东昆仑断裂东端塔藏断裂压剪活动与 高原隆升作用讨论

胡朝忠1),任金卫1),杨攀新1),熊仁伟1),陈长云2),付俊东3)

1) 中国地震局地震预测重点实验室,地震预测研究所,北京,100036;

2)中国地震局第一监测中心,天津,300180;3)山东省地震局,济南,250014

内容提要:塔藏断裂位于东昆仑断裂带东端,横贯青藏高原东缘的高原内部和边缘,因属于巴颜喀拉块体向东 南运移的东北侧边界带,其晚第四纪活动性质和滑动速率对认识青藏高原的构造变形模式极端重要。本文综合 SPOT、中巴资源卫星等高分辨率遥感影像解译,利用冲沟、山脊、断错河流阶地、断层槽谷、反向坎等地震地貌的识 别,开展详细的断错地层、地貌研究和系列年代学样品采集测试,对塔藏断裂的精细几何展布、晚第四纪活动性质、 滑动速率进行详细分析。塔藏断裂自西向东可分为青藏高原内部的罗叉段、青藏高原边缘的东北村段和马家磨 段,各段走向依次为113°、142°、130°,逐渐向南偏转,晚第四纪的活动表现为分段性和多期性。罗叉段全新世以左 旋剪切走滑为主兼挤压活动,左旋走滑速率为2.43~2.89 mm/a 左右,最新地表断错事件发生在0.66±0.04ka BP 以来,断层面表现出走滑断层的近垂直和张裂并发育充填楔的典型特征,塔藏断裂为东昆仑断裂系东延的主要断 裂之一;马家磨段也为全新世活动断层,距今9.0±0.8ka 的地层被断错,而且断层面北倾达58°。因此,对比分析 塔藏断裂各段活动特征可见,西部以水平剪切运动为主,而东部走滑运动分量逐渐变弱,断面北倾、北盘上升导致 的垂向分量逐渐变大。东昆仑断裂带及塔藏断裂晚第四纪走滑速率向东规则减小,并转化为横向逆冲作用和高原 隆升,符合"叠瓦状逆冲转换—有限挤出模型"的特征。

关键词:塔藏断裂;东昆仑断裂带;滑动速率;压剪活动;有限挤出模型

东昆仑断裂带玛曲以西的展布、地震地貌、走滑 速率、古地震、地层等研究取得了众多成果(Ren Jinwei et al., 1993, 1999; Seismological Bureau of Qinghai Province, 1999; Van der Woerd et al., 1998; Xu Xiwei et al., 2002; Li Haibing et al., 2004; Ma Yinsheng et al., 2005; Li Chunfeng et al., 2005; Kirby et al., 2007; Li Chenxia et al., 2009; Li Jian et al., 2016; Chen Yu et al., 2016; Xu Zhiqin et al., 2016)。但对东昆仑断裂带东延塔藏 断裂争论极大:Xu Xiwei et al. (2005)研究认为在 玛曲东部黄河大拐弯附近的东昆仑断裂玛曲段和岷 山段(塔藏断裂)呈左旋左阶斜列,形成一个宽达数 十千米的拉分盆地,塔藏断裂由多条走向向 SE 方 向逐渐偏转的次级断层斜列组成,在LANDSAT-7、 8 波段的卫星影像上可清晰见到断层迹线左旋切割 九寨沟约 500m; Kirby et al. (2007)研究认为塔藏

断裂罗叉村北全新世以来河流阶地地层未被错断, 活动速率小于 1mm/a, 为全新世不活动断裂; Zhang Junlong et al. (2014)认为左旋走滑速率为 7.68~ 9.37mm/a, 垂直滑动速率为 0.7~0.9mm/a, 与西 侧各段的活动速率基本一致; Fu Jundong et al. (2012)结合玛曲段的速度衰减梯度、滑动速率及玛 曲与罗叉之间的距离,推测塔藏断裂罗叉段的水平 滑动速率为 3.01mm/a; Ren Junjie et al. (2013)通 过阶地断错认为滑动速率为 1.5~3.2mm/a,东段 表现为向南西方向的逆冲,全新世平均滑动速率向 东逐渐降低,从1~1.5mm/a 到 0.3mm/a,到东端 的塔藏镇仅表现为全新世一级河流阶地中地层的褶 皱变形;Hu Chaozhong et al. (2011,2014)通过断错 地层、地貌分析发现塔藏断裂由青藏高原内部的水 平运动到高原边缘垂向运动分量不断变大,而且到 塔藏镇再往东部延伸的马家磨村附近也可见全新世

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41302171、41272233)、国家重点基础研究发展计划(编号 2008CB42570)和地震预测研究所基本 科研业务经费(编号 2017IES0302、2017IES010204)联合资助成果。

收稿日期:2016-09-05;改回日期:2016-12-23;责任编辑:周健。

作者简介:胡朝忠,男,1985年生。助理研究员,从事活动构造和地震中长期危险区研究。Email: huchaozhong2005@126.com。通讯作者:任金卫,男,1957年生。研究员,从事现代地壳运动研究。Email:ren@ies.ac.cn。



图 1 研究区位置索引图(A)和塔藏断裂几何展布图(B)

Fig. 1 The index schemes of research area (A) and geometrical distribution map of the Tazang fault (B)
LRBF-龙日坝断裂;XF-鲜水河断裂;LMSF-龙门山断裂;TFL-塔藏断裂罗叉段;TFD-塔藏断裂东北段;TFT-塔藏断裂塔藏段;
TFM-塔藏断裂马家磨段;DF-东昆仑断裂;YF-玉树断裂;AF-安宁河断裂;BF-碧口断裂;图 1B 据数字高程模型分析,
遥感影像解译,区域地质图,野外考察;底图为 ASTER DEM 数据

LRBF—Longriba fault; XF—Xianshuihe fault; LMSF—Longmen Mountain fault; TFL—Tazang fault Luocha segment; TFD—Tazang fault Dongbei segment; TFT—Tazang fault Tazang segment; TFM—Tazang fault Majiamo segment; DF—Dongkunlun fault; YF—Yushu fault; AF—Anninghe fault; BF—Bikou fault; Fig. 1B according to the analysising of the digital elevation model and interpretation of remote sensing image and regional geological map and field investigation; Base map form ASTER DEM data

地层被断错,该点断面北倾,北盘上升,南盘相对下降(图1)。

由于不同研究者采用的河流阶地断错模型不一 致,即使对同一场点的断错现象也认识完全不同,导 致从断错量到断错量对应的起始年代认识均不一 致,最终导致对塔藏断裂活动的定量参数认识差异 如此巨大,而性质、速率的判定更直接影响对于区域 构造变形模式的认识。显然,塔藏断裂的活动速率 和活动性质及其空间变化,急需深入分析,重新厘 定。本文采用与 Ren Jinwei et al. (1999)、He Wengui et al. (2006)研究东昆仑断裂、Wang Ping et al. (2011)研究广从断裂、Tang Yuan et al. (2010)研究川滇西部上新世以来构造地貌、Xu Xiwei et al. (2005)和 Pan Jiawei et al. (2015)研究 阿尔金断裂等相一致的构造地貌、地层单元断错方 法,即结合高分辨率遥感影像和高精度 DEM 数据 的活动断裂解译和活动断裂的野外地质地貌详细考 察、研究,对被断错的地层、地貌单元开展系列年代 学样品采集、测试,尽可能详细地确定各单元的起始 年代、终积年代,针对重点场点的高分辨率遥感影像 开展地貌单元划分和包括阶地前缘、水系等线性标 志的细致勾勒,分析、测量这些标志线的断错量,并 开展高精度 DGPS 测量,结合二者获得更加可信的 断错量,之后结合气候变化重新分析断错河流阶地 的堆积、侵蚀、再加积、再下切等形成过程,合理地选 择高阶地或底阶地断错模型,即合理选择各级断错 量开始积累的年代或年代范围,最终获得塔藏断裂 罗叉段准确的活动速率和塔藏断裂活动性质空间变 化的构造意义。简而言之,本文利用相较于以往研 究分辨率更高的遥感影像资料(0.5m分辨率的 DIGITA遥感影像)和更加系统的年代测试结果和 地层形成过程认识,重新估算塔藏断裂罗叉段的断 错滑动速率。

1 塔藏断裂罗叉段滑动速率研究

1.1 几何展布

塔藏断裂在东昆仑断裂玛曲段东延投影位置上 (图1A),发育于若尔盖盆地东北缘。塔藏断裂西侧 延伸进入若尔盖沼泽地中,地表可见断错痕迹起自 罗叉村西北,向东沿山麓发育,再向东延,横贯长江 流域、黄河流域的分水岭,再向东延伸经下黄寨,直 到多哇东侧。该段落为塔藏断裂罗叉段,全长 50km,总体走向约115°(图1、2)。之后断裂向南偏 转,延经东北村、塔藏村、九寨沟、马家磨等,依据断 裂延伸的几何不连续性和走向突变等(丁国瑜, 1993),自西向东依次可分为罗叉段、东北村段和马 家磨段(图1B)。

1.2 罗叉段晚第四纪台地地层层序及年代学

塔藏断裂罗叉段北西西向延伸穿过白龙江所属 的长江流域和阿细龙细所属的黄河流域。在阿细龙 细的上游各支流,可见一系列自 NE 向 SW 流动的 冲沟(图 2)。冲沟两侧普遍发育三级阶地(图 3a)。 一级台地拔河高约1~2m,沿冲沟零星分布,为冲沟 的一级阶地;二级阶地在冲沟两侧最为发育,宽可达



(a)—塔藏断裂罗叉段 ETM 影像;(b)—ETM 影像解译图

(a)-ETM image of the Tazang fault Luocha segment; (b)-the interpretation map from ETM image

100m 左右,拔河高约 6m,为冲沟的二级阶地;三级 阶地在图 2a 点西侧表现为非常宽阔的平台,构成罗 叉村北最发育的冲洪积扇群,拔河 18m 左右。若尔 盖盆 地 在 晚 更 新 世 以 来 才 表 现 为 抬 升 (Yang Dayuan et al.,1996),这表明晚更新世之后,流向盆 地中心的最大一级冲沟才开始强烈下切,所以第三 级阶地的形成时间也应与此对应。本文对一、二、三 级阶地的地层层序均进行了详细的分析并采集系列 年龄样品,测试得到台地地层的年龄值见表 1、2。

一级阶地:以罗叉村神山场点(33°49′20″N, 103°05′48″E)明显分为2层,表层为灰黑色黏土层, 向下为棱角状砂砾石层,砾石棱角发育,分选一般。 在砂砾石层顶部采集的释光样品测年结果为0.66 ±0.04ka(图 3d)。

二级阶地:以罗叉村北神山(33°49′20″N,103° 05′48″E,图 2b中d点)的二级阶地做为典型进行详 细分析,二级阶地拔河约6m,宽达100m。图3e为 T2阶地的层序剖面图,T2阶地总体上二元结构明 显,上部为厚2.9m的漫滩相粉细砂及黏土层互层、 下部为厚大于3m未见底的褐红色砾石层。对T2 层序详细划分由上到下依次为:①表土黑色黏土层 厚40cm,下侧为厚约20cm 灰绿色粉细砂层,再下 侧又为厚20cm 黑色黏土层,总厚0.8m;②灰绿色 粉细砂层,水平层理,厚0.5m;③褐红色砾石层,砾 径不等,较大者约3cm,厚0.25m;④灰绿色粉砂层 和黏土层互层,厚0.4m;⑤淡黄绿色粉砂层,水平层 理,厚0.7m;⑥深黑色黏土层,厚0.15m;⑦淡黄色 粉砂层,厚0.1m;⑧深黑色黏土质粉砂层,厚 0.3m;⑨褐红色砾石层,磨圆差,棱角明显,不等粒, 粒径1~5cm,夹淡黄色粉细砂,厚大于3m。

在第2、5、8层中选择较好的粉细砂进行系统 的热释光年龄样品采集,最后测年结果依次为2.61 \pm 0.13ka BP; 4.14 \pm 0.16ka BP; 4.15 \pm 0.12ka BP。Kirby et al. (2007)对图 2b 中 a 点二级阶地层 序进行了粗略研究和测年,也发现阶地总体二元结 构明显,并从下侧的褐红色砾石层中取得炭样测年 结果为 9.132±0.131ka BP,在粉砂黏土层中取得 炭样测年结果为 4.689±0.151ka BP。该测年结果 与本文在二级阶地中的第5层、第8层的淡黄绿色 粉砂层释光测年结果相近。说明由 NNE 向 SSW 流动的同等级冲沟(图 2b 中 c 点和 d 点)的阶地年 龄是可以对比的,而且相互印证更准确地限定了二 级阶地的年代。Ren Junjie et al. (2013)也在图 2b 中 a 和 d 点采集二级阶地粉砂层中的炭样,测试结 果为 4.85±0.06ka BP,下部砾石层中炭样测试结 果为 9.150±0.140ka BP。综合以上系列年代结果 (图 3e),可见二级阶地砾石层的年龄结果为 9.132 ±0.131~9.150±0.140ka BP;粉砂层开始沉积年 龄为 4.15±0.12~4.85±0.06ka BP, 而停止沉积 的年龄约为 2.61±0.13ka BP。

表 1 塔藏断裂罗叉段阶地和马家磨段断层剖面中砂层热释光测年结果

Table 1 O	OSL dating results of the	e terrace on Tazang	fault Luocha segment	and sand of fault prof	il on Tazang fault	Majiamo segment
-----------	---------------------------	---------------------	----------------------	------------------------	--------------------	-----------------

样品编号	α计数率(Ksec)	$K_2O(\%)$	埋深(m)	含水量(%)	剂量率(Gy/ka)	等效剂量(Gy)	阶地	年龄(ka)
01	14.83 \pm 0.29	2.74	0.6	28.79	4.69	3.09 ± 0.18	T1	0.66±0.04*
02	14.32 \pm 0.29	2.84	1.0	26.03	4.72	12.31 ± 0.63	T2	2.61 \pm 0.13*
03	15.68 \pm 0.30	3.10	2.5	样干	5.15	21.33 ± 0.80	T2	4.14±0.16*
04	13.61 \pm 0.28	2.50	3.1	样干	4.33	17.99 ± 0.51	Τ2	4.15±0.12*
05	18.77 \pm 0.33	4.06	1.7	样干	7.70	172.46 ± 20.46	Т3	22.41±2.63*
06	12.98±0.27	2.28	15.5	17.54	4.42	249.47 \pm 31.41	Т3	56.47±7.11*
07	12.3 \pm 0.2	2.80	0.5	样于	4.5 ± 0.2	40.50 \pm 3.40	Tn	9.00 ± 0.80
08	11.4 ± 0.2	2.70	0.5	样干	4.3 ± 0.2	55.70 ± 5.40	Tn	13.00 ± 1.30

注:* 据 Hu Chaozhong et al. (2011); Zhang Junlong et al. (2014)。

表 2 塔藏断裂罗叉段阶地阶地 C₁₄测年结果

Table 2 C₁₄ dating results of the terrace on Tazang

fault Luocha segment

样品 编号	地层岩性	测试 材料	δ ¹³ C含 量(%)	¹⁴ C年龄 (aBP)	修正年龄范 围(aBP)	阶地
06TZ1	河流泥沙	碳屑	-26.8	8133 ± 48	9132 ± 131 *	T2
TZ2	土壤	泥炭	-29.0	$4168~\pm~50$	$4689 \pm 151*$	T2

注:* 据 Kirby et al. (2007)。

三级阶地:山麓地带由 NNE 向 SSW 流动的冲

沟的三级阶地为侵蚀阶地(图 3a、d),仅在罗叉村东 北约 4km 处(103°03′44″E,33°49′12″N;图 2B 点)的 山盆过渡区,野外考察发现二级阶地下部沉积的黄 褐色砾石层,可与神山(33°49′20″N,103°05′48″E;图 2b 中 d 点)处二级阶地下部的黄褐色砾石层对比, 按阶地序列,本点三级阶地可对应侵蚀台地的形成。 台地拔河高约 18m。图 3f 为图 2b 中 f 点三级台地 的层序剖面图,可分为三层:顶部为厚 0.5m 的灰黑





图 3 塔藏断裂典型断错地貌现象、阶地地层年龄测试结果图

Fig. 3 Typical displacement geomorphology phenomena on Tazang fault

(a) 一罗叉村 a # 的阶地断错;(b) 一本多村 b # 的阶地断错;(c) 一本多村西 c # 的阶地断错,断错三角面;(d) 一罗叉村 d # 的冲沟、阶地断错,断层槽谷,断错三角面;(e) 一二级阶地地层层序及年龄;(f) 一三级阶地层层序及年龄结果;*据胡朝忠等,2011;张军龙等,2014
(a) 一Fault terrace in Luocha a #;(b) 一 fault terrace in Benduo b #;(c) — fault terrace, fault triangle in Benduo c #;
(d) — gully and terrace fault, fault valley, fault triangle in Luocha d #;(e) — the stratigraphic sequence and age of terrace 2;
(f) — the stratigraphic sequence and age of terrace 3; * after Hu Chaozhong et al.,2011;Zhang Junlong et al.,2014

色黏土质表土层;中部为含灰白色粉砂透镜体的砾石层,砂岩砾石磨圆差,棱角分明,粒径不等,5cm左右居多,厚16m,在本层距顶约3m处的透镜体中采 集热释光测年粉砂样品,测年结果为22.41± 2.63ka BP;下部为厚1.5m未见底的水平层理发育的粉砂层,在尽量靠顶部采集热释光测年粉砂样品,测年结果为56.47±7.11ka BP。根据测年结果,三级阶地形成于22.41±2.63ka BP之后,考虑砾石层堆

积速率较快,可认为三级阶地的年代为 22.41±2.63ka BP,三级阶地为晚更新世阶地。该年龄与盛海洋等(Shen Haiyang et al.,2008)发现黑河冲积平 原 I 级阶地的上更新统沉积物年代一致。

1.3 塔藏断裂罗叉段水系断错

通过遥感解译,发现较大一级多条冲沟不是顺 上游的流向流动,在断裂处发生向左侧的同步左旋 拐弯,这是被断裂左旋位错形成的,位错值由 NWW 向 SEE 分别为 310m、336m、320m、310m、110m、 64m、239m、145m、189m、97m、214m、156m、160m、 329m、317m、315m、304m等(图 2)。次一级冲沟左 旋断错量也有 70m、80m、75m等,同时还可见断头 沟发育,断头沟西侧冲沟北部宽近 100m,而南部冲 沟宽仅约 50m,这种上游宽下游窄是断裂断错之后 下游时代较新造成的;野外考察还发现多条纹沟被 错动 4m、5m、6m、4m 和 12m(图 3d)不等,形成扭错 水系。多级位错说明塔藏断裂罗叉段长期剧烈活动 的特点。其中最小一级冲沟的错动很可能代表了最 新一次地震时的错动量。

1.4 塔藏断裂罗叉段阶地断错和断错模型的选择

河流阶地是河流两侧发育的台阶状地质地貌 体。虽然因为河流自然拐弯、阶地成因的复杂性等, 河流阶地前缘、后缘不是直线延伸,但河流阶地前、 后缘常常有比较明显的延伸趋势。当断裂走向与阶 地前、后缘延伸趋势方向斜交并且断裂活动时,对阶 地的前、后缘错动开展研究能够获得断裂活动的定 量数据。

图 2b 中 a 点一级阶地前缘的断错不明显(图 3a),一方面可能是一级阶地形成以来断裂未活动, 也可能是因为靠近河流,河流的侵蚀作用使断裂最 新活动的变形未能保留。二级阶地前缘在断裂北侧 和南侧在延伸趋势方向上一致,但被左旋错断,断错 量达 25m(图 3a)。并且在断裂通过处形成椭圆形、 长轴走向约 90°的拉分凹陷。图 3b 位于图 2b 中 b 点位置,图中黄色线表示二级阶地的前缘,阶地前缘 也被左旋错动约 24m,比 c 点小可能是因本点二级 阶地拔河较 c 点高,阶地前缘剥蚀更严重。图 3b 中 还发现二级阶地顶面被断错约5m,水平分量与垂向 分量的比例达5:1,图 3b 东侧 100m 范围内的断层 剖面揭示的断面北倾约 59°(Fu Jundong et al., 2012), 而图 3a 几乎没发现垂向错动量, 这说明断裂 向东延伸,可能垂向分量变大。图 3b 中河流阶地的 发育存在明显的四象限分布特征,在东北侧一级阶 地不发育,发育较窄的二级阶地,二级阶地前缘较 陡。西北侧为河流阶地最发育的地方,一、二级阶地 均发育,二级阶地宽约 100m,一级阶地宽度达到了 10m;在西南侧,不发育河流阶地;在东南侧,发育积 水洼地,长着非常丰茂的灌木,发育二级阶地。阶地 的四象限分布特征与断裂的长期左旋活动过程一 致。沿断裂行迹追综,还发现多个较可靠的阶地前 缘断错点。在阿西茸(33°47′32″N,103°10′38″E;图 3c)处二级阶地前缘测量得到左旋错断量为 23m。 罗叉段多个场点二级阶地前缘的错断量相当,说明 罗叉段二级阶地前缘的真实断错量确实应为 20~ 25m 之间,但还需要更精确的测定。

图 3d 中一级阶地前缘的错断现象也不清晰,冲 沟左、右岸二级阶地前缘被左旋错动分别约 24m、 13m,左岸阶地前缘受侵蚀较弱,错动值较大,右岸 阶地前缘一直受冲沟侵蚀,保留的断错值较真实断 错值肯定偏小。0.5m 高分辨率的 DIGITAL 遥感 数据解译也可发现本点左、右岸阶地前缘断错量分 别为 13m、24m,二级阶地上冲沟左旋量为 12m,冲 沟左岸二级阶地后缘、三级阶地前缘左旋量为 142m (图 4a、b)。对左岸二级和三级阶地开展高精度 DGPS 测量,测量时特别控制台地前缘在断裂两侧 的延展位置,计算断错量时在断裂两侧分布采用控 制点连接而成前缘的趋势线,然后对比趋势线的断 错量,可精确地测定二、三级阶地前缘左旋断错量分 别为 21m 和 137m(图 4c)。

气候变化研究表明(Yao Tandong et al., 1997; Wang Yan et al., 2006; Qin Xiaoguang et al., 2017):58~32ka BP 为末次冰期间冰阶异常高温阶 段,30~23ka BP 为末次冰期冰盛期异常温暖期,23 ~20ka BP 为末次冰期冰盛期次暖期,20~18ka BP 为末次冰期冰盛期温暖阶段;18~16ka BP 为末次 冰期冰盛期寒冷阶段;可见从 58~16ka BP 期间,气 候由异常高温到寒冷,对比研究区三级阶地的沉积 序列,高温可能导致研究区冰川融化携带大量风化 砂砾石层堆积于山盆交界处即堆积了三级阶地巨厚 的砂砾石层,而且导致冲沟强烈下切,形成了最发育 的二级阶地形成的空间基础即二级阶地的后缘可能 对应该异常高温期的起始阶段,其中23~16ka BP 期间交替变化高频时期可能形成了研究区的三级阶 地;16~15ka BP 为末次冰盛期温暖阶段;15~ 13.4ka BP 为末次冰后期寒冷阶段;13.4~12.6ka BP 为温暖阶段;12.6~12ka BP 为冷干阶段;12~ 10.5ka BP 为温暖阶段;10.5~10ka BP 为寒冷阶 段;10ka BP 之后,气候总体以温湿为主要特征,其





Fig. 4 SPOT image and its interpretation of Shenshan Luocha segment and DGPS(corresponding field photos in figure 3d) (a)—DIGITAL GLOBAL影像来自 GOOGLE EARTH;(b)—影像解译图(与 a 位置、大小完全一致);

(c)—DGPS测量高精度地形等值线及断错解释图(本研究点位于图 2b 中 d 点位置)

(a)—DIGITAL GLOBAL image from GOOGLE EARTH;
 (b)—image interpretation map (the location and the size is same with map a);
 (c)—DGPS measurement of high precision topographic contour and the fault interpretation map (this study point is d point at Fig. 2b)

中 10~9ka BP 为过渡阶段;9~3ka BP 为全新世大 暖期,其中 5~3ka BP 为全新世大暖期晚期温湿阶 段,3 ka BP 以来变干变冷;对比研究区二级阶地的 沉积序列,显然 16~9ka BP 之间的气候高频变化形 成了该级台地的物质基础,而且 9ka BP 之后的大暖 期导致在 16~9ka BP 砂砾石层上的黏土层和粉细 砂层堆积以及冲沟的下切,以及二级阶地前缘的逐 渐形成,3 ka BP 之后变干变冷,二级阶地顶部也逐 渐停止了黏土层和粉细砂层的沉积。 当然上述契合得极好的气候、沉积、地貌耦合变 化过程是完全以气候为主导而作出的分析,包含一 定的逻辑推理成分。实际上还可能有构造隆升、局 部地形地貌等因素的影响,比如实际上本区域二级 阶地粉砂层的形成还可能与携带大量粉细砂的冰雪 进退融化相关。那么综上所述,本文认为如图 2b 中 d 点即图 3d 等处二级阶地前缘的年代对应系列年 龄结果的 9.132±0.131~9.150±0.140ka BP;二 级阶地后缘即三级阶地前缘的年代对应系列年龄结 果中的 56.47±7.11ka BP。

河流阶地的断错模型包括低阶地、高阶地等 2 种,其核心在于侧向侵蚀作用的强度,也就是阶地前 缘、阶地面上小冲沟等线性标志物形成之后该线性 标志是否被改变。显然,低阶地模型中侧向侵蚀作 用异常强烈,在冲沟位于低二级的台地上时该级阶 地前缘的断错量才开始得到保存;高阶地模型中,侧 向侵蚀几乎为0,是一种非常理想的环境,需要河流 快速下切,冲沟来不及左右摇摆侧向侵蚀。显然,本 文研究区中的阶地断错位于这 2 种端元模型之间, 而且本研究区的冲沟下切非常强烈,似乎更符合高 阶地模型的状况。但二级阶地前缘毕竟在形成前期 要受到河流的侵蚀,在形成后前缘也可能因断裂两 侧坡度不一致,因此 21m 可能是记录到的较真实值 小的位错值。从这个角度看,用 21m 的位错量获得 的断裂左旋走滑速率比真实值可能偏小。该断错量 的起始时间采用二级阶地砾石层上部的炭样的年龄 测试结果为 9.132±0.131~9.150±0.140ka BP,便 可得左旋走滑速率为 2.62mm/a;二级阶地面上的冲 沟被左旋断错约 12m,采用阶地上粉细砂层的年龄 4.15±0.12ka BP,便可得左旋走滑速率为 2.89mm/ a。三级阶地前缘、二级阶地后缘左旋断错 137m,对 应年龄应为湖相稳定沉积年龄 56.47ka BP,得滑动速 率约为 2.43mm/a。二级阶地上部粉细砂层也极可能 为冰川退缩融化时所形成,阶地下部砾石层顶部年代 为 9.132ka BP,该年龄应记录了图 2E 点即图 3b 中二 级阶地的形成年代,垂向断错量约 5m,可得垂向断 错速率约为 0.55mm/a。综上,塔藏断裂罗叉段晚 第四纪左旋走滑速率为 2.43~2.89 mm/a,罗叉段

表 3 塔藏断裂罗叉段滑动速率表 Table 3 Slip rate of Tazang fault Luocha segment

阶地	断错量(m)	高阶地年龄	高阶地模型速率(mm/a)	低阶地年龄	低阶地模型速率(mm/a)
T2/T1	21(水平)	$9130\pm$ 131 a BP	2.62	0.66 \pm 0.04 ka BP	31.82
T2/T1	5(垂向)	$9130\pm~131$ a BP	0.55	0.66 \pm 0.04 ka BP	7.58
T3/T2	137(水平)	56.47 ka BP	2.43	$9130\pm131~\mathrm{a~BP}$	15

2 塔藏断裂活动性质变化

从地貌面断错,前已述及,罗叉段西部几乎没发 现垂向错动量,东部水平分量与垂向分量的比例达 5:1,断裂向东延伸,可能垂向分量变大。塔藏断裂 东部马家磨段苗寨场点(图 1B)的地层断错剖面中 可见发育的黄色粉沙层和棱角状坡积砾石层被错 断,砾石在断裂处发生混乱和沿断裂的定向排列,在 断裂的坎前处,发现砾石长轴方向的定向排列,而砾 石上覆盖的层 2 粉砂层中采集的热释光样品测试结 果为 9.0±0.8ka,在层 1 下部粉砂层中采集的热释 光样品为 13.0±1.3ka;说明断裂在本区最新的活 动时代应为全新世。而且向北俯冲的角度达 58°左 右(图 5a)。

而在罗叉段(图 2b 中 E 点),断层剖面位于冲 沟的一级阶地剖面上,剖面上一级阶地由上到下地 层可以分为 3 部分(图 5b):①表土层,植物根系发 育,层厚 20~40cm; 灰白色黏土层,偶含砾石,厚 15 ~60cm 不等;褐红色黏土层,偶含砾石,砾径不等, 厚约 15cm;②灰白色棱角分明的砾石层,砾石呈片 状,砾石长约 5cm,整体厚约 70cm;褐红色砾石层, 厚 1m,未见底。③断裂所夹的灰黑色黏土砂砾层, 砂砾层层面向下凹,分析是断裂左旋走滑破裂,在本 点形成拉张破裂,两侧物质向张裂处积累而形成,说 明塔藏断裂罗叉段以左旋走滑活动为主。本点的第 二层褐红色砾石层从颜色、磨圆程度、成分、砾径等 均可与神山场点一级阶地(33°49′20″N;103°05′48″ E)褐红色砾石层对比,采用该测年结果 0.66± 0.04ka BP,说明断裂近几百年发生地震事件。在 剖面上,第二层黄褐色砾石层在如图中虚线表示的 断层两侧最大扁平面方向发生剧变,是断层活动造 成的。断面为走向 300°,断面近直立,走向与塔藏 断裂罗叉段整体走向相近。断裂在垂向上变形量较 小,说明塔藏断裂在西部的罗叉段以走滑作用为主。 对比塔藏断裂东、西部的上述两个典型断层剖面,也 可知不仅罗叉段向东延伸,垂向分量可能变大,对于 整条塔藏断裂,也是向东延伸,垂向分量逐渐变大, 即水平运动逐渐转为垂向隆升。

3 讨论

位移速率参数在活动断裂研究和进一步的断裂 地震危险性评价中极端重要。本文利用相较于以往 研究分辨率更高的遥感影像资料(0.5m分辨率的 DIGITAL遥感影像)和更加系统的年代测试结果 和地层形成过程分析,重新估算断错滑动速率。不 同研究者获得塔藏断裂滑动速率差异的原因是即使



图 5 塔藏断裂马家磨场点(a)和罗叉场点(b)剖面图 Fig. 5 The terrace strata displacement of Luocha and Majiamo segment ①-耕织层;②-坡积砾石黄土堆积物;③-黄土状粉沙锲体;④-黄土状粉沙;⑤-坡积砾石 ①-Farming and weaving layer; ②-slope gravel and loess like silt; ③-loess like silt wedge body;④-loess like silt; ③-slope grave

对于同一研究场点,断错量方面的认识也完全不同: 如 Kirby et al. (2007)认为二级阶地前缘没有被断 错,断错量接近 0m; Zhang Junlong et al. (2014)认 为二级阶地前缘断错 71m; Ren Junjie et al. (2013) 认为2级阶地前缘断错15~21m;本文基于更高分 辨率的遥感影像研究和 DGPS 测量以及场点的反 复研究对比分析,认为二级阶地前缘断错约为21m。 对断错量认识不一致的原因,有影像分辨率的不够 导致认识不清,也有对断错标志认识不一致导致的。 对于二级阶地前缘断错量对应的起始年代方面, Kirby et al. (2007)等的测试结果是 9.13±0.13ka; Zhang Junlong et al. (2014)应用 9.13±0.13ka 这 个年龄;Ren Junjie et al. (2013)等应用的是断错量 研究场点西侧另一冲沟测试获得的 8000±80a 至 9.13±0.13ka 的年龄。而本文系统总结本文测试 获得的和其他研究者获得的年代结果,得到二级阶 地从顶部向下年代序列为: 2.61±0.13ka BP、4.14 ±0.16ka BP、4.15±0.12ka BP、4.689±0.151ka BP、4.85±0.06ka BP、9.01±0.88ka BP、9.132± 0.131ka BP、9.150±0.140ka BP、12.48±1.10ka BP、12.720±0.08ka BP,这些年代中4.85±0.06ka BP及其更年轻的年代为阶地形成后洪水等形成的 粉细砂层的年代,12.48±1.10ka BP、12.720± 0.08ka BP为砂砾石层中的年代,代表的是阶地形 成过程中的年代,所以选择的9.132±0.131ka BP 更能代表阶地断错量对应的年代。

本研究还结合气候变化方面的资料。讨论阶地 地层序列的形成过程,也更倾向于采用高阶地模型 分析断裂的滑动速率。即气候变化方面 12~ 10.5ka BP 为温暖阶段;10.5~10ka BP 为寒冷阶 段;10ka BP 之后,气候总体以温湿为主要特征,其 中 10~9ka BP 为过渡阶段;9~3ka BP 为全新世大 暖期,上述气候的变化说明海拔高度达 3500m 左右 的本场点的二级阶地物源的来源于 12~10.5ka BP 为温暖阶段的强水动力条件,然后 9~3ka BP 为全 新世大暖期,冲沟强烈下切,形成阶地前缘。当然上 述契合得极好的气候、沉积、地貌耦合变化过程包含 一定的逻辑推理成分。

以上是本研究与 Kirby et al. (2007)和 Zhang Junlong et al. (2014)差异巨大的原因。本文最终结 果与慢速模型相一致。实际上,差异的产生也许更 重要的是不同研究者基于青藏高原是连续变形或不 连续变形 2 种模式出发而得到的结果,而未基于野 外实际观测到的现象。

4 结论

塔藏断裂位于东昆仑断裂带东端,横贯青藏高 原东缘的高原内部和高原边缘,自西向东可分为青 藏高原内部的罗叉段、青藏高原边缘的东北村段和 马家磨段。罗叉段全新世以左旋剪切走滑为主兼挤 压活动,左旋走滑速率为 2.43~2.89 mm/a 左右, 塔藏断裂为东昆仑断裂系东延的主要断裂之一;马 家磨段可见全新世地层被断错。对比分析塔藏断裂 各段活动特征可见,西部以水平剪切运动为主,而东 部走滑运动分量逐渐变弱,断面北倾、北盘上升导致 的垂向分量逐渐变大。东昆仑断裂带及塔藏断裂晚 第四纪走滑速率向东规则减小,并转化为横向逆冲 作用和高原隆升,即符合"叠瓦状逆冲转换一有限挤 出模型"的特征(Xu Xiwei et al.,2005)。

当然,塔藏断裂所在的青藏高原东部边缘区域, 早更新世时期为强烈的挤压缩短变形,中更世时期 可能是增厚后垮塌松弛阶段,晚更新世一全新世为 走滑、旋转运动(Zhang Yueqiao et al., 2016a)。从 整个东昆仑断裂而言,塔藏段西侧紧接着的是玛曲 段。晚更新世晚期一全新世期间,对于玛曲段的滑 动速率,Li Jian et al. (2016)等的最新研究认为从唐 地次段到玛曲次段约100km范围内,水平滑动速率 一致为 3~5mm/a。塔藏断裂罗叉次段的水平滑动 速率约为 2.43~2.89 mm/a,较玛曲段减小得很 少,但是塔藏断裂东部的马家磨次段全新世以来垂 向运动强烈,水平运动速率较罗叉次段进一步减小, 较玛曲段就小得更多。因此,东昆仑断裂东部玛曲 段和塔藏段上水平滑动速率真正大幅减小的区域应 该位于塔藏断裂上,更具体的发生在罗叉次段和更 东侧的东北村次段、马家磨次段间。

地球物理深部探测方面,跨东昆仑断裂东部已

有数条深部剖面资料(图 1A),如图 1A 中 d 为 Liu Zhen et al. (2015)利用短周期密集台阵观测跨断裂 两侧地壳结构;图 1A 中 e 为 Zhang Yueqiao et al. (2012, 2016a, 2016b)根据地表构造和地震定位推 断的岷山逆冲推覆构造剖面。Zhao Linqiang et al. (2015)通过2条跨塔藏断裂及西秦岭造山带的大地 电磁剖面研究(图1A中b,c),发现跨塔藏断裂的中 上地壳为较完整的高阻构造,没有出现明显陡立的 电性边界带,仅在塔藏段西南侧的松潘--甘孜地块 下存在埋深约为 20km 的低阻层、该低阻层的埋深 显示出向北愈来愈浅的趋势,在塔藏断裂北侧的迭 部-白龙江断裂和光盖山-迭山断裂带显示为出露地 表电性边界带,这两条断裂在深部约 10km 深度范 围有归并到东昆仑断裂带塔藏段上的趋势,三条断 裂共同组成东昆仑断裂带(Zhen Wenjun et al., 2013),分隔了松潘一甘孜地块和西秦岭造山带(中 段)。推测东昆仑断裂带在尾端发生了构造转换,东 昆仑断裂带塔藏段、以及北侧迭部-白龙江断裂和光 盖山-迭山断裂可能共同形成了帚状撒开的东昆仑 断裂带尾端破碎收缩构造,共同承担和分解了东昆 仑断裂东向的走滑速率。而且东、西2条大地电磁 测深剖面深部的低阻层在跨塔藏断裂附近似乎深度 有一定的跳跃,南深、北浅,高差可达 10km,可能解 释了断裂的垂向断错作用,而且东、西剖面的对比可 见,西剖面似乎向北倾角较小,更东剖面似乎倾角较 缓,与地表构造变形揭示的自西向东断裂活动性质 由走滑为主转换为垂向分量占较大比例一致。

Gao Rui et al. (2011)和 Wang Haiyan et al. (2014)通过深地震反射剖面研究(图 1A 中 a),建立 了该区域的岩石圈垂向构造图像,表明青藏高原东 北缘的地壳变形和岩石圈地幔变形完全解耦,东昆 仑断裂带被地壳拆离层截断。青藏高原东北缘的隆 起是由于岩石圈尺度的缩短作用形成的,上地壳的 双重逆冲构造与左旋走滑的东昆仑断裂带有关。即 受南北地块下地壳的挤压作用,西秦岭造山带上地 壳发生扇状变形,即造山带南北两侧均发生指向盆 地的逆冲变形,造山带中部则形成伸展变形。这种 上地壳变形样式并没有延伸到整个地壳,在地壳中 部(约 6s 附近)发育一个构造滑脱层,使上地壳变形 与下地壳变形脱耦。下地壳北倾的强反射描绘出了 若尔盖盆地与西秦岭造山带深部挤压构造体系下形 成的几何图像,为西秦岭造山带下地壳向若尔盖盆 地逆冲推覆提供了地震学依据,清楚地反映了若尔 盖盆地和西秦岭造山带在挤压构造体系下的俯冲与

逆冲推覆的接触关系,这种构造关系只限于下地壳。 西秦岭下地壳北倾的强反射与其南侧若尔盖盆地下 地壳北倾及近平的反射特征,揭示出西秦岭造山带 向若尔盖盆地逆冲推覆的构造关系;松潘地块下地 壳向北倾斜的强反射与华北南缘地块下地壳南倾的 反射在合作县下方相接。地表构造变形研究也约束 了东昆仑断裂向北俯冲作用,与深地震反射剖面揭 示断面北倾一致,印证了西秦岭造山带南侧指向盆 地的逆冲变形,这种推挤作用向北一直到临潭-宕昌 断裂带等。

以上地球物理探测成果与地表构造变形研究结 果的相互印证无疑更深刻地揭示了地壳变形的挤压 特征,塔藏断裂的活动性质与东昆仑断裂带主体相 比已发生了变化。这种变化是塔藏断裂位于巴颜喀 拉块体东北边缘,青藏高原向北推挤过程中,巴颜喀 拉块体向东一南东方向的"逃逸"运动在块体东部受 华南块体的强烈阻挡,使块体的逃逸运动受到限制, 部分分量向北挤压。

致谢:张军龙副研究员在野外考察过程中给予帮助;田勤俭、闻学泽研究员提出宝贵意见;释光样品由中国地震局地壳应力研究所赵俊香博士和中国 地震局地质研究所王昌盛工程师帮助测试,深表 感谢。

References

- Chen Changyun, Ren Jinwei, Meng Guojie, Yang Panxin, Xiong Renwei, Hu Chaozhong. 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, doi: 10. 6038/cjg20l31217 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yu, Liu Xingqi, He Li, Ye Li, Chen Huifei, Li Kai. 2016. Micro—area analysis and mechanism of varves from lake Kusai in the Hoh Xil area, northern Tibetan plateau. Acta Geologica Sinica, 90(5):1006~1015 (in Chinese with English abstract).
- Cui Zhongyuan, Yang Bin. 1979. Tosuohu-Maqu active belts. Journal of Northwestern Earthquake, 1 (2): 57 ~ 61 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jundong, Ren Jinwei, Zhang Junlong, Xiong Renwei, Yang Panxin, Chen Changyun, Hu Chaozhong. 2012. Research onLate Quaternary paleoearthquake on Tazang fault on the eastern section of the Kunlun active fault. Quaternary Sciences, 32 (3): 473 ~ 483 (in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Wang Haiyan, Wang Chenshan, Yin An, Zhang Yuxiu, Li Qiusheng. 2014. Lithospheric deformation shortening of the North eastern Tibetan Plateau: Evidence from reprocessing of

deep seismic reflection data. Acta Geoscientia Sinica, 32(5): $513 \sim 520$ (in Chinese with English abstract).

- He Wengui, Yuan Daoyang, Xiong Zhen, Ge Weipeng, Liu Xingwang. 2006. Study on characteristics of new activity and Holocene slip rate along Maqufault of East Kunlun active fault. Earthquake, 26(4): $67 \sim 75$ (in Chinese with English abstract).
- Hu Chaozhong. 2011. Late Quaternary activity of the Tazang fault. Beijing: The Master Dissertation of Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 1~71 (in Chinese with English abstract).
- Hu Chaozhong, Ren Jinwei, Yang Panxin, Xiong Renwei, Chen Changyun, Fu Jundong. 2014. Late Quaternary active features of the Tazang fault East Kunlun fault belt's eastward extension. China's interior of the earth physics and continental dynamics research. Beijing: Science Press, $920 \sim 934$ (in Chinese with English abstract).
- Jia Shixu, Zhang Xiankang. 2008. Study on the crust phases of deep seismic sounding experiments and fine crust structures in the northeast margin of Tibetan plateau. Chinese Journal of Geophysics, 51(5): 1431 ~ 1443 (in Chinese with English abstract).
- Kirby E, Harkins N, Wang E. 2007. Slip-rate gradients along the eastern kunlun fault. Tectonics, 26: 1~16.
- Li Chenxia, Xu xiwei, Wen Xueze, Zheng Rongzhang, Chen Guihua. 2009. The segmental characteristics of geometrical structure of the east Kunlun active fault (Maqin-Maqu segment). Seismology and Geology, 31(3): 441~458 (in Chinese with English abstract).
- Li Chunfeng, He Qunlu, Zhao Guoguang. 2005. Paleo-earthquake studies on the eastern section of the Kunlunfault. Acta Seismologica Sinica, $25(1): 60 \sim 67$ (in Chinese with English abstract).
- Li Haibing, Qi Xuexiang, Zhu Yingtang, Yang Jinshui, Paul Tapponnier, Shi Lianchang, Wang Yongwen. 2004. Asymmetrical Coseismic surface ruptures in the eastKunlun earthquake (Ms = 8. 1), northern Tibetan plateau. Acta Geologica Sinica, 78(5): 633~640 (in Chinese with English abstract).
- Li Jian, Zhang Yueqiao, Li Hailong, Xiong Jinhong, Li Jianhua. 2016. Revisiting Late Quaternaryslip-rate along the Maqu segment of the eastern Kunlun fault, NE Tibet. Acta Geologica Sinica, 90 (2): 801~840.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Wang Mou, Yi Haisheng, Li Yong. 2006. Morphological features of river valleys in the source region of the Yangtze River, northern Tibet, and their response to neotectonic movemen, Chinese Geology, 33(2): 374~382 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhen, Tian Xiaobing, Wu Zhenbing. 2015. Short cycle with dense array observationMinjiang fault on both sides of the crustal struture. Colloquium 2015, Institute of Geology and

Geophysics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).

- Ma Yinsheng, Shi Wei, Yang Nong, Zhang Chunshan, Zhang Huiping. 2005. Characteristics of the activity of the Maqu segment of the East Kunlunactive fault belt and its eastward extension. Geological Bulletin of China, 24(1): 30~35 (in Chinese with English abstract).
- Pan Jiawei, Li Haibing, Sun Zhimin, Liu Dongliang, Wu Chan, Yu Changqing. 2015. Tectonic responses in the Qaidam basin induced by Cenozoic activities of the Altyn Tagh falt. Acta Petrologica Sinica, 31(12): 3701 ~ 3712 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaoguang, Yin Zhiqiang, Wang Meihua, Zhao Wuji, Mu Yan, Zhang Lei. 2017 Loess records of the Holocene climate change of Gonghe and Guide basins in the northeastern boundary of the Tibet Plateau. Acta Geologica Sinica, 91(1):266~286 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jinwei, Wang Yipeng, Wu Zhangming. 1999. Quaternary activity characteristics and sliding rate of east Kunlun fault zone in north Qinghai-Tibet plateau. Beijing: The Earthquake Publishing, 147~164 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jinwei, Wang Yipeng, Wu Zhangming. 1993. Holocene earthquake deformation zones and their displacement and slip rate along the Xidatan-Dongdatan of Kusaihu-Maqu fault in northern Qinghai-Xizang plateau. Seimology andGeology, 15 (3): 285~288 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junjie, Xu Xiwei, Yeats R S. 2013. Millennial slip rates of the Tazang fault, the eastern termination of Kunlun fault: Implication for strain partitioning in eastern Tibet. Tectonophysics, doi: 10.1016/j.tecto.2013.06.026.
- Seismological Bureau of Qinghai Province, Institute of Crustal Dynamics, China Seismological Bureau. 1999. The Eastern Kunlun Active Fault Zone, Beijing: Seismological Press (in Chinese with English abstract).
- Sheng Haiyang. 2008. Lithostratigaphy of Late Neogene deposits in the Zoig Basin, northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau. Chinese Journal of Geology, 43(3): 445 ~ 472 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yuan, Liu Junlai. 2010. Morphotectonics of western Sichuan-Yunnan since Pliocece: the development of basins along fault zones and constraints on far-field intracontinental tectonic process. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1925 ~ 1937 (in Chinese with English abstract).
- Van Der Woerd, Ryerson F J, Tapponnier P. 1998. Holocene leftslip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun fault. Geology, 26(8): 695 ~ 698 .
- Wang Erqi, Zhou Yong, Chen Zhiliang, Burchfiel C B, Ji Jianqing. 2001. Geologic and geomorphic origins of the east Himalayan gap. Chinese Journal of Geology, 36 (1): 122 ~ 128 (in Chinese with English abstract).

- Wang Haiyan, Gao Rui, Li Qiusheng, Li Wenhui, Hou Hesheng, Kuang Chaoyang, Xue Aiming, Huang Weiyi. 2014. Deep seismicreflection profiling in the Songpan west Qinling Linxia basin of the Qinghai Tibet plateau: data acquistion, data processing and preliminary inter pretations. Chinese Journal of Geophysics, 57(5): 1451~1461, doi: 10.6038/cig20140510 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lailiang, Han Mukang. 1984. Tectonic geomorphology of the theory, method, application and trend. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Ping, Guo Liangtian, Dong Haogang, Sheng Qiang, Ouyang Lisheng, Yin Xing. 2011. Discuss on the origin of Xilin Hill fault at the eastside of Guang-Cong fault, Pearl River Delta. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3129~3140 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Zhao Zhizhong, Qiao Yansong, Wang Shubing, Li Chaozhu, Song Lifeng. 2006. Paleoclimatic and paleoenvironmental evolution since theLate Glacial epoch as recorded by sporopollen from the Hongyuan peat section on the Zoige plateau, northern Sichuan, China. Geological Bulletin of China, 25(7): 827~832 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Tapponnier P, Van Der Woerd J, Ryerson F J, Wang Feng, Zheng Rongzhang, Chen Wenbing, Ma Wentao, Yu Guihua, Chen Guihua, Meriaux A S. 2005. Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn Tagh fault and its structural transformation model, Science in China Series D: Earth Sciences, 48(3): 384~397.
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Li Zhonghai, Li Huaqi, Cai Zhihui, Liang Fenghua, Dong Hanwen, Cao Hui, Chen Xijie, Huang Xuemeng, Wu Chan, Xu Cuiping. 2016. Indo — asian collision: Tectonic transition from compression to strike slip. Acta Geologica Sinica, 90(1):1~23 (in Chinese with English abstract).
- Yang Dayuan, Wu Shengguang, Wang Yunfei. 1996. The terrace and drainage change upstream of the Yellow River. Geographical Science, 16(2): 137 ~ 143 (in Chinese with English abstract).
- Yao Tandong, Shi Yafeng, Qin Dahe, Jiao Keqin, Yang Zhihong, Tian Lide, Thompson L G, Mosley-Thompson E. 1997. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core. Science in China Series D: Earth Sciences, 27 (5); 447~452 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Yan, Zhao Guoze, Wang Lifeng, Wang Jijun, Chen Xiaobing, Zhao Lingqiang, Xiao Qibing. 2014. Deep electric structure beneath the intersection area of West Qinling orogenic zone with North-Southseismic tectonic zone in China. Chinese Journal of Geophysics, 57(8): 2594 ~ 2607. doi: 10.6038/ cjg20140819 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Junlong, Ren Jinwei, Chen Changyun, Fu Jundong, Yang Panxin, Xiong Renwei, Hu Chongzhong. 2014. The Late Pleistocene activity of the eastern part of east Kunlun fault

zone and its tectonic significance. Science in China Series D: Earth Sciences, 57: 439 \sim 453, doi: 10. 1007/s11430-013-4759-2.

- Zhang Yueqiao, Ma Yinsheng, Yang Nong, Zhang Huiping, Shi Wei. 2005. LateCenozoic left-slip faulting process of the east Kunlun-Qinling fault system in west Qinling region and its eastward propagation. Acta Geoscientica Sinica, 26(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Li Hailong, Wu Manlu, Liao Chunting. 2012. Late Cenozoicthrust and nappe structure along the Minjiang upstream: Evidence from a drill hole. Geological Review, 58 (2): 215~223 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Li Hailong, Li Jian. 2016a. Neotectonics of the eastern margin of Tibetan Plateau: new geological evidence for the change from early Pleistocene transpression to late Pleistocene-Holocene strike-slip faulting. Acta Geologica Sinica, 90(2): 467~485 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Li Jian, Li Hailong, Li Jianhua. 2016b.
 Reinvestigation on seismogenic structure of the 1933 Diexi Ms
 7. 5 earthquake, eastern margin of the Xizang (Tibetan)
 Plateau. Geological Review, 62(2):267~276 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lingqiang, Zhan Yan, Chen Xiaobing, Yang Hao, Jiang Feng. 2015. Deep electrical structure of the central west Qinling orogenic belt and blocks on its either side. Chinese Journal of Geophysics, 58(7): 2460~2472, doi: 10.6038/cjg20150722 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenjun, Yuan Daoyang, He Wengui, Min Wei, Ren Zhikun, Liu Xingwang, Wang Aiguo, Xu Chong, Ge Weipeng, Li Feng. 2013. Geometric pattern and active tectonics in Southeastern GansuProvince: Discussion on seismogenic mechanism of the Minxian-Zhangxian Ms 6. 6 earthquake on July 22, 2013. Chinese Journal of Geophysics, 56(12): 4058 ~4071, doi: 10.6038/cjg20131211 (in Chinese with English abstract).

参考文献

- 陈长云,任金卫,孟国杰,杨攀新,熊仁伟,胡朝忠,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.
- 陈钰,刘兴起,何利,叶莉,陈惠芬,李凯. 2016. 青藏高原北部可可西 里库赛湖年纹层微区分析及形成机理. 地质学报,90(5):1006 ~1015.
- 崔中元,杨斌.1979.托索湖一玛曲活动断裂带.西北地震学报,1 (2):57~61.
- 丁国瑜.1993.活断层分段.北京:地震出版社.
- 付後东,任金卫,张军龙,熊仁伟,杨攀新,陈长云,胡朝忠.2012.东 昆仑断裂带东段塔藏断裂晚第四纪古地震研究.第四纪研究, 32(3):473~483.
- 高锐,王海燕,王成善,尹安,张玉修,李秋生.2011. 青藏高原东北缘 岩石圈缩短变形一深地震反射剖面再处理提供的证据. 地球学

报,32(5):513~520.

- 何文贵,袁道阳,熊振,葛伟鹏,刘兴旺.2006. 东昆仑断裂带东段玛 曲断裂新活动特征及全新世滑动速率研究. 地震,26(4):67 ~75.
- 胡朝忠. 2011.塔藏断裂晚第四纪活动性研究.中国地震局地震预测研究所硕士学位论文.
- 胡朝忠,任金卫,杨攀新,熊仁伟,陈长云,付俊东.2014. 东昆仑断裂 东延一塔藏断裂晚第四纪活动特征研究.见:陈运泰,金振民, 石耀霖等编.中国地球内部物理与大陆动力学研究.北京:科学 出版社,920~934.
- 嘉世旭,张先康.2008. 青藏高原东北缘深地震测深震相研究与地壳 细结构. 地球物理学报,51(5):1431~1443.
- 李陈侠,徐锡伟,闻学泽,郑荣章,陈桂华.2009.东昆仑断裂东段玛 沁一玛曲段几何结构特征.地震地质,31(3):441~458.
- 李春峰,贺群禄,赵国光.2005.东昆仑活动断裂带东段古地震活动 特征.地震学报,27(1):60~67
- 李海兵, 戚学祥, 朱迎堂, 杨经绥, Tapponnier P, 史连昌, 王永文. 2004. 2001 年东昆仑地震(Ms=8.1)不对称的同震地表破裂构 造── 单侧块体运动为主及青藏高原内部物质向东滑移的证 据. 地质学报, 78(5):633~640.
- 李亚林,王成善,王谋,伊海生,李勇.2006. 藏北长江源地区河流地 貌特征及其对新构造运动的响应.中国地质,33(2):374~382.
- 刘震,田小波,武振波.2015. 短周期密集台阵观测岷江断裂两侧地 壳结构,中国科学院地质与地球物理研究所 2015 年学术年会.
- 马寅生,施炜,张岳桥,杨农,张春山,张会平.2005.东昆仑活动断裂 带玛曲段活动特征及其东延.地质通报,24(1):30~35.
- 潘家伟,李海兵,孙知明,刘栋梁,吴婵,于常青. 2015. 阿尔金断裂 带新生代活动在柴达木盆地中的响应.岩石学报,31(12): 3701 ~3712.
- 青海省地震局,中国地震局地壳应力研究所.1999. 东昆仑活动断裂带.北京:地震出版社.
- 秦小光,殷志强,汪美华,赵无忌,穆燕,张磊.2017.青藏高原东北缘 共和一贵德盆地全新世气候变化.地质学报,91(1):266~286.
- 任金卫,汪一鹏,吴章明.1993. 青藏高原北部库玛断裂东西大滩全 新世地震形变带及其位移特征和水平滑动速率. 地震地质,15 (3):285~288.
- 任金卫,汪一鹏,吴章明.1999. 青藏高原北部东昆仑断裂带第四纪 活动特征和滑动速率.见:中国地震局科技发展司和《活动断裂 研究》编委会编,活动断裂研究(7).北京:地震出版社,147 ~164.
- 盛海洋.2008. 青藏高原东北缘若尔盖盆地晚新近纪沉积的岩石地 层学. 地质科学,43(3):445~472.
- 唐渊,刘俊来.2010.川滇西部上新世以来构造地貌:断裂控制的盆 地发育及对于远程陆内构造过程的约束.岩石学报,26(6): 1925~1937.
- 王二七,周勇,陈智粱, Burchfiel C B,季建清.2001.东喜马拉雅缺口 的地质与地貌成因.地质科学,36(1):122~128.
- 王海燕,高锐,李秋生,李文辉,侯贺晟,匡朝阳,薛爱民,黄薇漪. 2014.青藏高原松潘一西秦岭一临夏盆地深地震反射剖面——

采集、处理与初步解释.地球物理学报,57(5):1451~1461.

王萍,郭良田,董好刚,盛强,欧阳立胜,尹行.2011.珠江三角洲广从

断裂东侧"西淋岗断层"成因论证. 岩石学报, 27(10):3129 ~3140.

- 王燕,赵志中,乔彦松,王书兵,李朝柱,宋利峰.2006.川北若尔盖高 原红原泥炭剖面孢粉记录的晚冰期以来气候古环境的演变.地 质通报,25(7):827~832.
- 王乃樑,韩慕康.1984.构造地貌学的理论、方法、应用与动向.北京: 科学出版社.
- 汶川地震应急科考队.2008. 汶川地震应急科考报告.北京:地震出版社.
- 徐锡伟, Tapponnier P, Van Der Woerd J, Ryerson F J, 王峰,郑荣 章,陈文彬,马文涛,于贵华,陈桂华, Meriaux A S. 2003. 阿尔金 断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论. 中 国科学 D 辑:地球科学, 33: 967~974.
- 许志琴,王勤,李忠海,李化启,蔡志慧,梁凤华,董汉文,曹汇,陈希 节,黄学猛,吴婵,许翠萍.2016.印度-亚洲碰撞:从挤压到走 滑的构造转换.地质学报,90(1):1~23
- 杨达源,吴胜光,王云飞.1996.黄河上游的阶地与水系变迁,地理科 学,16(2):137~143.
- 姚檀栋,施雅风,秦大河,焦克勤,杨志红,田立德,Thompson LG, Mosley-Thompson E. 1997.古里雅冰芯中末次间冰期以来的气

候记录研究.中国科学,(地球科学D辑),27(5):447~452.

- 詹艳,赵国泽,王立凤,王继军,陈小斌,赵凌强,肖骑彬.2014.西秦 岭与南北地震构造带交汇区深部电性结构特征.地球物理学 报,57(8):2594~2607.
- 张军龙,任金卫,陈长云,付俊东,杨攀新,熊仁伟,胡朝忠. 2014.东 昆仑断裂带东部晚更新世以来活动特征及其大地构造意义.中 国科学,(地球科学 D辑),44:654 - 667.
- 张岳桥,李海龙,吴满路,廖椿庭.2012. 岷江断裂带晚新生代逆冲推 覆构造:来自钻孔的证据. 地质论评,58(2):215~223.
- 张岳桥,李建,李海龙,李建华.2016b. 青藏高原东缘 1933 年叠溪 Ms7.5级地震发震构造再研究.地质论评,62(2):267~276.
- 张岳桥,马寅生,杨农,张会平,施炜.2005.西秦岭地区东昆仑一秦 岭断裂系晚新生代左旋走滑历史及其向东扩展.地球学报,26 (1):1~8.
- 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. 地球物理学报, 58(7): 2460 ~2472.
- 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.2013.甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 Ms 6.6级地震孕震机制.地球物理学报,56(12):4058~4071.

Discussion on the Compression-Shear Activity of the Tazang Fault in East Kunlun and Uplift of Plateau

HU Chaozhong¹⁾, REN Jinwei¹⁾, YANG Panxin¹⁾, XIONG Renwei¹⁾,

CHEN Changyun²⁾, FU Jundong³⁾

1) Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing, 100036;

2) China Seismological Bureau First Monitoring Center, Tianjin, 300180;

3) Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan, 250014

Abstract

Tazang fault in the eastern section of East Kunlun fault traverses the interior and boundary of the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau. As the northeastern boundary of the southeastward movement of Bayankala terrane, its active features and sliding rate in Late Quaternary are extremely important to understanding the tectonic deformation of the Qinghai-Tibet plateau. Combined with interpretation of the high-resolution remote sensing images obtained through SPOT and ASTER DEM, this study carried out detail research on offset strata and landform and geochronology using seismic data and morphological features (such as streams, mountain ridges, displaced fluvial fans, terrace, fault valley, reversed camp, and so on), so as to understand the distribution, activity and strike-slip rate of the Tazang faults in late Quaternary. The Tazang fault can be divided into from west to east: Luocha section in the Qinghai-Tibet plateau, Dongbeicun section and Majiamo section in the margin of the Qinghai-Tibet plateau, with each section trending to 113°, 142° and 130° respectively, and gradually turning toward south. Its activity in late Quaternary is characterized by multiple stages and episodes. The Luocha section was dominated by sinistral shear strike-slip in company with compression during Holocene, with a sinistral strike-slip rate of 2. 43 \sim 2. 89 mm/a. Since 0. 66 \pm 0. 04ka BP when the latest offsetting event occurred, the fault surface is characteristic of nearly vertical strike slipping and well-developed tensional filled fractures. The Tazang fault is one of the major faults in the eastern extension of the East Kunlun fault system. The Majiamo section may be the active fault in Holocene, and 9.0 \pm 0.8ka stratum was faulted, with the fault surface dipping north up to 58°. Therefore, comparative analysis of activities of each segment in the Tazang fault shows that the western section was predominantly horizontal shear movement, the eastern section had a decreasing strike-slip motion component, and north-dipping of fault surface and uprising of northern hanging wall both resulted in gradually increasing of the vertical component. Strikeslip of East Kunlun fault zone and Tazang fault tended to decrease eastward in late Quaternary, and was converted into horizontal thrusting and plateau uplift, which is consistent with the features of the "imbricated thrust conversion- limited extrusion" model.

Key words: East Kunlun fault; Tazang fault; Late Quaternary stike-slip rate; compression-shear activities; limited extrusion model