

刘兴旺,姚贇胜,朱俊文,等.河西走廊西端文殊山南缘断裂新活动特征[J].地震工程学报,2024,46(6):1395-1404.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240222003

LIU Xingwang, YAO Yunsheng, ZHU Junwen, et al. New activity characteristics of the southern Wenshushan fault in the western Hexi Corridor[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1395-1404. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240222003

## 河西走廊西端文殊山南缘断裂新活动特征

刘兴旺<sup>1,2</sup>, 姚贇胜<sup>1,2</sup>, 朱俊文<sup>1,2</sup>, 赵晓明<sup>3</sup>

(1. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州岩土地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**文殊山南缘断裂为新发现的位于河西走廊西端嘉峪关—文殊山隆起带南侧的一条活动断裂,研究其活动特征对完善区域构造图像、认识地区地震危险性具有重要意义。文章根据遥感影像解译、野外地质调查、航空摄影测量,结合年代学测试,对断裂进行综合研究。结果表明,文殊山南缘断裂长约25 km,断裂总体走向为NW向,倾向NE。根据断错及未断错地貌测年,确定该断裂最新一次地震活动的时间在 $(0.8 \pm 0.1)$  ka与 $(1\ 887 \sim 1\ 725)$  cal a BP之间。利用高精度数字高程模型数据,获得断层陡坎高度,结合相应的地貌年代,估算断裂垂直滑动速率在 $0.2 \sim 0.25$  mm/a。根据地震震级与破裂长度、位移量经验公式,估算文殊山南缘断裂潜在发震能力在6.8级左右,此震级下可能对邻近的乡镇、嘉峪关市区有较大的影响。

**关键词:**河西走廊; 嘉峪关—文殊山隆起; 活动断裂; 滑动速率; 全新世

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1395-10

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240222003

## New activity characteristics of the southern Wenshushan fault in the western Hexi Corridor

LIU Xingwang<sup>1,2</sup>, YAO Yunsheng<sup>1,2</sup>, ZHU Junwen<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaoming<sup>3</sup>

(1. Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou Institute of Geotechnique and Earthquake, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The southern Wenshushan fault, located on the southern side of the Jiayuguan—Wenshushan uplift in the western Hexi Corridor, is a newly discovered active fault. Studying its activity characteristics is crucial for enhancing the regional tectonic understanding and assessing seismic risk in the area. This study conducts a comprehensive study of the fault based on remote sensing image interpretation, field geological surveys, aerial photogrammetry, and chronological dating. The results indicate that the southern Wenshushan fault extends approximately 25 km to the northwest and dips to the NE. Dating of faulted and unfaulted landforms indicates that the latest seismic activity on the southern Wenshushan fault occurred between  $(0.8 \pm 0.1)$  ka and  $(1\ 887 \sim 1\ 725)$  cal a BP. Using high-precision digital elevation model data, the heights of the fault scarps were measured. Combined with the corresponding geological age, the vertical slip

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0901); 国家自然科学基金项目(42072246)

第一作者简介: 刘兴旺(1980—), 男, 研究员, 主要研究方向为活动构造及地貌。E-mail: lxw\_27@163.com。

rate of the fault was estimated to be between 0.2 and 0.25 mm/a. According to the empirical relationship between earthquake magnitude, rupture length, and displacement, the potential seismic magnitude of the southern Wenshushan fault is estimated to be around 6.8. This magnitude could significantly impact nearby towns and the Jiayuguan urban area.

**Keywords:** Hexi Corridor; Jiayuguan—Wenshushan uplift; active fault; slip rate; Holocene

## 0 引言

地震是群灾之首,尤其是发生在人口密集地区的强震更能造成严重的人员伤亡和财产损失<sup>[1-2]</sup>,如2023年12月18日发生在甘肃积石山的6.2级地震,造成了甘肃、青海两省大量的人员伤亡。已有的大量震例表明,活动断层是构造地震发生的根源,沿断层走向沿线往往破坏最为严重,人员伤亡也明显大于其他区域<sup>[3]</sup>。因此,准确限定活动断层的位置及活动特征在防震减灾工作中显得尤为重要。若对地区活动断层研究程度不足,不仅会造成在抗震设防、活断层避让方面认识的不足,也可能难以确定地震发震构造,如2023年甘肃积石山地震,在发震断裂的确定和发震模型的建立等方面就存在诸多不同的认识<sup>[4-6]</sup>。

位于河西走廊西端的嘉峪关—文殊山隆起是分隔酒西盆地和酒东盆地的重要隆起带<sup>[7]</sup>,嘉峪关—文殊山断裂带控制了隆起的形成和演化。以往的研究多集中在嘉峪关断裂上<sup>[7-12]</sup>,对文殊山断裂的研究相对较少<sup>[12]</sup>,对于隆起带周边是否存在其他活动断裂、断裂活动特征如何,则未开展过相关工作。通过卫星影像解译和野外实地调查,发现在文殊山隆起南缘存在活动断裂,本文对新发现的活动断裂进

行了地貌测量和年代学研究,并对断裂活动参数进行了限定,为完善区域构造图像、评价地震危险性提供了新的基础资料。

## 1 研究区概况

### 1.1 构造背景

新生代以来,印度板块和亚欧板块碰撞,青藏高原不断隆升、扩展,对亚洲乃至世界的构造和气候格局产生了深远影响<sup>[13-16]</sup>。祁连山—河西走廊位于青藏高原东北缘,是青藏高原正在形成的最年轻部分<sup>[17]</sup>,其形成演化是探讨印度—欧亚大陆碰撞远程效应和陆内造山作用的理想地区。此外,祁连山造山带的构造环境复杂,活动断裂带分布广泛,地震活动具有强度大、频度高且分布不均匀的特点(图1)。历史上,祁连山内部时有强震发生,如1932年昌马7.6级地震、2022年门源6.9级地震等。门源6.9级地震形成了长约30 km的地震破裂带,并断错了兰新高铁大梁隧道<sup>[18-21]</sup>,对交通运输造成了严重影响。然而,更多的大地震主要发生在河西走廊南、北两侧,如180年高台7½级地震、1609年红崖堡7¼级地震、1927年古浪8级地震、1954年山丹7¼级地震等<sup>[22-25]</sup>。

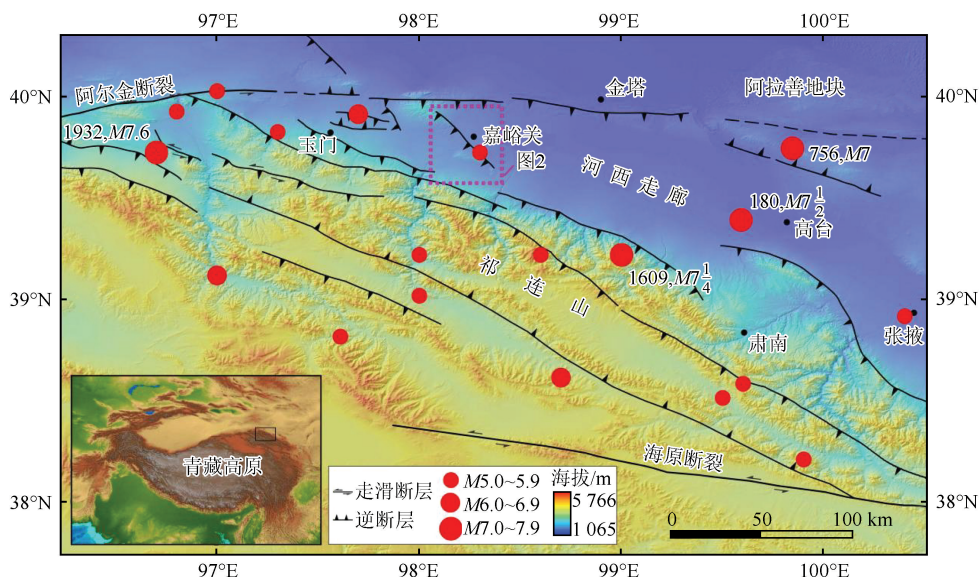


图1 祁连山西段活动断裂及强震分布图

Fig.1 Distribution map of active faults and strong earthquakes in the western part of Qilian Shan

断裂是河西走廊盆地最主要的构造活动形式之一,在控制盆地形成演化、隆升剥蚀、沉降沉积等方面发挥着重要作用。断裂发育广泛,既有发育在走廊盆地南北两侧的边界断裂,也有发育于盆地内部的断裂。总体而言,河西走廊盆地主要有 NW 向、NNW 向和近 EW 向 3 组断裂构造。NW 向断裂主要位于祁连山山区、盆地南北边界,多为大边界一级断裂,如祁连山北缘断裂带、河西走廊盆地北缘断裂带;NNW 向断裂发育不多,一般构成盆地内部隆起西边界,如嘉峪关断裂、榆木山东缘断裂等;EW 向断裂主要位于盆地内部以北和内部,前者有阿尔金山断裂向东延伸的黑山断裂、金塔南山断裂等,后者有白杨河断裂、民乐—永昌隐伏断裂等。

### 1.2 嘉峪关—文殊山隆起

河西走廊地处黄河以西、祁连山和巴丹吉林沙漠中间,是一个呈 NW—SE 走向的狭长地带,东西长约 1 000 km,南北最宽处近 200 km。河西走廊内部的大黄山隆起、榆木山隆起和嘉峪关—文殊山隆起将河西走廊分割成 4 个次级盆地<sup>[7]</sup>。嘉峪关—文殊山隆起位于河西走廊最西端,是走廊内部规模最小的次级隆起,该隆起带及与之具有成生联系的嘉峪关断裂、文殊山断裂分割了西侧的酒西盆地和东侧的酒东盆地。

文殊山隆起为一个新生代背斜,发育较为完整的新生代后期地层<sup>[26]</sup>。根据磁性地层年代学研究及构造分析,文殊山隆起的年代确定为 0.9 Ma<sup>[27]</sup>,隆起是由褶皱和断层两部分作用完成的,褶皱作用大于断裂作用。断裂主要为文殊山断裂,其最新一次地震活动被限定在  $(3.8 \pm 0.2) \text{ ka} \sim (4.7 \pm 0.2) \text{ ka}$  之间<sup>[12]</sup>。北侧嘉峪关隆起受嘉峪关断裂控制,走廊内多表现为各级较为年轻的阶地地貌面,最早的阶地地面形成于约 100 ka,据此限定断裂垂直滑动速率在  $(0.22 \pm 0.03) \text{ mm/a}$ <sup>[10]</sup>。

以往认为文殊山背斜隆起只存在一条断裂,即发育于山脊中央的文殊山断裂,而对于隆起带周缘是否存在活动断裂则无相关研究。我们在隆起带南缘发现了新的活动断裂,本文对该活动断裂开展了系列研究。

## 2 文殊山南缘断裂几何展布特征

经影像解译和野外实地考察,发现在文殊山南侧存在长约 25 km 的活动断裂,该断裂带未见前人报道,我们将其命名为文殊山南缘断裂(图 2)。断裂中西段主要沿文殊山南侧展布,东段分布于祁连山山前洪积扇之上。

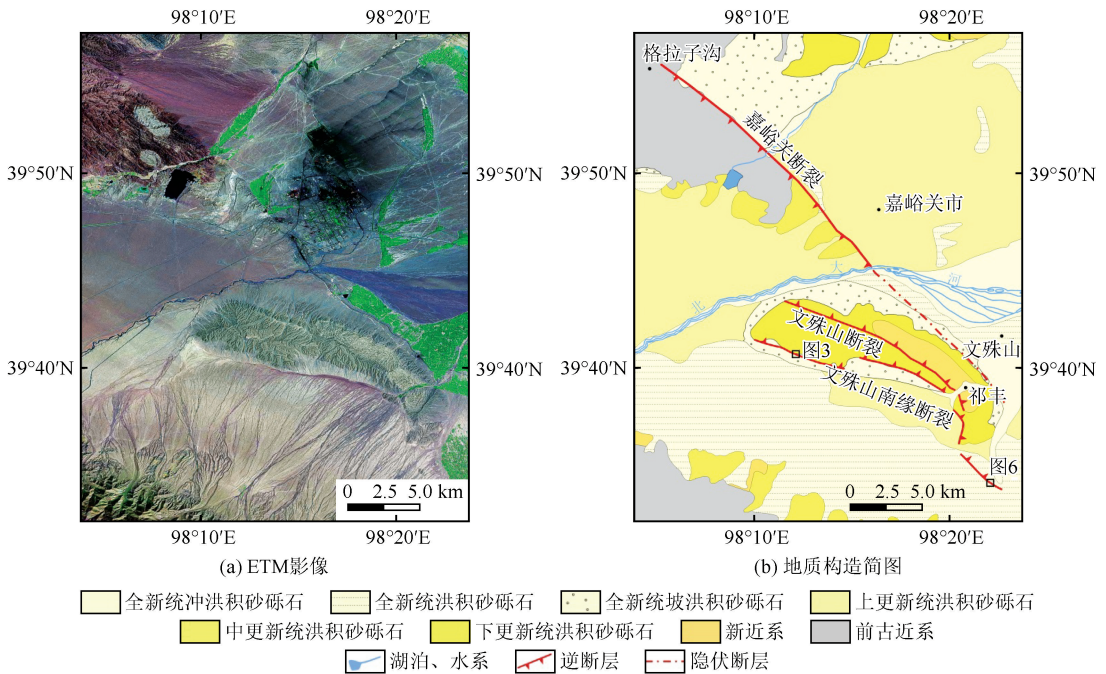


图 2 嘉峪关—文殊山隆起 ETM 影像及地质构造简图

Fig.2 ETM image and geological tectonic map of the Jiayuguan—Wenshushan uplift

文殊山南缘断裂连续性不好(图 2),断裂西段长约 7.5 km,总体走向  $N70^\circ W$ ,断裂活动在不同期洪积扇上形成高度不等的陡坎,陡坎朝向南,与地形

一致,为正向陡坎。再往东,中段与本段形成约 1.5 km 的阶区(图 2),长度、走向与西段相同,该段只保留了较早期的洪积扇,在断层通过处多形成三角面



地貌。断裂在通过祁丰藏族乡时呈弧形(图2),走向由N20°W逐渐变为N20°E,长约5 km。断裂最东段展布于山前洪积扇上,总体走向N50°W,长约5 km。该段陡坎朝向与地形相反,形成反向陡坎,陡坎不高,最高2 m左右。

为判断文殊山南缘断裂活动特征,野外在断裂东、西端选择了2个研究点(位置1、位置2)。利用小型无人机对研究点进行了详细航测,并根据照片处理得到高精度数字高程模型(Digital Elevation Mode, DEM)<sup>[28-29]</sup>,利用该数据可获得不同期地貌

面上保留的断层陡坎的高度。根据研究点沉积物特征,对断错地貌面年代的确定主要选择了光释光测年(Optically Stimulated Luminescence, OSL)方法,该方法可以很好地限定细粒沉积的粉细砂、黄土年代<sup>[30-32]</sup>。光释光样品在中国地震局黄土地震工程重点实验室完成测试,结果如表1所列。此外,在黄土沉积富含有机质沉积物的单元采集了<sup>14</sup>C样品一个,由美国Beta实验室进行测验。根据Intcal 13校正曲线<sup>[33]</sup>,利用在线OxCal软件将<sup>14</sup>C测试结果校正为日历年,并用“cal a BP”表示<sup>[34]</sup>,结果如表2所列。

表1 文殊山南缘断裂光释光样品测年结果

Table 1 OSL dating results of the southern Wenshushan fault

样品编号	埋深/m	U-238/( $\times 10^{-6}$ )	Th-232/( $\times 10^{-6}$ )	K-40/%	环境剂量率/(Ga/ka)	等效剂量/Ga	年龄/ka
JYGOSL-06	1.1	2.75 $\pm$ 0.03	10.6 $\pm$ 0.12	1.77 $\pm$ 0.32	3.46 $\pm$ 0.04	23 $\pm$ 0.5	6.7 $\pm$ 0.2
JYGOSL-07	1.0	2.35 $\pm$ 0.03	8.8 $\pm$ 0.04	1.56 $\pm$ 0.03	3.01 $\pm$ 0.04	103.47 $\pm$ 4.0	34.4 $\pm$ 1.4
JYGOSL-14	0.5	3.02 $\pm$ 0.02	11.4 $\pm$ 0.16	1.79 $\pm$ 0.01	3.63 $\pm$ 0.03	3.71 $\pm$ 0.38	1.0 $\pm$ 0.1
JYGOSL-15	0.9	2.92 $\pm$ 0.02	12.3 $\pm$ 0.05	1.83 $\pm$ 0.05	3.71 $\pm$ 0.03	25.81 $\pm$ 0.3	7.0 $\pm$ 0.1
JYGOSL-16	0.4	2.26 $\pm$ 0.03	10.9 $\pm$ 0.04	1.83 $\pm$ 0.03	3.57 $\pm$ 0.04	2.87 $\pm$ 0.48	0.8 $\pm$ 0.1

表2 文殊山南缘断裂<sup>14</sup>C年代样品测年结果

Table 2 <sup>14</sup>C dating result of the sample from the southern Wenshushan fault

样品编号	埋深/m	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	传统年龄/(a BP)	日历年龄/(cal a BP)
JYG14C-01	0.4	39.680 588	98.205 070	1 932	1 900 $\pm$ 30	1 887~1 725

### 3 文殊山南缘断裂活动特征

#### 3.1 位置1

研究点(位置1)位于断裂西段(图2),该处多期洪积扇被断错,发育明显的断层陡坎,表现为坡向南的陡坎地貌,高精度DEM影像可以观察到这一明显特征[图3(a)]。根据影像特征,并结合野外校核,本区主要发育四期洪积扇[图3(b)]。A0期洪积扇为最年轻、正在形成的洪积扇面,略高于现今河

道,相当于高漫滩地貌。A1期洪积扇高于河道不足1 m,其上有高度不大的断层陡坎发育[图4(a)]。相较于A0及A1期洪积扇,A2期洪积扇保留面积不大,高于现代冲沟1~2 m,其上断层陡坎明显[图4(b)]。A3期洪积扇高于现代冲沟3 m以上,主要残留于山坡前侧,其上陡坎高度较大[图4(c)],但断层下盘洪积扇受后期流水侵蚀,断层陡坎高度变化较大,需选择合适的位置才能精确限定陡坎高度。利用高精度DEM数据,对各期洪积扇上发育的断层

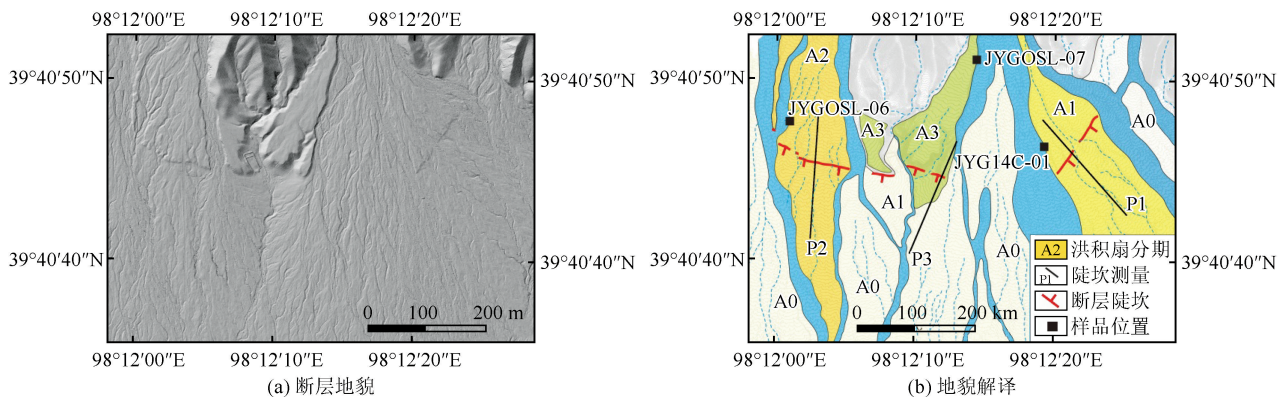


图3 位置1断层地貌及解译图

Fig.3 Faulted landform and interpretation map at site 1



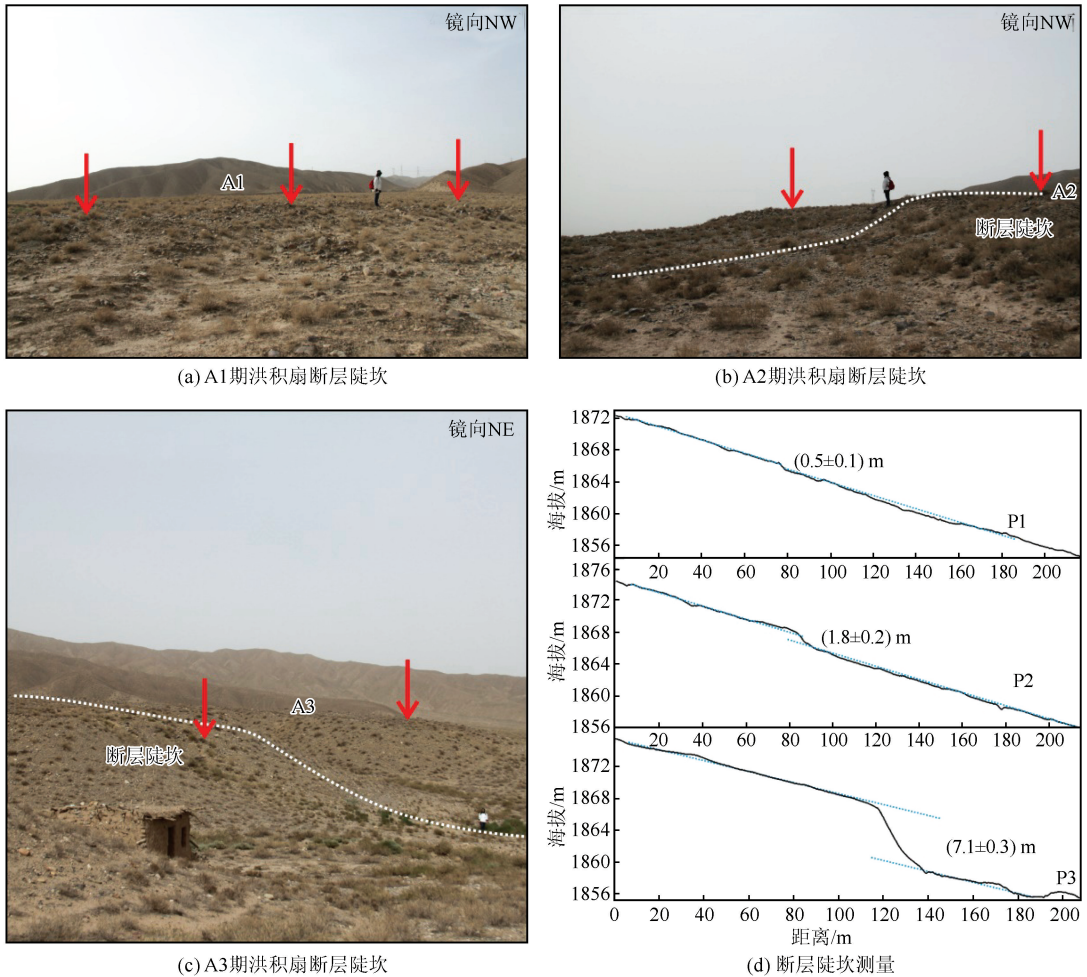


图 4 位置 1 洪积扇断层陡坎及垂直高度测量

Fig.4 Fault scarps on different alluvial fans and vertical hight measurement at site 1

陡坎高度进行了限定[图 3(b)],测量剖面由北向南,获得发育于 A1、A2、A3 期洪积扇面上的断层陡坎高度分别为 $(0.5\pm 0.1)$  m、 $(1.8\pm 0.2)$  m 和 $(7.1\pm 0.3)$  m[图 4(d)]。

根据影像特征及野外考察,断裂主要断错了 A1 ~ A3 期洪积扇,A0 洪积扇则未见断错特征。为限定断层活动时代及滑动速率,野外对 A1 ~ A3 期洪积扇采集了年代样品[图 3(b)]。A1 期洪积扇采样深度约 0.4 m,为<sup>14</sup>C 样品(JYG14C-01),主要为有机沉积物,经 Beta 实验室测试,树轮校正年龄为(1 887~1 725) cal a BP[图 5(a)]。A2 和 A3 洪积扇未见有机沉积物,主要采集了光释光样品 JY-GOSL-06 和 JYGOSL-07,采样位置主要集中在洪积扇上部冲洪积砾石层夹层内的细砂层,采样深度分别为 1.1 m 和 1.0 m,其结果分别为 $(6.7\pm 0.2)$  ka 和 $(34.4\pm 1.4)$  ka[图 5(b)、(c)]。

### 3.2 位置 2

研究点(位置 2)位于文殊山南缘断裂东段(图

2),地貌发育处为祁连山山前洪积扇,地形上南高北低,断层陡坎则坡向向南,表现为与地形相反的反向陡坎。利用无人机摄影测量,获得了研究点 DEM 数据,生成了山体阴影图[图 6(a)],并解译区分了研究点三级地貌面[图 6(b)]。与位置 1 类似,A0 期洪积扇代表了除现代河道外最年轻的地貌单元,是未被断裂断错的最年轻地貌体。A1 洪积扇呈长条状分布于冲沟两侧,保留面积较小,其上陡坎较低[图 7(a)]。A2 期洪积扇为本区广泛分布的一期洪积扇,构成本区地貌主体,其上陡坎明显且高度较大,易于识别[图 7(b)]。利用 DEM 数据,对发育于 A1 和 A2 期洪积扇上的断层陡坎高度进行了测量[剖面位置见图 6(b)],测量剖面由南向北。根据断层上、下盘地形趋势线拟合,获得发育于 A1 和 A2 洪积扇面上的断层陡坎高度分别为 $(0.6\pm 0.1)$  m 和 $(1.7\pm 0.2)$  m[图 7(d)]。

野外调查确定断裂主要断错了 A1 和 A2 期洪积扇,A0 期洪积扇则未被断错。为限定断层活动时

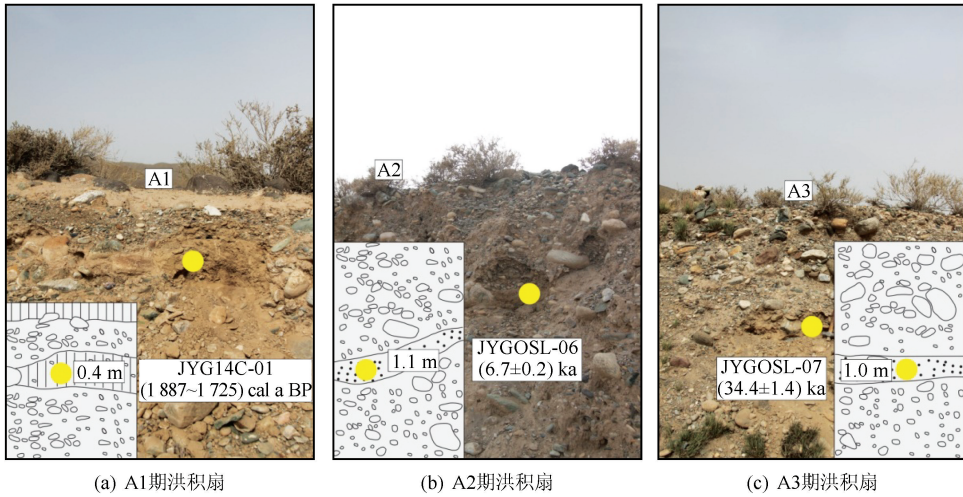


图 5 位置 1 各期洪积扇年代样品采集剖面及结果

Fig.5 Collection sections and results of samples from different alluvial fans at site 1

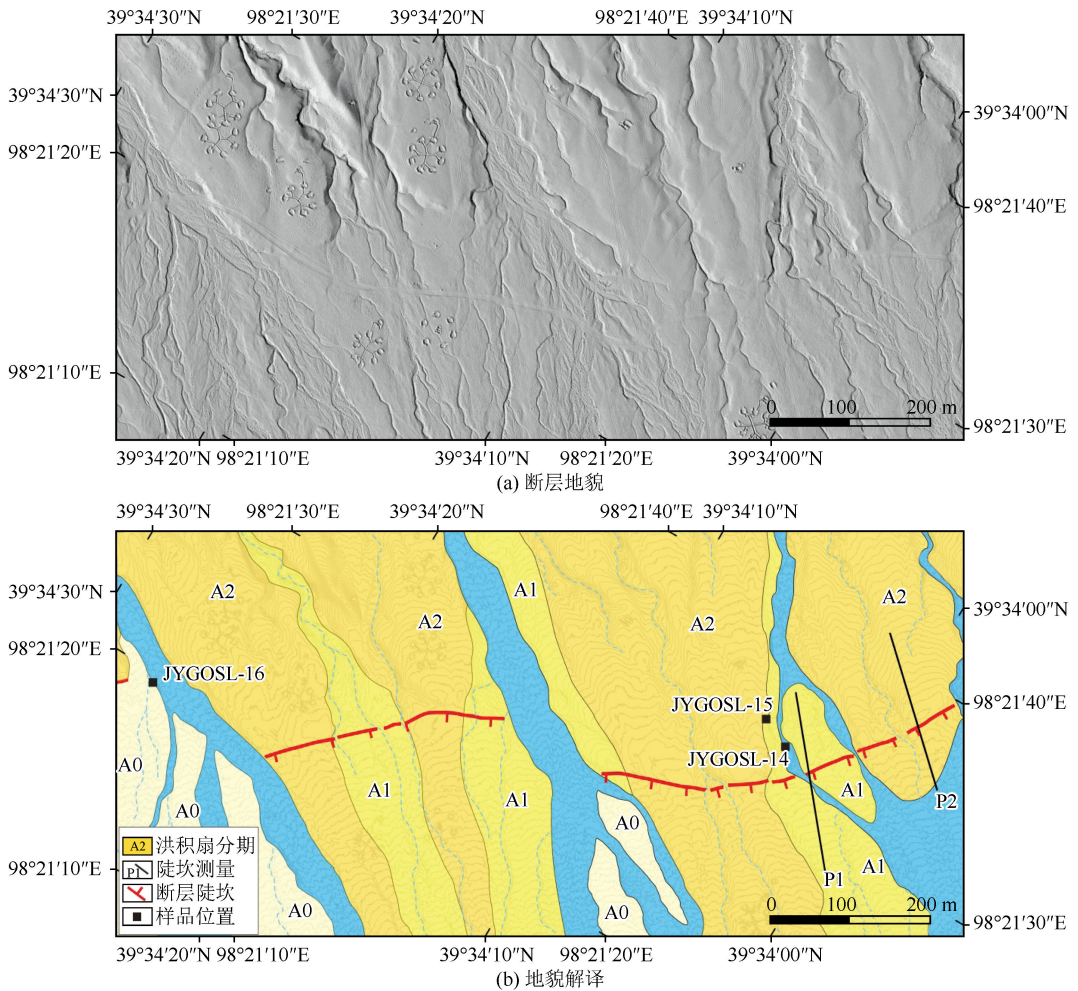


图 6 位置 2 断层地貌及解译图

Fig.6 Faulted landform and interpretation map at site 2

代及滑动速率,野外对 A0、A1 和 A2 期洪积扇采集了光释光年代样品[图 6(b)]。A0 期洪积扇样品(JYG1OSL-16)采样深度 0.4 m,为夹于洪积扇砾石

层内部的细砂层,测试结果为  $(0.8 \pm 0.1)$  ka[图 8(a)]。A1 和 A2 期洪积扇砾石层上部沉积了厚度不等的黄土,采样位置位于砾石层之上黄土底部



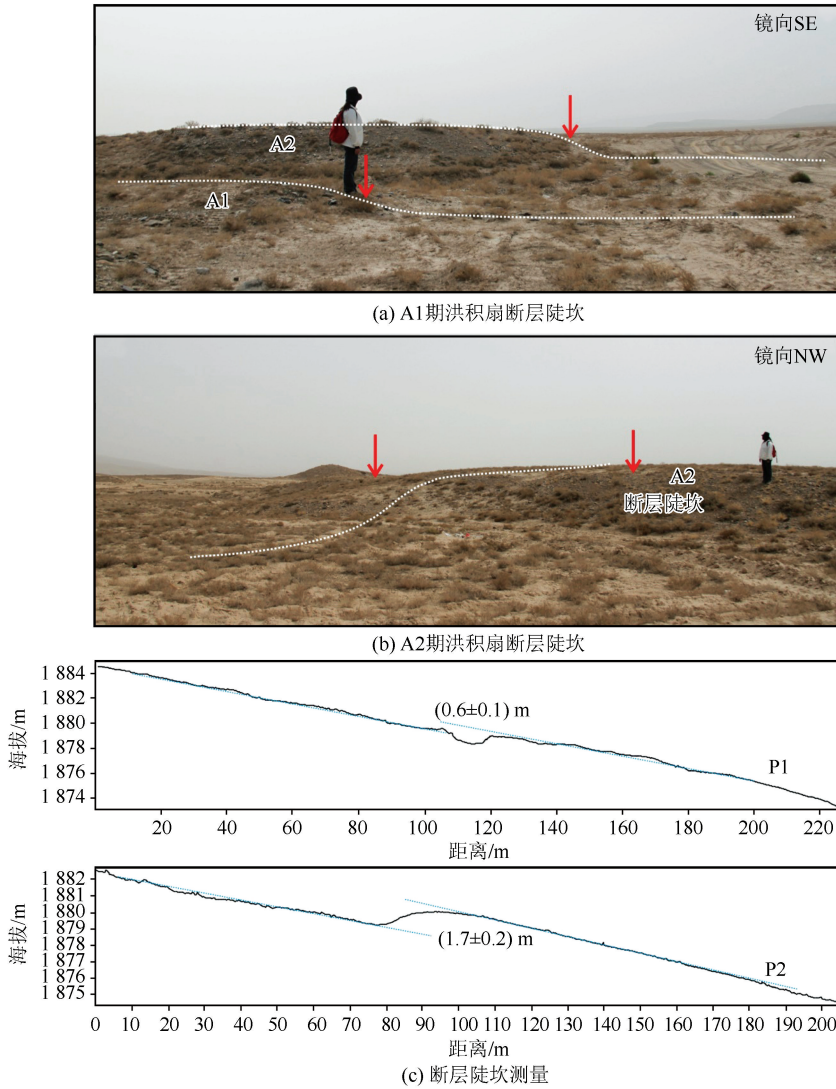


图 7 位置 2 洪积扇断层陡坎及垂直高度测量

Fig.7 Fault scarps on different alluvial fans and vertical height measurement at site 2

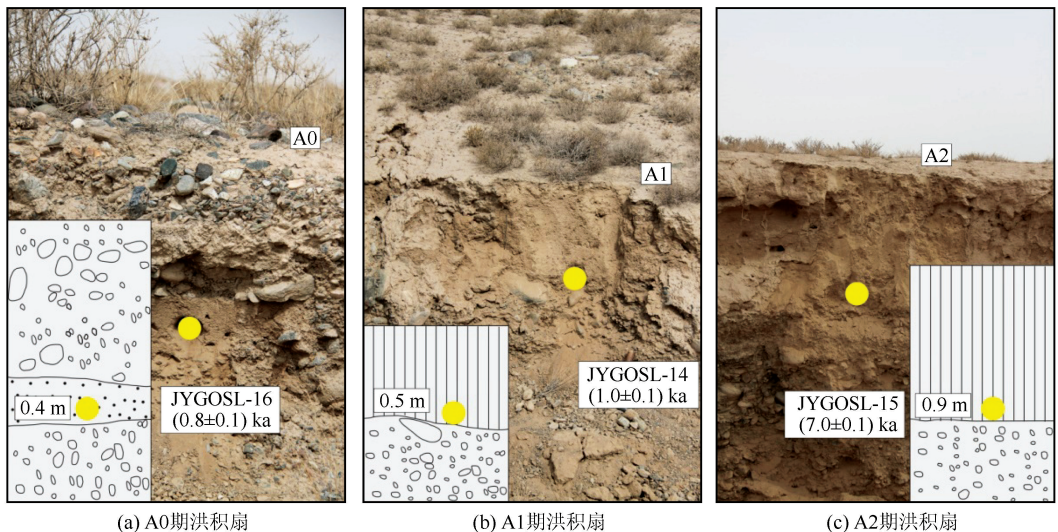


图 8 位置 2 各期洪积扇年代样品采集剖面及结果

Fig.8 Collection sections and results of samples from different of alluvial fans at site 2



(JYGOSL-14 和 JYGOSL-15), 采样深度分别为 0.5 m 和 0.9 m, 结果分别为  $(1.0 \pm 0.1)$  ka 和  $(7.0 \pm 1.1)$  ka [图 8(b)、(c)]。

## 4 讨论

### 4.1 断裂最新活动时代限定

本次未开展探槽古地震研究工作, 未获得断裂古地震活动参数, 但根据断裂活动断错和未断错的地貌面年代, 可以从地貌学角度对断裂最新一次活动事件的时间进行限定<sup>[35]</sup>。

两个研究点(位置 1、位置 2)空间位置距离较近, 地貌特征较为相似, 具有一定的可对比性。根据地貌面的解译(图 3、6), 断裂未断错的年代为 A0 期洪积扇, 相当于河流高漫滩的地貌单元, 断错的最新洪积扇为 A1 期洪积扇, 其上保留的断层陡坎高度约在 0.5 m。

A0 期洪积扇上只有一个光释光样品, 为 JYGOSL-16(图 6), 测试物质为夹于冲洪积相砾石层之间的细砂, 结果为  $(0.8 \pm 0.1)$  ka [图 8(a)], 表明这一年代以来断裂未有活动。A1 期洪积扇上有两个样品, 分别为 JYG14C-01 和 JYGOSL-14(图 3、6), 测试方法分别为 <sup>14</sup>C 和光释光, 采样位置分别为夹于砾石层之间的沉积物及其之上的黄土, 结果分别为  $(1\ 887 \sim 1\ 725)$  cal a BP [图 5(a)] 和  $(1.0 \pm 0.1)$  ka [图 8(b)]。野外观察研究点 2(位置 2)位于 A1 期洪积扇之上, 黄土沉积普遍厚度不大, 存在后期沉积的可能性, 样品结果可能偏年轻, 不能代表该期洪积扇的年代。 $(1\ 887 \sim 1\ 725)$  cal a BP 更能代表该洪积扇的年代, 即在距今  $(1\ 887 \sim 1\ 725)$  a 以来断裂有过活动, 并形成高约 0.5 m 的断层陡坎。

综合考虑, 可以把断裂最新一次地震活动的时间限制在  $(0.8 \pm 0.1)$  ka 与  $(1\ 887 \sim 1\ 725)$  cal a BP 之间。

### 4.2 断裂垂直滑动速率

根据地貌面上保留的断层陡坎高度和相应的地貌面年代, 可以获得断裂的垂直滑动速率。A1 期地貌面上陡坎高度较小, 根据酒西盆地断裂古地震复发特征<sup>[36]</sup>, 判断应为一次地震形成的遗迹, 未经历过多次地震累计, 不适宜断层滑动速率的计算。因此, 在滑动速率的估算中, 本文重点选择了 A2 和 A3 两期洪积扇进行研究。

A2 期洪积扇上的两个研究点, 无论是陡坎高度还是年代测试均较为一致, 反映了结果的可靠性。基于陡坎高度分别为  $(1.8 \pm 0.2)$  m 和  $(1.7 \pm 0.2)$  m,

年代结果分别为  $(6.7 \pm 0.2)$  ka 和  $(7.0 \pm 1.1)$  ka, 估算断裂垂直滑动速率在  $\sim 0.25$  mm/a。A3 期洪积扇为研究区最老的地貌面, 其年代结果为  $(34.4 \pm 1.4)$  ka, 相应的断层陡坎高度为  $(7.1 \pm 0.3)$  m, 根据这一结果, 获得断裂垂直滑动速率为  $\sim 0.2$  mm/a。

综合考虑, 可以把文殊山南缘断裂垂直滑动速率限定在  $0.2 \sim 0.25$  mm/a, 其量级与嘉峪关断裂相当<sup>[10]</sup>。

### 4.3 地震震级估算

此次新发现的文殊山南缘断裂为全新世断裂, 其发震能力如何呢? 根据断裂的长度(25 km), 利用青藏地区逆断层震级与破裂带长度的关系式  $M = 4.21 + 1.85 \lg L$  ( $M$  为震级,  $L$  为破裂带长度)<sup>[37]</sup>, 推算文殊山南缘断裂的发震震级为 6.8 级。根据位置 1 和位置 2 最新断错地貌面上陡坎高度(约 0.5 m), 该高度可以认为是一次地震形成的。考察中并未发现断层剖面, 根据文殊山断裂及北侧发现的断层剖面, 断裂倾角在  $40^\circ$  左右, 以此估算, 每次地震的同震位移量在 0.7 m 左右。利用逆断层震级与同震位移的关系式  $M = 7 + 1.05 \lg D$  ( $M$  为震级,  $D$  为同震位移)<sup>[37]</sup>, 计算得到文殊山南缘断裂地震震级同样为 6.8 级。

酒西盆地内部曾发生过 1785 年玉门惠回堡  $6\frac{3}{4}$  级地震, 其发震构造为新民堡断裂, 断裂长约 20 km, 至今保留自由面的断层陡坎高度约 0.5 m<sup>[38]</sup>。从断裂的规模与地震垂直位错看, 此次发现的文殊山南缘断裂与新民堡断裂量级相当, 亦可推断文殊山南缘断裂若发生地震, 震级也应在 6.8 级左右。

## 5 结论

本文通过卫星影像解译、野外地质调查、航空摄影测量, 结合第四纪年代学方法, 对位于河西走廊西端的文殊山南缘断裂进行了研究, 初步得出以下主要结论:

(1) 文殊山南缘断裂为新发现的全新世断裂, 位于文殊山隆起带南缘, 长约 25 km, 断裂总体走向为 NW 向, 倾向 NE。通过本文断错地貌研究, 认为断裂最新一次地震活动的时间在  $(0.8 \pm 0.1)$  ka 与  $(1\ 887 \sim 1\ 725)$  cal a BP 之间。

(2) 根据断层陡坎高度测量和相应的地貌年代, 估算文殊山南缘断裂垂直滑动速率在  $0.2 \sim 0.25$  mm/a, 与区域内嘉峪关断裂滑动速率相当。

(3) 根据经验公式, 文殊山南缘断裂潜在发震能力在 6.8 级左右, 在该震级条件下, 邻近的祁丰乡、文殊镇及嘉峪关城区可能会产生较大的影响。

## 参考文献(References)

- [1] 张培震,邓起东,张竹琪,等.中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J].中国科学:地球科学,2013,43(10):1607-1620. ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43 (10):1607-1620.
- [2] 雷启云,郑文俊,王银,等.鄂尔多斯活动地块及边界带 1 : 50 万地震构造图编制[J].地震科学进展,2024,54(1):65-74. LEI Qiyun, ZHENG Wenjun, WANG Yin, et al. The compilation of 1 : 500 000 seismotectonic map of the Ordos active block and boundary zone[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1):65-74.
- [3] 徐锡伟,赵伯明,马胜利,等.活动断层地震灾害预测方法与应用[M].北京:科学出版社,2011. XU Xiwei, ZHAO Boming, MA Shengli, et al. Prediction method and application of earthquake disaster of active fault [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [4] 陆诗铭,吴中海,李智超.2023 年 12 月 18 日甘肃省积石山 6.2 级地震的控震构造及特征[J].地震科学进展,2024,54(1):86-93. LU Shiming, WU Zhonghai, LI Zhichao. Seismic structure characteristics of the 18 December 2023  $M_{6.2}$  Jishishan earthquake, Gansu Province [J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1):86-93.
- [5] 杨攀新,熊仁伟,胡朝忠,等.2023 年甘肃积石山 6.2 级地震发震构造浅析[J].地震,2024,44(1):153-159. YANG Panxin, XIONG Renwei, HU Chaozhong, et al. Preliminary analysis of the seismogenic tectonics for the 2023 Jishishan  $M_{6.2}$  earthquake in Gansu Province [J]. *Earthquake*, 2024, 44(1):153-159.
- [6] 高原,李心怡,李抒予,等.2023 年 12 月 18 日积石山 6.2 地震的深浅变形构造分析[J].地震,2024,44(1):160-166. GAO Yuan, LI Xinyi, LI Shuyun, et al. Deep and shallow deformation tectonics of Jishishan  $M_{6.2}$  earthquake on 18 December 2023 in China [J]. *Earthquake*, 2024, 44(1):160-166.
- [7] 国家地震局地质研究所,国家地震局兰州地震研究所.祁连山—河西走廊活动断裂系[M].北京:地震出版社,1993. Institute of Geology, SSB, Lanzhou Institute of Seismology, SSB. Qilian Mountain—Hexi Corridor active fault system [M]. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [8] 陈柏林,刘建生,张永双,等.嘉峪关断裂晚第四纪新构造活动特征[J].地质力学学报,2007,13(1):78-85. CHEN Bailin, LIU Jiansheng, ZHANG Yongshuang, et al. Late Quaternary neotectonic movement of the Jiayuguan fault [J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 13(1):78-85.
- [9] 何文贵,袁道阳,王爱国,等.嘉峪关断层中段的新活动特征[J].中国地震,2010,26(3):296-303. HE Wengui, YUAN Daoyang, WANG Aiguo, et al. The recent active characteristics of the middle segment of Jiayuguan fault [J]. *Earthquake Research in China*, 2010, 26(3):296-303.
- [10] ZHENG W J, ZHANG H P, ZHANG P Z, et al. Late Quaternary slip rates of the thrust faults in western Hexi Corridor (northern Qilian Shan, China) and their implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau [J]. *Geosphere*, 2013, 9(2):342-354.
- [11] 刘兴旺,吴赵,梁明剑,等.嘉峪关断裂古地震活动特征及其强震危险性影响[J].地球科学,2021,46(10):3796-3806. LIU Xingwang, WU Zhao, LIANG Mingjian, et al. Paleoseismic characteristics of Jiayuguan fault and its seismic risk [J]. *Earth Science*, 2021, 46(10):3796-3806.
- [12] 郑文俊.河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式[D].北京:中国地震局地质研究所,2009. ZHENG Wenjun. Geometric pattern and active tectonics of the Hexi Corridor and its adjacent regions [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2009.
- [13] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision; features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India—Eurasia collision [J]. *Science*, 1975, 189(4201):419-426.
- [14] TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10(12):611-616.
- [15] MOLNAR P, ENGLAND P, MARTINOD J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon [J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(4):357-396.
- [16] AN Z S, KUTZBACH J E, PRELL W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya—Tibetan Plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, 411 (6833):62-66.
- [17] TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. *Science*, 2001, 294 (5547):1671-1677.
- [18] 刘璐,刘兴旺,张波,等.利用高分影像识别门源  $M_{6.9}$  地震地表破裂带[J].地震工程学报,2022,44(2):440-449. LIU Lu, LIU Xingwang, ZHANG Bo, et al. Recognition of surface ruptures of Menyuan  $M_{6.9}$  earthquake using GF images [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(2):440-449.
- [19] 颜丙囤,季灵运,蒋锋云,等. InSAR 数据约束的 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_{6.9}$  地震发震构造研究 [J]. 地震工程学报, 2022, 44(2):450-457. YAN Bingdun, JI Lingyun, JIANG Fengyun, et al. Seismogenic structure of Menyuan, Qinghai  $M_{6.9}$  earthquake on January 8, 2022 constrained by InSAR data [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(2):450-457.
- [20] 薛善余,谢虹,袁道阳,等.2022 门源  $M_{6.9}$  地震地表破裂带震害特征调查 [J]. 地震工程学报, 2022, 44(2):458-467. XUE Shanyu, XIE Hong, YUAN Daoyang, et al. Seismic disaster characteristics of the surface rupture of Menyuan  $M_{6.9}$  earthquake in 2022 [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(2):458-467.
- [21] 袁道阳,谢虹,苏瑞欢,等.2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_{6.9}$

- 地震地表破裂带特征与发震机制[J].地球物理学报,2023,66(1):229-244.
- YUAN Daoyang, XIE Hong, SU Ruihuan, et al. Characteristics of co-seismic surface rupture zone of Menyuan  $M_s$ 6.9 earthquake in Qinghai Province on January 8, 2022 and seismogenic mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1): 229-244.
- [22] 曹娜, 雷中生, 袁道阳, 等. 公元180年甘肃表氏地震考[J]. 地震学报, 2010, 32(6): 744-753, 767.
- CAO Na, LEI Zhongsheng, YUAN Daoyang, et al. Textural criticism on the Biaoshi, Gansu, earthquake in 180 AD[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(6): 744-753, 767.
- [23] 刘兴旺, 雷中生, 袁道阳, 等. 1609年甘肃红崖堡7¼级地震考证[J]. 西北地震学报, 2011(2): 143-148.
- LIU Xingwang, LEI Zhongsheng, YUAN Daoyang, et al. Textural research on the Hongyapu  $M7\frac{1}{4}$  earthquake in 1609[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011(2): 143-148.
- [24] 侯康明, 邓起东, 刘百箴. 对古浪8级大震孕育和发生的构造环境及发震模型的讨论[J]. 中国地震, 1999, 15(4): 339-348.
- HOU Kangming, DENG Qidong, LIU Baichi. Research on tectonic environment and seismogenic mechanism of 1927 Gulang great earthquake [J]. Earthquake Research in China, 1999, 15(4): 339-348.
- [25] 罗浩, 雷中生, 何文贵, 等. 1954年甘肃山丹7¼级地震史料补遗[J]. 震灾防御技术, 2010, 5(2): 185-198.
- LUO Hao, LEI Zhongsheng, HE Wengui, et al. Addendum of historical records of Shandan, Gansu Province  $7\frac{1}{4}$  earthquake in 1954[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2010, 5(2): 185-198.
- [26] 赵志军, 方小敏, 李吉均. 祁连山北缘酒东盆地晚新生代磁性地层[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2001, 31(增刊1): 195-201.
- ZHAO Zhijun, FANG Xiaomin, LI Jijun. Late Cenozoic magnetic strata in Jiudong Basin, northern margin of Qilian Mountains[J]. Scientia Sinica (Terra), 2001, 31 (Suppl01): 195-201.
- [27] 袁道阳. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003.
- YUAN Daoyang. Tectonic deformation features and space-time evolution in northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau since the Late Cenozoic time [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2003.
- [28] BEMIS S P, MICKLETHWAITE S, TURNER D, et al. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology[J]. Journal of Structural Geology, 2014, 69: 163-178.
- [29] 王朋涛, 邵延秀, 张会平, 等. sUAV摄影技术在活动构造研究中的应用: 以海原断裂驢马沟为例[J]. 第四纪研究, 2016, 36(2): 433-442.
- WANG Pengtao, SHAO Yanxiu, ZHANG Huiping, et al. The application of suav photogrammetry in active tectonics: Shan-
- magou site of Haiyuan fault, for example[J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(2): 433-442.
- [30] 王旭龙, 卢演涛, 李晓妮. 细颗粒石英光释光测年: 简单多片再生法[J]. 地震地质, 2005, 27(4): 615-623.
- WANG Xulong, LU Yanchou, LI Xiaoni. Luminescence dating of fine-grained quartz in Chinese loess: simplified multiple aliquot regenerative-dose (Mar) protocol [J]. Seismology and Geology, 2005, 27(4): 615-623.
- [31] 杨传成, 陈杰, 张克旗, 等. 水成相沉积物细颗粒石英光释光综合生长曲线的建立与应用[J]. 地震地质, 2007, 29(2): 402-411.
- YANG Chuancheng, CHEN Jie, ZHANG Keqi, et al. Standardized growth curves (SGC) for optical dating of fine-grained quartz from water-lain sediments [J]. Seismology and Geology, 2007, 29(2): 402-411.
- [32] 张克旗, 吴中海, 吕同艳, 等. 光释光测年法: 综述及进展[J]. 地质通报, 2015, 34(1): 183-203.
- ZHANG Keqi, WU Zhonghai, LÜ Tongyan, et al. Review and progress of OSL dating [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(1): 183-203.
- [33] REIMER P J, BARD E, BAILLIE M G L, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP [J]. Radiocarbon, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [34] BRONK RAMSEY C. Oxcal version 4.3.2 [DB/OL]. <http://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>, 2017.
- [35] 赵晓明, 刘兴旺, 蔡艺萌, 等. 利用断错地貌限定榆木山北缘断裂最新地震事件[J]. 第四纪研究, 2022, 42(3): 732-743.
- ZHAO Xiaoming, LIU Xingwang, CAI Yimeng, et al. Determination of the latest seismic event on the northern Yumushan fault by faulted landforms [J]. Quaternary Sciences, 2022, 42(3): 732-743.
- [36] 刘兴旺, 袁道阳, 何文贵, 等. 河西走廊西端酒西盆地古地震研究进展[J]. 地震工程学报, 2021, 43(1): 1-10.
- LIU Xingwang, YUAN Daoyang, HE Wengui, et al. Research progress on paleoearthquake in Jiuxi Basin located in the western Hexi Corridor [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(1): 1-10.
- [37] 邓起东, 于贵华, 叶文华. 地震地表破裂参数与震级关系研究 [C]// 国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(2). 北京: 地震出版社, 1992: 247-264.
- DENG Qidong, YU Guihua, YE Wenhua. Relationship between earthquake magnitude and parameters of surface ruptures associated with historical earthquake [C]// Institute of Geology, SSB. Research on active fault(2). Beijing: Seismological Press, 1992: 247-264.
- [38] 何文贵, 雷中生, 袁道阳, 等. 1785年玉门惠回堡地震的震灾特点与发震构造[J]. 西北地震学报, 2010, 32(1): 47-53.
- HE Wengui, LEI Zhongsheng, YUAN Daoyang, et al. Disaster characteristics of Huihuipu earthquake in 1785 in Yumen, Gansu Province, and discussion on its seismogenic structure [J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(1): 47-53.