

文章编号:1672-6561(2016)04-0483-11

喀喇昆仑断裂沿雅鲁藏布江缝合带 活动的构造地貌特征

王世锋¹, 江 万¹, 王 超²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101)

摘 要:喀喇昆仑断裂(KKF)在普兰裂谷以东的存在状况有两种推论:①大陆逃逸模式,认为喀喇昆仑断裂的活动状况在普兰裂谷以东和以西没有差别,都是沿雅鲁藏布江缝合带经历长时间、大尺度的右旋走滑;②分散变形模式,认为喀喇昆仑断裂的活动终止于普兰裂谷,断裂的走滑错距均被普兰裂谷吸收。然而,长久以来并没有针对喀喇昆仑断裂在普兰裂谷以东活动的野外调查。近年来,在普兰—仲巴一线针对喀喇昆仑断裂展开了详细的断裂几何学、运动学和年代学研究。野外调查表明,普兰—仲巴一线断层活动的构造地貌特征显著,如线性排列的断层三角面和断层陡坎、断塞塘、错断脊以及不同级别的水系右旋弯曲等,表明活动的喀喇昆仑断裂不仅仅局限于普兰裂谷以西。冲沟和错断脊显示霍尔地区喀喇昆仑断裂最大右旋错距为 (11 ± 1) km,而马攸木山以东的冈底斯花岗岩被右旋错断 (7 ± 1) km。喀喇昆仑断裂不同断层分支在马攸木山侧接,形成局部的挤压区。该挤压区吸收了约 4 km 的走滑错距,造成马攸木山成为雅鲁藏布江和印度河的分水岭。仲巴地区罗布岗日峰以东,喀喇昆仑断裂失去其地表踪迹,表明马攸木山附近的 7 km 走滑错距完全被隆格尔裂谷—罗布岗日峰—琼果盆地组成的盆山体系所吸收。霍尔附近一个右旋错距 (84 ± 2) m 的错断脊光释光测年结果表明该错断脊形成于 $(9.4 \pm 0.8) \sim (21.7 \pm 1.6)$ ka,由此计算出喀喇昆仑断裂在本区的最大右旋走滑速率为每年 (4.0 ± 0.3) mm。如果晚新生代以来喀喇昆仑断裂在本区均保持这样的走滑速率,则喀喇昆仑断裂在普兰—仲巴一线的起始活动时间在 3 Ma 左右,远小于阿里地区喀喇昆仑断裂的 12 Ma 起始活动时间。因此,断裂在研究区的几何学、运动学和年代学特征表明喀喇昆仑断裂在青藏高原陆内变形中具有分散变形的构造模式特征。

关键词:喀喇昆仑断裂;冈底斯花岗岩带;错断脊;水系位错;构造地貌;光释光测年;走滑速率
中图分类号:P542 文献标志码:A

Geomorphic Evidence for Recent Right-lateral Shear of Karakorum Fault Along Indus-Yalu Suture Zone of Tibet

WANG Shi-feng¹, JIANG Wan¹, WANG Chao²

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The existence active slip along Karakorum fault (KKF) in the east of Pulan graben is debated. One interpretation is that the KKF extends eastward along the Indus-Yalu suture zone and accommodates large magnitudes right-lateral shear; another interpretation is that the displacement along the KKF is absorbed by structures bounding Pulan graben and Gurla Madhata detachment system. The kinematic and geometric characteristics of the KKF along a 400 km long

收稿日期:2016-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41172192);中国地质调查局地质大调查项目(121201101000150014)

作者简介:王世锋(1970-),男,河北保定人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:wsf@cags.ac.cn。

segment of the Indus-Yalu suture zone between Mt. Kailas and Lopugangri ranges were reported. The results show that the evidence of recent deformation is characterized by offset streams, fault scarps, sag ponds, and shutter ridges; streams show a consistent right-lateral deflection; offsets vary from as little as tens of meters to as much as (11 ± 1) km, and basement rocks also show the same sense of offset with (7 ± 1) km; a region of transpression at Mayoumu Pass is interpreted to have absorbed 4 km of right-lateral displacement along the KKF, and about 7 km offset is transferred to Darong-Qiongguo Basin and possibly as far east as Lopugangri Range; a Holocene slip rate of (4.0 ± 0.3) mm per year for this segment of the KKF is calculated based on (84 ± 2) m right-lateral shutter ridge offset and optically stimulated luminescence ages of samples from sands and clays in the ridge ranging from (9.4 ± 0.8) ka to (21.7 ± 1.6) ka; the KKF is interpreted to have propagated to south-central Tibet since 3 Ma if the (11 ± 1) km offset occurs at Holocene slip rate keeping steady since Pliocene; right-lateral shear along the KKF in the western Himalaya is comparable to the distributed left-lateral shear documented from Dinggye to Chigu Co along the Indus-Yalu suture zone in the eastern Himalaya. It is suggested that this spatial distribution of strike-slip deformation is best explained by active oroclinal bending of Himalayan thrust wedge.

Key words: Karakorum fault; Gangdise granite belt; shutter ridge; stream channel offset; geomorphic evidence; optically stimulated luminescence; slip rate

0 引言

右旋走滑的喀喇昆仑断裂(KKF)是青藏高原西缘一条显著的构造地貌单元,断裂沿NW—SE走向在地表出露近千千米,北达帕米尔高原,南到狮泉河—普兰一线。近30年来,许多地质学家对该断裂的几何学、运动学和年代学进行了全面研究,取得了很大的进展^[1-21]。这些新认识包括:断裂有两期活动,早期(12 Ma之前)喀喇昆仑断裂具有走滑挤压特征,走滑错距在南端转化为狮泉河逆冲推覆构造系,向北转化为帕米尔 Karasu-Murghab-Rangkul 逆冲推覆构造系,晚期(12 Ma至今)断层具有走滑伸展特征,沿断裂走滑错距向北被塔什库尔干—塔合曼伸展体系所吸收,向南被门士盆地—阿伊山—札达盆山体系及普兰裂谷系所吸收。虽然断裂研究取得很大进展,但不同研究者对断裂在高原演化中的作用仍有不同的认识:坚持大陆逃逸模式的研究者认为喀喇昆仑断裂所有分支断裂的活动时间始于25~32 Ma期间,基于不同缝合带对比得到的走滑错距为280~400 km^[9,14-15,22-24];而坚持分散变形模式的研究者认为主干断裂是18 Ma以来才开始活动的,并逐渐向两端扩展,断裂的走滑错距在150 km以内^[2,4,6-7,11-13,18-20,25-28]。由于野外研究条件所限,普兰裂谷以东喀喇昆仑断裂活动状况一直没有展开具体的研究。坚持大陆逃逸模式的研究者认为断裂在普兰裂谷以东和以西并没有差别,都是大错

距长时间的活动特征^[9],而一部分坚持分散变形模式的研究者认为喀喇昆仑断裂所有走滑错距均被普兰裂谷吸收^[4,25],另一部分研究者认为喀喇昆仑断裂南缘52~66 km的走滑错距部分被普兰裂谷所吸收,部分可能沿雅鲁藏布江缝合带逐渐被吸收^[28-29]。为了深入了解普兰裂谷以西的喀喇昆仑断裂活动状况及建立精确的构造变形模型,本文对普兰—仲巴一线喀喇昆仑断裂展开了详细的野外调查。

1 区域地质背景

南岗仁波吉逆冲断裂(SKT或称为喜马拉雅大反向断裂)沿雅鲁藏布江缝合带分布,断裂最晚的活动时间止于13 Ma^[29-32]。该逆冲断裂为一向北逆冲的推覆构造,下盘主要为冈底斯火山岩带和始新世大竹卡组(E_3d)砾岩,上盘为特提斯海相地层及雅鲁藏布江缝合带。上盘涉及的地层主要为石炭系康托组(C_1k)和拉沙组(C_2l)、二叠系曲嘎组(P_2qg)和雅鲁藏布江缝合带有关的混杂堆积^[33]。康托组主要由砂岩夹灰岩组成,拉沙组主要是砂砾岩组合,而曲嘎组主要是海相灰岩和页岩组合。逆冲断裂下盘主要是冈底斯火山岩,研究区以不同期次的花岗岩为主,其次为第三系大竹卡组砾岩。现今活动的喀喇昆仑断裂走向与南岗仁波吉逆冲断裂在普兰—仲巴一线走向近于一直线,并切过南岗仁波吉逆冲断裂上盘,留下一系列构造地貌特征,由此限定喀喇昆

仑断裂活动时间晚于 13 Ma。研究区另一构造特征是近 EW 走向喀喇昆仑断裂与 14 Ma 以来活动的 SN 走向裂谷系交叉切割。其中,普兰裂谷系被认为是喀喇昆仑断裂转换构造^[6-7,28],隆格尔—Thakkhola 裂谷系在仲巴地区与喀喇昆仑断裂交汇,该裂谷系可能是喀喇昆仑断裂的尾端转换构造^[29]。

2 普兰裂谷以东喀喇昆仑断裂几何学、运动学特征

野外调查发现,普兰裂谷以东仍有明显的代表断层活动的构造地貌特征,如线性分布的断层陡坎、断塞塘、错断脊及水系的整体右旋弯曲等,指示右旋位错的错断脊及冲沟的错距在几十米到几千米不等。同时,基岩也表现出相似的错距,表明走滑错距的可靠性。根据地貌表现把断裂分为东、西两个分支断裂,它们在马攸木山左阶侧接,以下从西向东分段描述断层的活动特征(图 1)。

2.1 霍尔—公珠错一线

喀喇昆仑断裂穿过冈底斯山南坡到达普兰裂谷以东的霍尔镇,同时穿过南岗仁波吉逆冲断裂上盘。其上盘主要为雅鲁藏布江缝合带混杂堆积及部分新特提斯海相沉积。向南倾的断层三角面显示断层具

有走滑伸展特征,山脊和其间的水系均发生右旋位错,错距在 $(1.5 \pm 0.3) \sim (3.5 \pm 0.5)$ km 的水系位错在遥感图上清晰可辨,最大的水系位错介于点 I 和点 II 之间,为 (11 ± 1) km [图 2(a)]。断层陡坎走向 120° 左右,沿断层三角面底部发育,一般几十厘米高,呈羽状排列,显示古地震特征。点 II 附近古地震特征尤其明显,根据地震记载,可能是 1911 年 10 月 15 日发生在岗仁波吉地区的 6.7 级地震遗迹或 1918 年 4 月 28 日发生在公珠错附近的 5.8 级地震遗迹。在野外考察中,沿断层陡坎发现了很多热泉、断塞塘和断头河,表明断层的活动性,向西接近马攸木山,断裂的活动迹象逐渐衰弱,可能是断裂性质由伸展变为逆冲引起的。对点 I 附近一个约 84 m 的错断脊沿冲沟边缘从底到顶采集了一系列的光释光(OSL)测年样品[图 2(b)、(c)],用来限定山脊位错的累积时间。

2.2 马攸木山附近

马攸木山垭口可见二叠系曲嘎组紫红色砂岩向南逆冲于石炭系康托组灰黑色碳质页岩之上,两套地层之间缺失了本区广泛分布的上石炭统和下二叠统部分地层。垭口处可见灰黑色页岩上一个直径为 100~200 m 的紫红色砂岩山包,该山包为飞来峰。

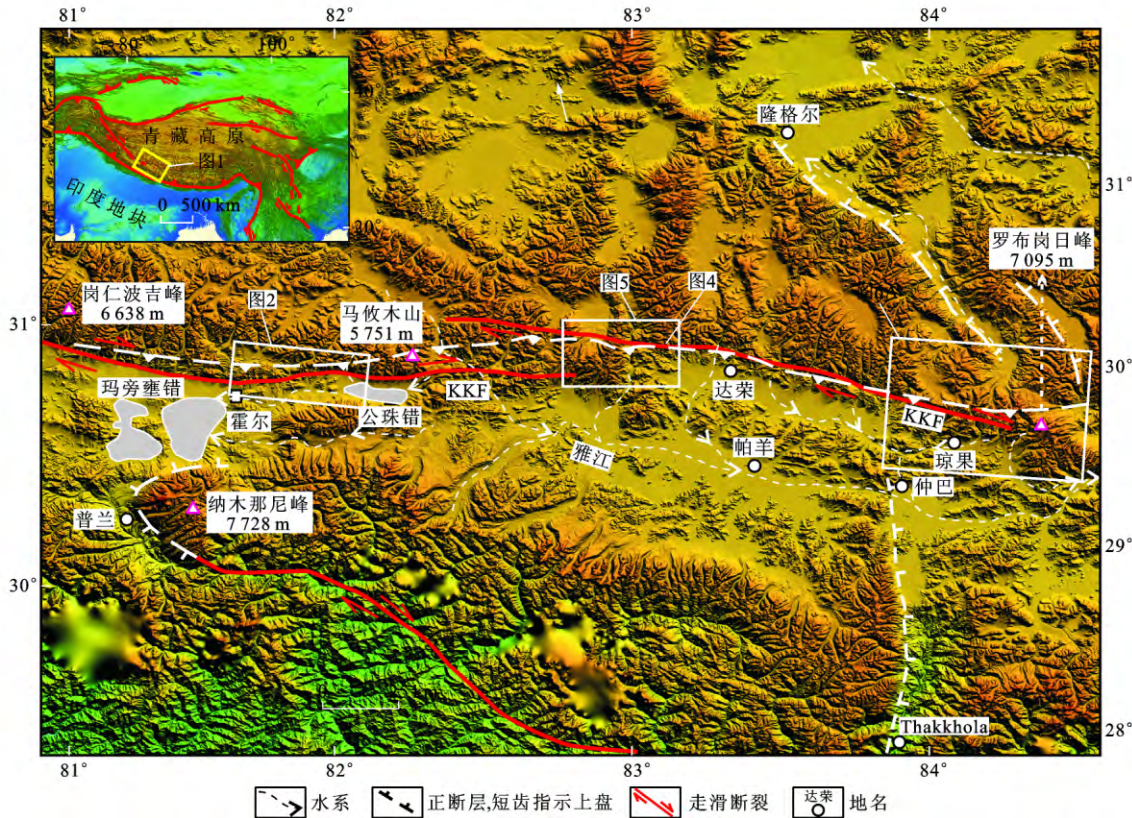
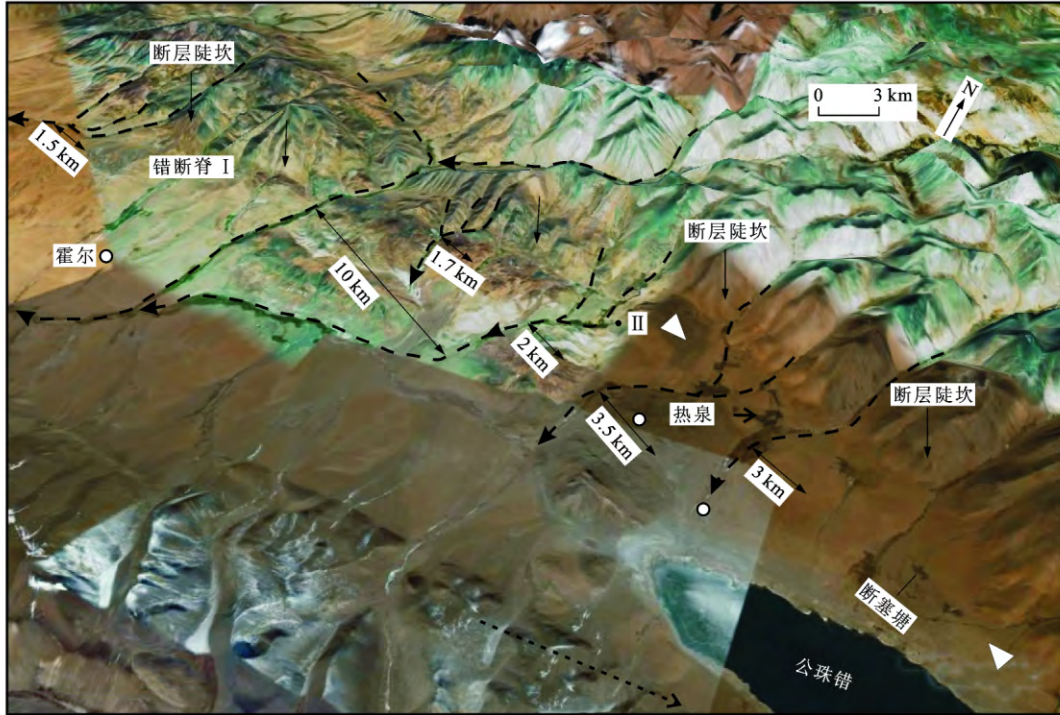


图 1 普兰—仲巴一线喀喇昆仑断裂地表展布简图

Fig. 1 Topographic Map Showing the Trace of Karakorum Fault Along Pulan-Zhongba



(a) 霍尔地区沿喀喇昆仑断裂水系右旋弯曲,错距在几十米至10 km左右



(b) 错断脊显示右旋错距在84 m左右,沿错断脊由底至顶采集一系列光释光样品



(c) 错断脊内新开挖层面的水平粉砂层及采样位置

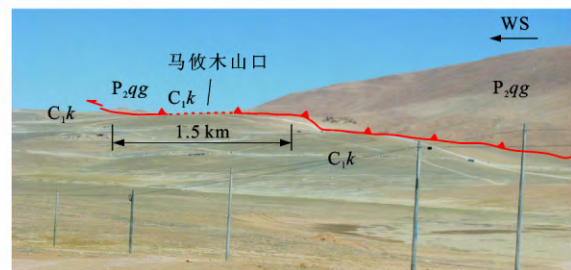
图2 霍尔地区沿喀喇昆仑断裂的构造地貌特征

Fig. 2 Geomorphologic Evidence of Huoer Area Along Karakorum Fault

因为其与逆断层上盘的岩性一致,所以判断该逆冲断裂逆冲推覆量最少为 1.5 km(图 3)。逆冲断裂的运动方向,上、下盘的岩石组合特征与南岗仁波吉逆冲断裂差异很大,且野外调查表明南岗仁波吉逆冲断裂在该逆冲断裂的北部 4~8 km 处。这是喀喇昆仑断裂的西支断裂在马攸木山附近逐渐尖灭并与东支断裂侧接造成的。喀喇昆仑断裂的东支断裂在马攸木山开始发育,并一直向东延伸经过达荣、帕羊到达琼果。喀喇昆仑断裂的分支断裂在马攸木山形成左阶侧接,局部形成挤压区,造成马攸木山成为印度河和雅鲁藏布江两大水系的分水岭(图 1)。

2.3 达荣附近

马攸木山和达荣—琼果盆地之间作为南岗仁波吉逆冲断裂下盘出露的冈底斯花岗岩地貌上形成高



逆冲推覆量为 1.5 km 左右

图3 二叠系曲嘎组砂岩逆冲于石炭系康托组页岩地层之上

Fig. 3 Photo Showing Sandstone of Permian Quga Group Thrusting Above Shale of Carboniferous Kangtuo Group

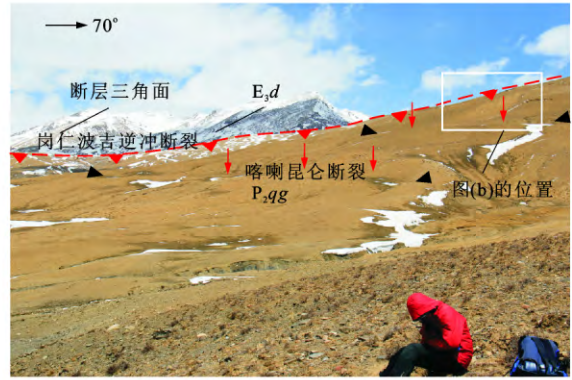
山,山前发育向南倾的巨大断层三角面,曾经的逆断层上盘地层石炭系拉沙组页岩和二叠系曲嘎组灰岩在地貌上位于坡脚的位置,表明本区经历了早期的

逆冲之后,晚期发生伸展滑塌,页岩形成的边坡断层陡坎发育。局部地区发育 3 条平行排列的断层陡坎,坎高 0.2~0.4 m,断坪宽 0.2~0.6 m,冲沟发生偏转或形成断头水系,表明喀喇昆仑断裂的近期活动痕迹(图 4)。断层的构造地貌特征与地质体的活动特征一致,根据 1:250 000 霍尔巴幅地质图,锆石 U-Pb 年龄为 71 Ma 和 15 Ma 的冈底斯花岗岩均发生了右旋位错,错距为 6~8 km(图 5),断裂带表现为碎裂带,未发现断层活动的韧性剪切带。

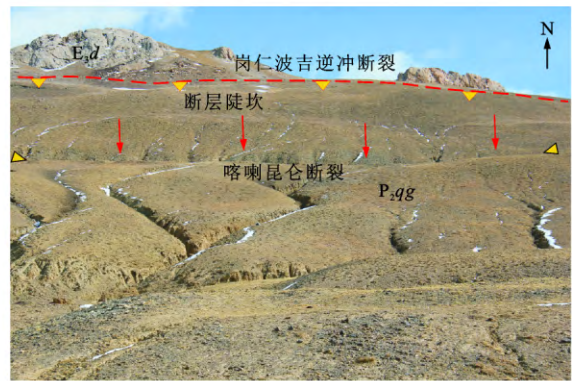
2.4 琼果附近

在达荣—琼果盆地北缘山腰,线状分布的断层迹象无论是遥感图还是野外观察都特征明显,线状分布的断层陡坎表明喀喇昆仑断裂在本区的断层走向与前述地区一样,断层面倾向 SSW,走向约 120°,表明其为走滑伸展断裂[图 6(a)、(b)]。一系列冲沟表现为右旋位错,错距在 30~160 m,断坪上可见断塞塘[图 6(c)]。达荣—琼果盆地北缘的活动断裂表明该盆地为断层控制的伸展盆地,盆地东北侧为雅鲁藏布江北侧的最高峰(罗布岗日峰),罗布岗日峰东侧遥感图和野外调查均未发现活动断裂的构造地貌特征。

本区特别值得关注的地貌特征是隆格尔裂谷在地貌上呈朝 NE 凸出的 NW—SE 走向弧形,该弧形终结于罗布岗日峰,该峰是雅鲁藏布江以北藏南最高峰,海拔 7 066 m,推测 14 Ma 以来活动的 SN 向裂谷被活动时间更晚、活动性更强的 EW 向喀喇昆仑断裂所切割,甚至隆格尔裂谷与 Thakkhola 裂谷本是一体的,只是由于喀喇昆仑断裂的右旋走滑造成两者分离达 30 km(图 1)。因此,罗布岗日峰同



(a) 整体图

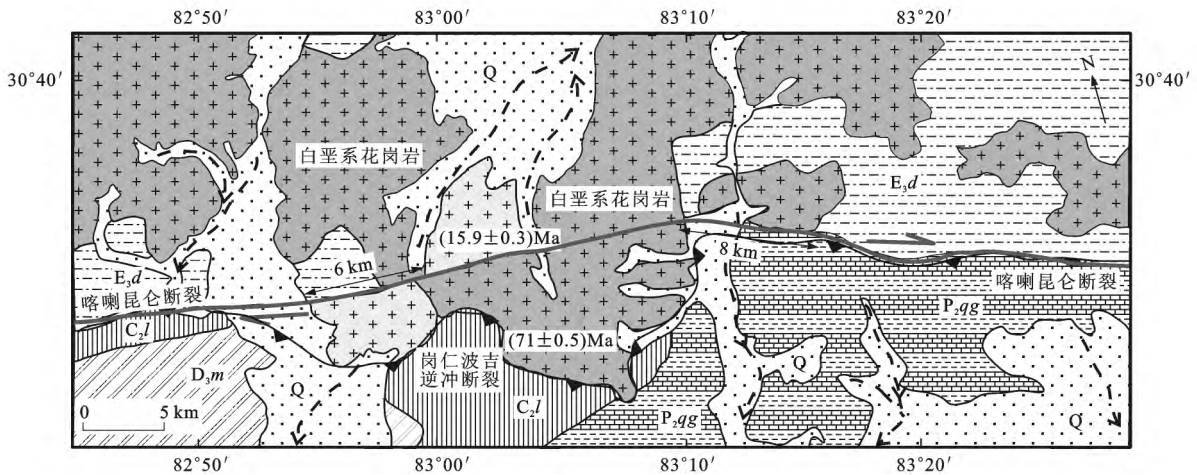


(b) 图(a)局部放大图

图 4 断层陡坎及断层三角面显示活动的喀喇昆仑断裂切过不活动的岗仁波吉逆冲断裂上盘

Fig. 4 Fault Triangle Facet and Scarp Showing the Active Karakorum Fault Cuts Through the Hanging Wall of the Inactive Kailas Thrust Fault

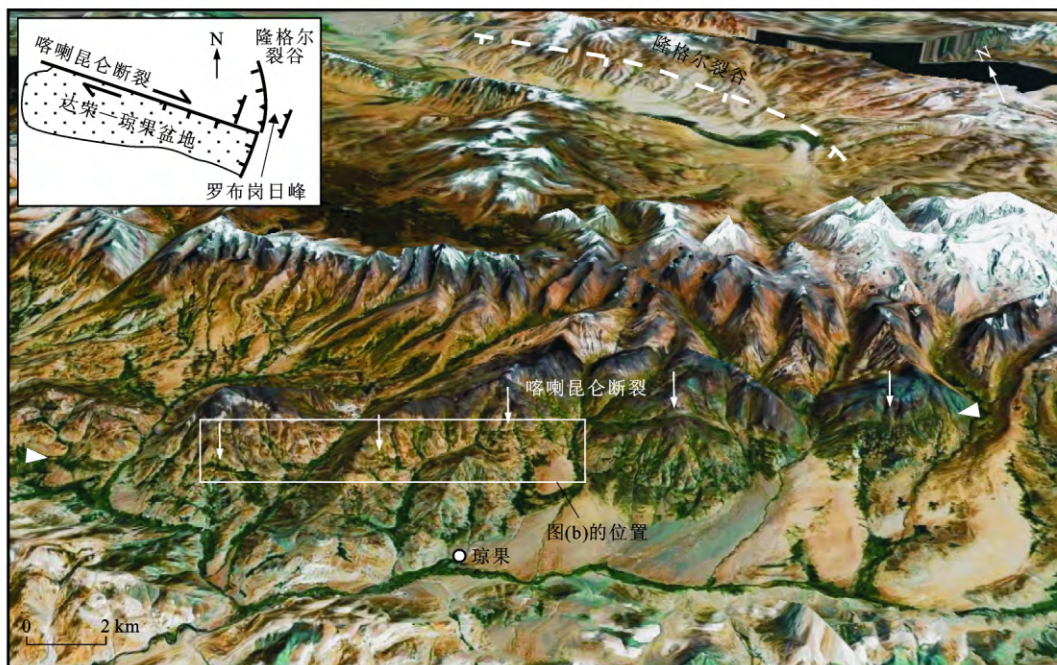
马攸木山一样,是喀喇昆仑断裂尾端发生构造转换,走滑断裂变为逆冲断裂的产物,转换构造导致喀喇昆仑断裂 6~8 km 的走滑错距被达荣—琼果盆地和罗布岗日峰所吸收,并造成仲巴县城以东失去喀



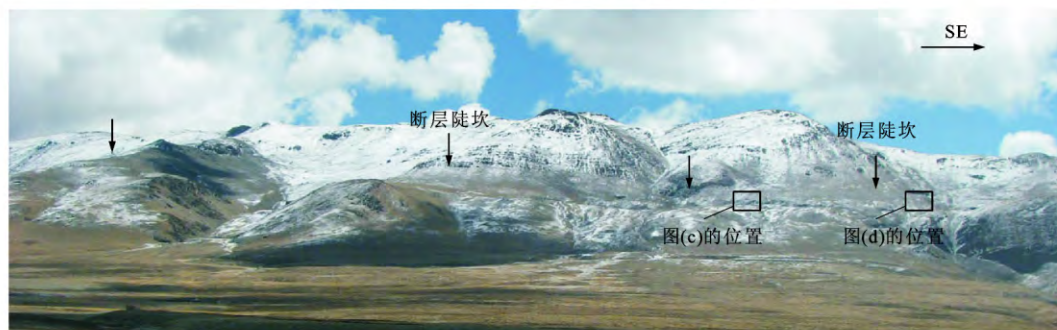
D_{3,m} 为马油木组;不同期次花岗岩右旋错距为 6~8 km;花岗岩年代数据见文献[33]

图 5 喀喇昆仑断裂切过冈底斯花岗岩带

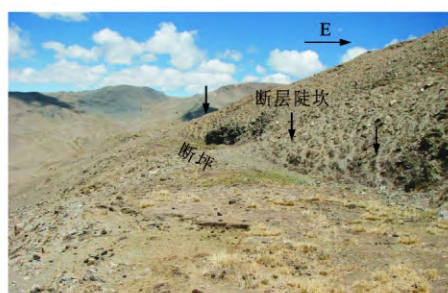
Fig. 5 Geological Map Showing Karakorum Fault Cuts Through Gangdise Granite Belt



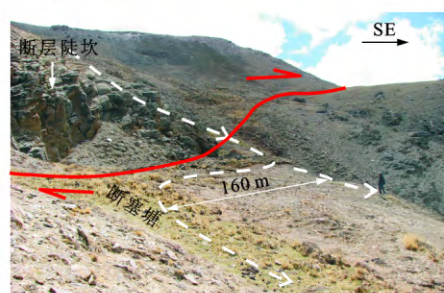
(a) 遥感图显示的琼果附近喀喇昆仑断裂构造地貌特征



(b) 琼果附近喀喇昆仑断裂线性断层陡坎



(c) 断层陡坎与段坪



(d) 右旋弯曲的水系,错距达160 m

图 6 琼果附近喀喇昆仑断裂现代活动的线性地貌特征

Fig. 6 Linear Geomorphology of Karakorum Fault Modern Activity near Qionguo

喇昆仑断裂活动迹象。

3 光释光年龄测量

为了更好地限定断层的走滑速率,本文对霍尔附近的错断脊进行了光释光样品的野外采集与室内年龄测定。该错断脊一侧的冲沟内从底到顶高差约 20 m,主要由未固结的河流相中沙和粉沙韵律互

层,呈层理水平状。该点布置采样 5 个,样品位置见图 2(b)、(c)。样品采集过程完全按照已有的标准流程进行^[34-35]。实验室内对样品进行的前处理是在中国地震局地质研究所光释光实验室暗房波长 660 nm 的红光下进行。由于可能暴露在日光下,首先去除钢管内两端的样品,用盐酸和过氧化氢处理钢管内部粒度小于 300 μm 的物质,以去除碳酸盐和有机

物,提高石英纯度,试验前处理流程按已有的标准程序进行^[36-37]。

3.1 等效剂量的测量

光释光信号测量和 β 辐照均在 Daybreak 2200 型自动化光释光测量仪上完成,激发光源分别是波长为 $(470\pm 5)\text{nm}$ 的蓝光束(最大功率 $67.3\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$)和波长为 $(880\pm 60)\text{nm}$ 的红外光束(最大功率 $80.1\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$)^[38-40]。光释光信号通过 EMI QA9235 型光电倍增管(PMT)检测。等效剂量的测量采用简单多片再生法(SMAR),样品在测试之前先利用红外释光(IRSL)信号检测石英纯度,做到样品长石在前期处理中已经基本刻蚀干净,石英纯度达到测试要求。在简单多片再生法测量时,天然测片为10个,预热温度为 $260\text{ }^\circ\text{C}$,预热时间为 10 s 。做到样品的简单多片再生法光释光衰减曲线与再生剂量生长曲线符合典型的石英信号特征,符合简单多片再生法光释光测年要求,同一个样品10个测片的等效剂量值大致相同。

3.2 环境剂量率的测量

环境剂量率是指样品每年吸收的周围环境辐射剂量值。样品环境剂量率的来源主要取决于样品及周围物质中的自然放射性核素衰变所产生的 α 、 β 和

γ 射线及宇宙射线的少量贡献^[38-40]。其中,放射性核素对环境剂量率的贡献主要来自U、Th及其衰变子体以及K。K的含量通过火焰光度计测量,U、Th元素及其衰变子体对样品环境剂量的贡献用经标定的 Daybreak 583 型低本底厚源 α 计数仪测定,在这里沿用的是 α 粒子计数率。计算时, α 系数(即 α 辐射产生释光信号的有效系数)采用 0.040 ± 0.005 ^[41]。由于水对 α 、 β 和 γ 辐射具有一定的吸收作用,样品埋藏层的含水量对样品环境剂量的影响不容忽视,本文样品含水量采用估计值($15\%\pm 5\%$),同时也考虑了宇宙射线的影响。最后,根据 Aitken 提出的换算关系^[36]得出研究区样品的环境剂量率。

3.3 光释光年龄测试结果

表1列出了霍尔错断脊的样品光释光各参数数值与测试年龄。各参数数值无异常状况,测试年龄与地层层序相符。上层沉积年龄较新,向下年龄逐渐变老。靠近顶部的沉积层样品HR-I年龄显示为 $(9.7\pm 0.8)\text{ka}$,中部沉积层有两个年龄,分别是样品HR-II的 $(15.4\pm 1.6)\text{ka}$ 和样品HR-III的 $(17.1\pm 1.8)\text{ka}$,沉积层底部HR-IV和HR-V年龄分别为 $(20.8\pm 1.8)\text{ka}$ 和 $(21.7\pm 1.6)\text{ka}$ 。

表1 霍尔地区错断脊的样品光释光年龄分析结果

Tab. 1 Analysis Results of OSL Dating for Samples from a Shutter Ridge in Huoer Area

样品编号	深度/m	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{K})/\%$	含水量/%	环境剂量率/($\text{Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$)	等效剂量/Gy	光释光年龄/ka
HR-I	0.7	1.72 ± 0.04	6.97 ± 0.03	2.4	0.02	3.4 ± 0.2	33.0 ± 2.6	9.7 ± 0.8
HR-II	0.5	2.02 ± 0.04	7.66 ± 0.03	2.6	0.02	3.7 ± 0.2	57.1 ± 5.8	15.4 ± 1.6
HR-III	0.5	1.66 ± 0.04	6.21 ± 0.03	2.4	0.03	3.3 ± 0.2	56.9 ± 6.0	17.1 ± 1.8
HR-IV	0.6	2.36 ± 0.04	8.51 ± 0.03	2.4	0.02	3.7 ± 0.2	76.2 ± 6.2	20.8 ± 1.8
HR-V	0.8	1.63 ± 0.04	6.53 ± 0.03	2.7	0.04	3.6 ± 0.2	78.7 ± 5.5	21.7 ± 1.6

注: $w(\cdot)$ 为元素质量分数;含水量是质量比。

4 讨论

4.1 喀喇昆仑断裂活动的地貌证据

从霍尔至仲巴近 300 km 的范围内,遥感图像和实地调查均发现断层活动的线性特征非常明显,本文照片(图2、4、6)中显示的沿断裂走向发育断层陡坎和断层三角面是断层伸展的地貌特征。同时,喀喇昆仑断裂是一条著名的右旋走滑断裂,不同级别的水系均发生右旋位错,表明其右旋走滑特征。水系位错的测量,本文参考了沿鲜水河断裂水系位错和沿昆仑断裂水系位错测量的相关方法^[42-43],具体测量方法见图7。此外,沿断裂还发育断塞塘和热泉,这些是断层活动的辅助证据。

根据藏南裂谷系的研究,藏南地区 14 Ma 以来处于伸展垮塌阶段^[44-45],这与断裂尾端形成局部的挤压构造(如文中提到的马攸木山和罗布岗日峰挤压构造)并不矛盾。地震级别的构造活动可以很好地展示这种伸展背景下的挤压构造,如在2010年青海玉树 7.1 级地震现场,可以发现地震破裂带由一系列雁列式排列次级断裂构成,根据侧接方式的不同,可在侧接带形成断塞塘或挤压脊^[46]。

4.2 霍尔—仲巴一线喀喇昆仑断裂活动特征、走滑速率及起始活动时间

野外调查表明,普兰裂谷以东仍然有喀喇昆仑断裂活动的构造地貌证据。无论是线性排列的断层三角面和断层陡坎,还是显示断层痕迹的断塞塘和

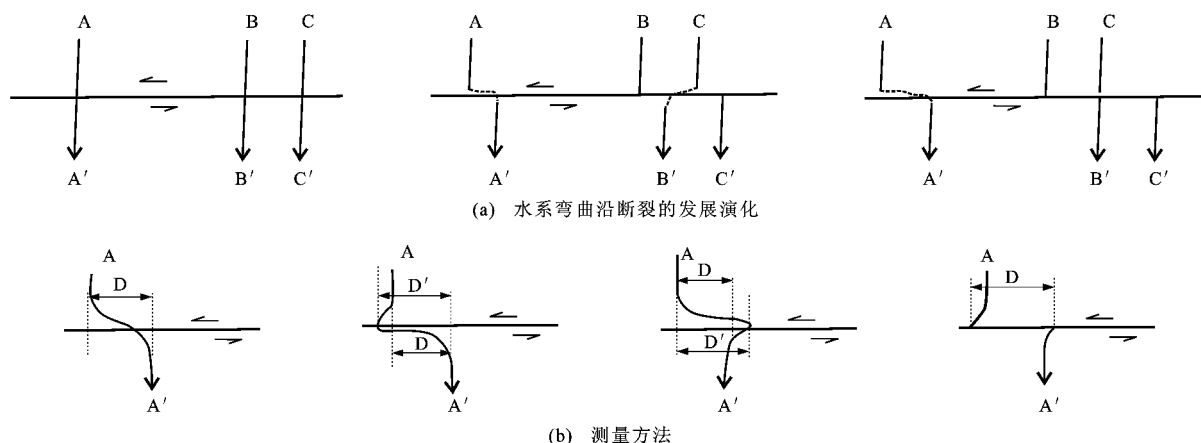


图7 水系沿断裂弯曲的原理及水系位错测量方法

Fig. 7 Schematic Illustration of Stream Deflection Geometries and Methods Used to Quantify the Magnitude of Stream Deflection

断层热泉以及一系列右旋位错的错断脊,均肯定了喀喇昆仑断裂断层沿雅鲁藏布江缝合带向东延伸到了藏南中部仲巴附近。不同于大陆逃逸模式提出的280~400 km走滑错距^[9,14-15],研究区内无论是水系位错还是地质体位错,最大错距为 (11 ± 1) km,如果假定10 Ma之前隆格尔—Thakkhola裂谷是SN向一体的,喀喇昆仑断裂最大走滑错距也只有30 km左右。而且在霍尔—仲巴一线,断层破碎带均为脆性破碎带,没有发现狮泉河地区的韧性糜棱岩带,这从一个侧面表明断层活动时间较晚,晚于喀喇昆仑断裂在狮泉河—普兰一线的12 Ma。

霍尔附近错距在84 m的错断脊光释光年龄表明错断脊形成于9~21 ka期间,冲沟底部可能还有代表错断脊形成的更老地层,由于未出露地表无法采样证实,这表明错断脊的形成不晚于21 ka。断层的持续活动远远早于相关水系形成时间,因此,错断脊在喀喇昆仑断裂活动下的错断量是错断脊开始形成以来逐渐积累完成的。假设21 ka为错断脊的形成年龄,喀喇昆仑断裂在研究区的走滑速率为每年 (4.0 ± 0.3) mm。这个走滑速率与普兰裂谷以西的喀喇昆仑断裂相比活动性明显减弱,如Chevalier等得到门士附近约每年10 mm的第四纪走滑速率^[47],而在狮泉河地区的长期走滑速率为每年6~8 mm^[20-22]。假设晚新生代以来喀喇昆仑断裂一直保持此匀速的走滑速率,而本区的最大错距为 (11 ± 1) km,由此得出本区断层可能的起始活动时间应该在3 Ma左右。如果隆格尔裂谷与Thakkhola裂谷是由于喀喇昆仑断裂右旋走滑而错断的,则喀喇昆仑断裂在研究区的最大走滑错距在30 km左右,由此推测喀喇昆仑断裂在本区的最老活动时间在7.5 Ma左右。但是罗布岗日峰以东再无喀喇昆仑

断裂活动迹象,30 km的走滑错距被罗布岗日峰所在的转换构造所吸收是不可想象的,因此,只能估计本区喀喇昆仑断裂的活动时间在3.0~7.5 Ma的某一时期。

4.3 喀喇昆仑断裂在普兰裂谷以东活动的构造意义

Searle等的研究表明马拉达克地区喀喇昆仑断裂起始活动时间在18 Ma左右^[4-5,27],并逐渐沿走向扩展到普兰地区,而法国地质学家Lacassin等则认为狮泉河地区断层的活动时间在25~32 Ma期间,并逐渐向北扩展^[9,14-15,24]。近年来,Wang等一直对狮泉河—普兰一线的喀喇昆仑断裂展开断裂几何学、运动学和年代学研究^[16-21,48],研究表明狮泉河—普兰一线的断裂活动时间起始于12 Ma以来。本文的研究表明普兰—仲巴一线的喀喇昆仑断裂活动时间在3.0~7.5 Ma期间,晚于狮泉河—普兰一线的断裂活动时间,且断裂的走滑错距在11 km左右,最大错距不超过30 km,同样小于狮泉河—普兰一线的52~60 km走滑错距。基于此,笔者认为喀喇昆仑断裂不同分支断层起始活动时间不同是断裂逐渐向SE扩展的结果,错距向东逐渐减小,到仲巴以东彻底失去踪迹的原因是转换构造不断吸收走滑错距。断裂在本区的几何学、运动学特征表明喀喇昆仑断裂具有分散变形的特征,而不是一些地质学家认为的沿雅鲁藏布江大规模长时间的侧向挤出^[9,49]。

5 结语

霍尔—仲巴一线的断裂几何学、运动学特征表明普兰裂谷以东仍存在喀喇昆仑断裂活动的构造地貌特征,但沿断裂带的右旋走滑错距只有十几千米,这远远小于大陆逃逸模式估计的上百千米走滑错距。光释光年代学数据表明,84 m左右的错断脊形

成于 21 ka 以来,由此计算出晚第四纪断裂的走滑速率为每年 (4.0 ± 0.3) mm。如果第四纪以来喀喇昆仑断裂在研究区保持此走滑速率,则研究区内喀喇昆仑断裂的起始活动时间在 3.5 Ma 左右,该段的喀喇昆仑断裂起始活动时间晚于喀喇昆仑断裂在拉达克地区的 18 Ma 起始活动时间,也晚于狮泉河地区断裂的 12 Ma 起始活动时间。这表明断裂的活动方式具有逐步向南扩展的特征,由此判断喀喇昆仑断裂在高原陆内变形中具有分散变形的构造模式特征。

参考文献:

References:

- [1] BURTMAN V S, MOLNAR P. Geological and Geophysical Evidence for Deep Subduction of Continental Crust Beneath the Pamir[J]. Geological Society of America Special Papers, 1993, 281: 1-76.
- [2] RATSCHBACHER L, FRISCH W, LIU G H. Distributed Deformation in Southern and Western Tibet During and After the India-Asia Collision[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B10): 19917-19945.
- [3] STRECKER M R, FRISCH W, HAMBURGER M W, et al. Quaternary Deformation in the Eastern Pamirs, Tadjikistan and Kyrgyzstan[J]. Tectonics, 1995, 14(5): 1061-1079.
- [4] SEARLE M P, WEINBERG R F, DUNLAP W J. Transpressional Tectonics Along the Karakoram Fault Zone, Northern Ladakh: Constrains on Tibet Extrusion[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1998, 135: 307-326.
- [5] DUNLAP W J, WEINBERG R F, SEARLE M P. Karakoram Fault Zone Rocks Cool in Two Phases[J]. Journal of the Geological Society, 1998, 155(6): 903-912.
- [6] MURPHY M A, YIN A, KAPP P, et al. Southward Propagation of the Karakoram Fault System into Southwest Tibet: Timing and Magnitude of Slip[J]. Geology, 2000, 28(5): 451-454.
- [7] MURPHY M A, YIN A, KAPP P, et al. Structural Evolution of the Gurla Mandhata Detachment System, Southwest Tibet: Implications for the Eastward Extent of the Karakoram Fault System[J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114(4): 428-447.
- [8] BROWN E T, BENDICK R L, BOURLES GAUR V, et al. Slip Rates of the Karakoram Fault, Ladakh, India, Determined Using Cosmic Ray Exposure Dating of Debris Flows and Moraines[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 107(B9), doi:10.1029/2000JB000100.
- [9] LACASSIN R, VALLI F, ARNAUD N, et al. Large-scale Geometry, Offset and Kinematic Evolution of the Karakorum Fault, Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219(3/4): 255-269.
- [10] 李海兵, VALLI F, 刘敦一, 等. 喀喇昆仑断裂的形成时代: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的制约[J]. 科学通报, 2007, 52(4): 438-447.
- LI Hai-bing, VALLI F, LIU Dun-yi, et al. Initial Movement of the Karakorum Fault in Western Tibet: Constraints from SHRIMP U-Pb Dating of Zircons[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(4): 438-447.
- [11] ROBINSON A C, YIN A, MANNING C E, et al. Tectonic Evolution of the Northeastern Pamir: Constraints from the Northern Portion of the Cenozoic Kongur Shan Extensional System, Western China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116(7/8): 953-973.
- [12] ROBINSON A C, YIN A, MANNING C E, et al. Cenozoic Evolution of the Eastern Pamir: Implications for Strain-accommodation Mechanisms at the Western End of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, 119(7/8): 882-896.
- [13] ROBINSON A C. Geologic Offsets Across the Northern Karakorum Fault: Implications for Its Role and Terrace Correlations in the Western Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 279(1/2): 123-130.
- [14] VALLI F, ARNAUD N, LELOUP P H, et al. Twenty Million Years of Continuous Deformation Along the Karakorum Fault, Western Tibet: A Thermochronological Analysis[J]. Tectonics, 2007, 26(4), doi:10.1029/2005TC001913.
- [15] VALLI F, LELOUP P, PAQUETTE J, et al. New U-Th/Pb Constraints on Timing of Shearing and Long-term Slip-rate on the Karakoram Fault[J]. Tectonics, 2008, 27(5), doi:10.1029/2007TC002184.
- [16] WANG S F, BLISNIUK P, KEMPF O, et al. The Basin-range System Along the South Segment of the Karakorum Fault Zone, Tibet[J]. International Geology Review, 2008, 50(2): 121-134.
- [17] 王世锋, 张伟林, 方小敏, 等. 藏西南札达盆地磁性地层学特征及其构造意义[J]. 科学通报, 2008, 53(6): 676-683.
- WANG Shi-feng, ZHANG Wei-lin, FANG Xiao-min, et al. Magnetostratigraphy of the Zanda Basin in Southwest Tibet Plateau and Its Tectonic Implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(6): 676-683.
- [18] WANG S F, FANG X M, LAI Q Z, et al. New Radio-

- metric Dating Constrains the Time for Initiation of the Karakorum Fault Zone(KFZ), SW Tibet[J]. *Tectonophysics*, 2009, 475(3/4): 503-513.
- [19] WANG S F, WANG C, PHILLIPS J R, et al. Displacement Along the Karakoram Fault, NW Himalaya, Estimated from LA-ICP-MS U-Pb Dating of Offset Geologic Markers[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 337/338: 156-163.
- [20] WANG S F, WANG E, FANG X M, et al. U-Pb SHRIMP and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages Constrain the Deformation History of the Karakoram Fault Zone (KFZ), SW Tibet[J]. *Tectonophysics*, 2011, 509(3/4): 208-217.
- [21] WANG S F, MO Y, PHILLIPS J R, et al. Karakoram Fault Activity Defined by Temporal Constraints on the Aiyi Shan Detachment, SW Tibet[J]. *International Geology Review*, 2014, 56(1): 15-28.
- [22] PELTZER G, TAPPONNIER P. Formation and Evolution of Strike-slip Faults, Rifts, and Basins During the India-Asia Collision: An Experimental Approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(B12): 15085-15117.
- [23] ARMIJO R, TAPPONNIER P, HAN T L. Late Cenozoic Right-lateral Strike-slip Faulting in Southern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B3): 2787-2838.
- [24] LELOUP H P, WEINBERG F R, MUKHERJEE K B, et al. Comment on 'Displacement Along the Karakoram Fault, NW Himalaya, Estimated from LA-ICP-MS U-Pb Dating of Offset Geologic Markers' Published by Shifeng Wang et al. in *EPSL*, 2012 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 363: 260-263.
- [25] SEARLE M P. Geological Evidence Against Large-scale Pre-Holocene Offsets Along Karakoram Fault: Implications for the Limited Extrusion of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 1996, 15(1): 171-186.
- [26] PHILLIPS R J, PARRISH R R, SEARLE M P. Age Constraints on Ductile Deformation and Long-term Slip Rates Along the Karakoram Fault Zone, Ladakh [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226: 305-319.
- [27] PHILLIPS R J, SEARLE M P. Macrostructural and Microstructural Architecture of the Karakoram Fault: Relationship Between Magmatism and Strike-slip Faulting [J]. *Tectonics*, 2007, 26(3), doi: 10.1029/2006TC00946.
- [28] MCCALLISTER A T, TAYLOR M H, MURPHY M A, et al. Thermo-chronologic Constraints on the Late Cenozoic Exhumation History of Gurla Mandhata, Metamorphic Core Complex, Southwestern Tibet [J]. *Tectonics*, 2014, 33(2): 27-52.
- [29] MURPHY M A, SANCHEZ V, TAYLOR M H. Syn-collisional Extension Along the India-Asia Suture Zone, South-central Tibet: Implications for Crustal Deformation of Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290(3/4): 233-243.
- [30] YIN A, HARRISON T M, MURPHY M A, et al. Tertiary Deformation History of Southeastern and Southwestern Tibet During the Indo-Asian Collision [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111(11): 1644-1664.
- [31] HARRISON T M, YIN A, GROVE M L, et al. The Zedong Window: A Record of Superposed Tertiary Convergence in Southeastern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B8): 19211-19230.
- [32] ZHANG R, MURPHY M A, LAPEN T J, et al. Late Eocene Crustal Thickening Followed by Early-Late Oligocene Extension Along the India-Asia Suture Zone: Evidence for Cyclicity in the Himalayan Orogen [J]. *Geosphere*, 2011, 7(5): 1249-1268.
- [33] 西藏地质矿产勘查开发局. 1:250 000 霍尔巴幅地质图[R]. 拉萨: 西藏地质矿产勘查开发局, 2005.
- Tibet Bureau of Geology and Mineral Resources. 1:250 000 Regional Geology of Huoerba [R]. Lhasa: Tibet Bureau of Geology and Mineral Resources, 2005.
- [34] MURRAY A S, WINTLE A G. Luminescence Dating of Quartz Using an Improved Single-aliquot Regenerative-dose Protocol [J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32(1): 57-73.
- [35] MURRAY A S, WINTLE A G. The Single Aliquot Regenerative Dose Protocol: Potential for Improvements in Reliability [J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37(4/5): 377-381.
- [36] AITKEN M J. An Introduction to Optical Dating [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [37] DULLER G A T. Distinguishing Quartz and Feldspar in Single Grain Luminescence Measurements [J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37(2): 161-165.
- [38] 赵俊香, 江娃利, 郭慧, 等. 唐山孙家楼探槽光释光测年及其对古地震事件的指示意义 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(5): 12-16.
- ZHAO Jun-xiang, JIANG Wa-li, GUO Hui, et al. Optical Dating of Sunjialou Trench in Tangshan and Its Significance for Palaeoseismic Events [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(5): 12-16.
- [39] 赵俊香, 于慎谔. 山西应县护驾岗冲洪积台地地层光

- 释光年龄及其指示意义[J]. 中国地震, 2012, 28(3): 277-284.
- ZHAO Jun-xiang, YU Shen-e. OSL Age of Hujiagang Alluvial-pluvial Platform Stratum in Yingxian, Shanxi Province and Its Significance[J]. Earthquake Research in China, 2012, 28(3): 277-284.
- [40] 赵俊香, 任俊杰, 于慎谔, 等. 山西忻定盆地断层崩积楔 OSL 年龄及其对古地震事件的指示意义[J]. 现代地质, 2012, 23(6): 1022-1029.
- ZHAO Jun-xiang, REN Jun-jie, YU Shen-e, et al. OSL Age of Fault Collapse Wedge in Xinding Basin, Shanxi Province and Its Significance for Paleoseismicity Events [J]. Geoscience, 2012, 23(6): 1022-1029.
- [41] 王旭龙, 李晓妮, 卢演侑. 红光固体二极管点阵在释光测年中的光照应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 133-138.
- WANG Xu-long, LI Xiao-ni, LU Yan-chou. Red LED and Its Application to Luminescence Lighting[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(1): 133-138.
- [42] WANG S F, WANG E, FANG X M, et al. Late Cenozoic Systematic Left-lateral Stream Deflection Along the Ganzhi-Yushu Fault, the Xianshuihe Fault System, Eastern Tibet [J]. International Geology Review, 2008, 50(7): 624-635.
- [43] FU B H, AWATA Y, DU J G, et al. Late Quaternary Systematic Stream Offsets Caused by Repeated Large Seismic Events Along the Kunlun Fault, Northern Tibet [J]. Geomorphology, 2005, 71(3/4): 278-292.
- [44] COLEMAN M, HODGES K. Evidence for Tibetan Plateau Uplift Before 14 Myr Ago from a New Minimum Age for East-west Extension [J]. Nature, 1995, 374: 49-52.
- [45] HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F, et al. Activation of the Nyainqentanghla Shear Zone: Implications for Uplift of the Southern Tibetan Plateau [J]. Tectonics, 1995, 14(3): 658-676.
- [46] RAO G, LIN A, YAN B, et al. Co-seismic Riedel Shear Structures Produced by the 2010 M_w 6.9 Yushu Earthquake, Central Tibetan Plateau, China [J]. Tectonophysics, 2011, 507(1/2/3/4): 86-94.
- [47] CHEVALIER M L, RYERSON F J P, TAPPONNIER R C, et al. Slip-rate Measurements on the Karakorum Fault May Imply Secular Variations in Fault Motion [J]. Science, 2005, 307: 411-414.
- [48] 莫亚思, 王世锋, 王超. 西藏阿里地区冈底斯花岗岩体的热年代学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 2014, 49(3): 965-981.
- MO Ya-si, WANG Shi-feng, WANG Chao. The Chronological Characteristics of the Gangdese Granite in the Ali Area and Its Tectonic Signification [J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(3): 965-981.
- [49] TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine [J]. Geology, 1982, 10(12): 611-616.

《地球科学与环境学报》2017 年度约稿函

尊敬的各位专家学者:

《地球科学与环境学报》(以下简称《学报》)自 1979 年创刊以来,得到了各位专家的支持,使期刊得到了快速发展。《学报》系地学综合性权威学术期刊,刊登的主要内容有基础地质与矿产地质、水资源与环境、工程地质、应用地球物理和地球信息科学等。为了不断提升《学报》的学术质量和影响力,特向各位专家学者约稿,诚盼各位专家学者能鼎力支持《学报》的发展。

《学报》目前的优势包括:1. 中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源;2. 特约稿不收取版面费,并且刊出后向作者支付一定稿酬;3. 发表周期短;4. 对学术质量高、有重大基金项目支持的论文优先发表;5. 刊登综述类论文;6. 可同期刊登同一主题的一系列成果。

联系地址:西安市南二环路中段长安大学杂志社《地球科学与环境学报》编辑部

邮政编码:710064

电话:029-82334686

E-mail:dkyhxb@chd.edu.cn;jesechd@163.com

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

《地球科学与环境学报》编辑部