

# 新疆西天山科克赛岩体年代学、地球化学及地质意义\*

朱明田<sup>1</sup> 武广<sup>2,3\*\*</sup> 解洪晶<sup>4</sup> 刘军<sup>2</sup> 张连昌<sup>1</sup>

ZHU MingTian<sup>1</sup>, WU Guang<sup>2,3\*\*</sup>, XIE HongJing<sup>4</sup>, LIU Jun<sup>2</sup> and ZHANG LianChang<sup>1</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 河南省灵宝市金源矿业有限责任公司, 灵宝 472500

4. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Lingbao Jinyuan Mining Limited Liability Company, Henan Province, Lingbao 472500, China

4. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2010-05-10 收稿, 2011-08-22 改回.

**Zhu MT, Wu G, Xie HJ, Liu J and Zhang LC. 2011. Geochronology and geochemistry of the Kekesai intrusion in western Tianshan, NW China and its geological implications. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3041–3054**

**Abstract** Kekesai intrusion, located in the north of the Sayram block of western Tianshan, Xinjiang, is composed of monzogranite porphyry of high-K calc-alkaline series. This paper presents the new major and trace element geochemistry and Sr–Nd isotopic compositions of the monzogranite porphyry. The contents of SiO<sub>2</sub> (70.56% ~ 71.46%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15.27% ~ 16.01%), MgO (0.77% ~ 1.02%), Sr (363 × 10<sup>-6</sup> ~ 577 × 10<sup>-6</sup>), Y (7.40 × 10<sup>-6</sup> ~ 8.50 × 10<sup>-6</sup>), Yb (0.60 × 10<sup>-6</sup> ~ 0.72 × 10<sup>-6</sup>) together with the strongly fractionated REE patterns ((La/Yb)<sub>N</sub>: 14.99 ~ 23.69) and weak negative-, or positive-Eu anomalies (δEu: 0.88 ~ 1.21) indicate that the monzogranite porphyry shows characteristics of adakitic rock. The rocks have low I<sub>Sr</sub> (0.705078 ~ 0.705572), positive ε<sub>Nd</sub>(t) values (2.82 ~ 3.56) and young two-stage Nd-model age (774 ~ 835Ma). The LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb age of the monzogranite porphyry indicates that the intrusion was emplaced at the end of the Late Carboniferous (301.9 ± 1.8Ma). Element and isotope data demonstrate that the Kekesai intrusion was produced by the partial melting of juvenile Neoproterozoic lower crust and associated with initial stage of post-collision process.

**Key words** Zircon U-Pb age; Geochemistry; Adakitic rock; Thickened crust; Kekesai intrusion; Western Tianshan

**摘要** 新疆西天山科克赛岩体位于赛里木地块北部, 岩石类型为二长花岗斑岩, 属高钾钙碱性系列。元素地球化学组成表明, 该二长花岗斑岩主量元素 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 含量分别为 70.56% ~ 71.46%、15.27% ~ 16.01% 和 0.77% ~ 1.02%; 轻稀土元素富集 ((La/Yb)<sub>N</sub> 为 14.99 ~ 23.69), 重稀土元素亏损, δEu 值显示弱负异常或正异常 (0.88 ~ 1.21); 微量元素 Sr、Y 和 Yb 含量分别为 363 × 10<sup>-6</sup> ~ 577 × 10<sup>-6</sup>、7.40 × 10<sup>-6</sup> ~ 8.50 × 10<sup>-6</sup> 和 0.60 × 10<sup>-6</sup> ~ 0.72 × 10<sup>-6</sup>。上述特征显示二长花岗斑岩具有埃达克岩的地球化学特征。同位素地球化学特征表明该二长花岗斑岩具有较低的锶初始值 (I<sub>Sr</sub> = 0.705078 ~ 0.705572)、正的 ε<sub>Nd</sub>(t) 值 (2.82 ~ 3.56) 和相对年轻的两阶段 Nd 模式年龄 (774 ~ 835Ma)。锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄为 301.9 ± 1.8Ma, 表明岩体形成于晚石炭世末期。元素地球化学和同位素地球化学特征显示科克赛岩体为新元古代增生的地壳物质部分熔融的产物, 形成于晚石炭世后碰撞初期阶段。

**关键词** 锆石铀-铅年龄; 地球化学; 埃达克质岩; 加厚下地壳; 科克赛岩体; 西天山

中图法分类号 P588.121; P597.3

\* 本文受国家科技支撑计划项目(2007BAB25B03)和国家自然科学基金项目(41073037)联合资助。

第一作者简介: 朱明田, 男, 1982年生, 博士后, 矿床学和地球化学专业, E-mail: junrich@mail.com

\*\* 通讯作者: 武广, 男, 1965年生, 博士, 研究员, 矿床学和地球化学专业, E-mail: wuguang@gig.ac.cn

埃达克岩是一种地球化学特征和成因特殊的中酸性火成岩,其突出的地球化学特征是:  $\text{SiO}_2 > 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ 、 $\text{MgO} < 3\%$ 、Sr 含量高( $> 400 \times 10^{-6}$ )、贫 Y 和 Yb( $Y < 18 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ )、重稀土(HREE)明显亏损等(Defant and Drummond, 1990)。一般认为是俯冲大洋板片部分熔融产物(Defant and Drummond, 1990; Kay *et al.*, 1993; Sajona *et al.*, 2000; Martin *et al.*, 2005)。随着对埃达克岩研究的深入,研究者又提出其他几种成因模式,如基性岩浆分离结晶作用(Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006)、加厚和拆沉下地壳部分熔融(Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996; Johnson *et al.*, 1997; Xu *et al.*, 2002; Xiong *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2005, 2006; 张旗等, 2001; 王强等, 2001)以及玄武质岩浆底侵成因(赵振华等, 2006)等。总之埃达克岩产生最基本条件是地壳厚度应满足石榴角闪岩相或榴辉岩相稳定的最低深度(Garrison and Davidson, 2003)。

2000年以来,许多学者在西天山相继发现了埃达克岩和埃达克质岩,并探讨了构造背景(Xiong *et al.*, 2001; Zhao *et al.*, 2008; 王强等, 2006; 赵振华等, 2006; 李永军等, 2008)。Xiong *et al.* (2001)认为西天山阿吾拉勒埃达克质岩源于新底侵玄武岩的部分熔融,形成于二叠纪后碰撞环境;王强等(2006)发现天山北部地区石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 玄武岩组合并指出天山北部地区石炭纪可能为岛弧环境而非裂谷环境;赵振华等(2006)将新疆北部地区的埃达克岩划分为形成于泥盆纪-早石炭世( $\geq 320\text{Ma}$ )的洋壳俯冲型和形成于中晚二叠世( $< 280\text{Ma}$ )的玄武质岩浆底侵型 2 种类型,指出洋壳俯冲型形成于岛弧环境,而底侵型形成于后碰撞环境。这些埃达克岩和埃达克质岩的发现,对西天山晚古生代构造演化提供了新的证据。尽管如此,关于西天山及邻区晚古生代大地构造背景,尤其是石炭纪岩浆岩的产出环境,一直存在较大争议。一些研究者认为石炭纪火成岩形成于岛弧和活动大陆边缘环境(肖序常等, 1992; 张增杰等, 2003; 李锦轶等, 2006; 朱志新等, 2006; Wang *et al.*, 2007, 2009; Xiao *et al.*, 2008, 2010; Zhao *et al.*, 2008, 2009; de Jong *et al.*, 2009); 另一些研究者指出早石炭世火成岩形成于岛弧环境,而晚石炭世的火成岩形成于后碰撞背景(Gao *et al.*, 1998; Gao and Klemd, 2003; 龙灵利等, 2008; Sun *et al.*, 2008; 韩宝福等, 2010; Han *et al.*, 2010); 王京彬和徐新(2006)认为,早石炭世-晚二叠世期间新疆北部属于后碰撞环境;还有部分研究者认为古亚洲洋在早石炭世已经闭合,早石炭世早期开始,天山及邻区进入内陆裂谷演化阶段(车自成等, 1996; 顾连兴等, 2000; Xia *et al.*, 2004)或发育地幔柱(夏林圻等, 2008)。西天山及邻区晚古生代大地构造背景、火成岩成因研究直接关系到对该区成矿地质背景的正确认识。科克赛矿床是近年来在西天山地区新发现的斑岩型铜钼矿床,目前仍处于勘查阶段(张玉萍等, 2008)。本文拟通过科克赛矿区内的二长花岗斑岩的岩石学、岩石地球化

学、同位素地球化学和 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作,探讨科克赛岩体成因和地球动力学背景。

## 1 地质背景和岩体特征

科克赛岩体位于西天山北缘,大地构造位置属于哈萨克斯坦板块的巴尔喀什-准噶尔微板块之巴尔喀什南缘活动陆缘的赛里木地块(何国琦等, 2004)。赛里木地块呈北西向西展布于中、哈边境地区,东西长约 350km,南北宽 60~80km,它的东、北、西南 3 面被滨巴尔喀什泥盆纪-石炭纪残余洋盆围限,东南与博罗霍洛岛弧相邻(图 1)。地块东部中国境内出露的最古老地层是古元古界温泉群,主要由角闪片岩、二云母片岩、斜长角闪岩、黑云母斜长片麻岩、云母石英片岩、眼球状片麻岩等组成,形成于 1.93~2.01Ga 之间,构成了地块的古元古代结晶基底(陈义兵等, 1999);中、新元古界主要由产叠层石的蓟县系库松木切克群和青白口系开尔塔斯群组成,为碳酸盐岩-泥岩建造,属于古元古代结晶基底上的第一盖层;再上,为不整合覆盖的震旦系砂岩、砂质泥岩及冰碛层;下古生界出露寒武系和奥陶系,以灰岩、泥质-硅质岩、粉砂岩及含磷岩层为主,岩性稳定、厚度不大,不整合或平行不整合于震旦系之上;上古生界主要分布于地块北部,自下而上为中泥盆统汗吉尔组砾岩、砂岩、粉砂岩,上泥盆统托斯库尔他乌组砂岩、粉砂岩、放射虫硅质泥质岩,下石炭统阿克萨克组砂岩、粉砂岩、含角砾晶屑岩屑凝灰岩,上石炭统东图津河组砂岩、粉砂岩,下二叠统辉石安山岩、玄武安山岩,它们构成了汗吉尔拗褶带(何国琦等, 2004; 张玉萍等, 2008),科克赛岩体就位于该拗褶带中。赛里木地块内侵入岩发育,晋宁期花岗岩片麻岩出露于赛里木湖以东,其结晶年龄为 798Ma(陈义兵等, 1999);加里东期侵入岩主要分布于温泉县西南,以晚奥陶世英云闪长岩、花岗闪长岩为主;华力西期侵入岩以花岗闪长岩和花岗岩为主,与该区斑岩型、矽卡岩型铜钼矿化关系密切,成岩时代为中泥盆世-早二叠世。区内褶皱和断裂构造发育,褶皱构造以复式背斜为主,多呈北西向西展布;断裂构造主要为北东向和北西向,以逆断层和平移断层为主,其中北西向断裂是重要的导矿和容矿构造(张玉萍等, 2008)。

科克赛岩体呈岩株状产出,东西长约 600m,南北宽约 260m,侵入于上泥盆统托斯库尔他乌组沉凝灰岩中(图 2)。该岩体岩石类型为二长花岗斑岩,与科克赛铜钼矿床的成矿关系密切。二长花岗斑岩呈斑状结构(图 3),斑晶以石英、斜长石、钾长石和黑云母为主,约占岩石总量的 80%。石英斑晶呈他形粒状,见熔蚀现象,大小 0.5~3.5mm,含量 20%;斜长石斑晶呈自形-半自形板状,聚片双晶和环带发育,有些发生绢云母化,大小 0.5×1~2×2.5mm,含量 30%;钾长石斑晶可见简单双晶,多数黏土化,含量 25%;黑云母浅褐-褐多色性,有些发生绿泥石化,含量 5%。基质由与斑晶成分相同的微晶组成,总量约占岩石的 20%,其中石英含量 10%,

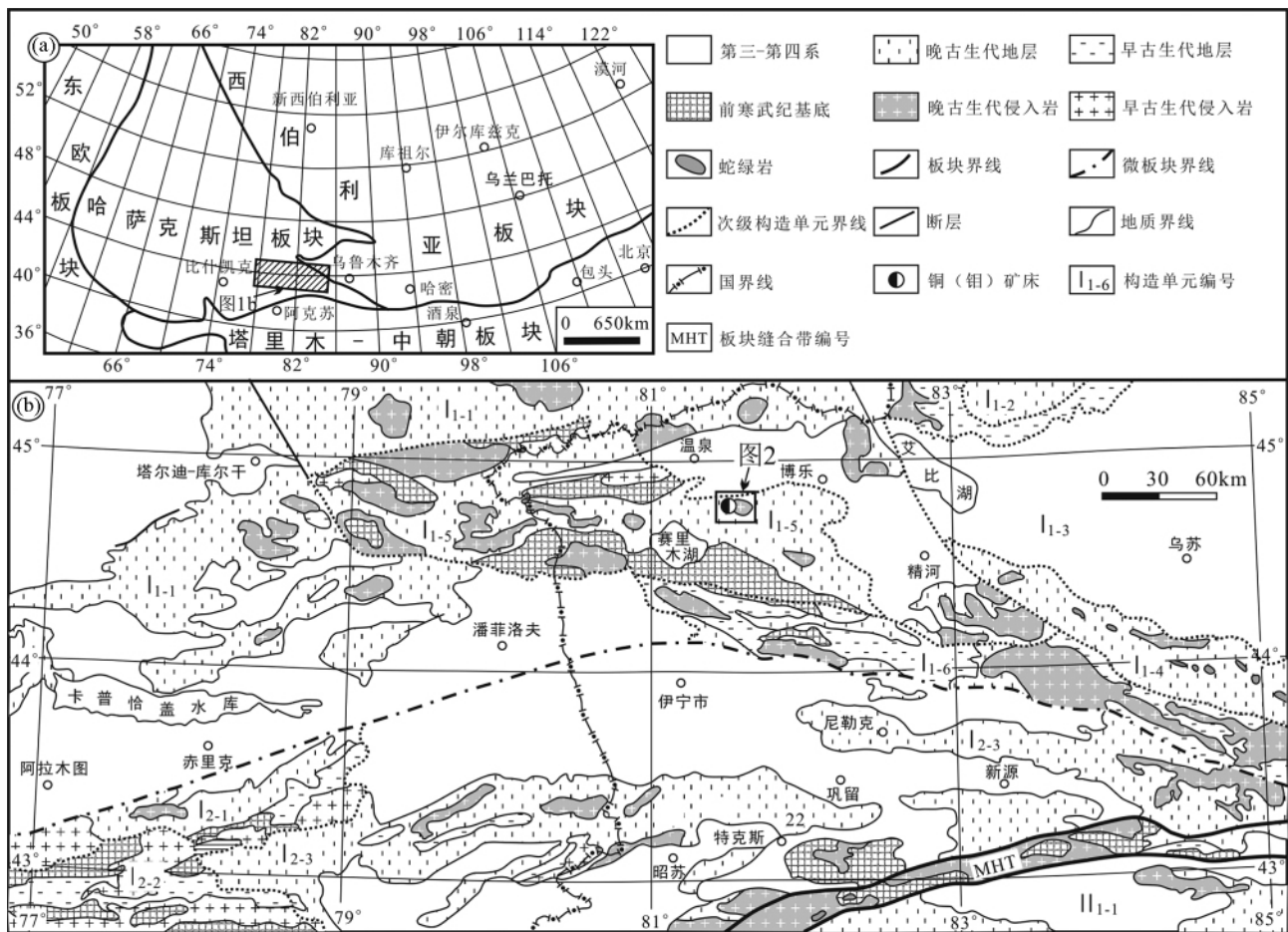


图1 西天山及邻区大地构造位置(a 据李锦轶等 2009 资料改编; b 据何国琦等 2004 资料改编)

构造单元名称: I<sub>1-1</sub>-滨巴尔喀什泥盆-石炭纪残余洋盆; I<sub>1-2</sub>-达拉布特-克拉麦里泥盆-石炭纪残余洋盆; I<sub>1-3</sub>-准噶尔中央地块; I<sub>1-4</sub>-依连哈比尔尔晚古生代残余洋盆; I<sub>1-5</sub>-赛里木地块; I<sub>1-6</sub>-博罗霍洛岛弧; I<sub>2-1</sub>-吉尔吉斯-捷尔斯克伊-那拉提早古生代岛弧; I<sub>2-2</sub>-伊赛克地块; I<sub>2-3</sub>-伊犁石炭-二叠纪裂谷; II<sub>1-1</sub>-塔里木北缘古生代活动陆缘; MHT-木扎尔特-红柳河板块缝合带

Fig. 1 Simplified regional geological map of western Tianshan and its neighboring areas (a, modified after Li *et al.*, 2009; b, modified after He *et al.*, 2004)

Tectonic units: I<sub>1-1</sub>-Devonian-Carboniferous peri-Balkhash remnant oceanic basin; I<sub>1-2</sub>-Devonian-Carboniferous Darbut-Karamaili remnant oceanic basin; I<sub>1-3</sub>-Junggar central massif; I<sub>1-4</sub>-Late Paleozoic Eren Habirga remnant oceanic basin; I<sub>1-5</sub>-Sayram massif; I<sub>1-6</sub>-Borohoro island arc; I<sub>2-1</sub>-Early Paleozoic Kirghizskiy-Chirski-Nalati island arc; I<sub>2-2</sub>-Issyk massif; I<sub>2-3</sub>-Carboniferous-Permian Yili rift; II<sub>1-1</sub>-Paleozoic active continental margin of northern Tarim; MHT, Muzart-Hongliuhe plate suture zone

斜长石含量 2%, 钾长石含量 8%, 粒度 0.05mm。副矿物可见 榍石、锆石、绿泥石和铁质矿物等。

## 2 样品采集和分析方法

横穿岩体采集岩石样品, 选取其中较新鲜的 13 件样品进行岩石地球化学分析。岩石主量、稀土和微量元素测试由国土资源部廊坊地球物理地球化学勘查研究所完成。其中全岩主量元素采用 XRF 分析, 稀土和微量元素采用 ICP-MS 分析。主量元素分析精度优于 3%, 稀土和微量元素分析精

度优于 5%。岩石 Sr、Nd 同位素在中国科学院广州地球化学研究所超净实验室进行前处理, Sr 和 REE 分离采用 AG50-8X 离子交换柱, 分别收集 Sr 和 REE 解析液; REE 的分离采用 HDEHP 交换柱, 收集 Nd 解析液。测试在北京大学造山带与地壳演化实验室完成, 所用实验仪器为 VG Axiom HR-MC-ICP-MS, Sr 和 Nd 同位素比值用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  作质量分馏校正。实验室对 Sr 标样 NIST SRM987 测定结果为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710255 \pm 15(2\sigma)$ , 对 Nd 标样 Shin-Etsu JNd-I 测定结果为  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512121 \pm 9(2\sigma)$ 。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  的测试精度优于 2% 和 0.5%。

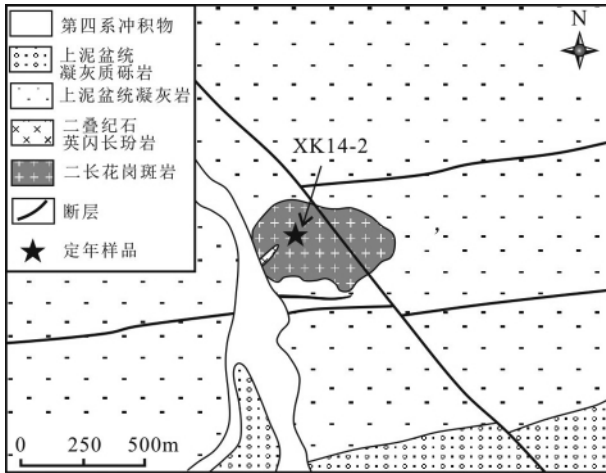


图2 西天山科赛岩体地质图  
Fig. 2 Sketch geological map of the Kekesai intrusion

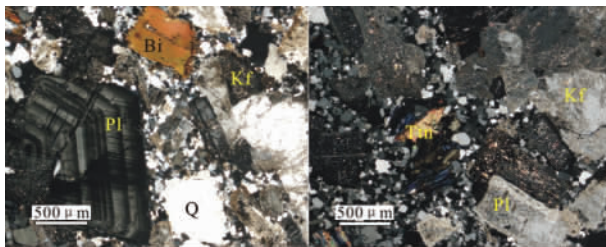


图3 二长花岗斑岩显微照片  
Q-石英; Pl-斜长石; Kf-钾长石; Bi-黑云母; Ttn-榍石. 正交偏光  
Fig. 3 Photomicrographs from the monzogranite porphyry  
Q-quartz; Pl-plagioclase; Kf-K-feldspar; Bi-biotite; Ttn-titanite. crossed polars

锆石颗粒选自二长花岗斑岩(XK14-2,图2),通过常规的重液和磁选进行初选,在双目镜下挑出晶形和透明度较好的锆石,然后将锆石置于环氧树脂中,磨制约一半大小,使锆石内部暴露,用于阴极发光和 LA-MC-ICP-MS 分析。锆石阴极发光在中国地质科学院地质研究所电子探针实验室完成; LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成,锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。详细实验流程参见侯可军等(2009),锆石年龄谱和图采用 ISOPLOT 3.0 程序获得。

### 3 锆石 U-Pb 年龄

在双目镜下观察锆石均呈淡黄色、玻璃光泽、透明-半透明、无包体,锆石表面光滑,大多呈双锥状,棱角分明,大小 50~150 μm,长宽比 1.5~3。阴极发光图像显示出典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构(图4),属于岩浆结晶的产物,有些锆石内部含有不规则的残留核。

锆石 LA-MC-ICP-MS 分析结果(表1)显示,锆石的 U 和 Th 含量分别介于  $228 \times 10^{-6}$  ~  $1034 \times 10^{-6}$  和  $105 \times 10^{-6}$  ~  $538 \times 10^{-6}$  之间,Th/U 比值介于 0.34~0.56 之间,大于 0.1,亦显示典型的岩浆成因锆石特征。在一致曲线图中,该样品主要存在 2 组年龄。其中 5 个锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $301.9 \pm 1.8\text{Ma}$ ,MSWD = 0.27,3 个锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄的加权平均值为  $383 \pm 15\text{Ma}$ ,MSWD = 3.4(图5)。结合锆石内部结构的图像特征,我们认为  $383 \pm 15\text{Ma}$  的年龄为岩浆上升过程中捕获的锆石年龄, $301.9 \pm 1.8\text{Ma}$  的年龄代表岩体的结晶年龄,而  $278.8\text{Ma}$  年龄则可能由铅丢失或后期热液活动引起。

表1 二长花岗斑岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 Zircon U-Pb LA-MC-ICP-MS data for the monzogranite porphyry of the Kekesai intrusion

测点号	Th( $\times 10^{-6}$ )	U( $\times 10^{-6}$ )	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄( Ma)	1σ	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1σ
XK14-2-1	266	645	0.41	303.7	2.0	0.34869	0.00263	0.04824	0.00033
XK14-2-2	492	1020	0.48	301.9	2.1	0.34612	0.00252	0.04795	0.00034
XK14-2-3	334	781	0.43	301.7	2.5	0.34811	0.00335	0.04791	0.00041
XK14-2-4	419	921	0.46	374.2	3.8	0.45545	0.00525	0.05977	0.00063
XK14-2-5	105	228	0.46	385.7	2.3	0.47894	0.00455	0.06165	0.00038
XK14-2-6	182	533	0.34	386.2	6.1	0.47028	0.00752	0.06174	0.00100
XK14-2-7	442	787	0.56	301.2	1.7	0.34550	0.00249	0.04783	0.00028
XK14-2-8	225	480	0.47	278.8	2.6	0.32341	0.00444	0.04420	0.00042
XK14-2-9	538	1034	0.52	301.1	2.2	0.34360	0.00266	0.04782	0.00034

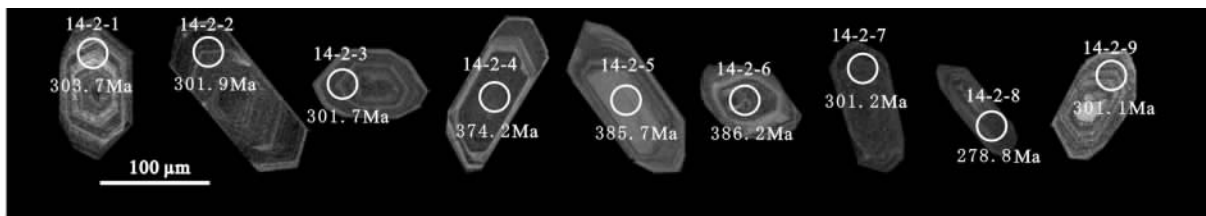


图4 二长花岗斑岩中锆石的形态及分析点位图

Fig. 4 Cathodoluminescence ( CL) images of zircons for the monzogranite-porphry

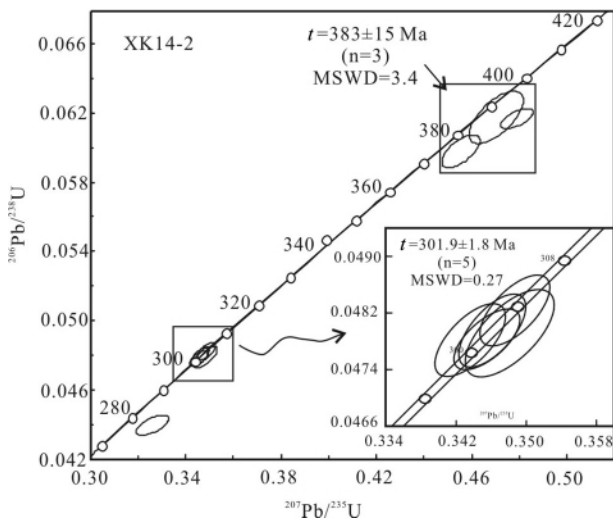


图5 二长花岗斑岩锆石的 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Concordia diagrams of LA-MC-ICP-MS U-Pb zircon dating results for the monzogranite porphyry

## 4 元素和同位素地球化学

### 4.1 元素地球化学

主量、微量和稀土元素分析结果列于表 2。

科克赛二长花岗斑岩的  $\text{SiO}_2$  含量介于 70.56% ~ 71.46% 之间,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高 ( 15.27% ~ 16.01% ),  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  介于 0.92 ~ 1.66 之间, 绝大多数样品大于 1;  $\text{MgO}$  含量低 ( 0.77% ~ 1.02% ),  $\text{Mg}^\#$  介于 46 ~ 56 之间, 铝指数 ( ASI ) 介于 1.23 ~ 1.39 之间, 全部大于 1.10。在花岗岩类实际矿物含量 QAP 分类图解 ( 图 6a ) 中, 全部样品落入二长花岗斑岩区域; 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解 ( 图 6b ) 中, 全部落入高钾钙碱性系列区域。

二长花岗斑岩稀土元素总量介于  $64.87 \times 10^{-6} \sim 110.2 \times 10^{-6}$  之间。岩石以轻稀土富集和强烈亏损重稀土为特征 ( 表 2、图 7a )  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  介于 15.0 ~ 23.7 之间,  $\text{Yb}$  含量较低 (  $0.60 \times 10^{-6} \sim 0.72 \times 10^{-6}$  )  $\delta\text{Eu}$  介于 0.88 ~ 1.2, 显示微弱负铕异常和正铈异常。

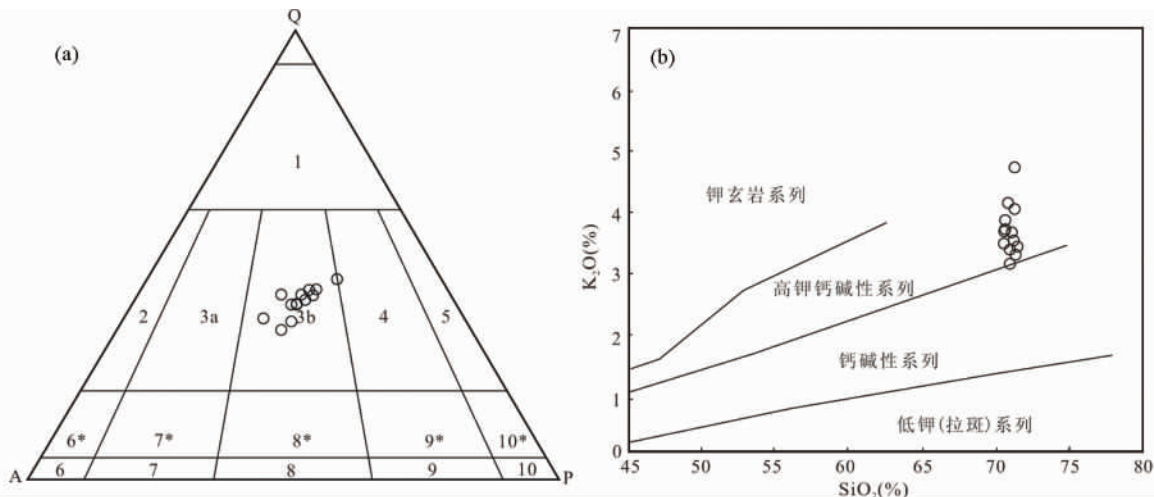


图6 花岗岩类实际矿物含量 QAP 分类图解 ( a , 据 Streckeisen , 1976 ) 和  $\text{SiO}_2$  与  $\text{K}_2\text{O}$  关系图解 ( b 据 Peccerillo and Taylor , 1976 )

1-富石英花岗岩; 2-碱长花岗岩; 3a-花岗岩; 3b-二长花岗斑岩; 4-花岗闪长岩; 5-英云闪长岩

Fig. 6 Diagrams of QAP ( a , after Streckeisen , 1976 ) and  $\text{K}_2\text{O}$  versus  $\text{SiO}_2$  ( b , after Peccerillo and Taylor , 1976 )

1-quartz-rich granite; 2-alkalin-feldspar granite; 3a-granite; 3b-monzogranite; 4-granodiorite; 5-tonalite

表2 二长花岗斑岩主量元素(wt%)、稀土元素及微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果Table 2 The analyzed data of major (wt%), rare earth and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) for the monzogranite porphyry

样品号	XK2-1	XK2-2	XK8-2	XK9-1	XK10-1	XK11-1	XK12-1	XK12-2	XK13-1	XK13-2	XK14-1	XK14-2	XK15-1
SiO <sub>2</sub>	70.63	70.88	71.20	71.12	71.29	70.95	70.95	71.46	71.32	70.56	71.35	70.57	70.63
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.36	0.37	0.32	0.31	0.38	0.35	0.35	0.36	0.36	0.38	0.37	0.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.74	15.66	15.40	15.27	15.49	15.98	16.01	15.60	15.57	15.91	15.83	15.90	15.61
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.70	0.56	0.01	0.43	0.40	0.65	0.58	0.52	0.75	0.48	0.51	0.65	0.82
FeO	1.19	1.11	1.78	1.26	0.76	1.11	1.35	1.14	0.87	1.33	1.14	1.26	1.14
MnO	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
MgO	1.02	0.92	0.99	0.77	0.80	1.00	0.92	0.92	1.00	0.93	0.91	0.99	0.92
CaO	1.72	1.33	1.71	1.74	1.34	2.24	1.33	1.89	1.61	1.93	1.95	2.04	1.61
Na <sub>2</sub> O	3.04	3.14	3.07	3.15	2.83	3.39	3.32	3.18	2.95	3.15	3.34	3.19	3.13
K <sub>2</sub> O	3.83	4.12	3.49	3.63	4.70	3.12	3.35	3.39	4.02	3.65	3.26	3.43	3.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
LOI	1.34	1.55	1.66	1.94	1.81	1.03	1.50	1.21	1.14	1.32	1.09	1.30	1.78
Total	99.70	99.73	99.77	99.71	99.81	99.95	99.75	99.75	99.70	99.73	99.86	99.80	99.76
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.26	1.31	1.14	1.15	1.66	0.92	1.01	1.07	1.36	1.16	0.98	1.08	1.18
A/CNK	1.28	1.30	1.29	1.24	1.27	1.23	1.39	1.26	1.28	1.26	1.26	1.26	1.29
Mg <sup>#</sup>	50	50	51	46	56	51	47	50	53	48	51	49	47
La	25.3	18.5	17.6	16.8	14.9	16.9	16.0	16.2	17.6	16.4	16.4	19.2	18
Ce	48.6	35.2	34.4	32.6	27.8	32.5	31.3	31.2	34.2	32.4	31.7	37	34.2
Pr	5.5	4.0	3.9	3.7	3.0	3.7	3.7	3.6	3.9	3.7	3.7	4.1	3.9
Nd	20.0	14.8	14.3	13.8	11.3	13.4	13.5	13.2	14.5	13.7	14.2	14.9	14.2
Sm	3.26	2.73	2.63	2.42	2.00	2.42	2.42	2.42	2.63	2.42	2.63	2.63	2.52
Eu	0.86	0.78	0.75	0.70	0.74	0.75	0.73	0.75	0.75	0.75	0.79	0.76	0.7
Gd	2.70	2.19	2.18	2.00	1.74	2.03	1.97	2.02	2.13	2.11	2.06	2.18	2.05
Tb	0.36	0.31	0.32	0.28	0.26	0.29	0.30	0.29	0.31	0.29	0.3	0.31	0.3
Dy	1.66	1.40	1.57	1.27	1.25	1.40	1.47	1.41	1.37	1.42	1.48	1.43	1.41
Ho	0.29	0.26	0.29	0.24	0.24	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.26
Er	0.81	0.67	0.77	0.63	0.69	0.71	0.70	0.69	0.72	0.72	0.73	0.74	0.73
Tm	0.11	0.09	0.12	0.10	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.1	0.11
Yb	0.72	0.62	0.72	0.60	0.67	0.67	0.69	0.69	0.65	0.67	0.61	0.62	0.68
Lu	0.10	0.09	0.11	0.08	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
ΣREE	110.2	81.63	79.63	75.17	64.87	75.19	73.18	72.86	79.19	74.98	75.02	84.33	79.13
δEu	0.88	0.96	0.95	0.96	1.2	1.0	1.0	1.0	0.96	1.0	1.0	0.96	0.93
(La/Yb) <sub>N</sub>	23.7	20.1	16.5	18.9	15.0	17.0	15.6	15.8	18.3	16.5	18.1	20.9	17.9
Sr	447	385	419	390	363	527	402	490	487	457	577	526	379
Rb	104	113	89	89	113	86	97	94	100	97	91	99	104
Ba	572	511	449	466	483	411	415	406	458	473	446	496	469
Th	9.8	6.5	5.6	5.4	5.6	5.6	5.7	6.0	6.2	6.2	5.2	6.3	6.5
Nb	5.5	5.0	5.2	5.0	4.4	5.5	5.1	4.8	4.1	5.0	4.9	5.0	5.2
Zr	151	151	134	141	132	158	149	159	141	158	146	154	142
Cs	6.7	5.7	5.6	6.4	8.5	8.6	7.9	6.5	6.8	7.9	6.3	7.0	7.0
Ga	19.5	18.6	18.0	17.4	17.4	20.3	19.1	18.4	18.3	19.0	18.4	18.7	18.9
Hf	4.72	4.88	4.09	4.33	3.95	4.70	4.57	4.73	4.14	4.88	4.50	4.61	4.47
Sc	5.5	5.0	5.3	4.6	4.8	5.6	5.1	5.3	5.3	5.4	5.2	5.4	5.3
Cr	13.1	9.4	11.7	6.6	7.5	12.2	12.8	11.0	11.7	11.7	7.4	11.9	13.1
V	31.0	29.0	29.4	24.5	25.4	36.5	30.3	30.3	32.2	32.9	32.3	34.4	32.2
Ni	7.4	5.7	8.4	4.8	6.4	8.9	6.9	11.2	6.9	8.1	6.2	7.8	7.7
Co	3.7	4.0	5.2	3.9	3.8	3.8	4.8	4.0	4.1	8.8	4.4	4.6	5.8
U	2.0	2.1	2.1	1.2	1.7	1.3	1.4	1.7	1.9	2.4	1.3	1.5	1.4
Y	8.5	7.5	8.4	7.4	7.4	7.7	7.6	7.6	7.8	7.9	7.8	7.9	7.7
Ta	0.43	0.41	0.38	0.39	0.38	0.39	0.41	0.36	0.30	0.39	0.36	0.41	0.47

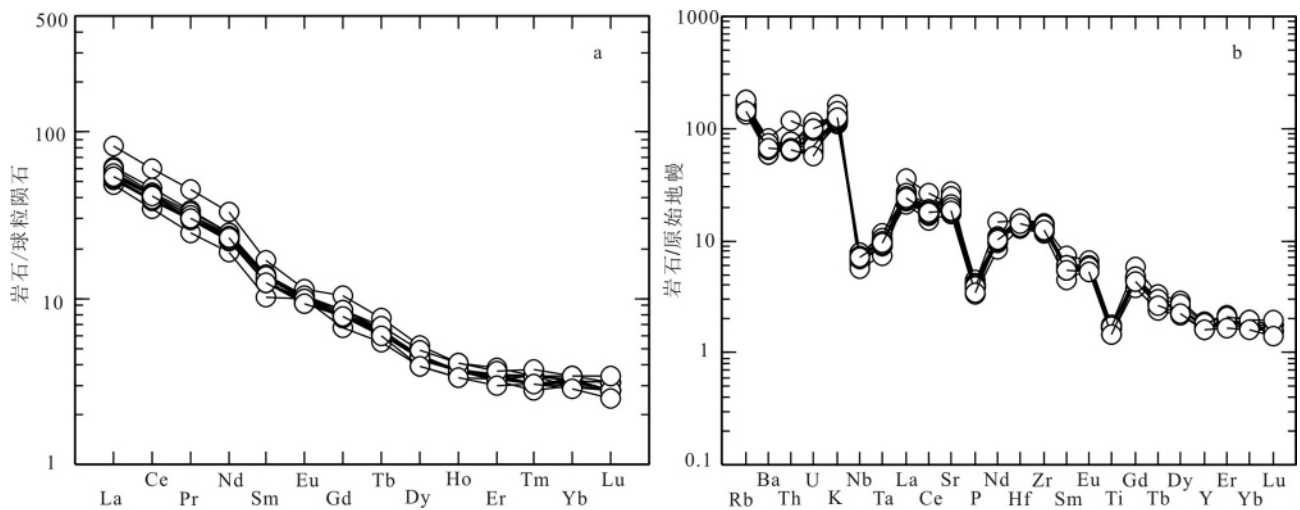


图7 二长花岗斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a, 标准化值据 Boynton, 1984) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b 标准化值据 McDonough *et al.*, 1992)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a, chondrite normalization vaules after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b, primitive mantle normalization vaules after McDonough *et al.*, 1992) of the monzogranite porphyry

表3 二长花岗斑岩 Sr-Nd 同位素分析结果及主要参数

Table 3 The Sr-Nd isotopic determination data and some major parameters for the monzogranite porphyry

样品号	岩性	Rb( × 10 <sup>-6</sup> )	Sr( × 10 <sup>-6</sup> )	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>s</sub>	I <sub>Sr</sub>	ε <sub>Sr</sub> (t)
XK2-1		104	447	0.67215	0.708451	0.705572	20.38
XK5-1		110	146	2.18691	0.714825	0.705458	18.75
XK6-1	二长花岗斑岩	115	206	1.61660	0.712002	0.705078	13.25
XK13-1		100	487	0.59598	0.707757	0.705204	15.15
XK14-1		91	577	0.45718	0.707278	0.705320	16.79

样品号	Sm( × 10 <sup>-6</sup> )	Nd( × 10 <sup>-6</sup> )	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>s</sub>	( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>i</sub>	ε <sub>Nd</sub> (t)	f <sub>Sm/Nd</sub>	t <sub>DM1</sub> (Ma)	t <sub>DM2</sub> (Ma)
XK2-1	3.26	20.00	0.09862	0.512589	0.512395	2.82	-0.50	745	835
XK5-1	2.52	14.08	0.10844	0.512638	0.512424	3.40	-0.45	743	788
XK6-1	2.31	13.27	0.10552	0.512632	0.512424	3.39	-0.46	732	788
XK13-1	2.63	14.49	0.10977	0.512618	0.512402	2.95	-0.44	782	824
XK14-1	2.63	14.18	0.11214	0.512654	0.512433	3.56	-0.43	746	774

注: ε<sub>Nd</sub>(t) = [(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>s</sub> / (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub> - 1] × 10000, f<sub>Sm/Nd</sub> = (<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd) / (<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub> - 1  
 t<sub>DM1</sub> = 1/λ × ln{1 + [(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>s</sub> - 0.51315] / [(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd) - 0.2135]}; t<sub>DM2</sub> = t<sub>DM1</sub> - t ( (f<sub>cc</sub> - f<sub>s</sub>) / (f<sub>cc</sub> - f<sub>DM</sub>) ); f<sub>cc</sub> = -0.4;  
 f<sub>DM</sub> = 0.08592  
 (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub> = 0.512638; (<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub> = 0.1967; (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub> = 0.51315; (<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub> = 0.2135

二长花岗斑岩富集大离子亲石元素(LILE), 如 Rb、Th、U、K 和 LREE; 亏损高场强元素(HFSE), 如 Nb、Ta、P、Ti、HREE 等; Ba 弱亏损; Sr 含量介于 363 × 10<sup>-6</sup> ~ 577 × 10<sup>-6</sup> 之间, 多数表现出弱富集特征; Y 含量较低, 介于 7.40 × 10<sup>-6</sup> ~ 8.50 × 10<sup>-6</sup> 之间; 岩石具有较高的 Sr/Y 比值(变化于 49 ~ 74 之间, 平均 58); 在微量元素蛛网图上显示强烈的 Nb、Ta、P、Ti 亏损(图 7b)。

#### 4.2 同位素地球化学

5 件二长花岗斑岩样品 Sr、Nd 同位素测试数据及参数计算结果列于表 3。

二长花岗斑岩 I<sub>Sr</sub> 介于 0.705078 ~ 0.705572 之间, 低于现今大陆壳 I<sub>Sr</sub> 平均值 0.719, 主体落在幔源火成岩的 I<sub>Sr</sub> 值(0.7020 ~ 0.7060) 范围之内。二长花岗斑岩的 ε<sub>Nd</sub>(t) 介于

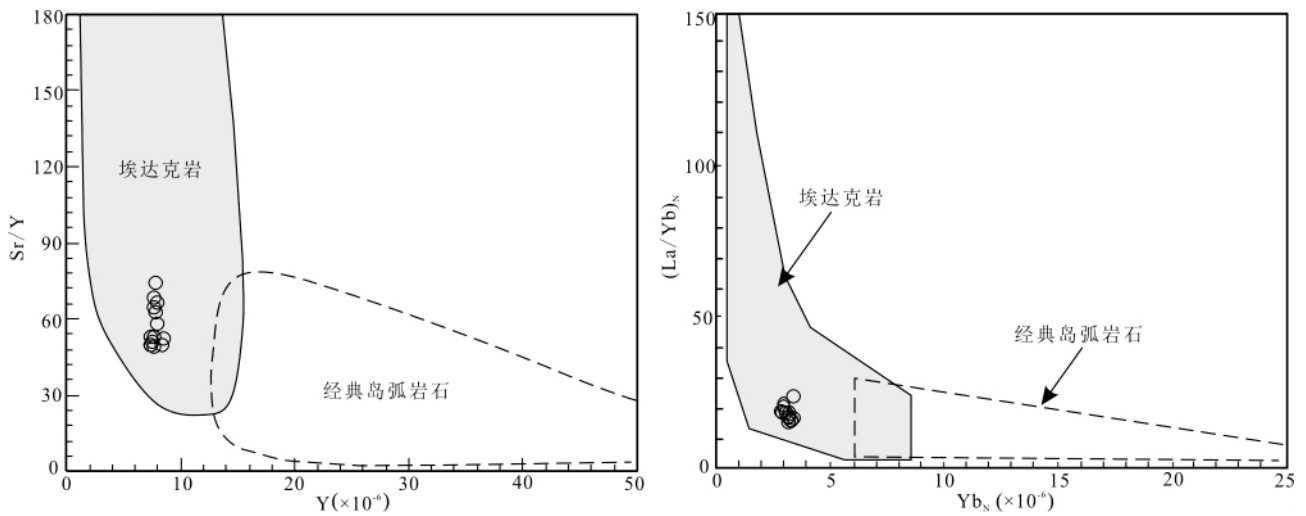


图8 科克赛二长花岗斑岩 Sr/Y-Y 和  $(La/Yb)_N$ - $Yb_N$  判别图(埃达克岩和经典岛弧岩石区据 Defant and Drummond, 1990 和 Martin *et al.* 2005)

Fig. 8 Plots of Sr/Y vs. Y and  $(La/Yb)_N$  vs.  $Yb_N$  for the monzogranite porphyry (fields of adakites and classic island arc magmatic rocks are from Defant and Drummond, 1990; Martin *et al.*, 2005)

2.82 ~ 3.56 之间, 远高于 Jahn *et al.* (1999) 归纳出的华北克拉通古老下地壳的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 (-44 ~ -32), 而与东北地区 and 兴蒙造山带显生宙花岗岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值接近(普遍大于 0, 平均值为 +2.0, 吴福元等, 1997; Hong *et al.*, 2004), 对应的两阶段 Nd 模式年龄为 774 ~ 835 Ma。二长花岗斑岩  $f_{Sm/Nd}$  变化范围不大 (-0.50 ~ -0.43), 说明源区的稀土元素 Sm、Nd 分馏不明显。

## 5 讨论

### 5.1 成岩物质来源

科克赛二长花岗斑岩地球化学数据表明其具有埃达克质岩特征, 如  $SiO_2$  (70.56% ~ 71.46%) > 56%、 $Al_2O_3$  (15.27% ~ 16.01%) > 15%、 $MgO$  (0.77% ~ 1.02%) < 3%; Sr 含量介于  $363 \times 10^{-6}$  ~  $577 \times 10^{-6}$ , 多数大于  $400 \times 10^{-6}$ , 高 Sr/Y (49 ~ 74)、 $(La/Yb)_N$  (14.99 ~ 23.69) 和低的 Y ( $7.40 \times 10^{-6}$  ~  $8.50 \times 10^{-6}$  <  $18 \times 10^{-6}$ )、Yb ( $0.60 \times 10^{-6}$  ~  $0.72 \times 10^{-6}$  <  $1.9 \times 10^{-6}$ ) 含量。在埃达克岩判别图上, 样品都落在埃达克岩区域(图 8)。

科克赛地区二长花岗斑岩具有较低的铈初始比值和较高的钕初始比值, 显示源区物质有较多的地幔成分或新增生的地壳物质。在  $I_{Sr-\epsilon_{Nd}}(t)$  图解(图 9a)中, 样品点均位于洋岛玄武岩区域; 在  $t_{DM}-\epsilon_{Nd}(t)$  图解(图 9b)中, 研究区样品全部落入中亚造山带范围内。前人针对中亚造山带显生宙花岗岩类普遍具有较高的  $\epsilon_{Nd}(t)$  正值的原因提出了一系列模型: 诸如由新生的新元古代地壳深熔形成古生代-中生代花岗岩(吴福元等, 1997); 高度分异的幔源岩浆与古老地壳物质混合, 新生的基性地壳物质与古老地壳物质的混合(Jahn

*et al.*, 2000); 幔源基性岩浆同化地壳物质并同时发生结晶分异(赵振华等, 1996; 周泰禧等, 1996); 幔源岩浆底侵作用和直接分异(韩宝福等, 1999); 大洋岩石圈及其派生物质(如与俯冲有关的弧岩岩浆及弧前沉积物)与古陆壳混合物的重熔(李锦轶等, 2007)等。一般认为, 由地幔部分熔融直接形成中-酸性岩的可能性极小(Martin, 1999)。科克赛二长花岗斑岩具有高的  $SiO_2$  含量(平均 70.99%), 低的  $MgO$  含量(平均 0.93%) 及低的 Cr (平均  $10.8 \times 10^{-6}$ )、Ni (平均  $7.4 \times 10^{-6}$ ) 和 V (平均  $30.8 \times 10^{-6}$ ) 含量, 而且野外未见到同期幔源岩浆形成的基性、超基性杂岩, 表明二长花岗斑岩主要是地壳物质部分熔融形成的。岩石具有较低的铈初始比值、较高的钕初始比值、正的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值及相对年轻的亏损地幔 Nd 模式年龄, 同世界其他地区地壳来源的花岗岩形成鲜明的对比,  $t_{DM}$  介于 774 ~ 835 Ma, 这与由蛇绿岩和岛弧杂岩时代所记录的古亚洲洋大规模扩张的时间基本一致(Dobretsov *et al.*, 1995), 其来源可能是新元古代由亏损地幔衍生出来不久的年轻地壳物质。所以, 笔者认为二长花岗斑岩源区应该是新元古代增生的地壳物质。

### 5.2 岩石成因

科克赛地区二长花岗斑岩可以借助埃达克质岩石的成因模型探讨其成因。埃达克质岩的主要成因模型包括: (1) 俯冲洋壳的部分熔融(Defant and Drummond, 1990; Kay *et al.*, 1993; Rapp *et al.*, 1999; Sajona *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006; 张连昌等, 2006); (2) 加厚下地壳的部分熔融(Atherton and Petford, 1993; Muir *et al.*, 1995; Petford and Atherton, 1996; Johnson *et al.*, 1997; 张旗等, 2001; 王强等, 2001; Xiong *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2005; 武广等,



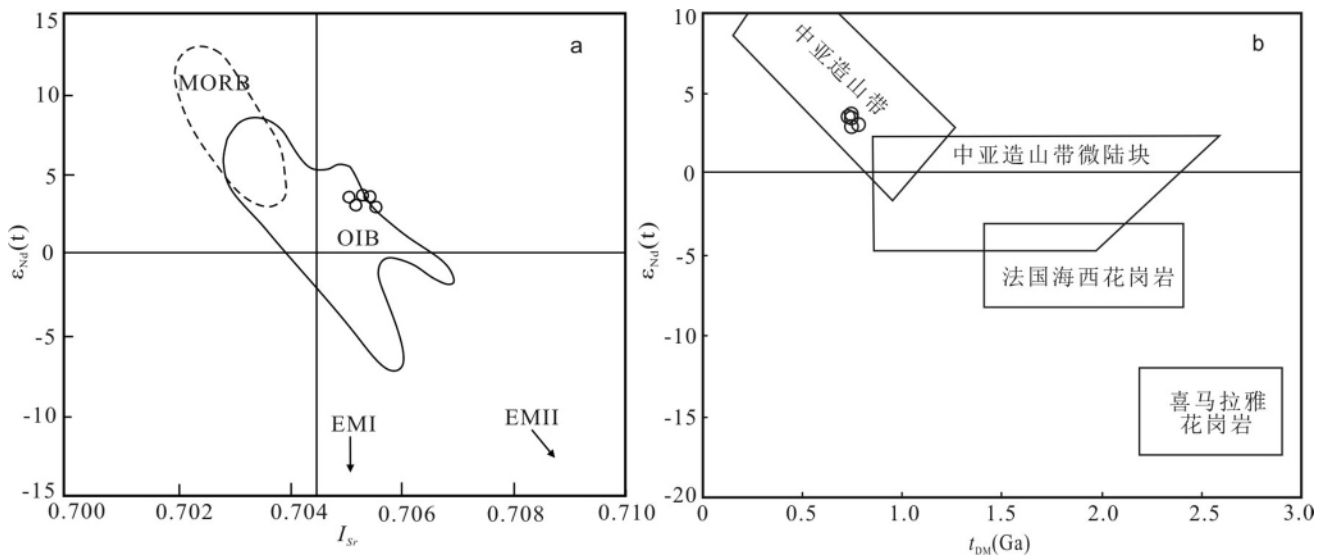


图9 二长花岗斑岩 Sr-Nd 同位素关系图解

(a)  $I_{Sr}$ - $\epsilon_{Nd}(t)$  关系图(据 Zindler and Hart, 1986); (b)  $\epsilon_{Nd}(t)$ - $t_{DM}$  关系图. MORB-大洋中脊玄武岩; OIB-洋岛玄武岩; EM I -富集地幔 I 型; EM II -富集地幔 II 型

Fig. 9 Sr-Nd correlation diagrams of the monzogranite porphyry

(a) -diagram of  $I_{Sr}$  versus  $\epsilon_{Nd}(t)$  (after Zindler and Hart, 1986); (b) -diagram of  $\epsilon_{Nd}(t)$  versus  $t_{DM}$ . MORB-Mid Ocean Ridge Basalt; OIB-Ocean Island Basalt; EM I -Enriched Mantle I; EM II -Enriched Mantle II

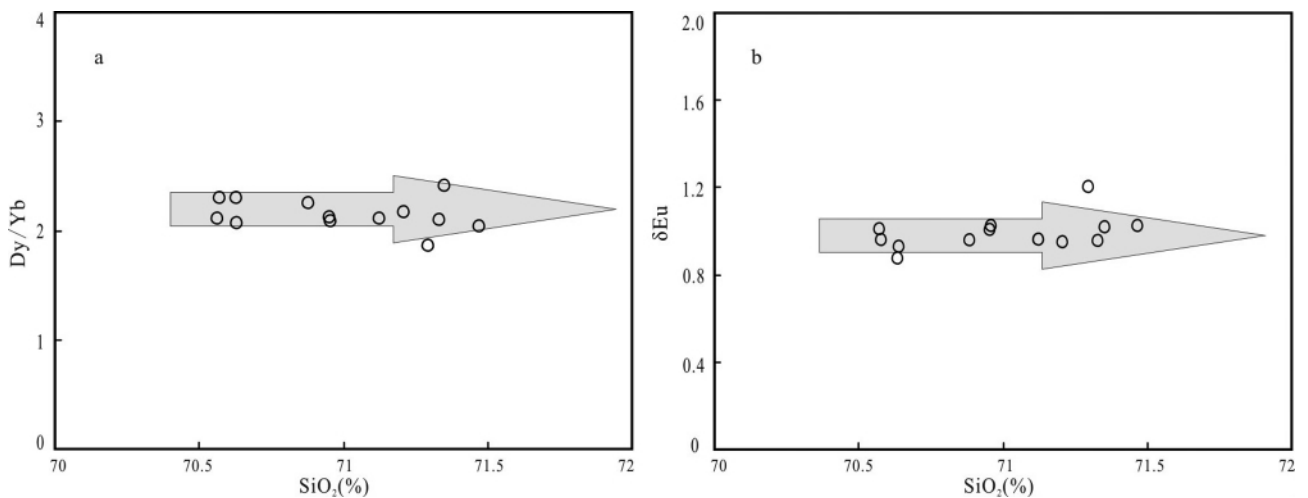


图10 科克赛二长花岗斑岩 Dy/Yb-SiO<sub>2</sub>(a) 和 δEu-SiO<sub>2</sub>(b) 图解

Fig. 10 Plots of Dy/Yb vs. SiO<sub>2</sub>(a) and δEu vs. SiO<sub>2</sub>(b) for the monzogranite porphyry

2008); (3) 拆沉下地壳熔融( Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006); (4) 镁铁质岩浆分离结晶作用( Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006)。

Castillo *et al.* (1999) 认为, 埃达克岩可以在低压下通过基性岩浆分离结晶作用形成。低压下斜长石、角闪石的分离结晶会使 MREE 和 HREE 之间产生向下凹的稀土配分模式, 且 Dy/Yb 随 SiO<sub>2</sub> 增高呈降低趋势, 而科克赛岩体不具备此特征(图 6、图 10a), 且岩体无明显 Eu 异常, 在 δEu-SiO<sub>2</sub>(图

10b) 上 δEu 随 SiO<sub>2</sub> 增长呈水平变化, 也不支持斜长石的分离结晶。高压下基性岩浆通过角闪石和石榴石分离结晶也会产生埃达克岩浆( Macpherson *et al.*, 2006) 对于角闪石和石榴石来说, Yb 具有比 Y 更高的分配系数, 因此角闪石或石榴石的分离结晶就会导致残留熔体中 Y/Yb 的升高, 而科克赛岩体的 Y/Yb 变化不大( 11.01 ~ 12.79 ), 与分离结晶模式相悖。并且在研究区不存在与科克赛岩体同期形成的大量镁铁质岩石, 也否定了分离结晶模式的可能性。俯冲洋壳部

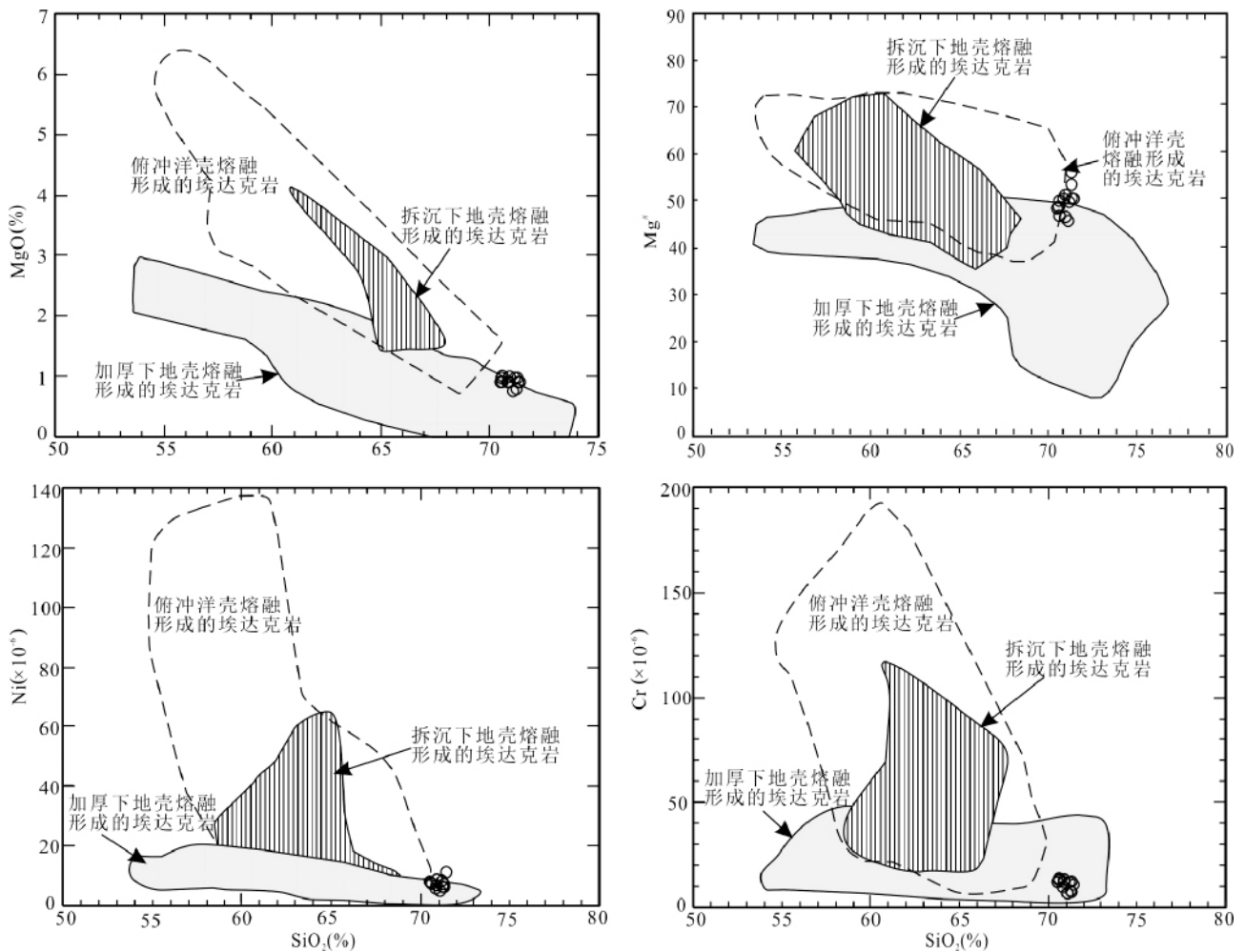


图 11 科克赛二长花岗斑岩  $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 、 $\text{Mg}^\#-\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ni}-\text{SiO}_2$  及  $\text{Cr}-\text{SiO}_2$  图解

图中俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩引自 Wang *et al.* (2006) 拆沉下地壳熔融形成的埃达克岩引自 Xu *et al.* (2002), Wang *et al.* (2004), Wang *et al.* (2006), 加厚下地壳熔融形成的埃达克岩引自 Atherton and Petford (1993), Muir *et al.* (1995), Petford and Atherton (1996), Johnson *et al.* (1997), Xiong *et al.* (2003)

Fig. 11 Plots of  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mg}^\#$ ,  $\text{Ni}$  and  $\text{Cr}$  vs.  $\text{SiO}_2$  for the monzogranite porphyry

Field of subducted oceanic crust derived adakite is from Wang *et al.* (2006); field of delaminated lower crust derived adakite is from Xu *et al.* (2002), Wang *et al.* (2004), and Wang *et al.* (2006); field of thickened lower crust derived adakite is from Atherton and Petford (1993), Muir *et al.* (1995), Petford and Atherton (1996), Johnson *et al.* (1997), and Xiong *et al.* (2003)

分熔融形成的熔体应具有类似 MORB 的 Sr-Nd 同位素组成 (Stern and Kilian, 1996; Sajona *et al.*, 2000) 而在图 9a 中,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值明显较 MORB 小, 指示其不可能源于洋壳的部分熔融。拆沉下地壳部分熔融形成的熔体, 在上升过程中不可避免会与其上部地幔相互作用, 形成的岩浆具较高的 MgO、Cr、Ni 含量 (Smithies, 2000; Prouteau *et al.*, 2001; Martin *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2006), 科克赛二长花岗斑岩较低的 MgO、Cr、Ni 含量及高  $\text{SiO}_2$  含量表明其不可能源于拆沉下地壳的部分熔融。加厚下地壳部分熔融可能是其形成机制, 在图 11 中, 样品也基本都投在加厚下地壳熔融区域。高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值及强烈亏损重稀土元素且中、重稀土之间没

有呈现向下凹的分布特征表明部分熔融过程中, 源区残留石榴石而不存在斜长石 (Rollinson, 1993), 这也正是岩体无明显 Eu 异常的原因。通过新生下地壳部分熔融产生这种岩浆需要具备两个基本条件: 一是要达到保持石榴石稳定的地壳厚度 (Rapp and Watson, 1995; Petford and Atherton, 1996); 二是要有足够的热源促使地壳部分熔融。科克赛岩体形成于地壳加厚背景, 足以满足石榴石残留相的稳定范围。软流圈地幔上涌的加热作用以及由于地壳增厚引发的热提供了新生下地壳部分熔融所需要的热量。

### 5.3 成岩构造背景

天山及邻区石炭纪-二叠纪火成岩曾被认为形成于裂谷

(车自成等,1996; Xia *et al.*, 2004) 或地幔柱环境(夏林圻等 2008) 但天山北部地区石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 玄武岩组合(320~334Ma Zhao *et al.*, 2008) 及石炭纪巴音沟蛇绿岩(325~344Ma 徐学义等 2006a, b) 的发现,均表明泥盆纪-早石炭世晚期(>320Ma) 西天山地区仍处于洋壳俯冲阶段(肖序常等,1992; 王强等 2006; Zhao *et al.*, 2008)。韩宝福等(2010) 及 Han *et al.* (2010) 获得侵位于北天山蛇绿杂岩中的四棵树“钉合岩体”的锆石 U-Pb 年龄为 316Ma, 认为北天山缝合带的形成时代可能是在早-晚石炭世之交,即介于 325~316Ma 之间;北天山在 325~316Ma 期间处于同碰撞构造背景,316~270Ma 处于后碰撞构造背景。Tang *et al.* (2010) 通过对喇嘛苏-达巴特地区岩浆岩研究,认为西北天山地区在晚泥盆世-晚石炭世为大陆弧环境,在早二叠世(~290Ma) 进入后碰撞阶段。朱永峰等(2006) 认为西天山地区晚泥盆世-早石炭世的火山弧自西向东逐渐消亡,取而代之的是晚石炭世的碰撞后富钾岩浆喷发,晚石炭世及之后二叠纪,天山地区发育以二叠纪双峰式火山岩为标志的大陆裂谷构造。Sun *et al.* (2008) 研究了阿吾拉勒地区的侵入岩和火山岩,获得正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 312Ma, 认为晚石炭世期间西天山处于俯冲汇聚到伸展的转换环境。陈衍景等(2004) 认为新疆北部地区多岛海在晚石炭世全面闭合消失,发生了以多块体拼贴碰撞为特征的中亚型造山作用。张作衡等(2008)、唐功建等(2008) 获得西天山达巴特 A 型花岗斑岩的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 279 和 289Ma, 认为晚石炭世末-早二叠世初,西天山进入板块碰撞-板内伸展阶段。Zhao *et al.* (2009) 认为阿吾拉勒地区 260~278Ma 的底侵型埃达克质岩石形成于后碰撞伸展环境。

由科克赛岩体成因可知,该岩体是加厚下地壳而非俯冲洋壳部分熔融的产物,因此不可能形成于俯冲背景。该岩体主要岩石类型为二长花岗斑岩,虽然岩石具有较高的铝饱和指数(ASI 多数大于 1.1),但是薄片未发现原生富铝矿物,如白云母、堇青石、红柱石等,考虑到岩石遭受了不同程度的蚀变,因此我们认为该岩体的过铝性是由于岩石遭受绢云母化蚀变的结果。科克赛岩体原始地幔标准化蛛网图显示富集 LILE,亏损 HFSE, Nb、P、Ti 明显亏损特征,与后碰撞 I 型花岗岩微量元素特征相似(Kuster and Harms, 1998) 科克赛岩体属于后碰撞花岗岩类。科克赛岩体形成时间在四棵树“钉合岩体”之后,北达巴特 A 型花岗岩之前,因此科克赛岩体最可能形成于主碰撞造山之后的后碰撞初期阶段。

## 6 结论

(1) 科克赛二长花岗斑岩的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄为 302Ma, 该岩体形成于晚石炭世末期。

(2) 科克赛二长花岗斑岩具有埃达克质岩的地球化学特征,最可能是加厚下地壳部分熔融的产物。岩石具有较低的锶初始比值(0.705078~0.705572)、较高的钕初始比值

(0.512395~0.512433)、正的  $\varepsilon_{Nd}(t)$  值(2.82~3.56) 及相对年轻的 2 阶段 Nd 模式年龄(774~835Ma), 暗示其岩浆源区应该是新元古代增生的地壳物质。

(3) 科克赛岩体形成于后碰撞初期阶段,表明古亚洲洋在西天山地区于晚石炭世已经闭合。

致谢 野外工作得到新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一区调大队杨屹高级工程师的大力支持;新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局科技处李凤鸣教授级高级工程师、中国地质调查局基础研究部李景春研究员提供了相关资料;锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年工作得到中国地质科学院矿产资源研究所侯可军副研究员的帮助;论文写作过程中与北京大学陈衍景教授,中国科学院广州地球化学研究所熊小林、王强研究员进行了多次探讨,使笔者受益颇多;在此一并致以诚挚的感谢。

## References

- Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144-146
- Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Elements Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63-114
- Castillo PR, Janney PE and Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 33-51
- Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1996. Review on the ancient Yili rift, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 478-489 (in Chinese with English abstract)
- Chen YB, Hu AQ, Zhang GX and Zhang QF. 1999. Zircon U-Pb age and Nd-Sr isotopic composition of granitic gneiss and its geological implications from Precambrian window of western Tianshan, NW China. *Geochimica*, 28(6): 515-520 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Bao JX, Zhang ZJ and Liu YL. 2004. Tectonic setting and element geochemistry of the Aikendaban Formation volcanic rocks in West Tianshan. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 36-45 (in Chinese with English abstract)
- de Jong K, Wang B, Faure M, Shu LS, Cluzel D, Charvet J, Ruffet G and Chen Y. 2009. New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on the Late Palaeozoic tectonic evolution of the western Tianshan (Xinjiang, northwestern China), with emphasis on Permian fluid ingress. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1239-1258
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662-665
- Dobretsov NL, Berzin NA and Buslov MM. 1995. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean. *International Geology Reviews*, 37: 335-360
- Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ and He GQ. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287: 213-231
- Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints. *Lithos*, 66: 1-22
- Garrison JM and Davidson JP. 2003. Dubious case for slab melting in the northern volcanic zone of the Andes. *Geology*, 31: 565-568
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Li HY, Xiao XJ and Yan ZF. 2000.

- Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 16 (3): 305–316 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin. *Science in China (Series D)*, 42(2): 113–119
- Han BF, Guo ZJ, Zhang ZC, Zhang L, Chen JF and Song B. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a Late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 627–640
- Han BF, Guo ZJ and He GQ. 2010. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2233–2246 (in Chinese with English abstract)
- He GQ, Cheng SD, Xu X, Li JY and Hao J. 2004. An Introduction to the Explanatory Text of the Map of Tectonics of Xinjiang and Its Neighbouring Areas. Beijing: Geological Publishing House, 1–110 (in Chinese with English abstract)
- Hong DW, Zhang JS, Wang T, Wang SG and Xie XL. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 799–813
- Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28 (4): 481–492 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157: 119–146
- Jahn BM, Griffin WL and Windley R. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328: VII–X
- Johnson K, Barnes CG and Miller CA. 1997. Petrology, geochemistry, and genesis of high-Al tonalite and trondhjemites of the Cornucopia stock, Blue Mountains, Northeastern Oregon. *Journal of Petrology*, 38(11): 1585–1611
- Kay SM, Ramos VA and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *Journal of Geology*, 101: 703–714
- Kuster D and Harms U. 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the late Neo-proterozoic East African Orogen: A review. *Lithos*, 45: 177–195
- Li JY, He GQ, Xu X, Li HQ, Sun GH, Yang TN, Gao LM and Zhu ZX. 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148–168 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (3): 565–582 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Zhang J, Yang TN, Li YP, Sun GH, Zhu ZX and Wang LJ. 2009. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian orogenic region and its adjacent areas. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 584–605 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Gu PY, Pang ZJ, Luan XD and Tong LL. 2008. Identification of the adakite rocks of Kulesayi series and its significance of Mo prospecting in the Tekesidaban of western Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2713–2719 (in Chinese with English abstract)
- Long LL, Gao J, Qian Q, Xiong XM, Wang JB, Wang YW and Gao LM. 2008. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from Yili region, western Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 699–710 (in Chinese with English abstract)
- Macpherson CG, Dreher S and Thirlwall MF. 2006. Adakites without slab melting: high pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 581–593
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1–24
- McDonough WF, Sun SS, Ringwood AE, Jagoutz E and Hofmann AW. 1992. Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 1001–1012
- Muir RJ, Weaver SD, Bradshaw, JD, Eby GN and Evans JA. 1995. Geochemistry of the Cretaceous Separation Plint Batholith, New Zealand: Granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *J. Geol. Soc. Lond.*, 152: 689–701
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 68–81
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37: 1491–1521
- Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M and Maury RC. 2001. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature*, 410: 197–200
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335–356
- Rollinson HR. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Singapore: Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., 1–352
- Sajona FG, Maury RC, Pubellier M, Leterrier J, Bellon H and Cotten J. 2000. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54: 173–206
- Smithies RH. 2000. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182: 115–125
- Stern CR and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral volcanic zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263–281
- Streckeisen AL. 1976. Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: A provisional attempt. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 1: 1–15
- Sun LH, Wang YJ, Fan WM and Zi JW. 2008. Post-collisional potassic magmatism in the Southern Awulale Mountain, western Tianshan Orogen: Petrogenetic and tectonic implications. *Gondwana Research*, 14: 383–394
- Tang GJ, Chen HH, Wang Q, Zhao ZH, Wyman DA, Jiang ZQ and Jia XH. 2008. Geochronological age and tectonic background of the Dabate A-type granite pluton in the West Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 947–958 (in Chinese with English abstract)
- Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Sun M, Li ZX, Zhao ZH, Sun WD, Jia XH and Jiang ZQ. 2010. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic magmatic rocks in the Lamasu-Dabate area, northwestern Tianshan (west China): Evidence for a tectonic transition from arc to post-collisional setting. *Lithos*, 119: 393–411
- Wang B, Shu LS, Cluzel D, Faure M and Charvet J. 2007. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): Implication for the tectonic evolution of Western Tianshan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 148–159
- Wang B, Cluzel D, Shu LS, Faure M, Charvet J, Chen Y, Meffre S and de Jong K. 2009. Evolution of calc-alkaline to alkaline magmatism

- through Carboniferous convergence to Permian transcurrent tectonics, western Chinese Tianshan. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1275 – 1298
- Wang JB and Xu X. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang. *China. Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23 – 31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL and Xu JF. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrites, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30(4): 353 – 362 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZH, Bao ZW, Xu W and Xiong XL. 2004. Cretaceous high potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal*, 38: 417 – 434
- Wang Q, McDermott F, Xu JF, Bellon H and Zhu YT. 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanics in the Hohxil area, northern Tibet: Lower crustal melting in an intracontinental setting. *Geology*, 33: 465 – 468
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47: 119 – 144
- Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Wyman DA, Xiong XL, Zi F and Bai ZH. 2006. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt and Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 11 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Jahn BM and Lin Q. 1997. Isotopic characteristics of the postorogenic granites in orogenic belt of northern China and their implications in crustal growth. *Chinese Science Bulletin*, 43(5): 420 – 424
- Wu G, Chen YJ, Sun FY, Li JC, Li ZT and Wang XJ. 2008. Geochemistry of the Late Jurassic granitoids in the northern end area of Da Hinggan Mountains and their geological and prospecting implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 899 – 910 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2008. Petrogenesis of Carboniferous-Early Permian rift-related volcanic rocks in the Tianshan and its neighboring area, northwestern China. *Northwestern Geology*, 41(4): 1 – 68 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 419 – 433
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen HL, Li ZL, Li JL and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 102 – 117
- Xiao WJ, Huang BC, Han CM, Sun S and Li JL. 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. *Gondwana Research*, 18: 253 – 273
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 169 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH, Mei HJ, Wang YX, Wang Q, Xu JF, Niu HC and Bao ZW. 2001. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust. *Chinese Science Bulletin*, 46(10): 811 – 817
- Xiong XL, Li XH, Xu JF, Li WX, Zhao ZH, Wang Q and Chen XM. 2003. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate: The Late Cretaceous Zhantang andesites in the Huichang basin, SE China. *Geochemical Journal*, 37: 233 – 252
- Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Papp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rock in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30: 1111 – 1114
- Xu XY, Xia LQ, Ma ZP, Wang YB, Xia ZC, Li XM and Wang LS. 2006a. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the plagiogranites from Bayingou ophiolite in North Tianshan Mountains and the petrogenesis of the ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 83 – 94 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Li XM, Ma ZP, Xia LQ, Xia ZC and Peng SX. 2006b. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of gabbro from the Bayingou ophiolite in the northern Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(8): 1168 – 1176 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Xiao WJ, Qin KZ and Zhang Q. 2006. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: Trace element and Sr-Nd-Pd isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 41: 188 – 200
- Zhang LC, Wan B, Jiao XJ and Zhang R. 2006. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar. *Geology in China*, 33(3): 626 – 631 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan Period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236 – 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YP, Wang R and Wang DG. 2008. Keersai granite-diorite-porphry body zircon SHRIMP U-Pb dating and the prospecting significance. *Xinjiang Geology*, 26(4): 340 – 342 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZH, Wang ZL, Zuo GC, Liu M, Wang LS and Wang JW. 2008. Ages and tectonic settings of the volcanic rocks in Dabate ore district in West Tianshan Mountains and their constraints on the porphyry-type mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1494 – 1503 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZJ, Chen YJ, Chen HY, Bao JX and Liu YL. 2003. The petrochemical characteristics of the Hercynian granitoids in Tianshan and its geodynamic implications. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23(1): 15 – 24 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Wang ZG, Zou TR and Masuda A. 1996. Study on petrogenesis of alkali-rich intrusive rocks of Ulungur, Xinjiang. *Geochimica*, 25(3): 205 – 220 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Wang Q, Xiong XL, Zhang HX, Niu HC, Xu JF, Bai ZH and Qiao YL. 2006. Two types of adakites in north Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica* 22(5): 1249 – 1265 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Wyman DA, Bao ZW, Bai ZH and Qiao YL. 2008. Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China. *Lithos*, 102: 374 – 391
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Bai ZH and Qiao YL. 2009. Late Paleozoic underplating in North Xinjiang: Evidence from shoshonites and adakites. *Gondwana Research*, 16: 216 – 226
- Zhou TX, Chen JF and Li XM. 1996. Origin of high  $\varepsilon_{Nd}(t)$  granites from Alatao mountain, Xinjiang. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 71 – 79 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zhou J and Guo X. 2006. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1341 – 1350 (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZX, Wang KZ, Xu D, Su YL and Wu YM. 2006. SHRIMP U-Pb dating of zircons from Carboniferous intrusive rocks on the active continental margin of Eren Habirga, West Tianshan, Xinjiang, China and its geological implication. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 986 – 991 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 14: 493 – 571

## 附中文参考文献

车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1996. 论伊犁古裂谷. *岩石学报*, 12

- (3): 478 - 489
- 陈衍景, 鲍景新, 张增杰, 刘玉琳. 2004. 西天山艾肯达坂组火山岩系的元素地球化学特征和构造环境. 矿物岩石 24(3): 36 - 45
- 陈义兵, 胡霏琴, 张国新, 张前锋. 1999. 西天山前寒武纪天窗花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及 Nd-Sr 同位素特征. 地球化学 28(6): 515 - 520
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 李宏宇, 肖新建, 严正富. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. 岩石学报, 16(3): 305 - 316
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基地的性质. 中国科学(D辑) 29(1): 16 - 21
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “缝合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限. 岩石学报 26(8): 2233 - 2246
- 何国琦, 成守德, 徐新, 李锦轶, 郝杰. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图说明书. 北京: 地质出版社, 1 - 65
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质 28(4): 481 - 492
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. 地质学报 80(1): 148 - 168
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报 23(3): 565 - 582
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 李亚萍, 孙桂华, 朱志新, 王励嘉. 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化. 吉林大学学报(地球科学版) 39(4): 584 - 605
- 李永军, 辜平阳, 庞振甲, 栾新东, 佟丽莉. 2008. 西天山特克斯达坂库勒萨依序列埃达克岩的确立及钼矿找矿意义. 岩石学报, 24(12): 2713 - 2719
- 龙灵利, 高俊, 钱青, 熊贤明, 王京彬, 王玉往, 高立明. 2008. 西天山伊犁地区石炭纪火山岩地球化学特征及构造环境. 岩石学报, 24(4): 699 - 710
- 唐功建, 陈海红, 王强, 赵振华, Wyman DA, 姜子琦, 贾小辉. 2008. 西天山达巴特 A 型花岗岩的形成时代与构造背景. 岩石学报 24(5): 947 - 958
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报, 80(1): 23 - 31
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学 30(4): 353 - 362
- 王强, 赵振华, 许继峰, Wyman DA, 熊小林, 资峰, 白正华. 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义. 岩石学报 22(1): 11 - 30
- 吴福元, 江博明, 林强. 1997. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义. 科学通报 42(20): 2188 - 2192
- 武广, 陈衍景, 孙丰月, 李景春, 李之彤, 王希今. 2008. 大兴安岭北端晚侏罗世花岗岩类地球化学及其地质和找矿意义. 岩石学报, 24(4): 899 - 910
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2008. 天山及邻区石炭纪-早二叠世裂谷火山岩岩石成因. 西北地质 41(4): 1 - 68
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1 - 169
- 徐学义, 夏林圻, 马中平, 王彦斌, 夏祖春, 李向民, 王立社. 2006a. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究. 岩石学报 22(1): 83 - 94
- 徐学义, 李向民, 马中平, 夏林圻, 夏祖春, 彭素霞. 2006b. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世: 来自辉长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的证据. 地质学报 80(8): 1168 - 1176
- 张连昌, 万博, 焦学军, 张锐. 2006. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义. 中国地质 33(3): 626 - 631
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报 17(2): 236 - 244
- 张玉萍, 王瑞, 王德贵. 2008. 新疆博乐科克赛花岗岩闪长斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及找矿意义. 新疆地质 26(4): 340 - 342
- 张增杰, 陈衍景, 陈华勇, 鲍景新, 刘玉林. 2003. 天山海西期不同类型花岗岩类地球化学特征及其地球动力学意义. 矿物岩石 23(1): 15 - 24
- 张作衡, 王志良, 左国朝, 刘敏, 王龙生, 王见碓. 2008. 西天山达巴特矿区火山岩的形成时代、构造背景及对斑岩型矿化的制约. 地质学报 82(11): 1494 - 1503
- 赵振华, 王中刚, 邹天人, 增田彰正. 1996. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨. 地球化学 25(3): 205 - 220
- 赵振华, 王强, 熊小林, 张海祥, 牛贺才, 许继峰, 白正华, 乔玉楼. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. 岩石学报 22(5): 1249 - 1265
- 周泰禧, 陈江峰, 李学明. 1996. 新疆阿拉套山花岗岩类高  $\epsilon_{Nd}$  值的成因探讨. 地质科学 31(1): 71 - 79
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报 22(5): 1341 - 1350
- 朱志新, 王克卓, 徐达, 苏延龙, 吴玉门. 2006. 依连哈比尔山石炭纪侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. 地质通报 25(8): 986 - 991