

青藏高原北部发现印支运动的新证据

——来自同构造花岗细晶岩脉的响应

白国典¹, 何 凯¹, 王艳慧¹, 琚根社², 杜保峰¹, 王 坤¹

(1. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450007; 2. 河南省地质科学研究所, 河南 郑州 450007)

摘 要: 在青藏高原北部昆仑山口-甘德断裂与巴颜喀拉山中央断裂之间发育延伸超过 100 km 的呈雁列排列的花岗细晶岩脉带, 这些花岗细晶岩脉走向多为北西向(118°), 少量呈南北向(2°)。通过对其宏、微观特征分析研究, 并结合在这两组花岗细晶岩脉中分别采获的 224.7 ± 0.64 Ma(南北向)与 220.5 ± 1.1 Ma(北西向)的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄数据, 指出这些花岗细晶岩脉是印支运动的产物, 是早印支期可可西里-巴颜喀拉地块向东昆仑地块斜向俯冲过程中, 岩浆沿着昆仑山口-甘德北西向冲掩断层下盘(南盘)形成的北西向与南北向两组“X”型共轭剪节理贯入形成的同构造花岗细晶岩脉。两组“X”型共轭剪节理的展布方向揭示了印支运动的主压应力方向, 即 NNW-SSE 向; 北西向雁列排列的节理反映其受右行走滑作用控制的特点; 花岗细晶岩脉形成的最早时间(224.7 ± 0.64 Ma)代表了这次俯冲走滑事件的时间, 也即昆仑山口-甘德断裂的形成时间。

关键词: 青藏高原北部; 细晶花岗岩脉带; 雁列; 同构造; 印支运动

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0087-12

New evidence of Indosinian movement in northern Tibetan Plateau: The response of the syntectonic granite aplite vein

BAI Guo-dian¹, HE Kai¹, WANG Yan-hui¹, JU Gen-she², DU Bao-feng¹ and WANG Kun¹

(1. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450007, China; 2. Henan Institute of Geological Sciences, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The row echelon granite aplite veined belt extending over one hundred kilometers are developed between the Kunlun Mountain Pass-Gander fault and the Bayan Haran central fault in northern Tibetan Plateau, and most of them are NW-trending, with a few being SN-trending. Based on an analysis of the macroscopic and microscopic characteristics of the row echelon granite aplite veins, as well as the LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for the SN-trending(224.7 ± 0.64 Ma) and NW-trending(220.5 ± 1.1 Ma) granite aplite veins, it is considered that the granite aplite veins are the products of Indosinian Movement, and they were formed in the oblique subduction of the Hoh Xil -Bayan Har terrane beneath the East Kunlun terrane in early Indosinian. The syntectonic granite aplite veins were injected along the “X” conjugate shear joints in the NW(118°) and the SN(2°) direction in the footwall (south section) of the Kunlun Mountain Pass-Gander overthrust fault. The principal compressive stress direction is revealed by the distribution direction of two groups of “X” type conjugate shear joints, which is NW(118°) to the SN(2°). The left order row echelon joints suggest that they are controlled by dextral strike-slip. The earliest formation time of granite aplite veins(224.7 ± 0.64 Ma) represents the time of

收稿日期: 2017-04-07; 接受日期: 2017-12-04

基金项目: 中国地质调查局区域地质调查项目(12120113033018)

作者简介: 白国典(1969-), 男, 汉族, 河南省舞钢市人, 地质高级工程师, 本科, 从事区域地质调查工作, E-mail: baiguodian@163.com。

subduction and strike-slip event, which is also the formation time of the Kunlun Mountain Pass-Gander fault.

Key words: northern Tibetan Plateau; granite aplite veins; echelon joints; syntectonic; Indosinian Movement

Fund support: Project of China Geological Survey(12120113033018)

印支运动是指发生于晚三叠世-早侏罗世阶段的造山运动,是青藏地区又一次有划时代意义的重大变革(杨广全等,2009),它是奠定青藏高原北部构造格局的全域性造山运动,也是开启陆内造山阶段的划时代构造运动(青海省地质矿产局,1991)。刘世坤等(1995、1998)、曲永贵等(2003)、蔡雄飞等(2004)、许志琴等(2001、2007)、崔军文等(2006)、闫全人等(2006)和张耀玲等(2015)分别从地层接触关系、海侵事件、沉积组合特征、变形构造以及同位素年代学等方面入手,对青藏高原印支运动及岩浆事件做过深入的研究。印支运动在青藏高原北部表现为强烈的造山运动,形成规模巨大的印支造山带(杨广全等,2009),首先它造成可可西里-巴颜喀拉地块斜向俯冲于东昆仑地块之下,形成一系列北西向逆冲带,致使地壳叠覆加厚,导致了亚洲最长的山脉——昆仑山系的形成,其次也造成了巴颜喀拉地槽的关闭(蔡雄飞等,2004),在东昆仑地块和可可西里-巴颜喀拉地块之间形成一条延绵 1 200 km 的大型会聚带——“东昆仑南缘”会聚带。许志琴等(2001)、张雪亭等(2005)、张传林等(2005)、柏道远等(2003)和李小兵等(2014, 2015)对该会聚带以及东昆仑地块的动力学机制进行过研究和总结。另一方面,由于印支运动被较晚的构造运动所隐蔽,不同时代的构造变形叠加复合在一起,形成了复杂的区域构造格局(Huang Jiqing, 1945; 吴珍汉等, 2007, 2011; 刘志伟等, 2016),由于缺乏有效的年代学资料,目前还难以精确厘定构造的活动期次及发生时代,也造成前人在“东昆仑南缘”会聚带以及东昆仑地块在印支期的动力学机制的认识上存在分歧:许志琴等(2001)、张紫程等(2010)认为,巴颜喀拉-松潘地块与东昆仑地块晚三叠世斜向碰撞形成大规模的左行走滑韧性剪切带;柏道远等(2003)认为,可可西里-巴颜喀拉地块在向北消减时东部具右旋走滑特点;查显锋等(2012)、李小兵等(2014, 2015)认为,东昆仑地块先后经历过左行走滑和右行走滑过

程。以上问题的焦点主要集中在:可可西里-巴颜喀拉地块向北斜向俯冲于东昆仑地块之下的过程中发生的走滑作用是左行走滑还是右行走滑,或是二者兼而有之?俯冲走滑作用发生在什么时间?主压应力的方向如何?

昆仑山口-甘德断裂位于可可西里-巴颜喀拉地块北缘,是可可西里-巴颜喀拉地块斜向俯冲于东昆仑地块过程中形成的一系列北西向冲掩断层之一,也是昆仑山口-昌马河 A 型俯冲带的主断裂。该俯冲带西始昆仑山口西,东延经鄂陵湖北、玛多、甘德北延入甘肃,走向北西、倾向北东,沿俯冲带滑塌-构造混杂体发育,下二叠统马尔争组呈断块产出(王立全等, 2013),也使得研究区中三叠统甘德组向北俯冲到中下三叠统昌马河组之下^{①②}。本次在“青海省曲麻莱县卡巴组多地区 I46E003021、I46E004021、I46E005021 三幅 1:5 万区域地质矿产调查”项目实施过程中,于仑山口-甘德断裂南盘(下盘)新发现贯穿全区呈北西向雁列排列的花岗细晶岩脉带。本文试通过对这些岩脉的空间展布特征、岩石学特征以及同位素测年等方面的研究,探讨该地区印支运动的动力学机制,并对这次俯冲走滑事件提供较为精确的年龄约束。

1 地质概况

研究区处于东昆仑地块与可可西里-巴颜喀拉地块接触带附近可可西里-巴颜喀拉地块一侧。东昆仑地块是加里东与印支的叠覆造山带,发育古生代至早-中三叠世浅变质岩系,可可西里-巴颜喀拉地块为印支造山带,发育三叠系巴颜喀拉山群复理石岩系^②,二者之间的结合带——“东昆仑南缘”会聚带(SKS)从研究区北部通过(图 1a)。巴颜喀拉山群为陆源碎屑岩夹少量碳酸盐岩、火山(碎屑)岩,区内北西向断裂以及褶皱构造发育,北西向的昆仑山口-甘德断裂以及巴颜喀拉山中央断裂将巴颜喀拉山群

① 中国地质科学院地质力学研究所. 2011. 1:25 万卡巴组多幅地质图(内部资料).

② 河南省地质调查院. 2016. 青海省曲麻莱县卡巴组多地区 I46E003021、I46E004021、I46E005021 三幅 1:5 万区域地质矿产调查报告(内部资料).

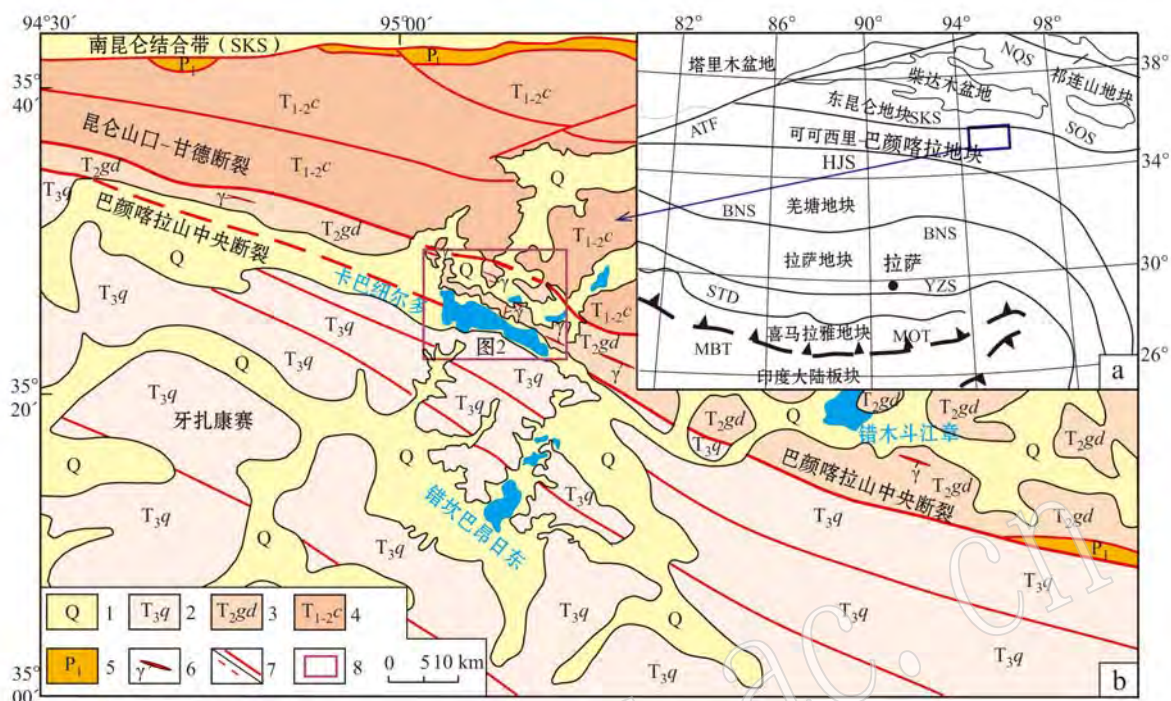


图 1 曲麻莱县卡巴组尔多湖一带构造位置(a, 据吴珍汉等, 2011)和地质略图(b, 据张耀玲等, 2015)

Fig. 1 Geotectonic position of the Kabanurdo area in Qumalai County (a, modified after Wu Zhenhan *et al.*, 2011) and geological sketch map (b, modified after Zhang Yaoling *et al.*, 2015)

1—第四系；2—上三叠统清水河组；3—中三叠统甘德组；4—中下三叠统昌马河组；5—下二叠统；6—花岗细晶岩脉；7—断层/隐伏断层；8—研究区位置；ATF—阿尔金断裂；NQS—北祁连缝合带；SQS—南祁连缝合带；SKS—东昆仑南缘汇聚带；HJS—可可西里—金沙江缝合带；BNS—班公湖—怒江缝合带；YZS—雅鲁藏布江缝合带；STD—藏南拆离系；MCT—主中央逆冲系；MBT—主边界逆冲系

1—Quaternary sediments; 2—Upper Triassic Qingshuihe Formation; 3—Middle Triassic Gande Formation; 4—Lower-Middle Triassic Changmahe Formation; 5—Lower Permian; 6—granite aplite veins; 7—fault/hidden fault; 8—location of the study area; ATF—Altun fault; NQS—North Qilian suture; SQS—South Qilian suture; SKS—the convergence zone on the southern margin of the East Kunlun Mountains; HJS—Kekexili-Jinshajiang suture; BNS—Bangong-Nujiang suture; YZS—Yarlung Zangbo suture; STD—South Tibetan detachment; MCT—main central thrust; MBT—main boundary thrust

切割成北、中、南三部分，分别对应中下三叠统昌马河组(T_{1-2c})、中三叠统甘德组(T_{2gd})以及上三叠统清水河组(T_{3q})(图 1b、图 2)。昆仑山口-甘德断裂为一倾向北东的逆断层，兼有右行走滑特征^①。受挤压应力作用的影响，昆仑山口-甘德断裂下盘(南盘)的中三叠统甘德组发育一系列轴面向北东陡倾的较为紧闭的北西向背斜或向斜。由于早期的逆冲推覆作用，造成深部较老的下二叠统(P_1)生物碎屑灰岩被带出，呈北西向构造岩块状展布于甘德组地层中(图 3)。

2 花岗细晶岩脉特征

2.1 宏观特征

花岗细晶岩脉呈北西向带状出露于昆仑山口-甘德断裂与巴颜喀拉山中央断裂之间的甘德组(T_{2gd})中(图 1b、图 2a、图 3)。花岗细晶岩带的分布宽度超过 5 km，沿走向方向延伸超过 100 km^②(图 1b)，单条岩脉的走向多为北西向(走向约 118° ，多向北东方向陡倾，倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$)，少量呈近南北

① 河南省地质调查院. 2016. 青海省曲麻莱县卡巴组尔多地区 146E003021、146E004021、146E005021 三幅 1:5 万区域地质矿产调查报告(内部资料)。

② 中国地质科学院地质力学研究所. 2011. 1:25 万卡巴组尔多幅地质图(内部资料)。

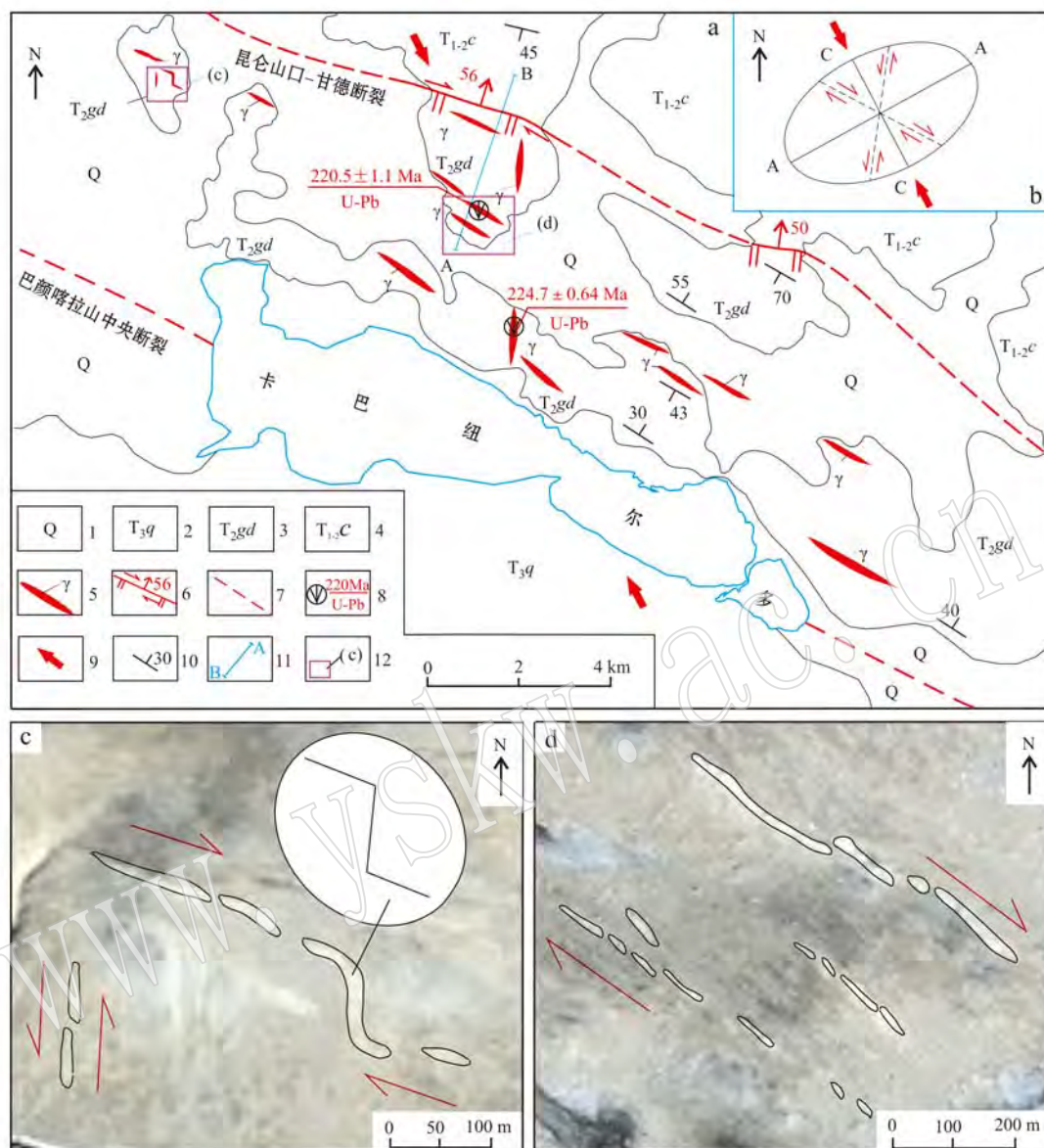


图 2 曲麻莱县卡巴组尔多一带雁列花岗细晶岩脉展布形态

Fig. 2 The distribution of echelon granite aplite veins in the Kabanurdo area of Qumalai County

a—花岗细晶岩脉展布形态; b—两组共轭节理所反映的应力场; c—充填于两组共轭节理中的细花岗细晶岩脉影像特征; d—北西向花岗细晶岩(脉)带影像特征(c、d 为 SPOT 图像, 拍摄时间: 2013-09-10); 1—第四系; 2—上三叠统清水河组; 3—中三叠统甘德组; 4—中下三叠统昌马河组; 5—花岗细晶岩脉; 6—逆断层(兼有走滑性质); 7—隐伏断层; 8—锆石 U-Pb 同位素测年结果(测年结果/测年方法); 9—压应力方向; 10—地层产状; 11—图 3 剖面位置及编号; 12—插图范围

a—the distribution of granite aplite veins; b—stress field reflected by two sets of conjugate joints; c—image features of granite aplite veins filled in two sets of conjugate joints; d—image features of north-west granite aplite zones (veins) (Fig. c and d are SPOT images, taken in September 10th, 2013); 1—Quaternary sediments; 2—Upper Triassic Qingshuihe Formation; 3—Middle Triassic Gande Formation; 4—Lower-Middle Triassic Changmahe Formation; 5—granite aplite veins; 6—thrust fault (with strike-slip property); 7—hidden fault; 8—U-Pb dating data of zircons (dating data/dating method); 9—principal compressive stress direction; 10—attitude of strata; 11—location and serial number of profile; 12—range of illustrations

向(走向约 2° , 多向西陡倾, 倾角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$)。单个岩脉宽 $0.5 \sim 5$ m, 延伸几十米至上百米, 最长达 400 m

以上, 往往由 3 条以上(通常为 3~4 条)长度为 $50 \sim 300$ m 呈左阶雁列排列的北西向花岗细晶岩脉组成

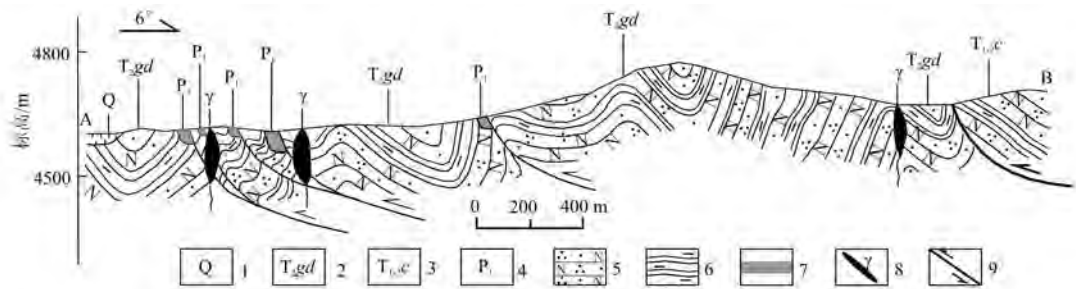


图 3 曲麻莱县卡巴组尔多一带花岗细晶岩脉与围岩接触关系剖面图

Fig. 3 The profile of the contact relationship between the granite aplite veins and the surrounding rocks in the Kabanurdo area of Qumalai County

1—第四系；2—中三叠统甘德组；3—中下三叠统昌马河组；4—下二叠统；5—长石英砂岩；6—粉砂质、泥质板岩；7—灰岩；8—花岗细晶岩脉；9—逆断层

1—Quaternary sediments; 2—Middle Triassic Gande Formation; 3—Lower-Middle Triassic Changmahe Formation; 4—Lower Permian; 5—feldspar-quartz sandstone; 6—silty slate, argillaceous slate; 7—limestone; 8—granite aplite dike; 9—thrust fault

一组,单个雁列组长度接近或超过 1 km,雁列角一般 5°~9°(平均 7°),均小于 10°,属剪裂型。区内雁列脉是岩浆沿着与主剪切面小角度相交的羽裂侵入充填的结果,反映沿北西向右行剪切形成的节理贯入的特点。

图 2c 与图 2d 是花岗细晶岩脉在 SPOT 卫星影像上的特征。从充填在北西向与南北向两组节理中的花岗细晶岩脉在 SPOT 卫星影像上的展布形态可以看出:① 两组节理中的北西向节理比较发育,南北向节理不发育,两组节理的主剪裂面均由羽状微裂面组成。北西向羽状微裂面呈现左阶雁列排列的特点,受右行走滑作用控制;南北向羽状微裂面呈现右阶雁列排列的特点,受左行走滑作用控制;② 从

图 2c 中可见到岩浆沿着由北西向与南北向共轭节理组成的“Z”字形裂面充填的现象。

由此可看出,两组节理应为剪节理中较典型的共轭“X”节理系,受控于同一挤压应力场。按照平均 7°的雁列角可推测出两组共轭节理的主剪裂面的走向分别为 111°(北西向)与 9°(近南北向),二者锐夹角(78°)的平分线代表了主压应力方向(150°)(图 2b)。

2.2 微观及运动学特征

该花岗细晶岩脉侵入于中三叠统甘德组中,走向与围岩地层走向近一致,岩脉中发育与围岩一致的劈理(图 4a),劈理方向和岩脉与围岩的接触面近一致。北西向与南北向花岗细晶岩的岩性较为一

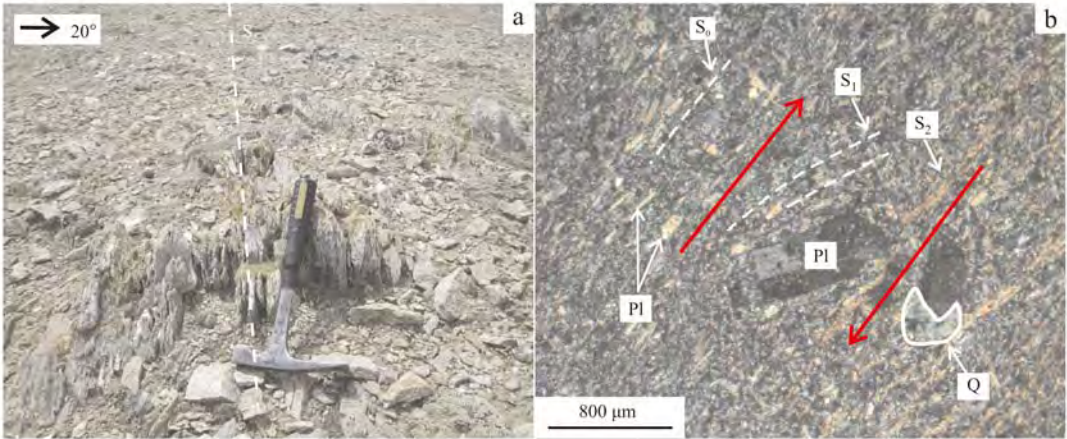


图 4 花岗细晶岩脉宏、微观特征

Fig. 4 The macroscopic and microscopic characteristics of granite aplite veins
a—发育劈理(S₂)的花岗细晶岩脉露头；b—正交镜下斜长石(Pl)定向构造

a—the outcrop of granite aplite veins with cleavage (S₂); b—the oriented structure of plagioclase (Pl), crossed nicols

致,呈细晶结构,块状构造,由钾长石($56\% \pm$)、石英($27\% \pm$)及斜长石($17\% \pm$)组成。钾长石、石英呈它形粒状;斜长石呈小板条状,长轴多在 $0.02 \sim 0.15$ mm,部分长石矿物被绢云母交代,岩石中偶见斜长石、石英斑晶。由图 4b 可清晰地看出,在花岗细晶岩中发育 3 组比较明显的线状构造:分别是岩浆就位过程中形成的 2 组定向构造 S_0 与 S_1 ,以及成岩之后形成的后期不均匀分布的劈理 S_2 。由于后期形成的劈理并未干扰、破坏前期原始定向组构,使得两个期次的定向构造易于区分。其中, S_0 是岩浆就位过程中矿物沿岩脉走向形成的流动线理; S_1 是矿物受到剪切作用的影响发生了旋转而形成的另一组流动线理。正交偏光下可见到多数小板条状斜长石沿岩脉走向定向排列明显,构成 S_0 线理,少数小板条状斜长石和斜长石斑晶发生了旋转现象,其长轴与 S_1 一致,显示其在岩浆就位过程中受右行剪切作用影响发生了顺时针旋转,反映其为右行剪切环境中沿节理贯入的同构造花岗细晶岩脉。

研究区这些节理(岩脉)分布范围广、规模大(宽度超过 5 km,长度超过 100 km),构成一定的几何形式,且在产状、方位、组合、排列、间距等方面具有规律性,属于区域性节理,是近南北向挤压过程中,伴随地层褶皱、断裂而同时形成的共轭节理系。这些节理中多数未被岩脉充填,并多被后期构造改造和破坏而不易识别,一些节理由于处于特定的构造有利部位被近同期岩浆贯入而易于识别。区内的花岗细晶岩脉就是岩浆沿昆仑山口-甘德右行逆冲断裂下盘产生的共轭剪节理贯入而形成的同构造花岗细晶岩脉。

同构造花岗岩体具同侵位固结期的塑性变形特征(谢才福,2002),其岩浆变形可提供相对应的区域构造力学信息(王涛等,2007)。卡巴纽尔多一带花岗细晶岩与同构造花岗岩体具相似的构造变形特征,表现为剖面上由北向南逆冲推覆性质、平面上具右行走滑剪切特征,花岗细晶岩带空间上为一条北西向逆冲推覆兼具右行走滑的斜冲型剪切带。根据两组花岗细晶岩脉的不同展布方向,可推测出主压应力大致方向为 NNW(330°)-SSE(150°)向(图 2b)。

3 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试

本次对沿南北向(U-Pb3063/1)及北西向(U-Pb3072/3)两组共轭剪节理贯入的花岗细晶岩脉分

别采集了锆石 U-Pb 同位素样品。前者采自卡巴纽尔多湖北岸山南坡呈南北向展布的花岗细晶岩脉,采样位置的地理坐标为北纬 $95^\circ 07' 22''$ 、东经 $35^\circ 26' 8''$ 。后者采自泥巴山东南呈北西向展布的花岗细晶岩脉,采样位置的地理坐标为北纬 $95^\circ 06' 44''$ 、东经 $35^\circ 27' 32''$ 。2 个样品均选自蚀变相对较弱的新鲜岩石,每个样重约 10 kg。

本次用于 LA-ICP-MS U-Pb 同位素地质年代学研究所用样品的锆石挑选在河北廊坊区域地质调查研究所实验室完成。首先采用常规方法进行粉碎,并用淘选、电磁选等进行分离,然后在双目镜下挑选出晶形完好、无明显裂痕且包裹体少的锆石,将选好的锆石粘贴在环氧树脂表面,再对其进行剖光露出锆石内部结构。锆石制靶与阴极发光(CL)照相在北京锆年领航科技有限公司进行,将挑选的晶形完好的锆石颗粒与标准锆石 TEM 一起粘贴在环氧树脂中,抛光后制成样靶。锆石阴极发光照相(CL)和 LA-ICP-MS 分析分别在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室(U-Pb3063/1 样品)和西北大学大陆动力学国家重点实验室(U-Pb3072/3 样品)完成。使用的 ICP-MS 为 ELan6100-DRC,激光剥蚀系统为德国 LamdaPhysik 公司的 GeoLas200M 深紫外(DUV)193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统。激光束斑直径为 $32 \mu\text{m}$,实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM 610 作为外标, ^{29}Si 作为内标。详细分析方法、仪器参数和数据处理方法参照 Liu 等(2008,2010)。锆石测定点的同位素比值、U-Pb 表面年龄和 U-Th-Pb 含量计算采用 GLITTER(Ver4.0)程序,实验获得的数据采用 Andersen 等(2002)方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响。采用 Isoplot 程序(Ver3.0)进行锆石年龄加权平均计算及谐和图的绘制。采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值的误差为 2σ ,U/Pb(和 Pb/Pb)平均年龄误差为 95%置信度。

两样品相应的 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果列于表 1。

南北向(U-Pb3063/1)及北西向(U-Pb3072/3)两组花岗细晶岩脉的锆石具有相似晶形特征(图 5)。样品中锆石较完整,锆石颗粒为无色透明,多具锥柱状晶体,自形程度高。绝大多数锆石呈现密集的岩浆振荡环带结构(罗志高等,2010),根据振荡环带宽度与岩浆温度的关系,样品内锆石形成的岩浆环带

较窄,多属酸性岩浆较低温下锆石结晶时微量元素扩散缓慢的缘故(吴元保等,2004;李长民,2009);同时环带具较窄的边,可能反映岩浆后期构造事件的影响(张宏飞等,2007)。其中²³²Th/²³⁸U 比值均落于 0.17~0.61 之间,为锆石的岩浆成因特征提供了佐证(杨德明等,2004;吴元保等,2004;李长民,2009)。

表 1 卡巴纽尔多一带花岗细晶岩脉锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses for granitic aplite veins from Kabanurdo area

测点	$w_B/10^{-6}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	年龄/Ma			
	Pb	Th	U						$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
南北向细晶岩脉: U-Pb3063/1												
1	22.62	171.41	578.13	0.30	0.051 1	0.250 8	0.035 5	0.011 6	256	227	225	233
2	36.41	191.38	967.44	0.20	0.052 1	0.253 1	0.035 1	0.009 9	300	229	223	199
3	38.95	246.08	998.10	0.25	0.050 5	0.248 0	0.035 5	0.011 5	220	225	225	231
4	24.30	146.91	624.51	0.24	0.053 8	0.262 2	0.035 3	0.011 4	361	236	224	229
5	9.71	75.97	244.54	0.31	0.053 0	0.261 0	0.036 2	0.009 4	328	235	229	189
6	31.46	158.55	817.69	0.20	0.051 2	0.250 5	0.035 5	0.010 2	256	227	225	206
7	35.56	277.10	888.29	0.31	0.053 4	0.257 6	0.035 1	0.011 1	343	233	223	222
8	14.87	155.50	363.26	0.43	0.053 6	0.262 4	0.035 4	0.009 2	354	237	224	184
9	22.20	309.22	508.66	0.61	0.055 1	0.267 5	0.035 5	0.010 2	418	241	225	207
10	16.74	211.29	398.63	0.53	0.051 1	0.248 5	0.035 5	0.009 8	243	225	225	196
11	34.73	239.84	878.64	0.27	0.053 9	0.259 7	0.034 9	0.012 3	365	234	221	246
12	32.72	229.01	819.95	0.28	0.051 9	0.256 3	0.035 6	0.011 8	280	232	226	237
13	40.63	525.26	957.26	0.55	0.052 5	0.257 4	0.035 7	0.010 4	306	233	226	210
14	13.47	85.29	346.67	0.25	0.054 0	0.262 1	0.035 7	0.011 9	369	236	226	239
15	28.84	139.41	771.50	0.18	0.048 9	0.244 9	0.035 1	0.012 8	143	222	222	256
16	39.34	290.28	1001.82	0.29	0.053 1	0.260 8	0.035 7	0.011 4	331	235	226	229
北西向细晶岩脉: U-Pb3072/3												
1	59.38	329.77	1464.86	0.23	0.051 1	0.245 4	0.034 8	0.014 3	247.3	222.8	220.5	286.2
2	25.22	127.64	418.1	0.31	0.198 3	0.954 8	0.034 9	0.055 3	2 812.4	680.6	221.2	1 087.0
3	46.67	252.83	1156.67	0.22	0.050 1	0.240 6	0.034 8	0.013 7	201.0	218.9	220.6	275.1
4	53.81	341.81	1325.84	0.26	0.050 2	0.241 1	0.034 8	0.012 5	206.6	219.2	220.4	250.3
5	57.81	252.43	1475.84	0.17	0.050 7	0.241 2	0.034 5	0.012 1	226.9	219.4	218.6	242.7
6	45.85	264.64	1097.57	0.24	0.054 6	0.262 2	0.034 8	0.016 7	394.2	236.4	220.8	335.1
7	42.99	177.62	1070.59	0.17	0.051 8	0.248 9	0.034 9	0.015 5	276.7	225.7	220.8	309.8
8	43.79	259.69	968.35	0.27	0.087 2	0.419 5	0.034 9	0.022 8	1 365.9	355.7	220.9	455.0
9	48.38	291.9	1 193.89	0.24	0.050 7	0.243 6	0.034 9	0.011 8	225.7	221.4	220.9	236.8
10	12.28	107.37	260.39	0.41	0.090 7	0.436 0	0.034 8	0.018 9	1 440.7	367.4	220.8	378.0
11	12.91	200.86	1 360.29	0.35	0.050 9	0.243 1	0.034 6	0.010 7	237.7	220.9	219.3	214.7
12	21.18	212.82	1 197.61	0.26	0.050 1	0.240 2	0.034 8	0.011 0	199.3	218.5	220.3	221.5
13	40.76	437.53	445.38	0.18	0.052 7	0.252 1	0.034 7	0.016 0	313.5	228.3	220.1	321.2
14	62.54	139.81	1 158.23	0.34	0.070 9	0.339 7	0.034 8	0.019 5	953.9	297.0	220.2	389.4
15	20.40	211.97	1 086.53	0.26	0.050 2	0.241 2	0.034 8	0.010 5	204.9	219.4	220.7	212.0
16	32.43	219.76	657.73	0.31	0.050 7	0.243 1	0.034 8	0.010 9	227.7	221.0	220.3	218.8
17	21.03	211.89	1 090.26	0.22	0.050 9	0.244 8	0.034 9	0.011 5	235.9	222.3	221.0	230.7
18	16.47	290.28	1 346.67	0.28	0.050 4	0.242 6	0.034 9	0.010 6	212.1	220.5	221.3	213.4

U-Pb3063/1 样品锆石晶体长轴多在 80~150 μm 之间,长宽比多为 1.5:1~3:1(图 5a)。对 16 颗锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄测试(数据见表 1),除 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值变化较大外,²⁰⁷Pb/²³⁵U、²⁰⁶Pb/²³⁸U 和 ²⁰⁸Pb/²³²Th 年龄均具较小的变化区间。其中,²⁰⁶Pb/²³⁸U 变化区间最小,年龄

集中于 221~229 Ma,在 U-Pb 谐和图上,几乎所有锆石颗粒样品都投影在谐和线上及其附近(图 6a-1),所得²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权平均年龄为 224.6±1.24 Ma(MSWD=0.32,95%置信度)(图 6a-2),相当于晚三叠世,代表该期南北向花岗细晶岩脉的成岩年龄。

U-Pb3072/3 样品锆石晶体长轴多在 100~120

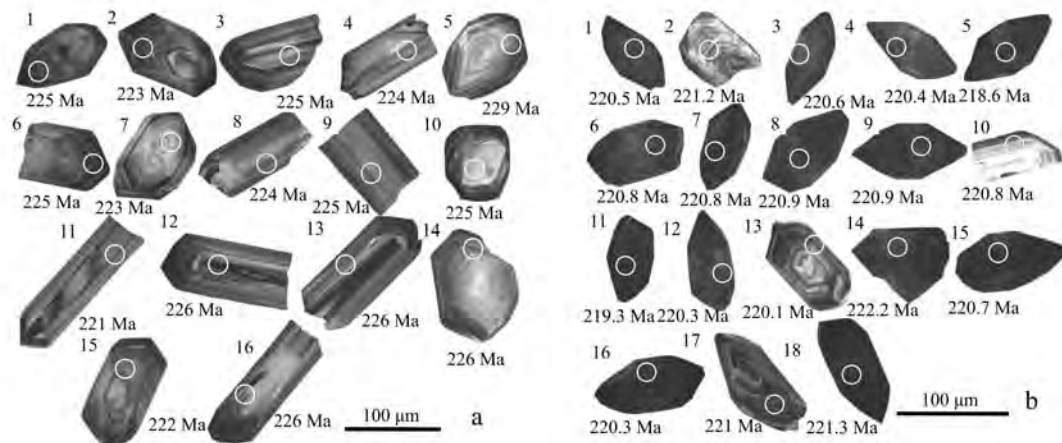


图 5 南北向(a)与北西向(b)花岗细晶岩脉锆石 CL 图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 5 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons from the SN-trending (a) and NW-trending (b) granite aplite veins

μm 之间,长宽比多为 2:1(图 5b)。对 18 粒锆石进行了 18 点分析,采用 LA-ICP-MS 对其进行锆石 U-Pb 年龄测定。从表 1 中可以看出,绝大多数锆石谐和年龄变化范围极小,锆石点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集

中于 218.6~221.2 Ma,几乎所有锆石颗粒样品都投影在谐和线上及其附近(图 6b-1),所得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $220.5 \pm 1.1 \text{ Ma}$ (MSWD=0.16, 95% 置信度)(图 6b-2),相当于晚三叠世,代表该期

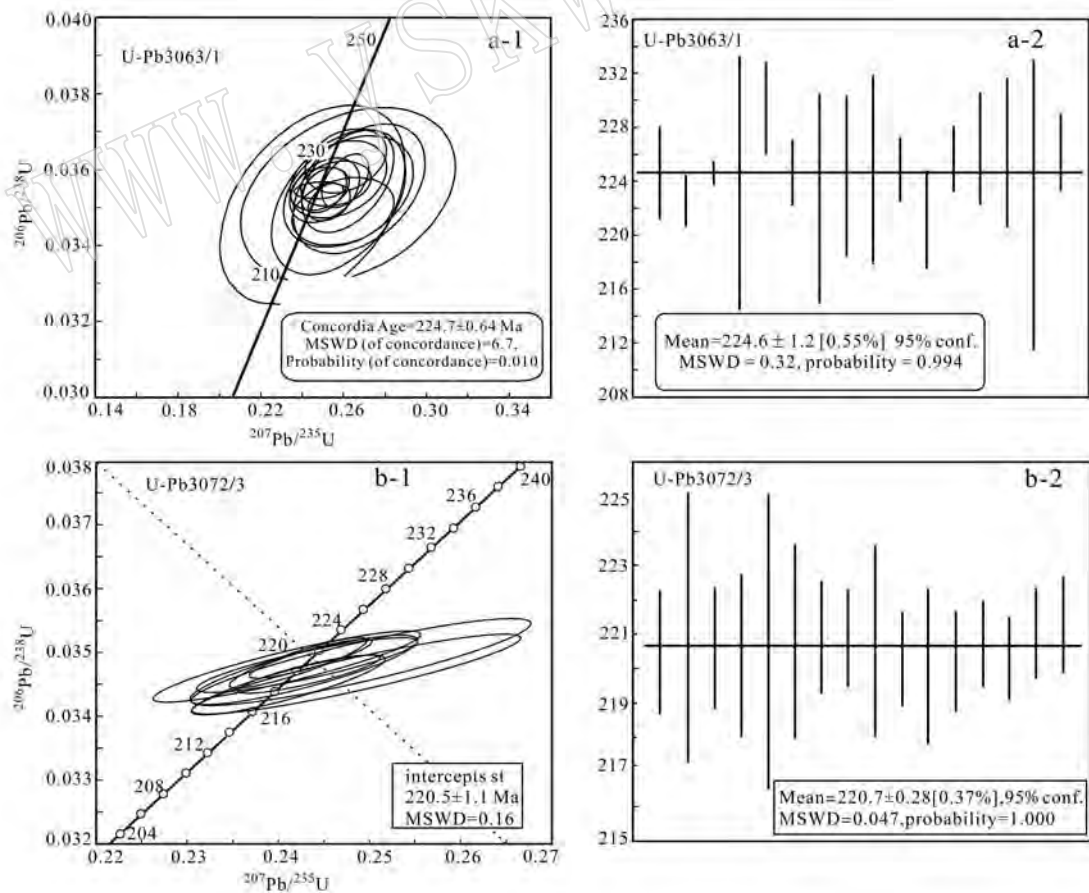


图 6 花岗细晶岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams of zircons from granite aplite veins

北西向细晶岩脉的成岩年龄。

北西向与南北向细晶岩脉的年龄较一致,这也与它们所贯入的两组节理为同期形成的共轭节理吻合,二者应受控于同一应力场,即印支期应力场。

4 讨论

印支运动在青藏高原北部表现为强烈的造山运动,造成可可西里-巴颜喀拉地块斜向俯冲于东昆仑地块之下,伴随这次俯冲作用形成一系列北西向的褶皱和一系列北西向冲掩断层。查明这些北西向冲掩断层的形成时间以及动力学机制是恢复和研究印支运动的重要手段。

前人通过对东昆仑印支期岩浆活动的研究获得了印支运动 Rb-Sr、K-Ar、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 以及锆石 U-Pb SHRIMP 同位素年代学资料(袁万明等,2000; 罗照华等,2002; 刘成东等,2003; 王国灿等,2007; 张紫程等,2010; 李洁等,2012),但由于不同同位素体系封闭温度不同,所获得的年龄结果差别较大,主要集中在 170~223 Ma 之间。有证据表明,青藏高原北部印支期发生了大规模右行走滑作用(柏道远等,2003; 查显锋等,2012; 李小兵等,2014,2015),目前对此次右行走滑作用尚缺少精确的年代学约束(查显锋等,2012)。

昆仑山口-甘德断裂位于可可西里-巴颜喀拉地块北缘、“东昆仑南缘”印支会聚带南侧,是可可西里-巴颜喀拉地块斜向俯冲于东昆仑地块过程中形成的一系列北西向冲掩断层之一,沿该断裂下盘(南盘)产出的同构造花岗细晶岩脉在空间上具有共轭产出、雁列排列、区域性分布等规律,反映了受近南北向挤压兼有右旋走滑作用控制的特点。这些岩脉受后期(燕山期、喜马拉雅期)构造干扰和破坏较轻微,能够较为客观真实地反映印支期的区域应力场特征。本次获得的花岗细晶岩脉年龄为 220.5 ± 1.1 Ma~ 224.6 ± 1.24 Ma,相当印支运动早期(杨广全等,2009)。该年龄基本代表了印支期右行走滑作用发生的时间,也代表了可可西里-巴颜喀拉地块向东昆仑地块斜向俯冲的时间,而沿共轭节理产出的两个方向的岩脉则较直观地展现了印支期的主压应力大致方向,即 NNW(330°)-SSE(150°)向。

有证据表明,在印支期右行走滑作用发生之前,在“东昆仑南缘”会聚带以及东昆仑地块还发生过左行走滑作用(许志琴等,2001; 查显锋等,2012; 李小

兵等,2014,2015),它们应经历过多次构造运动。

由此可以看出:早印支期由于 NNW(330°)-SSE(150°)向的挤压,造成可可西里-巴颜喀拉地块向北斜向俯冲于东昆仑地块之下,形成包括昆仑山口-甘德断裂在内的一系列北西向右行走滑冲掩断层,与这些冲掩断层同时形成的还有北西向和南北向共轭节理。这次构造运动也使得之前受左行走滑作用控制的“东昆仑南缘”会聚带以及东昆仑地块被右行走滑作用所取代,相对于之前的左行走滑 NNE-SSW 向的主压应力方向(许志琴等,2001),印支期右行走滑的主压应力方向发生了逆时针偏转现象。

5 结论

(1) 早印支期近南北向的挤压引起可可西里-巴颜喀拉地块向东昆仑地块之下斜向俯冲兼右行走滑过程,形成包括昆仑山口-甘德断裂在内的一系列兼有右行走滑特征的北西向冲掩断层。呈北西向带状分布的花岗细晶岩脉就是岩浆沿着伴随这次挤压形成的北西向与南北向共轭节理贯入而形成的同构造岩脉。

(2) 花岗细晶岩脉的年龄 224.6 ± 1.24 Ma 基本代表了可可西里-巴颜喀拉地块向东昆仑地块斜向俯冲的时间,也代表了昆仑山口-甘德右行走滑逆冲断裂的形成时间。

(3) 研究区两组方向的花岗细晶岩脉所代表的共轭剪节理指示了印支运动在该阶段的应力场,主压应力方向大致为 NNW($330^\circ \pm$)-SSE($150^\circ \pm$)。相对于之前左行走滑运动 NNE-SSW 向的主压应力方向,该期右行走滑的主压应力方向发生了逆时针偏转现象。

致谢 审稿专家提出了宝贵、有益的建议,中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室、西北大学大陆动力学国家重点实验室测试本文样品;岩矿方面得到河南省地质调查院实验室裴玉华、李敏工程师等的帮助,在此一并表示感谢。

References

- Anderson W, Jarzynski J and Salan R T. 2002. Monitoring the condition of liquid-lubricated mechanical seals[J]. Sealing Technology, 2002(2): 6~11.

- Bai Daoyuan, Xiong Yanwang, Chen Jianchao, *et al.* 2003. Structural deformation and dynamic mechanisms of the Bayan Har foreland basin in the Yinshishan region, Qinghai[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(4): 71~78(in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology Mineral Resources Qinghai Province. 1991. *Regional Geology of Qinghai Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Cai Xiongfei, Wang Guocan and Li Dewei. 2004. Features of indosinian movement in Kunlun area[J]. *Geoscience Frontiers*, 11(3): 50(in Chinese with English abstract).
- Cui Junwen, Zhang Xiaowei and Tang Zheming. 2006. Tectonic divisions of the Qinghai-Tibet Plateau and structural characteristics of deformation on their boundaries[J]. *Chinese Geology*, 33(2): 256~367(in Chinese with English abstract).
- Huang Jiqing. 1945. On major tectonic forms of China[A]. *Geological Memoirs*[C]. Chungking: The National Geological Survey of China Under the Ministry of Economic Affairs, 1~165.
- Liu Chengdong, Zhou Su, Mo Xuanxue, *et al.* 2003. Constraint on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating and geochemistry of the collisional granitic rocks in the orogenic belt of east Kunlun[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 26(4): 301~305(in Chinese with English abstract).
- Liu Shikun and Xu Kaifeng. 1995. Triassic transgression events and Indo-China Movement phases in Qiangbei-Changdu area, Tibet[J]. *Tibet Geology*, 14(2): 121~127(in Chinese with English abstract).
- Liu Shikun and Xu Kaifeng. 1998. Triassic lithostratigraphy and Indosinian Movement in the Qiangbei-Qamdo area, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 17(1): 25~29(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chem. Geol.*, 257: 34~43.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, *et al.* 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 55: 1535~1546.
- Liu Zhiwei, Zhao Wenjin, Wu Zhenhan, *et al.* 2016. Ancient oceanic crustal subduction of East Kunlun orogenic belt: Evidence from deep-reflection seismic data[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1692~1702(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, *et al.* 2002. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292~297(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhigao, Wang Yuejun, Zhang Feifei, *et al.* 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for Baimashan and Jintan Indosinian granitic plutons and its petrogenetic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2): 282~290(in Chinese with English abstract).
- Li Changmin. 2009. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons[J]. *Geological Survey and Research*, 32(3): 161~174(in Chinese with English abstract).
- Li Jie, Chen Wen, Yong Yong, *et al.* 2012. Emplacement age, geochemical characteristics and tectonic significance of Zhaxike quartz diorite in Yushu area, Qinghai Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(5): 773~786(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaobing, Pei Xianzhi, Chen Youxin, *et al.* 2015. Study on the plastic deformation and dynamic condition of Hatugou-Qingshuiquan-Gouli ductile shear zone in the eastern section of east Kunlun[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(2): 208~230(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaobing, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, *et al.* 2014. Ductile shearing in the eastern segment of Central Kunlun tectonic belt and its geological significance[J]. *Chinese Geology*, 41(2): 419~436(in Chinese with English abstract).
- Qu Yonggui, Wang Yongsheng, Zhang Shuqi, *et al.* 2003. An inspiration from the section of the Late Triassic Duoburi Formation in the Xainza area-stratigraphic constraints on the Indosinian movement in Gangdisi[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(7): 470~473(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. The mineralogical study for the causes of zircon formation and the constraints for the explanation of the U-Pb isotope age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 12~35(in Chinese with English abstract).
- Wu Zhenhan, Ye Peisheng, Hu Daogong, *et al.* 2011. Paleogene thrust system in southern Qiangtang basin, central Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1009~1016(in Chinese with English abstract).
- Wu Zhenhan, Ye Peisheng, Zhao Wenjin, *et al.* 2007. Late Cenozoic overthrust system in the southern East Kunlun Mountains, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 448~456(in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Xiang Shuyuan, Wang An, *et al.* 2007. Ther-

- mochronological constraint to the processes of the east Kunlun and adjacent areas in Mesozoic-Early Cenozoic[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 605~614, 680(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Zheng Yadong, *et al.* 2007. Studies on structures of granitic plutons and granitic tectonic dynamics[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 91~113(in Chinese with English abstract).
- Wang Liquan, Pan Guitang, Ding Jun, *et al.* 2013. Geological Map and Instructions of Tibetan Plateau and its Adjacent Areas (1: 1 500 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 147~147(in Chinese with English abstract).
- Xie Caifu. 2002. A microstructure marker of syntectonic granitoids[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(2): 179~185(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Li Haibing, Yang Jingsui, *et al.* 2001. A large transpression zone at the south margin of the east Kunlun mountains and oblique subduction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 156~164(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Liu Haibing, *et al.* 2007. An Orogenic Plateau: Terrain Tectonics, Collisional Orogenesis and Rising Mechanisms of the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 350~460(in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Liu Shuwen, *et al.* 2006. Eastern margin of the Tibetan Plateau: A window to probe the complex geological history from the Proterozoic to the Cenozoic revealed by SHRIMP analyses[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1 285~1 294(in Chinese with English abstract).
- Yang Deming, He Zhonghua, Zheng Changqing, *et al.* 2000. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Dezhong granitoid gneisses and its geological implications in Menba Area, Tibet[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 34(S1): 12~22(in Chinese with English abstract).
- Yang Guangquan and Wang Genhou. 2009. Discussion on the indosinian movement in Qinghai-Tibet area, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1 188~1 190(in Chinese with English abstract).
- Yuan Wanming, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2000. The record of indosinian tectonic setting from the granitoid of Eastern Kunlun mountains[J]. *Geological Review*, 46(2): 203~211(in Chinese with English abstract).
- Zha Xianfeng, Ji Wenhua, Zhang Haidi, *et al.* 2012. A discussion on the deformation phases and tectonic process of the Southern Kunlun accretionary complex belt, in central Qinghai[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 2 015~2 024(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chuanlin, Yu Haifeng, Wang Aiguo, *et al.* 2005. Dating of triassic granites in the western Kunlun mountains and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 645~652(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfei, Xu Wangchun, Guo Jianqiu, *et al.* 2007. Zircon U-Pb and Hf isotopic composition of deformed granite in the southern margin of the Gangdise terrane, Tibet: Evidence for early Jurassic subduction of Neo-Tethyan oceanic slab[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 347~1 353(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xueting, Wang Bingzhang, Yu Jian, *et al.* 2005. Sedimentary characteristics of the Bayan Har remnant ocean basin, northwestern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(7): 613~620(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yaoling, Hu Daogong, Wu Zhenhan, *et al.* 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages for dacitic tuffite from Bayan Har Group, northern Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 4(5): 809~814(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zicheng, Zhang Xujiao, Gao Wanli, *et al.* 2010. Evidence of zircon U-Pb ages for the formation time of the east Kunlun left-lateral ductile shear belt[J]. *Journal of Geomechanics*, 16(1): 51~58(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏道远, 熊延望, 陈建超, 等. 2003. 青海银石山地区巴颜喀拉前陆盆地构造变形特征及动力学机制[J]. *沉积与特提斯地质*, 23(4): 72~78.
- 蔡雄飞, 王国灿, 李德威. 2004. 印支运动在昆仑地区的表现特征[J]. *地学前缘*, 11(3): 50.
- 崔军文, 张晓卫, 唐哲民. 2006. 青藏高原的构造分区及其边界的变形构造特征[J]. *中国地质*, 33(2): 256~266.
- 刘成东, 周肃, 莫宣学, 等. 2003. 东昆仑造山带后碰撞花岗岩岩石地球化学和⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素年代学约束[J]. *华东地质学院学报*, 26(4): 301~305.
- 刘世坤, 徐开锋. 1995. 西藏羌北-昌都地区三叠纪的海侵事件及印支运动的期次[J]. *西藏地质*, 14(2): 121~127.
- 刘世坤, 徐开锋. 1998. 西藏羌北-昌都地区三叠纪岩石地层及印支运动[J]. *中国区域地质*, 17(1): 25~29.
- 刘志伟, 赵文津, 吴珍汉, 等. 2016. 东昆仑造山带中地壳存在古洋

- 壳俯冲的深反射地震证据[J]. 地质学报, 90(8): 1 692~1 702.
- 罗照华, 柯 珊, 曹永清, 等. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. 地质通报, 21(6): 292~297.
- 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 等. 2010. 金滩和白马山印支期花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其成岩启示[J]. 大地构造与成矿学, 34(2): 282~290.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 33(3): 161~174.
- 李小兵, 裴先治, 陈有炘, 等. 2015. 东昆仑造山带东段哈图沟-清水泉-沟里韧性剪切带塑性变形及动力学条件研究[J]. 大地构造与成矿学, 39(2): 208~230.
- 李小兵, 裴先治, 刘成军, 等. 2014. 东昆仑东段东昆中构造带韧性剪切作用及其地质意义[J]. 中国地质, 41(2): 419~436.
- 李 洁, 陈 文, 雍 拥, 等. 2012. 青海玉树地区扎喜科岩体形成时代、地球化学特征及构造意义研究[J]. 地球学报, 33(5): 773~786.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 291~292.
- 曲永贵, 王永胜, 张树岐, 等. 2003. 西藏申扎地区晚三叠世多布日组地层剖面的启示——对冈底斯印支运动的地层学制约[J]. 地质通报, 22(7): 470~473.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.
- 吴珍汉, 叶培盛, 胡道功, 等. 2011. 青藏高原羌塘盆地南部古近纪逆冲推覆构造系统[J]. 地质通报, 30(7): 1 009~1 016.
- 吴珍汉, 叶培盛, 赵文津, 等. 2007. 东昆仑南部晚新生代逆冲推覆构造系统[J]. 地质通报, 26(4): 448~456.
- 王国灿, 向树元, 王 岸, 等. 2007. 东昆仑及相邻地区中生代-新生代早期构造过程的热年代学记录[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 32(5): 605~614, 680.
- 王立全, 潘桂棠, 丁 俊, 等. 2013. 青藏高原及邻区地质图说明书(1:150 000 0)[M]. 北京: 地质出版社, 147~147.
- 王 涛, 王晓霞, 郑亚东, 等. 2007. 花岗岩构造研究及花岗岩构造动力学刍议[J]. 地质科学, 42(1): 91~113.
- 谢才富. 2002. 同构造花岗岩的一种显微构造标记[J]. 岩石矿物学杂志, 21(2): 180~185.
- 许志琴, 李海兵, 杨经绥, 等. 2001. 东昆仑山南缘大型转换挤压构造带和斜向俯冲作用[J]. 地质学报, 75(2): 156~164.
- 许志琴, 杨经绥, 刘海兵, 等. 2007. 造山的高原-青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京: 地质出版社, 350~460.
- 闫全人, 王宗起, 刘树文, 等. 2006. 青藏高原东缘构造演化的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学框架[J]. 地质学报, 80(9): 1 285~1 294.
- 杨德明, 和钟铨, 郑常青, 等. 2004. 西藏门巴地区德宗花岗质片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34(S1): 12~22.
- 杨广全, 王根厚. 2009. 初论青藏地区的“印支运动”[J]. 地质通报, 28(9): 1 188~1 190.
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2000. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. 地质论评, 46(2): 203~211.
- 查显锋, 计文化, 张海迪, 等. 2012. 青海中部昆南增生杂岩带变形分期及构造过程[J]. 地质通报, 31(12): 2 015~2 024.
- 张传林, 于海锋, 王爱国, 等. 2005. 西昆仑西段三叠纪两类花岗岩年龄测定及其构造意义[J]. 地质学报, 79(5): 646~652.
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据[J]. 岩石学报, 23(6): 1 347~1 353.
- 张雪亭, 王秉璋, 俞 建, 等. 2005. 巴颜喀拉残留洋盆的沉积特征[J]. 地质通报, 24(7): 613~620.
- 张耀玲, 胡道功, 吴珍汉, 等. 2015. 青藏高原北部巴颜喀拉山群英安质沉凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 34(5): 809~814.
- 张紫程, 张绪教, 高万里, 等. 2010. 东昆仑左行走滑韧性剪切带形成时代的锆石 U-Pb 年龄证据[J]. 地质力学学报, 16(1): 51~58.