

张波, 王爱国, 袁道阳, 文亚猛, 王维桐, 秦满忠, 何文贵. 2020. 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. 地震学报, 42(5): 629–644. doi: 10.11939/jass.20200007.
Zhang B, Wang A G, Yuan D Y, Wen Y M, Wang W T, Qin M Z, He W G. 2020. Discovery of new activity of Xiahe fault in Gansu: Discussion on seismogenic structure of the 2019 Xiahe $M_s5.7$ earthquake. Acta Seismologica Sinica, 42(5): 629–644. doi: 10.11939/jass.20200007.

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

张 波^{1,2)} 王爱国^{2),†} 袁道阳³⁾ 文亚猛²⁾
王维桐²⁾ 秦满忠²⁾ 何文贵²⁾

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

2) 中国兰州 730000 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站

3) 中国兰州 730000 兰州大学地质科学与矿产资源学院

摘要 2019 年 10 月 28 日甘肃夏河 $M_s5.7$ 地震发生于临潭—宕昌断裂与西秦岭北缘断裂之间, 震中周边断裂的发育情况不明, 断裂研究程度低, 且无明确的地表断裂与该地震相关. 本文通过遥感解译和野外调查, 完善了震中周边断裂即临潭—宕昌断裂、夏河断裂东段和达麦—合作断裂的几何展布图像和新活动特征, 结合小震精定位和震源机制, 综合分析并构建了夏河地震的发震构造模型. 研究结果显示: 夏河地震的周边断裂包括两条已知、但研究程度不高的西秦岭北缘断裂和临潭—宕昌断裂, 以及仅标绘在地质图上、活动未知的夏河断裂和达麦—合作断裂; 首次发现了夏河断裂东段的新活动, 活动性质兼具左旋走滑和向北逆冲, 前人基于小震定位判定的发震断层(走向 312° , 倾向 42° , 倾角 48°)可能是夏河断裂东段派生的一条隐伏分支, 该分支在平面上与夏河断裂东段呈小角度斜交(夹角 22°), 在深部归并到夏河断裂, 滑动方向(滑动角 48°)与夏河断裂东段的活动性质(兼具逆冲和左旋)一致. 夏河断裂东段在构造上可能归属于临潭—宕昌断裂西段, 是西秦岭北缘断裂正花状构造的组成部分, 2019 年夏河 $M_s5.7$ 地震代表临潭—宕昌断裂西段的构造活动.

关键词 2019 年甘肃夏河 $M_s5.7$ 地震 发震构造 夏河断裂 临潭—宕昌断裂 西秦岭北缘断裂

doi: 10.11939/jass.20200007 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Discovery of new activity of Xiahe fault in Gansu: Discussion on seismogenic structure of the 2019 Xiahe $M_s5.7$ earthquake

Zhang Bo^{1,2)} Wang Aiguo^{2),†} Yuan Daoyang³⁾ Wen Yameng²⁾
Wang Weitong²⁾ Qin Manzhong²⁾ He Wengui²⁾

^{*} 基金项目 中国地震局地震科技星火计划(XH19045Y)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2018IESLZ02, 2020IESLZ02)共同资助.

收稿日期 2020-01-14 收到初稿, 2020-07-23 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: wagu2008@163.com



1) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

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

3) School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: On October 28, 2019, a magnitude 5.7 earthquake struck the Xiahe county, Gansu Province. This event was located between the Lintan-Dangchang fault and West Qinling fault, where surface faults were poorly mapped and studied, and there was no fault directly related to the Xiahe $M_S5.7$ earthquake. In this paper, through the remote sensing interpretation and field investigation, the geometric pattern and new activity of geological faults around the Xiahe earthquake epicenter were studied preliminarily. Combined with the relocated small earthquakes and the focal mechanism solutions, the seismotectonic model of the Xiahe earthquake was built up and comprehensively analyzed. The results are as follows. First, the surrounding faults of the Xiahe earthquake include two well-known but poorly-studied faults (the West Qinling fault and Lintan-Dangchang fault) and two poorly-known faults (the Xiahe fault and Damai-Hezuo fault) that were only mapped on the geological map. Second, this work has acquired more detailed geometric pattern and new activity of the Lintan-Dangchang fault, the east segment of the Xiahe fault, and the Damai-Hezuo fault, and we have discovered Holocene activity of the Xiahe fault for the first time, it is of both left-lateral strike-slip and northward reverse-slip. Third, the seismogenic fault plane (the strike, dip direction and dip angle are 312° , 42° and 48° , respectively) determined by previous studies based on earthquake sequence relocation is likely to be one hidden fault derived from the east segment of Xiahe fault, the hidden fault is at a small angle (22°) to the east segment of Xiahe fault, and merges with Xiahe fault in the deep earth, slip direction of the hidden fault (rake is 48°) agrees well with the slip senses (with both left-lateral slip and reverse slip) of the east segment of the Xiahe fault. The east segment of the Xiahe fault may be structurally part of the west segment of the Lintan-Dangchang fault and is part of the positive flower structure of the West Qinling fault, and the Xiahe $M_S5.7$ earthquake in 2019 represents the tectonic activity of the west segment of the Lintan-Dangchang fault.

Key words: Gansu Xiahe $M_S5.7$ earthquake in 2019; causative structures; Xiahe fault; Lintan-Dangchang fault; West Qinling fault

引言

据中国地震台网中心(2019)正式测定,北京时间2019年10月28日1时56分,甘肃省甘南州夏河县(35.10°N , 102.69°E)发生 $M_S5.7$ 地震,震源深度为10 km(下文简称为夏河地震).夏河地震发生在西秦岭北缘断裂与临潭—宕昌断裂之间(图1).该区历史上中强地震较少,仅1936年康乐 $M_6\frac{3}{4}$ 地震和1964年和政 M_5 地震有记载,这两次地震与西秦岭北缘断裂有关(国家地震局震害防御司,1995;张波等,2015).

临潭—宕昌断裂东段中强地震活跃,发生过2013年岷县—漳县 $M_S6.6$ 地震、1837年岷县 M_6 地震、1573年岷县 $M_6\frac{3}{4}$ 地震、2003年岷县 $M_S5.2$ 地震、2006年岷县—卓尼 $M_S5.0$ 地震等(国家地震局震害防御司,1995;郑文俊等,2005, 2007a, b, 2013a, b;何文贵等,2006, 2013);而原认为与临潭—宕昌断裂西段有关的公元842年碌曲 M_7 地震,经史料考证和发震构造调查,被认为是光盖山—迭山断裂西段的构造活动(袁道阳等,2014).临潭—宕昌断裂

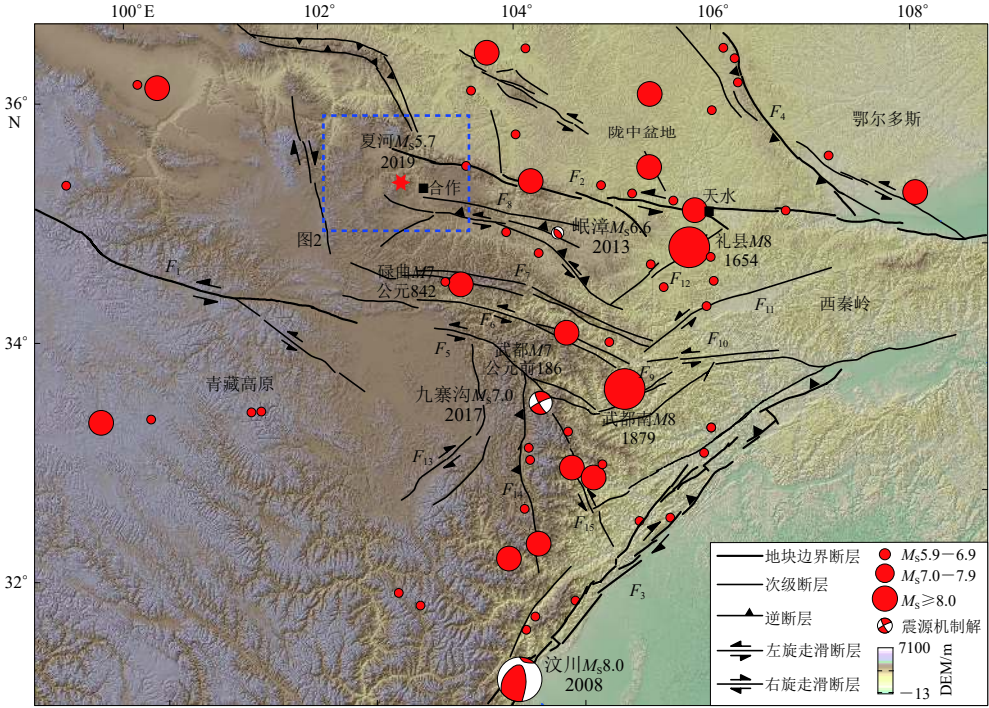


图 1 区域地形地貌、活动构造和历史地震分布图

F_1 : 东昆仑断裂; F_2 : 西秦岭北缘断裂; F_3 : 龙门山断裂; F_4 : 六盘山断裂; F_5 : 塔藏断裂; F_6 : 白龙江断裂; F_7 : 光盖山—迭山断裂; F_8 : 临潭—宕昌断裂; F_9 : 哈南断裂; F_{10} : 武都—康县断裂; F_{11} : 两当—江洛断裂; F_{12} : 礼县—罗家堡断裂; F_{13} : 龙日坝断裂; F_{14} : 岷江断裂; F_{15} : 虎牙断裂。底图为 SRTM1 (shutter radar topographic mission) 的数字高程模型(digital elevation model, 缩写为 DEM) 数据(分辨率为 30 m); 震源机制解来源于 [GCMT \(2019\)](#)

Fig. 1 Regional topography, active tectonics and historical earthquakes

F_1 : East Kunlun fault; F_2 : West Qinling fault; F_3 : Longmenshan fault; F_4 : Liupanshan fault; F_5 : Tazang fault; F_6 : Bailongjiang fault; F_7 : Guanggaishan-Dieshan fault; F_8 : Lintan-Dangchang fault; F_9 : Ha’nan fault; F_{10} : Wudu-Kangxian fault; F_{11} : Liangdang-Jiangluo fault; F_{12} : Lixian-Luojiapu fault; F_{13} : Longriba fault; F_{14} : Minjiang fault; F_{15} : Huya fault. The base map is SRTM1 (shutter radar topographic Mission) DEM (resolution is 30 m), and the focal mechanism solutions are from [GCMT \(2019\)](#)

的强震活动表现为“东强西弱”，其原因和构造机理尚不清楚。

2019 年夏河 $M_S5.7$ 地震位于中强地震稀少的临潭—宕昌断裂西段附近，对于研究临潭—宕昌断裂西段的构造活动以及分析临潭—宕昌断裂“东强西弱”的分段活动差异具有十分重要的意义。本文拟通过研究震中周边活动断裂的空间展布图像和新活动特征，结合[刘旭宙等\(2021\)](#)通过震源机制解和地震重定位而判定的发震节面，分析其与区域构造的关系，建立夏河地震的构造模型。

1 区域构造背景

夏河地震位于南北地震带中段的松潘—西秦岭构造结，是青藏高原与四川盆地、鄂尔多斯地块相互作用而强烈变形的区域，也是东昆仑断裂与西秦岭北缘断裂的左阶过渡区，阶区

内的构造活动受控于东昆仑断裂和西秦岭北缘断裂,阶区内发育弧形次级断裂系,从西向东断裂走向由WNW转向NE,形成南凸的弧形断裂系,弧形断裂系共同分配和调节了东昆仑断裂和西秦岭北缘断裂的差异活动速率(袁道阳等, 2004; 郑文俊等, 2016)(图1)。晚第四纪以来,弧形构造系活动强烈,发生了1654年礼县M8、1879年武都南M8、公元前186年武都M7、公元842年碌曲M7等大地震和数十次中强地震(顾功叙, 1983; 国家地震局震害防御司, 1995)。

由于西秦岭地形起伏大、海拔高、侵蚀改造强烈等原因,很多研究人员在研究区开展了活动构造和历史地震研究,但是东昆仑—西秦岭阶区内弧形断裂系的几何展布仍然不明,断裂活动性质、活动性定量参数和历史地震等研究一直比较薄弱(韩竹军等, 2001; 袁道阳等, 2004; 冯希杰等, 2005; 侯康明等, 2005; 贾伟等, 2012, 2018; 俞晶星等, 2012; 何文贵等, 2013; 刘兴旺等, 2015; 杨晓平等, 2015; 郑文俊等, 2016; Zheng *et al.*, 2016; 张波等, 2021)。

2019年夏河 $M_{\text{s}}5.7$ 地震震中附近的已知活动断裂包括北侧的西秦岭北缘断裂锅麻滩段和南侧的临潭—宕昌断裂西段。西秦岭北缘断裂锅麻滩段西起甘加以西,向东经切龙沟、大槐沟、松香滩、羊毛沟、锅麻滩至莲麓以东,长约165 km,由多条雁列排布的次级断裂组成。该断裂的新活动以左旋走滑为主,全新世以来该段发生过两次古地震事件,分别距今 $(1\,932\pm54)$ 年和 $(3\,602\pm89)$ — $(5\,880\pm115)$ 年(张波等, 2012)。1936年康乐 $M_{\text{b}}6.4$ 地震也发生在该断裂上,形成了长达14 km的地表破裂带,现今仍残留地震陡坎、地裂缝、大型基岩崩塌等地表破裂和次生灾害,最大同震左旋和垂直位移为2.5 m和0.6 m(张波等, 2015)。

临潭—宕昌断裂西起合作以西,向东经临潭、岷县至宕昌以东,走向由WNW逐渐转变为NNW,形成向北东凸出的弧形,延伸长达300 km(袁道阳等, 2004; 何文贵等, 2013; 郑文俊等, 2013a, b; 张波等, 2021)。该断裂几何结构复杂,由多条规模不等、相互平行或斜接的次级断裂组合而成,自西向东可分为三段:西段由南、北两支组成,南、北支又可进一步细分,南支断裂走向为NE—ENE,北支断裂走向为WNW;中段各分支断裂的几何形态收敛,走向为WNW;东段断裂分散成临潭—宕昌断裂主断裂、禾驮断裂、木寨岭断裂和柏林口断裂等四条分支断裂,其中,临潭—宕昌断裂主断裂可能是2013年岷县漳县 $M_{\text{s}}6.6$ 地震的发震构造(何文贵等, 2013; 郑文俊, 2013b)。临潭—宕昌断裂主断裂的运动性质以左旋走滑为主,局部段表现为向南逆冲,最新活动时代以晚更新世为主。张波等(2021)在中段的贡恰村一带首次发现临潭—宕昌断裂的全新世活动。夏河地震震中南侧为临潭—宕昌断裂的西段北支,目前尚未见关于该段的研究成果,断裂的几何展布和活动性质也不明。

在临潭—宕昌断裂西段与西秦岭北缘断裂锅麻滩段之间,地质图上还标绘了两条活动性未知的断裂,这两条断裂也未见前人研究成果,本文暂将这两条断裂命名为夏河断裂和达麦—合作断裂(图2)。夏河断裂发育于三叠系内部,而达麦—合作断裂位于二叠系与三叠系之间。夏河断裂距离夏河地震震中北侧仅2.6 km,可能与夏河地震存在密切的关联。

2 研究方法

2.1 遥感图像选取和解译

遥感图像解译是研究活动断裂的基础工作。在研究区附近,张波等(2018)通过解译多种遥感图像,结合野外地质地貌调查验证,研究了光盖山—迭山断裂的几何展布图像和新活动特征。解译夏河地震震中附近的断裂时主要使用谷歌地球图像(亚米级),但极震区位于几幅

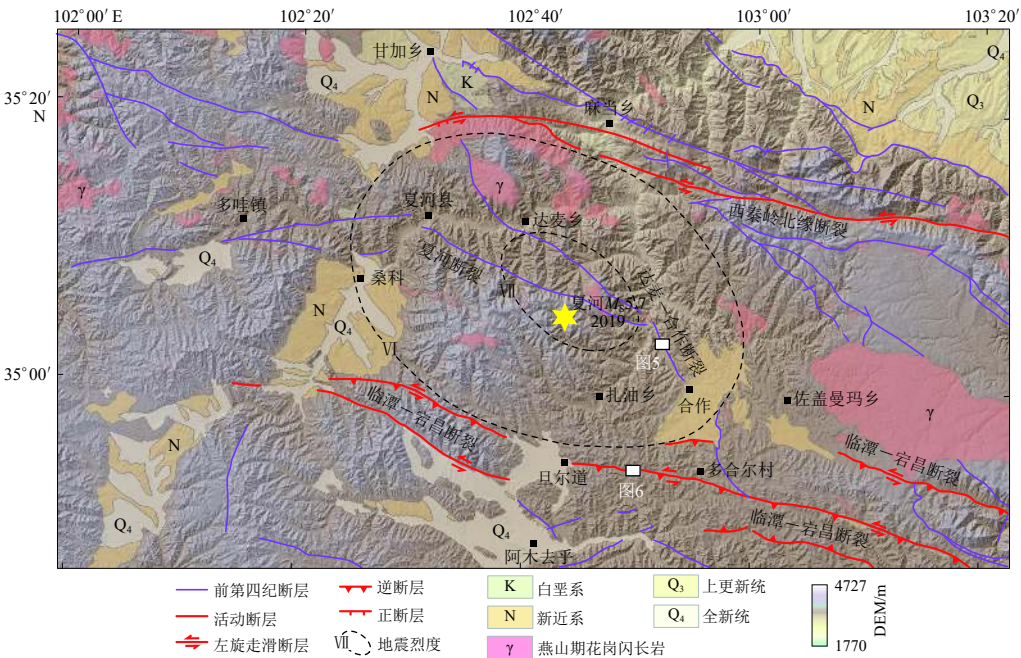


图2 2019年夏河 $M_S5.7$ 地震周边构造分布

地层、基岩断层来源于1:20万地质图(合作幅)^①,地震烈度引自甘肃省地震局(2019)

Fig. 2 Active tectonics around the epicenter of the Xiahe $M_S5.7$ earthquake in 2019

Stratigraphy and bedrock fault data are from 1:200 000 geological map (Hezuo district). The earthquake intensity field refers to Gansu Earthquake Agency (2019)

图像的拼接部位,存在大片阴影区和云区,而考虑到其它时相的图像分辨率又过低,解译中还使用了印度遥感卫星 IRS-P5 影像(全色分辨率为 2.5 m).在宏观地貌解译中,使用分辨率为 12.5 m 的日本对地观测卫星 ALOS (Advanced Land Observing Satellite)的数字高程模型 (DEM).

通过收集研究区附近活动断裂研究的相关文献(张波等, 2012, 2018; 何文贵等, 2013),结合笔者在研究区附近的工作经验,归纳了研究区活动断裂的解译标志.活动断裂最明显的标志是清晰连续的线性特征,线性特征在图像上多表现为线性色调差异,如线性亮色、暗色条带以及色差分界带(张波等, 2018).根据研究区活动断裂的运动特征,可能还存在冲沟左旋、断层泉、断塞塘、地形坡折等识别标志.

2.2 野外考察

在详细解译的基础上,在野外对典型点进行踏勘和详细研究,修正解译结果,总结断错地质地貌表现.根据断错地质地貌特征,分析断裂的活动性质;根据被断错的典型地貌面的年龄对比,分析断裂的最新活动时代;根据地形地貌和断裂形迹,基于地质学中的“V”字形法则,判断断面的倾向.最后,初步获得了夏河地震震中附近的断裂展布和新活动特征.

^① 甘肃省地质局, 1972. 中华人民共和国地质图(1:200 000) 9-48-7(合作)幅.

3 结果

3.1 夏河断裂新活动的发现

通过遥感解译和野外考察,发现夏河断裂西接贵德断裂,向东经官秀寺、交隆务、多哇镇南、拉卜楞寺、塘乃合村、洒易囊村南、当浪咱村南,终止于合作西北的多朗囊一带(图3).夏河断裂西段主要位于拉卜楞寺以西,走向近EW,断裂长度为54 km(图3a);夏河断裂东段主要位于拉卜楞寺以东,总体走向为ESE,断裂长度为39 km(图3b).

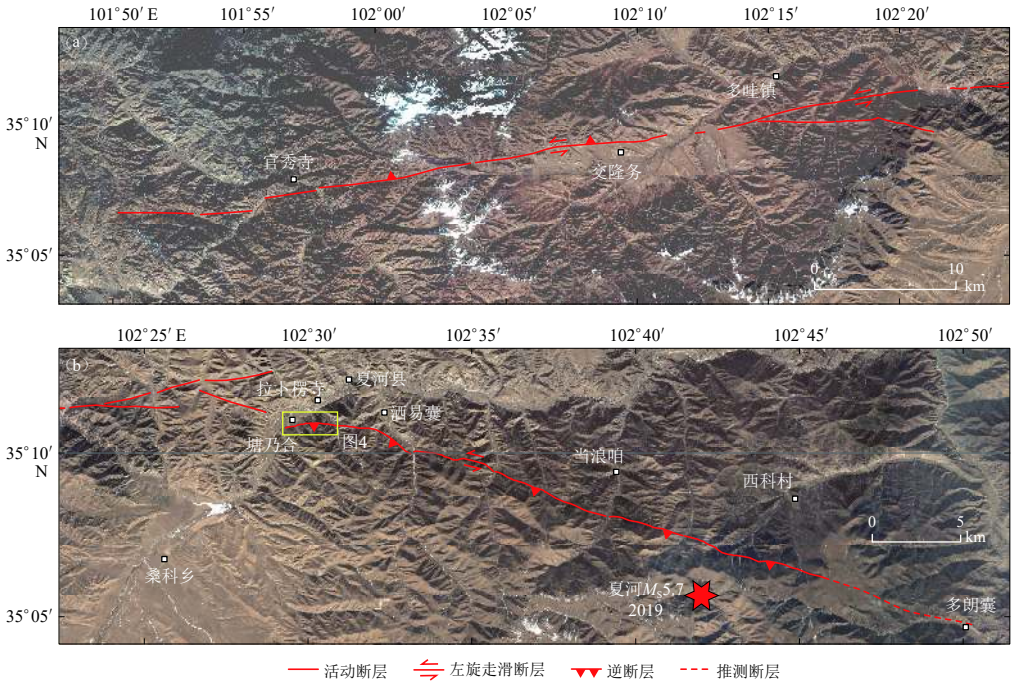


图3 夏河断裂西(a)、东(b)段几何展布图像

底图为印度遥感卫星 IRS-P5 影像,分辨率为 2.5 m

Fig. 3 Fault geometry of the west (a) and east (b) segments of Xiahe fault

The base map is IRS-P5 satellite image from India with the resolution 2.5 m

夏河断裂东段控制了夏河东南侧的宏观地貌边界,在较大几何尺度上表现为地形的坡折,穿过断裂的多条大冲沟和山脊显示同步左旋(图3).东段沿线可见较典型的线性地貌,包括断层陡坎、左旋、断层沟槽和断层堙口等连续出露的断层地貌(图4).塘乃合南侧,断层连续错动山脊和冲沟,形成断层陡坎和断层沟槽等地貌(图4a, b);一条小冲沟左旋6.5 m,冲沟左岸的二级阶地左旋6 m(图4c),二级阶地拔河高度为2.5—5 m,根据阶地拔河高度和形成年龄的经验公式(袁道阳等, 1999)推算,二级阶地形成于全新世中期.该冲沟东侧200 m发育一条大冲沟,冲沟二级阶地上保留两条断层陡坎,断层陡坎高均为1.5 m(图4d),该阶地拔河高度为7—9 m,根据阶地拔河高度和形成年龄的经验公式(袁道阳等, 1999)推算,该阶地形成于晚更新世—全新世.形成于晚更新世—全新世的微地貌(冲沟阶地)被断错,说明夏河断裂东段为全新世活动断裂.

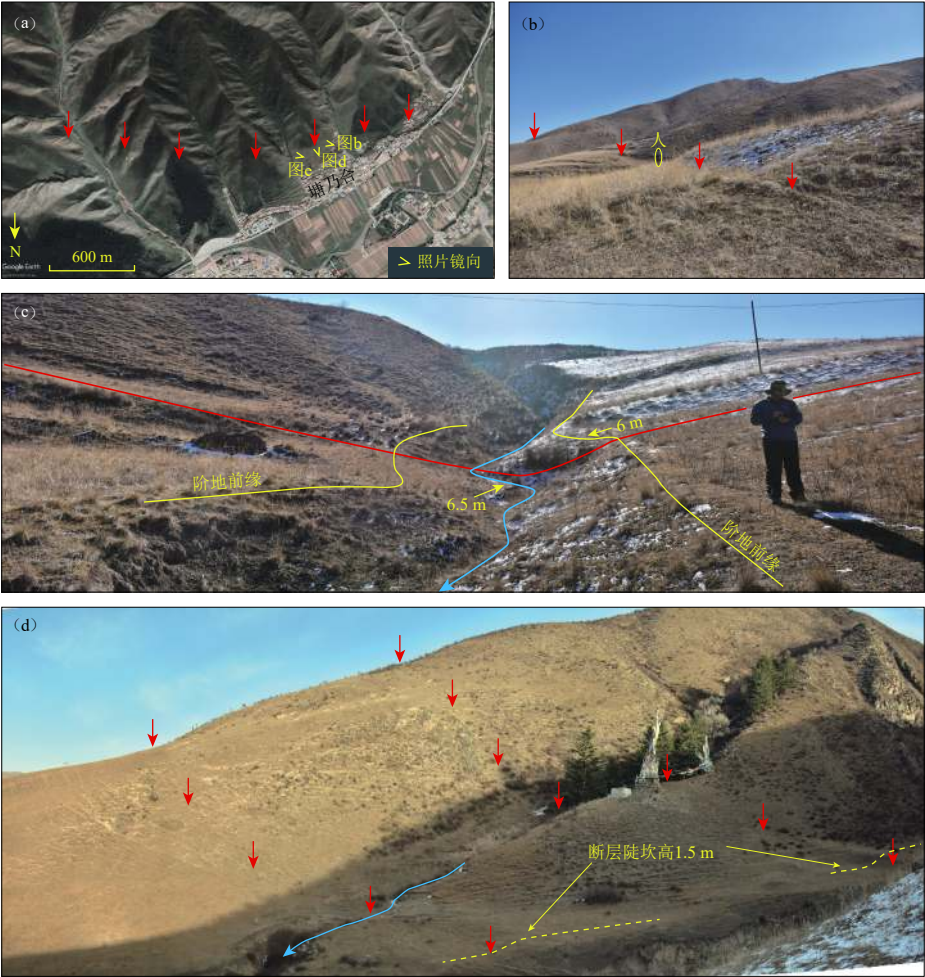


图 4 夏河断裂东段塘乃合村南断层地貌

- (a) 塘乃合南侧断层卫星影像, 红色箭头代表断层; (b) 塘乃合南侧断层线性地貌, 红色箭头代表断层, 镜向 E;
(c) 塘乃合南侧小冲沟及二阶阶地左旋位错, 红色实线代表断层, 黄色实线代表阶地前缘, 蓝色实线和箭头代表冲沟和流向, 镜向 SES; (d) 图(c)冲沟东侧 200 m 处的大冲沟东侧断层地貌, 红色箭头代表断层, 黄色虚线代表阶地面上的地形陡坎, 蓝色实线和箭头代表冲沟和流向, 镜向 E

Fig. 4 Offset geomorphologies to the south of the Tangnaihe village along the east segment of the Xiahe fault

- (a) Remote sensing image of fault trace, where red arrows represent fault trace; (b) Linear fault trace to the south of the Tangnaihe village, where red arrows represent fault trace, view to E; (c) Left-lateral offset of a small gully and its terrace, red solid line represents fault, yellow solid lines represent terrace edge, blue solid line and arrow represent gully and flow direction, view to SES; (d) Offset geomorphologies 200 m east of the gully in Fig. (c), where red arrows represent fault trace, yellow dashed lines indicate topographic scarps on gully terrace, blue solid line and arrow represent gully and flow direction, view to E

另外, 从断裂的地表展布和地形地貌(图 3)来看, 断层在冲沟内更靠南, 在山坡上更靠北, 地表形迹为向东北凸出的弧形, 基于“V”字形法则判断夏河断裂东段具有向北的逆冲分量(仰冲), 断层面倾向 SW. 数字高程模型(SRTM3 DEM 和 ALOS DEM)显示(图 2, 7), 夏河

断裂一线表现为南高北低的宏观差异构造地貌，支持“V”字形法则的判断结果。因此，夏河断裂东段兼具逆冲和左旋走滑分量，断面倾向南。

3.2 达麦—合作断裂

达麦—合作断裂起自达麦西北，向东南延伸至合作市，在合作东南被临潭—宕昌断裂截断(图 2)。该断裂走向为 $N30^{\circ}-50^{\circ}W$ ，长约 60 km，倾向 NE，倾角为 65° 。断裂主要发育在二叠系灰褐色砂岩、灰岩和三叠系灰黄色板岩之间，局部段发育在下三叠统灰黄色板岩与燕山期花岗闪长岩之间，表现为二叠系灰褐色砂岩和燕山期花岗闪长岩向南西逆冲至下三叠统灰黄色板岩之上，破碎带宽 10 m 左右(图 5)。经多种遥感图像综合解译，结果显示该断裂在地表无线性显示。野外考察表明，断层在扎油沟东侧山坡通过处无明显断错地貌，山脊和冲沟无同步变形。因此，达麦—合作断裂应是一条前第四纪断裂。

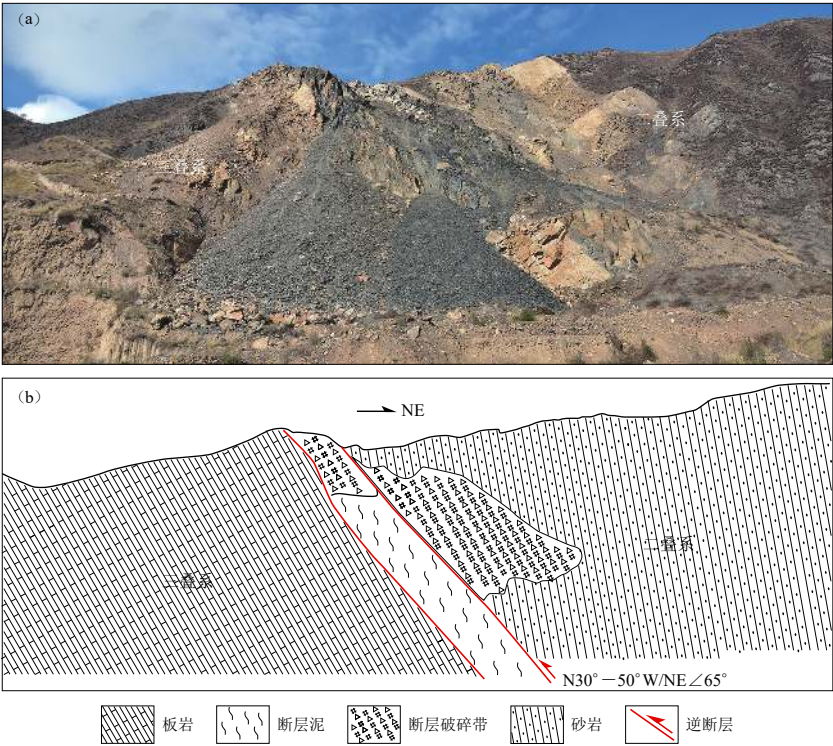


图 5 达麦—合作断裂的基岩断层剖面(a)及素描图(b)

Fig. 5 Fault profile (a) and sketch map (b) of the Damai-Hezuo fault

3.3 临潭—宕昌断裂西段

通过遥感解译和野外考察，完善了临潭—宕昌断裂西段北支的几何展布图像(图 2)。西段北支可细分成两条次级断裂：① 合作南断裂，控制合作新近系盆地的南边界，形成盆山地貌；② 临潭—宕昌断裂西段的主体部分，向西延伸至旦尔道一带后分散成近平行的两条断裂，在桑科盆地南边界附近，两条断裂收敛并终止。

合作南断裂构成盆山边界，北侧为新近系(N)，南侧为古生界(Pz)。微地貌断错包括冲沟和阶地的同步左旋，阶地拔沟高度低于 5 m[据袁道阳等(1999)的经验公式，估计形成于晚更新世至全新世]，说明合作南断裂自晚更新世以来活动过，且具有明显的左旋走滑分量。临

潭一宕昌断裂西段的主体部分在国道合作界牌处揭露断层剖面, 剖面上显示逆断层, 倾向南, 倾角 30°, 断裂由南向北逆冲(图 6). 同时, 地形上发育坡向北、高数米的陡坎, 支持断层由南向北的逆冲活动. 地质地貌现象表明, 临潭—宕昌断裂西段北支的运动性质兼具逆冲和左旋走滑.

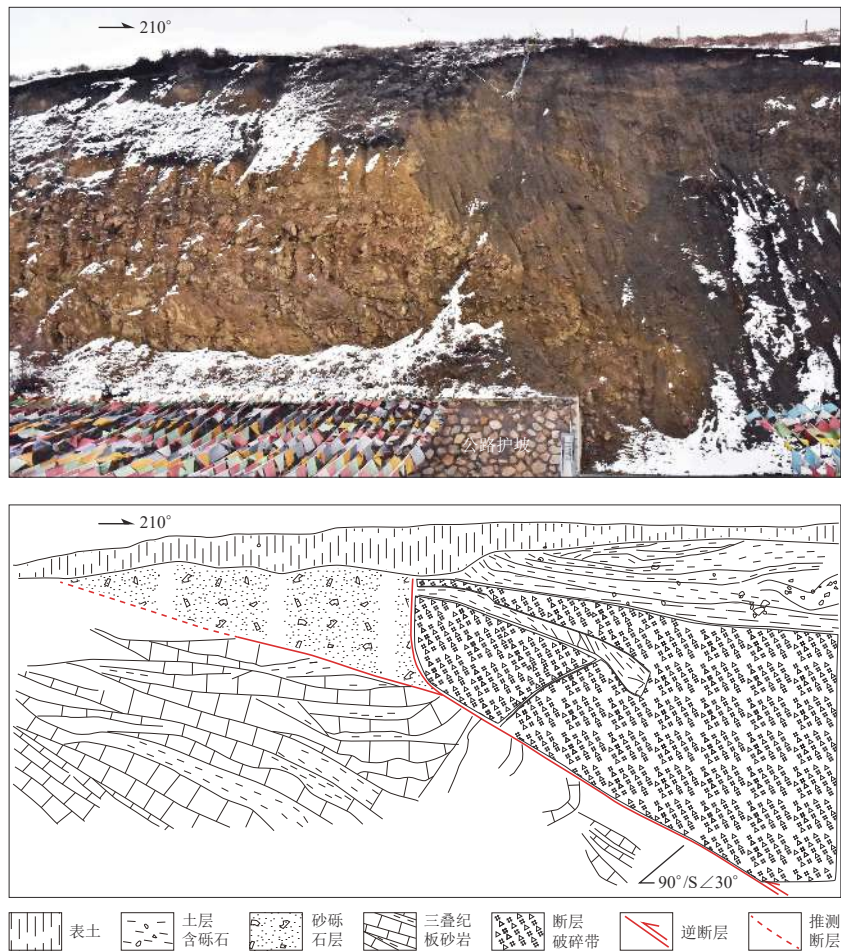


图 6 合作界牌处公路地堑东侧断层剖面(a)及其素描图(b)

Fig. 6 Fault profile (a) and sketch map (b) of the east wall of highway trench at the boundary mark of the Hezuo city

4 讨论

4.1 夏河地震的发震构造模型

上述各断裂展布、活动性质和断层产状如图 7 所示. 临潭—宕昌断裂西段包含 3 条次级分支, 其中: 合作南断层、西段主体(震中南侧 18 km)均向南倾, 断面往深部延伸(下延)时会远离震中; 达麦—合作断裂位于震中北东侧, 倾向 NE, 断面下延时同样远离震中; 西秦岭北缘断裂位于震中北侧 20 km 外, 断面面倾向南, 倾角为 45°—65°, 虽然断面下延时会靠近震中, 但距离震中仍然较远; 夏河断裂距离震中北侧仅 2.6 km, 断面倾向南, 断面下延时会靠

近震源和震中,震中向深部的投影(震源)可能与断裂相交.从震中与断裂位置、断层产状的几何关系可知,夏河断裂与2019年夏河 $M_{\text{S}}5.7$ 地震可能存在密切关联.

刘旭宙等(2021)通过gCAP方法和P波初动求解夏河地震的震源机制解(表1),并利用双差定位方法对夏河地震序列进行了重新定位(图7a),认为发震断层的节面参数为:走向 312° ,倾角 48° ,滑动角 48° ,该节面与GCMT(2019)和USGS(2020)的节面I大体一致(表1).发震断层无法与地表断裂对应,可能是一条隐伏断裂,该断裂走向为 312° ,在平面上与夏河断裂东段(走向 110°)呈小角度(夹角 22°)斜交;发震断层倾向北东(42°),而夏河断裂倾向 200° (SW),二者在深部可能相交(图7b, c);发震断层和滑动角 48° 与夏河断裂的运动性质(兼具逆冲和左旋走滑)相对应.夏河断裂在地表形成了显著的宏观构造地貌,反映其长期的构造活动历史,并且夏河断裂本身具有较大的规模(夏河断裂东段长39 km),所以该断裂应该是临潭—宕昌断裂与西秦岭北缘断裂之间的一条主干断裂,对区域地形地貌、构造活动起控制作用.据此推测,发震断层向深部延伸时可能归并到夏河断裂上,可能是夏河断裂的一条隐伏分支.因此,2019年夏河 $M_{\text{S}}5.7$ 地震可能是夏河断裂东段派生的一条隐伏分支活动的结果,该分支走向 312° ,倾向 42° ,倾角 48° ,平面上与夏河断裂小角度相交,在深部归并到夏河断裂.

表1 不同研究机构发布的2019年夏河 $M_{\text{S}}5.7$ 地震的震源机制解

Table 1 Focal mechanism solutions of the 2019 Xiahe $M_{\text{S}}5.7$ earthquake issued by different institutions

资料来源	节面 I			节面 II			M_{w}	震源深度 /km
	走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$	走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$		
GFZ (2019)	336	57	84	166	34	99	5.2	10
USGS (2020)	307	37	40	184	66	120	5.3	14
GCMT (2019)	307	48	40	188	62	131	5.3	16.3
刘旭宙等(2021)	312	48	48	185	56	127	5.36	5.9

4.2 夏河断裂的构造归属

本文初步查明了夏河地震周边断裂的几何图像和最新活动特征,发现夏河断裂具有全新世活动,活动性质兼具左旋走滑和逆冲.结合刘旭宙等(2021)判定的发震断层分析夏河地震的发震构造模型,认为发震断层可能是夏河断裂东段派生出的一条隐伏分支(走向 312° ,倾向 42° ,倾角 48°),2019年夏河 $M_{\text{S}}5.7$ 地震可能是夏河断裂东段构造活动的结果.

夏河断裂东段倾向南,断面下延在趋势上可能归并到临潭—宕昌断裂或滑脱面上(图7c).因此,临潭—宕昌断裂西段除了南支(ENE走向)和北支(EW-WNW走向)以外,还包含更北侧的夏河断裂东段.临潭—宕昌断裂整体形成中间收敛、两端发散的几何形态,其西段与东段类似,分散成多条分支断层,但发散形态与东段不同:西段从中部向南、北两侧散开,而东段主要呈现向南的帚状散开.

4.3 西秦岭西端的三维构造模型与夏河地震发震机制

郑文俊等(2013b)在研究2013年岷县漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 地震时指出,临潭—宕昌断裂是西秦岭北缘断裂花状构造的组成部分,且在深部归并到西秦岭北缘断裂上(图7c).唐克—合作—临夏深地震反射剖面(王海燕等, 2014; Gao et al., 2014; Xu et al., 2017)跨越了东昆仑—西秦岭过渡区的西端,其结果显示:东昆仑—西秦岭过渡区的深反射层的变形情况大致可以分成南

北两段,南段的迭部—白龙江断裂带以强烈褶皱变形为主,北段的西秦岭北缘断裂和临潭—宕昌断裂(碌曲—麻当)构成一个相对宽缓的变形带;自东昆仑断裂往北,向北倾的下地壳内反射层清晰可见,而到合作一带,下地壳内反射层变为向南倾,北倾与南倾的分界线贯穿整个地壳,同时将临潭—宕昌断裂与迭部—白龙江断裂系(白龙江断裂和光盖山—迭山断裂)截然分开.因此,临潭—宕昌断裂与西秦岭北缘断裂的关系更加密切,二者对应的上地壳反射层变形也不同于东昆仑—白龙江变形带.南段上地壳的反射层变形由于受到东昆仑断裂的直接影响,活动速率大,褶皱变形强烈,地形发生强烈隆起,河流急剧下切,形成了极高的地形起伏度(张波等, 2018);北段临潭—宕昌断裂受西秦岭北缘边界断裂的直接影响,活动速率相对较小,上地壳反射层相对平缓,仅局部位置发育强烈变形带.夏河地震是临潭—宕昌断裂西段的构造活动直接受到西秦岭北缘断裂控制的反映.

横跨西秦岭西段的两条大地电磁剖面(赵凌强等, 2015)显示西秦岭阶区地壳内形成倒梯形的高电阻体,说明若尔盖盆地和陇中盆地均向西秦岭深部俯冲,两条边界断裂相向俯冲,形成西秦岭深部结构的边界条件.因此,东昆仑断裂和西秦岭北缘断裂从地表和深部均控制了西秦岭阶区的构造变形.前人研究表明,南边界东昆仑断裂两盘的相对运动速率大(van der Woerd *et al.*, 2002; Kirby *et al.*, 2007; Harkins *et al.*, 2010; 李陈侠等, 2011; Ren *et al.*, 2013; 胡朝忠等, 2017),北边界西秦岭北缘断裂两盘的相对速率小(滕瑞增等, 1994; 李传友等, 2007),阶区南北边界左旋速率的差异必然导致阶区内部的变形调整,调整主要发生在阶区内的次级断裂上,变形方式包括断错和褶皱.

在这样的构造环境下,与边界断裂平行的阶区内 WNW 向断裂兼具左旋走滑和逆冲的性质,逐步吸收和分配了边界断裂的差异变形(袁道阳等, 2004).临潭—宕昌断裂西段北支和夏河断裂的运动性质以及夏河地震的发生均与区域构造变形分析一致.由于临潭—宕昌断裂东段的走向发生顺时针旋转,且该段具有左旋走滑的运动分量,因此构造应力容易在该段发生重新分配和快速释放,所以历史上 3 次 M_6-7 地震和多次 M_4-6 中强地震主要发生在临潭—宕昌断裂东段(国家地震局震害防御司, 1995; 郑文俊等, 2005, 2007a, b, 2013a, b; 何文贵等, 2006, 2013).本研究发现临潭—宕昌断裂西段呈张开状,分支断层较多,各分支断层的走向也有差异,一些分支断层未出露地表.与东段类似,西段的构造应力由于没有稳定的积累环境,容易发生重新分配和快速释放,在释放的过程中形成了 2019 年夏河 $M_{5.7}$ 地震.

5 讨论与结论

本文通过全面调查 2019 年甘肃夏河 $M_{5.7}$ 地震震中周边的断裂,发现了夏河活动断裂,在此基础上结合地质和地球物理资料,综合分析并构建了夏河地震的发震构造模型,提出夏河地震可能是夏河断裂东段隐伏分支活动的结果.震中周边完整的断裂图像是深入分析地震构造、建立发震构造建模的基础,也是地震灾害风险普查的关键.

宏观构造地貌和“V”字形法则指示夏河断裂倾向南,是临潭—宕昌断裂西段的分支,而临潭—宕昌断裂在深部归并到西秦岭北缘断裂,所以夏河地震代表临潭—宕昌断裂西段和西秦岭北缘断裂西段的构造活动,是调节西秦岭北缘断裂与东昆仑断裂之间差异构造变形的体现.

2019 年甘肃夏河 $M_{5.7}$ 地震的发生,说明临潭—宕昌断裂的西段与东段一样,也具有孕

育中强地震的能力。下一步我们将深入研究震中周边断裂(尤其是夏河断裂)的几何学和运动学特征,获取震中周边活动断裂的古地震和滑动速率等定量活动参数,完善区域构造模型和地球动力学模型,为区域中长期地震危险性分析提供基础资料。

感谢审稿老师严谨认真的修改意见,笔者获益良多。

参 考 文 献

- 冯希杰,董星宏,刘春,李晋. 2005. 范家坝—临江断裂活动与1879年甘肃武都南8级地震的讨论[J]. *地震地质*, **27**(1): 155–163.
- Feng X J, Dong X H, Liu C, Li J. 2005. Discussion on the activity of Fanjiaba-Linjiang fault and the south Wudu, Gansu Province M8 earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **27**(1): 155–163 (in Chinese).
- 甘肃省地震局. 2019. 甘肃夏河5.7级地震烈度图发布[EB/OL]. [2019-10-31]. <http://www.gsdzj.gov.cn/sjdt/8432.jhtml>.
- Gansu Earthquake Agency. 2019. Gansu Xiahe $M_{\text{S}}5.7$ earthquake intensity map released [EB/OL]. [2019-10-31]. <http://www.gsdzj.gov.cn/sjdt/8432.jhtml> (in Chinese).
- 顾功叙. 1983. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社: 54–166.
- Gu G X. 1983. *Catalogue of Chinese Earthquakes*[M]. Beijing: Science Press: 54–166 (in Chinese).
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录[M]. 北京: 地震出版社: 154–361.
- Department of Earthquake Disaster Prevention, China Earthquake Administration. 1995. *Catalogue of Chinese Historical Strong Earthquakes*[M]. Beijing: Seismological Press: 154–361 (in Chinese).
- 韩竹军, 向宏发, 冉勇康. 2001. 青藏高原东缘礼县—罗家堡断裂带晚更新世以来的活动性分析[J]. *地震地质*, **23**(1): 42–48.
- Han Z J, Xiang H F, Ran Y K. 2001. Activity analysis of Lixian-Luojiapu fault zone in the east boundary of Tibetan Plateau since the Late-Pleistocene[J]. *Seismology and Geology*, **23**(1): 42–48 (in Chinese).
- 何文贵, 周志宇, 马尔曼, 石玉成, 李小峰. 2006. 岷县—卓尼5.0级地震的基本特征和地质背景研究[J]. *地震研究*, **29**(4): 373–378.
- He W G, Zhou Z Y, Ma E M, Shi Y C, Li X F. 2006. Basic features and geological background of the Minxian-Zhuoni $M_{\text{S}}5.0$ earthquake on Sep. 7, 2004[J]. *Journal of Seismological Research*, **29**(4): 373–378 (in Chinese).
- 何文贵, 郑文俊, 王爱国, 刘兴旺, 张波, 刘方斌, 庞炜. 2013. 临潭—宕昌断裂新活动特征与岷县漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 地震关系研究[J]. *地震工程学报*, **35**(4): 751–760.
- He W G, Zheng W J, Wang A G, Liu X W, Zhang B, Liu F B, Pang W. 2013. New activities of Lintan-Dangchang fault and its relations to Minxian-Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(4): 751–760 (in Chinese).
- 侯康明, 雷中生, 万夫岭, 李丽梅, 熊振. 2005. 1879年武都南8级大地震及其同震破裂研究[J]. *中国地震*, **21**(3): 295–310.
- Hou K M, Lei Z S, Wan F L, Li L M, Xiong Z. 2005. Research on the 1879 southern Wudu $M_{\text{S}}8.0$ earthquake and its co-seismic ruptures[J]. *Earthquake Research in China*, **21**(3): 295–310 (in Chinese).
- 胡朝忠, 任金卫, 杨攀新, 熊仁伟, 陈长云, 付俊东. 2017. 东昆仑断裂东端塔藏断裂压剪活动与高原隆升作用讨论[J]. *地质学报*, **91**(7): 1401–1415.
- Hu C Z, Ren J W, Yang P X, Xiong R W, Chen C Y, Fu J D. 2017. Discussion on the compression-shear activity of the Tazang fault in East Kunlun and uplift of plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, **91**(7): 1401–1415 (in Chinese).
- 贾伟, 刘洪春, 柳煜, 袁道阳. 2012. 武都—康县断裂带活动性初步研究[J]. *西北地震学报*, **34**(2): 142–149.
- Jia W, Liu H C, Liu Y, Yuan D Y. 2012. Preliminary study on activity of the Wudu-Kangxian fault zone[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **34**(2): 142–149 (in Chinese).
- 贾伟, 刘洪春, 柳煜, 袁道阳, 邵延秀, 刘兴旺, 张波. 2018. 武都—康县断裂新活动性的滑动速率[J]. *地震工程学报*, **40**(4): 794–801.

- Jia W, Liu H C, Liu Y, Yuan D Y, Shao Y X, Liu X W, Zhang B. 2018. New activity and slip rate of Wudu-Kangxian fault[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **40**(4): 794–801 (in Chinese).
- 李陈侠, 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 陈桂华, 杨虎, 安艳芬, 高翔. 2011. 东昆仑断裂带中东部地震破裂分段性与走滑运动分解作用[J]. *中国科学: 地球科学*, **41**(9): 1295–1310.
- Li C X, Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, Chen G H, Yang H, An Y F, Gao X. 2011. Rupture segmentation and slip partitioning of the mid-eastern part of the Kunlun fault, north Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, **54**(11): 1730–1745.
- 李传友, 张培震, 张剑玺, 袁道阳, 王志才. 2007. 西秦岭北缘断裂带黄香沟段晚第四纪活动表现与滑动速率[J]. *第四纪研究*, **27**(1): 54–63.
- Li C Y, Zhang P Z, Zhang J X, Yuan D Y, Wang Z C. 2007. Late-Quaternary activity and slip rate of the western Qinling fault zone at Huangxianggou[J]. *Quaternary Sciences*, **27**(1): 54–63 (in Chinese).
- 刘兴旺, 袁道阳, 邵延秀, 吴赵. 2015. 甘肃迭部—白龙江南支断裂中东段晚第四纪构造活动特征[J]. *地球科学与环境学报*, **37**(6): 111–119.
- Liu X W, Yuan D Y, Shao Y X, Wu Z. 2015. Characteristics of Late Quaternary tectonic activity in the middle-eastern segment of the southern branch of Diebu-Bailongjiang fault, Gansu[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, **37**(6): 111–119 (in Chinese).
- 刘旭甫, 沈旭章, 何晓慧, 蒲举. 2021. 2019年夏河M5.7级地震余震序列重定位及发震构造研究[J]. *地震地质*, **43** (待发表).
- Liu X Z, Shen X Z, He X H, Pu J. 2021. Relocation of the 28 October 2019 Xiahe earthquake sequence and analysis of seismogenic fault[J]. *Seismology and Geology*, **43** (in Chinese) (in press).
- 滕瑞增, 金瑶泉, 李西候, 苏向州. 1994. 西秦岭北缘断裂带新活动特征[J]. *西北地震学报*, **16**(2): 85–90.
- Teng R Z, Jin Y Q, Li X H, Su X Z. 1994. Recent activity characteristics of the fault zone at northern edge of western Qinling Mt.[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **16**(2): 85–90 (in Chinese).
- 王海燕, 高锐, 李秋生, 李文辉, 侯贺晨, 匡朝阳, 薛爱民, 黄薇漪. 2014. 青藏高原松潘—西秦岭—临夏盆地深地震反射剖面: 采集、处理与初步解释[J]. *地球物理学报*, **57**(5): 1451–1461.
- Wang H Y, Gao R, Li Q S, Li W H, Hou H S, Kuang C Y, Xue A M, Huang W Y. 2014. Deep seismic reflection profiling in the Songpan-west Qinling-Linxia basin of the Qinghai-Tibet Plateau: Data acquisition, data processing and preliminary interpretations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(5): 1451–1461 (in Chinese).
- 杨晓平, 冯希杰, 黄雄南, 宋方敏, 李高阳, 陈献程, 张玲, 黄伟亮. 2015. 礼县—罗家堡断裂晚第四纪活动特征: 兼论1654年礼县8级地震孕震机制[J]. *地球物理学报*, **58**(2): 504–519.
- Yang X P, Feng X J, Huang X N, Song F M, Li G Y, Chen X C, Zhang L, Huang W L. 2015. The Late Quaternary activity characteristics of the Lixian-Luojiabu fault: A discussion on the seismogenic mechanism of the Lixian M8 earthquake in 1654[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(2): 504–519 (in Chinese).
- 俞晶星, 郑文俊, 袁道阳, 庞建章, 刘兴旺, 刘白云. 2012. 西秦岭西段光盖山—迭山断裂带坪定—化马断裂的新活动性与滑动速率[J]. *第四纪研究*, **32**(5): 957–967.
- Yu J X, Zheng W J, Yuan D Y, Pang J Z, Liu X W, Liu B Y. 2012. Late Quaternary active characteristics and slip-rate of Pingding-Huama fault, the eastern segment of Guanggaishan-Dieshan fault zone (west Qinling mountain)[J]. *Quaternary Sciences*, **32**(5): 957–967 (in Chinese).
- 袁道阳, 石玉成, 刘百簏. 1999. 青藏高原东北缘地区晚第四纪水系沉积物年代标尺的初步研究[J]. *地震地质*, **21**(1): 1–8.
- Yuan D Y, Shi Y C, Liu B C. 1999. Study on the time scale of Late Quaternary hydrogenic sediments along the northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Seismology and Geology*, **21**(1): 1–8 (in Chinese).
- 袁道阳, 张培震, 刘百簏, 甘卫军, 毛凤英, 王志才, 郑文俊, 郭华. 2004. 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*, **78**(2): 270–278.
- Yuan D Y, Zhang P Z, Liu B C, Gan W J, Mao F Y, Wang Z C, Zheng W J, Guo H. 2004. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*,

- 78(2): 270–278 (in Chinese).
- 袁道阳, 雷中生, 刘兴旺, 谢虹, 苏琦. 2014. 公元 842 年甘肃碌曲地震考证与发震构造分析 [J]. *地震地质*, **36**(3): 609–624.
- Yuan D Y, Lei Z S, Liu X W, Xie H, Su Q. 2014. Textual research of Luqu earthquake in 842 AD in Gansu Province and analysis of its causative structure[J]. *Seismology and Geology*, **36**(3): 609–624 (in Chinese).
- 张波, 何文贵, 袁道阳, 刘白云, 刘兴旺. 2012. 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*, **32**(1): 136–143.
- Zhang B, He W G, Yuan D Y, Liu B Y, Liu X W. 2012. Late Quaternary activities of the west segment of northern margin of western Qinling fault zone and its western extension[J]. *Earthquake*, **32**(1): 136–143 (in Chinese).
- 张波, 何文贵, 方良好, 庞伟, 赵泽贤, 刘兴旺. 2015. 1936 年甘肃康乐 6% 级地震地表破裂带调查 [J]. *地震研究*, **38**(2): 262–271.
- Zhang B, He W G, Fang L H, Pang W, Zhao Z X, Liu X W. 2015. Surveys on surface rupture phenomena of Gansu Kangle M₆% earthquake in 1936[J]. *Journal of Seismological Research*, **38**(2): 262–271 (in Chinese).
- 张波, 王爱国, 袁道阳, 吴明, 刘小丰, 郑龙. 2018. 基于多源遥感解译和野外验证的断裂几何展布: 以西秦岭光盖山—迭山南麓断裂为例 [J]. *地震地质*, **40**(5): 1018–1039.
- Zhang B, Wang A G, Yuan D Y, Wu M, Liu X F, Zheng L. 2018. Fault geometry defined by multiple remote sensing images interpretation and field verification: A case study from southern Guanggaishan-Dieshan fault, western Qinling[J]. *Seismology and Geology*, **40**(5): 1018–1039 (in Chinese).
- 张波, 田勤俭, 王爱国, 李文巧, 徐岳仁, 高泽民. 2021. 西秦岭临潭—宕昌断裂第四纪最新活动特征 [J]. *地震地质*, **43** (待发表).
- Zhang B, Tian Q J, Wang A G, Li W Q, Xu Y R, Gao Z M. 2021. Studies on new activity of Lintan-Dangchang fault, West Qinling[J]. *Seismology and Geology*, **43** (in Chinese) (in press).
- 赵凌强, 詹艳, 陈小斌, 杨皓, 姜峰. 2015. 西秦岭造山带(中段)及其两侧地块深部电性结构特征 [J]. *地球物理学报*, **58**(7): 2460–2472.
- Zhao L Q, Zhan Y, Chen X B, Yang H, Jiang F. 2015. Deep electrical structure of the central West Qinling orogenic belt and blocks on its either side[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(7): 2460–2472 (in Chinese).
- 郑文俊, 刘小凤, 赵广莹, 马尔曼. 2005. 2003 年 11 月 13 日甘肃岷县 M_{5.2} 地震基本特征 [J]. *西北地震学报*, **27**(1): 61–65.
- Zheng W J, Liu X F, Zhao G K, Ma E M. 2005. Principal features of Minxian M_{5.2} earthquake in Gansu Province, on Nov. 13, 2003[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **27**(1): 61–65 (in Chinese).
- 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 何文贵, 葛伟鹏, 刘兴旺. 2007a. 1573 年甘肃岷县地震史料考证与发震构造探讨 [J]. *中国地震*, **23**(1): 75–83.
- Zheng W J, Lei Z S, Yuan D Y, He W G, Ge W P, Liu X W. 2007a. Textual research on the historical data of the 1573 AD Minxian earthquake in Gansu Province and discussion on its seismogenic structure[J]. *Earthquake Research in China*, **23**(1): 75–83 (in Chinese).
- 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 何文贵, 葛伟鹏, 刘兴旺. 2007b. 1837 年甘肃岷县北 6 级地震考证与发震构造分析 [J]. *地震*, **27**(1): 120–130.
- Zheng W J, Lei Z S, Yuan D Y, He W G, Ge W P, Liu X W. 2007b. Structural research on the 1837 northern Minxian M₆ earthquake in Gansu Province and its causative structure[J]. *Earthquake*, **27**(1): 120–130 (in Chinese).
- 郑文俊, 闵伟, 何文贵, 任治坤, 刘兴旺, 王爱国, 许冲, 李峰. 2013a. 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震震害分布特征及发震构造分析 [J]. *地震地质*, **35**(3): 604–615.
- Zheng W J, Min W, He W G, Ren Z K, Liu X W, Wang A G, Xu C, Li F. 2013a. Distribution of the related disaster and the causative tectonic of the Minxian-Zhangxian M_{6.6} earthquake on July 22, 2013, Gansu, China[J]. *Seismology and Geology*, **35**(3): 604–615 (in Chinese).
- 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 闵伟, 任治坤, 刘兴旺, 王爱国, 许冲, 葛伟鹏, 李峰. 2013b. 甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 M_{6.6} 级地震孕震机制 [J]. *地球物理学报*, **56**(12): 4058–4071.

- Zheng W J, Yuan D Y, He W G, Min W, Ren Z K, Liu X W, Wang A G, Xu C, Ge W P, Li F. 2013b. Geometric pattern and active tectonics in southeastern Gansu Province: Discussion on seismogenic mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_{\text{s}}6.6$ earthquake on July 22, 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(12): 4058–4071 (in Chinese).
- 郑文俊, 袁道阳, 张培震, 俞晶星, 雷启云, 王伟涛, 郑德文, 张会平, 李新男, 李传友, 刘兴旺. 2016. 青藏高原东北缘活动构造几何图像、运动转换与高原扩展[J]. *第四纪研究*, **36**(4): 775–788.
- Zheng W J, Yuan D Y, Zhang P Z, Yu J X, Lei Q Y, Wang W T, Zheng D W, Zhang H P, Li X N, Li C Y, Liu X W. 2016. Tectonic geometry and kinematic dissipation of the active faults in the northeastern Tibetan Plateau and their implications for understanding northeastward growth of the plateau[J]. *Quaternary Sciences*, **36**(4): 775–788 (in Chinese).
- 中国地震台网中心. 2019. 10月28日1时56分在甘肃甘南州夏河县发生5.7级地震[EB/OL]. [2019–10–28]. <http://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx/356645/index.html>.
- China Earthquake Networks Center. 2019. A $M_{\text{s}}5.7$ earthquake occurred in Xiahe County, Gannan Prefecture, Gansu Province at 1:56 on October 28[EB/OL]. [2019–10–28]. <http://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx/356645/index.html> (in Chinese).
- Gao R, Wang H Y, Zeng L S, Zhang J S, Guo T L, Li Q S, Li W H, Li P W, Guan Y. 2014. The crust structures and the connection of the Songpan block and West Qinling orogen revealed by the Hezuo-Tangke deep seismic reflection profiling[J]. *Tectonophysics*, **634**: 227–236.
- GFZ. 2019. GFZ event gfz2019vbqy[EB/OL]. [2019–10–28]. <https://geofon.gfz-potsdam.de/data/alerts/2019/gfz2019vbqy/mt.txt>.
- GCMT. 2019. Global CMT catalog: 201910271756A Qinghai, China[EB/OL]. [2019–10–27]. <http://www.globalcmt.org>.
- Harkins N, Kirby E, Shi X H, Wang E Q, Burbank D, Fan C. 2010. Millennial slip rates along the eastern Kunlun fault: Implications for the dynamics of intracontinental deformation in Asia[J]. *Lithosphere*, **2**(4): 247–266.
- Kirby E, Harkins N, Wang E Q, Shi X H, Fan C, Burbank D. 2007. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault[J]. *Tectonics*, **26**(2): TC2010.
- Ren J J, Xu X W, Yeats R S, Zhang S M. 2013. Millennial slip rates of the Tazang fault, the eastern termination of Kunlun fault: Implications for strain partitioning in eastern Tibet[J]. *Tectonophysics*, **608**: 1180–1200.
- USGS. 2020. $M_{\text{s}}5.3$: 14 km S of Damai, China[EB/OL]. [2020–01–11]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us600063nh/moment-tensor>.
- van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, Meriaux A S, Meyer B, Gaudemer Y, Finkel R C, Caffee M W, Zhao G G, Xu Z Q. 2002. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun fault (Tibet), from ^{26}Al , ^{10}Be , and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology[J]. *Geophys J Int*, **148**(3): 356–388.
- Xu X, Gao R, Dong S W, Wang H Y, Guo X Y. 2017. Lateral extrusion of the northern Tibetan Plateau interpreted from seismic images, potential field data, and structural analysis of the eastern Kunlun fault[J]. *Tectonophysics*, **696/697**: 88–98.
- Zheng W J, Liu X W, Yu J X, Yuan D Y, Zhang P Z, Ge W P, Pang J Z, Liu B Y. 2016. Geometry and Late Pleistocene slip rates of the Liangdang-Jiangluo fault in the western Qinling mountains, NW China[J]. *Tectonophysics*, **687**: 1–13.