

大青山山前断裂土右旗西段莲花山探槽揭露的古地震事件及年龄

姚胜, 王爱国, 邵延秀, 刘兴旺, 张波, 贾源源

Paleoseismic events and ages revealed by the Lianhuashan trench in the western section of the Tuyouqi of the Daqingshan piedmont fault

Yao Yunsheng, Wang Aiguo, Shao Yanxiu, Liu Xingwang, Zhang Bo, and Jia Yuanyuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzksjz.2023-132>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滇东北会泽—者海断裂晚第四纪活动特征

The Quaternary activity characteristics of the Huize—Zhehai fault in the Northeast area of Yunnan

地震科学进展. 2019(7): 17–22

高密度电法在大盈江隐伏断裂探测中的应用

Application of high density resistivity method on exploring buried fault—Dayingjiang fault

地震科学进展. 2019(9): 20–25

郯庐断裂宿迁段地球化学气体特征分析

Analysis of geochemical gas characteristics in Suqian section of the Tanlu fault zone

地震科学进展. 2020(3): 30–35

阿尔金断裂中段乌尊确尔—索尔库里段长序列古地震记录

Long paleoseismic record on the Wuzunxiaoer—Xorkoli section of the central Altyn Tagh fault

地震科学进展. 2019(5): 47–49

塔尔湾—登登山—池家刺窝断裂分段性及最大潜在地震分析

Analysis of segmentation and maximum potential seismicity of Tarwan—Dengdengshan—Chijiaciwo fault

地震科学进展. 2021(7): 315–319

郯庐断裂带中南段断层形变累积率长期变化特征

Long-term variation of fault deformation rate in the central-south segment of the Tanlu fracture zone

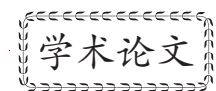
地震科学进展. 2018(12): 22–28



关注微信公众号，获得更多资讯信息

姚赞胜, 王爱国, 邵延秀, 等. 大青山山前断裂土右旗西段莲花山探槽揭露的古地震事件及年龄 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 34-44. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-132

Yao Y S, Wang A G, Shao Y X, et al. Paleoseismic events and ages revealed by the Lianhuashan trench in the western section of the Tuyouqi of the Daqingshan piedmont fault[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 34-44. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-132



大青山山前断裂土右旗西段莲花山探槽 揭露的古地震事件及年龄

姚赞胜^{1,2)} 王爱国^{1,2)*} 邵延秀³⁾ 刘兴旺^{1,2)} 张 波^{1,2)} 贾源源⁴⁾

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) 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000

3) 天津大学, 天津 300072

4) 甘肃省地震局, 甘肃兰州 730000

摘要 大青山山前断裂位于河套盆地北缘, 晚第四纪以来活动强烈, 前人对该段古地震特征做过较多研究, 但是因测年技术手段限制, 以及在同一断层剖面拥有较多能有效约束古地震事件的测年数据较少、且能揭露出较多古地震事件的剖面偏少。本文通过对大青山山前断裂土右旗西段莲花山东侧古地震探槽的开挖, 利用光释光年代学数据对古地震事件进行有效约束, 并结合前人在该段探槽的年代数据, 运用断层逐次限定法综合分析, 得出土右旗西段断裂距今约 11 500 年发生了 5 次古地震事件, 平均复发间隔 2 260 年。该段断裂 5 次古地震事件由新到老分别为: 1.28~1.42 ka、3.41~3.60 ka、4.08~5.01 ka、8.26~9.32 ka 和 10.70~11.30 ka。最新一次活动事件应该为公元 849 年地震。同时, 探槽揭露该段断层呈正断层性质, 倾角在 $\angle 58^{\circ} \sim \angle 77^{\circ}$ 之间。根据经验公式, 包头段、土右旗西段和土左旗西段的潜在发震能力分别在 $M_W 6.8 \sim 7.1$ 、 $M_W 6.8 \sim 7.1$ 和 $M_W 7.1 \sim 7.2$ 左右。本文经验公式得出的震级偏小, 可能存在级联破裂, 后期需进一步结合其他手段对大青山山前断裂西段的危险性进行综合评价。

关键词 大青山山前断裂; 土右旗西段; 莲花山; 古地震探槽; 复发间隔; 正断层

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2024)01-0034-11

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2023-132

Paleoseismic events and ages revealed by the Lianhuashan trench in the western section of the Tuyouqi of the Daqingshan piedmont fault

Yao Yunsheng^{1,2)}, Wang Aiguo^{1,2)}, Shao Yanxiu³⁾, Liu Xingwang^{1,2)}, Zhang Bo^{1,2)}, Jia Yuanyuan⁴⁾

1) Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Gansu Lanzhou 730000, China

收稿日期: 2023-09-23; 采用日期: 2023-11-21。

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2020IESLZ02), 自然科学基金项目(42272242), 甘肃省地震局创新团队专项(2019TD0101)和 2023 年陇原青年创新创业人才项目联合资助。

第一作者: 姚赞胜(1985-), 男, 助理研究员, 主要从事活动构造和释光年代学研究。E-mail: Yaoyun008@163.com。

* 通信作者: 王爱国(1972-), 男, 正高级工程师, 主要从事地震地质与地震工程方向研究。E-mail: waguo2008@163.com。



- 2) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Gansu Lanzhou 730000, China
- 3) Tianjin University, Tianjin 300072, China
- 4) Gansu Earthquake Agency, Gansu Lanzhou 730000, China

Abstract Daqingshan piedmont fault is located in the northern margin of Hetao basin and has been active strongly since the Late Quaternary. Previous researchers had conducted extensive research on the characteristics of paleoseismic in this area, but limited by the dating techniques and the fact that there were fewer data available on the same fault profile that can effectively constrain paleoseismic events, and fewer profiles that can reveal more paleoseismic events. This paper explores the excavation of an paleoseismic trench on the east side of Lianhuashan in the western section of Tuyouqi of the Daqingshan piedmont fault, using Optically Stimulated Luminescence data, and combineing with the age data of previous exploration trenches. By using the fault successive limit method, it is found that the western section of the Tuyouqi fault has experienced five paleoseismic events approximately 11 500 years ago, with an average recurrence interval of 2 260 years. The five paleoseismic events in this section of the fault, from new to old, are 1.28 to 1.42 ka, 3.41 to 3.60 ka, 4.08 to 5.01 ka, 8.26 to 9.32 ka, and 10.70 to 11.30 ka, respectively. The latest event of activity should be the earthquake of 849 AD. Meanwhile, the trench exploration revealed that the fault in this section exhibits a normal fault nature, with an inclination angle between 58 and 77 degrees. According to empirical formula, the potential seismic capacity of the Baotou section, the western section of Tuyouqi, and the western section of Tuzuoqi are around $M_W 6.8 \sim 7.1$, $M_W 6.8 \sim 7.1$ and $M_W 7.1 \sim 7.2$, respectively. The magnitude obtained by the empirical formula in this paper is relatively small, and there may be cascade rupture. In the later stage, it is necessary to conduct a comprehensive evaluation of the risk of the western section of Daqingshan piedmont fault combined with other means.

Keywords Daqingshan piedmont fault; western section of Tuyouqi; Lianhuashan; paleoseismic trench; recurrence interval; normal fault

0 引言

大青山山前断裂带沿大青山南麓展布, 北侧为阴山隆起带, 南临河套断陷盆地, 在西端与乌拉山山前断裂成右阶分布(图1)。大青山山前断裂位于北侧阴山断隆和河套断陷盆地之间, 作为新生代长期活动并控制着河套断陷盆地北侧的边界断裂, 是控制山前盆地与大青山隆起带形成的重要构造带, 为河套断裂系的重要组成部分, 第四纪晚期活动强烈^[1-3]。大青山山前断裂带晚更新世和全新世活动尤为显著, 形成一系列正断层和阶状正断层, 并在近代历史上发生过多地地震, 其中最近一次为1996年发生在包头市西的6.4级地震。

前人在大青山山前断裂开展过相关工作, 对其不同分段的活动特征有不同认识^[4-8]。部分学者通过对古地震探槽所揭露的特征将大青山山前断裂分为5段, 其中古地震事件发生最多的为包头至土默特右旗段, 从多个探槽揭露出该段发生过5次古地震事件, 但是在单一探槽中缺少能揭示出5次古地震事件发生的特征及证据, 同时缺乏较为理想的年代序列来约束古地震期次^[1-2, 4-5, 7-10]。马保起等^[5]把该段分

为4段, 认为中部雪海沟—土默特右旗段活动性较强, 而江娃利等^[6]通过对大青山山前断裂破裂带进行研究, 把大青山山前断裂以土左旗为界, 分为东西两段, 并对比现今中小地震震中分布得出, 全新世晚期大青山断裂活动在土左旗以西活动强烈, 同时推断西段为849年包头强震的地表地震断层。

此外, 包头市作为内蒙古自治区第二大城市, 是重要的经济中心和工业中心; 而包头位于大青山山前断裂地震活动断层之上, 历史记载, 曾在公元849年发生过 $(7.7 \pm 0.5) \sim 8$ 级的大地震^[11-14]。何仲太等^[8]对大青山山前断裂潜在震源区进行划分, 并认为包头段和土右旗西段、土左旗西段的潜在震级上限分别为7.5级、8级和8级。因此, 该地区的地震危险性一直是重点关注的区域之一。

鉴于以上前人研究结果, 本文选取在全新世活动较强烈的土右旗西段为重点研究区域。通过卫星遥感影像解译及野外地质调查, 在大青山山前断裂土右旗西段莲花山东侧开挖了古地震探槽, 并基于新的年代学数据和前人的古地震研究成果, 对该段古地震序列进行重新限定, 同时对大青山山前断裂西段(包头段—土左旗西段)未来地震危险性进行

探讨。

1 研究区概况

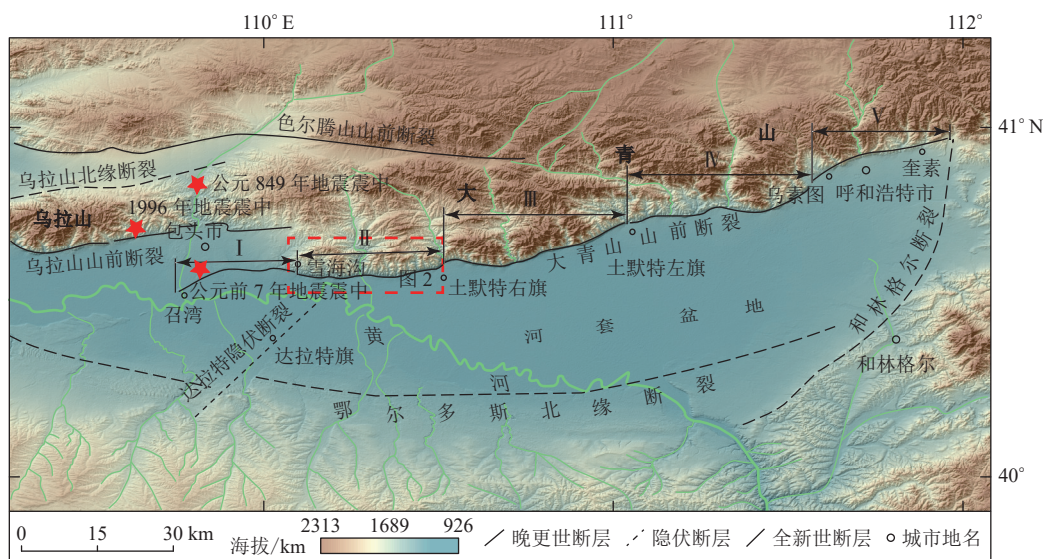
1.1 构造背景

大青山地区经历过复杂的构造变动,在中生代时期发生了强烈的板内造山作用^[15],阴山地块破裂解体,形成了中生代断陷盆地和大型逆冲推覆构造。到中、晚侏罗世末期的燕山运动,在受到南北向的挤压作用,断陷盆地消失,形成近东西向褶皱、断裂构造,以及北东东和北西西向的断裂带。燕山运动之后,奠定了本区基本构造格局,阴山地块固结为一稳定的地块,晚白垩世隆起遭受剥蚀。新生代时期,受

区域性北西、南东向主张应力场作用,阴山地块南侧破裂解体,形成河套断陷盆地,盆地北侧形成一系列断裂带,呈左阶斜列展布,断层面总体向南倾斜,山体间歇性抬升,遭受强烈的剥蚀作用,河套断陷盆地不断沉降,接收巨厚的沉积^[1,10]。

1.2 大青山山前断裂几何展布及分段特征

大青山山前断裂带西起包头市黄河南昭君坟,总体呈北东东向展布于大青山南麓,其中断裂西侧时而呈近东西走向,时而呈北西西向,在东侧呈北东东向,经九原区、东河区、土默特右旗、土默特左旗,一线延伸至呼和浩特以东,长约 240 km(图 1),倾向南,是典型的正断倾滑断裂。



I: 包头段; II: 土右旗西段; III: 土左旗西段; IV: 毕克齐段; V: 呼和浩特段

图 1 研究区区域构造图

Fig. 1 Tectonic map of the study area

前人对大青山断裂进行了不同的分段。李克等^[4]通过古地震时空的分布及断裂的几何特征、活动速率、活动时间及构造地貌等实际资料把该段划分为 5 段。江娃利等^[6]根据探槽所揭示的断层剖面分析,将该段在全新世晚期的活动分为东、西两段,西段自包头至土左旗,东段自毕克齐至奎素。冉永康等^[7]通过对古地震完整性的研究,把该段分为 5 段,自西向东分为:黄河—雪海沟段(包头段),长 37 km;雪海沟—土右旗段(土右旗西段),长 35 km;土右旗—土左旗段(土左旗西段),长 56 km;土左旗—乌素图段(毕克齐段),长 49 km 和乌素图—奎素段(呼和浩特段),长 46 km;后期何仲太等^[8]对前人的分段方法进行分析比较之后,更为确定认可该分段,本文沿用该

分段模式。前人在此分段基础上对大青山断裂潜在震源区进行了研究,得出雪海沟—土左旗段的震级上限为 8 级^[6]。鉴于该段的重要性,本文重点也选择在土右旗西段进行研究。

土右旗西段西起雪海沟,东至土右旗,全长约 35 km,该段断裂沿大青山南麓山前台地前缘展布,走向总体近东西向,是典型的正断倾滑型断裂,在最新地貌面上多处断错全新世地层(图 1)。断裂带北侧发育两级台地,大青山山前断裂带沿这两级台地展布。其中 I 级台地为洪积台地,是全新世时期断裂多次活动堆积后形成的^[6,10],I 级台地下部主要为上更新统湖积粉砂层和砂砾石层,上部为全新世早期的洪积砾石层及黄土批盖。II 级台地为湖积基座台地,

下部基座由太古界片麻岩、燕山期正长岩和侏罗系砂岩组成, 上部覆盖更新统粉砂层及砂砾石层^[4,10]。

2 研究方法

古地震学是一门揭露和研究地质记录过程中保存过去地震事件的科学, 记录了在史前和人类历史资料没有记录的地震事件^[16]。探槽技术作为古地震研究的一种直接而有效的手段, 是获取古地震位错量或古地震复发间隔等较为理想的资料^[17]。探槽开挖可以通过探槽剖面发现一些保留在地层剖面的古地震遗迹和标志, 进而分析揭露古地震事件的位错量以及其他变形特征等。同时, 探槽剖面中也能够提供和断层活动相关的年代关系。

古地震学要解决的核心问题是了解过去地震发生的时间、强度和重复间隔^[18]。而光释光测年技术是对晚第四纪碎屑沉积物最后一次曝光事件年龄直接测定的一种测年方法^[19-20]。释光测年技术经过30多年的发展, 特别是对全新世沉积物测年, 在几十至十万年尺度范围内已经获得了与独立年龄吻合较好的结果^[21]。目前, 国内外学者已成功将光释光测年应用到古地震测年中^[22-24]。

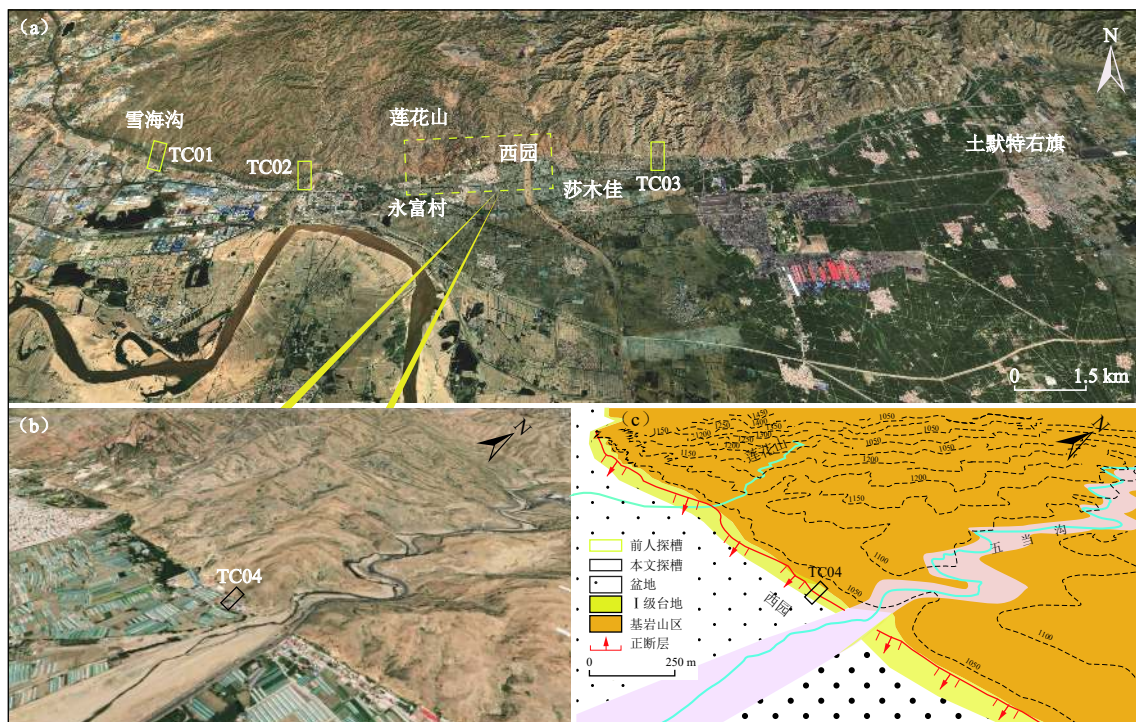
本文年代样品在采集时先剥去表层约30 cm厚

的物质, 然后选用直径约5 cm 不锈钢圆管对探槽中的沉积物进行避光采集, 保证样品在采集过程中未经曝光。样品的前处理采用常规操作流程^[25]: 先用湿筛法分选出63~90 μm 颗粒, 接着用10%的HCL去除样品中碳酸盐以及表面可能包裹的氧化物, 然后用30%的 H_2O_2 去除样品中的有机质, 再用配置好的2.58 g/cm³多钨酸钠重液对长石和石英进行分离, 最后对分离的石英样品进行40% H_2SiF_6 刻蚀样品, 除去样品中的长石和其他矿物。每次步骤后均用纯水清洗3遍, 最终得到63~90 μm 的粗颗粒石英进行测试。等效剂量(De)在Risø TL/OSL-DA-20-C/D型热/光释光仪上完成测试, 该辐照源为 β 源 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, 每秒辐照剂量率为 (0.129 ± 0.002) Gy。环境剂量率(Dose Rate)的测定采用中子活化分析法, 测定了U, Th, K放射性元素的含量。测试流程采用石英单片再生法^[26-27]。

3 结果

3.1 莲花山古地震探槽

莲花山位于包头市东河区砂尔沁镇永富村北侧(图2a), 属于大青山山前断裂带土右旗西段, 在莲花山东侧2 km左右的西园北侧山前发育T1堆积台



(a) 土右旗西段研究区(影像据 Google earth); (b) 莲花山地貌特征(影像据 Google earth); (c) 莲花山地貌特征解译图; TC01, TC02, TC03 为前人开挖探槽数据^[7,11,28], TC04 为本文开挖探槽的位置

图2 莲花山研究区位置

Fig. 2 Location of the Lianhuashan study area

地,主要由全新统砂砾石和黄土砾石层组成。在该段台地上发育断断续续的断层陡坎,且较缓。由于该段人为改造严重,断层陡坎不明显(图3)。但在野外踏勘过程中,发现在此台地冲沟处有断层剖面出露。由此,在此处清理出一条长约 25 m,深 4~7 m 的古地震探槽剖面(图4)。出露地层如下:

U1: 花岗岩基岩构造破碎蚀变带。基岩风化面呈褐红色,块状构造,构造破碎强烈,大部分沿节理面破碎,呈棱角状,在 U1 层上沉积了一层厚约 14 cm 的古土壤层;

U2: 浅褐红色的砾石层。分选性差,磨圆度差,呈角砾状。砾石粒径差别较大,在 2~20 cm 之间,中间部分夹粗砂层且有轻微的定向排列,在 U2 层上沉积了一层厚约 14 cm 的古土壤层;



图3 莲花山探槽地貌特征(红色箭头为断层经过位置)

Fig. 3 Geomorphological features of Lianhuashan trench

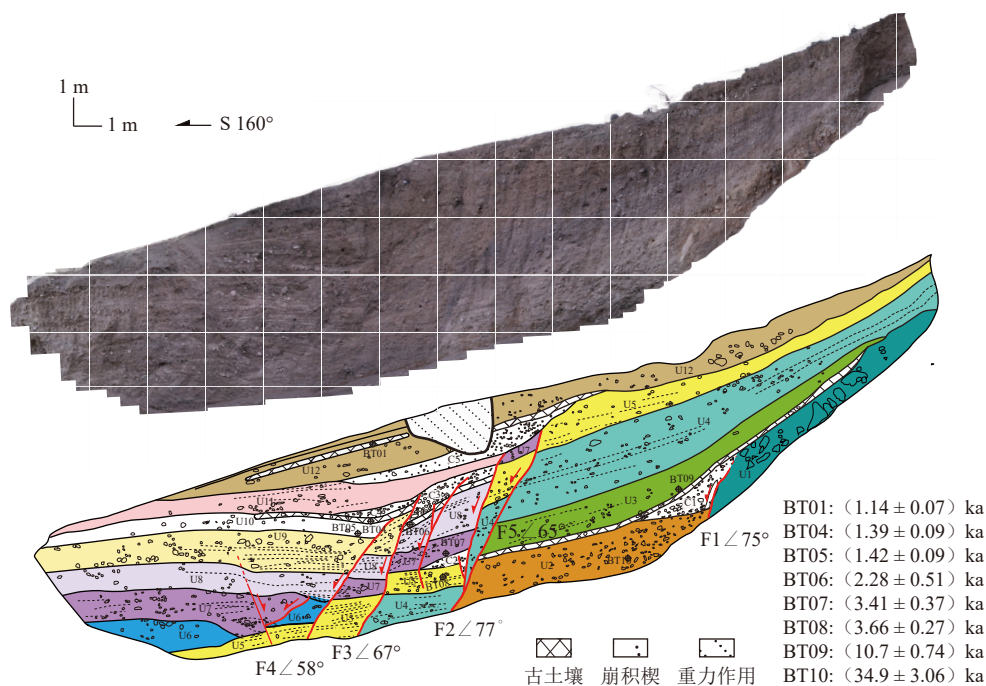


图4 莲花山探槽西壁拼接解译图

Fig. 4 Interpretation of the west wall of Lianhuashan trench

U3: 灰白色砂砾层,分选性差,含有<20 cm 的小砾石,磨圆度较差,棱角状,厚度 1 m 左右,部分砾石呈定向排列;

U4: 灰黑色砂砾层,夹有灰白色砂砾层,两层呈韵律分布,分选性差,水平层理分布,小砾石定向排列,磨圆度差,呈棱角状,砾石粒径<20 cm;

U5: 灰黄色砂砾层,分选性差,部分砂砾石定向排列,水平层理,磨圆度差,呈棱角状,砾石粒径<10 cm;

U6: 含砂砾石层,灰白色,分选性差,上部较

乱,砾石粒径<19 cm,砾石堆积较乱;

U7: 灰黑色砾石层,分选性差,底部含粗砂的砾石层,磨圆度差,棱角状分布,砾石粒径,由下往上,总体由细变粗砾序排列,并定向排列;

U8: 灰色含砾石砂层,分选性差,其中砾石磨圆度差,棱角状,中部含有砾石定向排列,厚度 82 cm 左右,U8 层上沉积了约 16 cm 厚的古土壤层;

U9: 灰白色含砂砾石层,较松散,分选性差,砾石粒径<30 cm,呈棱角状,砾石层及砂层部分可见定向排列,厚度 1.2 m 左右;

U10: 灰黄色含砂砾层, 较松散, 分选性差, 砾石呈棱角状, 厚 0.5 m, U10 层上沉积了约 16 cm 厚的古土壤层;

U11: 含砾砂层, 灰红色, 分选差, 砾石粒径 < 30 cm, 磨圆度差, 呈棱角状, 部分砾石定向排列, 厚 1 m 左右;

U12: 表层是含腐殖土的黄土砂层, 含灰黑色腐殖土, 松散。含砾石, 呈棱角状, 砾石粒径无分选, 杂乱堆积, 最厚处约 1.3 m, 在 U12 地层中间因重力作用而形成了一块下坠区域, 深约 1.6 m。

3.2 古地震探槽事件解译

从探槽剖面解译可以揭露出 5 次古地震事件 (图 4), 断层倾角在 $\angle 58^\circ \sim \angle 77^\circ$ 之间, 发生 5 次地震之后保留了 5 次事件所形成的崩积楔。

第 1 次事件 F1, 倾角 $\angle 75^\circ$ 。F1 断层断错了 U1 和 U2 断层, 并形成了崩积楔 C1, C1 由棱角状的砾石和砂层混合堆积而成。事件之后覆盖了一层厚约 14 cm 的古土壤层, 后期沉积了 U3、U4 和 U5 等较年轻的地层。

第 2 次事件 F2, 倾角 $\angle 77^\circ$ 。F2 断错了最新地层 U5 及更老的地层, 形成了崩积楔 C2。但是, 在该剖面显示断层 U4 地层的垂直错距为 2.1 m, 分析可能不是一次事件形成的错距, 在后文中有验证。在第 2 次事件之后, 在崩积楔 C2 之上沉积了 U7 地层, 同时在 U7 地层之上又沉积了一套新地层 U8。

第 3 次事件 F3, 倾角 $\angle 67^\circ$ 。F3 断错了 U8 地层, 垂直错距为 0.96 m, 从而形成崩积楔 C3。同时, 该次事件伴有次级断裂断错了 C3 下层的古土壤层, 后期形成了 U9 和 U10 地层。

第 4 次事件 F4, 倾角 $\angle 58^\circ$ 。F4 断错了 U10 以下更老的地层, 形成了崩积楔 C4, 从断错的 U10 地层以上古土壤及 U9 地层垂直错距为 0.76 m。事件之后发育了地层 U11。

第 5 次事件 F5, 倾角 $\angle 65^\circ$ 。F5 在 F2 断裂带上又发生了一次活动, 形成了崩积楔 C5, 两次事件断错距累积约 2.1 m。同时, 分析崩积楔 C2 的第 1 次活动事件后形成的楔体主要来源于自由面所在的地层中, 而第 2 次地震事件形成了一个基底张性裂隙带, 早期形成的崩积楔被破坏, 部分物质掉入裂隙内。因此, 确定这是两次地震活动事件的标志物。

4 讨论

4.1 土右旗西段古地震特征

土右旗西段位于包头段东侧, 紧邻包头市区。始

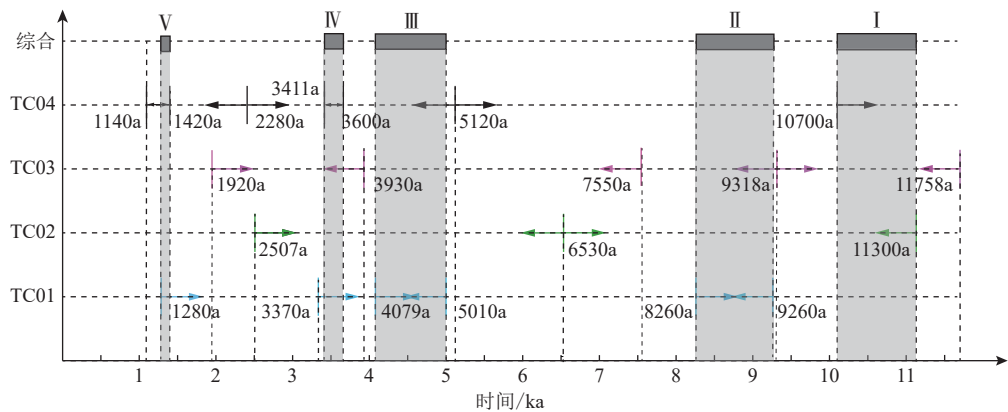
新世以来, 大青山山前断裂新生代活动强烈。史载公元 849 年 10 月, 内蒙河套地区发生了大地震, 前人对大青山山前断裂活动特征做了一些研究。国家地震局^[1]和李彦宝等^[28]在土右旗西段莎木佳山前 T1 级台地上开挖的探槽剖面均揭露出了 4 次活动事件。但是国家地震局^[1]从测量 3 个碳同位素年代数据的约束结果中, 仅仅较为粗略地限定了 4 次事件。第 1 次事件限定在 (11758 ± 94) a 与 (9318 ± 78) a 之间; 第 2 次事件应该是晚于 (9318 ± 78) a; 第 3 次事件在距今 (3930 ± 95) a 之后; 第 4 次事件只是据充填楔的标志来判识。李彦宝等^[28]后来也对莎木佳点开挖了探槽, 对碳同位素再校正后的结果表示, 最新一次事件发生在 1920 BC 至今, 在 7500~1500 BC 之间发生了两次事件, 7500 BC 之前发生一次事件。李克等^[4]和聂宗笙^[2]用在大青山西段, 包头市以东的铝厂北、阿善沟门、永富村和莎木佳等地的地层断错层中所采的年代数据来限定地震事件的时间。冉勇康等^[7]对该段古地震事件进行过统计和划分, 认为土右旗西段古地震活动历史是较为完整的, 但是约束古地震事件的年代数据相对欠缺。

本文探槽中揭露出了 5 次古地震事件, 针对 5 次古地震事件, 分别在不同层位采集了 8 个光释光样品, 其年代结果见表 1。该样品的年代结果对这 5 次事件有较好的约束, 其中最老的一次事件发生在地层 U2 之后, 崩积楔 C1 之后形成的古土壤之前, 因此, 样品 BT09 和 BT10 约束了该事件发生在 $(10.7 \pm 0.74) \sim (34.9 \pm 3.06)$ ka 之间。第 2 次事件在崩积楔前后地层都有采样品 BT07 和 BT08, 限定在 $(3.41 \pm 0.37) \sim (3.66 \pm 0.27)$ ka 之间。第 3 次事件发生后形成崩积楔 C3, 并断错了崩积楔之前沉积的古土壤层, 同时, 在之后沉积的地层 U10 中采到样品 BT05, 古土壤层中采到样品 BT06, 把该次事件限定在 $(2.28 \pm 0.51) \sim (1.42 \pm 0.09)$ ka 之间。第 4 次事件同样和第 3 次类似, 在崩积楔 C4 之前沉积的古土壤中采到样品 BT04, 把第 4 次古地震事件约束在 (1.39 ± 0.09) ka 之后。第 5 次事件发生后沉积了 U12 地层, 在该层中采到样品 BT01, 结合前人研究成果最终把第 5 次事件限定在 1140~1280 a 之间。同时, 综合前人在土右旗西段开挖探槽中年代学数据, 并利用古地震逐次限定法 (图 5), 对土右旗西段断层活动事件进行有效限定, 得出该 5 次事件由老到新年代依次为: 11.30~10.70 ka、9.32~8.26 ka、5.01~4.08 ka、3.60~3.41 ka、1.42~1.28 ka。

前人通过对探槽和地貌的研究表明, 大青山山

表 1 莲花山探槽光释光年代数据
Table 1 Optically Stimulated Luminescence age data of Lianhuashan trench

样品编号	深度/m	粒径/ μm	含水量/%	等效剂量/Gy	$U/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$\text{Th}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	K/%	剂量率/%	年代/ka
BT01	0.47	63~90	0.85	2.58 ± 0.07	0.88 ± 0.20	5.52 ± 0.50	1.66 ± 0.04	2.27 ± 0.07	1.14 ± 0.07
BT04	3.02	63~90	0.95	3.71 ± 0.16	1.18 ± 0.30	7.23 ± 0.60	2.01 ± 0.40	2.67 ± 0.12	1.39 ± 0.09
BT05	3.50	63~90	0.93	4.24 ± 0.19	0.97 ± 0.20	5.35 ± 0.50	2.34 ± 0.40	2.98 ± 0.13	1.42 ± 0.09
BT06	4.10	63~90	0.13	6.36 ± 1.40	0.4 ± 0.20	2.73 ± 0.40	2.66 ± 0.40	2.79 ± 0.19	2.28 ± 0.51
BT07	5.50	63~90	0.18	9.48 ± 0.94	0.48 ± 0.20	3.52 ± 0.40	2.75 ± 0.40	2.78 ± 0.12	3.41 ± 0.37
BT08	6.30	63~90	0.10	10.65 ± 0.60	1.14 ± 0.20	5.43 ± 0.40	2.24 ± 0.40	2.91 ± 0.13	3.66 ± 0.27
BT09	4.80	63~90	0.10	29.15 ± 1.43	0.83 ± 0.30	4.13 ± 0.50	2.59 ± 0.40	2.72 ± 0.12	10.7 ± 0.74
BT10	7.10	63~90	0.10	109.69 ± 7.91	0.97 ± 0.20	5.35 ± 0.50	2.34 ± 0.40	3.14 ± 0.14	34.9 ± 3.06



图中 TC04 黑色标识为本文数据, TC01、TC02、TC03 数据引自 [5, 10, 28]

图 5 大青山山前断裂土右旗西段莲花山探槽古地震事件约束

Fig. 5 Constraints of paleoseismic events in Lianhuashan trench in the west Tuyouqi banner of Daqingshan piedmont fault

前断裂共发生了约 22 次古地震事件, 其中全新世有 14 次, 每一段古地震事件都不同。该段总体从西段断错地貌来看, 断裂活动比较明显, 而在土右旗西段自 1.1 万年以来, 共发生了 5 次古地震事件, 平均重复间隔为 (2.29 ± 0.36) ka^[7]。Peng 等^[29]统计了前人开挖探槽中的年代数据, 大青山山前断裂在 15000 年以来有 6 次事件发生, 复发间隔为 $(2700 + 340)$ a。本文结合前人年代数据用断层逐次限定法综合分析, 得出左右旗西段断裂距今约 11500 年以来发生了 5 次古地震事件, 平均时间间隔为 2260 年。

聂宗笙^[2]在铝厂北 I 级台地前缘位置开挖探槽 (图 2a, TC01) 中得出最新的一次活动事件断错地层的年代为 (1.28 ± 0.07) ka, 断距为 0.5 m, 并认为这次事件为公元 849 年地震所致。在本文所开挖探槽中, 最新的一次事件发生后形成崩积楔, 年代数据把这次事件约束在 1.28~1.42 ka 之间, 可能就是公元 849 年的那次地震, 这与人研究成果吻合^[29], 并缩小了最近一次古地震事件约束时限。

同时, 聂宗笙等^[9]在阿善沟门村北 I 级台地陡坎处开挖探槽 (图 2a, TC02), 根据断错地层的年龄判定此处 0.28 m 的陡坎是 849 年地震所致, 累积断距大于 1.27 m。结合本次开挖探槽最新一次事件的断距和第 2 次事件累积位错为 2.1 m, 单次地震事件位错约在 1 m 左右, 这与人研究基本相符。

此外, 河套断陷带规模大、构造活动比较强烈^[1], 其北界断裂自西向东主要包括狼山山前断裂、色尔腾山山前断裂、乌拉山山前断裂、大青山山前断裂, 各个断裂均表现为正断层和阶状正断层。据 Peng 等^[29]最新对前人在以上各个断裂上所开挖探槽中的年代数据进行收集和重新统计。在大约 15000 年内, 以上各个断裂依次发生了 6 次、7 次、8 次和 6 次古地震, 其重复周期分别为 (2290 ± 580) a、 (1790 ± 820) a、 (1680 ± 910) a 和 (2700 ± 340) a, 本文为 $2260 \pm 840)$ a。结合前人研究成果, 根据单段和多段地震地表破裂和古地震事件的数据, 狼山山前断裂和大青山山前断裂重复周期两者更为接近, 相对应公元

849 年和公元前 7 年的地震。在危险性方面, Peng 等^[29]对数据统计显示,根据地震重复周期表明,河套断陷带主要断裂向西和向东方向呈不同类型丛集传播,自公元 849 年地震以来,色尔腾山山前断裂似乎没有发生较大地震,因此应该考虑该段未来会发生较大地震的风险。

4.2 大青山西段地震危险性评价及影响

前人在大青山山前断裂西段开展过相关古地震研究(表 2),其中聂宗笙等^[9]对包头段的探槽进行了

古地震研究,得出包头段自 11.3 ka 以来共发生 5 次事件,其中最新一次事件发生在 2.21~1.28 ka 之间,认为是 849 年发生的强震,平均复发间隔为 1.37 ka;土右旗西段经过本文及前人开挖探槽的结果显示出,共发生过 5 次古地震事件,其中最近一次事件位于 1.14 ka 之前,为 849 年地震所致;冉勇康等^[7]对土左旗西段进行总结得出,该段距今 1.1 万年以来,发生 4 次古地震事件,平均复发间隔时间为 2.95 ka。何仲太等^[8]对大青山西段研究得出该段震级上限为 8 级。

表 2 距今约 1.2 万年以来大青山山前断裂西段古地震事件(部分数据来自^[7,9])
Table 2 Paleoseismic events in the western section of the Daqingshan piedmont fault since approximately 12 000 years ago^[7,9]

段落	事件	事件区域 年龄/ka	事件年龄/ka	与上次事件的 间隔/ka	平均复发 间隔/ka	数据来源
包头段	1	11.30~5.53	6.53 ± 0.65			
	2	5.53~4.08	4.61 ± 0.09	1.92		
	3	3.84~3.37	3.84 ± 0.10	0.77	1.37 ± 0.12	聂宗笙等 ^[9]
	4	2.51~2.01	2.01 ± 0.16	1.83		
	5	2.21~1.28	1.28 ± 0.07	0.93		
土右旗西段	1	11.30~10.75	10.70 ± 0.07			
	2	9.32~8.26	8.76 ± 0.05	1.94		
	3	5.01~4.08	4.55 ± 0.45	4.22	2.26 ± 0.84	部分来源冉勇康等 ^[7] ; 李彦宝等 ^[28]
	4	3.60~3.41	3.65 ± 0.28	0.90		
	5	1.42~1.28	> 1.14 ± 0.07	1.99		
土左旗西段	1	> 10.79	> 10.79			
	2	8.84~7.69	8.27 ± 0.58	> 2.52		
	3	7.29~5.51	6.40 ± 0.89	1.871	2.95 ± 0.56	冉勇康等 ^[7]
	4	2.01~1.88	1947 ± 0.07	4.449		

尽管有很多利用原始地震变形资料来推断古地震时间和震级,但是,前人还是习惯用板内断裂迹线上确认的地表破裂带长度(SRL)和最大位错量来计算古地震的震级^[30-31]。假如大青山断裂西段包头段、土右旗西段和土左旗西段发生破裂,根据地表破裂带长度(SRL)与震级关系的经验公式^[10]: $M_W=5.08+1.16 \times \log(SRL)$ 推算的震级分别为 6.8 级、6.8 级和 7.1 级。同时根据何仲太^[32]获得包头段和土右旗西段最大平均同震位移为 1.6 m,土左旗西段最大平均同震位移为 2.4 m,利用最大同震位移(AD)与震级关系经验公式^[10]: $M_W=6.93+0.82 \times \log(AD)$ 推算包头段、土右旗西段和土左旗西段的震级分别为 7.1 级、7.1 级和 7.2 级(表 3),包头段、土右旗西段和土左旗西段的震级范围分别为 M_W 6.8~7.1、 M_W 6.8~7.1 和

M_W 7.1~7.2。
结合前人文章统计资料(表 1 和表 2),大青山山前断裂西段包头段古地震平均复发周期相对较短,土右旗西段、土左旗西段断裂古地震平均复发周期较长,同时包头段最晚的地震的离逝时间较长,而土右旗西段和土左旗西段离逝时间较短,从而判断包头段未来发生地震的概率大于土右旗西段和土左旗西段。另外,本文讨论的古地震包头段、土右旗西段和土左旗西段的震级范围分别为 M_W 6.8~7.1、 M_W 6.8~7.1 和 M_W 7.1~7.2,对比何仲太等^[8]对包头段破裂长度与震级之间的特征,判定地震的震级为 6.6 级,震级上限为 7.5 级,而土右旗西段和土左旗西段潜在震级上限为 8 级。本文经验公式得出的震级偏小,作者认为大青山山前断裂相邻段落可能存

表 3 大青山山前断裂西段各段潜在震级估值(平均同震位移数据来自^[32])
Table 3 Estimation of potential seismic magnitudes in the western section of Daqingshan piedmont fault^[32]

段落	分段长度/km	平均同震 位移/m	上次事件离逝 时间/ka	平均复发 间隔/ka	潜在地震最大震级 估值(依据SRL)	潜在地震最大震级 估值(依据AD)
包头段	37	1.6±0.28	1.28	1.37±0.12	6.8	7.1
土右旗西段	35	1.6±0.27	1.14	2.26±0.84	6.8	7.1
土左旗西段	56	2.4±0.32	1.88	2.95±0.56	7.1	7.2

在级联破裂的现象,尤其是土右西段和土左西段,多次古地震事件的时间相近,存在级联破裂,相应的震级会高于独段破裂的震级,故得出的潜在震级范围总体是偏小的。综合考虑,虽然该段潜在震级是偏小的,但是能产生地表破裂的大震,各段断裂也存在发生 6~7 级中强地震的能力,如公元前 7 年内蒙包头市地区 8 级地震以及 849 年 8 级地震^[10, 14],对城市造成严重的破坏。

从文中得出该区的古地震数据显示,该区具有类似丛集活动性,丛集期之间的间隔较长,而丛集期内的间隔较短。这可能是大青山山前各段断裂各自发生特征地震时破裂到相邻的各段,致使其他段断层上的地震发生,不同段落古地震活动叠加,这些地震都集中在一个相对较短的区间内,每次丛集地震发生后伴随的是长时间的构造平静。鉴于此,在评价该区地震危险性评价时,平均复发间隔只作为一个参考。因此,未来有必要结合其他多手段对大青山山前断裂西段的危险性进行综合评价,为该地区防震减灾工作的制定提供更为科学的依据。

5 结论

(1)通过对大青山断裂土右旗西段莲花山东侧进行卫星影像解译、野外现场踏勘和探槽的开挖以及光释光年代学数据对古地震事件的约束,认为大青

山山前断裂土右旗西段在全新世以来断裂有过 5 次古地震事件。结合前人研究成果,运用断层逐次限定法综合分析,得出土右旗西段断裂距今约 11500 年以来发生 5 次古地震事件,平均时间间隔为 2260 年。该段断裂发生过 5 次古地震事件,第 1 次发生在 11.30~10.70 ka 之间;第 2 次发生在 9.32~8.26 ka 之间;第 3 次发生在 5.01~4.08 ka 之间;第 4 次发生在 3.60~3.41 ka 之间;第 5 次事件也是最新的一次事件发生在 1.42~1.28 ka 之间,并且这次事件就是公元 849 年地震。同时,探槽揭露该段断层呈正断层性质,倾角在 $\angle 58^{\circ} \sim \angle 77^{\circ}$ 之间,每次地震的垂直位移平均约在 0.76~1.05 m 之间。

(2)根据经验公式,包头段、土右旗西段和土左旗西段未来的潜在发震能力分别为 $M_w6.8 \sim 7.1$ 、 $M_w6.8 \sim 7.1$ 和 $M_w7.1 \sim 7.2$ 左右,经验公式所计算的震级是低估的,但是断裂可能存在在该震级条件下,将对包头等周缘地区产生较大危害,未来对该地区的地震危险性值得持续关注,但是需要多方法、多手段综合开展评价研究工作。

致谢

衷心感谢审稿专家给本文提出的建设性意见和建议。

参考文献

[1] 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社, 1988: 251-285
The Research Group of *Peripheral Active Fault System Around the Ordos* by State Seismological Bureau. *Peripheral active fault system around the Ordos*[M]. Beijing: Seismological Press, 1988: 251-285

[2] 聂宗笙. 内蒙古大青山山前断裂带西段全新世古地震的大探槽研究 [M]//活动断裂研究 (5): 理论与应用. 北京: 地震出版社, 1996: 125-135
Nie Z S. Study on Holocene paleoearthquakes along the western segment of the Daqingshan piedmont fault[M]//Research on active fault (5): Theory and application. Beijing: Seismological Press, 1996: 125-135

[3] 刘群. 内蒙古大青山山前活动断裂带构造变形特征 [J]. 世界地质, 2012, 31(1): 113-119
Liu Q. Structural deformation characteristics of Daqingshan piedmont fault in Inner Mongolia[J]. *Global Geology*, 2012, 31(1): 113-119

- [4] 李克, 吴卫民, 杨发, 等. 大青山山前活动断裂分段性研究 [M]//中国地震学会地震地质专业委员会. 中国活动断层研究. 北京: 地震出版社, 1994: 102-113
Li K, Wu W M, Yang F, et al. A study on segmentation of the Daqingshan frontal active fault [M]//Professional Committee of Seismic Geology of Seismological Society of China. Research on active faults in China. Beijing: Seismological Press, 1994: 102-113
- [5] 马保起, 李克, 吴卫民. 大青山山前断裂活动的分段性研究 [M]//地壳构造与地壳应力文集 (13). 北京: 地震出版社, 2001: 53-60
Ma B Q, Li K, Wu W M. A study on segmentation of the Daqingshan frontal active fault [M]// Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics (13). Beijing: Seismological Press, 2001: 53-60
- [6] 江娃利, 肖振敏, 王焕贞, 等. 内蒙古大青山山前活动断裂带的地震破裂分段特征 [J]. 地震地质, 2001, 23(1): 24-34
Jiang W L, Xiao Z M, Wang H Z, et al. Segmentation character of seismic surface ruptures of the piedmont active fault of Mt. Daqingshan, Inner Mongolia [J]. Seismology and Geology, 2001, 23(1): 24-34
- [7] 冉勇康, 张培震, 陈立春. 河套断陷带大青山山前断裂晚第四纪古地震完整性研究 [J]. 地学前缘, 2003, 10(增刊 1): 207-216
Ran Y K, Zhang P Z, Chen L C. Research on the completeness of paleoseismic activity history since Late Quaternary along the Daqingshan piedmont fault in Hetao depression zone, North China [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(S1): 207-216
- [8] 何仲太, 马保起, 卢海峰. 大青山山前活动断裂带分段与潜在震源区划分 [J]. 地震地质, 2007, 29(4): 765-775
He Z T, Ma B Q, Lu H F. Active fault segmentation and the identification of potential seismic zones along the Daqingshan piedmont fault [J]. Seismology and Geology, 2007, 29(4): 765-775
- [9] 聂宗笙, 李克, 陈建. 大青山山前断裂带中、晚全新世活动的发现 [J]. 地质科学, 1986(3): 217-220
Nie Z S, Li K, Chen J. The discovery of the Middle and Late Holocene activity of the front zone of Daqingshan Mt. [J]. Scientia Geologica Sinica, 1986(3): 217-220
- [10] 吴卫民, 李克, 马保起, 等. 大青山山前断裂带大型组合探槽的全新世古地震研究 [M]//活动断裂研究 (4): 理论与应用. 北京: 地震出版社, 1995: 123-132
Wu W M, Li K, Ma B Q, et al. Research on Holocene paleoearthquakes along the piedmont fault of Mt. Daqingshan [M]//Research on active fault (4): Theory and application. Beijing: Seismological Press, 1995: 123-132
- [11] 聂宗笙, 任云, 刘志明, 等. 内蒙古包头市区大青山山前断裂地震活动断层初步研究 [J]. 现代地质, 2011, 25(5): 938-957
Nie Z S, Ren Y, Liu Z M, et al. Preliminary study on seismic active faults of the Daqingshan frontal fault in Baotou City, Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2011, 25(5): 938-957
- [12] 中央地震工作小组办公室. 中国地震目录 [M]. 北京: 科学出版社, 1971
Office of the Central Earthquake Working Group. China earthquake catalogue [M]. Beijing: China Science Publishing, 1971
- [13] 顾功叙. 中国地震目录 (公元前 1831—公元 1969 年) [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 9-98
Gu G X. Earthquakes catalogue of China (1831 BC—1969 AD) [M]. Beijing: Science Press, 1983: 9-98
- [14] 聂宗笙. 公元前 7 年内蒙古包头地区 8 级地震的初步研究 [J]. 地震学报, 2013, 35(4): 584-603
Nie Z S. Preliminary investigation on the historical M_8 earthquake occurred in 7 BC at Baotou, Inner Mongolia [J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(4): 584-603
- [15] 刘正宏, 徐仲元, 杨振升. 大青山逆冲推覆体系含义及地质特征 [J]. 世界地质, 2001, 20(3): 224-229
Liu Z H, Xu Z Y, Yang Z S. Daqingshan thrust system signification and its geological characteristics [J]. World Geology, 2001, 20(3): 224-229
- [16] 冉勇康, 邓起东. 古地震学研究的历史、现状和发展趋势 [J]. 科学通报, 1999, 44(1): 12-20
Ran Y K, Deng Q D. History, current situation, and development trends of paleoseismic research [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(1): 12-20
- [17] Sieh K E. A review of geological evidence for recurrence times of large earthquakes [M]. AGU, 1981: 182-203
- [18] 冉勇康, 王虎, 杨会丽, 等. 中国大陆古地震研究的关键技术与案例解析 (4)——古地震定年技术的样品采集和事件年龄分析 [J]. 地震地质, 2014, 36(4): 939-955
Ran Y K, Wang H, Yang H L, et al. Key techniques and several cases analysis in paleoseismic studies in China's mainland (4): Sampling and event analysis of paleoseismic dating methods [J]. Seismology and Geology, 2014, 36(4): 939-955
- [19] Aitken M J. An introduction to optical dating [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998: 7-18
- [20] Rhodes E J. Optically stimulated luminescence dating of sediments over the past 200 000 years [J]. Annual Review of Earth and Planetary

- [Sciences](#), 2011, 39(1): 461-488
- [21] Murray A S, Olley J M. Precision and accuracy in the optical stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: A status review[J]. *Geochronometria*, 2002, 21: 1-16
- [22] Banerjee D, Murry A S, Bøtter-Jensen L, et al. Equivalent dose estimation using a single aliquot of polymineral fine grains[J]. [Radiation Measurements](#), 2001, 33(1): 73-94
- [23] Fattahi M, Walker R, Hollingsworth J, et al. Holocene slip-rate on the Sabzevar thrust fault, NE Iran, determined using optically stimulated luminescence (OSL)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245(3/4): 673-684
- [24] Porat N, Duller G A T, Rivka A, et al. Recent faulting in the southern Arava, Dead Sea Transform: Evidence from single grain luminescence dating[J]. *Quaternary International*, 2009, 199(1/2): 34-44
- [25] 赖忠平, 欧先交. 光释光测年基本流程[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 683-693
- Lai Z P, Ou X J. Basic procedures of optically stimulated luminescence (OSL) dating[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(5): 683-693
- [26] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol[J]. [Radiation Measurements](#), 2000, 32(1): 57-73
- [27] Murray A S, Wintle A G. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability[J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37(4/5): 377-381
- [28] 李彦宝, 冉勇康, 陈立春, 等. 河套断陷带主要活动断裂最新地表破裂事件与历史大地震[J]. *地震地质*, 2015, 37(1): 110-125
- Li Y B, Ran Y K, Chen L C, et al. The latest surface rupture events on the major active faults and great historical earthquakes in Hetao fault-depression zone[J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(1): 110-125
- [29] Peng H, Zhang D L, Zheng W J, et al. Recurrence and clustering of large earthquakes along the northern boundary of Ordos block: Constraining paleoearthquakes by an improved multiple trench constraining method[J]. *Lithosphere*, 2022(1): 6823155
- [30] Bonilla M G, Mark R K, Lienkaemper J J. Statistical relation among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984, 74: 2379-2411
- [31] Coppersmith K J, Youngs R R. Data needs for probabilistic fault displacement hazard analysis[J]. *Journal of Geodynamics*, 2000, 29(3/5): 329-343
- [32] 何仲太. 大青山山前活动断裂带的分段地震危险性概率评估[M]//地壳构造与地壳应力文集(19). 北京: 地震出版社, 2007: 35-41
- He Z T. Occurrence probability of characteristic earthquakes on the segments of daqingshan piedmont fault[M]//Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics (19). Beijing: Seismological Press, 2007: 35-41