征

萧千皓¹, 袁道阳^{1*}, 文亚猛^{1,2}, 于锦超¹, 陈艳文¹, 孙 浩¹

1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃兰州 730000
2. 齐鲁师范学院地理与旅游学院, 山东济南 250000

摘要: 位于青藏高原北部边缘、祁连山西端的石包城-昌马盆地内部及其边缘活动构造众多, 构造活动强烈, 其中的石包城-鹰嘴山断裂作为盆地内部一条规模最大的逆断裂-褶皱带, 构造变形样式复杂, 断错地貌清晰。基于高精度无人机SfM (Structure-from-Motion)摄影测量, 结合野外实地调查对断错地貌的精细解译, 分析了石包城-鹰嘴山断裂东段的大雪山北山断裂段的最新活动特征、构造变形样式, 并利用宇宙成因核素方法对关键断错地貌定年, 进而通过对多级阶地的变形方式和变形量分析及相应的地貌面年龄, 计算其晚第四纪变形速率。结果表明: 大雪山北山断裂由两排断裂组成, 其中前缘断裂的逆冲作用在盆地内部形成了多条逆断裂-褶皱带, 而后缘断裂则发育与褶皱作用相关的弯矩正断层, 构成典型的逆断裂-断弯褶皱组合形态。断裂活动使得前缘断裂(鲁家埃段)穿过的 T_3 和 T_4 阶地分别产生了 (6.56 ± 0.34) m 和 (16.09 ± 1.13) m 的垂直位移量, 结合阶地年龄计算得到该段断裂晚第四纪的垂直滑动速率约为 (0.15 ± 0.01) mm/a, 水平缩短速率约为 (0.12 ± 0.02) mm/a, 断裂总体逆冲速率约为 (0.19 ± 0.03) mm/a。其深部滑脱面向南延伸至野马河-大雪山主断裂约深 (2.7 ± 0.5) km 处, 构成一典型的薄皮状逆断裂-褶皱变形带, 这一结构样式为该断裂系向盆地内部前展式挤压扩展的结果。

关键词: 大雪山北山断裂; 无人机影像; 逆断裂-褶皱带; 弯矩正断层; 构造地质学。

中图分类号: P546 文章编号: 1000-2383(2026)01-329-16 收稿日期: 2025-07-30

Late Quaternary Tectonic Deformation Characteristics of Daxue Shan Bei Shan Fault in the Western Qilian Mountains

Xiao Qianhao¹, Yuan Daoyang^{1*}, Wen Yameng^{1,2}, Yu Jinchao¹, Chen Yanwen¹, Sun Hao¹

1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
2. School of Geography and Tourism, Qilu Normal University, Jinan 250000, China

Abstract: Located at the northern edge of the Qinghai-Tibet Plateau and the western end of the Qilian Mountains, the Shibaocheng-Changma Basin and its surrounding areas are characterized by numerous active tectonic features and intense tectonic activity. Among these, the Shibaocheng-Yingzuishan Fault Zone, as the largest reverse fault-fold belt in the basin, exhibits complex tectonic deformation patterns and distinct fault dislocation landforms. This region is an ideal area for studying basin-mountain tectonic deformation and its deep-shallow tectonic relationships, as well as for understanding the tectonic conversion relationships between different faults and crustal shortening patterns. This study employs high-precision unmanned aerial vehicle (UAV) Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry techniques, combined with field survey results, to conduct a detailed

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(No. 2022xjkk1305); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(No. 2019QZKK0901)。

作者简介: 萧千皓(2000-), 男, 硕士, 主要从事活动构造与构造地貌研究。ORCID: 0009-0000-0813-2065. E-mail: xiaoqh2023@lzu.edu.cn

*** 通讯作者:** 袁道阳, E-mail: yuandy@lzu.edu.cn

引用格式: 萧千皓, 袁道阳, 文亚猛, 于锦超, 陈艳文, 孙浩, 2026. 祁连山西端大雪山北山断裂晚第四纪构造变形特征. 地球科学, 51(1): 329-344.

Citation: Xiao Qianhao, Yuan Daoyang, Wen Yameng, Yu Jinchao, Chen Yanwen, Sun Hao, 2026. Late Quaternary Tectonic Deformation Characteristics of Daxue Shan Bei Shan Fault in the Western Qilian Mountains. *Earth Science*, 51(1): 329-344.

interpretation of faulted landforms. It analyzes the latest activity characteristics and tectonic deformation patterns of the Daxue Shan Bei Shan Fault within the eastern segment of the Yingzishan Fault. It also employs cosmogenic nuclide dating methods to age-date key faulted landforms, and further calculates the Late Quaternary deformation rates through analyses of the deformation patterns and deformation amounts of multi-level terraces and their corresponding landform surfaces. The research results indicate that the Daxue Shan Bei Shan Fault consists of two rows of faults. The thrusting action of the front-edge fault has formed multiple reverse fault-fold belts within the basin, while the rear-edge fault has developed bend-moment normal faults associated with fold, forming a typical reverse fault-normal fold combination. Fault activity caused the front-edge fault (Lujiaai segment) terraces T_3 and T_4 to experience vertical displacements of (6.56 ± 0.34) m and (16.09 ± 1.13) m, respectively. Based on terrace age calculations, the vertical slip rate of this fault segment is approximately (0.15 ± 0.01) mm/a, with a horizontal shortening rate of approximately (0.12 ± 0.02) mm/a and the overall thrust rate is approximately (0.19 ± 0.03) mm/a. The deep slip surface extends southward to Daxue Shan Fault at a depth of approximately (2.7 ± 0.5) km, forming a typical thin-skinned reverse fault-fold deformation zone, which is the result of the fault system's forward-extending compression and expansion into the basin interior.

Key words: Daxue Shan Bei Shan Fault; unmanned aerial vehicle image; reverse fault fold belt; bending-moment normal fault; structural geology.

阿尔金断裂是青藏高原北部与塔里木盆地之间的边界断裂,是一条岩石圈规模的大型左旋走滑断裂,是欧亚变形场的主要构造之一(Tapponnier *et al.*, 1982; Peltzer *et al.*, 1989; Avouac and Tapponnier, 1993; Wittlinger *et al.*, 1998; Replumaz and Tapponnier, 2003; Mériaux *et al.*, 2005; 许志琴等, 2011),其水平滑动速率在阿克塞以西稳定在 (10 ± 2) mm/a左右,自肃北开始向东其走滑速率迅速衰

减,到宽滩山一带仅 $1 \sim 2$ mm/a(Yan *et al.*, 2024)。阿尔金断裂东段滑动速率的衰减逐渐被祁连山西端一系列逆冲断裂所吸收,其左旋位移的减小量逐渐转化为逆断层的地壳缩短和上升盘推覆体的隆起作用,形成了党河南山、大雪山和北祁连山等一系列北西向山地和山间盆地(图1)(Tapponnier *et al.*, 2001; Luo *et al.*, 2015)。其中,石包城附近是阿尔金断裂向东应变分配和构造转换的关键三联点

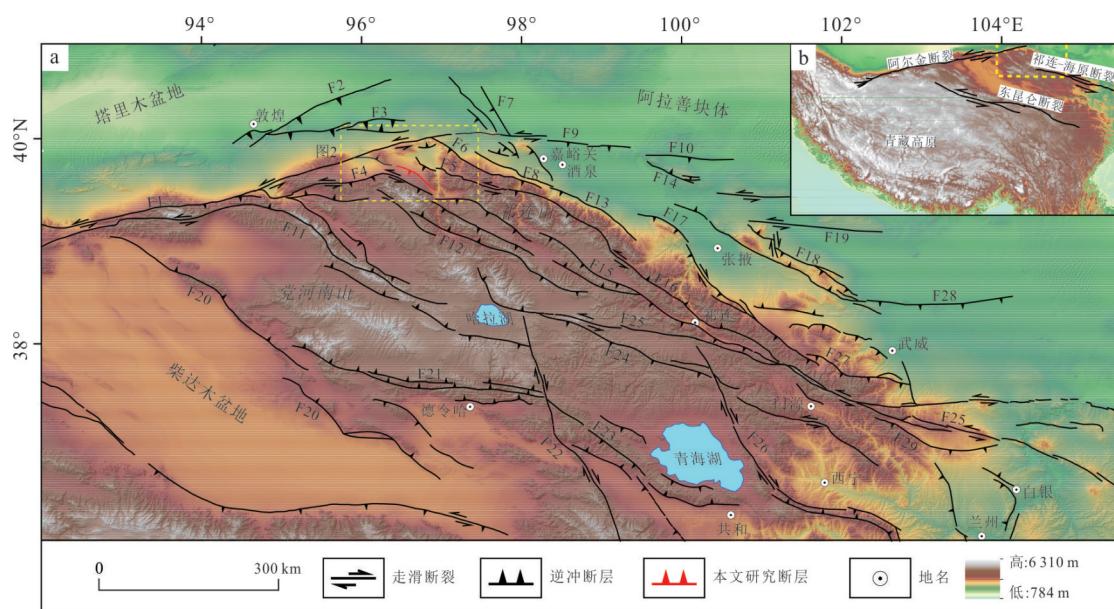


图 1 青藏高原东北缘活动断裂分布

Fig.1 Distribution of active faults in the northeast margin of Tibetan Plateau

F1. 阿尔金断裂; F2. 三危山断裂; F3. 南截山断裂; F4. 野马河-大雪山断裂; F5. 昌马断裂; F6. 旱峡-大黄沟断裂; F7. 花海断裂; F8. 玉门-北大河断裂; F9. 黑山-金塔南山断裂; F10. 慕少梁断裂; F11. 党河南山断裂; F12. 疏勒南山断裂; F13. 佛洞庙-红崖子断裂; F14. 合黎山断裂; F15. 托勒山北缘断裂; F16. 肃南-祁连断裂; F17. 榆木山断裂; F18. 龙首山断裂; F19. 桃花拉山-阿右旗断裂; F20. 柴达木盆地北缘断裂; F21. 宗务隆山断裂; F22. 鄂拉山断裂; F23. 青海南山断裂; F24. 大通山断裂; F25. 祁连-海原断裂; F26. 日月山断裂; F27. 皇城-双塔断裂; F28. 河西堡-四道山断裂; F29. 玛雅雪山断裂

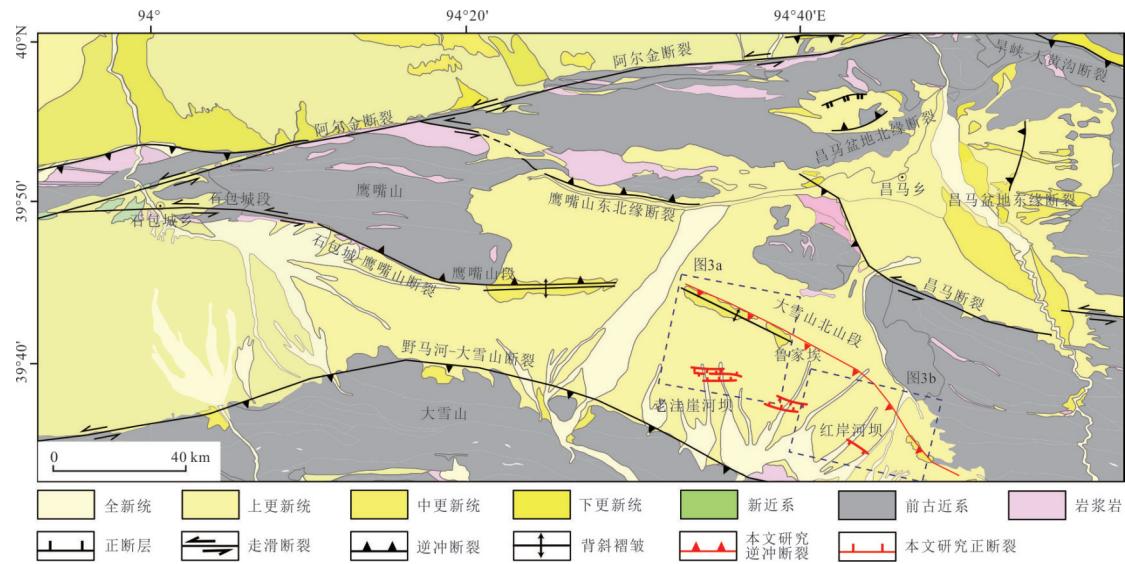


Fig.2 Distribution of active faults in the Shibaocheng-Changma Basin

之一,其重要的分支断裂即为石包城-鹰嘴山断裂。该断裂西自石包城乡,向南东延伸到昌马盆地内部,可分为西段的石包城段、中段的鹰嘴山段和东段的大雪山北山段,其性质逐渐从左旋走滑转变为挤压逆冲和逆断裂-褶皱变形,其与周缘断裂共同控制了石包城-昌马盆地的发育演化和构造变形(图2)。

前人对石包城-昌马盆地周边的活动断裂,包括位于盆地北部的阿尔金断裂东段、盆地东北部的昌马断裂和旱峡-大黄沟断裂、盆地南部的野马河-大雪山断裂等开展了较为深入的研究(图2)(罗浩等,2016,2020;吴明等,2017;何文贵等,2018;刘亢等,2019),而对延伸到盆地内部的石包城-鹰嘴山断裂东段的大雪山北山断裂则鲜有深入研究;仅Meyer *et al.*(1998)早期开展了初步的考察研究,但因缺少高分辨率的影像资料和绝对年代样品的约束,对大雪山北山断裂的构造变形方式、缩短速率和最新活动性等缺乏更深入的认识。因此对该断裂开展深入研究,对揭示祁连山西端构造变形样式、转换关系和应变分配等均具有重要意义。

1 地质构造背景

石包城-昌马盆地是位于祁连山北缘最西端的一个压陷性山间盆地,其西北边界为阿尔金断裂,东界为旱峡-大黄沟断裂,南至野马河-大雪山断裂和昌马断裂等,整体呈不规则的矩形。盆地的沉积演化和构造变形主要受阿尔金断裂东段走滑活动、南部野马河-大雪山断裂的左旋兼逆冲挤压以

及东部昌马断裂的左旋走滑作用控制,经历了多期次强烈的构造活动之后,盆地内部发育了规模较大的石包城-鹰嘴山NWW向的逆断裂和褶皱带。

综合前人研究结果,石包城-昌马盆地周边的多条活动断裂带以左旋走滑为主,兼具挤压逆冲变形分量。其中,阿尔金断裂作为青藏高原北部一条巨型左旋走滑断裂带,其水平滑动速率在肃北以西稳定在 (10 ± 2) mm/a左右,自肃北向东速率减小至7 mm/a,向东到宽滩山一带逐渐递减至1~2 mm/a,甚至到金塔南山断裂其走滑速率仅有0.27~0.48 mm/a(Zhang *et al.*, 2024),其滑动速率的衰减被祁连山和河西走廊西段一系列NWW向的逆冲断裂和褶皱隆起所吸收和转换(张宁等,2016; Liu *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2024)。野马河-大雪山断裂位于祁连山最西端,处于阿尔金断裂带与祁连山断裂带之间的构造转换部位,全长约170 km,呈NE向展布,为一条左旋走滑兼逆冲性质的全新世活动断裂。野马河-大雪山断裂由西段(肃北段)、中段(野马河段)和东段(大雪山段)所组成。其中,肃北段断裂活动性质以挤压逆冲为主,逆冲速率为 $(0.72\pm 0.08)\sim(0.86\pm 0.16)$ mm/a;野马河段以左旋走滑为主,其水平滑动速率为 $(2.50\pm 0.36)\sim(2.80\pm 0.33)$ mm/a;大雪山段以左旋走滑为主兼具逆冲性质,其水平滑动速率为 $(1.40\pm 0.12)\sim(2.73\pm 0.20)$ mm/a,逆冲速率为 (0.22 ± 0.04) mm/a(罗浩,2013)。昌马断裂为祁连山内部一条逆左旋走滑断裂,总体呈NWW向展布,倾向南,倾角50°~80°,全新世左旋走滑速率为

3.4~4.5 mm/a (Du *et al.*, 2020), 该断裂发生了 1932 年昌马 7.6 级地震, 形成长约 120 km 的地震地表破裂带。旱峡-大黄沟断裂是祁连山北缘西段的一条逆冲型盆山边界断裂, 最新调查发现在天生圈-大风沟一带的断裂中段最新活动时代为全新世中晚期, 最新一次构造活动发生于距今 (1 970±290) a 以后 (陈艳文等, 2025)。而该区规模较大的石包城-鹰嘴山断裂, 尤其是东段的大雪山北山断裂段目前缺乏新的定量研究结果 (罗浩, 2013)。除此之外, 在盆地内部新发现一些次级断裂, 如昌马盆地东缘断裂、鹰嘴山东北缘断裂以及昌马盆地北缘断裂等, 为综合研究石包城-昌马盆地内部晚第四纪构造变形特征和机制奠定了重要基础。

2 研究方法

2.1 数据采集

近年来, 随着无人机技术、计算机视觉理论和自动特征匹配算法的进步, SfM (Structure from Motion) 三维重建技术被整合到摄影测量中。这种方法极大地提高了摄影测量的自动化程度, 促进了摄影测量方法的进一步发展。SfM 方法是利用先进的特征匹配算法从三张或多张图像中高效地提取相应特征, 并将这些特征从一张图像跟踪到另一张图像的过程。该过程最初恢复相机在摄影过程中的相对位置, 然后使用非线性最小二乘法对其进行优化, 最终确定相机的位置和方向, 以及被摄物体的三维空间坐标。与传统摄影测量方法相比, SfM 技术可以从目标不同角度拍摄的照片中快速获取高精度的地形地貌数据, 显著降低测量成本。

本研究中, 使用了一台大疆 DJI Mavic 3E 无人机对大雪山北山断裂段进行低空摄影测量。这种无人机轻巧便携, 重量为 1 375 g, 最大飞行海拔高度为 6 000 m, 最大水平飞行速度为 15 m/s, 并且可以承受高达 12 m/s 的风速。其工作温度范围为 0~40 °C, 最大飞行持续时间约为 45 min, 每次飞行有效工作时间为 15~20 min。其安全性能强大, 具有全向避障和智能返航功能。同时, 它配备了两个集成的双模定位模块, 包括全球定位系统 (GPS) 和全球导航卫星系统 (GLONASS)。该无人机配备了 2 000 万像素的 4/3 CMOS 广角相机, 可实现最快 0.7 s 间隔连拍, 同时配备了 1 200 万像素的 1/2" CMOS 长焦相机, 支持最大 56 倍混合变焦。另外, 其配备的 RTK 模块, 可仿地飞

行, 实现厘米级精度定位, 确保获取到分辨率高、色彩还原度好及物体成像变形小的影像数据, 满足快速获取断裂沿线的断错微地貌或地震地表破裂带等高分辨率图像的研究要求。

本研究的无人机航拍区位于石包城-昌马盆地内部发育的一系列逆断层-褶皱带。为了克服研究区存在的局部隆起、强风等不利条件, 无人机的飞行高度设置在 100~150 m 之间, 侧边重叠率为 75%~85%, 以获取尽可能高的分辨率图像, 同时确保飞行安全。由于天气条件和抵抗较大风速使得电池加速耗尽, 从而导致需要多次飞行任务来完成给定区域的航空摄影。在这种情况下, 必须确保不同的飞行任务在被测区域、飞行高度、飞行路径和侧面重叠方面保持一致或相似的重叠, 以方便后期的图像合成。

2.2 数据处理

基于高分辨率卫星影像对大雪山北山断裂段的构造地貌解译, 选取断层陡坎地貌较为典型且保存较为完整的区域进行无人机航拍作业, 航测区域鲁家埃段全长约 14.5 km、宽约 4 km; 航测区域老洼崖河坝段全长约 8 km、宽约 5 km。首先利用机载实时动态差分系统 (RTK, Real Time Kinematic) 替代地面控制点, 以提高航拍照片的定位精度。根据断裂沿线的地形地貌特征, 设置好合适的起飞高度和较高的影像重叠率, 以提高地形地貌数据的分辨率。之后利用 SfM 摄影测量技术按照事先规划的航线执行无人机自动航测任务。将高度重叠的约 15 000 张无人机照片导入 Photoscan 软件中进行精准对齐, 生成高质量的密集点云数据, 实现高分辨率的 DEM 数据及高质量正射影像生成, 精度可达 0.14 m。

利用 Arcgis 平台对高质量 DEM 影像进行表面分析, 可得到对应的山体阴影图, 沿断裂迹线识别不同高度的断层陡坎会在山体阴影图中呈现出明显的断错微地貌。通过精确识别断层陡坎获取其平面几何分布图像, 并用红线标出断层迹线, 跨断层迹线两侧拉取完整的地形剖面线, 结合山体坡度角将剖面恢复对齐至水平, 由此测量得到单次或多次地震事件累积形成的断层陡坎高度和褶皱变形形态, 并结合野外考察校核垂直位移测量值的可靠性。结合地形剖面线、不同冲积扇形态及相关切割关系等微地貌特征, 对航测区域进行精细地貌填图, 划分出不同的地貌单元, 为分析不同时期断裂活动特征及变形样式提供依据。

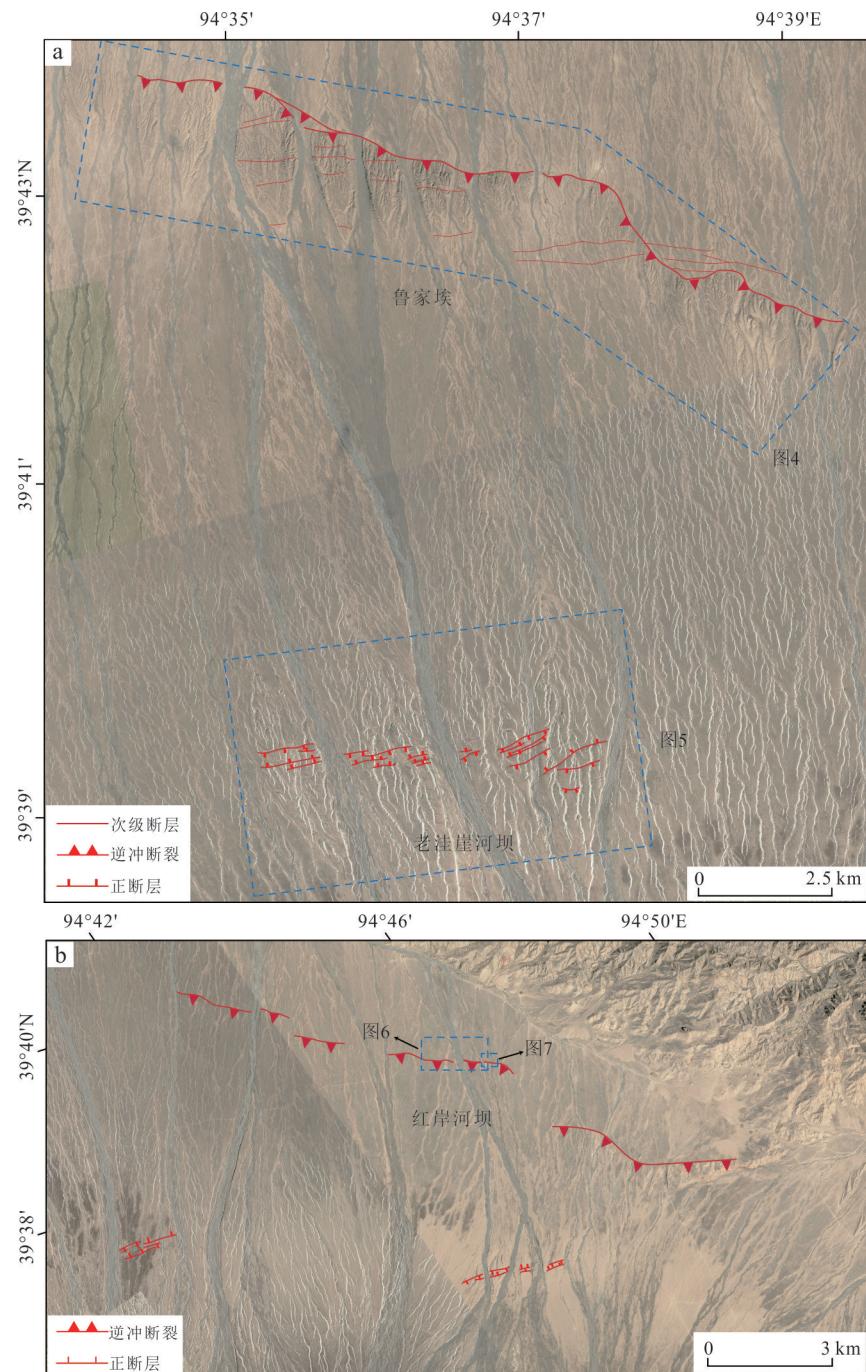


图3 大雪山北山断裂段空间几何展布

Fig.3 The spatial geometric distribution of faults in the Daxue Shan Bei Shan Fault

2.3 宇宙成因核素测年方法

宇宙成因核素测年(如¹⁰Be、²⁶Al和³⁶Cl)已广泛应用于地貌学、第四纪地质学和活动构造学等领域的地质定年,以确定各级地貌面形成过程的地表暴露年龄和剥蚀速率等(Gosse *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2009).河流阶地面的准确定年是活动构造定量研究中计算变形速率的关键.常见的宇宙成因核素年龄采样方式有3种,分别为单个砾石表层样品、表面

混合样及深度剖面法(任光雪, 2021),本研究中采样方法选取表面混合样,分别于阶地地貌面及其对应现代河流河床均匀采集粒径2 cm左右的花岗岩或含石英砾石样品.石英的提纯和制靶工作在中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室完成,随后的测试工作在西安地球环境研究所完成,石英样品的提纯和¹⁰Be靶样的制备遵循了Kohl *et al.* (1992)所概述的流程.

3 大雪山北山断裂的断错微地貌研究

断裂沿线的地表变形形态以及断错位移能够直观地反映出活动断裂带的多期构造活动特征。通过断层带上地形地貌的变化及其在水平和垂直方向上的位移精细测量,可以深入分析断层的活动习性。

根据高分辨率地形数据,解译断错地貌发现,石包城-鹰嘴山断裂东段的大雪山北山断裂主要分为西中东三段,即鲁家埃段、老洼崖河坝段和红岸河坝段(图2和图3),西段的石包城段与鹰嘴山段断裂属于阿尔金断裂应变分配后形成的次级断裂,与阿尔金断裂联系紧密,继承了阿尔金断裂左旋走滑的断裂性质,因此鹰嘴山段为左旋走滑兼北倾逆冲断裂;而到了断裂东段大雪山北山段则几乎与阿尔金断裂没有联系,主要与野马河-大雪山断裂联系紧密,该段断裂性质为南倾的逆冲断裂,因此大雪山北山段与中西两段断裂的形成机制是不同的。其中,鲁家埃段和老洼崖河坝段构成了两排性质不同的逆断裂-褶皱带和张性正断层系(图4和图5)。两段断裂整体上构成逆断层-褶皱型构造变形的完整形态;沿着鲁家埃断裂陡坎往东延展在红岸河坝附近,除了后缘同样存在张性正断层之外,其前缘发现了一排较连续、延伸较长的逆冲断裂陡坎,其中西侧的陡坎更高而东侧的陡坎则很低,可能记录了一次最新的地震事件(图6和图7)。对上述三段断裂的几何图像、变形特征分述如下。

3.1 鲁家埃段航测影像解译

航测鲁家埃段全长约 14.5 km,断裂的走向从西到东由 NWW 向变为 NW 向。根据高分辨率地形数据,解译鲁家埃段断错地貌发现,断裂控制的阶地发生了明显的褶皱变形,除了发育有典型的逆断裂-褶皱带之外,其前缘断错地貌清晰,有明显的逆断层陡坎;在背斜南北两侧,还发现了许多次级反冲断层,为最新的地震地表破裂带,这些破裂带走向与背斜枢纽一致,整体为 NWW 向,长度约 5 km,在谷歌影像以及无人机正射影像上轨迹清晰(图4)。在鲁家埃段的一系列背斜中,背斜的规模都呈现出从中部向东西两端逐渐变小的特点。

3.2 老洼崖河坝段航测影像解译

根据高分辨率地形数据,通过对老洼崖河坝段无人机影像的解译,发现该段断裂主要为多排次级无根的弯矩正断层。在地层褶皱变形过程

中,弯矩断层主要是调节层面的拉长或缩短(Burbank and Anderson, 2013),其形成不受褶皱变形机制的控制,可能是因为不同变形机制产生的褶皱(滑脱、断展或断弯褶皱)几何形态往往是相同或相似的,都表现为背斜或向斜形态。该地区的褶皱为背斜褶皱,因此其核部受到的张力是最大的,为了调节层面的长短因此形成了弯矩正断层。

按照倾向的不同,将解译到的弯矩正断层分为倾向北和倾向南的正断层,其中,中西部的弯矩正断层呈近 EW 向;在东边有一个特征很明显的倾向北的陡坎,走向 NEE,这些弯矩正断层形成了一系列类似地堑地垒的地貌组合形态(图5)。

3.3 红岸河坝段航测影像解译

重点对红岸河坝段最前缘的逆冲断层陡坎进行了考察和无人机航测。根据高分辨率地形数据,对红岸河坝段无人机影像解译为明显的逆断裂陡坎,切出 5 条陡坎剖面,得到了西侧陡坎规模为 2.7~8.4 m(图6),而其东侧陡坎高度小,仅 0.19~0.66 m,可能代表最新的一次构造事件(图7)。

4 地貌面年代确定

在鲁家埃段的考察发现该地区主要可分为 4 级阶地: T_0 河漫滩、 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 。根据阶地地貌特征和可采集样品的条件,选择阶地变形明显的 T_3 、 T_4 阶地面进行 ^{10}Be 采样。由于研究区位于大雪山前冲洪积扇面之上,小砾石较多而且含石英成分较丰富,因此本研究选择采集不同阶地面上和河床中 2~3 cm 含石英丰富的小砾石混合样,来厘定宇宙成因核素 ^{10}Be 暴露年代。

根据测得的地貌面样品的 ^{10}Be 浓度减去河道样品的 ^{10}Be 浓度即为地貌面废弃后累积的 ^{10}Be 浓度,结合采样信息及遮蔽系数,利用 Cosmic ray exposure program 在线计算程序计算得到样品年龄: T_3 阶地为 (39.95 ± 1.85) ka, T_4 阶地为 (112.44 ± 5.11) ka(表1)。

5 断裂构造变形特征

经过野外实地调查和详细地貌面填图,结合高精度无人机航测影像,提取跨多级阶地面上具有多期断裂陡坎的地形剖面,发现大雪山北山断裂段表现为较典型的逆断层-褶皱变形,其褶皱变形形态符合铲式断层模型(Hu *et al.*, 2015)。参考 Xu *et al.* (2021)对党河南山逆断裂-褶皱变形的研究方法,

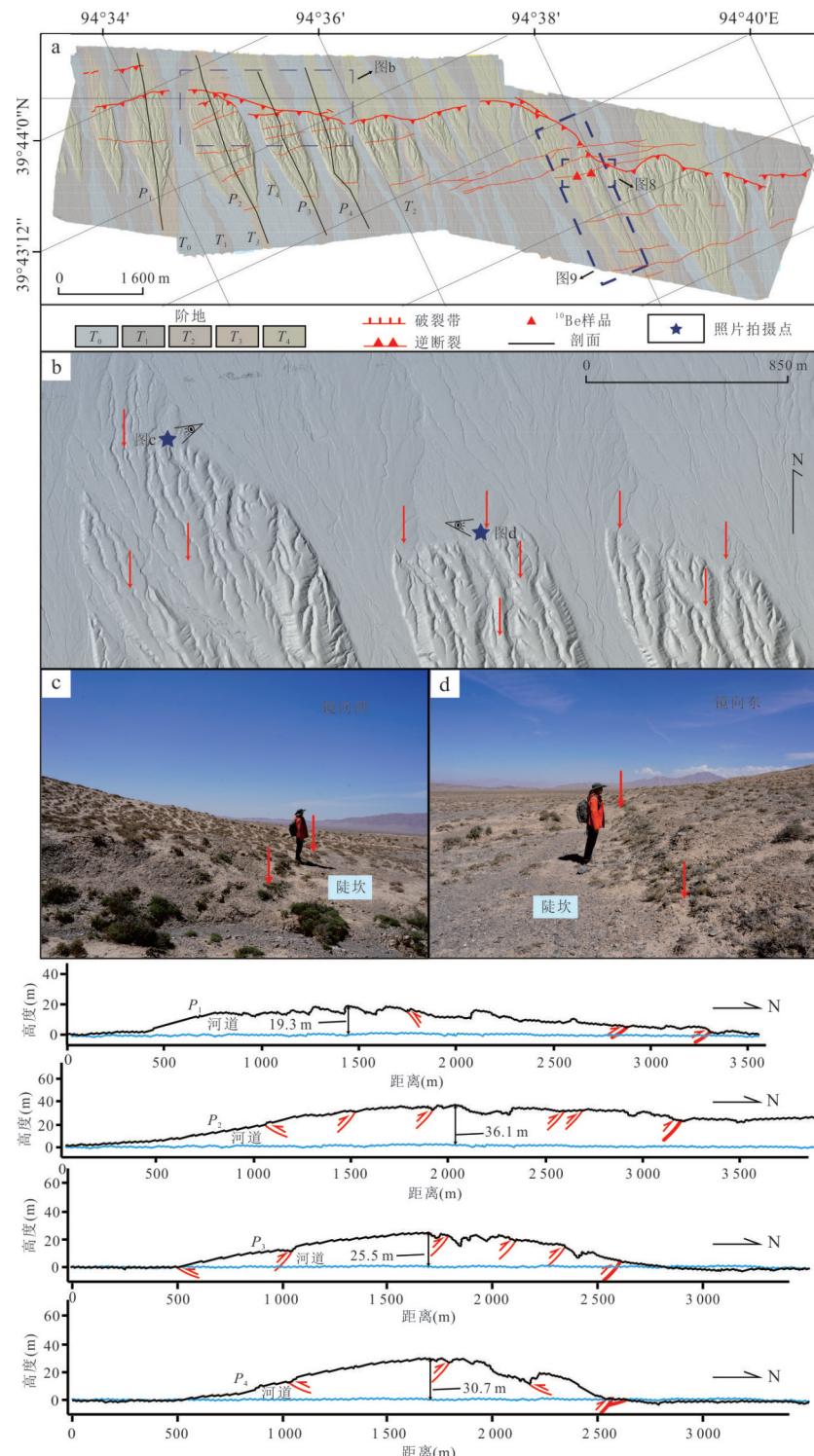


图4 鲁家埃段高分辨率无人机影像解译及精细地貌图

Fig.4 High-resolution UAV image interpretation and detailed geomorphic mapping of the Lujiaai Section

可以根据发生褶皱变形的阶地/台地的地形剖面中褶皱形态及其几何参数,反演其在深部的几何学与运动学特征,进而结合变形台面的年代学结果,分别计算断层自不同台面形成以来的垂直滑动速率和水平缩短速率(图9,位置见图4)。

5.1 断层深部几何特征

应用Hu *et al.*(2015)提出的铲式断层几何模型,可以从剖面上不对称褶皱的形状推导出逆冲断层的深部几何结构。首先基于Arcgis平台,根据已解译的不同级别阶地面画出拟定的剖面线,在这些

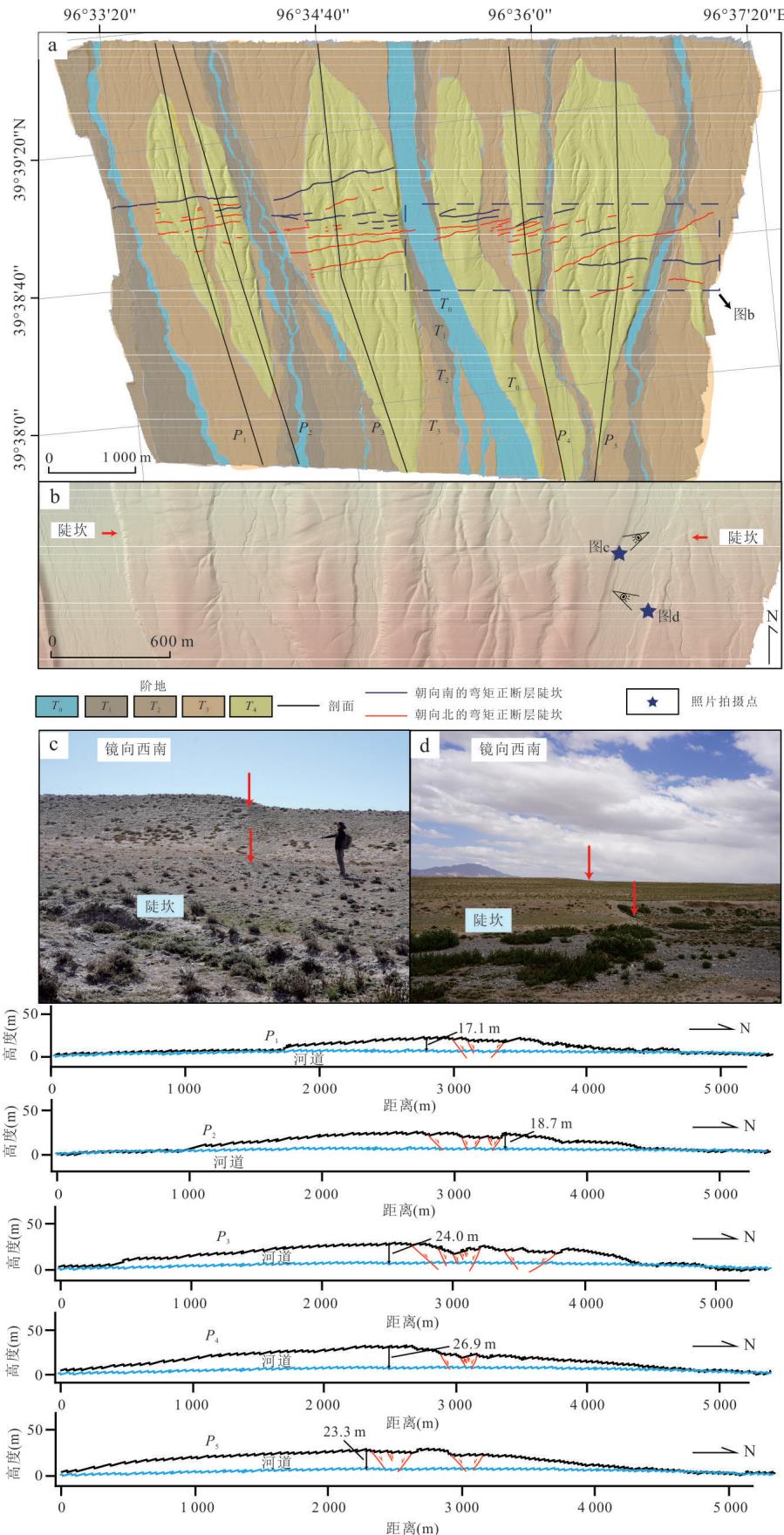


图 5 老洼崖河坝段高分辨率无人机影像解译及精细地貌填图

Fig.5 High-resolution unmanned aerial vehicle image interpretation and detailed geomorphic mapping of Laowayaheba Section

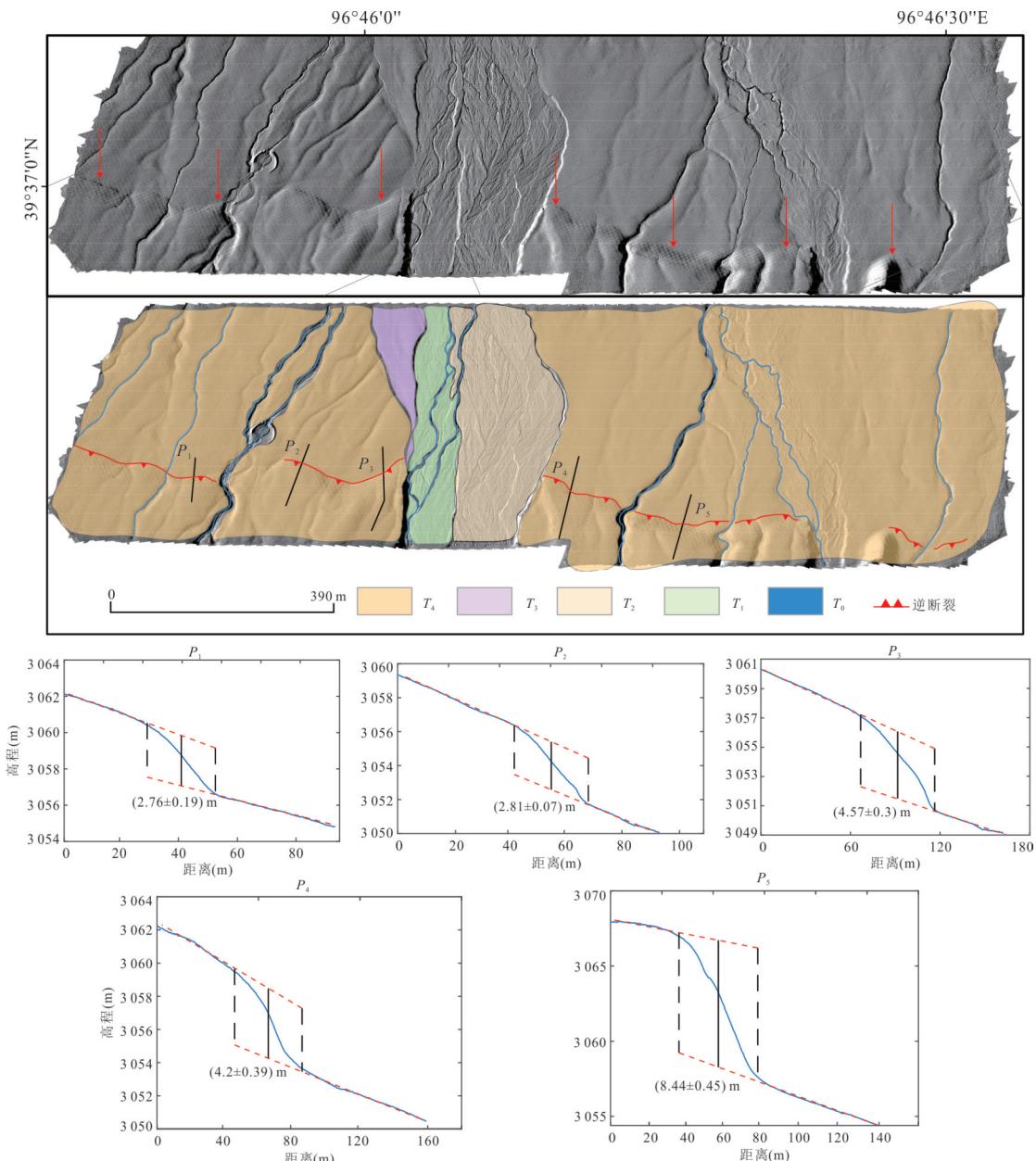


图6 大雪山北山断裂红岸河坝段西侧褶皱高分辨率无人机影像解译及剖面图

Fig.6 High-resolution unmanned aerial vehicle image interpretation and cross-sectional diagram of western folds in the Honganheba Section along the Daxue Shan Bei Shan Fault

线上按照相等距离 15 m 截取点, 获得截取点的高程, 进而得到 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 阶地的点剖面, 分别为 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 , 之后将这些点的坐标输入到 Matlab 程序中, 生成相应的点高程图, 从而得到不同阶地地面地形的点剖面(图9), 在剖面地形轮廓上可以清楚看到褶皱变形形态.首先选取较典型的 T_4 阶地面进行分析, 其点剖面呈现的褶皱形态宽度由褶皱前缘(d_1)、轴向顶端(d_2)和后缘(d_3)的水平范围确定, 剖面褶皱宽度为 1 941 m. 在褶皱的轴向顶部, 变形台面高于基准水平 h_1 的隆起面为 (18 ± 3) m, 而

后缘的隆起 h_2 为 (6 ± 2) m(图 10). 考虑到断层开始后沉积在陡坡底部和更上游的沉积物, 因此获取隆升量需要参考基准水平参考线. 使用沿断层面均匀滑动的假设 (Thompson *et al.*, 2002; Hu *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2021), 断层深部和浅部之间的断层倾角变化可以使用以下公式确定:

$$\frac{h_1}{\sin \alpha_1} = \frac{h_2}{\sin \alpha_2}. \quad (1)$$

根据野外实地调查发现的断层剖面, 在该剖面测得三次构造活动事件的断层倾角分别为 48° 、 50°

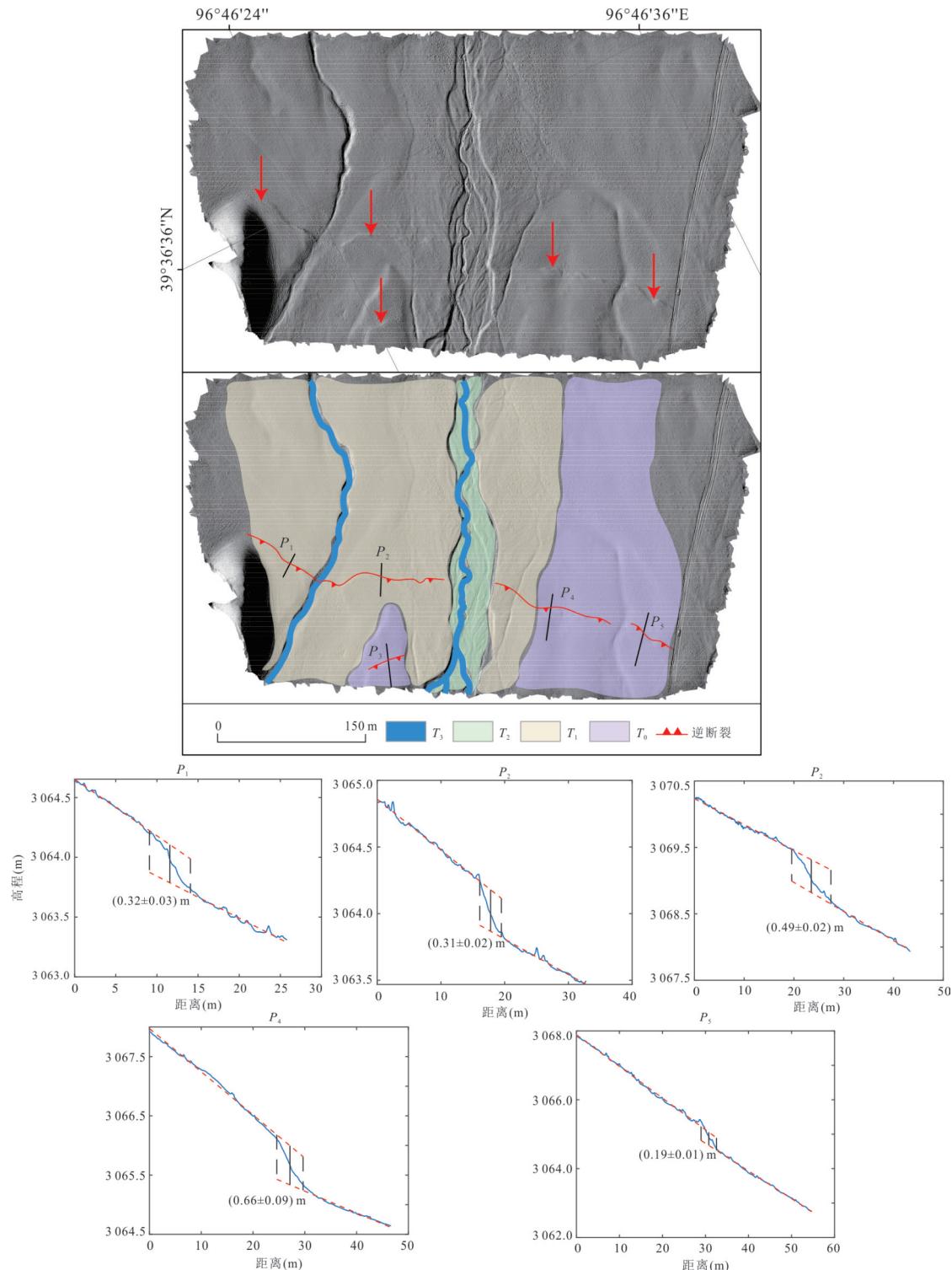


图 7 大雪山北山断裂红岸河坝段东侧褶皱高分辨率无人机影像解译及剖面图

Fig.7 High-resolution unmanned aerial vehicle image interpretation and cross-sectional diagram of eastern folds in the Honganheba Section along the Daxue Shan Bei Shan Fault

和 49°, 其浅部倾角 α_1 大致为 $49^\circ \pm 1^\circ$, 同时根据野马河-大雪山断裂前人探槽开挖揭示的断层倾角 56° 和 47° 校核其准确性 (吴明, 2017), 由此得到剖面深部角度 α_2 为 $15^\circ \pm 2^\circ$ (图 12). 铲

式断层段上端和下端拐点的深度 H_1 、 H_2 可以用以下公式计算 (Hu *et al.*, 2015):

$$H_1 = \left(\frac{d_1}{2} + d_2 \right) \times \sin \alpha_1 \times \cos \alpha_1, \quad (2)$$

表1 ^{10}Be 采样及测年信息Table 1 ^{10}Be sampling and dating information

样品编号	年龄(ka)	经度(°)	纬度(°)	海拔(m)	^{10}Be 浓度(at/g)	误差(at/g)	遮蔽系数
23-LJA-10Be-T ₀		96.630 6	39.699 0	2 835	661 308.1	19 168.6	1
23-LJA-10Be-T ₃	39.95±1.85	96.630 1	39.699 9	2 840	1 219 660	35 934.26	1
23-LJA-10Be-T ₄	112.44±5.11	96.632 0	39.699 6	2 852	3 423 505	61 001.79	1

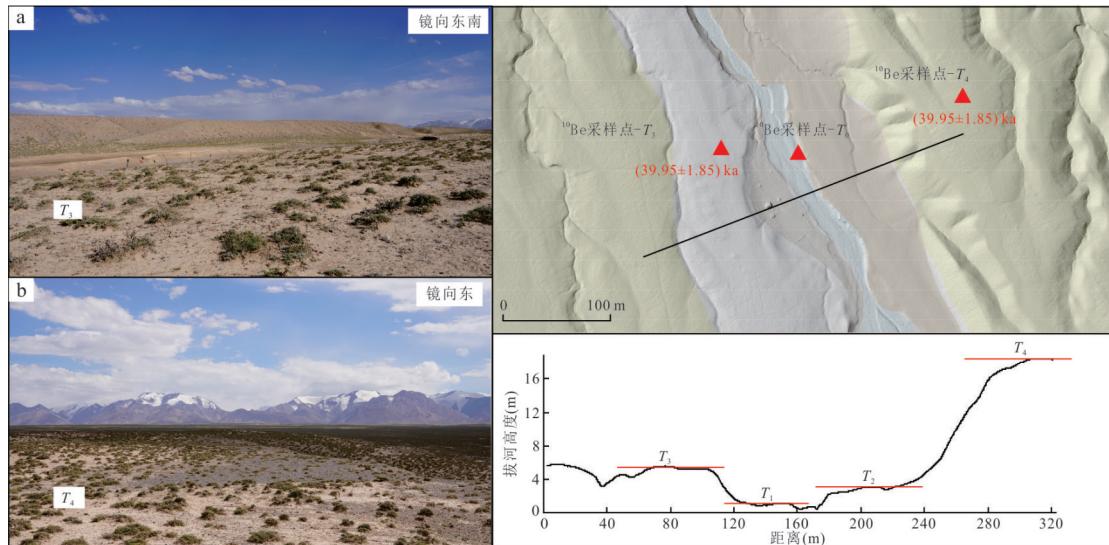


图8 采样具体地点及照片

Fig.8 Sampling specific locations and photos

表2 鲁家埃段深部滑脱面参数

Table 2 Parameters of deep slip surface of Lujiaai Section

剖面编号	α_2	$h_1(\text{m})$	$h_2(\text{m})$	$H_1(\text{m})$	$H_2(\text{m})$	$S(\text{m})$	$D(\text{m})$
P_4	15°±2°	18±3	6±2	458.5±4	1 138.5±8	24.2±5	12.55±2
P_3	10°±3°	5.2±2	1.2±1	523.6±4	1 046.4±6	6.9±1	4.8±1

$$H_2 = \left[\left(\frac{d_1}{2} + d_2 \right) \times \sin \alpha_1 + \frac{d_3}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \times \right. \\ \left. (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \right] \times \cos \alpha_2, \quad (3)$$

由公式(2)、(3)可得, H_1 为 458.5 m, H_2 为 1 138.5 m, 从而获取整个断裂在地表深部滑脱面的形态及参数。用下列公式(Hu *et al.*, 2015)可以分析确定大雪山北山断裂段 T_4 阶地自该阶地面形成以来的总滑移量 S 为 (24.2±5) m。

$$S = \frac{h_1 - h_2}{\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}. \quad (4)$$

结合上述断裂活动几何参数和台地年代结果, 就可以进一步计算并分析断裂在不同时期的滑动速率。同样, T_3 阶地面的点剖面所反映的褶皱变形形态也较为理想, 因此在 T_3 阶地面运用同样的模型

和方法来解译褶皱变形特征。由此得到这点剖面的垂直隆升高度 h_1 与 h_2 分别为 (5.2±2) m、(1.2±1) m, 根据地形剖面的几何学特征得到断裂在铲式滑脱面下方的地表深部角度转变为 10°, 并计算出 T_3 阶地面总滑动位移量 S 为 (6.9±1) m。通过上述剖面推演出的深部滑脱面形态表明, 鲁家埃段逆冲推覆体是在同一滑脱面之上受断裂控制逆冲断错地表。

5.2 断层运动学特征

根据无人机航测影像中测得的鲁家埃的 T_3 、 T_4 阶地地形剖面得到的逆冲断层陡坎高度分别为 (6.56±0.34) m 和 (16.09±1.13) m, 并结合在 T_3 、 T_4 阶地得到的年代结果 ((39.95±1.85) ka、(112.44±5.11) ka), 可以计算出由剖面 P_3 、 P_4 得到的垂直滑动速率为 (0.16±0.01) mm/a、(0.14±0.01) mm/a, 因此大雪山北山断裂鲁家埃段晚更新世以来的平

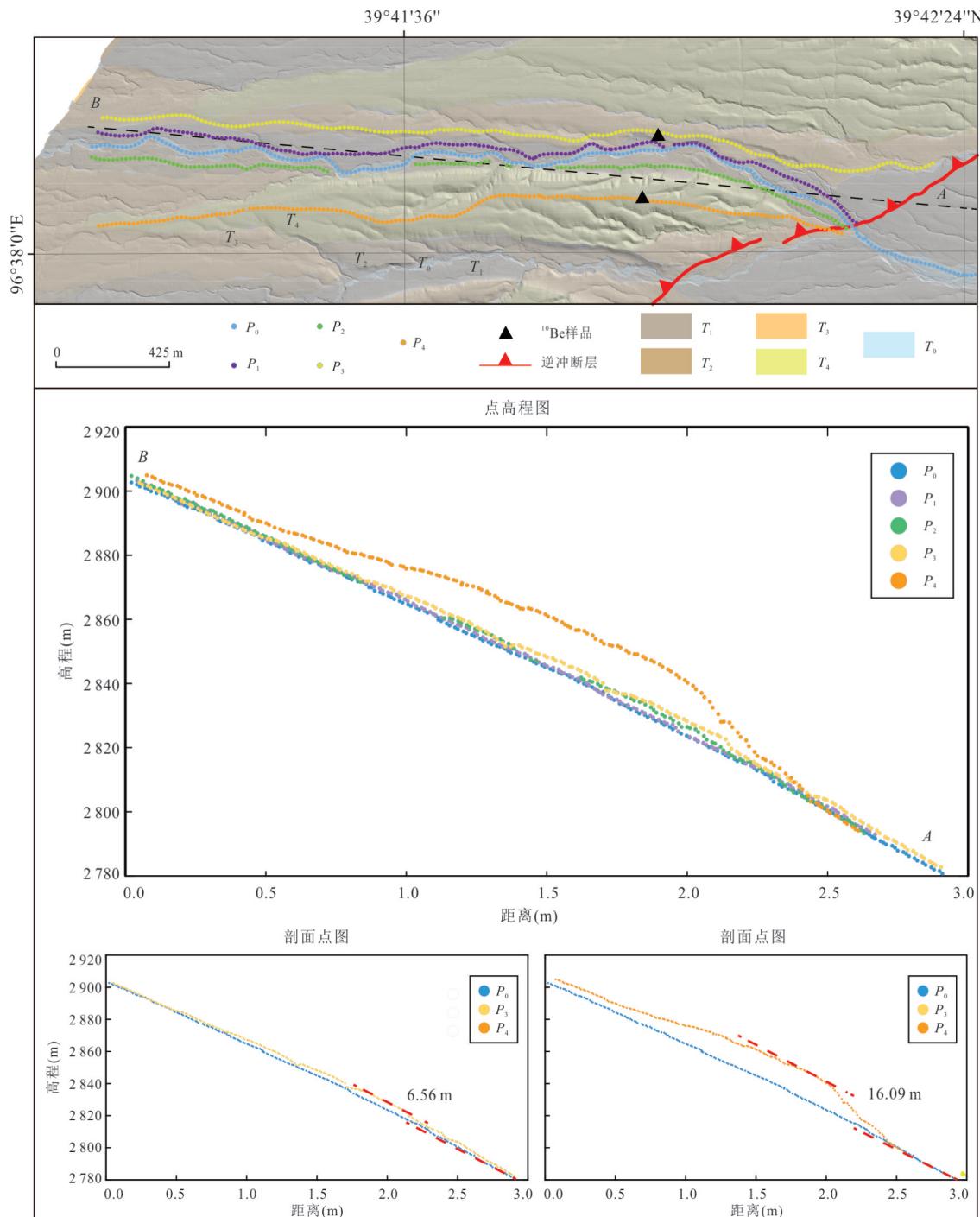


图 9 不同阶地地形点剖面

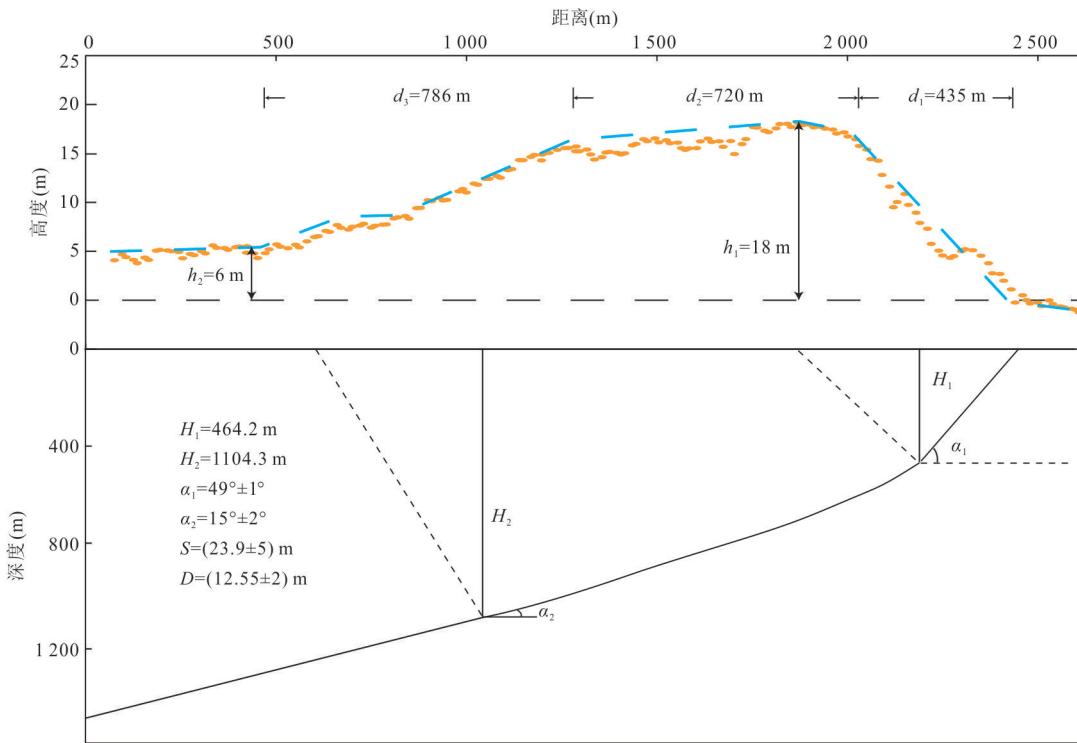
Fig.9 Cross-sectional profiles of topographic points across multiple terrace levels

均垂直速率约为 $(0.15 \pm 0.01) \text{ mm/a}$ 。同时根据铲式断层几何模型得到的 T_3 和 T_4 阶地的总滑移量 S 分别为 $(6.9 \pm 1) \text{ m}$ 和 $(24.2 \pm 5) \text{ m}$ ，结合年代结果计算出断裂总的逆冲速率分别为 $(0.17 \pm 0.03) \text{ mm/a}$ 和 $(0.21 \pm 0.05) \text{ mm/a}$ ，平均为 $(0.19 \pm 0.03) \text{ mm/a}$ 。

据此，大雪山北山断裂的水平缩短速率同样可以运用断层几何学来推导，结合褶皱变形形态

和几何参数，计算逆冲推覆体在断裂活动控制下产生的水平缩短量及缩短速率。假设褶皱变形过程中的横截面积被保留，则根据面积守恒，地壳缩短面积 Y 与地表褶皱面积 X 应该相同，用以下公式分别表示 X 和 Y ：

$$X = \frac{h_1 d_1}{2} + h_1 d_2 + h_2 d_3 + \frac{(h_1 - h_2) d_3}{2}, \quad (5)$$

图10 鲁家埃段 T_4 地表深部滑脱面形态Fig.10 The morphology of the deep surface detachment in the T_4 of the Lujiaai Section

$$Y = D^2 \times \frac{\tan \alpha_2}{2} + H_3 \times D, \quad (6)$$

据公式(5)、(6)求出缩短量 D 分别为 (4.8 ± 1) m、 (12.55 ± 2) m, 用阶地年龄计算得到自 T_3 、 T_4 阶地形成以来水平缩短速率分别为 (0.12 ± 0.03) mm/a 和 (0.11 ± 0.02) mm/a, 因此得出大雪山北山断裂东段长期水平缩短速率约为 (0.12 ± 0.02) mm/a。这些速率的不确定性再次通过高斯误差传播法获得, 计算过程中综合考虑了褶皱形态与变形参数, 使结果更加精确。

6 讨论

6.1 断裂的变形样式和变形速率

6.1.1 变形样式 大雪山北山断裂是由野马河-大雪山断裂东段的挤压逆冲作用向山前盆地内部扩展引起, 在地表形成两排逆断裂-褶皱带, 其中鲁家埃段主要表现为低角度的逆冲断裂作用(下部 15° 、近地表 49°), 老洼崖河坝段则主要表现为一系列次级无根的弯矩正断层陡坎。

6.1.2 变形速率 根据 Meyer *et al.* (1998) 的研究, 得到断裂的隆升速率为 (1.5 ± 0.4) mm/a, 缩短速率为 (2.1 ± 0.6) mm/a, 由于缺少本区的绝对年代资

料, 其研究结果存在较大的不确定性。对该断裂的垂直隆升速率和水平缩短速率重新进行了计算, 根据在 T_3 、 T_4 阶地面采集的样品和对相应阶地切点剖面以得到褶皱高度并计算得到断裂晚更新世以来的垂直隆升速率为 (0.15 ± 0.01) mm/a, 水平缩短速率为 (0.12 ± 0.02) mm/a, 总的逆冲滑动速率为 (0.19 ± 0.03) mm/a。Meyer 结果偏大的原因有以下几点: ①受当时的研究条件限制, 没有得到断裂带附近断错地貌面的年代, 借用末次冰期的年龄代替计算得到的年龄误差太大; ②同样, 受当时的影像分辨率限制, 褶皱高度的测量误差较大。

6.1.3 与区域构造变形定量研究结果的对比分析 本文对于大雪山北山断裂段的研究结果(逆冲速率 (0.15 ± 0.01) mm/a)与前人对石包城-昌马盆地周边的一些逆冲断裂的定量研究结果(大雪山北缘断裂逆冲速率为 $(0.13 \pm 0.01) \sim (0.22 \pm 0.04)$ mm/a, 罗浩, 2013; 三危山断裂逆冲速率为 (0.03 ± 0.01) mm/a, 刘兴旺等, 2021)大致相当, 说明这种低速率的逆冲断层作用符合区域分布式变形的总体量级。

6.2 断裂深部构造变形模型

根据 Meyer *et al.* (1998)、Bedrosian *et al.* (2001) 和李满等(2020)对于断裂深部构造的研究, 对大雪山北山断裂的深部构造模型进行了更新(图 11)。断

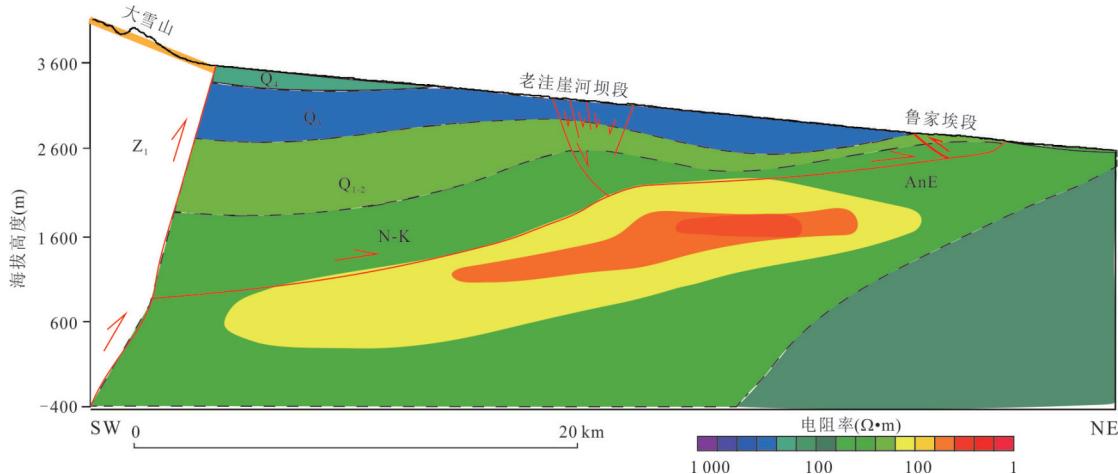


图 11 断裂深部构造模型

Fig.11 Model of deep structural faults

深部断层及电阻率修改自 Meyer *et al.* (1998) 和 Bedrosian *et al.* (2001)

裂的构造变形模式主要为深部的野马河-大雪山主断裂沿 NE 向的挤压逆冲作用向石包城-昌马盆地内部扩展,不仅形成了前缘的多条逆断裂-褶皱带,而且在褶皱后翼因局部张性作用在地表形成了多条弯矩正断层陡坎(老洼崖河坝段),之后继续向盆地内部以低角度冲出地表,在地貌面上表现为明显的逆冲陡坎(鲁家埃段),构成一个逆断裂-褶皱带和弯矩正断层的完整形态。

基于上述逆断裂-褶皱带的形态特征进一步分析认为,其深部滑脱面向南延伸至野马河-大雪山主断裂约深(2.7 ± 0.5) km,其研究结果与李满等(2020)根据大地电磁测深剖面反演结果得到的滑脱面深度大体一致。本文和前人研究结果表明,野马河-大雪山断裂和盆地内部的大雪山北山断裂构成一组典型的薄皮状逆断裂-褶皱变形构造体系,为该断裂系向盆地内部前展式挤压扩展的地貌反映。

7 结论

通过对石包城-鹰嘴山断裂东段的大雪山北山断裂段的详细野外调查和对无人机影像的精细解译和地貌面年代学约束,获得了该段断裂的基本变形特征。取得的主要认识如下:

(1) 石包城-鹰嘴山断裂东段的大雪山北山断裂段晚第四纪构造变形形态属于典型的逆断裂-褶皱带,形成鲁家埃段和老洼崖河坝段两排褶皱相关构造。其中,鲁家埃段主要表现为挤压逆冲-褶皱变形,在老洼崖河坝段发育了多条弯矩正断层。断裂最东端的红岸河坝段最前缘主要表现为 2 排逆断层

陡坎,最新断层陡坎形成年代为全新世晚期。

(2) 通过对大雪山北山断裂变形较典型、变形幅度大的鲁家埃段 T_3 、 T_4 阶地采样定年及铲式断层几何模型的应用,得到鲁家埃段晚更新世以来的垂直滑动速率为 (0.15 ± 0.01) mm/a, 水平缩短速率为 (0.11 ± 0.06) mm/a, 总的逆冲速率为 (0.19 ± 0.03) mm/a, 是一条低滑动速率的逆断裂-褶皱带,校核了 Meyer *et al.* (1998) 的初步研究结果。上述研究结果,与本区的大雪山北缘断裂、旱峡-大黄沟断裂以及三危山断裂、南截山断裂等的挤压逆冲速率大致相当,为 $0.2 \sim 0.4$ mm/a, 为区域性挤压逆冲断裂较低滑动速率的变形,实现其应变分配。

(3) 综合前人深部研究结果,认为大雪山北山断裂是一条受野马河-大雪山主断裂向盆地内部以低角度逆冲作用控制的薄皮状逆断裂-褶皱变形形态,断裂滑动位移量主要被地层缩短及褶皱变形吸收,为野马河-大雪山断裂向盆地内部前展式挤压扩展的结果。

References

- Avouac, J. P., Tapponnier, P., 1993. Kinematic Model of Active Deformation in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 20(10): 895–898. <https://doi.org/10.1029/93gl00128>
- Bedrosian, P. A., Unsworth, M. J., Wang, F., 2001. Structure of the Altyn Tagh Fault and Daxue Shan from Magnetotelluric Surveys: Implications for Faulting Associated with the Rise of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 20(4): 474–486. <https://doi.org/10.1029/2000tc001215>

- Burbank, D. W., Anderson, R. S., 2013. Tectonic Geomorphology, Second Edition. *Environmental & Engineering Geoscience*, 19(2): 198–200. <https://doi.org/10.2113/gsgeosci.19.2.198>
- Chen, Y. W., Li, S. W., Yuan, D. Y., et al., 2025. Geological and Geomorphologic Evidence of Late Quaternary Activity in the Middle Segment of the Hanxia-Dahuanggou Fault in the Northern Margin of Qilian Shan. *Geological Bulletin of China*, 1–12 (in Chinese with English abstract). <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250115.1058.010>
- Du, J. X., Fu, B. H., Guo, Q., et al., 2020. Segmentation and Termination of the Surface Rupture Zone Produced by the 1932 Ms 7.6 Changma Earthquake: New Insights into the Slip Partitioning of the Eastern Altyn Tagh Fault System. *Lithosphere*, 12(1): 19–39. <https://doi.org/10.1130/l1113.1>
- Gosse, J. C., Phillips, F. M., 2001. Terrestrial In Situ Cosmogenic Nuclides: Theory and Application. *Quaternary Science Reviews*, 20(14): 1475–1560. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00171-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00171-2)
- He, W. G., Zhang, B., Wu, M., et al., 2018. Paleoseismology on the Yemahe Segment of the Yemahe-Daxueshan Fault Revealed by Trench Study. *Seismology and Geology*, 40(1): 261–275 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. F., Pan, B. T., Kirby, E., et al., 2015. Rates and Kinematics of Active Shortening along the Eastern Qilian Shan, China, Inferred from Deformed Fluvial Terraces. *Tectonics*, 34(12): 2478–2493. <https://doi.org/10.1002/2015tc003978>
- Kohl, C. P., Nishiizumi, K., 1992. Chemical Isolation of Quartz for Measurement of *In-Situ*-Produced Cosmogenic Nuclides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(9): 3583–3587. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90401-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90401-4)
- Li, M., Xiao, Q. B., Yu, G., 2020. Electrical Structure of the Altyn Tagh Fault at the Changma Section and Its Tectonic Significance. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(11): 4125–4143 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. K., Harbor, J., 2009. Cosmogenic Nuclides and Geomorphology: Theory, Limitations, and Applications. In: Ferrari, D. M., Guiseppi, A. R., eds., *Geomorphology and Plate Tectonics*. Nova Science Publishers, Hauppauge, 1–33.
- Liu, J. R., Ren, Z. K., Zheng, W. J., et al., 2020. Late Quaternary Slip Rate of the Aksay Segment and Its Rapidly Decreasing Gradient along the Altyn Tagh Fault. *Geosphere*, 16(6): 1538–1557. <https://doi.org/10.1130/ges02250.1>
- Liu, K., Li, H. B., Wang, C. Z., et al., 2019. Comprehensive Analysis of Deep and Shallow Structures in the Eastern Altyn Tagh Fault Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6): 1833–1847 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. W., Yuan, D. Y., Yao, Y. S., et al., 2021. Paleoearthquake Characteristics in Dunhuang Segment of the Sanweishan Fault. *Seismology and Geology*, 43(6): 1398–1411 (in Chinese with English abstract).
- Luo, H., He, W. G., Wang, D. W., et al., 2013. Study on the Slip Rate of Changma Fault in Qilian Mountains Since Late Pleistocene. *Seismology and Geology*, 35(4): 765–777 (in Chinese with English abstract).
- Luo, H., He, W. G., Yuan, D. Y., et al., 2015. Slip Rate of Yema River-Daxue Mountain Fault since the Late Pleistocene and Its Implications on the Deformation of the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 89(2): 561–574. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12447>
- Luo, H., He, W. G., Yuan, D. Y., et al., 2016. New Insight on Paleoearthquake Activity along Changma Fault Zone. *China Earthquake Engineering Journal*, 38(4): 632–637, 668 (in Chinese with English abstract).
- Luo, H., Xu, X. W., Liu, X. L., et al., 2020. The Structural Deformation Pattern in the Eastern Segment of the Altyn Tagh Fault. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 692–706 (in Chinese with English abstract).
- Mériaux, A. S., Tapponnier, P., Ryerson, F. J., et al., 2005. The Aksay Segment of the Northern Altyn Tagh Fault: Tectonic Geomorphology, Landscape Evolution, and Holocene Slip Rate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B4): B04404. <https://doi.org/10.1029/2004jb003210>
- Meyer, B., Tapponnier, P., Bourjot, L., et al., 1998. Crustal Thickening in Gansu-Qinghai, Lithospheric Mantle Subduction, and Oblique, Strike-Slip Controlled Growth of the Tibet Plateau. *Geophysical Journal International*, 135(1): 1–47. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00567.x>
- Peltzer, G., Tapponnier, P., Armijo, R., 1989. Magnitude of Late Quaternary Left-Lateral Displacements along the North Edge of Tibet. *Science*, 246(4935): 1285–1289. <https://doi.org/10.1126/science.246.4935.1285>
- Ren, G. X., 2021. Late Quaternary Activity and Tectonic Transition of the Sinistral Slip Faults, Eastern Tian Shan (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese with English abstract).

- Replumaz, A., Tapponnier, P., 2003. Reconstruction of the Deformed Collision Zone between India and Asia by Backward Motion of Lithospheric Blocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B6): 2285. <https://doi.org/10.1029/2001jb000661>
- Royden, L. H., Burchfiel, B. C., King, R. W., et al., 1997. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet. *Science*, 276(5313): 788–790. <https://doi.org/10.1126/science.276.5313.788>
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., et al., 1982. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, 10 (12): 611–616. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1982\)10<611:PETIAN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1982)10<611:PETIAN>2.0.CO;2)
- Tapponnier, P., Xu, Z. Q., Roger, F., et al., 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671–1677. <https://doi.org/10.1126/science.105978>
- Thompson, S. C., Weldon, R. J., Rubin, C. M., et al., 2002. Late Quaternary Slip Rates across the Central Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9): 2203. <https://doi.org/10.1029/2001jb000596>
- Wittlinger, G., Tapponnier, P., Poupinet, G., et al., 1998. Tomographic Evidence for Localized Lithospheric Shear along the Altyn Tagh Fault. *Science*, 282(5386): 74–76. <https://doi.org/10.1126/science.282.5386.74>
- Wu, M., 2017. Study on the Segmental Activities of the Yema He-Daxue Shan Fault (Dissertation). Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Hetzel, R., Hampel, A., et al., 2021. Slip Rate of the Danghe Nan Shan Thrust Fault from ¹⁰Be Exposure Dating of Folded River Terraces: Implications for the Strain Distribution in Northern Tibet. *Tectonics*, 40(4): e2020TC006584. <https://doi.org/10.1029/2020tc006584>
- Xu, Z. Q., Li, H. B., Tang, Z. M., et al., 2011. The Transformation of the Terrain Structures of the Tibet Plateau through Large-Scale Strike-Slip Faults. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (11): 3157–3170 (in Chinese with English abstract).
- Yan, B., Chen, P., Gao, Y., 2024. Stepwise Decrease in Strike-Slip Rate along the Eastern Altyn Tagh Fault and Its Relation to the Qilian Shan Thrust System, North-eastern Tibetan Plateau. *Journal of Structural Geology*, 179: 105037. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2023.105037>
- Zhang, B., Allen, M. B., Yao, Y. S., et al., 2024. Geometry, Slip Rate, and the Latest Earthquake of the Jinta Nanshan Fault: Interactions of the Altyn Tagh Fault and the Qilian Shan at the Northern Margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 876: 230271. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230271>
- Zhang, N., 2016. Geometry and Kinematics of the Eastern End of the Algyn Tagh Fault (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈艳文, 李树武, 袁道阳, 等, 2025. 邛连山北缘旱峡-大黄沟断裂中段晚第四纪活动的地质地貌证据. *地质通报*, 1–12. <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250115.1058.010>
- 何文贵, 张波, 吴明, 等, 2018. 野马河-大雪山断裂野马河段探槽古地震特征. *地震地质*, 40(1): 261–275.
- 李满, 肖骑彬, 喻国, 2020. 阿尔金走滑断裂带昌马段的电性结构样式及构造意义. *地球物理学报*, 63(11): 4125–4143.
- 刘亢, 李海兵, 王长在, 等, 2019. 阿尔金断裂带东段地区深浅部构造综合分析. *岩石学报*, 35(6): 1833–1847.
- 刘兴旺, 袁道阳, 姚赟胜, 等, 2021. 三危山断裂敦煌段古地震活动特征. *地震地质*, 43(6): 1398–1411.
- 罗浩, 何文贵, 王定伟, 等, 2013. 邛连山昌马断裂晚更新世滑动速率. *地震地质*, 35(4): 765–777.
- 罗浩, 何文贵, 袁道阳, 等, 2016. 昌马断裂带古地震活动特征的新认识. *地震工程学报*, 38(4): 632–637, 668.
- 罗浩, 徐锡伟, 刘小利, 等, 2020. 阿尔金断裂东段的构造转换模式. *地质学报*, 94(3): 692–706.
- 任光雪, 2021. 东天山左旋走滑断裂晚第四纪活动与构造转换(博士学位论文). 北京: 中国地震局地质研究所.
- 吴明, 2017. 野马河-大雪山断裂分段活动性研究(硕士学位论文). 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等, 2011. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造. *岩石学报*, 27(11): 3157–3170.
- 张宁, 2016. 阿尔金断裂东端部的几何结构与运动特征(硕士学位论文). 北京: 中国地震局地质研究所.