https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.044

巴颜喀拉块体内部五道梁-长沙贡玛断裂中段全新世活动及最新古地震证据

梁明剑[1,2],黄飞鹏[3],孙　凯[3],张会平[3,4*],吴微微[1,2],张佳伟[3],杜　方[1],周文英[1,2]

1. 四川省地震局,四川成都　610041
2. 中国地震局成都青藏高原地震研究所,四川成都　610041
3. 中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室,北京　100029
4. 中国地震局地质研究所,西藏拉萨地球物理野外观测站,西藏拉萨　850004

摘　要: 为揭示巴颜喀拉块体内部构造变形特征,基于地震地质调查和新年代学方法研究了五道梁-长沙贡玛中段的最新活动性.地质地貌和探槽揭露的证据显示,五道梁-长沙贡玛断裂中段为全新世活动的左旋走滑断裂,也表明其作为巴颜喀拉块体内部的主干断裂之一,具有孕育和发生强震的构造条件.该断裂中段的最晚一次古地震事件发生在(4 409~4 225)a BP之后,距今可能超过千年;而且近两年来断裂中东段小震活动频繁,2020年4月1日发生了5.6级中强地震,其未来的地震危险性需引起关注.

关键词: 青藏高原;五道梁-长沙贡玛断裂;巴颜喀拉块体;地震危险性;地震学.

中图分类号: P65　　**文章编号:** 1000-2383(2022)03-766-13　　**收稿日期:** 2021-12-11

The Holocene Activity and Its Evidence from Paleoearthquake of the Middle Segment of Wudaoliang-Changshagongma Fault Inside the Bayan Har Block

Liang Mingjian[1,2], Huang Feipeng[3], Sun Kai[3], Zhang Huiping[3,4*], Wu Weiwei[1,2], Zhang Jiawei[3], Du Fang[1], Zhou Wenying[1,2]

1. *Sichuan Earthquake Administration*, *Chengdu*　610041, *China*
2. *Chengdu Institute of the Tibetan Plateau Earthquake Research*, *China Earthquake Administration*, *Chengdu*　610041, *China*
3. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics*, *Institute of Geology*, *China Earthquake Administration*, *Beijing*　100029, *China*
4. *Lhasa National Geophysical Observation and Research Station*, *Institute of Geology*, *China Earthquake Administration*, *Lhasa*　850004, *China*

Abstract: To reveal the internal tectonic deformation characteristics of the Bayan Har block, this paper studies the middle segment of the Wudaoliang-Changshagongma fault activity of the Late Quaternary based on seismic geological survey and new

基金项目: 地震动力学国家重点实验室开放基金课题(No. LED2020B02);西藏拉萨地球物理国家野外科学观测站研究课题(No. NORSLS21-04);四川省地震局地震科技专项项目(Nos. LY2216,LY2217).

作者简介: 梁明剑(1979-),男,高级工程师,博士,主要从事活动构造方面研究.ORCID:0000-0001-5527-7136. E-mail:23800794@qq.com

* **通讯作者:** 张会平,ORCID:0000-0002-3042-4301. E-mail: huiping@ies.ac.cn

引用格式: 梁明剑,黄飞鹏,孙凯,张会平,吴微微,张佳伟,杜方,周文英,2022.巴颜喀拉块体内部五道梁-长沙贡玛断裂中段全新世活动及最新古地震证据.地球科学,47(3):766-778.

Citation: Liang Mingjian, Huang Feipeng, Sun Kai, Zhang Huiping, Wu Weiwei, Zhang Jiawei, Du Fang, Zhou Wenying, 2022. The Holocene Activity and Its Evidence from Paleoearthquake of the Middle Segment of Wudaoliang-Changshagongma Fault Inside the Bayan Har Block. *Earth Science*, 47(3): 766-778.

chronological methods. The geological and geomorphological evidences show that the middle segment of the Wudaoliang-Changshagongma fault is a Holocene left-lateral strike-slip fault, indicating that the fault has tectonic condition for generating strong earthquakes as one of the main faults inside the Bayan Har block. The latest paleoearthquake event on the middle segment of the fault occurred after (4 409—4 225) a BP. The elapsed time may be more than a thousand years. Moreover, small earthquakes have been active on this segment in the past two years. And a *M*5.6 earthquake occurred on it on April 1st, 2020. So, we should pay attention to the strong earthquake risk of the fault in the future.

Key words: Tibet Plateau; the Wudaoliang-Changshagongma fault; the Bayan Har block; the risk of earthquake; seismology.

0　引言

近20年多来，在巴颜喀拉块体及其周边发生了包括2001年昆仑山口8.1级和2008年汶川8.0级地震在内的一系列强震，成为大地震活动最为强烈的地区（图1；邓起东等，2014；袁道阳等，2020）.这使得巴颜喀拉块体及其边界断裂带的活动构造变形、机制及孕震机理等成为大家关注的焦点.但近年来相关研究更多集中在玉树–甘孜–鲜水河断裂带、东昆仑断裂带和龙门山断裂带等主要边界断裂带上（Royden *et al.*, 1997; Meng *et al.*, 2006; Hubbard and Shaw，2009；张培震等，2009；Zhang *et al.*，2010；Fu *et al.*，2011；Xu *et al.*，2016；赵航等，2021）.然而，巴颜喀拉内部2021年5月22日青海玛多7.4级地震的发生表明除了块体边界断裂外，还需重视块体内部的构造变形和孕育强震，并加强巴颜喀拉块体内部不同规模断裂晚第四纪活动性的调查研究，从而加深对该断块内部断裂孕震特征与机制等的认识.

前人已经发现巴颜喀拉块体内部实际上发育了多条NW向的晚第四纪活动断裂，具有孕育和发生7.0级以上大地震的能力（Yan *et al.*，2013；梁明剑等，2014，2020；李陈侠等，2016；詹艳等，2021）.例如，1947年3月17日达日县发生的7¾级地震发生在达日断裂上（梁明剑等，2020），而2021年5月22

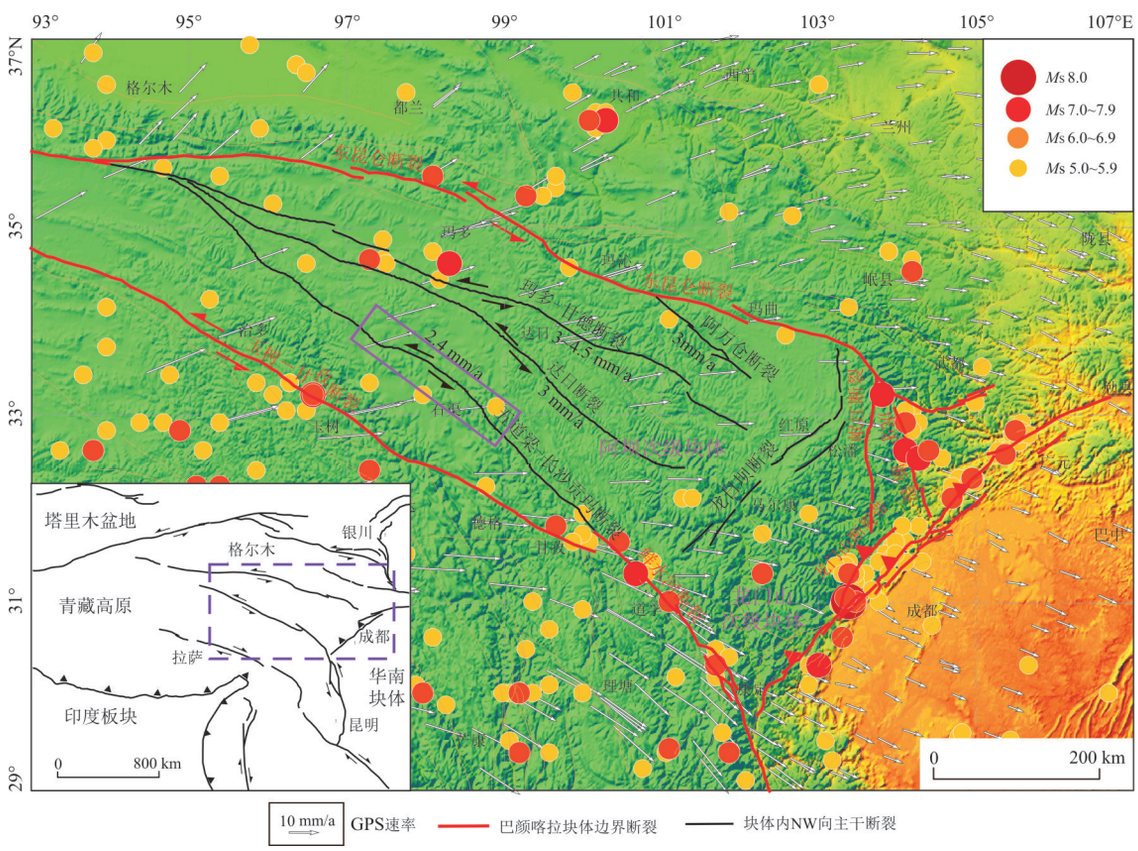

图1　巴颜喀拉块体中东部主要活动断裂及地震活动分布

Fig.1　Distribution of main active faults and seismic activity in the middle-eastern part of the Bayan Har block

断裂数据修改自徐锡伟等（2016）；GPS数据引自Wang and Shen（2020）；紫色实线框为研究断裂段范围

日发生的玛多*M*s7.4地震发生在江错断裂上(张裕明等,1996;盖海龙等,2021;潘家伟等,2021),发震断层都处于巴颜喀拉块体内部.五道梁-长沙贡玛断裂是位于巴颜喀拉块体内部的一条大型走滑断裂,张裕明等(1996)最早系统性阐述巴颜喀拉块体内部的系列NW向走滑断裂时,认为该断裂(其文章称之为清水河断裂)仅西段局部为全新世活动.邓起东等(2007)编制的中国活动构造图(1∶400万)中采用了张裕明等(1996)的研究成果,标注该断裂西北段为全新世活动断裂,其他段落在第四纪活动过但晚更新世以来活动情况不明.吴中海和周春景(2017)在《中国及毗邻海区活动断裂分布图(1∶500万)》中,基于遥感解译结果确定该断裂为具有中等活动性的左旋走滑活动断层.徐锡伟等(2016)在《中国及邻近地区地震构造图》的断裂数据库里面提及该断裂晚第四纪以来没有新活动.区域地质报告里面,认为五道梁-长沙贡玛断裂新近纪的活动最为强烈,对断裂沿线的沉积、岩浆活动、成矿具有控制作用(四川省地质矿产局,1987,区域地质调查报告(长沙贡玛幅、石渠幅):地质部分).最新的Google Earth影像显示,五道梁-长沙贡玛断裂中段在四川石渠县北部控制一新生代盆地的北边界,本文基于高分辨率遥感解译、地震地质调查、无人机摄影测绘、探槽与新年代学方法等手段,对五道梁-长沙贡玛断裂中段进行调查研究后发现,该断裂段具有明显的全新世活动性,并具有古地震记录.希望这一新的发现有助于更好地认识巴颜喀拉地块内部的最新构造变形特征与孕震条件.

1 区域背景

研究区域位于巴颜喀拉块体南部,区内广泛分布浅变质的三叠系砂岩,这套古特提斯洋的碎屑沉积经历了印支、燕山和喜马拉雅多期构造运动(Enkelmann *et al.*, 2007; 张克信等,2007;陈守建等,2011;Ding *et al.*,2013).其构造格架形成于印支期晚期,也是随后燕山与喜马拉雅期地壳运动及构造变形的基础(Roger *et al.*,2010;宋博文等,2020).研究区域位于巴颜喀拉山南、雅砻江北侧,区内发育的河流均属于雅砻江支流,水系多呈放射状,地貌上属于中-浅切割区.

巴颜喀拉块体被龙日坝断裂分割为阿坝次级块体(西部)和龙门山次级块体(东部)(图1;Shen *et al.*,2005;徐锡伟等,2008;Ren *et al.*,2013;陈长云等,2013),龙日坝断裂及其晚第四纪新活动性的发现,改变了人们以往对巴颜喀拉块体运动学和构造变形机制的认识;而且2021年5月22日玛多7.4级和1947年3月17日达日7¾级地震就发生在巴颜喀拉块体内部的断裂上,也说明了块体内部存在着明显的构造变形,并具有孕育和发生大地震的构造条件.除了龙日坝断裂之外,巴颜喀拉块体内部(龙日坝断裂以西)还发育着众多NW向的大型走滑断裂,包括阿万仓断裂、甘德南缘断裂、达日断裂和五道梁-长沙贡玛断裂等,它们是调节各次级块体间构造变形及其相互作用的重要纽带(图1).已有研究表明,阿万仓断裂、玛多-甘德断裂和达日断裂均具有晚第四纪活动性(叶世强和张启富,1993;熊仁伟等,2010;Yan *et al.*,2013;梁明剑等,2014,2020;李陈侠等,2016;詹艳等,2021).其中,阿万仓断裂为全新世活动的左旋走滑断裂,晚第四纪平均滑动速率为3 mm/a,构成了东昆仑断裂东段活动速率分配的重要分支断裂(李陈侠等,2016).玛多-甘德断裂也是全新世活动的左旋走滑断裂,熊仁伟等(2010)获得其甘德段全新世水平滑动速率约3 mm/a.达日断裂也为全新世活动断裂,该断裂中段仍保留有1947年达日7¾级地震长约70 km的地表破裂带(梁明剑等,2020).而五道梁-长沙贡玛断裂研究程度比较薄弱,以前被认为是第四纪早-中期活动断裂(徐锡伟等,2016).研究区内现今5级以上的地震活动主要沿着板块边界活动断裂分布,尤其7级以上强震主要受边界活动断裂的控制;另一部分地震活动则大多发生在块体内部的活动断裂或复杂的构造部位上(图1).

2 全新世断裂活动证据

五道梁-长沙贡玛断裂位于巴颜喀拉块体南部,靠着甘孜-玉树断裂北侧,断裂向南东延伸可能衔接块体南东边界的鲜水河断裂.其中,位于石渠县北长沙贡玛乡的断裂中段线性行迹尤为明显,控制着长沙贡玛新生代盆地的北边界(图2),沿断层的一系列冲沟和冲洪积扇被左旋位错,形成反向槽谷、断塞塘和线性断层陡坎等地貌(图3).

于石渠县阿日扎乡约达一带(图2;经纬度:E98.290 079°、N33.370 272°),断裂发育于古近纪紫红色砂砾岩与早-中更新统土黄色砂砾岩之间(图4a),断裂剖面北侧约50 m处见俄溪河东岸Ⅱ级阶地的砂砾石层受断裂活动的影响产生了倾斜变形(图4b),砂层产状为N46°E/NW∠40°.

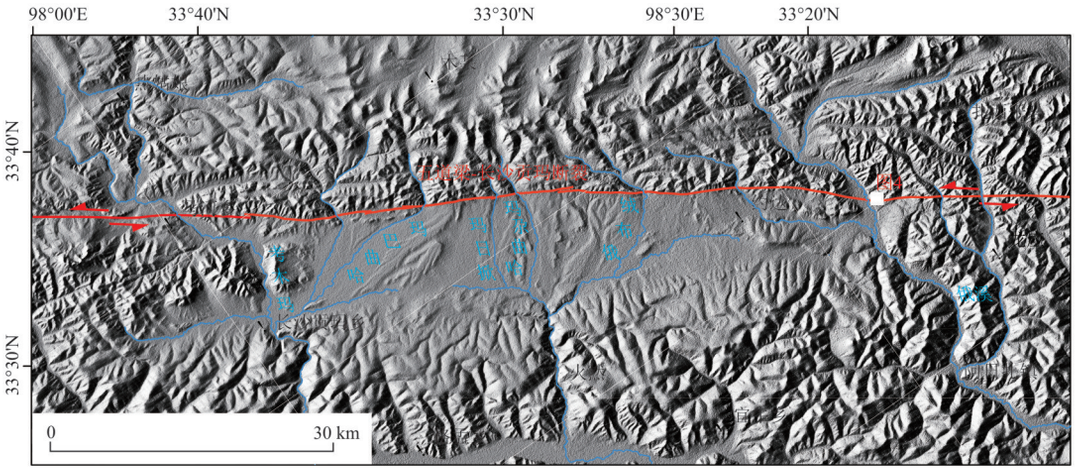

图 2　五道梁-长沙贡玛断裂中段展布

Fig.2　Distribution of the middle segment of the Wudaoliang-Changshagongma fault

底图数据采用 ALOS 12.5 m 的 DEM 数据

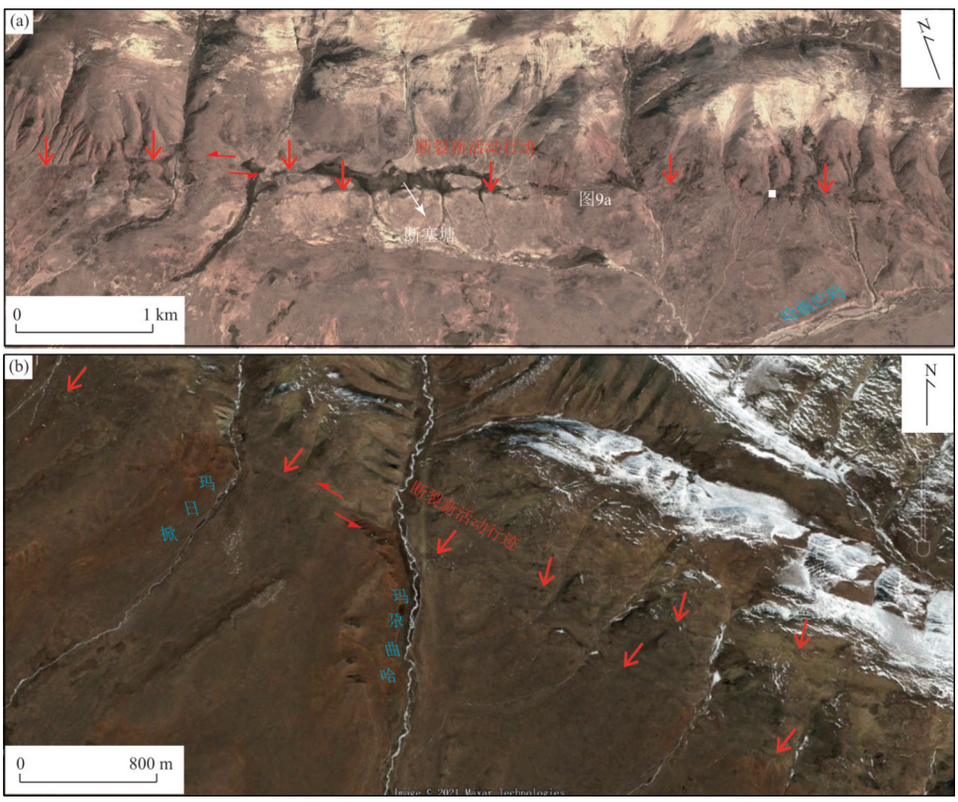

图 3　五道梁-长沙贡玛断裂新活动行迹

Fig.3　New active trails of the Wudaoliang-Changshagongma fault

a. 为哈曲巴玛沟以西，长沙贡玛盆地北缘的五道梁-长沙断裂中段构造地貌；b. 哈曲尕玛沟附近一带的断裂中段构造地貌；底图为 Google Earth 影像

石渠县新荣乡火然村北，五道梁-长沙贡玛断裂控制着长沙贡玛盆地北缘边界，断裂为古近系棕红色泥岩、细砾岩与三叠系绢云母板岩、变质砂岩的分界．于俄布绒河出山口西侧，可见断裂发育于桔红色古近系砂砾岩与三叠系变质砂岩之间（图 5a；经纬度：E98.562 999°、N33.170 976°），形成明显的线性陡坎或断层槽谷．而沟口西侧，断裂切过山前洪积扇，发育良好的线性陡坎，坎下常见断层泉发育（图 5b；经纬度：E98.310 191°、N33.358 201°）．

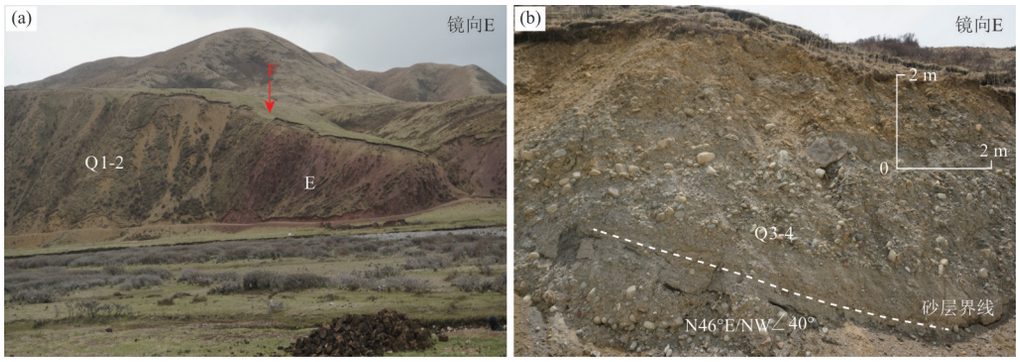

图 4　阿日扎镇约达村一带断裂剖面与Ⅱ级阶地的砂砾石层变形

Fig.4　The fault profile of the Wudaoliang-Changshagongma fault and the deformation of the gravel layer of the Ⅱ-level terrace near Yueda Village, Arizha Town

a.阿日扎镇北俄溪河东岸,五道梁-长沙贡玛断裂发育于砖红色古近系砾岩与早-中更新统砂砾岩之间;b.断层活动导致俄溪河东岸Ⅱ级阶地的砂砾石层倾斜变形

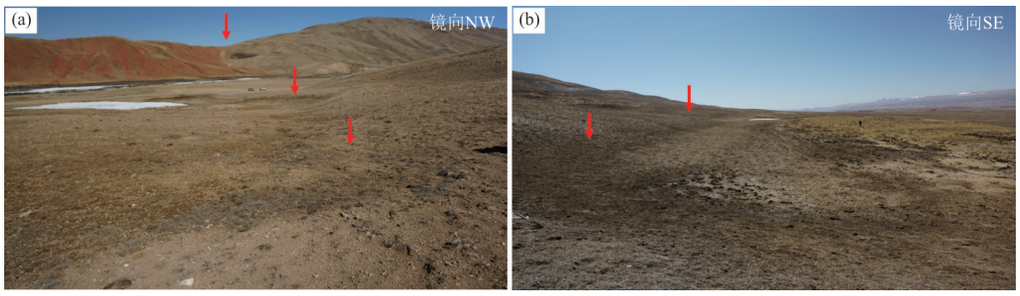

图 5　火然村北部的断层槽谷与断层陡坎地貌

Fig.5　Fault landforms near the north of the Huoran Village

a.俄布绒河出山口西侧,断裂发育于古近系砂砾岩与三叠系板岩、变质砂岩之间;b.俄布绒河出山口东,山前洪积扇上形成的断层陡坎及坎下发育沼泽带

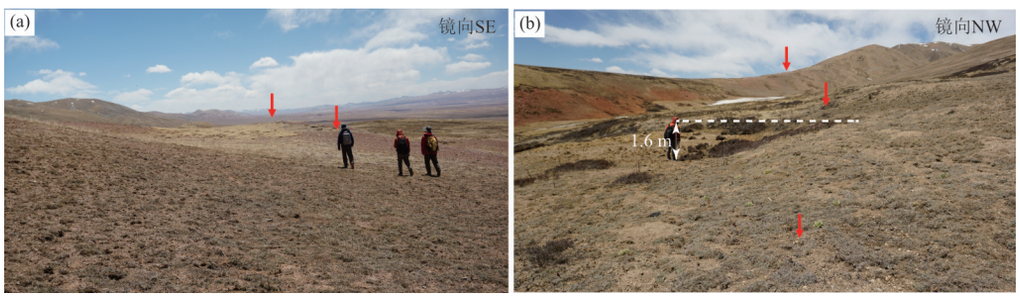

图 6　掀日玛沟口一带的断层陡坎地貌

Fig.6　The fault scarp landforms near the mouth of Xianrimagou river

a.掀日玛沟口附近洪积扇上形成高约 0.3～0.6 m 的反向陡坎;b.照片远处见断裂发育于砖红色古近系砂砾岩与三叠系变质砂岩之间,近处断裂在洪积扇上形成高约 1.6 m 的断层陡坎

五道梁-长沙贡玛断裂往北西延伸,切过掀日玛沟口,在沟口西侧的洪积台地上形成高约 0.3～0.6 m 高的反向陡坎(图 6a;经纬度:E98.273 622°、N33.377 968°),疑似地表破裂带;而在沟口东侧断裂切过不同时期形成的山前洪积扇,形成线性良好的断层陡坎,陡坎高约 0.4～2.5 m,坎下常见断层泉发育(图 6b;经纬度:E98.278 471°、N33.375 135°).

断裂继续向北西延伸至哈曲沟巴玛沟口西的山前冲洪积扇,局部呈多支展布,切过山前洪积扇,形成多条线性陡坎(图 7a;经纬度:E98.153 701°、N33.444 089°).图 7a 位置往南东,断层切过多期山前冲积扇,形成线性反向陡坎、断塞塘等构造地貌

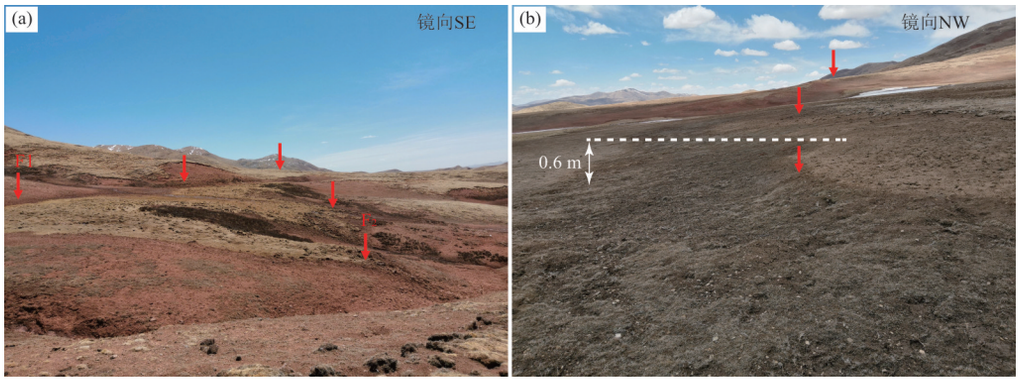

图 7　哈曲巴玛沟口西山前洪积扇上的断层陡坎地貌

Fig.7　The fault scarp landforms on the alluvial fan in the east of the Haqubama river

a.断裂在哈曲巴玛沟口西的山前冲洪积扇分为多支次级断层;b.断裂在最新一期冲洪积扇上形成高约 0.6 m 的断层陡坎

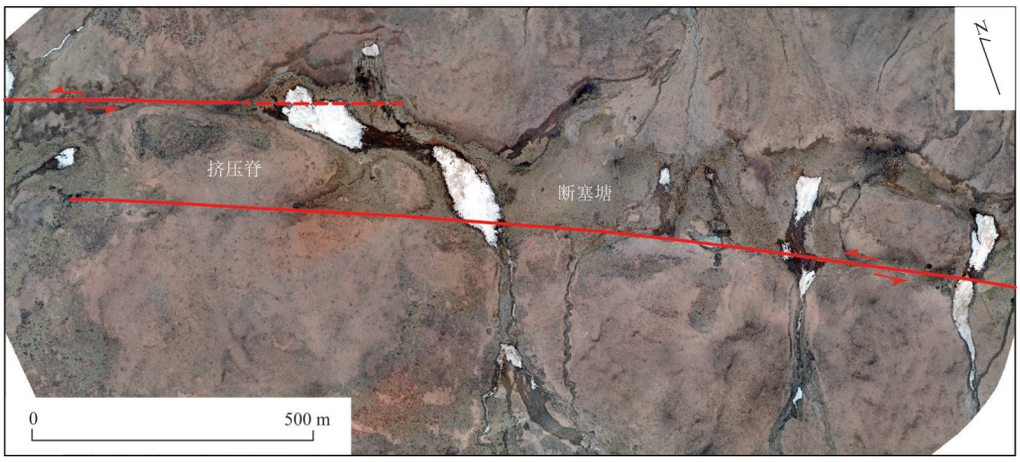

图 8　哈曲巴玛沟口西山前洪积扇的挤压脊与断塞塘

Fig.8　The contrusion ridge and sag pond developed on the alluvial fan near the mouth of the Haqubama river

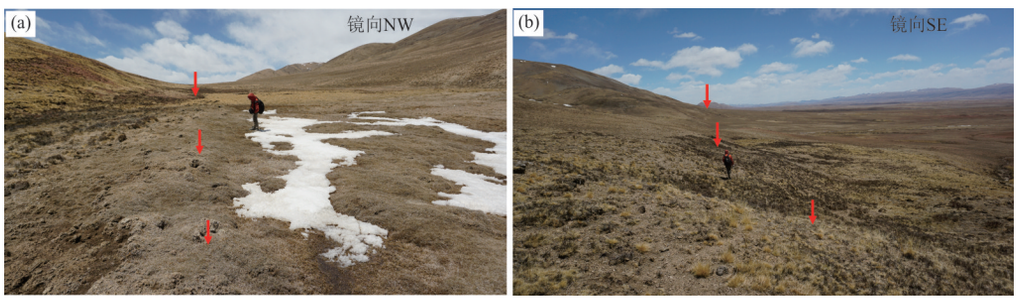

图 9　哈曲巴玛沟东山前洪积扇上的断层陡坎

Fig.9　The fault scarps developed on the alluvial fan near the mouth of the Haqubama river

a.哈曲巴玛沟东的宽断层槽谷中发育有高约 0.2～0.4 m 的反向小陡坎,可能为最新一次地震活动所形成;b.洪积扇上形成的断层线性陡坎

(图 3a),其中断裂穿过一新洪积扇,形成高约 0.6 m 的断层陡坎和宽约 4～5 m 坎下沼泽带(图 7b;经纬度:E98.162 004°、N33.436 618°).该处断裂呈左阶羽列,形成挤压脊地貌,向东则为连续性良好的断层反向陡坎,形成断塞塘地貌(图 8;参考经纬度:E98.163 588°、N33.436 606°).继续向南东,在一山脊形成的大反向槽谷里,见保存有一高约 0.2～0.4 m 的反向小陡坎(图 9a;经纬度:E98.181 201°、N33.427 189°),疑似是最新一次地震地表破裂;该处南侧的老洪积扇上形成一系列高约 3～4 m 的线性

图 10 冲沟被断裂水平位错约 10.5 m

Fig.10　A gully was dislated by the fault with a horizontal displacement of about 10.5 m

a. 哈曲巴玛沟口东山前洪积扇上见一冲沟被断裂左旋位错约 10.5 m；b. 洪积扇的取样照片和地层剖面

表 1　年代样品测试结果

Table 1　The results of the chronological samples

取样编号	实验室编号	样品描述	$\delta^{13}C$(‰)	测试年龄(a BP)	校正年龄(a BP)
WC-C14-01	Beta-607296	炭屑	-24.4	3 840±30	4 405～4 220
WCTC-C14-01	Beta-607291	炭屑	-20.4	12 430±40	15 052～14 782
WCTC-C14-06	Beta-607292	炭屑	-23.4	3 830±30	4 409～4 225

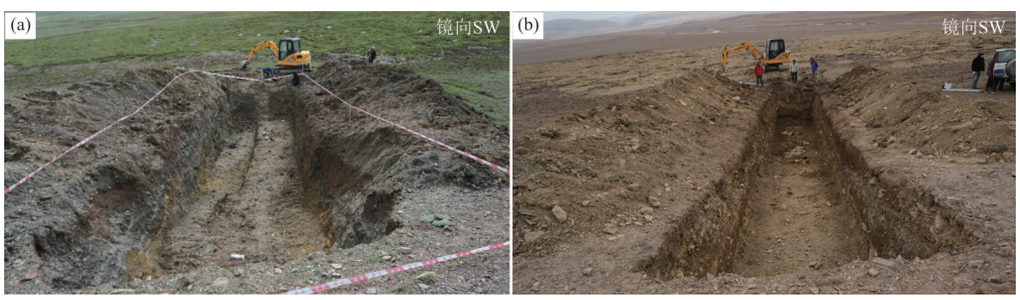

图 11　火然村北山前洪积扇跨断层陡坎开挖 2 个探槽

Fig.11　Two trenches were excavated across the fault scarp on the alluvial fan in the northern of the Huoran Village

a. 探槽 TC1 开挖的照片；b. 探槽 TC2 开挖的照片

断层陡坎(图 9b；经纬度：E98.195 201°、N33.419 406°). 哈曲巴玛沟口东山前洪积扇上见一冲沟被断裂左旋位错约 10.5 m(图 10a；经纬度：E98.146 834°、N33.446 719°)，笔者于洪积扇开挖一槽坑，揭露 2 套地层：层①为黄褐色砂土层，层②为砂砾层，砾石呈棱角状. 在层②取年代样品 WCTC-C14-06，其测试结果为(4 409～4 225)a BP (图 9b，表 1)，由此估算该处的断裂水平滑动速率为 2.4±0.2 mm/a.

3　古地震证据

沿着长沙贡玛盆地北缘对五道梁-长沙贡玛断裂进行追索性地质地貌调查，发现断裂断错了山前最新一期洪积扇，表明断裂具有晚第四纪活动性；而且局部段落保留有很新的反向陡坎和断层行迹，怀疑是最晚一次强震遗留下来的地表破

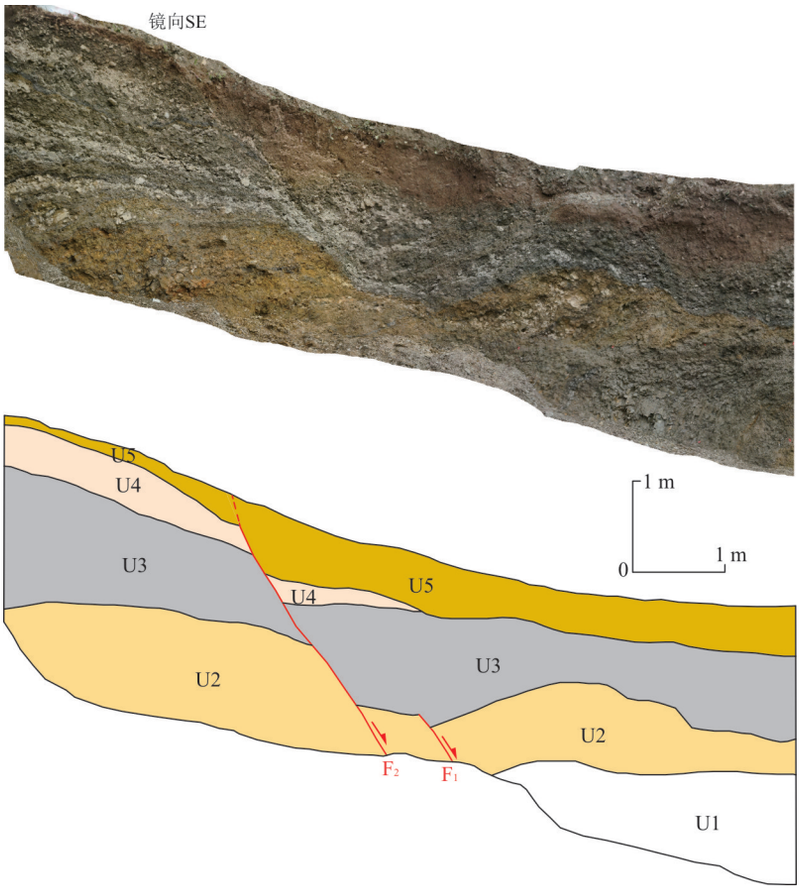

图 12　探槽 TC1 南东壁照片及解释剖面

Fig.12　Photograph and interpretation section of the south-eastern wall of trench TC1

裂带.为了验证是否是最晚一次地震的地表破裂带,笔者在火然村北的盆地北缘开挖了 2 个探槽(图 11),以确定断裂最新活动的情况.

探槽 TC1(经纬度:E98.315 842°,N33.354 686°)南东壁揭示 5 套主要地层(图 12):U1 为基岩,岩性为板岩,风化严重.U2 为土黄色砾石层,砾石磨圆差,呈棱角状,具有明显的水平层理.U3 为深褐色砂砾层,砾石磨圆差,具有一定的层理.U4 为黄褐色砂图层,层理不明显,含有较多的小砾石,砾径一般小于 5 cm.U5 为深褐色砂土层,含丰富植物根系.探槽揭露了 2 次古地震事件:事件Ⅰ中,断层 F_1 和 F_2 断错了地层 U2,并导致地层揉皱变形;事件Ⅱ中,断层 F1 断错了探槽揭露的顶部地层(图 13).

探槽 TC2(经纬度:E98.310 191°、N33.358 201°)北西壁局部揭示 5 套主要地层(图 14):U1 为灰色砾石层,沉积物分选差,砾石呈棱角状.U2 为灰黄色砂砾层,略具层理,含砂层透镜体或条带;其中 U2-2 为青灰色的砂层夹砾石,呈长透镜体状.U3 为褐色砂土层,底部见一层呈长透镜体状的红褐色砂层(U3-1).

图 13　探槽 TC1 南东壁断层 F_2 的局部特征

Fig.13　Photograph showing the characteristic of the F_2 that revealed in the south-eastern wall of trench TC1

U4 为顶部的黑褐色土壤层.探槽 TC2 揭露了 2 次古地震事件:事件Ⅰ为断层断错了地层 U1 和 U2,最为明显的是断层断错了青灰色标志层 U2-2,形成坎前堆积 W(W 为杂色砂砾石堆积),被层 U3 所覆盖(图 14).根据地层 U2-2 和 U3 底部的年代样品

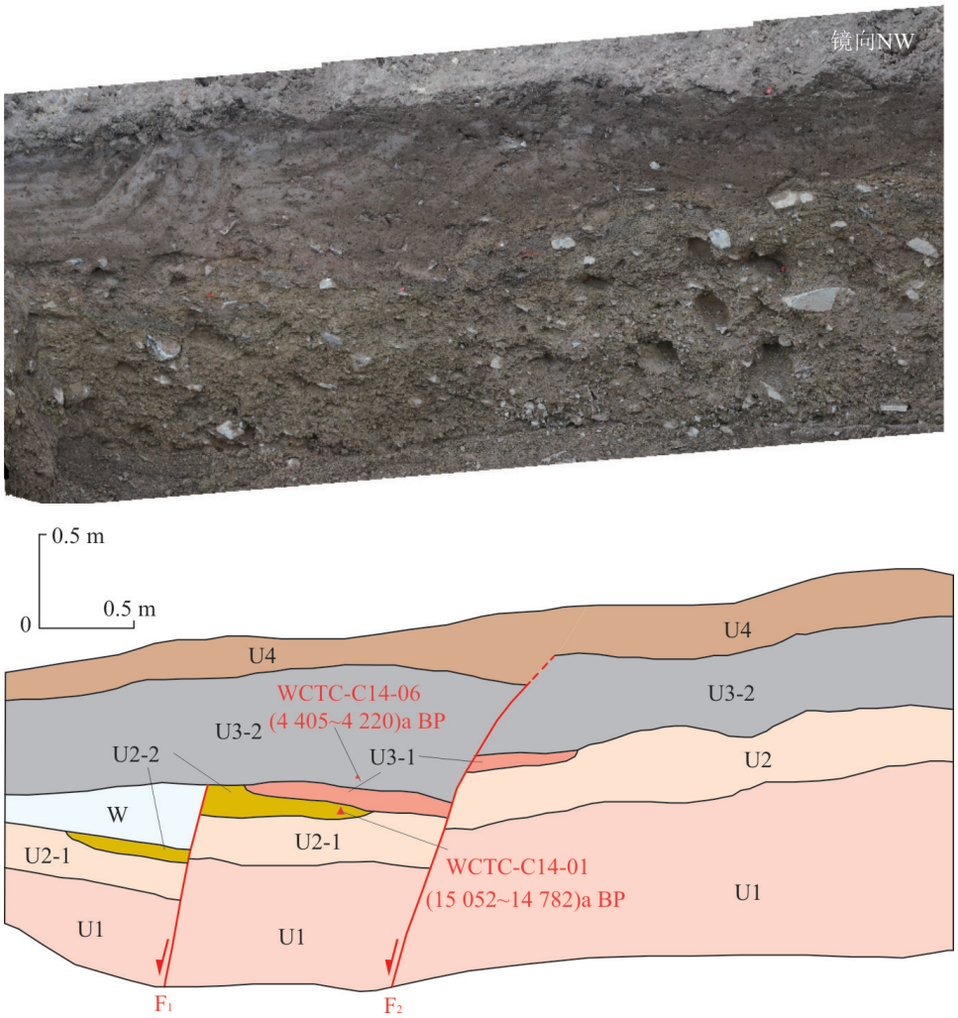

图 14　探槽 TC2 北西壁照片及解释剖面

Fig.14　Photograph and interpretation section of the north-western wall of trench TC2

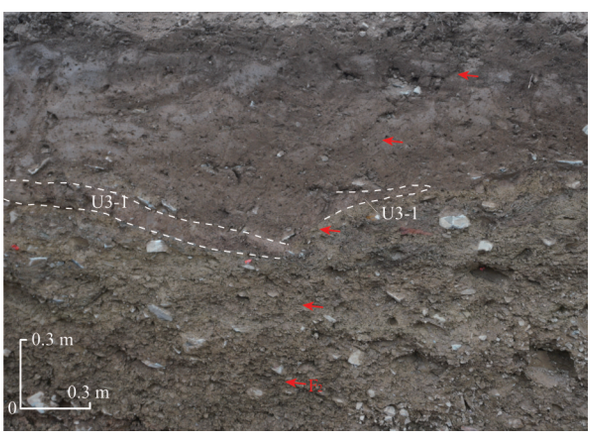

图 15　探槽 TC2 揭露的标志层被断错的局部照片

Fig.15　The partial photo showing the mark layer U3-1 were dislocated by the F_2 that reveal in the trench TC2

WCTC-C14-01 和 WCTC-C14-06 的测试结果，该次地震应发生在（15 052～14 782）至（4 405～4 220）a BP 之间（表 1）. 事件Ⅱ为断层断错了顶部地层 U3，尤其砖红色的标志层 U3-1 被断错（图 15），根据 WCTC-C14-06 的测年结果，该次事件应发生在（4 405～4 220）a BP 之后，也表明了五道梁-长沙贡玛断裂具有全新世活动性.

4　讨论

巴颜喀拉块体作为青藏高原内部最具代表性的活动块体之一，是研究青藏高原活动地块绕喜马拉雅东构造结旋转和地壳物质向南东方向有限挤出过程中晚第四纪构造变形和强震活动的典型地区之一（Tapponnier *et al.*, 1982; Zhang *et al.*, 2004; Burchfiel *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2016; 闻学泽，2018）. 目前，巴颜喀拉块体的相关研究主要集中在边界断裂带上，而关于块

体内部断裂的研究甚少．但已有的研究表明，巴颜喀拉块体内部的阿万仓断裂、玛多-甘德断裂和达日断裂也均具有全新世活动性，都为左旋走滑断裂，断裂的左旋走滑速率也都在 3 mm/a 左右（Yan *et al.*，2013；梁明剑等，2014，2020；李陈侠等，2016；詹艳等，2021）．张裕明等（1996）最早发现五道梁-长沙贡玛断裂西段局部具有全新世活动性，并不排除西段均具有全新世活动性的可能，也许是因为块体内部这些主干断裂活动强度和滑动速率相比块体边界断裂（如东昆仑断裂、甘孜-玉树断裂和鲜水河断裂）要小，而且强震复发间隔要长，所以断裂新活动行迹保留不完整．笔者基于地震地质调查和新年代学方法等手段，发现了五道梁-长沙贡玛断裂中段控制着长沙贡玛盆地生成与演化，沿断层一系列的冲沟和冲洪积扇被左旋位错，形成反向槽谷、断塞塘和线性断层陡坎等微地貌，构造地貌调查与探槽揭露的证据均表明断裂具有全新世活动性，也进一步佐证了五道梁-长沙贡玛断裂具有全新世活动的可能性．除此之外，本文还初步获得五道梁-长沙贡玛断裂中段的水平滑动速率为 2.4±0.2 mm/a，速率值与阿万仓断裂、玛多-甘德断裂、达日断裂的滑动速率相当，如果巴颜喀拉块体内部这几条 NW 向主干断裂都具有全新世活动性的话，可能反映它们分割了巴颜喀拉块体，相对均匀地分配了块体内部的构造变形，并将块体的变形向东传递．当然，仍需要更多的证据去证明这些 NW 向的大型走滑断裂是否已经将巴颜喀拉块体分解成更多次级的活动块体，但这些断裂明显的晚第四纪活动性说明它们在巴颜喀拉块体、乃至青藏高原东缘地区的构造变形中发挥着重要的作用．

石渠探槽 TC2 揭露五道梁-长沙贡玛断裂中段最新一次古地震时间发生在（4 405～4 220）a BP 之后，虽然未限定事件的时间上限，但其离逝时间可能超过千年．五道梁-长沙贡玛断裂中段全新世活动最为明显的段落长逾 120 km，根据经验公式（Wells and Coppersmith，1994）该断层段如果全段破裂的话，可发生 7.5 级左右的强震，能产生约 5 m 左右的水平同震位错，结合断裂的水平滑动速率为 2.40 mm/a，笔者估算其强震的平均复发间隔约为 2 000 a 左右．而且，近两年来五道梁-长沙贡玛断裂中段小震活动频繁，2020 年还发生了 5.6 级中强地震，因此该断裂未来的地震危险性值得关注．

5　结论

（1）五道梁-长沙贡玛为巴颜喀拉块体内部一条大型的左旋走滑断裂，在石渠北边断裂控制一新生代盆地的北边界，沿断层一系列的冲沟和冲洪积扇被左旋位错，形成反向槽谷、断塞塘和线性断层陡坎等微地貌，地质地貌与古地震的证据表明该断裂具有全新世活动性．

（2）巴颜喀拉块体内部阿万仓、玛多-甘德、达日和五道梁-长沙贡玛断裂等 NW 向的主干断裂均具有全新世活动性，其滑动速率约为 3 mm/a，可能相对均匀地分配了巴颜喀拉块体的内部构造变形．

（3）五道梁-长沙贡玛断裂中段最新一次古地震时间发生在（4 405～4 220）a BP 之后，离逝时间可能超过千年；而且近 2 年五道梁-长沙贡玛断裂中段小震活动频繁，2020 年还发生了 5.6 级中强地震，该断裂未来的地震危险性需引起关注．

References

Burchfiel, B. C., Royden, L. H., van der Hilst, R. D., et al., 2008. A Geological and Geophysical Context for the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 18(7): 4. https://doi.org/10.1130/gsatg18a.1

Chen, C. Y., Ren, J. W., Meng, G. J., et al., 2013. Division, Deformation and Tectonic Implication of Active Blocks in the Eastern Segment of Bayan Har Block. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(12): 4125－4141 (in Chinese with English abstract).

Chen, S. J., Li, R. S., Ji, W. H., et al., 2011. Lithostratigraphy Character and Tectonic-Evolvement of Permian-Trias in the Bayankala Tectonic Belt. *Earth Science*, 36(3): 393－408 (in Chinese with English abstract).

Deng, Q. D., Cheng, S. P., Ma, J., et al., 2014. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(7): 2025－2042 (in Chinese with English abstract).

Deng, Q. D., Ran, Y. K., Yang, X. P., 2007. Distribution Map of Active Faults in China (1:4 000 000). Seismological Press, Beijing (in Chinese).

Ding, L., Yang, D., Cai, F. L., et al., 2013. Provenance Analysis of the Mesozoic Hoh-Xil-Songpan-Ganzi Turbidites in Northern Tibet: Implications for the Tectonic Evolution of the Eastern Paleo-Tethys Ocean. *Tectonics*, 32(1): 34—48. https://doi. org/10.1002/tect.20013

Enkelmann, E., Weislogel, A., Ratschbacher, L., et al., 2007. How was the Triassic Songpan - Ganzi Basin Filled? A Provenance Study. *Tectonics*, 26(4): TC4007. https://doi.org/10.1029/2006tc002078

Fu, B. H., Shi, P. L., Guo, H. D., et al., 2011. Surface Deformation Related to the 2008 Wenchuan Earthquake, and Mountain Building of the Longmen Shan, Eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 805—824. https://doi. org/10.1016/j.jseaes.2010.11.011

Gai, H. L., Yao, S. H., Yang, L. P., et al., 2021. Characteristics and Causes of Coseismic Surface Rupture Triggered by the "5.22" M_S 7.4 Earthquake in Maduo, Qinghai, and Their Significance. *Journal of Geomechanics*, 27(6): 899—912 (in Chinese with English abstract).

Hubbard, J., Shaw, J. H., 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan (*M*w 7.9) Earthquake. *Nature*, 458(7235): 194—197. https://doi.org/10.1038/nature07837

Li, C. X., Yuan, D. Y., Yang, H., et al., 2016. The Tectonic Activity Characteristics of Awancang Fault in the Late Quaternary, the sub-Strand of the Eastern Kunlun Fault. *Seismology and Geology*, 38(1): 44—64 (in Chinese with English abstract).

Liang, M. J., Yang, Y., Du, F., et al., 2020. Late Quaternary Activity of the Central Segment of the Dari Fault and Restudy of the Surface Rupture Zone of the 1947 *M*7¾ Dari Earthquake, Qinghai Province. *Seismology and Geology*, 42(3): 703—714 (in Chinese with English abstract).

Liang, M. J., Zhou, R. J., Yan, L., et al., 2014. The Relationships between Neotectonic Activity of the Middle Segment of Dari Fault and Its Geomorphological Response, Qinghai Province, China. *Seismology and Geology*, 36(1): 28—38 (in Chinese with English abstract).

Meng, Q. R., Hu, J. M., Wang, E., et al., 2006. Late Cenozoic Denudation by Large - Magnitude Landslides in the Eastern Edge of Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(1—2): 252—267. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.12.008

Pan, J. W., Bai, M. K., Li, C., et al., 2021. Coseismic Surface Rupture and Seismogenic Structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) M_S7.4 Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1655—1670 (in Chinese with English abstract).

Ren, J. J., Xu, X. W., Yeats, R. S., et al., 2013. Latest Quaternary Paleoseismology and Slip Rates of the Longriba Fault Zone, Eastern Tibet: Implications for Fault Behavior and Strain Partitioning. *Tectonics*, 32(2): 216—238. https://doi.org/10.1002/tect.20029

Roger, F., Jolivet, M., Malavieille, J., 2010. The Tectonic Evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and Adjacent Areas from Proterozoic to Present: A Synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254—269. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.008

Royden, L. H., Burchfiel, B. C., King, R. W., et al., 1997. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet. *Science*, 276(5313): 788—790. https://doi. org/10.1126/science.276.5313.788

Shen, Z. K., Lü, J. N., Wang, M., et al., 2005. Contemporary Crustal Deformation around the Southeast Borderland of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110: B11409. https://doi. org/10.1029/2004jb003421

Song, B. W., Zhang, K. X., Xu, Y. D., et al., 2020. Paleogene Tectonic-Stratigraphic Realms and Sedimentary Sequence in China. *Earth Science*, 45(12): 4352—4369 (in Chinese with English abstract).

Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., et al., 1982. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, 10(12): 611. https://doi. org/10.1130/0091 - 7613(1982)10611: petian>2.0.co;2

Wang, M., Shen, Z. K., 2020. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774. https://doi. org/10.1029/2019jb018774

Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974—1002

Wen, X. Z., 2018. The 2008 Wenchuan, 2013 Lushan and 2017 Jiuzhaigou Earthquakes, Sichuan, in the last more than one Thousand Years of Rupture History of the Eastern Margin of the Bayan Har Block. *Acta Seismologica Sinica*, 40(3): 255—267 (in Chinese with

English abstract).

Wu, Z. H., Zhou, C. J., 2017. Distribution Map of Active Faults in China and Its Adjacent Sea Area (1∶5 000 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Xiong, R. W., Ren, J. W., Zhang, J. L., et al., 2010. Late Quaternary Active Characteristics of the Gande Segment in the Maduo-Gande Fault Zone. *Earthquake*, 30(4): 65−73 (in Chinese with English abstract).

Xu, X. W., Han, Z. J., Yang, X. P., et al., 2016. Seismotectonic Map in China and Its Adjacent Regions. Seismological Press, Beijing (in Chinese).

Xu, X. W., Wen, X. Z., Chen, G. H., et al., 2008. Discovery of the Longriba Fault Zone in Eastern Bayan Har Block, China and Its Tectonic Implication. *Science in China* (*Series D*), 38(5):529−542 (in Chinese).

Xu, X., Keller, G. R., Gao, R., et al., 2016. Uplift of the Longmen Shan Area in the Eastern Tibetan Plateau: An Integrated Geophysical and Geodynamic Analysis. *International Geology Review*, 58(1): 14−31. https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1055595

Yan, L., Li, Y., Zhao, G.H., et al., 2013. Study on the Late Quaternary Activity Characteristics and its Tectonic Geomorphology Response of the middle Segment of Dari Fault in the Northeastern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica* (*English Edition*), 87(Suppl.): 403−405.

Ye, S. Q., Zhang, Q. F., 1993. Study of the Seismic Structure (M=7¾, 1947) with Remote Sensing Method in Dari, Qinghai. *Remote Sensing for Land & Resources*, 5(2): 28−34 (in Chinese with English abstract).

Yuan, D. Y., Feng J. G., Zheng, W. J., et al., 2020. Migration of Large Earthquakes in Tibetan Block Area and Disscussion on Major Active Region in the Future. *Seismology and Geology*, 42(2): 297−315 (in Chinese with English abstract).

Zhan, Y., Liang, M. J., Sun, X. Y., et al., 2021. Deep Structure and Seismogenic Pattern of the 2021.5.22 Madoi(Qinghai) M_s7.4 Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(7): 2232−2252 (in Chinese with English abstract).

Zhang, K. X., Wang, G. C., Chen, F. N., et al., 2007. Coupling between the Uplift of Qinghai-Tibet Plateau and Distribution of Basins of Paleogene-Neogene. *Earth Science*, 32(5): 583−597 (in Chinese with English abstract).

Zhang, P. Z., Shen, Z. K., Wang, M., et al., 2004. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data. *Geology*, 32(9): 809−812. https://doi.org/10.1130/g20554.1

Zhang, P. Z., Wen, X. Z., Shen, Z. K., et al., 2010. Oblique, High-Angle, Listric-Reverse Faulting and Associated Development of Strain: The Wenchuan Earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38: 353−382. https://doi. org/10.1146/annurev - earth - 040809-152602

Zhang, P. Z., Wen, X. Z., Xu, X. W., et al., 2009. Tectonic Model of the Great Wenchuan Earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Chinese Science Bulletin*, 54(7): 944−953 (in Chinese).

Zhang, Y. M., Li, M. F., Meng, Y. Q., et al., 1996. Research on Fault Activities and Their Seismogeological Implication in Bayan Har Mountain Area. *Research on Active Fault*, 5: 154−171 (in Chinese with English abstract).

Zhao, H., Li, D. H., Zhao, J., et al., 2021. Exploration for the Southern Segment of the Ganzi-Yushu Fault Zone Using Shallow Seismic Reflection Method. *Earthquake Research in Sichuan*, (1): 6−11 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈长云,任金卫,孟国杰,等,2013. 巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义. 地球物理学报,56(12): 4125−4141.

陈守建,李荣社,计文化,等,2011. 巴颜喀拉构造带二叠-三叠纪岩相特征及构造演化. 地球科学,36(3): 393−408.

邓起东,程绍平,马冀,等,2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. 地球物理学报,57(7): 2025−2042.

邓起东,冉勇康,杨晓平,等,2007. 中国活动构造图(1:400万). 北京:地震出版社.

盖海龙,姚生海,杨丽萍,等,2021. 青海玛多"5•22"M_s7.4级地震的同震地表破裂特征、成因及意义. 地质力学学报,27(6): 899−912.

李陈侠,袁道阳,杨虎,等,2016. 东昆仑断裂带东段分支断裂:阿万仓断裂晚第四纪构造活动特征. 地震地质,38(1): 44−64.

梁明剑,杨耀,杜方,等,2020. 青海达日断裂中段晚第四纪活动性与1947年M7¾地震地表破裂带再研究. 地震地质,42(3): 703−714.

梁明剑,周荣军,闫亮,等,2014. 青海达日断裂中段构造活动与地貌发育的响应关系探讨. 地震地质,36(1): 28−38.

潘家伟,白明坤,李超,等,2021.2021年5月22日青海玛多M_s7.4地震地表破裂带及发震构造. 地质学报,95(6):

1655－1670.

宋博文，张克信，徐亚东，等，2020. 中国古近纪构造-地层区划及地层格架. 地球科学，45(12): 4352－4369.

闻学泽，2018. 巴颜喀拉块体东边界千年破裂历史与2008年汶川、2013年芦山和2017年九寨沟地震. 地震学报，40(3): 255－267.

吴中海，周春景，2017. 中国及毗邻海区活动断裂分布图(1∶500万). 北京：地质出版社.

熊仁伟，任金卫，张军龙，等，2010. 玛多-甘德断裂甘德段晚第四纪活动特征. 地震，30(4): 65－73.

徐锡伟，韩竹军，杨晓平，等，2016. 中国及邻近地区地震构造图. 北京：地震出版社.

徐锡伟，闻学泽，陈桂华，等，2008. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义. 中国科学(D辑)，38(5): 529－542.

叶世强，张启富，1993. 青海达日1947年7¾级地震构造的遥感研究. 国土资源遥感，5(2): 28－33.

袁道阳，冯建刚，郑文俊，等，2020. 青藏地块区大地震迁移规律与未来主体活动区探讨. 地震地质，42(2): 297－315.

詹艳，梁明剑，孙翔宇，等，2021. 2021年5月22日青海玛多M_s7.4地震深部环境及发震构造模式. 地球物理学报，64(7): 2232－2252.

张克信，王国灿，陈奋宁，等，2007. 青藏高原古近纪-新近纪隆升与沉积盆地分布耦合. 地球科学，32(5): 583－597.

张培震，闻学泽，徐锡伟，等，2009. 2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式. 科学通报，54(7): 944－953.

张裕明，李闽峰，孟勇琦，等，1996. 巴颜喀拉山地区活动断层活动性研究及其地震地质意义. 活动断裂研究，5: 154－171.

赵航，李大虎，赵晶，等，2021. 甘孜-玉树断裂南段浅层地震反射波法探测. 四川地震，(1): 6－11.