

藏北羌塘泛非和印支事件的记录:来自俄久卖变质杂岩地球化学与锆石 U-Pb 年代学的证据^{*}

郑艺龙¹ 王根厚^{1**} 郭志文² 梁晓¹ 袁国礼¹ 王寒冻¹ 黄波¹ 何亚东¹

ZHENG YiLong¹, WANG GenHou^{1**}, GUO ZhiWen², LIANG Xiao¹, YUAN GuoLi¹, WANG HanDong¹, HUANG Bo¹ and HE YaDong¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

2. 中化地质矿山总局福建地质勘查院,福州 350013

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Fujian Geological Exploration Institute of CHEMCHINA Geology & Mine Bureau, Fuzhou 350013, China

2014-06-20 收稿, 2014-12-11 改回.

Zheng YL, Wang GH, Guo ZW, Liang X, Yuan GL, Wang HD, Huang B and He YD. 2015. The record of the Pan-African and the Indosinian tectono-thermal event in Qiangtang terrane, northern Tibet: Evidence from geochemical characteristics and U-Pb geochronology of the metamorphic complex in EjiuMai area. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (4): 1137 – 1152

Abstract Tectonic attribute of the Qiangtang Basin is a controversial issue, and further study would be helpful to understand it. EjiuMai complexes, located in the northern margin of the “Central Uplift” in Qiangtang Basin, are composed of sillimanite gneiss, gneissic granite, and tourmaline leucogranite intruded into complexes. In the northern margin of the “Central Uplift”, the high-grade metamorphic rock was only discovered in EjiuMai complexes. Therefore, the complexes would be an important window to understand the tectonic evolution of Qiangtang Basin. On the basis of the geological survey, the detailed studies on petrology, U-Pb zircon geochronology and geochemistry have been conducted for gneissic granite and leucogranite respectively. In the case of gneissic granite, the weighted average age was 476.6 ± 4.8 Ma, and geochemical characteristics indicate it being arc volcanic rocks. The volcanic rocks enriched large ion lithophile elements including Rb, Ba, Th and Pb, and lost high field-strength element including Nb, Ta, Ti, and P. At the same time, the zircons in the leucogranite show obvious core-mantle-rim structure. The age for core part ranged between 2052 ± 25 Ma and 541 ± 8 Ma. Besides, the weighted average age was 463.7 ± 7.5 Ma for mantle, 214.6 ± 2 Ma for the medial edge, and 189.4 ± 1.1 Ma for lateral edge. The geochemical characteristics demonstrated that leucogranite had been formed in typical tectonic settings of collision. Comprehensively, EjiuMai complexes contained magmatic products of later Pan-African events at Early Paleozoic (~ 470 Ma), and suffered deep burying and partial melting in Indosinian in which leucogranite was formed at ca. 214 Ma and ca. 189 Ma, respectively. Therefore, the geological record of the Pan-African period could be extended at least to the northern margin of the “Central Uplift” in Qiangtang Basin.

Key words Qiangtang Basin; Metamorphic complexes; U-Pb dating; Pan-African tectono-thermal event; Indosinian tectono-thermal event

摘要 藏北羌塘盆地大地构造属性是长期争议的议题,深入研究有助于对该问题的探讨。俄久卖杂岩体产出于羌塘盆地中央隆起带北缘,包括夕线石片麻岩和片麻状花岗岩,以及侵位于其中的淡色花岗岩脉。在中央隆起北侧,高级变质岩仅发现于俄久卖杂岩体内。因此,该杂岩为研究羌塘盆地构造演化的重要窗口。在区域地质调查的基础上,本文重点对片麻状花岗岩和淡色花岗岩开展了岩石学、锆石 U-Pb 年代学与地球化学研究。其中,片麻状花岗岩加权平均年龄为 476.6 ± 4.8 Ma,且岩石中大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 和 Pb 相对富集,高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P 较亏损,显示弧火山岩的地球化学特征。淡色花岗岩中的锆石呈明显的核-幔-边环带结构,其核部测得年龄介于 2052 ± 25 Ma ~ 541 ± 8 Ma 之间,幔部加权平均年龄为

* 本文受中国地质调查局项目(1212011086062、1212011221081、1212011221115)资助。

第一作者简介:郑艺龙,男,1986年生,博士生,构造地质学专业,E-mail: cugbzyl@126.com

** 通讯作者:王根厚,男,1963年生,博士,教授,博士生导师,从事构造地质学研究,E-mail: wgh@cugb.edu.cn

463.7 ± 7.5 Ma, 边部内侧为 214.6 ± 2 Ma, 边部外侧为 189.4 ± 1.1 Ma。地球化学特征表明该淡色花岗岩形成于典型的同碰撞构造环境。综合研究表明, 俄久卖杂岩体包括早古生代泛非晚期岩浆事件产物 (~470 Ma), 且在印支运动期遭受深埋作用并发生部分熔融, 分别形成了 ~214 Ma 和 ~189 Ma 的淡色花岗岩。因此, 羌塘盆地内泛非时期的地质记录可延伸至中央隆起带北缘。

关键词 羌塘盆地; 变质杂岩; 锆石 U-Pb 年龄; 泛非运动; 印支运动

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

羌塘盆地是我国陆域内面积最大的海相沉积盆地, 以其独特的地质构造格局和潜在矿产资源前景引起了国内外许多学者的关注。由于该区地处高原腹地, 是研究程度最低的地区, 长期以来对该盆地大地构造属性争议不休。在羌塘盆地以中央的羌塘隆起为界, 将羌塘盆地分为南、北羌塘块体 (图 1a)。关于南、北块体的构造属性前人有三种观点: 一种观点认为, 南、北羌塘块体均属冈瓦纳大陆的一部分, 均具有泛非基底, 北侧的金沙江缝合带为冈瓦纳大陆之北界 (Yin and Harrison, 2000; Kapp *et al.*, 2003; Gehrels *et al.*, 2011;

Pullen *et al.*, 2008, 2011, 2014); 另一种观点则强调南羌塘块体属于冈瓦纳大陆体系, 北羌塘块体则亲扬子块体, 其间的龙木错-双湖缝合带才是冈瓦纳大陆之北界, 为一级构造边界 (李才, 1987; Zhang *et al.*, 2001; 李才等, 2008; 刘焰等, 2011; 杨耀等, 2014; Zhao *et al.*, 2014); 第三种观点则认为, 南羌塘块体是一巨型增生杂岩, 班公湖-怒江缝合带为冈瓦纳北界 (潘桂堂等, 2012)。存在争议的重要原因是羌塘盆地的基底属性长期悬而未决。部分学者认为羌塘盆地存在前寒武纪基底, 且还可再细分为上、下两层, 下部为刚性的“结晶基底”, 上部为变质的“塑性基底” (王成善等, 1987; 王国芝等, 2001; 黄继均等, 2001; 彭智敏等, 2011)。李才 (2008) 在此“变质基底”中发现晚古生代化石, 认为羌塘盆地不存在前寒武纪基底。Pullen *et al.* (2011)、Zhao *et al.*

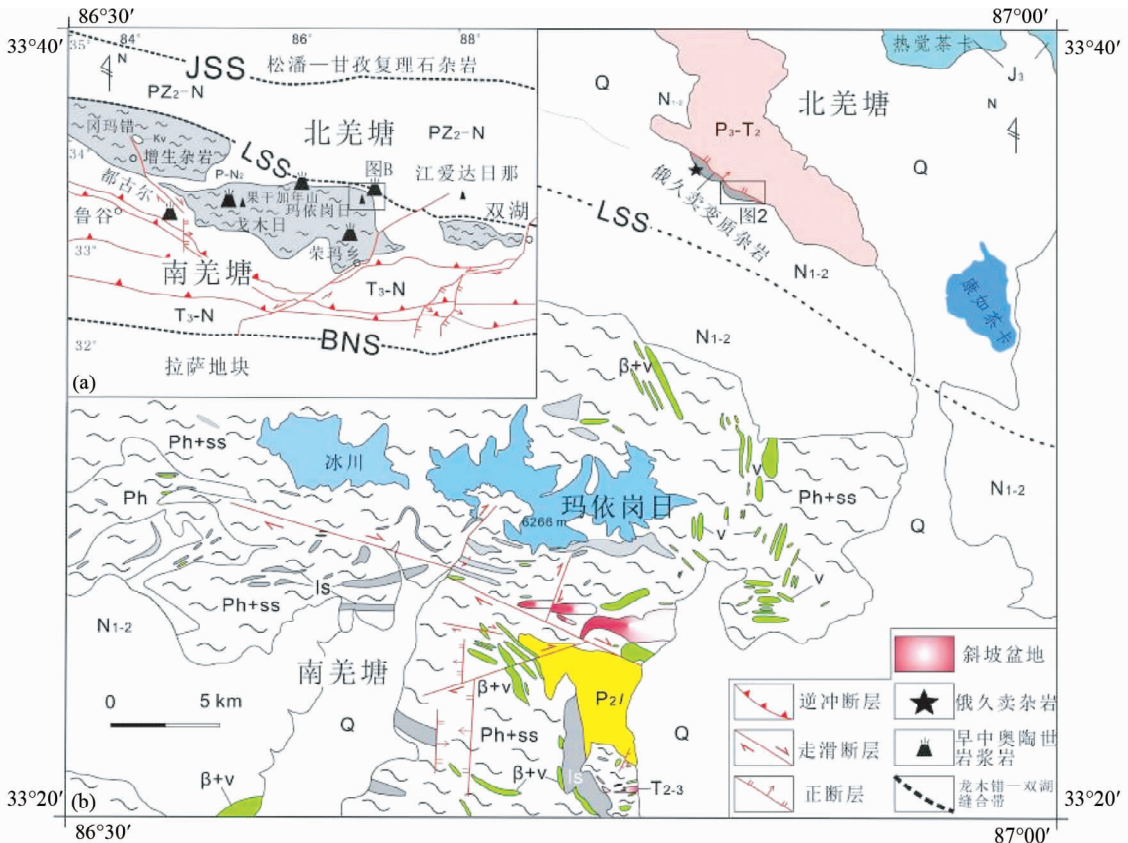


图 1 藏北羌塘玛依岗地区地质简图 (据 Liang *et al.*, 2012 修改)

(a) 南羌塘地区早-中奥陶世岩浆岩分布; (b) 玛依岗日地区地质简图。JSS-金沙江缝合带; LSS-龙木错-双湖缝合带; BNS-班公湖-怒江缝合带。Ph-千枚岩; ss-变质石英砂岩; ls-大理岩; β -玄武岩、变质玄武岩; v -辉长岩、辉绿岩

Fig. 1 Simplified geological map of Mayigangri, northern Tibet (modified after Liang *et al.*, 2012)

(2014)认为南羌塘都古尔花岗片麻岩(474~476Ma)、冈塘错西花岗片麻岩(472Ma)是南羌塘盆地的泛非基底(图1a);王根厚等(2009)、Liang *et al.* (2012)则认为南羌塘为印支期增生楔,其下部不存在大规模的结晶基底。何世平等(2013)在东部玉树地区宁多岩群中获得的碎屑锆石最小年龄为 1044 ± 30 Ma,侵入宁多岩群的片麻状花岗岩年龄为 991 ± 4 Ma,因此认为羌塘地区还是存在前寒武纪基底。

大量的研究与区域地质调查证实了班公湖-怒江缝合带以南的基底为泛非基底(潘桂棠等, 1997, 2002, 2004a, b; DeCelles *et al.*, 2000; 许志琴等, 2005; 宋述光等, 2007; Gawood *et al.*, 2007; 李才等, 2008; Zhu *et al.*, 2013)。在该缝合带以北,胡培远等(2010)在羌塘中部蜈蚣山识别出早古生代的花岗片麻岩,其锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 464.6 ± 4.8 Ma,认为该年龄记录了羌南-保山块体内的泛非晚期的构造事件,而北羌塘块体内还未发现有该期构造活动的记录。在玛依岗日北侧的俄久卖一带发现了包括高级变质岩的杂岩体(谭富文等, 2008),是目前唯一发现于羌中隆起北侧的高级变质岩,成为探讨藏北高原地壳演化过程的重要窗口,受到广泛关注。基于该变质杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究,谭富文等(2008, 2009)认为1780~1666Ma为该变质杂岩的峰期变质年龄,羌塘盆地具有前寒武纪结晶基底。但刘通等(2013)不赞同此观点,他们将此变质杂岩区分为副片麻岩(含夕线石的片麻岩)和正片麻岩(不含夕线石的片麻岩),根据正片麻岩中具有核-幔-边结构的锆石 U-Pb 年龄,认为正变质岩峰期变质作用发生于207Ma前后,羌塘盆地基底成型于晚三叠世。相同的研究对象,相似的研究手段,却得出截然不同的认识,因此本文拟在详实的1:5万区域地质调查的基础之上,重新解剖这套变质杂岩,试图澄清事实,丰富藏北无人区的地质认识。

2 地质概况

羌塘盆地夹持于南部的冈底斯-念青唐古拉陆块与北部的可可西里-巴颜喀拉陆块之间,其北界为西金乌兰-金沙江断裂缝合带,其南界为班公湖-怒江断裂缝合带。本文研究区位于羌塘盆地中部的玛依岗日,为羌中隆起与北羌塘块体的结合部位(图1a)。研究区南部广泛出露增生杂岩、早古生代浅变质岩和新生代陆相沉积。北侧为北羌塘沉积盖层,包括晚二叠世-中生代浅海相沉积和新生代陆相沉积(图1b)。增生杂岩为一套整体无序、局部有序的构造混杂岩,包括印支期的高压低温变质岩,如蓝片岩、榴辉岩(李才, 1997; Pullen *et al.*, 2008; 翟庆国等, 2009; 刘焰等, 2011); 浅变质且具复理石性质的深海-半深海陆源碎屑沉积岩,如粉砂质板岩、变质石英砂岩等;海山、洋壳残片,如蛇绿岩套(翟庆国等, 2010)、大理岩和枕状玄武岩等。北羌塘晚二叠世-中生代浅海相沉积岩可再细分为:上二叠统热觉茶卡组砂岩、粉砂岩夹生屑灰岩;下三叠统康鲁组含细砾粗砂岩、岩屑砂岩,硬水泉组鲕粒、豆粒灰岩、钙质泥岩、中细砂岩;中三叠统康南组钙质粉砂岩、硅质岩和瘤状灰岩;上侏罗统索瓦组砂屑灰岩、泥晶灰岩。整体上构成海陆交互相-海相-海陆交互相的旋回。白垩纪之后,羌塘大部地区都已抬升为陆地,形成了以阿布山组和康托组紫红色磨拉石为代表的陆相沉积岩。

俄久卖变质杂岩产出于增生杂岩与北羌塘沉积盖层之间,呈北西西向带状产出,出露宽度10~200m,延伸约4km(图2)。遥感图像中杂岩平行一大型断裂分布(图2)。由于后期近北东-南西走向滑断层的错动,杂岩带呈透镜状产出。实测剖面(图3)表明杂岩北侧以低角度正断层与北羌塘早-

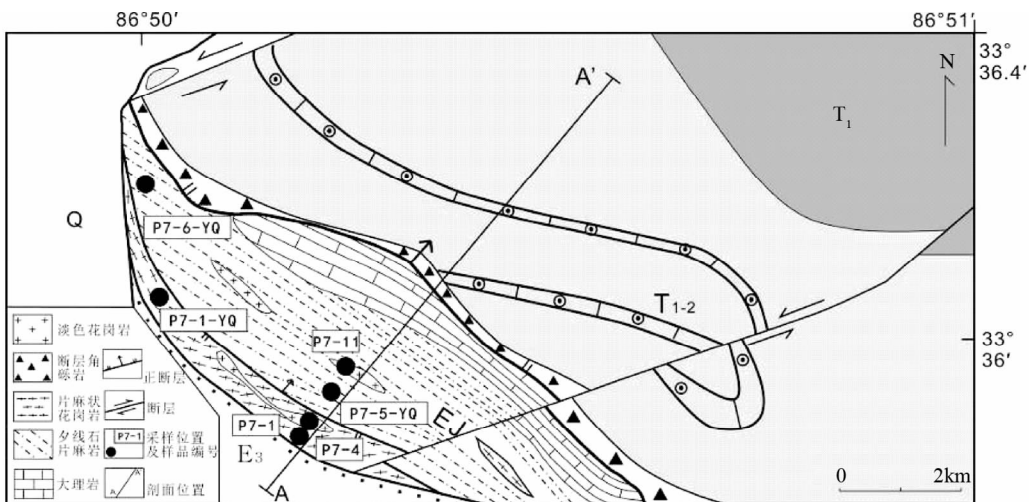


图2 俄久卖片麻岩地区地质简图

EJ-俄久卖杂岩体;T₁-早三叠世康鲁组;T₁₋₂-早中三叠世硬水泉组;E₃-晚始新世康托组;Q-第四系;A-A'为剖面详见图3

Fig.2 Geological sketch map of Ejiumai area

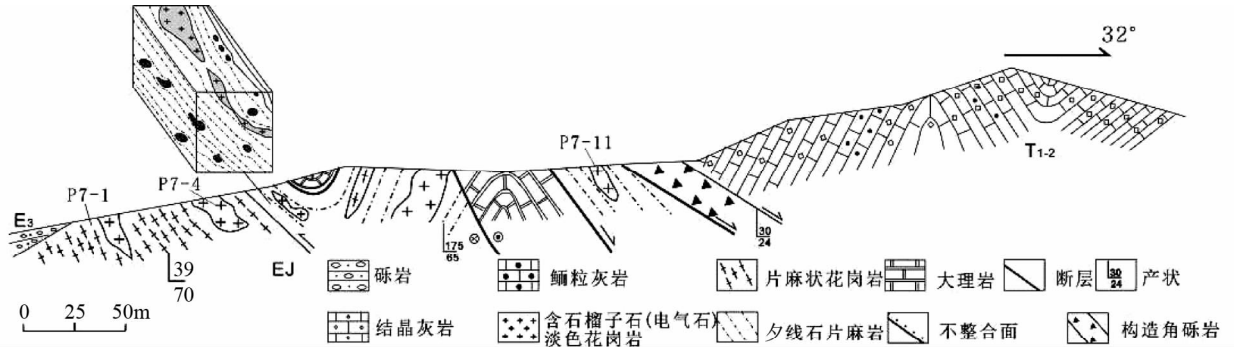


图3 俄久卖变质杂岩地质剖面图

EJ-俄久卖变质杂岩; T₁₋₂-早-中三叠世硬水泉组; E₃-晚始新世康托组; 左上角三维立体图放大显示淡色花岗岩脉近平行片麻理侵位于杂岩体之中

Fig.3 The cross section of the metamorphic complex in Ejiumai area

中三叠世硬水泉组(T₁₋₂)灰岩断层接触,断层倾向北北东(图2、图3、图4a),由于后期褶皱效应的叠加,断层产状有所起伏。断层上盘硬水泉组灰岩主要为细晶灰岩、生屑灰岩和鲕粒灰岩,其中的化石与波痕等保存良好,该岩石只在与杂岩体接触部位遭受了变形作用,形成断层角砾岩带,角砾砾径主要介于5~10cm之间,并发育一系列近直立的节理面,节理面中充填铁质含量较高的红色方解石脉。该断裂下盘岩石则具明显的糜棱岩化现象,长石斑晶拉长、拉断、旋转,形成碎斑系,其他矿物则明显被搓碎。随着与断层距离增大,糜棱岩化明显减弱。上、下盘岩石均叠加了后期轴线近东西向的褶皱作用,杂岩由南向北显示先背斜后向斜。在断层角砾岩中发育小型擦痕,指示上盘向南运动,应是褶皱形成过程中,由于挤压作用导致构造反转形成的逆断层。杂岩南侧为康托组(E₃k)砾岩,产状近水平,砾岩中含大量(变质)杂岩的砾石,由此判断其与杂岩为不整合接触关系。淡色花岗岩脉以平行片麻理的方向侵位于杂岩体中(图3)。

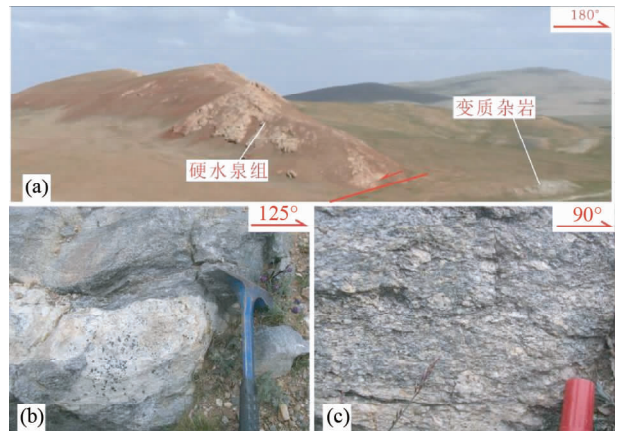


图4 俄久卖变质杂岩露头照片

(a) 变质杂岩露头景观,北侧为硬水泉组,南侧为变质杂岩,二者以低角度正断层接触;(b) 细粒夕线石片麻岩,淡色花岗岩脉侵位其中;(c) 中粒片麻状花岗岩

Fig.4 The outcrop photos of the metamorphic complex in Ejiumai area

3 岩石学与矿物学特征

俄久卖杂岩包括夕线石片麻岩、片麻状花岗岩,淡色花岗岩侵入其中(图2、图3、图4b, c),此外还有少量矽卡岩(方柱阳起岩)和大理岩。由于变形强烈,除淡色花岗岩外,上述各岩性之间没有识别出明显的相互穿插关系,多以断层接触(图2、图3)。

夕线石片麻岩为粒状变晶结构,片麻状构造,斜长石(35%)、钾长石(20%~25%)、石英(25%)构成浅色条带,黑云母(5%~10%)、夕线石(<10%)则形成暗色条带(图5a),少量石榴子石平行片麻理产出。变斑晶以斜长石、钾长石为主,其中含有较多无序的包裹体(图5b)。

片麻状花岗岩具不等粒半自形结构,花岗结构,片麻状构造(图5c),主要由斜长石(60%~65%)、钾长石(少量)、石英(20%~25%)和黑云母(15%)组成,含石榴子石。变

斑晶以斜长石为主,多呈自形板状,局部被钾长石蚕食状交代,可见蠕虫结构(图5d),矿物颗粒间接触界线较平直,且无胶结物充填,黑云母定向排列。

淡色岩类包括二云母花岗岩、糜棱岩化含电气石伟晶岩和弱糜棱岩化含电气石花岗岩等。岩石主要由斜长石(~35%)、钾长石(0~35%)、石英(20%~25%)和黑云母(10%~20%)组成,含有少量白云母、电气石、石榴子石等矿物。斜长石近半自形板状产出,常具绢云母化、高岭土化等现象,少数颗粒边缘被搓碎(图5e);钾长石近半自形板状-他形粒状,一般0.1~1.0mm,个别达3.0mm,高岭土化,可见其轻微交代斜长石。岩石内部可见碳酸盐脉。

矽卡岩类主要为方柱阳起岩,由阳起石(45%)、方柱石(40%),其次为石英(10%)和方解石(5%)组成。阳起石他形柱状、粒状,大小一般为0.1~0.7mm,较少部分1~6mm;

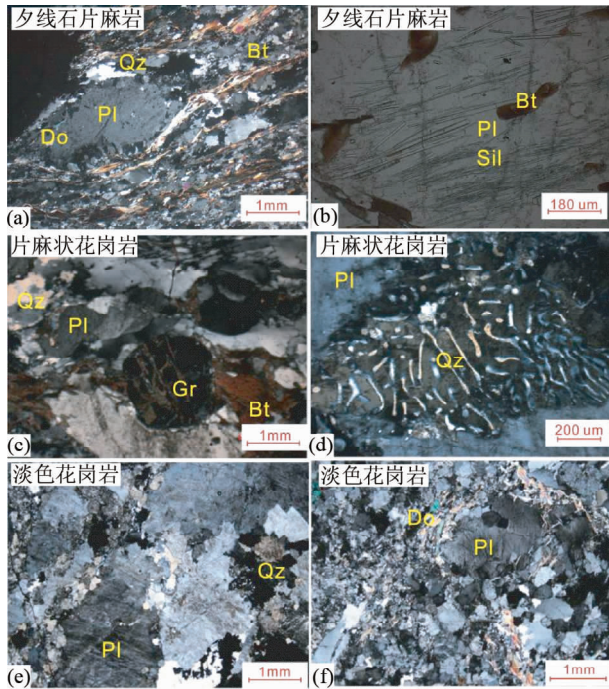
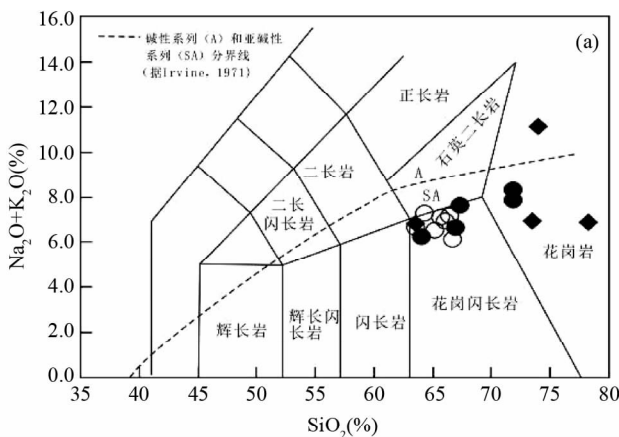


图5 俄久卖杂岩代表性显微镜照片

(a)石榴子石平行片麻理分布;(b)含有黑云母包裹体的斜长石;(c)片麻状花岗岩保留花岗结构;(d)片麻状花岗岩中的蠕虫结构;(e)糜棱岩化花岗岩;(f)二云母花岗岩。Qz-石英;Bt-黑云母;Gr-石榴子石;Pl-斜长石;Do-白云母

Fig.5 The microscope photos of the metamorphic complex rocks in Ejiumai area

方柱石他形柱状、粒状,大小一般 0.1 ~ 0.5mm,少量 0.5 ~ 0.9mm,石英、方解石堆状或脉状零散分布。大理岩主要由方解石组成(90%),含有少量白云母(<10%)。



4 分析方法

利用中国地质大学(北京)科学研究院实验中心带正交偏光的奥林巴斯光学显微镜和日本 EPMA-1600 型电子探针开展岩石微观研究,岩石常、微量元素分析是由河北省区域地质矿产调查研究所实验室分别采用 X 射线荧光谱法(XRF)、化学滴定法和等离子体质谱法(ICP-MS)完成。

在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成锆石单矿物的分选,按宋彪等(2002)描述的方法制作锆石 SHRIMP 分析靶,然后再开展反射光、透射光与阴极发光的分析与研究工作,进一步筛选锆石颗粒。SHRIMP 分析由中国地质科学院北京离子探针中心完成,测试流程同 Compston *et al.* (1992)。采用 SQUID 和 ISOPLLOT 软件处理原始测试数据。LA-ICP-MS 分析由中国地质大学(北京)实验室完成,激光剥蚀系统为美国 New Wave 公司的 UP193SS 型、深紫外(DUV)193nm、ArF 准分子激光剥蚀系统,激光束斑直径约为 36μm。ICP-MS 为美国 Agilent 科技有限公司的 7500a 型仪器。实验中采用载气 He,流速 0.7L/min,年龄计算时以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值校正,用标准锆石 TEM (417Ma)做监控盲样,元素含量以国际标样 NIST610 为外标,Si 为内标计算,NIST612 和 NIST614 做监控盲样。中国地质大学(北京)张红雨等人采用 Glitter 4.4 和 ISOPLLOT 软件处理原始测试数据。

5 地球化学特征

本次研究分析了 5 个片麻状花岗岩,4 个淡色花岗岩和 4 个夕线石片麻岩的常、微量元素特征(表 1)。

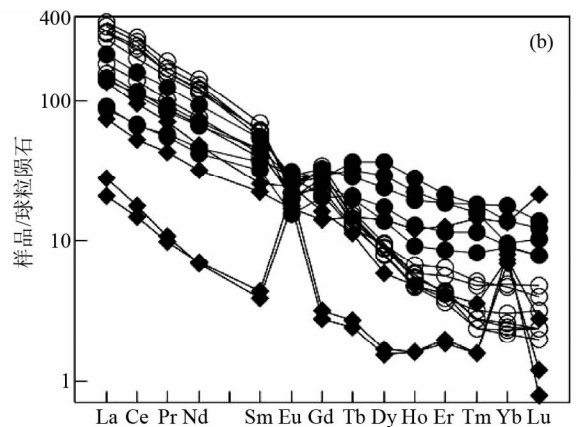


图6 俄久卖片麻状花岗岩、淡色花岗岩硅碱图解(a,据 Middlemost, 1994; Irvine *et al.*, 1971)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b,标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)

实心方块为淡色花岗岩,实心圆为片麻状花岗岩,空心圆为片麻状花岗岩引自刘通等(2013)

Fig.6 Alkali-silica discrimination diagrams (a, after Middlemost, 1994; Irvine *et al.*, 1971) and chondrite-normalized REE patterns (b, normalizing values after Sun and McDonough, 1989) of gneissic granite and leucogranite in Ejiumai area

表1 俄久卖地区代表性的夕线石片麻岩、片麻状花岗岩和淡色花岗岩主量(wt%)、微量($\times 10^{-6}$)元素成分Table 1 The major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements composition of sillimanite gneiss, gneissic granite and leucogranite in Ejiumai

样品号	P7-1 -YQ ₁	P7-1 -YQ ₂	P7-8 -YQ ₁	P7-8 -YQ ₂	P7-5 -YQ	P7-6 -YQ	P7-2 -YQ	P7-4 -YQ	样品号	P7-1 -YQ ₁	P7-1 -YQ ₂	P7-8 -YQ ₁	P7-8 -YQ ₂	P7-5 -YQ	P7-6 -YQ	P7-2 -YQ	P7-4 -YQ
岩性	片麻状花岗岩				夕线石片麻岩		淡色花岗岩		岩性	片麻状花岗岩				夕线石片麻岩		淡色花岗岩	
SiO ₂	67.32	64.04	66.98	71.86	47.52	56.23	78.23	73.96	Lu	0.31	0.35	0.26	0.20	0.73	0.40	0.03	0.02
Al ₂ O ₃	16.12	16.44	16.98	15.09	13.39	18.90	12.51	13.61	Li	34.7	66.00	35.50	21.30	42.30	74.40	4.30	8.20
TiO ₂	0.61	0.72	0.38	0.30	1.65	0.81	0.01	0.04	Be	2.84	4.22	5.12	2.68	0.60	3.56	2.29	0.75
Fe ₂ O ₃	0.12	0.42	0.34	0.25	2.05	0.90	0.01	0.03	Sc	8.33	15.13	9.06	5.77	47.24	18.99	0.90	1.60
FeO	2.80	4.65	2.35	1.45	9.72	5.96	0.07	0.26	V	57.60	91.70	79.07	52.55	765.4	315.5	35.40	55.50
Fe ₂ O ₃ ^T	3.23	5.59	2.95	1.87	12.85	7.52	0.09	0.32	Cr	24.60	79.00	36.40	26.30	70.20	104.9	27.80	30.20
CaO	2.71	3.22	3.14	1.06	9.65	1.74	1.62	0.23	Co	8.00	14.40	8.00	3.50	47.40	19.10	0.40	0.70
MgO	1.33	2.77	1.70	0.86	6.62	3.41	0.05	0.14	Ni	10.70	29.60	11.10	9.30	31.20	35.90	10.10	10.40
K ₂ O	3.95	3.1	2.80	4.12	0.65	6.61	3.89	9.41	Cu	6.80	19.60	3.10	3.50	29.30	25.90	9.40	11.80
Na ₂ O	3.66	3.18	3.85	3.73	2.66	3.73	3.02	1.72	Zn	45.40	82.70	48.30	23.00	151.30	47.20	18.00	20.50
MnO	0.03	0.06	0.02	0.01	0.22	0.05	0.01	0.01	Ga	20.90	22.50	26.70	21.40	17.30	28.90	15.50	14.00
P ₂ O ₅	0.422	0.19	0.41	0.10	0.13	0.14	0.03	0.04	Rb	159.2	154.9	158.2	177.6	22.30	449.1	145.6	354.7
LOI	0.85	1.09	0.96	0.80	5.66	1.36	0.48	0.42	Sr	130.3	239.4	170.8	126.4	133.6	131.4		
A/CNK	0.94	0.98	0.98	1.06			0.94	0.95	Zr	128.5	227.8	126.3	106.6	110.1	150.3	83.80	17.90
Total	99.92	99.87	99.92	99.89	99.91	99.84	99.91	99.86	Nb	16.26	19.63	10.87	31.44	2.65	26.19	0.46	2.70
Y	43.57	29.48	33.72	21.98	45.78	33.23	3.08	3.10	Mo	0.25	0.23	0.05	0.10	0.28	0.48	0.24	0.28
La	21.69	50.78	35.13	20.53	4.93	36.59	6.69	4.89	Ag	0.06	0.05			0.11	0.04		
Ce	40.62	98.70	66.96	41.60	12.33	73.29	10.73	9.00	Cd	0.07	0.04			0.15	0.04		
Pr	5.54	11.94	7.99	5.25	2.21	9.44	1.03	0.94	In	0.08	0.09	0.09	0.06	0.10	0.10	0.01	0.02
Nd	21.73	44.01	30.87	19.86	11.69	34.44	3.22	3.26	Cs	8.15	8.41	7.29	4.16	1.43	19.43	1.71	8.66
Sm	5.60	8.21	6.91	4.89	4.15	6.77	0.59	0.67	Ba	374.2	536.9	267.7	427.3	84.3	866.3		
Eu	1.81	1.70	1.67	0.89	1.67	1.66	1.03	1.30	Hf	3.29	6.68	3.91	3.50	6.29	5.12	2.89	0.28
Gd	5.68	6.76	6.01	4.19	4.42	5.64	0.56	0.65	Ta	1.19	1.33	0.65	1.60	0.20	1.88	0.15	0.82
Tb	1.36	1.06	1.21	0.78	1.13	1.00	0.09	0.10	W	0.93	1.02	0.92	0.66	1.13	1.77	0.14	0.38
Dy	9.29	6.06	7.43	4.44	8.57	6.31	0.39	0.42	Tl	0.99	1.01	0.90	0.84	0.27	2.06	0.77	1.65
Ho	1.57	1.10	1.25	0.72	1.83	1.20	0.09	0.09	Pb	32.9	16.9	31.73	42.34	36.40	20.70	52.24	62.79
Er	3.55	3.05	3.10	1.90	5.40	3.44	0.30	0.32	Bi	0.10	0.12	0.07	0.16	0.18	0.14	0.20	0.09
Tm	0.46	0.46	0.40	0.29	0.92	0.57	0.04	0.04	Th	9.10	19.17	15.83	24.96	8.42	19.13	1.23	6.06
Yb	2.34	2.99	1.62	1.57	6.13	3.50	1.15	1.37	U	2.54	2.80	2.51	3.95	0.42	3.68	0.45	0.54

注:FeO 采用化学滴定法测量, Fe₂O₃^T = Fe₂O₃ + FeO/0.899

片麻状花岗岩中 SiO₂ 含量为 64.04% ~ 71.86%, 平均为 68.4%; Al₂O₃ 为 13.93% ~ 16.98%, MgO 为 0.67% ~ 2.77%, 平均为 1.47%; TiO₂ 为 0.31% ~ 0.72%, 平均为 0.46%; K₂O 为 2.8% ~ 4.12%, K₂O/Na₂O = 0.73 ~ 1.66; P₂O₅ 为 0.1% ~ 0.42%, 平均为 0.26%。从以上岩石化学特征来看, 片麻状花岗岩具有富铝、富碱, 贫钛、磷的特征。CIA (100 × Al₂O₃ / (Al₂O₃ + CaO + Na₂O + K₂O)) 指数为 48.35 ~ 53.1, 明显低于页岩等典型的沉积岩 (Nesbitt, 1982)。在硅碱图解中主要落在花岗岩闪长岩和花岗岩中 (图 6a)。稀土总量相对较高 (ΣREE = 129.1 × 10⁻⁶ ~ 266.7 × 10⁻⁶), 显示明显的轻重稀土分异, (La/Yb)_N 较高 (6.65 ~ 12.2), 配分型式为右倾曲线 (图 6b)。

淡色花岗岩 SiO₂ 含量较高 (绝大多数高于 73%), Al₂O₃ 为 12.51% ~ 16.78%, TiO₂ 为 0.01% ~ 0.65%, MgO 为 0.05% ~ 2.65%, K₂O、Na₂O 含量较高 (K₂O + Na₂O = 6.91%

~ 11.13%), P₂O₅ 为 0.028% ~ 0.042%。具有富硅、富铝、富钾, 贫钛、磷的特征。A/CNK (Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O)) 介于 0.94 ~ 1 之间, 显示铝质花岗岩特征。在硅碱图解中主要落在花岗岩中 (图 6a)。淡色花岗岩稀土元素总量较低 (ΣREE = 26.17 × 10⁻⁶ ~ 140.2 × 10⁻⁶), 轻稀土富集, 重稀土相对亏损 ((La/Yb)_N 为 2.56 ~ 18.8), 配分型式为右倾曲线 (图 6b)。

夕线石片麻岩 SiO₂ 含量变化较大 (47.52% ~ 76.06%), Al₂O₃ 含量较高, 为 13.39% ~ 18.9%, TiO₂ 为 0.02% ~ 1.65%, CaO 为 0.92% ~ 9.65%, MgO 为 0.17% ~ 6.62%, K₂O + Na₂O 为 3.31% ~ 10.34%。整体上看, 除了铝含量较高, 钛含量较低, 其他成分含量均具有较大波动。稀土总量相对较低 (ΣREE = 34.43 × 10⁻⁶ ~ 217.5 × 10⁻⁶), 显示轻微的轻稀土富集特征 ((La/Yb)_N 平均值为 2.7)。

表2 俄久卖片麻状花岗岩(P7-1)及淡色花岗岩(P7-4)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

Table 2 SHRIMP U-Pb dating of zircons from gneissic granite (P7-1) and leucogranite (P7-4) in Ejiumai area

测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	Rad. ^{206}Pb ($\times 10^{-6}$)	Comm. ^{206}Pb (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$t^{206/238}$ ($\pm 1\sigma$)(Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$t^{207/206}$ ($\pm 1\sigma$)(Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$
P7-1										
1.1	189	134	0.73	12.50	0.60	0.08	477.6 \pm 6.9	0.06	439 \pm 89	0.59
2.1	89	70	0.82	6.10	1.31	0.08	489.3 \pm 8.4	0.05	279 \pm 173	0.56
3.1	331	213	0.67	66.40	0.06	0.23	1354.2 \pm 16.6	0.08	1292 \pm 18	2.71
4.1	317	285	0.93	76.00	0.05	0.28	1586.2 \pm 22.0	0.10	1606 \pm 14	3.81
5.1	359	106	0.30	92.00	0.00	0.30	1683.8 \pm 21.2	0.11	1727 \pm 15	4.35
6.1	600	224	0.38	63.30	0.15	0.12	745.2 \pm 18.4	0.06	657 \pm 47	1.04
7.1	100	69	0.71	6.20	-0.19	0.07	449.7 \pm 8.7	0.06	532 \pm 69	0.58
8.1	130	112	0.89	49.50	0.16	0.44	2358.8 \pm 33.5	0.19	2781 \pm 24	11.85
9.1	384	273	0.74	25.60	0.10	0.08	480.8 \pm 6.2	0.06	643 \pm 40	0.65
10.1	1246	164	0.14	469.60	0.02	0.44	2344.1 \pm 23.7	0.16	2449 \pm 8	9.63
11.1	90	41	0.47	5.90	0.88	0.08	466.7 \pm 8.0	0.05	343 \pm 163	0.55
12.1	144	112	0.80	9.50	0.73	0.08	470.3 \pm 7.1	0.05	349 \pm 99	0.56
13.1	94	65	0.72	6.30	0.71	0.08	482.1 \pm 8.1	0.06	564 \pm 130	0.63
14.1	178	101	0.59	11.80	0.93	0.08	477.3 \pm 7.2	0.06	467 \pm 63	0.60
15.1	682	171	0.26	74.50	0.03	0.131	771.4 \pm 11.4	0.06	728 \pm 19	1.11
16.1	55	43	0.80	3.60	0.36	0.08	473.0 \pm 9.5	0.06	452 \pm 180	0.59
17.1	630	454	0.75	43.60	0.15	0.08	498.5 \pm 6.1	0.06	515 \pm 32	0.64
18.1	718	492	0.71	37.80	0.24	0.06	382.5 \pm 4.7	0.06	497 \pm 37	0.48
19.1	226	217	0.99	14.70	0.17	0.08	470.3 \pm 7.6	0.06	512 \pm 51	0.60
20.1	1629	526	0.33	117.00	0.05	0.08	517.1 \pm 6.1	0.06	508 \pm 18	0.66
21.1	129	66	0.53	8.00	1.10	0.07	445.2 \pm 7.1	0.05	200 \pm 185	0.49
22.1	87	51	0.61	5.80	0.76	0.08	477.9 \pm 8.6	0.06	482 \pm 180	0.60
23.1	60	17	0.30	27.60	0.39	0.53	2744.7 \pm 95.6	0.21	2900 \pm 37	15.32
24.1	423	486	1.19	101.80	0.15	0.28	1589.1 \pm 18.5	0.10	1615 \pm 13	3.84
25.1	303	198	0.68	27.20	0.66	0.10	635.6 \pm 8.2	0.06	595 \pm 73	0.85
P7-4										
1.1	3091	17	0.01	93.00	0.12	0.04350	221.7 \pm 1.3	0.05	232 \pm 22	0.25
2.1	1182	6	0.01	34.60	0.03	0.03	215.6 \pm 0.9	0.05	257 \pm 35	0.24
3.1	1212	5	0.00	31.10	0.11	0.03	189.8 \pm 0.8	0.05	185 \pm 33	0.21
4.1	1276	6	0.00	34.90	0.23	0.03	201.5 \pm 0.8	0.05	206 \pm 42	0.22
5.1	1140	6	0.01	32.60	0.09	0.03	211.1 \pm 1.0	0.05	260 \pm 65	0.24
6.1	1018	539	0.55	123.00	0.07	0.14	847.3 \pm 3.2	0.06	810 \pm 19	1.28
7.1	349	88	0.26	39.70	-0.20	0.13	802.8 \pm 4.5	0.07	891 \pm 28	1.26
8.1	1208	5	0.00	32.00	-0.02	0.03	195.6 \pm 1.3	0.05	244 \pm 29	0.22
9.1	1411	6	0.00	36.00	0.12	0.04	188.7 \pm 0.9	0.05	134 \pm 28	0.20
10.1	1283	7	0.01	18.90	0.50	0.02	108.9 \pm 0.6	0.05	1 \pm 92	0.11
11.1	972	7	0.01	11.60	1.65	0.01	87.3 \pm 1.0	0.05	287 \pm 256	0.10
13.1	1486	6	0.00	43.70	0.05	0.03	217.1 \pm 1.1	0.05	181 \pm 38	0.23
14.1	1932	6	0.00	72.60	0.13	0.04	275.6 \pm 5.9	0.05	283 \pm 49	0.31
15.1	1151	5	0.00	29.60	0.18	0.03	189.5 \pm 1.4	0.05	148 \pm 45	0.20

6 锆石 U-Pb 年龄

本次研究对 1 件片麻状花岗岩(样品号:P7-1)和 2 件淡色花岗岩(糜棱岩化电气石微晶岩,样品号:P7-4;糜棱岩化含电气石花岗岩,样品号:P7-11)开展了锆石 U-Pb 年代学研究工作。

片麻状花岗岩中的锆石多呈无色,个别颗粒略带浅黄色,半自形到他形柱状,部分具浑圆状外型,颗粒长径 100 ~ 160 μm ,长宽比在 1 : 1 ~ 3 : 1 之间。在阴极发光图像中,锆石为灰白色,振荡环带明显,通常不具有暗色的变质增生边,部分锆石中振荡环带被改造加厚或变模糊(图 7a)。对片麻状花岗岩中的 25 颗锆石分别进行了 25 个测试点分析,分析结果表明这些锆石的 Th、U 含量和 Th/U 变化范围较大,分别为 $41 \times 10^{-6} \sim 526 \times 10^{-6}$, $55 \times 10^{-6} \sim 1629 \times 10^{-6}$ 和 0.14

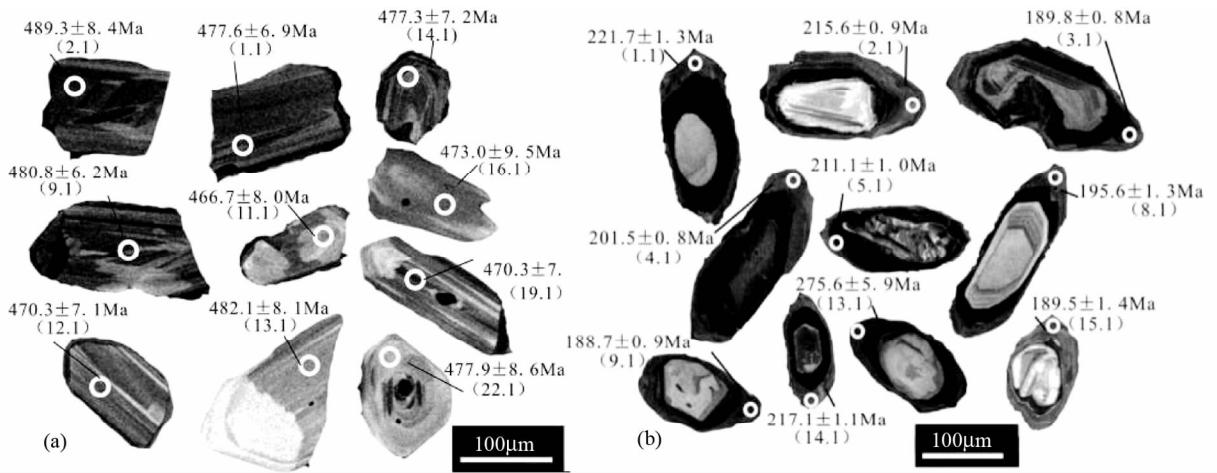


图7 俄久卖片麻状花岗岩(P7-1)和淡色花岗岩(P7-4)中部分锆石阴极发光图

P7-1 锆石发育振荡环带(a), P7-4 锆石具明显核-幔-边结构(b). 白色圆圈指示锆石测年位置, 括号内、外数字分别为测试点编号和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值

Fig. 7 Cathodoluminescence images of zircons from gneissic granite (P7-1) and leucogranite (P7-4) in Ejiumai area

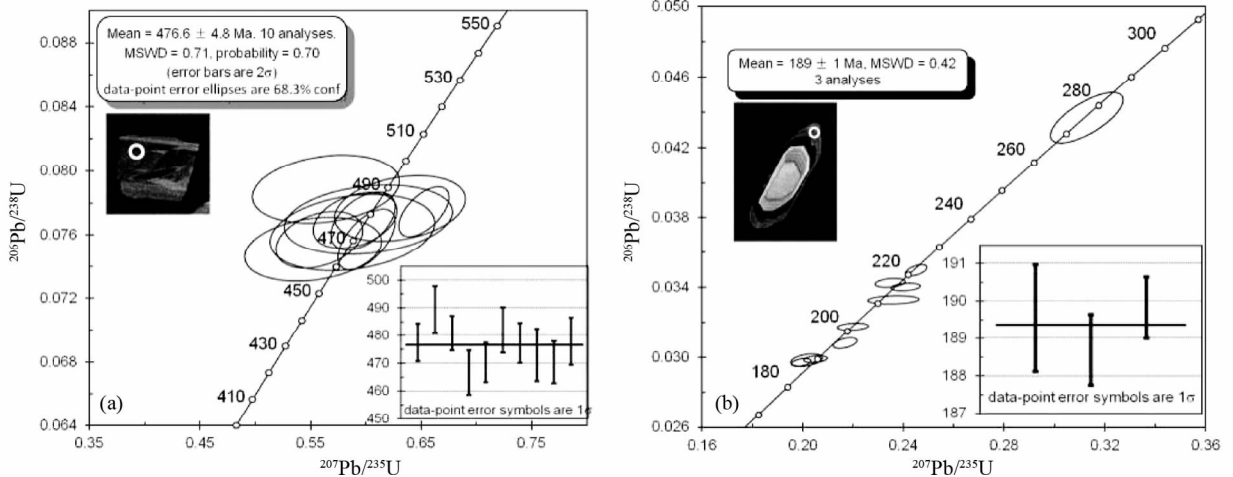


图8 俄久卖片麻状花岗岩(P7-1)和淡色花岗岩(P7-4)中的锆石 U-Pb 谐和图及加权平均年龄

Fig. 8 Concordia diagrams and weighted mean ages of zircons from gneissic granite (P7-1) and leucogranite (P7-4) in Ejiumai area

~1.19。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄14个测点年龄介于449.7~498.5Ma, 其中10个测点的加权平均年龄为 $476.6 \pm 4.8\text{Ma}$ (图8a)。9个锆石年龄分布于635.6~2900Ma之间(大于1000Ma者, 则取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值), 应为继承锆石。另2个年龄517.1Ma、382.5Ma则可能为混合年龄(表2)。

淡色花岗岩锆石自形到半自形长柱状, 少数为短柱状, 粒径100~200 μm , 长宽比在1.5:1~4:1之间。阴极发光图像显示, 锆石具明显的核-幔-边结构, 核部为灰白色, 浑圆状, 部分锆石核部还具有溶蚀港湾结构; 幔部亮度较高, 具有典型的岩浆锆石振荡环带; 边部还可再细分为两部分: 内侧为灰黑色均匀分布或具弱振荡环带, 外侧为灰色均匀窄边, 具有面状生长带或扇形环带(图7b、图9)。个别锆石没有发

育核-幔-边结构, 内部形态呈冷杉叶页状。

采用SHRIMP对淡色花岗岩P7-4中锆石测年, 共分析了15个测试点。其中核部获得了2个802.7Ma、847.3Ma古老年龄, 测试点Th/U分别为0.55和0.26, 但其普通铅过小, 可能经历Pb丢失事件, 舍弃不用。由于幔部U含量太高, 未能获得可信的幔部年龄值。边部外侧年龄值分布于188.5~221.7Ma之间(275.6 \pm 5.9Ma的年龄应为混合年龄), 其中188.7~189.8Ma分布于一致线上, 3个测试点平均年龄值为 $189.4 \pm 1.1\text{Ma}$ (图8b), 边部所有测试点Th/U \leq 0.01(表2)。

由于锆石U的含量太高, 因此采用LA-ICP-MS对另一件淡色花岗岩(P7-11)锆石测年, 并同时获得各测试点微量元素含量, 共分析45个测试点。锆石核部的U和Th含量相对

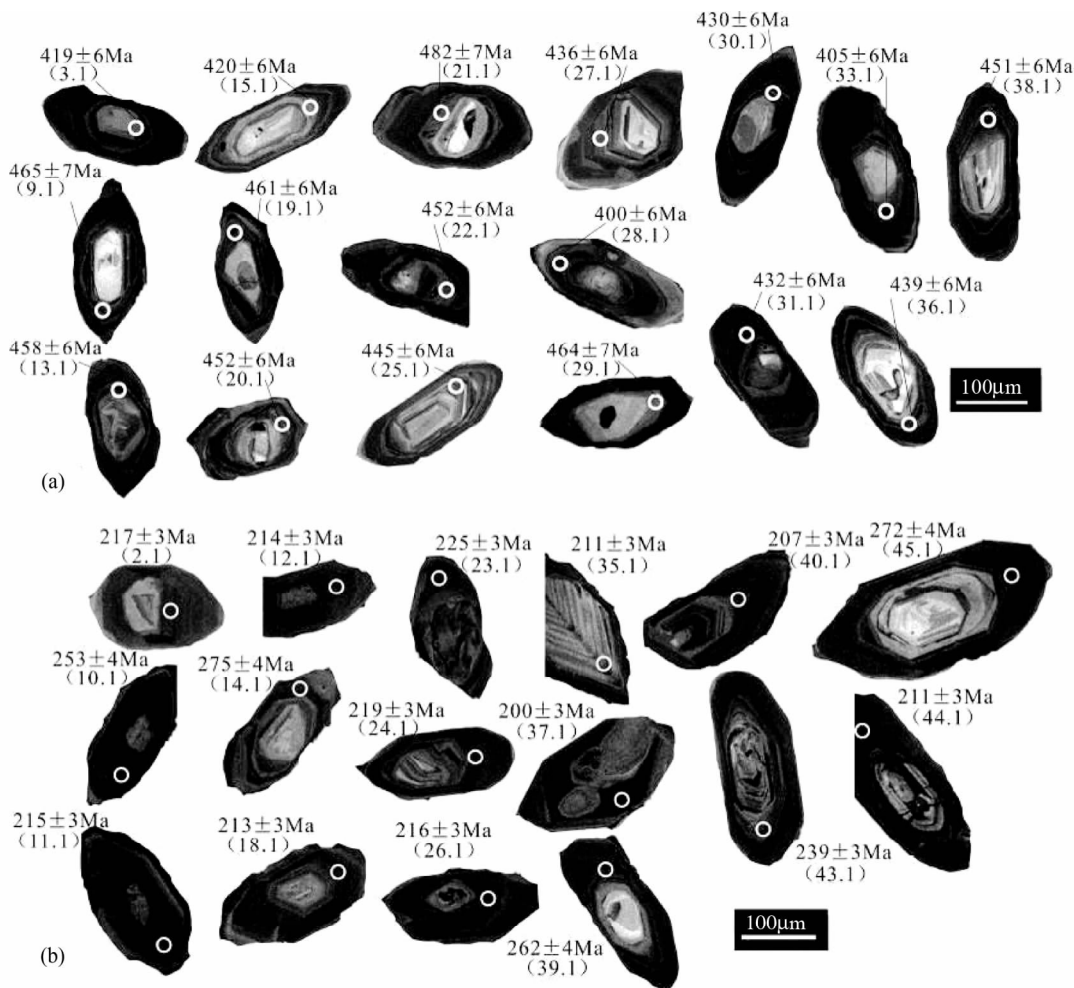


图9 俄久卖淡色花岗岩(P7-11)中部分锆石阴极发光图

多数锆石具明显核-幔-边结构, 仅个别锆石具有冷杉叶结构, 白色圆圈指示锆石测年位置, 括号内、外数字分别为测试点编号和²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值

Fig. 9 Cathodoluminescence images of zircons from leucogranite (P7-11) in Ejiumai area

较低, 分别在 $87.2 \times 10^{-6} \sim 220.2 \times 10^{-6}$ 和 $437.3 \times 10^{-6} \sim 825.8 \times 10^{-6}$ 之间, $Th/U = 0.18 \sim 0.35$, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化范围较大, 8 个样品点分布于 $541 \pm 8Ma \sim 2052 \pm 25Ma$ 之间 (表 3), 没有形成谐和年龄。锆石幔部 (图 9a) U 含量低、Th 含量高, Th/U 比较小, 分别为 $18.15 \times 10^{-6} \sim 122.08 \times 10^{-6}$ 和 $497.2 \times 10^{-6} \sim 1705.7 \times 10^{-6}$ 之间, $Th/U = 0.02 \sim 0.17$ 。在谐和图上, 17 个点分布于 $400 \pm 6Ma \sim 482 \pm 7Ma$ 之间, 其中 3 个样品形成 $463.7 \pm 7.5Ma$ 的加权平均年龄 (图 10a)。锆石边部内侧 (图 9b) 同样也是 U 含量低, Th 含量高, 分别在 $54.28 \times 10^{-6} \sim 308.6 \times 10^{-6}$ 和 $1244.4 \times 10^{-6} \sim 2093.6 \times 10^{-6}$ 之间, $Th/U = 0.06 \sim 0.35$ 。13 个测试点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中, 分布于 $200 \pm 3Ma \sim 225 \pm 3Ma$ 之间, 其中 9 个点形成 $214.6 \pm 2Ma$ 的加权平均年龄 (图 10b)。另有 7 个点分布于 $239 \sim 371Ma$ 之间, 可能为混合年龄。

7 讨论

一般认为火成岩成因的锆石其 Th/U 比值在 0.1 ~ 1 的范围内 (陈岳龙等, 2004; 雷玮琰等, 2013)。片麻状花岗岩 P7-1 中的锆石阴极发光图像中振荡环带明显, 且测试点 Th/U 绝大多数在 0.1 ~ 1 之间, 为典型岩浆锆石特征, 因而 $476.6 \pm 4.8Ma$ 的年龄值可能代表了片麻状花岗岩结晶年龄。淡色花岗岩 P7-11 中锆石的幔部在阴极发光图像中也具有明显的振荡环带, 且稀土元素配分图显示岩浆锆石特征 (图 11), 表明这些测试点所获得的 $463.7 \pm 7.5Ma$ 为岩浆锆石的结晶年龄。该样品边部内侧显示变质重结晶作用形成的灰色均匀分布特征或指示岩浆作用的弱振荡环带 (图 8a, b), Th/U 比值较低 (给出范围多数小于 0.1)。这些特征共同在边部存在, 表明淡色花岗岩源岩在该时期发生了高级变质作用, 并伴随部分熔融作用, 因而在边部获得的 $214.6 \pm 2Ma$

表3 俄久卖淡色花岗岩(P7-11) 锆石 La-ICP-Ms U-Pb 年龄

Table 3 La-ICP-Ms U-Pb dating of zircons from leucogranite (P7-11) in Ejiumai area

测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Ma)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)
01	87.22	474.92	0.18	0.07	837 ± 19	0.88	640 ± 9	0.07	586 ± 8
02	119.17	1677.6	0.07	0.05	198 ± 20	0.24	216 ± 4	0.05	217 ± 3
03	28.94	1605.75	0.02	0.06	431 ± 17	0.51	421 ± 6	0.06	419 ± 6
04	122.24	1764.61	0.07	0.05	213 ± 20	0.24	215 ± 4	0.05	215 ± 3
05	164.59	825.79	0.20	0.06	680 ± 17	0.75	568 ± 8	0.06	541 ± 8
06	192.86	606.15	0.32	0.07	789 ± 17	1.02	713 ± 9	0.07	689 ± 10
07	96.37	437.32	0.22	0.07	818 ± 17	1.12	762 ± 10	0.07	743 ± 10
08	97.64	673.87	0.14	0.16	2476 ± 38	8.37	2272 ± 15	0.16	2052 ± 25
09	30.24	837.92	0.04	0.06	444 ± 18	0.58	461 ± 7	0.6	465 ± 7
10	92.96	1733.62	0.05	0.05	257 ± 20	0.28	254 ± 4	0.05	253 ± 4
11	126.61	1712.07	0.07	0.05	221 ± 20	0.24	216 ± 4	0.05	215 ± 3
12	145.60	1999.23	0.07	0.05	216 ± 19	0.23	214 ± 4	0.05	214 ± 3
13	100.74	1231.13	0.08	0.06	539 ± 17	0.59	472 ± 7	0.06	458 ± 6
14	54.28	1244.36	0.04	0.05	271 ± 21	0.31	274 ± 5	0.05	275 ± 4
15	52.41	1049.55	0.05	0.06	500 ± 19	0.53	433 ± 7	0.06	420 ± 6
16	18.15	1705.69	0.01	0.05	386 ± 18	0.43	366 ± 5	0.05	363 ± 5
17	127.67	459.40	0.28	0.08	1151 ± 16	1.60	969 ± 11	0.08	891 ± 12
18	108.89	1722.19	0.06	0.05	233 ± 21	0.24	215 ± 4	0.05	213 ± 3
19	53.75	869.05	0.06	0.06	472 ± 18	0.58	463 ± 7	0.06	461 ± 6
20	41.28	924.06	0.04	0.06	448 ± 18	0.56	452 ± 7	0.06	452 ± 6
21	122.08	714.93	0.17	0.06	535 ± 20	0.62	492 ± 8	0.06	482 ± 7
22	78.25	1264.59	0.06	0.06	657 ± 18	0.62	487 ± 7	0.06	452 ± 6
23	104.62	1577.04	0.07	0.05	195 ± 21	0.25	223 ± 4	0.05	225 ± 3
24	138.73	1908.49	0.07	0.05	206 ± 20	0.24	218 ± 4	0.05	219 ± 3
25	36.10	877.31	0.04	0.06	444 ± 19	0.55	445 ± 7	0.06	445 ± 6
26	106.99	1670.32	0.06	0.05	206 ± 21	0.24	216 ± 4	0.05	216 ± 3
27	26.17	1309.75	0.02	0.06	435 ± 19	0.54	436 ± 7	0.06	436 ± 6
28	45.38	1185.27	0.04	0.06	522 ± 19	0.51	419 ± 6	0.06	400 ± 6
29	42.64	497.20	0.09	0.06	531 ± 23	0.60	476 ± 8	0.06	464 ± 7
30	36.68	1407.79	0.03	0.06	445 ± 19	0.53	433 ± 7	0.06	430 ± 6
31	49.12	1446.21	0.03	0.06	434 ± 19	0.53	432 ± 7	0.06	432 ± 6
32	220.29	636.72	0.35	0.08	1071 ± 17	1.63	981 ± 11	0.08	942 ± 13
33	25.66	1041.47	0.02	0.05	400 ± 20	0.49	404 ± 6	0.05	405 ± 6
34	56.98	1374.59	0.04	0.05	383 ± 20	0.44	372 ± 6	0.05	371 ± 5
35	308.63	1375.43	0.22	0.05	213 ± 23	0.23	211 ± 4	0.05	211 ± 3
36	27.67	999.54	0.03	0.06	443 ± 20	0.54	440 ± 7	0.06	439 ± 6
37	90.98	1549.60	0.06	0.05	199 ± 22	0.22	200 ± 4	0.05	200 ± 3
38	22.84	1385.10	0.02	0.06	459 ± 19	0.56	452 ± 7	0.06	451 ± 6
39	100.66	1791.85	0.06	0.06	319 ± 20	0.30	268 ± 4	0.05	262 ± 4
40	136.11	1861.71	0.07	0.06	223 ± 21	0.23	209 ± 4	0.05	207 ± 3
41	106.89	1649.13	0.06	0.06	474 ± 18	0.46	381 ± 6	0.06	366 ± 5
42	150.03	476.44	0.31	0.07	851 ± 18	1.30	845 ± 11	0.07	842 ± 12
43	109.87	1698.56	0.06	0.05	239 ± 21	0.26	239 ± 4	0.05	239 ± 3
44	159.08	2093.57	0.08	0.05	212 ± 20	0.23	211 ± 4	0.05	211 ± 3
45	78.36	1690.89	0.05	0.05	283 ± 20	0.31	273 ± 4	0.05	272 ± 4

代表了淡色花岗岩的结晶年龄,冷杉叶状锆石所获得 $211 \pm 3\text{Ma}$ 的年龄也说明这点(图 9b-35.1; 吴元保和郑永飞, 2004)。P7-4 锆石测试点为灰色的增生边,相应 Th/U 均小于等于 0.01,因而 $189 \pm 1\text{Ma}$ 也应代表另一期淡色花岗岩的

结晶年龄。淡色花岗岩幔部具有与片麻状花岗岩较一致的岩浆锆石年龄,表明淡色花岗岩为片麻状花岗岩部分熔融形成。

淡色花岗岩呈脉状侵入夕线石片麻岩和片麻状花岗岩

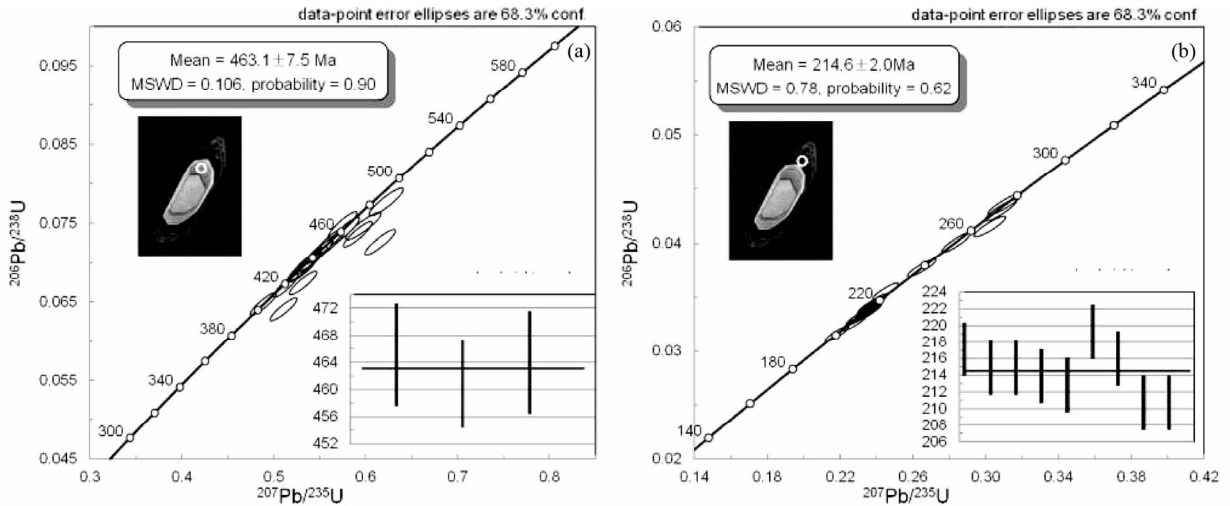


图 10 俄久卖淡色花岗岩 (P7-11) 中的锆石 U-Pb 谐和图及加权平均年龄

Fig. 10 Concordia diagrams and weighted mean ages of zircons from leucogranite (P7-11) in Ejiumai area

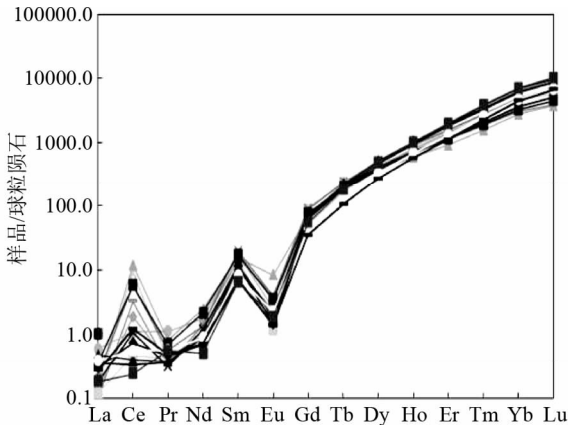


图 11 俄久卖淡色花岗岩 (P7-11) 中的锆石幔部稀土元素配分图 (标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)

不同标记符号代表不同测试点

Fig. 11 Chondrite-normalized REE patterns of zircons mantles from leucogranite (P7-11) in Ejiumai area (normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

中,产状平行片麻理且变形极弱。此外,片麻状花岗岩与淡色花岗岩在哈克图解上具有良好的相关性(图 12),且片麻状花岗岩 Eu 为负异常 ($\delta Eu = 2 \times Eu_N / (Sm_N + Gd_N) = 0.56 \sim 0.97$),淡色花岗岩 Eu 主要表现为不同程度的正异常 ($\delta Eu = 0.94, 1.16, 5.4, 5.94$),这可能与发生深熔作用时,长石溶解再结晶有关(图 6b)。以上几点也都表明淡色花岗岩可能为片麻状花岗岩经脱水熔融产生。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 13a)上片麻状花岗岩和淡色花岗岩均显示为大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 和 Pb 相对富集,而高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P 较亏损,表明淡色花岗岩可能继承了片麻状花岗岩的弧火山岩特征。淡色花岗岩 SiO_2 含量较高(绝大多数高于 73%), Al_2O_3 为 12.51%

$\sim 16.78\%$, $K_2O + Na_2O = 6.91\% \sim 11.13\%$, 稀土元素总量较低 ($\sum REE = 26.17 \times 10^{-6} \sim 140.2 \times 10^{-6}$), 与典型淡色花岗岩一致(郭素淑和李曙光, 2007)。在 Th、Hf 和 Yb 等元素上,不同样品有所变化,可能与邻近夕线石片麻岩有关。Rb-(Y + Nb) 图解则分别指示出了片麻状花岗岩与淡色花岗岩的形成环境(图 13b)。12 个片麻状花岗岩样品有 10 个投在火山弧环境,一个投在与板内环境交界,另一个投在与同碰撞交界位置;4 个淡色花岗岩样品,3 个投在同碰撞环境,一个投在板内岩浆岩环境。对两个 SiO_2 含量较高的夕线石片麻岩样品进行砂岩的 $(K_2O/Na_2O) - SiO_2$ 图解 (Irvine *et al.*, 1971) 判别,结果显示其形成于活动陆缘环境,这与片麻状花岗岩的形成环境相配套。

$476.6 \pm 4.8 Ma$ 与 $463.7 \pm 7.5 Ma$ 在误差范围内一致,应代表同期构造事件,而 $214.6 \pm 2.0 Ma$ 与 $189 \pm 1 Ma$ 可能也是同一构造事件的产物。上述分析表明俄久卖变质杂岩主要受早-中奥陶世和晚三叠世-早侏罗世两期构造事件影响。片麻状花岗岩形成于早-中奥陶世的活动陆缘的火山弧环境,而淡色花岗岩则形成于晚三叠世-早侏罗世的同碰撞环境。

冈瓦纳大陆是在新元古代末至古生代初经过泛非造山运动而联合组成的超级大陆,大量的花岗岩研究及地质填图资料证实班公湖-怒江缝合带以南的基底为泛非基底(潘桂棠等, 1997, 2002, 2004a, b; DeCelles *et al.*, 2000; 解超明等, 2000; 许志琴等, 2005; 宋述光等, 2007; Gawood *et al.*, 2007; 李才等, 2008)。俄久卖片麻状花岗岩中获得了约 472 ~ 463 Ma 的古老年龄,与冈瓦纳大陆泛非运动晚期的年龄接近,是增生杂岩北侧首次发现泛非运动的年龄记录,并且这一年龄可以与印度板块内部及喜马拉雅造山带中发育大量同时代的花岗质岩石相对比 (DeCelles *et al.*, 2000; Gehrels *et al.*, 2003)。Pullen *et al.* (2011) 在冈玛错以南地区识别出早奥陶世花岗岩片麻岩,获得 476 ~ 474 Ma 的锆石 LA-ICP-MS

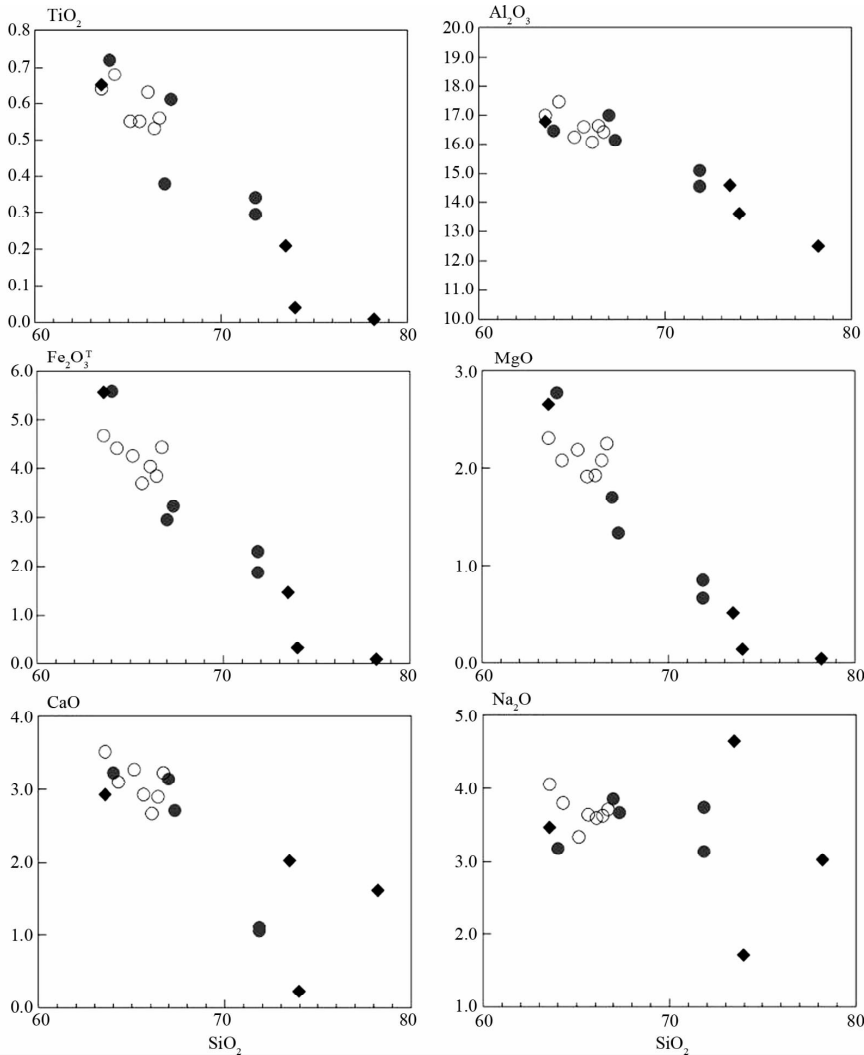


图 12 俄久卖片麻状花岗岩、淡色花岗岩类哈克图解

实心方块为淡色花岗岩, 实心圆为片麻状花岗岩, 空心圆为片麻状花岗岩引自刘通等(2013)

Fig. 12 Harker diagrams of EjiuMai gneissic granite and leucogranite

U-Pb 年龄; Zhao *et al.* (2014) 在冈塘错西识别出早-中奥陶世花岗岩片麻岩 472.6 ± 3.2 Ma 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄; 胡培远等(2010) 在蜈蚣山花岗岩片麻岩的捕获锆石获得 464.5 ± 4.8 Ma 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 均与俄久卖片麻状花岗岩中发现的泛非运动晚期年龄一致。在增生杂岩带南侧(都古尔花岗岩片麻岩)、内部(冈塘错西部、蜈蚣山、戈木日西花岗岩片麻岩)和北缘(俄久卖片麻岩)均有出露, 表明南羌塘块体确实存在泛非晚期运动的记录。而北羌塘块体迄今为止没有发现该时期的年龄记录, 也表明俄久卖变质杂岩更可能来源于南羌塘。

此外, 在果干加年山识别出蛇绿岩堆晶辉长岩具有 461 ± 7 Ma 的锆石 SHRIMP 年龄(王立全等, 2008), 在桃形错识别出蛇绿岩堆晶辉长岩具有 460 ± 8 Ma、 467 ± 4 Ma 的锆石 SHRIMP 年龄(吴彦旺等, 2010; 翟庆国等, 2010), 这些中奥陶世的堆晶辉长岩被认为代表了青藏高原中部地区原-古特

提斯洋扩张过程中早期的岩浆作用事件(王立全等, 2008); 而区内有化石记录的最老地层为中奥陶统的塔石山组(李才, 2008; 董春艳等, 2011), 为一套浅变质的浅海陆缘碎屑沉积和碳酸盐台地沉积。从而羌塘中部在早-中奥陶世, 既有主动大陆边缘的火山弧沉积, 又有被动大陆边缘的浅海相沉积; 既有俯冲形成的火山弧花岗岩, 又有扩张形成的堆晶辉长岩, 可能的解释是当时的南羌塘盆地并非一个统一的块体。

已有资料表明南、北羌塘地块在印支期实现闭合, 时间为晚三叠世诺利期(张开均和唐显春等, 2009; 耿全如等, 2011)。Kapp *et al.* (2000)、翟庆国等(2009)对区内蓝岭蓝片岩的蓝闪石、钠质闪石和多硅白云母进行氩-氩年代学测试, 获得 $221.4 \sim 227.3$ Ma 的变质年龄。而 Zhao *et al.* (2014) 对冈塘错花岗岩的分析表明, 同碰撞环境的中细粒花岗岩形成于 222.6 ± 6.6 Ma, 而碰撞后伸展环境的中粗粒花岗岩则

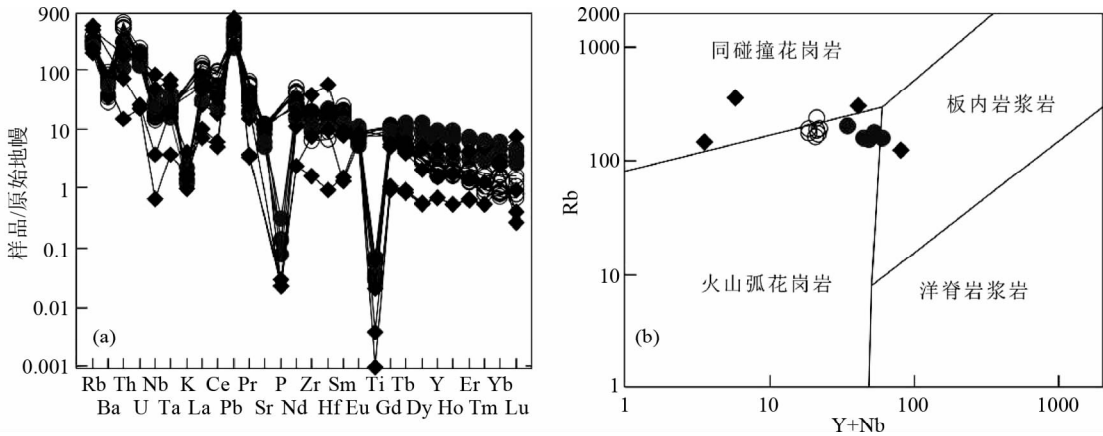


图 13 俄久卖片麻状花岗岩、淡色花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a, 标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)及 Rb-(Y + Nb)图解(b, 据 Forster *et al.*, 1997)

实心方块为淡色花岗岩, 实心圆为片麻状花岗岩, 空心圆为片麻状花岗岩引自刘通等(2013)

Fig. 13 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalizing values after Sun and McDonough, 1989) and Rb-(Y + Nb) diagram (b, after Forster *et al.*, 1997) for EjiuMai gneissic granite and leucogranite

形成与 $214.4 \pm 4\text{Ma}$ 。表明龙木错-双湖洋于 220Ma 左右完成俯冲, 进入碰撞时期(董永胜等, 2010)。本文在淡色花岗岩获得的 $214.6 \pm 2\text{Ma}$ 锆石 U-Pb 年龄与同碰撞地球化学特征, 与冈塘花岗岩基本一致, 应为同期产物, 是冈瓦纳大陆与欧亚大陆碰撞事件的物质记录。Yin and Harrison(2000)、Kapp *et al.* (2000) 指出羌塘中部晚三叠世-早侏罗世在碰撞背景下同时存在逆冲作用和拆离作用, 两种断层相互切割, 本文于淡色花岗岩中获得的 $214.6 \pm 2\text{Ma}$ 、 $189 \pm 1\text{Ma}$ 的年龄应是该期构造事件的年龄记录, 该期运动也导致变质杂岩和淡色花岗岩普遍糜棱岩化。

8 结论

(1) 俄久卖地区片麻状花岗岩主要结晶于 $463 \sim 476\text{Ma}$ 期间, 它是泛非运动晚期南羌塘地区中酸性岩浆作用的产物, 地球化学显示形成于火山弧环境。

(2) 早古生代花岗岩在印支运动期间又经历深埋作用, 发生部分熔融作用, 形成晚三叠世-早侏罗世($214.6 \pm 2.0\text{Ma}$ ~ $189 \pm 1\text{Ma}$) 淡色花岗岩。

(3) 俄久卖变质岩作为迄今为止唯一一处出露于增生杂岩带北缘的高级变质岩, 获得的片麻状花岗岩 $463 \sim 476\text{Ma}$ 的年龄, 进一步证明了泛非运动影响范围的北界至少可以延伸到南羌塘北部。

致谢 感谢韩芳林教授级高工、杨运军高工野外的指导和帮助。野外调查和采样过程中得到冈玛日项目组的大力帮助, 赵中宝和牛文超在变质杂岩成因方面给予很好的建议; 魏华夏和王泉在野外生活上诸多照顾; 中国地质大学(北京) 科学院苏犁老师、张红雨老师, 中国地质科学院 SHRIMP 实

验室董春燕老师、马铭株同学, 河北省区域地质矿产调查研究所实验室等在实验测试方面给予很大帮助; 二位审稿老师为文章提出许多宝贵的意见; 在此一并表示诚挚的感谢。

References

Chen YL, Luo ZH, Zhao JX, Li ZH, Zhang HF and Song B. 2004. The zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical of Mianning complex in Sichuan and its origin. *Science in China (Series D)*, 34(8): 687 - 697 (in Chinese)

Compston W, Williams IS and Kirschnik JL. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *Journal of the Geological society, London*, 149: 171 - 184

DeCelles PG, Gehrels GE, Quade J, LaReau B and Spurlin M. 2000. Tectonic implications of U-Pb zircon ages of the Himalayan Orogenic Belt in Nepal. *Science*, 288: 497 - 499

Dong CY, Li C, Wan YS, Wu YW, Xie HQ and Liu DY. 2011. Detrital zircon age model of Ordovician Wenquan quartzite south of Lungmuco-Shuanghu Suture in the Qiangtang area, Tibet: Constraint on tectonic affinity and source regions. *Scientia Sinica (Terrae)*, 41(3): 299 - 308 (in Chinese)

Dong YS, Li C, Shi JR, Zhang XZ and Wang SY. 2010. Forming process of the high pressure metamorphic belt in central Qiangtang, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2099 - 2105 (in Chinese with English abstract)

Forster HJ, Tischendorf G and Trumbull RB. 1997. An evaluation of the Rb vs. (Y + Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40: 261 - 293

Gawood PA, Johnson MRW and Nemchin AA. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 70 - 84

Gehrels GE, DeCelles PG, Martin A, Ojha G and Pinhasi BN. 2003. Initiation of the Himalayan Orogen as an Early Paleozoic thin-skinned thrust belt. *Gas Today*, 13(9): 4 - 9

Gehrels GE, Kapp P, DeCelles P, Pullen A, Blakey R, Weislogel A, Ding L, Guynn J, Martin A, McQuarrie N and Yin A. 2011. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogeny. *Tectonics*, 30(5), TC5016, doi: 10.

1029/2011TC002868

- Geng QR, Pan GT, Wang LQ, Peng HM and Zhang Z. 2011. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co-Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet. *Geological Bulletin of China*, 30(8): 1261 – 1274 (in Chinese with English abstract)
- Guo SS and Li SG. 2007. Petrological and geochemical constraints on the origin of leucogranites. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 2902298 (in Chinese with English abstract)
- He SP, Li RS, Wang C, Gu PY, Yu PS, Shi C and Zha XF. 2013. Research on the formation age of Ningduo rock group in Changdu Block: Evidence for the existence of basement in the North Qiangtang. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 015 – 024 (in Chinese with English abstract)
- Hu PY, Li C, Su L, Li CB and Yu H. 2010. Zircon U-Pb dating of granitic gneiss in Wugong Mountain area, central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau: Age records of Pan-African Movement and Indo-China Movement. *Geology in China*, 37(4): 1050 – 1061 (in Chinese with English abstract)
- Huang JJ. 2001. Structural characteristics of the basement of the Qiangtang Basin. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 333 – 337 (in Chinese with English abstract)
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523 – 548
- Kapp P, Yin A, Craig E, Murphy M, Harrison TM, Spurlin M, Ding L, Deng XG and Wu CM. 2000. Manning blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet. *Geology*, 28(1): 19 – 22
- Kapp P, Yin A, Craig E, Harrison TM, Taylor MH and Ding L. 2003. Tectonic evolution of the Early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet. *Tectonics*, 22(4): 17(1 – 22)
- Lei WY, Shi GH and Liu YX. 2013. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 273 – 284 (in Chinese with English abstract)
- Li C. 1987. The Longmuco-Shuanghu-Lancangjiang plate suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies Permo-Carboniferous System in northern Xizang, China. *Journal of Changchun College of Geology*, 17(2): 156 – 162 (in Chinese with English abstract)
- Li C. 1997. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the crossite in blueschist from central Qiangtang and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 42: 448 (in Chinese)
- Li C. 2008. A review on 20 years' study of the Longmu Co-Shuanghu-Lancang River suture zone in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Geological Review*, 54(1): 105 – 119 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Dong YS, Zhai QG, Wang LQ, Yan QR, Wu YW and He TT. 2008. Discovery of Early Paleozoic ophiolite in the Qiangtang of Tibet Plateau: Evidence from SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 31 – 36 (in Chinese with English abstract)
- Liang X, Wang GH, Yuan GL and Liu Y. 2012. Structural sequence and geochronology of the Qomo Ri accretionary complex, Central Qiangtang, Tibet: Implications for the Late Triassic subduction of the Paleo-Tethys Ocean. *Gondwana Research*, 22(2): 470 – 481
- Liu T, Zhai QG, Wang J, Su L, Kang Z and Suolang CL. 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of high-grade metamorphic rocks from the Qiangtang Basin, northern Tibet, and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 32(11): 1691 – 1703 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y and Lü YZ. 2011. Pseudosection modeling of garnet blueschist from Rongma Area, central Qiangtang, North Tibet: Implications to the tectonic evolution of central Qiangtang. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 100 – 115 (in Chinese with English abstract)
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37: 215 – 224
- Nesbitt HW and Young GM. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutite. *Nature*, 299: 715 – 717
- Pan GT, Chen ZL and Li XZ. 1997. Revolution of East-Tethys Geology Tectonics. Beijing: Geological Publishing House, 121 – 128 (in Chinese)
- Pan GT, Li XZ, Wang LQ, Ding J and Chen ZL. 2002. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 701 – 707 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Wang LQ and Zhu DC. 2004a. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23(1): 12 – 19 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Zhu DC, Wang LQ, Liao ZL, Geng QR and Jiang XS. 2004b. Bangong Lake-Nu River suture zone-the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 371 – 382 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Wang LQ, Li RS, Yin FG and Zhu DC. 2012. Tectonic model of archipelagic arc-basin systems: The key to the continental geology. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(3): 5 – 16 (in Chinese with English abstract)
- Peng ZM, Geng QR, Zhang Z, Jia BJ and Diao ZZ. 2011. SHRIMP zircon U-Pb ages and their geological implications for the metamorphic rocks in the Qiangtang Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31(4): 97 – 103 (in Chinese with English abstract)
- Pullen A, Kapp P, Gehrels GE, Vervoort JD and Ding L. 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Geology*, 36(5): 351 – 354
- Pullen A, Kapp P, Gehrels GE, Ding L and Zhang QH. 2011. Metamorphic rocks in central Tibet: Lateral variation and implications for crustal structure. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3 – 4): 585 – 600
- Pullen A and Kapp P. 2014. Mesozoic tectonic history and lithospheric structure of the Qiangtang terrane: Insights from the Qiangtang metamorphic belt, central Tibet. *Geological Society of America Special Papers*, doi: 10.1130
- Song B, Zhang YH, Wang YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Song SG, Ji JQ, Wei CJ, Su L, Zheng YD, Song B and Zhang LF. 2007. Determination of Early Paleozoic gneissic granites in the Nu River area, northwestern Yunnan and its tectonic significances. *Chinese Science Bulletin*, 52(8): 927 – 930 (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 42(1): 313 – 345
- Tan FW, Chen M, Wang J, Fu XG, Wang JJ and Du BW. 2008. Discovery of middle- and high-grade metamorphic rocks in the central Qiangtang basin, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 27(3): 351 – 355 (in Chinese with English abstract)
- Tan FW, Wang J, Fu XG, Chen M and Du BW. 2009. U-Pb zircon SHRIMP of metamorphic rocks from the basement age of the Qiangtang basin, northern Tibet, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 139 – 146 (in Chinese with English abstract)
- Wang CS, Hu CZ, Wu RZ and Zhang MG. 1987. Significance of the discovery of Chasang-Chabu rift in northern Xizang (Tibet). *Journal of Chengdu college of Geology*, 14(2): 33 – 46 (in Chinese with English abstract)
- Wang GH, Han FL, Yang YJ, Li YQ and Cui JL. 2009. Discovery and geological significance of Late Paleozoic accretionary complexes in central Qiangtang, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1181 – 1187 (in Chinese with English abstract)
- Wang GZ and Wang CS. 2001. The disintegrate and dating of the basement metamorphic rocks in Qiangtang Tibet. *Science in China (Series D)*, 31(Suppl.): 77 – 82 (in Chinese)

- Wang LQ, Pan GT, Li C, Dong YS, Zhu DC, Yuan SH and Zhu TX. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of Early Paleozoic cumulate in Guoganjianian Mt. from central Qiangtang area of northern Tibet: Considering the evolvement of Proto- and Paleo-Tethys. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2045–2056 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese)
- Wu YW, Li C, Xie CM, Wang M and Hu PY. 2010. Petrology and geochronology of Guoganjianianshan Permian ophiolite in central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1773–1780 (in Chinese with English abstract)
- Xie CM, Li C, Su L, Wu YW, Wang M and Yu H. 2010. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircon from granite-gneiss in the Amdo area, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1737–1744 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Liang FH, Qi XX, Liu FL, Zeng LS, Liu DY, Li HB, Wu CL, Shi RD and Chen SY. 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Yang Y, Zhao ZB, Yuan TY, Liu Y and Li CY. 2014. Ordovician parallel unconformity in Qiangtang terrane, northern Tibet: Implications to Early Paleozoic evolution of northern Tibetan regions. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2381–2392 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *J. Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211–280
- Zhai QG, Li C, Wang J, Chen W and Zhang Y. 2009. Petrology, mineralogy and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology for Rongma blueschist from central Qiangtang, northern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2281–2288 (in Chinese with English abstract)
- Zhai QG, Wang J, Li C and Su L. 2010. SHRIMP U-Pb dating and Hf isotopic analyses of Middle Ordovician meta-cumulate gabbro in central Qiangtang, northern Tibetan Plateau. *Scientia Sinica (Terrae)*, 40(5): 565–573 (in Chinese)
- Zhang KJ. 2001. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet. *Comment Geology*, 29: 90
- Zhang KJ and Tang XC. 2009. Eclogites in the interior of the Tibetan Plateau and their geodynamic implications. *Chinese Science Bulletin*, 54: 2556–2567
- Zhao ZB, Bons PD, Wang GH, Liu Y and Zheng YL. 2014. Origin and pre-Cenozoic evolution of the South Qiangtang basement, Central Tibet. *Tectonophysics*, 623: 52–66
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Dilek Y, Hou ZQ and Mo XX. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429–1454
- 郭素淑, 李曙光. 2007. 淡色花岗岩的岩石学和地球化学特征及其成因. *地学前缘*, 14(6): 290–298
- 何世平, 李荣社, 王超, 辜平阳, 于浦生, 时超, 查显锋. 2013. 昌都地块宁多岩群形成时代研究: 北美塘基底存在的证据. *地学前缘*, 20(5): 015–024
- 胡培远, 李才, 苏犁, 李春斌, 于红. 2010. 青藏高原羌塘中部蜈蚣山花岗岩片麻岩锆石 U-Pb 定年——泛非与印支事件的年代学记录. *中国地质*, 37(4): 1050–1061
- 黄继均. 2001. 羌塘盆地基底构造特征. *地质学报*, 75(3): 333–337
- 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展. *地学前缘*, 20(4): 273–284
- 李才. 1987. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界. *长春地质学院学报*, 17(2): 156–162
- 李才. 1997. 西藏羌塘中部蓝片岩青铝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义. *科学通报*, 42(4): 488
- 李才. 2008. 青藏高原龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带研究二十年. *地质论评*, 54(1): 105–119
- 李才, 董永胜, 翟庆国, 王立全, 阎全人, 吴彦旺, 何彤彤. 2008. 青藏高原羌塘早古生代蛇绿岩-堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 24(01): 31–36
- 刘通, 翟庆国, 王军, 苏犁, 康珍, 索朗次列. 2013. 藏北羌塘盆地基底高级变质岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 32(11): 1691–1703
- 刘焰, 吕永增. 2011. 西藏羌塘中部绒马地区石榴蓝闪片岩变质演化过程的视剖面模拟及其意义. *地学前缘*, 18(2): 100–115
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社, 121–128
- 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 丁俊, 陈智梁. 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分. *地质通报*, 21(11): 701–707
- 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 2004a. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考. *地质通报*, 23(1): 12–19
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 廖忠礼, 耿全如, 江新胜. 2004b. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据. *地学前缘*, 11(4): 371–382
- 潘桂棠, 王立全, 李荣社, 尹福光, 朱弟成. 2012. 多岛弧盆系构造模式: 认识大陆地质的关键. *沉积与特提斯地质*, 32(3): 5–16
- 彭智敏, 耿全如, 张璋, 贾宝江, 刁志忠. 2011. 羌塘盆地变质锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *沉积与特提斯地质*, 31(4): 97–103
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增): 26–30
- 宋述光, 季建清, 魏春景, 苏犁, 郑亚东, 宋彪, 张立飞. 2007. 滇西北怒江早古生代片麻状花岗岩的确定及其构造意义. *科学通报*, 52(8): 927–930
- 谭富文, 陈明, 王剑, 付修根, 王进军, 杜佰伟. 2008. 西藏羌塘盆地中部发现中高级变质岩. *地质通报*, 27(3): 351–355
- 谭富文, 王剑, 付修根, 陈明, 杜佰伟. 2009. 藏北羌塘盆地基底变质岩的锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 25(1): 139–146

附中文参考文献

- 陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 李志红, 张宏飞, 宋彪. 2004. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因. *中国科学(D辑)*, 34(8): 687–697
- 董春艳, 李才, 万渝生, 王伟, 吴彦旺, 颜炳强, 刘敦一. 2011. 西藏羌塘龙木错-双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄分布模式: 构造归属及物源区制约. *中国科学(地球科学)*, 41(3): 299–308
- 董永胜, 李才, 施建荣, 张修政, 王生云. 2010. 羌塘中部高压变质带的形成过程. *岩石学报*, 26(7): 2099–2105
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 彭智敏, 张璋. 2011. 班公湖-怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景. *地质通报*, 30(8): 1261–1274

- 王成善, 胡承祖, 吴瑞忠, 张懋功. 1987. 西藏北部查桑-茶布裂谷的发现及其地质意义. 成都地质学院学报, 14(2): 33-46
- 王根厚, 韩芳林, 杨运军, 李元庆, 崔江利. 2009. 藏北羌塘中部晚古生代增生杂岩的发现及其地质意义. 地质通报, 28(9): 1181-1187
- 王国芝, 王成善. 2001. 西藏羌塘基底变质岩系的解体 and 时代厘定. 中国科学(D辑), 31(增刊): 77-82
- 王立全, 潘桂棠, 李才, 董永胜, 朱弟成, 袁四化, 朱同兴. 2008. 藏北羌塘中部果干加年山早古生代堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——兼论原-古特提斯洋的演化. 地质通报, 27(12): 2045-2056
- 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. 科学通报, 49(16): 1589-1604
- 吴彦旺, 李才, 解超明, 王明, 胡培远. 2010. 青藏高原羌塘中部果干加年山二叠纪蛇绿岩岩石学和同位素定年. 地质通报, 29(12): 1773-1780
- 解超明, 李才, 苏犁等. 2000. 藏北安多地区花岗片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年. 地质通报, 29(12): 1737-1744
- 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 戚学祥, 刘福来, 曾令森, 刘墩一, 李海兵, 吴才来, 史仁灯, 陈松永. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录. 岩石学报, 21(1): 1-12
- 杨耀, 赵中宝, 苑婷媛, 刘焰, 李聪颖. 2014. 藏北羌塘奥陶纪平行不整合面的厘定及其构造意义. 岩石学报, 30(8): 2382-2392
- 翟庆国, 李才, 王军, 陈文, 张彦. 2009. 藏北羌塘中部绒玛地区蓝片岩岩石学、矿物学和⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学. 岩石学报, 25(9): 2281-2288
- 翟庆国, 王军, 李才, 苏犁. 2010. 青藏高原羌塘中部中奥陶世变质堆晶辉长岩锆石 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素特征. 中国科学(地球科学), 40(5): 565-573
- 张开均, 唐显春. 2009. 青藏高原腹地榴辉岩研究进展及其地球动力学意义. 科学通报, 54: 1804-1814