

西昆仑甜水海地体早寒武世花岗岩浆 作用及其构造意义

朱杰¹, 李秋根¹, 王宗起², 汤好书³, 陈旭⁴, 肖兵¹

(1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国地质科学院矿床研究所, 北京 100037; 3. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 4. 宾夕法尼亚州立大学能源与矿物工程系, 宾夕法尼亚大学城 美国 16802)

摘要: 瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体出露于西昆仑造山带的甜水海地体中。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年表明, 阿依里西岩体的花岗质斑岩的侵位年龄为 (530 ± 6) Ma, 瓦仍孜拉甫岩体的黑云母二长花岗质片麻岩的侵位年龄为 (515 ± 2) Ma, 都形成于早寒武世。岩石地球化学特征表明, 阿依里西岩体中花岗质斑岩的 SiO_2 含量为 67.7%~69.4%, 具有较高的 $\text{Mg}^\#$ 值(44~46), A/CNK 值为 0.81~0.93; K_2O 含量为 2.15%~3.02%, 呈钙碱性至高钾钙碱性特征; 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-3.3 \sim -0.8$; 以轻重稀土分异较为明显, 富集 Cs、Rb、K、Th、Zr、Hf、Y 等元素, 而亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 等元素为特点, 是由幔源岩浆与壳源岩浆发生混合作用而成。瓦仍孜拉甫岩体黑云母二长花岗质片麻岩的 SiO_2 含量高其变化范围为 75.0%~76.3%, $\text{Mg}^\#$ 值比较低, 为 18~26; A/CNK 值为 1.01~1.30, K_2O 含量为 4.31~4.98, 表现为高钾钙碱性、过铝质特征, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+2.5 \sim +4.3$; 属于高分异 I 型花岗岩, 源于高钾钙碱性的安山岩和玄武质安山岩的部分熔融。根据这些地球化学特征, 结合西昆仑不同地质单元中早古生代花岗岩体的分布特征、地质年代学和岩石成因特征, 研究认为这 2 个花岗质岩体形成于岛弧环境, 其为进一步深入研究西昆仑造山带早古生代的构造演化过程提供了新的地质资料。

关键词: 西昆仑; 甜水海地体; 早寒武世; 花岗质岩体; 锆石 U-Pb 年龄

中图分类号: P595, P588

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2016)04-0001-18

Magmatism and Tectonic Implications of Early Cambrian Granitoid Plutons in Tianshuihai Terrane of the Western Kunlun Orogenic Belt, Northwest China

ZHU Jie¹, LI Qiugen¹, WANG Zongqi², TANG Haoshu³, CHEN Xu⁴, XIAO Bing¹

(1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550008, China; 4. Department of Energy and Mineral Engineering, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802, US)

Abstract: The Ayilixi and Warengzilafu plutons are located in the Tianshuihai terrane of the

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-08-22

基金项目: 中国地质调查局环塔里木前寒武纪成矿作用及大型找矿靶区优选研究项目(1212011140056)

作者简介: 朱杰(1991-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 北京大学。E-mail: zhujie1227@163.com

Western Kunlun Orogenic Belt (WKOB). Detailed LA-ICP-MS zircon U-Pb dating has yielded the crystallization ages of ca. (530 ± 6) Ma and ca. (515 ± 2) Ma for the Ayilixi pluton and Warengzilafu pluton, respectively, signifying their formation in Cambrian. The Ayilixi rocks are high-K calc-alkaline to shoshonitic granite porphyries, with a limited range of SiO₂ (67.7% ~ 69.4%), high Mg# (44~46), A/CNK ratios (0.81~0.93) and K₂O (2.15%~3.02%). They are also marked by negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -3.3 to -0.8, obviously fractionated between light and heavy rare earth element, enrichments in Cs, Rb, K, Th, Zr, Hf, Y, and depletions in Ba, Nb, Ta, Sr, P, T. They are considered to have been most likely derived from magma mixing processes by mantle-derived magma and crustal magmatic melt. The Warengzilafu biotite monzonitic granite gneisses are high-K calc-alkaline and peraluminous. Compared to the rocks of the Ayilixi pluton, they generally have higher SiO₂ (75.0%~76.3%), lower Mg# (18~26), with higher A/CNK ratios (1.01~1.30) and positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of +2.5 to +4.3. Elemental and isotopic data suggest that the Warengzilafu rocks are highly fractionated I-type granites, which were mainly generated by partial melting of high-K calc-alkaline andesite and basaltic andesite. The two plutons represent the early Cambrian magmatism under island-arc setting in Tianshuihai terrane, which are related to the subduction of Proto-Tethys.

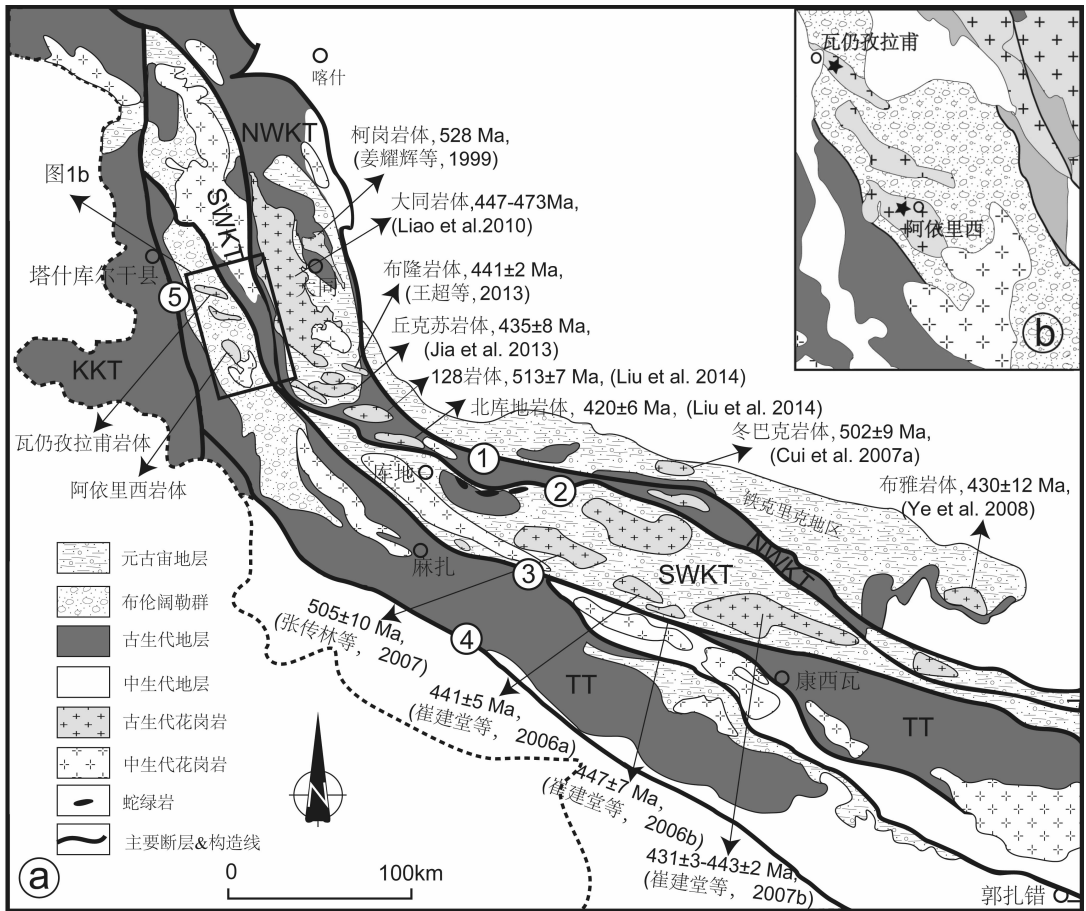
Keywords: Western Kunlun; Tianshuihai terrane; Early Cambrian; granitoid plutons; zircon U-Pb dating

西昆仑造山带是中央造山带(秦岭-祁连-昆仑造山带)的重要组成部分,处于连接古亚洲构造域和特提斯构造域的关键构造位置(姜春发等, 2000)。该造山带岩浆活动强烈,花岗岩分布广且多期次,是昆仑山山脉花岗岩密集区之一(图1);时代主要集中在早古生代—中生代,并与原特提斯洋和古特提斯洋的演化密切相关(JIA et al., 2013; LIAO et al., 2010; LIU et al., 2014; YE et al., 2008; 崔建堂等, 2006a, 2006b, 2007a, 2007b; 姜耀辉等, 1999; 康磊等, 2015a; 王超等, 2013; 张传林等, 2007; 郑玉壮等, 2013)。近年来,有关西昆仑中生代花岗岩的成因及其与古特提斯洋演化关系的研究取得了长足进展,并趋于达成共识,其为研究西昆仑造山带构造岩浆演化提供了大量重要的信息(陈海云等, 2014; 康磊等, 2012a, 2012b, 2015b; 张传林等, 2005)。但是,在原特提斯洋演化及其相关花岗质岩浆成因的研究尚未达成一致。现有的地质资料和地质年代学数据显示,古生代花岗质岩体大多出露于西昆仑的南、北地体,并集中分布于库地断裂带的两侧(图1)。长期以来,对古生代花岗质岩石的研究主要沿着新藏公路的128和库地等地开展来探讨西昆仑的早古生代构造演化过程,其他地区,特别是甜水海地体区域,研究程度还相当薄弱。目前,

鲜有古生代岩浆作用的报道(林尚康等, 2015),更谈不上年代学、岩浆起源和成因机制等方面工作的开展,导致人们对西昆仑造山带古生代构造演化的解释依然存在分歧。一些学者认为原特提斯洋向南俯冲消减,并引起西昆仑南、北地体之间的碰撞(JIA et al., 2013; LIAO et al., 2010; LIU et al., 2014; MATTE et al., 1996; MATTERN et al., 2000; PAN, 1996; YE et al., 2008);也有一些学者持相反的观点,认为原特提斯洋是向北消减的(邓万明, 1995; LI et al., 2007; WANG et al., 2004);还有一种观点,认为原特提斯洋在早奥陶世前向南俯冲,随后俯冲极性发生转变,转为向北俯冲(XIAO et al., 2002, 2005)。由此引出原特提斯洋的俯冲极性及其最终缝合时限等诸多讨论。此外,布伦阔勒岩群作为甜水海地体的地层主体,也是西昆仑最主要的赋铁地层,其时代问题也限制了人们对该区区域构造演化和成矿等的认识(李红中等, 2015; 林尚康等, 2015; 高晓峰等, 2013; 杨文强等, 2011; 曲军峰等, 2007)。因此,笔者拟通过对西昆仑甜水海地体中侵入到布伦阔勒岩群的2个花岗质侵入体进行U-Pb年龄、岩石地球化学和Hf同位素的系统研究,获得古生代侵入年龄,并结合西昆仑造山带不同构造单元的古生代花岗质岩浆作用

和区域变质作用的研究成果,从岩石学和地球化学入手,来探讨其岩浆起源和岩石成因等问题,为进一

步研究西昆仑造山带古生代的构造属性及演化过程等提供新的依据。



NWKT. 西昆仑北地体; SWKT. 西昆仑南地体; TT. 甜水海地体; KKT. 喀喇昆仑地体; 1. 奥依塔格-柯岗断裂带; 2. 库地断裂带; 3. 麻扎-康西瓦断裂带; 4. 龙木错-双湖断裂带; 5. 喀喇昆仑断裂带

图 1 西昆仑造山带和研究区地质简图(据李荣社等, 2008)

fig.1 Schematic tectonic map of Western Kunlun Orogenic Belt and the geological map of the study area

1 区域地质背景及岩石学特征

西昆仑造山带位于塔里木克拉通西南缘和青藏高原的西北缘(图 1a),长约 1 000 km,是一个典型的长期复杂演化的复合造山带,其自北向南以奥依塔格-柯岗断裂带、库地断裂带、麻扎-康西瓦断裂带、龙木错-双湖断裂带和喀喇昆仑断裂带为边界划分为西昆仑北地体、西昆仑南地体和甜水海地体等 3 个构造单元(MATTERN et al., 1996; MATTERN et al., 2000; PAN, 1996; XIAO et al., 2002; 李荣社等, 2008; 张传林等, 2007)。造山带内地层多样,从元古宙地层到第四纪地层均有出露,

其中前寒武纪地层出露比较齐全,构成了西昆仑地区的结晶基底。该造山带发育大量不同时代、不同类型的岩浆岩,较好地保存了多期发展演化阶段的地质记录。

研究区位于麻扎-康西瓦断裂带以南的甜水海地体(图 1),该地体一度被认为是古特提斯洋盆俯冲而形成的巨型增生楔(MATTERN et al., 1996; MATTERN et al., 2000; WANG, 2004; XIAO et al., 2002, 2005)。布伦阔勒岩群作为甜水海地体基底岩系属西昆仑西段前人划分的最主要前寒武纪的地层单元,前人报道的高压麻粒岩也是出露于该地层单元中(边小卫等, 2015; 曲军峰, 2007; 王建平, 2008; 杨文强等, 2011)。但是,最近几年的

同位素测年结果显示布伦阔勒岩群的组成可能比较复杂,既有早古生代组分又有中生代组分(林尚康等, 2015; 燕长海等, 2012; 杨文强等, 2011; 曲军峰, 2007)。该岩群为一套富含石榴子石、矽线石的变质岩系; 主要岩性为黑云石英片岩、黑云斜长片麻岩和黑云斜长片岩、黑云石英片岩夹石英岩、大理岩等(杨文强等, 2011); 其变质较深, 且变质程度不均匀, 内部局部可见较大规模构造混杂岩带, 说明其中混入不同时期的地层块体(王建平, 2008)。根据岩性组合特征, 岩群包括 4 个岩石地层单元: ① 磁铁石英岩单元。② 斜长角闪片麻岩单元。③ 矽线石榴子片岩-石英岩单元。④ 大理岩单元。

本次研究的花岗质岩石出露于甜水海地体, 位于布伦阔勒岩群中, 都大致呈北西方向展布。其中一岩体为塔阿西附近的瓦仍孜拉甫岩体, 另一岩体为赞坎铁矿附近的阿依里西岩体, 采样位置见图 1b。瓦仍孜拉甫岩体出露面积为 30 km², 野外特征表明, 暗色包体不发育(图 2a)。该岩体以出露黑云母二长花岗质片麻岩为主, 主要由石英、钾长石、斜

长石、黑云母和白云母等组成, 呈中-粗粒似斑状结构, 片麻状构造。斜长石发育聚片双晶, 部分蚀变为绢云母; 黑云母一般呈定向排列, 构成片麻理(图 2b), 表明遭受了后期变质变形作用的改造; 白云母呈细粒, 充填于石英、长石和黑云母晶体之间; 副矿物以磷灰石、锆石和磁铁矿为主。阿依里西岩体位于瓦仍孜拉甫岩体以南 12 km 的赞坎铁矿区域, 出露面积约 60 km²(图 1b、图 2c), 被志留系温泉沟组所覆盖, 并被燕山晚期岩体侵入。其岩性以花岗质斑岩为主, 并发育闪长质片麻岩、石英闪长片麻岩和正长花岗岩等。花岗质斑岩呈片麻构造, 斑状结构(图 2d)。斑晶主要为石英、斜长石、钾长石, 粒度为 1~5 mm, 含量大约为 40%, 并含少量暗色镁铁质矿物黑云母斑晶。其中, 斜长石斑晶含量约占 40%~50%, 板条状, 粒度为 1.5~3.5 mm, 常发生绢云母化; 其次为石英, 多为粒状, 占 40%, 粒度一般为 2~4 mm, 偶见石英巨晶, 粒度可达 5~6 mm; 钾长石斑晶约占 10%。在样品中常常能够观察到长石、石英、黑云母斑晶聚集现象, 为典型的次火山

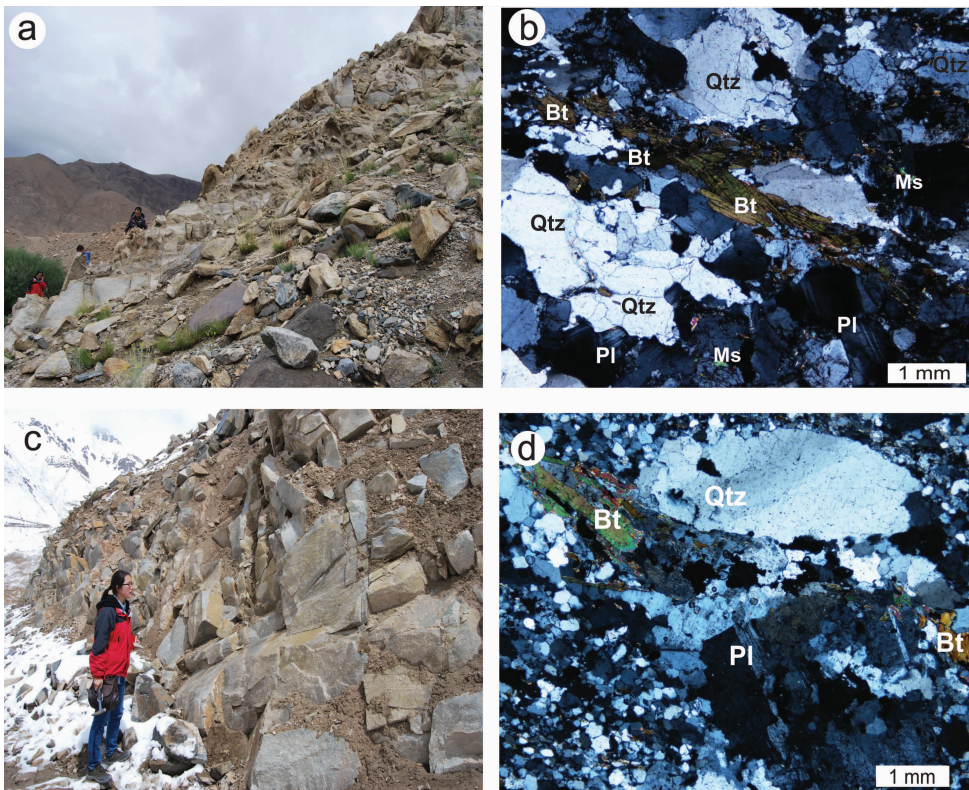


图 2 花岗质岩体野外照片和薄片显微照片

Fig. 2 Photographs and photomicrographs of granitoids in the study area

岩特点。基质为显微花岗结构,主要由钾长石、石英、斜长石以及少量黑云母组成;岩石的副矿物主要有金属矿物、锆石、磷灰石、榍石等。

2 分析方法

笔者分别在瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体中采集样品3件,样品新鲜,无风化。主、微量和稀土元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。其中,主量元素分析方法如下:准确称取0.4 g岩石样品粉末与4.0 g偏硼酸锂和四硼酸锂混合熔剂,混合均匀后在高频熔样机熔成玻璃片,然后使用瑞士Thermo电子公司生产的ARL Advant'XP+型波长散射扫描X射线荧光光谱仪(XRF)测定。微量和稀土元素分析方法:准确称取已烘干样品 0.0250 ± 0.0003 g于Teflon溶样罐中,加入1.5 mL HNO_3 和1.5 mL HF赶走硅,反应后,蒸干,再将1.5 mL HF、1.5 mL HNO_3 和一定量的 HClO_4 放入配套的不锈钢熔样罐中,在175 °C恒温条件下消解72 h以上,取出蒸成湿盐状加入 HNO_3 赶HF,然后用1% HNO_3 提取定溶,使用Agilent 7500ce ICP-MS测试。主量和微量元素测试数据的相对误差分别优于3%和5%。

锆石的反射光和透射光图像在北京大学地空学院显微照相室完成,锆石CL图像在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室热场发射扫描电镜上完成。锆石U-Pb定年和原位Lu-Hf同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。锆石微量元素含量和U-Pb同位素定年利用LA-ICP-MS同时分析完成,激光剥蚀系统为GeoLas 2005, ICP-MS为Agilent 7500 a。实验所采用的激光束斑直径为32 μm ,每个时间分辨分析数据包括大约20~30 s的空白信号和50 s的样品信号。U-Pb同位素定年采用锆石标准91500作外标进行同位素分馏校正,而锆石微量元素含量利用多个USGS参考玻璃(BCR-2G, BIR-1G)作为多外标、Si作内标的方法进行定量计算,实验过程中每分析5个样品点,分析2次91500。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Th-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMS-DataCal(LIU et al., 2010)完成。锆石样品的U-Pb

年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用Iso-plot/Ex-ver3(Ludwig, 2003)完成。锆石进行U-Pb同位素定年后,再在原位利用Neptune(Thermo Fisher Scientific,德国)多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)和Geolas 2005(Lambda Physik,德国)ArF激光剥蚀系统完成锆石Lu-Hf同位素分析。测试过程中,所采用的激光束斑直径为44 μm ,激光束脉冲能量为 $5.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。每个分析数据包括大约20 s的背景信号和50 s的剥蚀信号。详细的分析方法与LIU et al., (2010)和HU et al. (2012)相同。

3 分析结果

3.1 全岩地球化学特征

瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体的全岩分析数据见表1。在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 岩石地球化学分类图中,瓦仍孜拉甫岩体黑云母二长花岗岩片麻岩和阿依里西岩体花岗质斑岩分别落于花岗岩和石英二长岩的区域(图3)。从表1中可见,瓦仍孜拉甫岩体的黑云母二长花岗岩片麻岩具有较高的 SiO_2 (75.0%~76.3%) 和 Na_2O (2.93%~3.24%)以及高的 K_2O (4.31%~4.98%)含量;而阿依里西岩体的花岗质斑岩具有较低的 SiO_2 (67.7%~69.4%) 和 Na_2O (6.01%~6.49%),以及低的 K_2O (2.15%~3.02%)含量。在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解中(图4a),瓦仍孜拉甫岩体黑云母二长花岗片麻岩样品落于高钾钙碱性区域,阿依里西岩体的3个花岗质斑岩样品则投影到钙碱性向高钾钙碱性过渡区域。同样,其对应的 $\text{Mg}^\#$ 值也存在差别(表1),前者值较低,为18~26,位于地壳物质熔融产生的熔体区域(图4b);后者值较高,为44~46,位于地壳物质熔融产生熔体区域的上部(图4b)。另外,两岩体具有相似的 Al_2O_3 含量范围(表1),但瓦仍孜拉甫岩体样品的A/CNK值为1.01~1.30,在A/CNK-A/NK图中(图4c),样品主要落入过铝质区域;阿依里西岩体样品的A/CNK值为0.81~0.93,在A/NK vs. A/CNK图中属于准铝质的范围(图4c)。在 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解中(图4d),瓦仍孜拉甫岩体的黑云母二长花岗片麻岩表现出分异花岗岩的特点。

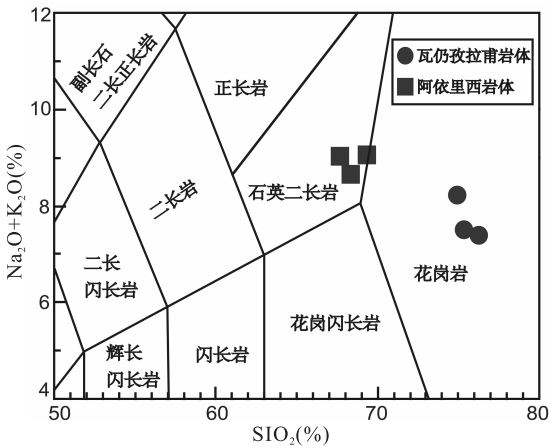


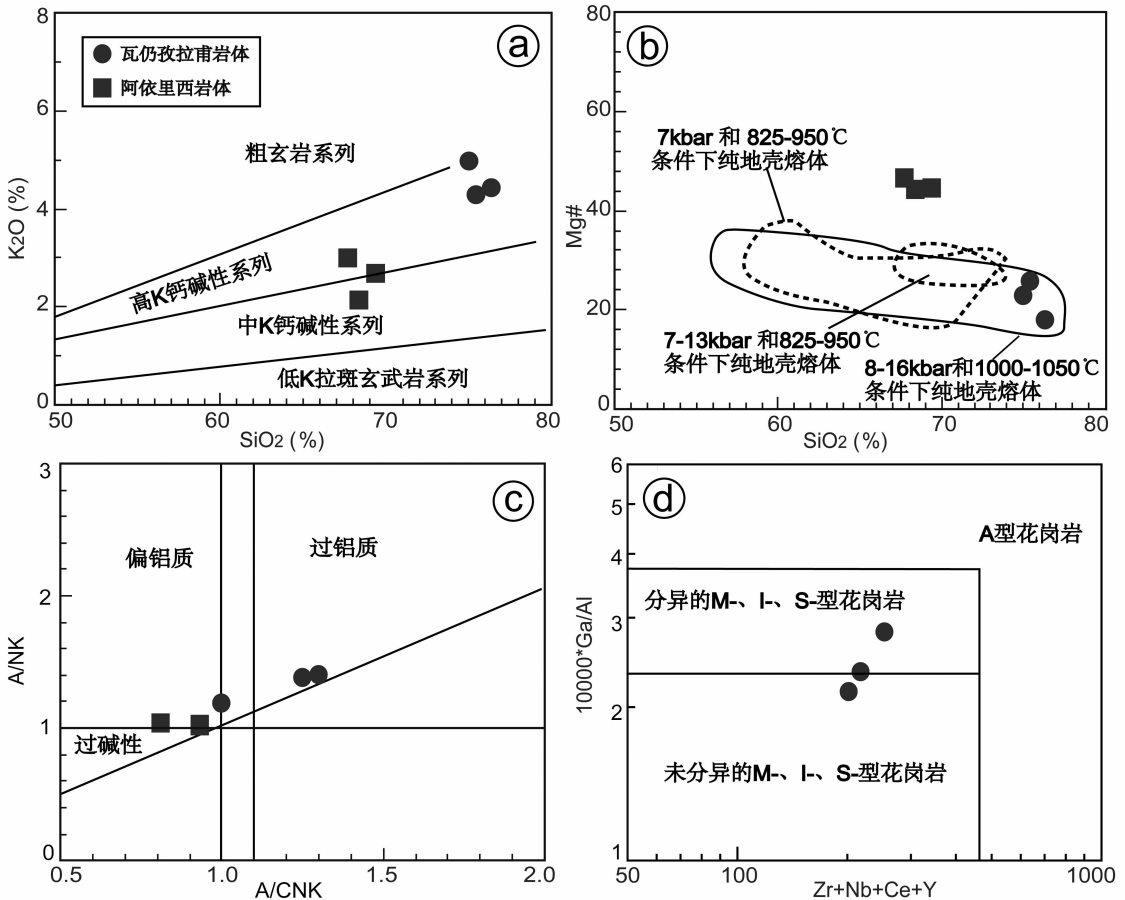
图3 地球化学分类图

Fig. 3 Geochemical classification diagram

2个岩体的稀土总量较高(表1),并具有相似的稀土总量及配分图,表现为轻稀土相对重稀土富集和负的Eu异常(图5a和c)。所不同的是,阿依里西岩体样品的Eu负异常变化范围较大,为0.29~0.81;瓦仍孜拉甫岩体样品则变化较小,为0.40~0.42。由两岩体的微量元素和原始地幔标准化多元元素图(图5b和d)分析,它们的微量元素分布大致相同,都富集大离子亲石元素(Cs、Th、K等)和轻稀土元素,亏损高场强元素Nb、Ta和Ti。

3.2 锆石 U-Pb 年龄与原位 Hf 同位素特征

瓦仍孜拉甫岩体样品 13TSK26-1 中锆石 U-Pb 同位素分析结果列于表 2,其代表性的锆石 CL 图像见图 6a。锆石呈无色透明状,颗粒以短柱状、



(a) K_2O vs. SiO_2 分类图,按照 Peccerillo and Taylor (1976); (b) $Mg^\#$ vs. SiO_2 图, [$Mg^\# = \text{molar } MgO / (MgO + 0.85 \times FeO^*)$]; 8~16 kbar 和 1000~1050 °C 的实验条件下低钾玄武岩的纯地壳熔融的熔体区域(Rapp and Watson, 1995); 7~13 kbar 和 825~950 °C 下泥质岩的地壳熔融的熔体区域(Douce and Johnston, 1991); 7 kbar 和 825~950 °C 条件下,中等含水(1.7%~2.3%)的中-高钾玄武岩的地壳熔融的熔体区域(Sisson et al., 2005); (c) A/NK [molar $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$] vs. A/CNK [molar $Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$] 图,据 Maniar and Piccoli (1989); (d) $10,000 * Ga/Al$ vs. $(Zr + Nb + Ce + Y)$ 图,据 Whalen et al. (1987)

图4 岩体主量元素地球化学特征图

Fig. 4 Major geochemical features of the studied plutons

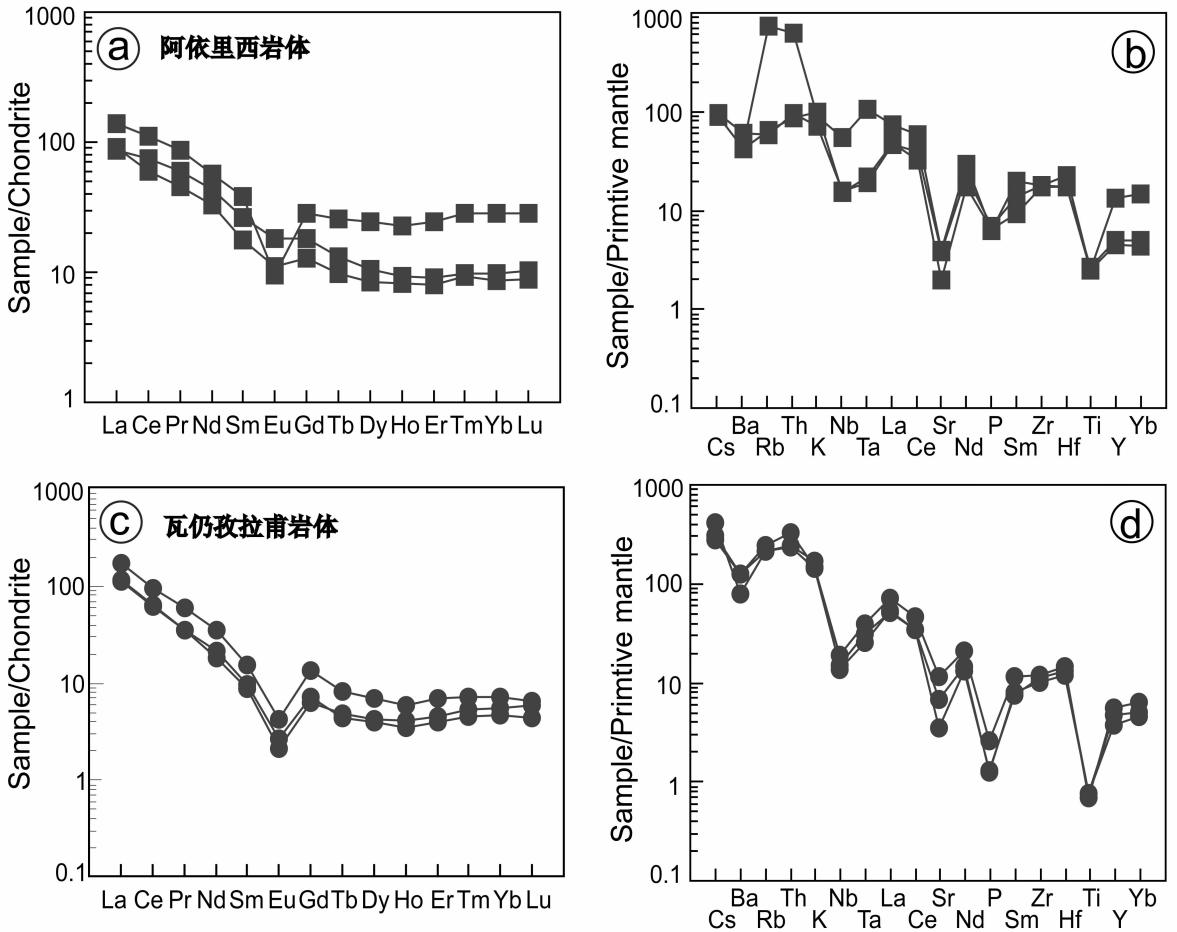


图 5 样品稀土图谱和微量元素蛛网图,球粒陨石数据图

引自 Taylor and McLennan (1985),原始地幔数据引自 Sun and McDonough (1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams

表 1 花岗岩体主量(%)、微量元素(10^{-6})测试结果表

Tab. 1 Major (%) and trace (10^{-6}) element analyses of the Early Paleozoic Datong pluton

| 岩体 | 阿依里西岩体 | | | 瓦仍孜拉甫岩体 | | | |
|---|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 样品号 | 13TSK13-1 | 13TSK13-2 | 13TSK13-3 | 13TSK26-1 | 13TSK26-2 | 13TSK26-4 |
| SiO ₂ | | 67.7 | 68.4 | 69.4 | 76.3 | 75.4 | 75.0 |
| TiO ₂ | | 0.54 | 0.57 | 0.54 | 0.15 | 0.17 | 0.17 |
| Al ₂ O ₃ | | 13.4 | 13.5 | 13.8 | 13.4 | 13.9 | 12.7 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | | 5.30 | 4.37 | 4.29 | 1.36 | 1.53 | 1.63 |
| MnO | | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.04 |
| MgO | | 1.98 | 1.48 | 1.48 | 0.13 | 0.23 | 0.21 |
| CaO | | 0.74 | 1.97 | 0.82 | 0.57 | 0.45 | 1.08 |
| Na ₂ O | | 6.01 | 6.49 | 6.36 | 2.93 | 3.18 | 3.24 |
| K ₂ O | | 3.02 | 2.15 | 2.69 | 4.45 | 4.31 | 4.98 |
| P ₂ O ₅ | | 0.14 | 0.15 | 0.14 | 0.06 | 0.03 | 0.03 |

续表 1

| 岩体 样品号 | 阿依里西岩体 | | | 瓦仍孜拉甫岩体 | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 13TSK13-1 | 13TSK13-2 | 13TSK13-3 | 13TSK26-1 | 13TSK26-2 | 13TSK26-4 |
| LOI | 0.99 | 0.85 | 0.41 | 0.55 | 0.66 | 0.86 |
| Total | 99.9 | 99.9 | 99.9 | 99.9 | 99.9 | 99.9 |
| Cs | 0.70 | 0.76 | 38.00 | 2.42 | 2.15 | 3.18 |
| Rb | 41 | 37 | 472 | 155 | 134 | 134 |
| Sr | 42 | 79 | 83 | 243 | 143 | 75 |
| Ba | 293 | 429 | 328 | 865 | 859 | 548 |
| La | 33 | 32 | 50 | 49 | 36 | 37 |
| Ce | 57 | 71 | 105 | 82 | 60 | 61 |
| Pr | 6.16 | 8.08 | 11.91 | 8.46 | 5.56 | 5.67 |
| Nd | 24 | 31 | 40 | 29 | 20 | 18.0 |
| Sm | 4.12 | 6.05 | 8.71 | 5.16 | 3.62 | 3.32 |
| Eu | 0.96 | 1.57 | 0.84 | 0.74 | 0.51 | 0.44 |
| Gd | 3.92 | 5.61 | 8.70 | 6.13 | 3.87 | 3.44 |
| Tb | 0.57 | 0.77 | 1.50 | 0.80 | 0.50 | 0.54 |
| Dy | 3.24 | 4.05 | 9.21 | 4.68 | 3.09 | 3.23 |
| Ho | 0.70 | 0.80 | 1.94 | 0.92 | 0.62 | 0.70 |
| Er | 2.02 | 2.28 | 6.07 | 3.07 | 2.00 | 2.21 |
| Tm | 0.33 | 0.35 | 1.01 | 0.44 | 0.31 | 0.36 |
| Yb | 2.15 | 2.45 | 7.10 | 3.12 | 2.27 | 2.54 |
| Lu | 0.34 | 0.39 | 1.09 | 0.45 | 0.33 | 0.41 |
| Y | 20 | 22 | 61 | 26 | 17.0 | 22 |
| Nb | 10.80 | 11.18 | 39.55 | 13.55 | 10.80 | 9.90 |
| Zr | 194 | 201 | 198 | 132 | 114 | 126 |
| Hf | 5.30 | 5.30 | 6.87 | 4.46 | 3.76 | 4.08 |
| Ta | 0.89 | 0.79 | 4.36 | 1.63 | 1.30 | 1.06 |
| Th | 7.46 | 8.02 | 53 | 28 | 20 | 20 |
| U | 1.21 | 1.61 | 18.48 | 5.43 | 3.36 | 3.24 |
| REE | 138 | 166 | 254 | 193 | 139 | 139 |
| Eu* | 0.72 | 0.81 | 0.29 | 0.40 | 0.42 | 0.40 |
| Mg [#] | 46 | 44 | 45 | 18 | 26 | 23 |
| Nb/Ta | 12.20 | 14.22 | 9.07 | 8.33 | 8.32 | 9.36 |
| Ti/Zr | 16.65 | 16.89 | 16.24 | 6.87 | 8.74 | 7.92 |
| (La/Yb) _N | 10.38 | 8.82 | 4.78 | 10.60 | 10.64 | 9.79 |

注:主量元素含量为 wt. %; Fe₂O₃T 为全铁; 微量元素含量为 10⁻⁶; LOI 为烧失量; Mg[#] = MgO/(MgO + 0.85 × FeO*), δEu = (Eu)_N/((Sm)_N × (Gd)_N)^{1/2}; 下脚标 N 表示球粒陨石标准化, 其标准化值据 Taylor and McLennan (1985)。

表 2 甜水海花岗质岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表
Tab. 2 Results of LA-ICP-MS U-Pb zircon dating for granitoids of Tianshuihai

| 分析点 | Th (10 ⁻⁶) | U (10 ⁻⁶) | Th/U | 同位素比值 | | | | | | 表观年龄(Ma) | | | | | |
|-----------|---------------------------|--------------------------|------|--------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|--------------------------------------|-------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|
| | | | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ |
| 13TSK26-1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 7 049 | 7 876 | 0.89 | 0.057 2 | 0.001 3 | 0.662 9 | 0.014 7 | 0.083 5 | 0.000 5 | 498 | 45.4 | 516 | 9.0 | 517 | 3.3 |
| 2 | 5 732 | 8 712 | 0.66 | 0.056 2 | 0.001 4 | 0.645 5 | 0.017 9 | 0.082 6 | 0.001 0 | 461 | 55.6 | 506 | 11.0 | 511 | 6.2 |
| 3 | 1 576 | 3 425 | 0.46 | 0.057 6 | 0.001 6 | 0.665 8 | 0.019 0 | 0.083 3 | 0.000 8 | 522 | 61.1 | 518 | 11.6 | 516 | 4.9 |
| 4 | 1 658 | 3 391 | 0.49 | 0.058 7 | 0.001 7 | 0.678 9 | 0.020 4 | 0.083 1 | 0.000 8 | 567 | 60.2 | 526 | 12.3 | 515 | 4.6 |
| 5 | 3 026 | 5 304 | 0.57 | 0.057 9 | 0.001 7 | 0.668 2 | 0.019 2 | 0.083 1 | 0.000 7 | 528 | 64.8 | 520 | 11.7 | 515 | 4.1 |
| 6 | 2 147 | 4 602 | 0.47 | 0.056 4 | 0.001 8 | 0.655 7 | 0.021 3 | 0.083 8 | 0.000 8 | 478 | 72.2 | 512 | 13.1 | 518 | 4.7 |
| 7 | 5 267 | 6 903 | 0.76 | 0.057 8 | 0.001 6 | 0.671 0 | 0.018 2 | 0.083 7 | 0.000 8 | 524 | 63.9 | 521 | 11.0 | 518 | 4.5 |
| 8 | 5 598 | 7 356 | 0.76 | 0.057 4 | 0.001 4 | 0.667 5 | 0.015 8 | 0.083 9 | 0.000 6 | 506 | 56.5 | 519 | 9.6 | 519 | 3.5 |
| 9 | 2 227 | 4 253 | 0.52 | 0.057 7 | 0.001 3 | 0.665 8 | 0.015 3 | 0.083 3 | 0.000 7 | 520 | 45.4 | 518 | 9.3 | 516 | 4.3 |
| 10 | 4 494 | 7 829 | 0.57 | 0.057 5 | 0.001 2 | 0.661 6 | 0.014 9 | 0.083 1 | 0.001 0 | 509 | 44.4 | 516 | 9.1 | 514 | 5.7 |
| 11 | 5 191 | 7 219 | 0.72 | 0.056 7 | 0.001 1 | 0.649 9 | 0.012 9 | 0.082 7 | 0.000 5 | 480 | 44.4 | 508 | 8.0 | 512 | 3.3 |
| 12 | 1 996 | 3 562 | 0.56 | 0.056 6 | 0.001 2 | 0.652 9 | 0.013 9 | 0.083 5 | 0.000 7 | 472 | 46.3 | 510 | 8.5 | 517 | 4.2 |
| 13 | 1 966 | 3 817 | 0.52 | 0.054 6 | 0.001 2 | 0.632 8 | 0.014 1 | 0.083 7 | 0.000 7 | 398 | 54.6 | 498 | 8.8 | 518 | 4.3 |
| 14 | 2 232 | 4 245 | 0.53 | 0.055 6 | 0.001 2 | 0.644 1 | 0.014 5 | 0.083 7 | 0.000 7 | 435 | 48.1 | 505 | 9.0 | 518 | 3.9 |
| 15 | 3 604 | 5 192 | 0.69 | 0.059 9 | 0.001 3 | 0.681 0 | 0.015 3 | 0.082 3 | 0.000 7 | 598 | 52.8 | 527 | 9.2 | 510 | 4.1 |
| 16 | 1 441 | 3 045 | 0.47 | 0.056 3 | 0.001 1 | 0.655 1 | 0.014 1 | 0.084 0 | 0.000 7 | 465 | 44.4 | 512 | 8.7 | 520 | 4.3 |
| 17 | 3 772 | 5 327 | 0.71 | 0.057 0 | 0.001 0 | 0.653 4 | 0.012 2 | 0.082 8 | 0.000 5 | 500 | 38.9 | 511 | 7.5 | 513 | 3.1 |
| 18 | 2 076 | 4 184 | 0.50 | 0.057 2 | 0.001 1 | 0.663 4 | 0.013 3 | 0.083 9 | 0.000 6 | 498 | 44.4 | 517 | 8.1 | 519 | 3.7 |
| 13TSK13-1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 153 | 317 | 0.48 | 0.058 0 | 0.002 4 | 0.694 5 | 0.028 9 | 0.086 6 | 0.001 1 | 532 | 92.6 | 536 | 17.3 | 535 | 6.5 |
| 2 | 138 | 300 | 0.46 | 0.055 6 | 0.003 0 | 0.650 0 | 0.030 9 | 0.086 1 | 0.001 1 | 435 | 114 | 508 | 19.0 | 532 | 6.8 |
| 3 | 188 | 572 | 0.33 | 0.057 8 | 0.002 2 | 0.685 9 | 0.026 3 | 0.085 3 | 0.000 9 | 524 | 83.3 | 530 | 15.9 | 528 | 5.4 |
| 4 | 573 | 892 | 0.64 | 0.056 5 | 0.001 6 | 0.669 0 | 0.019 7 | 0.085 6 | 0.001 0 | 472 | 97.2 | 520 | 12.0 | 529 | 6.2 |
| 5 | 204 | 395 | 0.52 | 0.057 9 | 0.002 1 | 0.682 9 | 0.023 3 | 0.085 5 | 0.001 0 | 524 | 84.2 | 529 | 14.1 | 529 | 6.0 |
| 6 | 253 | 429 | 0.59 | 0.057 5 | 0.002 2 | 0.676 7 | 0.025 3 | 0.085 1 | 0.000 9 | 522 | 80.5 | 525 | 15.3 | 527 | 5.5 |
| 7 | 148 | 310 | 0.48 | 0.057 4 | 0.002 6 | 0.677 0 | 0.027 8 | 0.086 0 | 0.001 0 | 506 | 69.4 | 525 | 16.8 | 532 | 6.0 |
| 8 | 215 | 436 | 0.49 | 0.059 0 | 0.002 4 | 0.697 7 | 0.026 8 | 0.085 5 | 0.000 9 | 569 | 88.9 | 537 | 16.0 | 529 | 5.5 |
| 9 | 149 | 332 | 0.45 | 0.056 9 | 0.002 8 | 0.659 9 | 0.030 3 | 0.083 7 | 0.001 0 | 487 | 107.4 | 515 | 18.5 | 518 | 5.9 |
| 10 | 494 | 813 | 0.61 | 0.058 6 | 0.001 8 | 0.675 6 | 0.019 7 | 0.083 7 | 0.000 7 | 550 | 68.5 | 524 | 12.0 | 518 | 4.1 |
| 11 | 527 | 717 | 0.74 | 0.095 3 | 0.002 6 | 2.351 8 | 0.096 6 | 0.168 1 | 0.004 3 | 1 544 | 51.9 | 1 228 | 29.3 | 1 002 | 23.9 |
| 12 | 245 | 414 | 0.59 | 0.055 1 | 0.002 2 | 0.641 6 | 0.024 6 | 0.084 3 | 0.000 8 | 417 | 90.7 | 503 | 15.2 | 521 | 4.8 |
| 13 | 313 | 523 | 0.60 | 0.056 9 | 0.001 8 | 0.672 0 | 0.020 4 | 0.085 8 | 0.000 7 | 487 | 76.8 | 522 | 12.4 | 531 | 4.4 |
| 14 | 294 | 483 | 0.61 | 0.055 9 | 0.002 3 | 0.662 7 | 0.026 1 | 0.085 8 | 0.000 9 | 450 | 86 | 516 | 16.0 | 531 | 5.5 |

续表 2

| 分析点 | Th (10^{-6}) | U (10^{-6}) | Th/U | 同位素比值 | | | | | | | | 表观年龄 (Ma) | | | | | |
|-----|---------------------|--------------------|------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|--|--|
| | | | | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | | | |
| | | | | | 1σ | | 1σ | | 1σ | | 1σ | | 1σ | | 1σ | | |
| 15 | 227 | 459 | 0.50 | 0.058 | 1.0002 | 1.0682 | 7.0022 | 9.0085 | 4.0000 | 8.532 | 77.8 | 528 | 13.8 | 528 | 5.0 | | |
| 16 | 694 | 940 | 0.74 | 0.054 | 3.0001 | 8.0523 | 2.0016 | 6.0069 | 5.0000 | 9.383 | 72.2 | 427 | 11.1 | 433 | 5.4 | | |
| 17 | 428 | 839 | 0.51 | 0.059 | 1.0001 | 7.0713 | 4.0019 | 6.0087 | 4.0000 | 9.569 | 63.0 | 547 | 11.6 | 540 | 5.4 | | |
| 18 | 162 | 360 | 0.45 | 0.057 | 8.0002 | 6.0672 | 8.0027 | 7.0085 | 0.0001 | 0.524 | 100.0 | 522 | 16.8 | 526 | 5.8 | | |
| 19 | 212 | 377 | 0.56 | 0.061 | 5.0002 | 2.0722 | 0.0025 | 1.0085 | 3.0000 | 9.657 | 84.2 | 552 | 14.8 | 528 | 5.3 | | |
| 20 | 160 | 299 | 0.53 | 0.064 | 4.0002 | 7.0773 | 7.0030 | 4.0088 | 3.0001 | 1.754 | 90.7 | 582 | 17.4 | 545 | 6.3 | | |
| 21 | 541 | 2367 | 0.23 | 0.073 | 4.0001 | 3.1607 | 5.0029 | 6.0158 | 2.0001 | 2.1033 | 37.0 | 973 | 11.5 | 947 | 6.6 | | |
| 22 | 269 | 495 | 0.54 | 0.057 | 5.0002 | 1.0691 | 3.0023 | 3.0086 | 9.0000 | 9.522 | 77.8 | 534 | 14.0 | 537 | 5.3 | | |
| 23 | 207 | 411 | 0.50 | 0.058 | 9.0002 | 6.0697 | 3.0028 | 9.0086 | 3.0000 | 9.565 | 89.8 | 537 | 17.3 | 533 | 5.6 | | |
| 24 | 183 | 380 | 0.48 | 0.056 | 7.0002 | 2.0669 | 8.0025 | 6.0085 | 8.0000 | 9.480 | 85.2 | 521 | 15.6 | 530 | 5.4 | | |

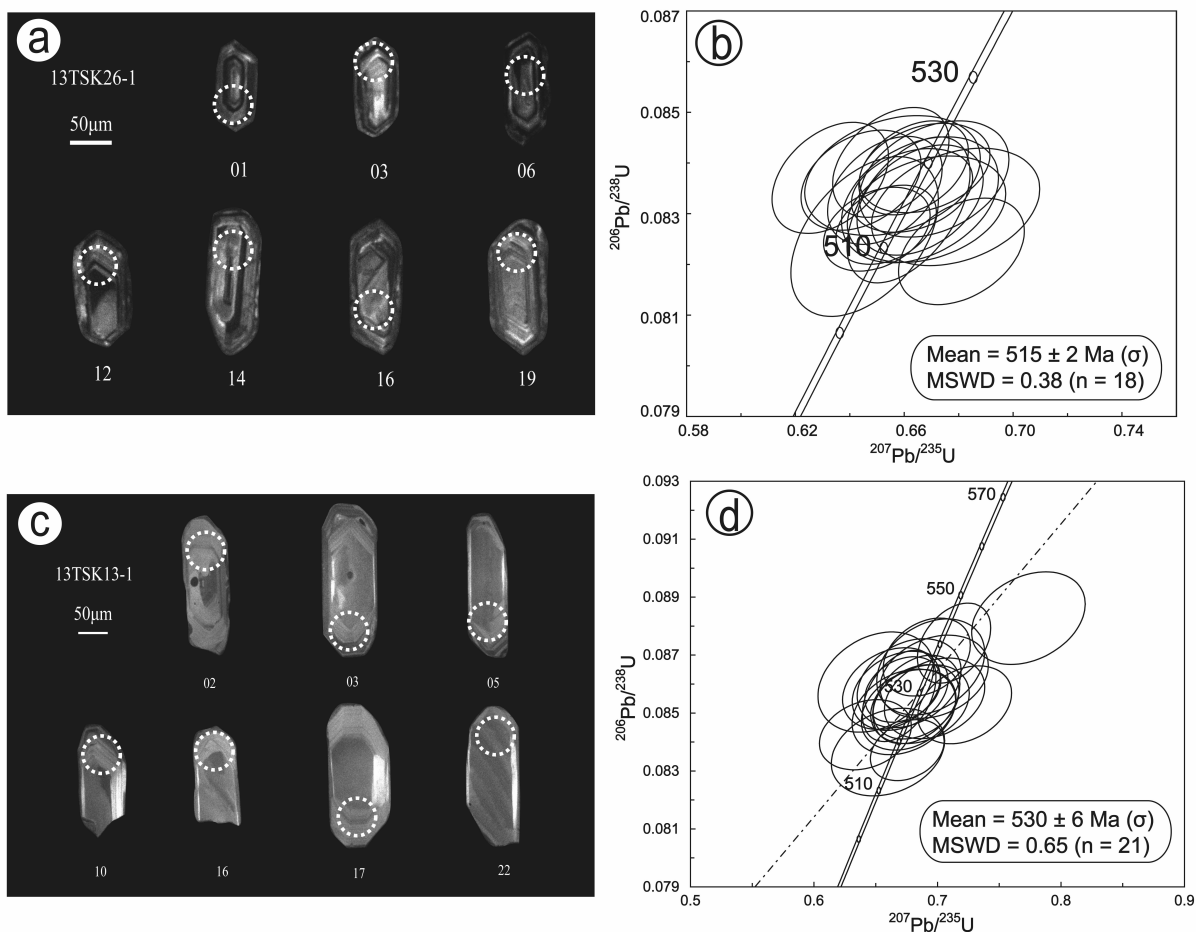


图 6 花岗质岩体锆石阴极发光图像和锆石 U - Pb 同位素谐和图

Fig. 6 CL images of representative zircon grains and U - Pb concordia diagrams

自形粒状为主,长轴长度为 80~140 μm ,长宽比为 3:2~2:1,发育明显的振荡环带结构。分析的 18 个锆石的 U 和 Th 含量高且变化大,其 U 为 $3.045 \times 10^{-6} \sim 8.712 \times 10^{-6}$,Th 为 $1.441 \times 10^{-6} \sim 7.049 \times 10^{-6}$,Th/U 为 0.46~0.90,为典型的高分异岩浆锆石的特征。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄为 $(510 \pm 4.1) \sim (520 \pm 4.3)$ Ma(表 2),所有分析点构成了一个密集的年龄集中区域(图 6b),它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄加权平均值为 (515 ± 2) Ma

($\sigma; n=18$),MSWD=0.38。该年龄值应该代表瓦仍孜拉甫岩体的侵入年龄,表明其是早古生代岩浆活动的产物。其中的 8 个测点的进行了 Hf 同位素分析,结果列于表 3 中。锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.037 424~0.060 770 和 0.282 542~0.282 591, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +2.5~+4.3,Hf 同位素单阶段模式和二阶段模式年龄分别为 960~1 037 Ma 和 1 213~1329 Ma(表 3)。

表 3 甜水海花岗质岩体的 Lu-Hf 同位素分析结果表

Tab. 3 Zircon Hf trace elements features of granitoids of Tianshuihai Terrane

| 分析点 | Age(Ma) | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | 1σ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | 1σ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | 1σ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $T_{\text{DM}}(\text{Ma})$ | $T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$ |
|-----------|---------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 13TSK26-1 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 515 | 0.060 77 | 0.000 562 | 0.002 4 | 0.000 02 | 0.282 560 | 0.000 020 | 0.282 537 | -7.5 | 3.0 | 1 017 | 1 293 |
| 2 | 515 | 0.050 62 | 0.001 991 | 0.002 2 | 0.000 09 | 0.282 542 | 0.000 017 | 0.282 521 | -8.1 | 2.5 | 1 037 | 1 329 |
| 3 | 515 | 0.052 63 | 0.000 617 | 0.002 0 | 0.000 02 | 0.282 545 | 0.000 018 | 0.282 525 | -8.0 | 2.6 | 1 028 | 1 318 |
| 4 | 515 | 0.049 09 | 0.001 853 | 0.002 0 | 0.000 07 | 0.282 557 | 0.000 014 | 0.282 538 | -7.6 | 3.1 | 1 010 | 1 290 |
| 5 | 515 | 0.059 61 | 0.000 889 | 0.002 4 | 0.000 03 | 0.282 559 | 0.000 022 | 0.282 536 | -7.5 | 3.0 | 1 019 | 1 296 |
| 6 | 515 | 0.037 42 | 0.000 360 | 0.001 5 | 0.000 01 | 0.282 564 | 0.000 018 | 0.282 550 | -7.3 | 3.5 | 987 | 1 264 |
| 7 | 515 | 0.056 81 | 0.001 942 | 0.002 3 | 0.000 08 | 0.282 588 | 0.000 017 | 0.282 566 | -6.5 | 4.1 | 973 | 1 227 |
| 8 | 515 | 0.048 40 | 0.001 076 | 0.002 0 | 0.000 04 | 0.282 591 | 0.000 014 | 0.282 572 | -6.4 | 4.3 | 960 | 1 213 |
| 13TSK13-1 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 530 | 0.021 11 | 0.000 688 | 0.001 0 | 0.000 04 | 0.282 418 | 0.000 013 | 0.282 408 | -12.5 | -1.2 | 1 178 | 1 573 |
| 2 | 530 | 0.020 00 | 0.001 089 | 0.000 8 | 0.000 04 | 0.282 356 | 0.000 015 | 0.282 348 | -14.7 | -3.3 | 1 259 | 1 708 |
| 3 | 530 | 0.019 09 | 0.000 308 | 0.000 8 | 0.000 01 | 0.282 411 | 0.000 013 | 0.282 403 | -12.8 | -1.4 | 1 183 | 1 585 |
| 4 | 530 | 0.018 53 | 0.000 086 | 0.000 8 | 0.000 00 | 0.282 427 | 0.000 015 | 0.282 420 | -12.2 | -0.8 | 1 158 | 1 547 |
| 5 | 530 | 0.015 62 | 0.000 245 | 0.000 7 | 0.000 01 | 0.282 425 | 0.000 013 | 0.282 419 | -12.3 | -0.8 | 1 158 | 1 549 |
| 6 | 1 002 | 0.021 27 | 0.001 224 | 0.000 8 | 0.000 05 | 0.281 672 | 0.000 064 | 0.281 656 | -38.9 | -17.3 | 2 204 | 2 954 |
| 7 | 530 | 0.020 18 | 0.000 561 | 0.000 8 | 0.000 02 | 0.282 363 | 0.000 015 | 0.282 355 | -14.5 | -3.1 | 1 250 | 1 692 |
| 8 | 530 | 0.030 48 | 0.000 632 | 0.001 3 | 0.000 03 | 0.282 385 | 0.000 018 | 0.282 372 | -13.7 | -2.5 | 1 235 | 1 653 |

阿依里西岩体样品 13TSK13-1 中锆石 U-Pb 同位素分析结果见于表 2,代表性的锆石 CL 图像见图 6c。锆石为无色透明状,颗粒以短柱状、自形粒状为主,长轴长度为 80~130 μm ,长宽比为 3:2~3:1,发育明显的振荡环带结构。共选取了 23 颗锆石进行 U-Pb 年龄分析,其中包括 2 个继承锆石核。继承锆石核发育增生边结构,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄分别为 (1002 ± 23.9) Ma 和 (947 ± 6.6) Ma,对应的 Th/U 值为 0.736 和 0.228。其余测点的 U

和 Th 含量变化范围大,其 U 的含量为 $299 \times 10^{-6} \sim 940 \times 10^{-6}$,Th 的含量为 $138 \times 10^{-6} \sim 694 \times 10^{-6}$,Th/U 为 0.33~0.74(表 2),为典型的岩浆锆石。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄变化范围为 $(545 \pm 6.3) \sim (518 \pm 4.1)$ Ma,在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上,分析点落在谐和线上或接近谐和线,它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄加权平均值为 (530 ± 6) Ma($\sigma; n=21$),MSWD=0.65。这一年龄可代表阿依里西岩体的结晶年龄(图 6d),表明阿依里西岩体也是在

古生代岩浆活动的产物,不过其形成时代早于瓦仍孜拉甫岩体。类同于瓦仍孜拉甫岩体,测定了其中的8个测点的Hf同位素,结果列于表3中。其中一颗继承锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为0.212 75、0.281 672,对应的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.000 845 4, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-17.3,单阶段模式年龄和二阶段模式年龄分别为2 204 Ma和2 954 Ma。其余的7颗锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为0.015 623~0.030 481和0.281 363~0.282 427, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-3.3~-0.8,单阶段模式年龄和二阶段模式年龄分别为1 158~1 235 Ma和1 547~1 708 Ma(表3)。

4 讨论

4.1 花岗岩侵位时代及其意义

目前,在西昆仑甜水海地体还未有过早古生代花岗质岩石年龄的报道。U-Pb 锆石测年结果显示,所用测点的Th/U值均大于0.3(表2),锆石发育典型的岩浆成因的韵律震荡环带,晶形相对完整。因此,这些锆石给出的年龄能够代表其侵位年龄。故所获得的瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体的U-Pb 锆石年龄(分别为 515 ± 2 Ma和 530 ± 6 Ma)可以作为岩体的形成年龄,说明它们形成于早古生代早寒武世,属于加里东期构造旋回岩浆作用的产物。因此,甜水海地体中出露的瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体古生代年龄的确定,将改观长期以来所认为的古生代花岗岩浆作用仅仅出露于西昆仑造山带的西昆仑南、北地体的面貌。

野外特征表明,这2个花岗岩体与布伦阔勒岩群呈侵入接触关系。该岩群最初被认为是甜水海地体的古老变质基底单元,并依据变质程度和前苏联学者在西南帕米尔地区的同位素测年结果归为古元古代(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1982)。JI et al. (2011)在甜水海地体西段布伦阔勒岩群片理化变质流纹岩中获得($2\ 481\pm 14$)Ma,认为布伦阔勒岩群中存在古元古界组分。本次研究中,样品阿依里西岩体样品13TSK13-1中获得2颗继承锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄分别为($1\ 002\pm 23.9$)Ma和(947 ± 6.6)Ma(表2),意味着在研究区应存在前寒武纪组分。2个岩体的锆石Hf同位素二阶段模式年龄分别为1 213~1 329 Ma和1 547~1 708 Ma,进一步说明研究区可能含有老地壳物质。布伦阔勒

岩群中发育有赞坎、老并、叶里克等大型铁矿床,因考虑到其以磁铁矿石岩方式产出,也曾被推测其形成于古元古代(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1985)。然而,近年来,高精度锆石U-Pb定年结果显示,其组成可能较为复杂,时代有异。张传林等(2007)在塔什库尔干县附近的2个角闪岩相变质的孔兹岩中获得继承碎屑锆石年龄(540~2 200 Ma),认为它是一套火山-沉积岩系,沉积在新元古代晚期-早古生代早期。燕长海等(2012)在老并铁矿含矿岩段内长英质片岩和黑云母石英片岩中测得碎屑锆石分别为(532 ± 3.9)Ma和(526 ± 5)Ma,指出这2个年龄应为该区布伦阔勒岩群源区岩石的年龄,说明老并矿区布伦阔勒岩群中的含铁岩系的形成时代为早古生代。很明显,随着布伦阔勒岩群中早古生代组分的发现,引发了西昆仑铁矿的时代归属和成因的争论。最近,高晓峰等(2013)报道了西昆仑塔什库尔干塔阿西一带布伦阔勒岩群中的英安岩的U-Pb 锆石年龄为(521.3 ± 3.3)Ma;林尚康等(2015)在赞坎铁矿区Ⅲ矿体顶板处采集的两英安岩给出U-Pb 锆石年龄为(533 ± 10)Ma和(527.4 ± 9.0)Ma,说明火山喷发于早寒武世。本次研究得出的瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体为早古生代早寒武世花岗岩浆活动,其在时间上与塔阿西和赞坎铁矿火山岩形成时代相近,进一步证实布伦阔勒岩群中含有古生代组分,含铁岩系应是早古生代的产物,而非前寒武纪。

4.2 岩石成因

岩石的主微量元素和同位素特征可以作为判断花岗质岩体岩浆来源的关键依据。阿依里西岩体花岗质斑岩以高 $\text{Mg}^\#$ 值(44~46)为特征,平均值为45.02,远高于地壳内岩石部分熔融实验所得熔体的数值(通常 $\text{Mg}^\#$ 值小于40; RAPP et al., 1995),排除其岩浆源于壳源物质的部分熔融的可能性。然而,阿依里西岩体的Nb/Ta值变化范围为9.07~14.22,平均比值为11.8;Ti/Zr值变化范围为16.2~16.9,平均值为16.6;分别与地壳的Nb/Ta值(11~12, Green, 1995)和Ti/Zr值(<20 , FRANCALANCI et al., 1993)一致。因此,说明该岩体是由幔源基性岩浆结晶分异形成的可能性较小,而可能有壳源物质的参与。另外,在样品13TSK13-1所测定的锆石U-Pb年龄中存在2颗继承锆石,其年龄分别为(1002 ± 23.9)Ma和(947 ± 6.6)Ma,也指示了其成岩过程中

有古老地壳物质的加入。再者,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-3.3 \sim -0.8$, 二阶段模式年龄为 $1547 \sim 1708$ Ma, 远大于其成岩年龄, 依然显示出古老地壳物质的贡献。在源区判别图(图7)中, 岩石样品落在变质玄武岩(图7a)或变质火成岩(图7b)熔融源区范围。另一方面, 阿依里西岩体花岗质斑岩相对低硅($67.7\% \sim 69.4\%$)、富 Na_2O ($6.01\% \sim 6.49\%$) 及富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素和重稀土元素的地球化学特点, 表明岩浆源区有壳源和岩石圈地幔组分的参

与。由于锆石 Hf 同位素组成不受岩浆分离结晶和部分熔融的影响, 因此锆石 Hf 同位素组成的不均一性 ($-3.3 \sim -0.8$), 很可能指示了幔源岩浆与壳源岩浆的混合, 排除了单一岩浆来源系统内分离结晶或者部分熔融的同源岩浆演化的可能性 (BOLHAR et al. 2008)。因此, 可以推断阿依里西岩体岩浆来源于地幔和地壳 2 个端元, 岩浆具有壳-幔混合的特点。该推论与研究区赞坎矿区英安斑岩的岩石成因相一致 (林尚康等, 2015)。

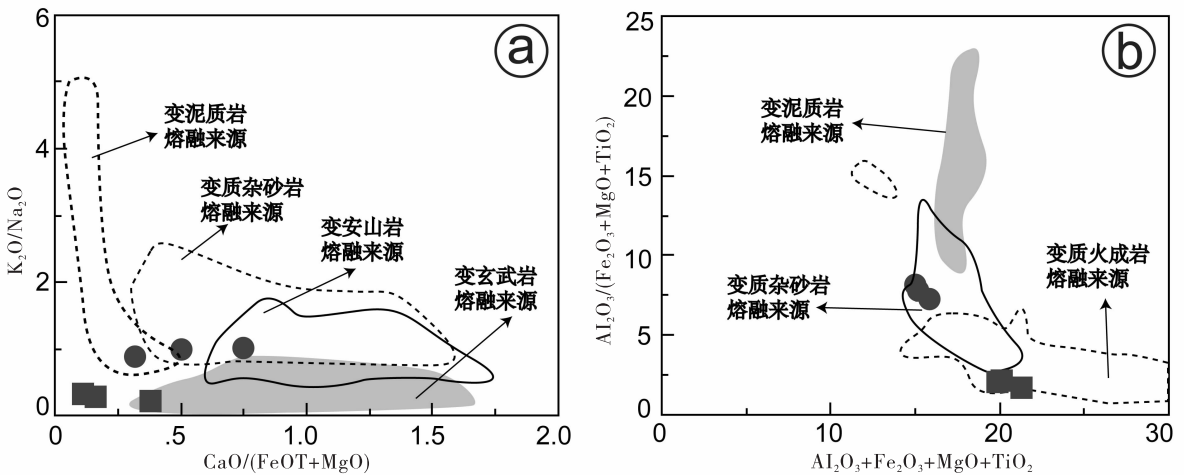


图7 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}})$ 图解(据 Altherr and Siebel, 2002)和 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO} * + \text{MgO} + \text{TiO}_2) - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO} * + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 图解(据 Patiño Douce, 1999)

Fig. 7 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}/(\text{MgO} + \text{TFeO})$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO} * + \text{MgO} + \text{TiO}_2) - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO} * + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ diagrams

综上所述, 瓦仍孜拉甫岩体黑云母二长花岗质片麻岩具有高分异花岗岩的特征。该岩体在矿物学上以长石和石英的含量为主, 并含少量白云母。唯一的暗色矿物为黑云母。地球化学特征上, 常量元素以 Si、Al、Na 和 K 4 种元素为主, 其他元素 Ti、Fe、Mn、Mg、Ca 和 P 含量较低, 表现出高硅 ($\text{SiO}_2 > 75.0\%$) 和高碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 7.38\%$) 的特点; 微量元素以高 Rb、Th 和 U 为特色, 具高 Rb/Sr 值和低 K/Rb 值的特征。这些特征类似于高分异花岗岩 (CHAPPELL, 1999; WU et al., 2003)。此外, 该岩体所有样品的 P_2O_5 的含量很低 ($< 0.06 \text{ wt. } \%$), 进一步说明其是高分异 I 型花岗岩 (CHAPPELL, 1999; XIAO et al., 2014)。瓦仍孜拉甫岩体黑云母二长花岗质片麻岩具有高硅 ($75.0\% \sim 76.3\%$)、低 $\text{Mg}^\#$ ($18 \sim 26$)、富 K_2O ($4.31\% \sim 4.98\%$) 及富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素和重

稀土元素的地球化学特点, 表明其主要来源于地壳的部分熔融。在源区判别图(图7)中, 岩石样品落在变质玄武岩(图7a)或变质火成岩(图7b)熔融源区范围附近, 并以高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 为特点进入到变质沉积岩的熔融区域。这似乎指出瓦仍孜拉甫岩体黑云母二长花岗质片麻岩的源岩为沉积岩。其高 SiO_2 和高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 以及富集 Cs 和 Rb 的特点, 与云母类矿物脱水熔融形成的熔体相似。然而, 如前所述, 瓦仍孜拉甫岩体黑云母二长花岗质片麻岩具低的 P_2O_5 的含量 ($< 0.06\%$, 表1)、高 Sr 的含量 ($75\% \sim 243\%$) 和高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($+2.5 \sim +4.3$; 表3), 且其岩石学特征显示以发育磁铁矿为特点。因此, 我们认为其不是沉积岩部分熔融形成的。此外, 熔融实验结果表明, 当源区的火成岩富集斜长石而只含有少量辉石等镁铁质矿物, 熔融形成的熔体会具有高的 $\text{Al}_2\text{O}_3/$

($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{TiO}_2$)值 (SISSON et al. 2005)。因此,源区的物质最有可能是高钾钙碱性的安山岩和玄武质安山岩 (ROBERTS et al. 1993)。

4.3 构造背景

出露于甜水海地体的瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体形成于早寒武世,锆石 U-Pb 同位素年龄分别为 $(515 \pm 2)\text{Ma}$ 和 $(530 \pm 6)\text{Ma}$ 。

地球化学特征显示瓦仍孜拉甫岩体为高分异的

I型花岗岩,阿依里西岩体为中钾-高钾钙碱性 I型花岗岩;在稀土元素配分图上(图 5a、图 5c),曲线呈现右倾式;在微量元素多元图解上(图 5b、图 5d),两岩体富集大离子亲石元素和轻稀土元素,普遍亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素,意味着俯冲相关的亲缘性。在 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Rb}/10 - \text{Hf} - \text{Ta} * 3$ 图解中(图 8),投影点在岛弧岩浆岩或火山弧花岗岩区域,显示岛弧岩浆岩的特征。

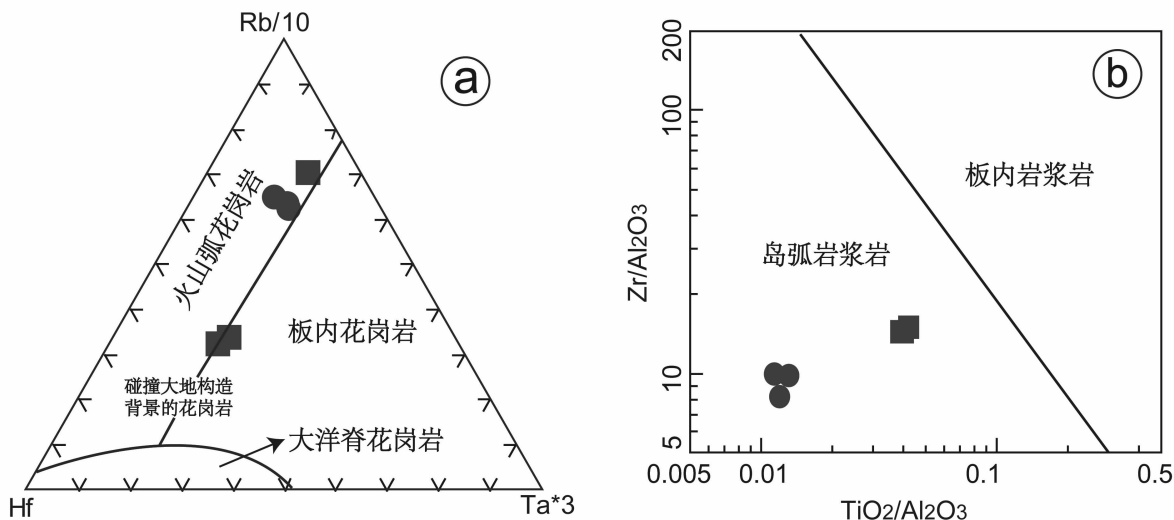


图 8 构造环境判别图(据 HARRIS et al. , 1986; MÜLLER, 1992)

Fig. 8 Diagrams of tectonic discrimination

现有大量研究资料表明(JIA et al. , 2013; LIAO et al. , 2010; LIU et al. , 2014; MATTE et al. , 1996; MATTERN et al. , 2000; PAN, 1996; WANG, 2004; XIAO et al. , 2002, 2005; YE et al. , 2008),西昆仑早古生代构造岩浆带是可以与同区晚古生代媲美的,其属于中央造山带加里东期构造-岩浆活动的一部分,是古特提斯洋俯冲消减的产物(姜春发等,2000)。

综合西昆仑南地体中较新的高精确地质年代学研究分析(图 1),将早古生代加里东期构造-岩浆活动分为 2 个不连续的火成岩时期:约 500 Ma 的岛弧火成岩和 456~431 Ma 的造山带后期的火成岩时期(崔建堂等,2006a, 2006b, 2007a, 2007b; 冯江鹏等,2014; ZHANG et al. , 2007)。甜水海地体的瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体的岩浆作用时限与约 500 Ma 的岛弧岩浆时间上相一致。因此,

它们形成于岛弧背景。

5 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测得甜水海地体的瓦仍孜拉甫岩体黑云母二长花岗质片麻岩和阿依里西岩体花岗质斑岩分别为 $(515 \pm 2)\text{Ma}$ 和 $(530 \pm 6)\text{Ma}$,形成于早古生代早寒武世时期。

(2) 瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体都属于 I型花岗岩。其中瓦仍孜拉甫岩体为高分异 I型花岗岩,其源于高钾钙碱性的安山岩和玄武质安山岩的部分熔融;阿依里西岩体为幔源岩浆与地壳熔体岩浆混合而成的产物。

(3) 瓦仍孜拉甫岩体和阿依里西岩体形成于与原特提斯洋盆冲有关的岛弧构造环境。

参考文献(References):

- 边小卫, 崔建堂, 王炬川, 等. 西昆仑康西瓦南一带康西瓦岩群的厘定及其地质意义[J]. 西北地质, 2015, 48(3):31-38.
- BIAN Xiaowei, CUI Jiantang, WANG Juchuan, et al. Redefinition of the Kangxiwa Group in South Kangxiwa Area of West Kunlun and Its geological significance[J]. Northwestern geology, 2015, 48(3):31-38.
- 陈海云, 孙妍, 包平, 等. 西昆仑上其木干岩体岩石成因及地质意义——地球化学及 U-Pb 年代学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(04): 657-670.
- CHEN Haiyun, SUN Yan, BAO Ping, et al. Petrogenesis and geological significance of Shangqimugan plutons in Western Kunlun; Evidence from geochemistry and U-Pb chronology [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33 (4): 657-670.
- 崔建堂, 王炬川, 边小卫, 等. 西昆仑康西瓦北侧早古生代角闪闪长岩、英云闪长岩的地质特征及其锆石 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地质通报, 2006a, 25 (12): 1441-1449.
- CUI Jiantang, WANG Juchuan, BIAN Xiaowei, et al. Geological Characteristics of Early Paleozoic Amphibolite and Tonalite in Northern Kangxiwar. West, Kunlun, China and their zircon SHRIMP U-Pb dating [J]. Geological Bulletin of China, 2006a, 25 (12): 1441-1449.
- 崔建堂, 王炬川, 边小卫, 等. 西昆仑康西瓦一带早古生代石英闪长岩的地质特征及其锆石 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地质通报, 2006b, 25 (12): 1450-1457.
- CUI Jiantang, WANG Juchuan, BIAN Xiaowei, et al. Geological characteristics of Early Paleozoic quartz diorite in the vicinity of Kangxiwar, West Kunlun, China and its zircon SHRIMP U-Pb dating [J]. Geological Bulletin of China, 2006b, 25 (12): 1450-1457.
- 崔建堂, 王炬川, 边小卫, 等. 西昆仑康西瓦北部冬巴克片麻状英云闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地质通报, 2007a, 26 (06): 726-729.
- CUI Jiantang, WANG Juchuan, BIAN Xiaowei, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Dongbake gneissic tonalite in northern Kangxiwa [J]. Geological Bulletin of China, 2007a, 26 (06): 726-729.
- 崔建堂, 王炬川, 边小卫, 等. 西昆仑康西瓦北侧蒙古包—普守一带早古生代花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年[J]. 地质通报, 2007b, 26 (06): 710-719.
- CUI Jiantang, WANG Juchuan, BIAN Xiaowei, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of early Paleozoic granite in the Menggubao-Pushou area on the northern side of Kangxiwar. Geological Bulletin of China, 2007b, 26 (06): 710-719.
- 邓万明. 喀喇昆仑—西昆仑地区蛇绿岩的地质特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1995, (S1): 98-111.
- DENG Wanming. Geological features of ophiolite and tectonic significance in the Karakorum-west Kunlun Mts [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, (S1): 98-111.
- 冯江鹏, 曹福根, 宋倩倩, 等. 西昆仑柳什塔格南二长花岗岩 SHRIMP 定年、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2014, 47(04):163-169.
- FENG Jiangpeng, CAO Fugen, SONG Qianqian, et al. SHRIMP U-Pb ages, Geochemical Characteristics and Geological Implications of the Monzonitic Granite at South Liushitage, West Kunlun [J]. Northwestern Geology, 2014, 47(04):163-169.
- 高晓峰, 校培喜, 康磊, 等. 西昆仑大同西岩体成因: 矿物学, 地球化学和锆石 U-Pb 年代学制约 [J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3065-3079.
- GAO Xiaofeng, XIAO Peixi, KANG Lei, et al. Origin of Datongxi pluton in the west Kunlun orogen: constraints from mineralogy, elemental geochemistry and zircon U-Pb age [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (9): 3065-3079.
- 姜春发, 王宗起, 李锦铁. 中央造山带开合构造 [M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- JIANG Chunfa, WANG Zongqi, LI Jinyi. Opening-Closing Tectonics of Center Orogenic Belt [M]. Beijing, Geological Publishing House, 2000.
- 姜耀辉, 芮行健, 贺菊瑞, 等. 西昆仑山加里东期花岗岩类构造的类型及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 105-115.
- JIANG Yaohui, RUI Xingjian, HE Jurui, et al. Tectonic type of caledonian granitoids and tectonic significance in the west Kunlun Mts [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1): 105-115.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑慕士塔格岩体的 LA-

- ICP-MS 锆石 U-Pb 定年:对古特提斯碰撞时限的制约[J]. 地质论评, 2012a, 58(04): 763-774.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. LA-ICP-MS U-Pb Dating of the Zircon from Muztagata Pluton in Western Kunlun Orogenic Belt: Constraints on the Time of Paleotethys' Collision [J]. Geological Review, 2012, 58(04): 763-774.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑慕士塔格岩体的岩石地球化学特征、岩石成因及其构造意义[J]. 地质通报, 2012b, 31(12): 2001-2014.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Muztagata intrusion in Western Kunlun orogenic belt and their tectonic significance [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(12): 2001-2014.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑西北缘大洋斜长花岗岩带的岩石地球化学特征、成因及其构造环境[J]. 岩石学报, 2015a, 31(09): 2566-2582.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics, petrogenesis and tectonic setting of Oceanic plagiogranites belt in the northwestern margin of western Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015a, 31(09): 2566-2582.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑西段晚古生代—中生代花岗质岩浆作用及构造演化过程[J]. 中国地质, 2015b, 42(3): 533-552.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Neopaleozoic and Mesozoic granitoid magmatism and tectonic evolution of the West Kunlun Mountains [J]. Geology in China, 2015b, 42(3): 533-552.
- 李荣社, 计文化, 杨永成. 昆仑山及邻区地质 [M], 北京: 地质出版社, 2008: 1-5.
- LI Rongshe, JI Wenhua, YANG Yongcheng. Geology of Kunlun Mountain and Adjacent Areas [M]. Beijing, Geological Publishing House, 2008: 1-5.
- 林尚康, 汤好书, 任涛. 西昆仑赞坎铁矿区英安班岩锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 河南科学, 2015, 33(06): 986-992.
- LIN Shang Kang, TANG Haoshu, REN Tao. In-Situ U-Pb Ages and Hf Isotopic Analyses of Zircons from Rhyodacite in Zankan, West Kunlun Area [J]. Henan science, 2015, 33(06): 986-992.
- 曲军峰, 张立飞, 艾永亮, 等. 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩 PT 轨迹、SHRIMP 锆石定年及其大地构造意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, 37(04): 429-441.
- QU Junfeng, ZHANG Lifei, AI Yongliang, et al. Discovery and P-T path of high pressure granulite in Taxkorgan, western Kunlun and its tectonic significance [J]. Science in China (series D), 2007, 37(04): 429-441.
- 王超, 刘良, 何世平, 等. 西昆仑早古生代岩浆作用过程: 布隆花岗岩地球化学和锆石 U-Pb-Hf 同位素组成研究[J]. 地质科学, 2013, 48(4): 997-1014.
- WANF Chao, LIU Liang, HE Shiping, et al. Early Paleozoic magmatism in west Kunlun: constraints from geochemical and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of the Bulong granite [J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(4): 997-1014.
- 王建平. 西昆仑塔什库尔干混杂岩地质特征及其大地构造意义[J]. 地质通报, 2008, 27(12): 2057-2066.
- WANG Jianping. Geological features and tectonic significance of melange zone in the Taxkorgan area, West Kunlun [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(12): 2057-2066.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1982, 14-15.
- 燕长海, 陈曹军, 曹新志, 等. 新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(4): 549-557.
- YAN Changhai, CHEN Caojun, CAO Xinzhi, et al. The discovery of the “Pamir-type” iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(4): 549-557.
- 杨文强, 刘良, 曹玉亭, 等. 西昆仑塔什库尔干印支期(高压)变质事件的确定及其构造地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(8): 1047-1060.
- YANG Wenqiang, LIU Liang, CAO Yuting, et al. Geochronological evidence of Indosinian (high-pressure) metamorphic event and its tectonic significance in Taxkorgan area of the Western Kunlun Mountains, NW China [J]. Sci China Earth Sci, 2010, 53: 1445-1459.
- 张传林, 于海锋, 王爱国, 等. 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, 2005, 79(5): 645-652.
- ZHANG Chuanlin, YU Haifeng, WANG Aiguo, et al. Dat-

- ing of Triassic Granites in the Western Kunlun Mountains and Its Tectonic Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(5): 645-652.
- 张传林, 陆松年, 于海锋, 等. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据 [J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(2): 145-154.
- ZHANG Chuanlin, LU Songnian, YU Haifeng, et al. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb geochronology [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(2): 145-154.
- 郑玉壮, 杨维文, 王腾. 新疆西昆仑早古生代侵入岩地球化学特征及地质意义 [J]. *西北地质*, 2013, 46(04): 57-65.
- ZHENG Yuzhuang, YANG Weiwen, WANG Teng. Geochemistry and geological significance of the intrusive rocks of Early Paleozoic in Western Kunlun, Xinjiang [J]. *Northwest Geology*, 2013, 46(04): 57-65.
- ALTHERR R, SIEBEL W. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(4): 397-415.
- BOLHAR R, WEAVER SD, WHITEHOUSE MJ, et al. Sources and evolution of arc magmas inferred from coupled O and Hf isotope systematics of plutonic zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 268(3-4): 312-324.
- CHAPPELL BW. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535-551.
- DOUCE AE, JOHNSTON AD. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 107, 202-218.
- FRANCALANCI L, TAYLOR SR, MCCULLOCH MT, et al. Geochemical and isotopic variations in the calc-alkaline rocks of Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea, Italy: constraints on magma genesis [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1993, 113(3): 300-313.
- GREEN TH. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4): 347-359.
- HARRIS NBW, PEARCE JA, TINDLE AG. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward MP and Reis AC (eds) [J], *Collision tectonics*, 1986, 19: 67-81.
- HU ZC, LIU YS, GAO S, et al. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X-skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27, 1391-1399.
- JI WH, LI RS, CHEN SJ, et al. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and its geological significance [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54: 61-72.
- JIA RY, JIANG YH, LIU Z, et al. Petrogenesis and tectonic implications of early Silurian high-K calc-alkaline granites and their potassic microgranular enclaves, western Kunlun orogen, NW Tibetan Plateau [J]. *International Geology Review*, 2013, 55: 958-975.
- LOAO SY, JIANG YH, JIANG SY, et al. Subducting sediment-derived arc granitoids: evidence from the Datong pluton and its quenched enclaves in the western Kunlun orogen, northwest China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2010, 100: 55-74.
- LIU YS, GAO S, HU Z, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51, 537-571.
- LIU Z, JIANG YH, JIA RY, et al. Origin of Middle Cambrian and Late Silurian potassic granitoids from the western Kunlun orogen, northwest China: a magmatic response to the Proto-Tethys evolution [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2014, 108: 91-110.
- LUDWIG KR. Isoplot/Ex, Version 3. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel; Berkeley [J]. Geochronology Center Berkeley, California, 2003.
- MANIAR PD, PICCOLI PM. Tectonic discrimination of

- granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101, 635-643.
- MATTE P, TAPPONNIER P, AMAUD N, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1996, 142: 311-330.
- MATTERN F, SCHNEIDER W. Suturing of the Proto- and paleo-Tethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18: 637-650.
- MÜLLER D, ROCK NM, GROVES DI. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study [J]. Mineralogy and Petrology, 1992, 46: 259-289.
- RAPP RP, WATSON EB. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. Journal of Petrology, 1995, 36(4): 891-931.
- ROBERTS MP, CLEMENS JD. Origin of high-potassium, talc-alkaline, I-type granitoids [J]. Geology, 1993, 21 (9): 825-828.
- SISSON TW, RATAJESKI K, HANKINS WB, et al. Volcanic granitic magmas from common basaltic sources [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 148, 635-661.
- SUN SS, McDonough WF. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- TAYLOR SR, McLennan SM. The continental crust: its composition and evolution [J]. 1985.
- PECCERILLO A, TAYLOR SR. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58, 63-81.
- PAN YS. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains [J]. Seismological Press, Beijing, China, 1996.
- PATINO Douce AE. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1999. 168: 55-75.
- WANG ZH. Tectonic evolution of the western Kunlun orogenic belt, western China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 24, 153-161.
- WHALEN JB, CURRIE KL, CHAPPELL BW. A-type granites-geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.
- WU FY, JAHN BM, WILDE SA, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis [J]. Lithos, 2003, 66(3/4): 241-273.
- XIAO B, LI QG, LIU SW, et al. Highly fractionated Late Triassic I-type granites and related molybdenum mineralization in the Qinling orogenic belt: Geochemical and U-Pb-Hf and Re-Os isotope constraints [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 56: 220-233.
- XIAO WJ, WINDLEY BF, HAO J, et al. Arc-ophiolite obduction in the Western Kunlun Range (China): implications for the Palaeozoic evolution of central Asia [J]. Journal of the Geological Society, 2002, 159, 517-528.
- XIAO WJ, WINDLEY BF, LIU DY, et al. Accretionary tectonics of the Western Kunlun Orogen, China: a Paleozoic-early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia [J]. The Journal of Geology, 2005, 113, 687-705.
- YE HM, LI XH, LI ZX, et al. Age and origin of high Ba-Sr appinite-granites at the northwestern margin of the Tibet Plateau: implications for early Paleozoic tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt [J]. Gondwana Research, 2008, 13, 126-138.