

西秦岭夏河断裂的西延活动特征

张波, 李启雷, 王爱国, 何文贵, 姚胜, 朱俊文, 蔡艺萌, 冯紫微

The western extension of Xiahe fault in West Qinling Discussion on seismogenic structure of Qinghai Zeku M_s 4.9 earthquake in 2017

Zhang Bo, Li Qilei, Wang Aiguo, He Wengui, Yao Yunsheng, Zhu Junwen, Cai Yimeng, and Feng Ziwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-137>

您可能感兴趣的其他文章

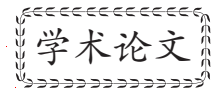
Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张波, 李启雷, 王爱国, 等. 西秦岭夏河断裂的西延活动特征——兼论 2017 年青海泽库 $M_S4.9$ 地震成因 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 25-33. doi:10.19987/j.dzqxjz.2023-137

Zhang B, Li Q L, Wang A G, et al. The western extension of Xiahe fault in West Qinling: Discussion on seismogenic structure of Qinghai Zeku $M_S4.9$ earthquake in 2017[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 25-33. doi:10.19987/j.dzqxjz.2023-137



西秦岭夏河断裂的西延活动特征 ——兼论 2017 年青海泽库 $M_S4.9$ 地震成因

张波^{1,3)} 李启雷^{2)*} 王爱国^{1,3)} 何文贵¹⁾ 姚赉胜^{1,3)}
朱俊文¹⁾ 蔡艺萌¹⁾ 冯紫微³⁾

- 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) 青海省地震局, 青海西宁 810001
- 3) 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000

摘要 2017 年青海泽库 $M_S4.9$ 地震的震中位于走向南北的日月山断裂附近, 而小震优势排列和震源机制解却和日月山断裂矛盾。本文通过活动断裂遥感解译和野外考察, 在震中附近发现了 EW 走向和 NW 走向的断裂, 它们属于夏河断裂西端构造, EW 走向断裂倾向 N, 其运动性质兼具左旋走滑和逆冲。同时, 我们使用双差定位方法对泽库 $M_S4.9$ 地震开展重定位, 发现小震排列也呈 NW 和 EW 两段, 横跨 EW 走向段的小震指示倾向 N 的断层面。通过对比夏河断裂西端构造和地震排列特征, 我们发现夏河断裂的三维几何和运动性质与小震排列和震源机制具有良好的对应关系。因此, 我们推测夏河断裂是泽库 $M_S4.9$ 地震的发震断裂。结合区域构造背景分析, 我们认为夏河断裂可能是西秦岭北缘断裂西端帚状散开的分支之一, 此次地震可能代表西秦岭北缘断裂西端的构造活动, 同时也可能受到日月山断裂右旋剪切的影响。本文研究结果进一步凸显了鉴定构造活跃区次级先存断裂新活动特征、完善区域活动构造图像的意义。

关键词 2017 年青海泽库 $M_S4.9$ 地震; 发震构造; 夏河断裂; 西秦岭北缘断裂; 日月山断裂

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2024)01-0025-09

doi: 10.19987/j.dzqxjz.2023-137

收稿日期: 2023-09-29; 采用日期: 2023-12-04。

基金项目: 地震科技星火计划(XH23040A), 中国国家留学基金项目(202004190032), 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2020IESLZ02)和甘肃省地震局创新团队项目(2019TD0101)联合资助。

第一作者: 张波(1986-), 男, 副研究员, 主要从事地震构造方面的研究。E-mail: bzhang86@163.com。

* 通信作者: 李启雷(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事地震活动性分析工作。E-mail: 27263836@qq.com。



The western extension of Xiahe fault in West Qinling: Discussion on seismogenic structure of Qinghai Zeku $M_S4.9$ earthquake in 2017

Zhang Bo^{1,3)}, Li Qilei²⁾, Wang Aiguo^{1,3)}, He Wengui¹⁾, Yao Yunsheng^{1,3)},
Zhu Junwen¹⁾, Cai Yimeng¹⁾, Feng Ziwei³⁾

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

2) Qinghai Earthquake Agency, Qinghai Xining 810001, China

3) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Gansu Lanzhou 730000, China

Abstract The epicenter of the 2017 Qinghai Zeku $M_S4.9$ earthquake was located near the SN-striking Riyueshan fault, while the focal mechanism solutions and the dominant arrangement of seismic sequence are inconsistent with the Riyueshan fault. In this paper, we have discovered EW- and NW-trending faults near the epicenter, by methods of remote sensing interpretation and field investigation. These faults are western terminal structures of Xiahe fault, in which the EW-trending faults are north-dipping and associated with kinematics including both left-lateral and vertical slip. Meanwhile, we use double differential positioning to relocate seismic sequences of Zeku $M_S4.9$ earthquake. Results show that seismic arrangements consist of two segments striking NW and EW. The seismic profile crossing EW-striking segment indicates a north-dipping fault plane. Well consistence is found between Xiahe fault and seismic arrangements of Zeku $M_S4.9$ earthquake, which leads us to the speculation that the seismogenic fault of Zeku earthquake is Xiahe fault. From a regional perspective, the Xiahe fault might be one strand of dissipating faults in the western end of the West Qinling fault, and the Zeku $M_S4.9$ earthquake represents tectonic activity of the western end of the West Qinling fault. Besides, the northwestward turn of fault striking and reverse slipping of Xiahe fault might also be attributed to the right-lateral shearing effects of Riyueshan fault. Results of this paper highlight the significance of improving active fault traces, especially for the secondary or pre-existing faults in a tectonic active area.

Keywords Qinghai Zeku $M_S4.9$ earthquake in 2017; seismogenic structure; Xiahe fault; West Qinling fault; Riyueshan fault

0 引言

对中强地震的发震构造和机制开展研究,有助于深入认识区域地震构造模型和地球动力背景,更好地服务于防震减灾工作。2017年12月15日青海省黄南藏族自治州泽库县(35.13°N, 101.87°E)发生4.9级地震(下文简称,泽库 $M_S4.9$ 地震),截至2021年10月30日,泽库 $M_S4.9$ 地震序列共发生可定位余震159次,其中1级以上地震118次,最大余震为2017年12月15日20时38分的 $M_S3.9$ 地震。由于震中附近人烟稀少,前人对该地震的关注较少。李启雷等^[1]对泽库 $M_S4.9$ 地震序列进行研究,认为泽库 $M_S4.9$ 地震的震源机制为左旋走滑,发震断层节面为走向NWW,倾角53°。震中附近的已知活动断裂仅有日月山断裂南段,但前人得到的震源机制和发震节面^[1]与日月山断裂南段矛盾。因此,一个重要的问题是泽库 $M_S4.9$ 地震是否存在明确的地震断裂?

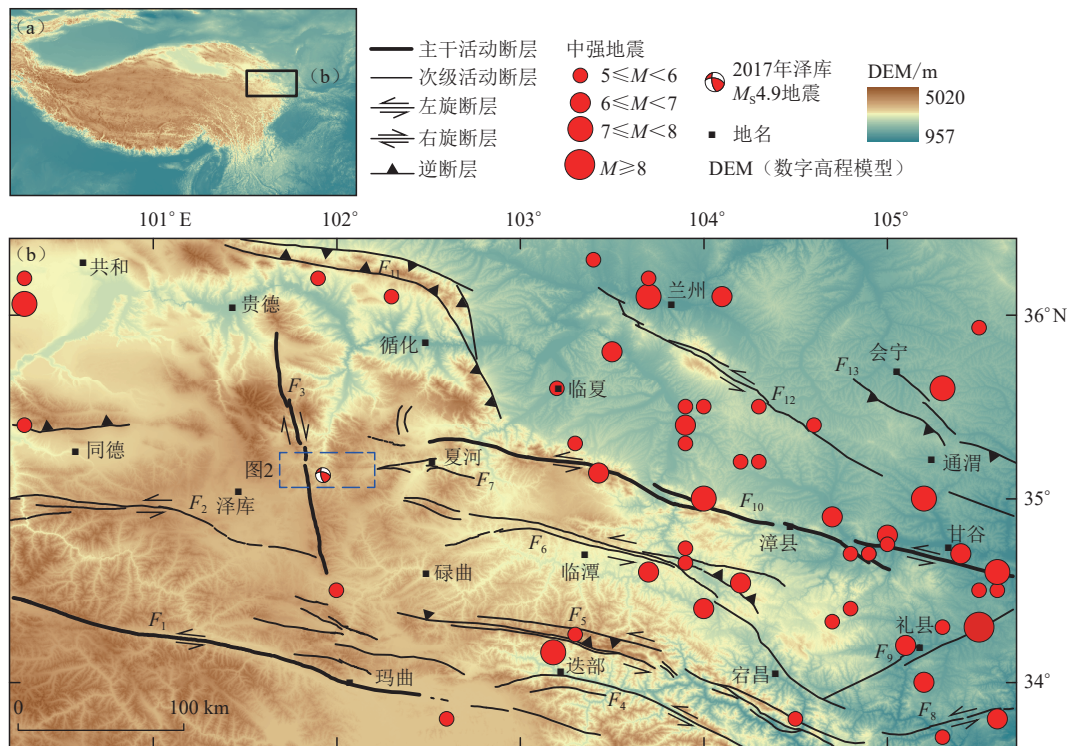
近年来,西秦岭地区发生了一系列中强地震,由

此发现了一系列断裂的新活动。2013年岷县漳县 $M_S6.6$ 地震发生后,震中附近的禾驮断裂被证实存在新活动^[2]。2017年九寨沟 $M_S7.0$ 地震发生后,雪山断裂以北的虎牙断裂的新活动迹线被发现^[3]。2019年夏河 $M_S5.7$ 地震发生后,震中附近的夏河断裂的新活动特征才被发现^[4]。

因此,本文目标是通过系统解译震中附近的活动断裂,完善震中附近的活动断裂图像。同时结合小震排列特征,综合分析泽库 $M_S4.9$ 地震的发震构造和发震机制。

1 区域构造背景

研究区位于青藏高原东缘的西秦岭地区(图1)。在青藏高原向北东扩展和向东挤出的构造背景下,研究区主要发育了NWW和NNW两组活动断裂,NWW向断裂(如东昆仑断裂、西秦岭北缘断裂)以左旋走滑为主,NNW向断裂(如日月山断裂、鄂拉山断裂)以右旋走滑为主,两者共同吸收和调节青藏高



F_1 : 东昆仑断裂; F_2 : 中铁断裂; F_3 : 日月山断裂南段; F_4 : 白龙江断裂; F_5 : 光盖山断裂; F_6 : 临潭—宕昌断裂; F_7 : 夏河断裂; F_8 : 两当—江洛断裂; F_9 : 礼县—罗家堡断裂; F_{10} : 西秦岭北缘断裂; F_{11} : 拉脊山断裂; F_{12} : 马衔山断裂; F_{13} : 西巩驿断裂

F_1 : East Kunlun fault; F_2 : Zhongtie fault; F_3 : Southern segment of Riyueshan fault; F_4 : Bailongjiang fault; F_5 : Guanggaishan fault; F_6 : Lintan-Dangchang fault; F_7 : Xiahe fault; F_8 : Liangdang-Jiangluo fault; F_9 : Lixian-Luojiapu fault; F_{10} : West Qinling fault; F_{11} : Lajishan fault; F_{12} : Maxianshan fault; F_{13} : Xigongyi fault

图 1 区域地震构造图

Fig. 1 Regional seismotectonic map

原东北缘的向外扩展^[5-6]。

震中位于走向 NNW 的日月山断裂东侧,日月山断裂是距震中最近的断裂。据张弛等^[7]的研究,日月山断裂南段是一条全新世活动断裂,活动性质以右旋走滑为主,右旋走滑速率约为 2.69~3.37 mm/a。除日月山断裂外,震中附近还发育夏河断裂、临潭—宕昌断裂和西秦岭北缘断裂等。夏河断裂主要展布于夏河县与合作市之间,向西可能延伸至多哇盆地乃至震中附近,根据地质地貌断错推测其为全新世活动断裂,活动性质以左旋走滑为主^[4]。临潭—宕昌断裂主体为临潭盆地北部的边界断裂,向西散开成多条分支,为全新世活动断裂,兼有左旋走滑和倾滑活动^[8]。西秦岭北缘断裂是区域上一条深大断裂带,狭义的西秦岭北缘断裂东起宝鸡,西止于甘加以西,是一条全新世活动断裂,以左旋走滑活动为主^[9]。西秦岭北缘断裂西端位于震中附近,同时发育多条南北

向逆断层,甘加盆地以西还可见新活动迹线,说明西秦岭北缘断裂延伸到了震中附近^[10-11]。

由此可见,震中位于 NNW 走向的日月山断裂与 NWW 走向的西秦岭北缘断裂、夏河断裂的过渡转换部位,构造背景较为复杂。对震中附近活动断裂开展解译和野外调查,结合小震排列和区域构造背景,可更好地认识该地震的发震构造和孕震机制,深入认识该区的地震构造特征和构造变形。

2 夏河断裂西延活动特征

2.1 断裂展布特征

经过遥感解译和野外地质地貌调查,我们在张波等^[4]的基础上,完善了夏河断裂的地表展布图像,并基于断错地质地貌分析了该断裂的新活动特征。

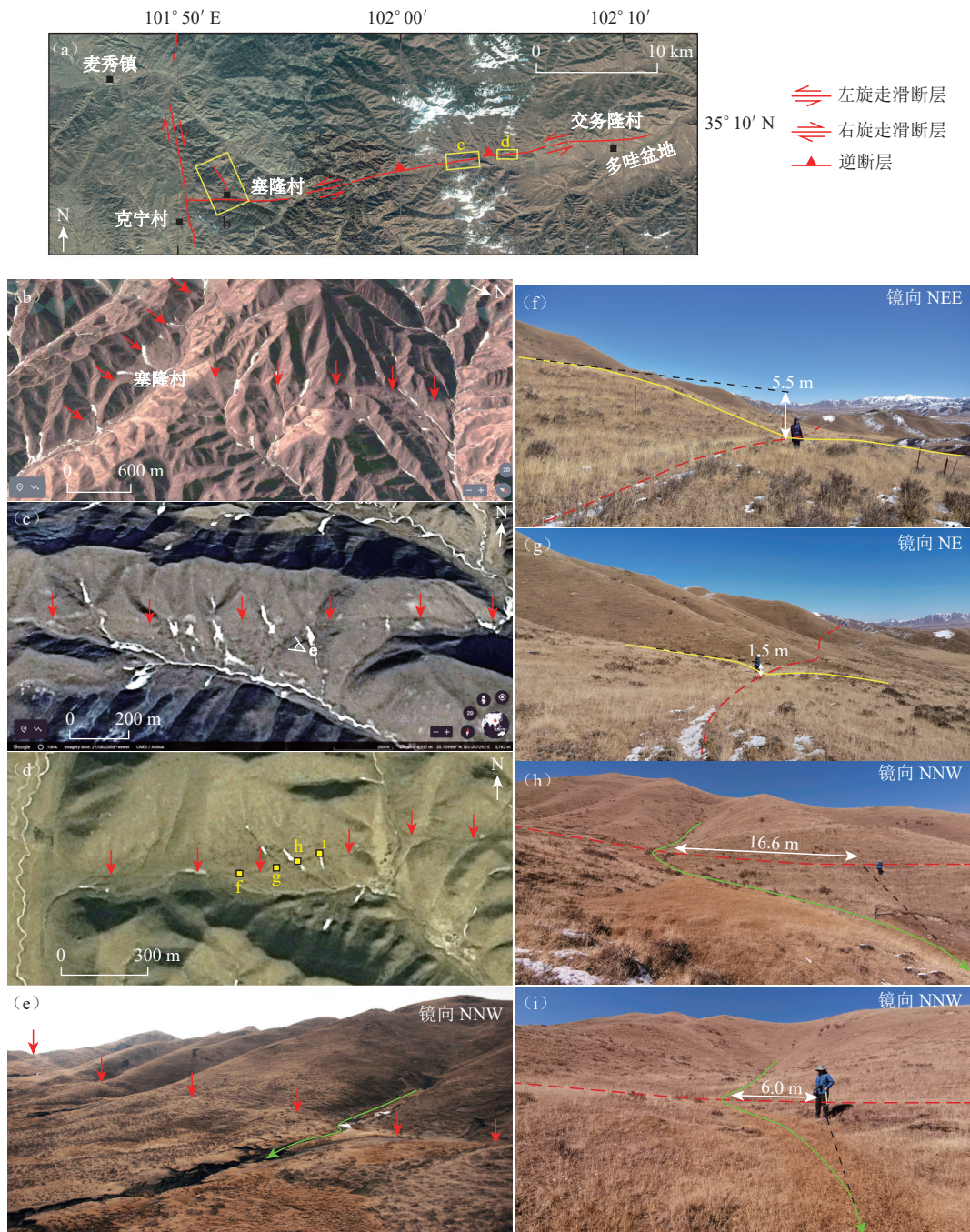
在夏河县以西,夏河断裂的断裂线性可继续向西追索,经过夏河县城以北、多哇乡以南、交务隆村

以北、塞隆村后，被日月山断裂截切。在塞隆村以北，还可见一条走向NW、长度仅2.5 km的断裂线性(图2a—b)，说明在夏河断裂与日月山断裂的构造转换区内发育了较复杂的活动构造。夏河断裂总体走向约80°，宏观地貌表现为地形坡折并控制盆山边界，

发育断层垭口、断层沟槽、断层泉等地貌(图2b—e)。

2.2 断裂新活动特征

断层新活动明显，新发育的微地貌发生明显的断错(图2)。不同时代的坡积物上发育不同高度的断层陡坎，说明断裂具有长期的垂向活动(图2f—g)。



红色箭头、红色虚线和红色实线指示断层位置；绿色实线代表冲沟，箭头指示水流方向；黄色实线指示地貌面
 Red arrows, red dashed lines, and red solid lines represent Xiahe fault; Green solid lines with arrows represent gullies associated with flowing directions; Yellow solid lines indicate geomorphic surfaces

图2 夏河断裂西延段地质地貌特征

Fig. 2 Geological and geomorphic characteristics along western segment of Xiahe fault

断裂也具有明显的左旋走滑活动, 可见多条冲沟和冲洪积扇发生同步左旋。交务隆村以西 7 km 处, 坡积物上 2 条相邻冲沟发生同步左旋, 大冲沟左旋 16.6 m, 小冲沟左旋 6.0 m(图 2h—i)。地质地貌断错表明, 夏河断裂兼具左旋走滑和倾滑分量。

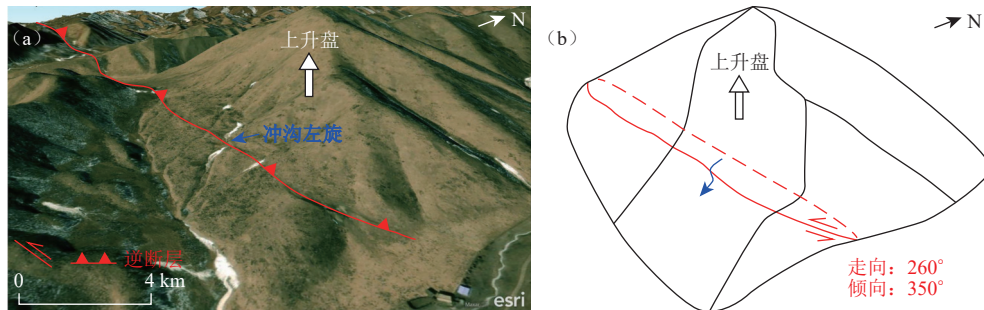


图 3 交务隆村以西断层三维几何示意图

Fig. 3 The 3D fault geometry west of Jiaowulong village

3 2017 年泽库 $M_S4.9$ 地震重定位

本文采用 Waldhauser 等^[12]提出的地震双差相对定位法, 对 2017 年泽库 $M_S4.9$ 地震序列开展重定位工作。该方法同时将每个台站观测的事件与台站组成台站—事件对, 使地震对的观测和理论走时之差的残差最小, 可以有效消除震源至台站间共同传播路径效应。双差定位方法通过反演每个地震相对矩心的相对位置, 可以有效减小因地壳结构模型影响而引起的误差^[13-15]。

本文使用的震相数据为青海测震台网产出, 选用震中附近 300 km 左右的青海测震台网、甘肃测震台网及科学台阵(CA)等地震监测台站的震相数据, 其中 100 km 内台站有 8 个, 100~200 km 内有 16 个, 200~300 km 内有 6 个。为了既保证定位精度, 又有足够多的观测数据, 选取有 4 个以上台站记录并且有 6 个以上震相数据共 98 个地震事件参与重定位计算。考虑到本次主震震级仅为 4.9 级, 地震序列中以小震居多, 震相信噪比普遍较低, 且 S 波作为续至波受到 P 波尾波以及各种反射震相的干扰, 其到时拾取精度要低于 P 波到时的拾取精度, 故本文在进行重定位计算时输入震相 P 波和 S 波分别赋予权重 1 和 0.5。本文采用的速度结构模型分为 6 层, 波速比设定为 1.70, 如表 1 所示。

采用共轭梯度法(LSQR)重定位后得到 86 次地震的震源位置参数, 为原来地震总数的 88%。选用震相走时共 1571 个, 其中 Pg 走时 873 个, Sg 走时 698 个;

2.3 断裂倾向

在交务隆村以西 7 km 处的山坡上, 断层迹线略呈弧形, 山坡上迹线向南凸出, 东侧沟内迹线偏北。根据地形特征和断层迹线推测(“V”字形法则), 夏河断裂西延段的断层面应向北倾(图 3)。

重定位后共构成震相对 45 895 组, 其中 Pg 走时 26 047 对, Sg 走时 19 848 对。

表 1 速度结构模型

Table 1 Velocity models used in relocation

深度/km	地震波速度/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	P波	S波
0	4.50	2.65
5	5.60	3.29
10	5.90	3.47
15	6.00	3.53
40	6.50	3.82
60	7.90	4.65

图 4 显示了定位后的泽库 $M_S4.9$ 地震序列。重定位后的地震序列总体呈 NWW—SEE 向分布, 长轴长约 4.6 km, 由 NW 走向(318°)和 EW 走向(269°)两段组成(图 4b)。主震($M_S4.9$)位于 NW 走向段上(剖面 AA'), 最大余震($M_S3.9$)位于 EW 走向段上(剖面 BB'), 两者间隔约 18 小时。主震和几次较大余震的深度较大, 其余余震深度较浅, 反应地震由深部向地表扩展(图 4c—d)。剖面 CC' 为横跨 EW 走向段的地震剖面, 小震排列指示向 N 倾的断层面, EW 走向段的小震排列与夏河断裂的三维几何匹配良好(图 4e)。

4 讨论

4.1 2017 年泽库 $M_S4.9$ 地震的发震构造

夏河断裂西段的三维几何(走向、倾向等)和运

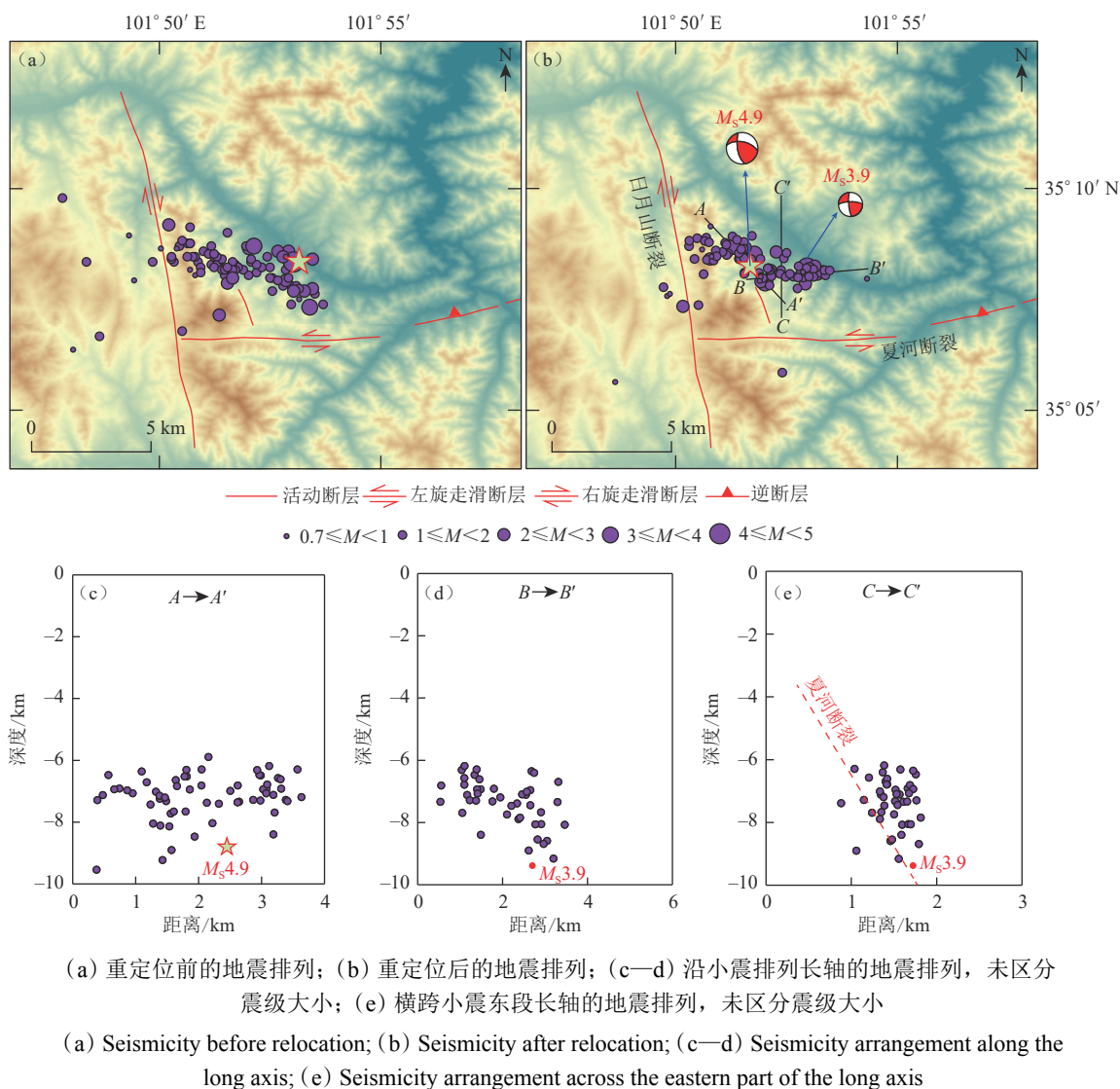


图4 2017年泽库 $M_s 4.9$ 地震序列重定位

Fig. 4 Relocated seismicity of Zeku $M_s 4.9$ earthquake in 2017

动性质(左旋走滑),与泽库 $M_s 4.9$ 地震的小震排列(EW走向段)、深部延伸、震源机制对应较好,据此我们推测泽库 $M_s 4.9$ 地震的发震断裂应为夏河断裂西段(图5)。日月山断裂南段的走向为 351° ,与小震长轴偏差较大,所以泽库 $M_s 4.9$ 地震应未直接发生在日月山断裂上。尽管泽库 $M_s 4.9$ 地震的震级不高,但地震学和地震地质学的良好对应,使得该地震仍然具有明确的发震断裂。

夏河断裂是一条中强地震活跃的次级断裂,近年来的2017年泽库 $M_s 4.9$ 地震和2019年夏河 $M_s 5.7$ 地震都和该断裂密切相关^[4]。综合本文和前人结果,夏河断裂总体上分两段,夏河县以东,断裂走向SE,倾向SW,2019年夏河 $M_s 5.7$ 地震发生于该段的次级分支上^[4];夏河县以西,断裂走向NEE,西端包括至

少2条分支;断裂总体倾向N,与2017年泽库 $M_s 4.9$ 地震的小震排列耦合较好。

完善区域活动断裂图像,有助于深入认识区域地震构造。本文通过断错地质地貌解译和调查,发现了震中附近次级断裂的几何展布和新活动,并结合地震学结果判断了泽库 $M_s 4.9$ 地震的发震构造。本研究进一步凸显了完善区域活动断裂图像的意义。近年来,研究区附近发生了多次中强地震(2013年岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震、2019年夏河 $M_s 5.7$ 地震等),这些地震的发震断裂均由震后调查发现,均是先存的、认识程度低的次级断裂^[2,4]。我们不仅要区域主干框架断裂开展研究,也需要对次级断裂的新活动特征开展普查,完善区域活动断裂图像。普查的重点应为新构造活动强烈(活动断裂、中强震或小震密集)

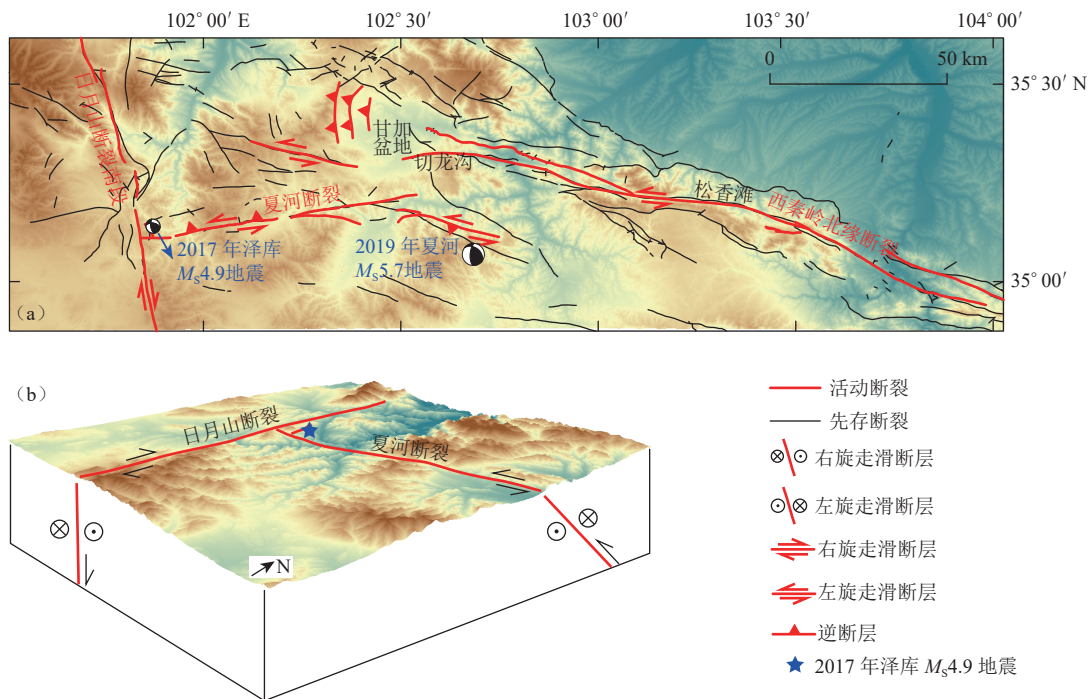
(a) 西秦岭北缘断裂西端构造图像; (b) 2017 年泽库 $M_s4.9$ 地震构造特征(a) Fault geometry around the western end of the West Qinling fault; (b) Seimogenic environment of the Zeku $M_s4.9$ earthquake in 2017

图 5 区域地震构造特征

Fig. 5 Regional seismotectonics map

地区的先存次级断裂,从而更好地解剖中强地震,分析区域地震构造背景。

4.2 夏河断裂的构造归属探讨

本文发现的夏河断裂西段,从走向和运动性质来看,可能属于西秦岭北缘断裂向西延伸的分支^[16]。西秦岭北缘断裂早期认为终止在松香滩一带^[17];随着遥感图像分辨率提高,张波等^[9]和 Chen 等^[10]发现断裂活动迹线可以继续向西追索到甘加盆地附近。断裂几何图像在甘加盆地一带较为复杂,包括多条走向不一、性质各异的分支断裂。夏河断裂可能和西秦岭北缘其他迹线一起,形成帚状发散的多条分支^[9,12]。除了夏河断裂西段以外,其他分支(如切龙沟分支)也在日月山断裂以东失去踪迹,据此我们推测狭义的西秦岭北缘断裂西端终止在日月山断裂。

随着断裂的逐渐终止,西秦岭北缘断裂的走滑分量一部分转换为拉脊山断裂的逆冲活动,促使积石山的隆升^[18];还有一部分耗散在甘加盆地附近的次级分支断裂上,导致上述次级断裂具有新活动特征,从而发生一系列中强地震(如 2017 年泽库 $M_s4.9$ 地震)。部分次级断裂发生构造转换,在甘加盆地以西形成了多条南北向的逆断层^[11]。

夏河断裂在构造上也可能与日月山断裂紧密关联。日月山断裂是青藏高原北部的一条十分重要的断裂,形成于前新生代,经历了多期构造演化,在调节青藏高原东北缘的新生代构造演化中起着关键的作用^[7,19-20]。日月山断裂的运动性质以右旋走滑为主,在断裂两盘相对剪切的情况下,一些与剪切方向垂直的断裂可能会受到剪切作用的影响而具有逆断性质。因此,夏河断裂逆断的运动特征也可能受到了日月山断裂的影响。而夏河断裂西端的 NW 向断裂线性(图 2),可能是在日月山断裂的近断层牵引作用下形成的。

因此,夏河断裂西端的构造归属存在多种可能,其左旋走滑的运动特征可能来源于西秦岭北缘断裂左旋走滑的西端效应,其逆断性质和几何展布也有可能受到日月山断裂右旋剪切的影响。对于西秦岭北缘断裂西延特征及其与日月山断裂的构造关系,有待后续研究。

5 结论

通过对 2017 年泽库 $M_s4.9$ 地震震中附近的活动断层解译和野外调查,结合小震重定位,本文得到如

下结论:

(1) 本文查明了夏河断裂的西延特征。夏河断裂经多哇盆地北部向西延伸, 被日月山断裂截断; 夏河断裂总体走向 NEE, 倾向 N, 活动性质兼具左旋走滑和逆断; 夏河断裂与日月山断裂的构造转换区还发育一条走向 NW 的断裂。

(2) 本文重新定位了 2017 年泽库 $M_S4.9$ 地震序列。地震序列长轴分 NW 走向 (318°) 和 EW 走向 (269°) 两段, EW 走向段小震排列指示倾向北的断层。

(3) 泽库 $M_S4.9$ 地震发生在夏河断裂与日月山断

裂的构造转换区, 小震排列和震源机制与夏河断裂的三维几何和运动性质对应良好, 因此认为夏河断裂是泽库 $M_S4.9$ 地震的发震断裂。夏河断裂可能是西秦岭北缘断裂西端帚状散开的分支之一, 代表西秦岭北缘断裂西端的构造活动, 同时也可能受到日月山断裂右旋剪切的影响。

致谢

感谢两位审稿专家极好的建议, 尤其关于学习 Ridgecrest 地震的建议极大地拓展了作者的视野!

参考文献

- [1] 李启雷, 李玉丽, 刘文邦. 2017 年 12 月 15 日青海泽库 $M_S4.9$ 地震序列分析 [J]. 防灾减灾学报, 2019, 35(2): 9-14
Li Q L, Li Y L, Liu W B. Analysis of the $M_S4.9$ Zeku earthquake sequence on December 15, 2017 in Qinghai Province[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2019, 35(2): 9-14
- [2] 何文贵, 郑文俊, 王爱国, 等. 临潭-宕昌断裂新活动特征与岷县漳县 $M_S6.6$ 地震关系研究 [J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 751-760
He W G, Zheng W J, Wang A G, et al. New activities of Lintan-Dangchang fault and its relations to Minxian-Zhangxian $M_S6.6$ earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 751-760
- [3] 任俊杰, 徐锡伟, 张世民, 等. 东昆仑断裂带东端的构造转换与 2017 年九寨沟 $M_S7.0$ 地震孕震机制 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4027-4045
Ren J J, Xu X W, Zhang S M, et al. Tectonic transformation at the eastern termination of the Eastern Kunlun fault zone and seismogenic mechanism of the 8 August 2017 Jiuzhaigou $M_S7.0$ earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4027-4045
- [4] 张波, 王爱国, 袁道阳, 等. 甘肃夏河断裂新活动的发现——兼论 2019 年夏河 $M_S5.7$ 地震的发震构造 [J]. 地震学报, 2020, 42(5): 629-644
Zhang B, Wang A G, Yuan D Y, et al. Discovery of new activity of Xiahe fault in Gansu: Discussion on seismogenic structure of the 2019 Xiahe $M_S5.7$ earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2020, 42(5): 629-644
- [5] 袁道阳, 张培震, 刘百麓, 等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换 [J]. 地质学报, 2004, 78(2): 270-278
Yuan D Y, Zhang P Z, Liu B C, et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 270-278
- [6] Yuan D Y, Champagnac J D, Ge W P, et al. Late Quaternary right-lateral slip rates of faults adjacent to the lake Qinghai, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. GSA Bulletin, 2011, 123(9/10): 2016-2030
- [7] 张驰, 李智敏, 任治坤, 等. 日月山断裂南段晚第四纪活动特征 [J]. 地震地质, 2022, 44(1): 1-19
Zhang C, Li Z M, Ren Z K, et al. Characteristics of Late Quaternary activity of the southern Riyueshan fault[J]. Seismology and Geology, 2022, 44(1): 1-19
- [8] 张波, 田勤俭, 王爱国, 等. 西秦岭临潭-宕昌断裂第四纪最新活动特征 [J]. 地震地质, 2021, 43(1): 72-91
Zhang B, Tian Q J, Wang A G, et al. Studies on new activity of Lintan-Dangchang fault, West Qinling[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(1): 72-91
- [9] 张波, 何文贵, 袁道阳, 等. 西秦岭北缘断裂带西端晚第四纪活动特征及其西延问题 [J]. 地震, 2012, 32(1): 136-143
Zhang B, He W G, Yuan D Y, et al. Late Quaternary activities of the west segment of northern margin of western Qinling fault zone and its western extension[J]. Earthquake, 2012, 32(1): 136-143
- [10] Chen P, Lin A M. Tectonic topography and Late Pleistocene activity of the West Qinling fault, northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 176: 68-78

- [11] 陆诗铭, 王爱国, 文亚猛, 等. 甘加盆地西缘断裂带发现新活动证据 [J]. 地震工程学报, 2021, 43(5): 1045-1053
Lu S M, Wang A G, Wen Y M, et al. Evidence of new activities along the western margin fault zone of the Ganjia Basin[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(5): 1045-1053
- [12] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(6): 1353-1368
- [13] 黄媛, 杨建思, 张天中. 2003 年新疆巴楚—伽师地震序列的双差分重新定位研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 162-169
Huang Y, Yang J S, Zhang T Z. Relocation of the Bachu-Jiashi, Xinjiang earthquake sequence in 2003 using the double-difference location algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 162-169
- [14] 秦双龙. 双差定位方法的研究 [J]. 新疆石油教育学院学报, 2009, 10(6): 201-202
Qin S L. A study of double-difference algorithm[J]. Journal of Petroleum Educational Institute of Xinjiang, 2009, 10(6): 201-202
- [15] 房立华, 吴建平, 王未来, 等. 云南鲁甸 $M_S6.5$ 地震余震重定位及其发震构造 [J]. 地震地质, 2014, 36(4): 1173-1185
Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. Relocation of the aftershock sequence of the $M_S6.5$ Ludian earthquake and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 2014, 36(4): 1173-1185
- [16] 张志亮. 西秦岭北缘断裂带西端的活动性及其对西宁至成都铁路方案的影响 [J]. 华南地震, 2020, 40(2): 85-91
Zhang Z L. The activity of the west end of the Western Qinling fault zone and its influence on the railway project from Xining to Chengdu[J]. *South China Journal of Seismology*, 2020, 40(2): 85-91
- [17] 国家地震局兰州地震研究所. 西秦岭北缘断裂带 1/5 万活动断裂地质图说明书 [M]. 1993
Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration. Geological map of 1/50000 active fault in the northern edge fault zone of the western Qinling Mountains[M]. 1993
- [18] 张波. 西秦岭北缘断裂西段与拉脊山断裂新活动特征研究 [D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2012
Zhang B. The study of new activities on western segment of northern margin of Western Qinling fault and Lajishan fault[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2012
- [19] 赵保强. 青海省多禾茂地区南北向断裂特征及成因分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010
Zhao B Q. Characteristics and cause analysis to the north-south fault of Duohemao area in Qinghai Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010
- [20] Duvall A R, Clark M K. Dissipation of fast strike-slip faulting within and beyond northeastern Tibet[J]. *Geology*, 2010, 38(3): 223-226