

doi: 10.12029/gc20220518

高栋, 吴才来, 郜源红, 吴迪, 郑坤, 徐楠, 陈红杰. 2022. 南阿尔金玉苏普阿勒克塔格花岗岩体成因及其对区域早古生代构造演化的启示[J]. 中国地质, 49(5): 1636–1655.

Gao Dong, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Di, Zheng Kun, Xu Nan, Chen Hongjie. 2022. Genesis of the Yusupualeke Tagh granitic pluton in the South Altun and its implications for the regional Early Paleozoic tectonic evolution[J]. *Geology in China*, 49(5): 1636–1655(in Chinese with English abstract).

南阿尔金玉苏普阿勒克塔格花岗岩体成因及其对区域早古生代构造演化的启示

高栋^{1,2}, 吴才来¹, 郜源红¹, 吴迪³, 郑坤¹, 徐楠¹, 陈红杰⁴

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 4. 郑州大学, 河南 郑州 450001)

摘要:【研究目的】玉苏普阿勒克塔格花岗岩体位于阿尔金造山带南部茫崖蛇绿混杂岩带内, 主要由中粗粒似斑状黑云二长花岗岩及中细粒含斑黑云二长花岗岩组成。玉苏普阿勒克塔格岩体的形成时代、成因类型和岩浆物质来源尚不明确, 制约了我们进一步认识该岩体形成的地球动力学背景以及南阿尔金造山带早古生代构造演化过程。【研究方法】因此, 本文对玉苏普阿勒克塔格岩体进行了岩石学、锆石 U–Pb 年代学、全岩地球化学、黑云母矿物化学及 Hf 同位素组成等方面的研究。【研究结果】锆石 U–Pb 年代学研究结果表明该岩体中粗粒似斑状黑云二长花岗岩的锆石 U–Pb 加权平均年龄为 451~447 Ma。结合前期工作获得该岩体中细粒含斑黑云二长花岗岩的年龄(430~423 Ma), 笔者认为玉苏普阿勒克塔格花岗岩体属于早古生代岩浆活动的产物。黑云母矿物化学研究结果表明, 玉苏普阿勒克塔格岩体形成于温度较低压力较高环境。根据玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩的矿物组成、全岩地球化学特征及形成的物理化学环境, 认为该岩体属于 I 型花岗岩。Hf 同位素组成研究结果表明, 玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩具有相似的 Hf 同位素组成, 暗示它们具有相似的物质来源: 源岩以新生地壳的部分熔融为主, 在侵位过程中经历了部分古老地壳物质的混染。【结论】综合玉苏普阿勒克塔格花岗岩体的形成时代、成因类型、物质来源, 结合区域构造演化资料, 本文认为玉苏普阿勒克塔格岩体形成于与南阿尔金洋北向俯冲有关的活动大陆边缘环境。

关键词: 花岗岩; 锆石 U–Pb 年龄; Hf 同位素组成; 构造意义; 地质调查工程; 玉苏普阿勒克塔格; 南阿尔金造山带

创 新 点: 玉苏普阿勒克塔格花岗岩体形成于早古生代, 源岩以新生地壳的部分熔融为主, 形成于与南阿尔金洋北向俯冲有关的活动大陆边缘环境。

中图分类号: P597; P619.22⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)05-1636-20

Genesis of the Yusupualeke Tagh granitic pluton in the South Altun and its implications for the Early Paleozoic regional tectonic evolution

GAO Dong^{1,2}, WU Cailai¹, GAO Yuanhong¹, WU Di³, ZHENG Kun¹, XU Nan¹, CHEN Hongjie⁴

收稿日期: 2019-09-29; 改回日期: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272079, 41872071)及中国地质调查局项目(121201102000150005-06, 12120115027001, DD20190006, DD20160022-06)联合资助。

作者简介: 高栋, 男, 1991 年生, 博士, 主要从事火成岩岩石学研究; E-mail: gaod@cug.edu.cn。

通讯作者: 吴才来, 男, 1960 年生, 博士, 研究员, 主要从事火成岩岩石学研究; E-mail: wucailai@126.com。

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037 China*; 2. *School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China*; 3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 4. *Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China*)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The Yusupualeke Tagh granitic pluton is located in the Mangya ophiolitic mélangé zone, South Altun orogenic belt. It mainly comprises the medium-coarse grained porphyritic biotite monzonitic granite and medium-fine grained phenocryst-bearing biotite monzonitic granite. However, their formation ages, petrogenesis, and material sources are still controversial, which restricts the understanding of the geodynamic background for the pluton and the Early Palaeozoic tectonic evolution of the South Altun orogenic belt. **[Methods]** To determine the formation ages, petrogenesis, and material sources of the granitic pluton, we studied petrology, zircon U-Pb chronology, whole-rock geochemistry, biotite mineral chemistry, and Hf isotopic composition of the pluton in this paper. **[Results]** Our results show that the medium-coarse grained porphyritic biotite monzonitic granite yielded weight mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 451–447 Ma. Combined with the formation ages (430–423 Ma) of medium-fine grained phenocryst-bearing biotite monzonitic granite in our previous study, we concluded that the Yusupualeke Tagh pluton was generated at Early Paleozoic. The study of biotite mineral chemistry indicated that the studied granitoids were formed in a low-temperature/high-pressure environment. Based on the mineral composition, whole rock geochemistry, and diagenetic condition, we believed that the studied granitoids should be genetically ascribed to I-type granite. According to Hf isotopic compositions, the studied granitoids show similar Hf isotopic compositions, suggesting that they probably have similar material sources. They were mainly derived from the partial melting of the juvenile crust and mixed a small amount of ancient crust during the emplacement. **[Conclusions]** Based on the formation age, genetic type, origin, and tectonic setting, and combined with the regional tectonic evolution, we proposed that the Yusupualeke Tagh granitic pluton was formed in an active continental margin setting related to the northward subduction of the South Altun ocean.

Key words: granite; zircon U-Pb dating; Hf isotopic composition; tectonic implication; geological survey engineering; Yusupualeke Tagh; South Altun orogenic belt

Highlights: The Yusupualeke Tagh granitoids were formed at Early Paleozoic and originated from partial melting of the juvenile crust. They were emplaced in an active continental margin setting related to the northward subduction of the South Altun ocean.

About the first author: GAO Dong, male, born in 1991, doctor, engaged in igneous petrology; E-mail: gaod@cug.edu.cn.

About the corresponding author: WU Cailai, male, born in 1960, doctor, professor, engaged in igneous petrology; E-mail: wucailai@126.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41272079, No. 41872071) and the projects of China Geological Survey (No.121201102000150005-06, No.12120115027001, No.DD20190006, No.DD20160022-06).

1 引言

阿尔金造山带位于青藏高原北部边缘,在南阿尔金造山带花岗岩出露十分广泛,前人已做了大量的研究工作(吴锁平等,2007;王超等,2008;曹玉亭等,2010;孙吉明等,2012;杨文强等,2012;康磊等,2013,2016;康磊,2014;Wang et al., 2014;吴才来等,2014,2016a,2016b;刘良等,2015;Liu et al., 2016;王立社等,2016;Wu et al., 2018;陈红杰等,2018;潘雪峰等,2019;过磊等,2019;曾忠诚等,2020)。玉苏普阿勒克塔格岩体位于南阿尔金蛇绿混杂岩带内,前人对该岩体进行了岩石学、岩石地

球化学及锆石U-Pb年代学等方面的研究(王超等,2008;Wang et al., 2014;高栋等,2019)。然而,关于玉苏普阿勒克塔格岩体的形成时代、成因类型及形成的构造背景认识仍存分歧。部分学者获得玉苏普阿勒克塔格花岗岩体中粗粒似斑状二长花岗岩的形成年龄为432 Ma,认为该岩体属于A型花岗岩,形成于造山后伸展环境(王超等,2008;Wang et al., 2014)。笔者通过前期工作获得该岩体中粗粒似斑状黑云二长花岗岩的形成年龄为448~442 Ma,属于I型花岗岩,形成于与洋壳俯冲有关的活动大陆边缘环境(高栋等,2019)。此外,前人对南阿尔金造山带早古生代构造演化过程也存在不同认识:

康磊(2014)认为南阿尔金早古生代花岗岩体主要形成于南阿尔金陆块的北向俯冲、碰撞及碰撞后伸展过程;Liu et al.(2016)认为南阿尔金古生代花岗岩体主要形成于南阿尔金洋的双向俯冲、碰撞及碰撞后伸展过程。

本文在前人工作基础上对玉苏普阿勒克塔格岩体进行了详细的岩石学、锆石U-Pb年代学研究,确定了该岩体的主要岩石类型及形成时代;对玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩中的黑云母进行了系统的电子探针分析,利用黑云母矿物化学组成估算了岩浆结晶时的物理化学条件;结合该岩体的岩石学、全岩地球化学及Hf同位素组成特征,查明了玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩成因类型及岩浆物质来源;最后综合区域地质背景,探讨了玉苏普阿勒克塔格岩体形成的构造背景及其对南阿尔金早古生代构造演化的启示意义。

2 地质概况及岩石学特征

阿尔金造山带位于青藏高原北部边缘,东部与阿拉善地块和祁连造山带相接,西南端插入昆仑造山带,南北方向分割塔里木地块及柴达木地块(车自成等,1995;郭召杰等,1998;Liu et al., 1998;许志琴等,1999;王永等,2020)。根据前人研究,阿尔金造山带自北向南依次可分为5个次级构造单元:阿北地块、

北阿尔金蛇绿混杂岩带、中阿尔金地块、南阿尔金超高压变质带及南阿尔金蛇绿混杂岩带(茫崖蛇绿混杂岩带)(图1)(许志琴等,1999;刘良等,2009;刘永顺等,2009;吴才来等,2014,2016a,2016b;Liu et al., 2016;彭银彪等,2018;菅坤坤等,2018)。

玉苏普阿勒克塔格岩体位于南阿尔金蛇绿混杂岩带内,呈北东向产出,与围岩之间呈侵入接触关系。岩体北侧主要为角闪岩相-麻粒岩相变质岩组成的古元古代阿尔金群及砂岩、砾岩组成的侏罗纪大煤沟组地层。岩体南侧主要为洪积扇、冲积扇及沙丘等组成的第四纪沉积。根据已有地质资料(苏吾什杰幅地质图^①)及野外地质调查,玉苏普阿勒克塔格岩体主要包括两种岩石类型:在岩体中部以中粗粒似斑状黑云二长花岗岩为主,在岩体边部及岩体与围岩的接触带上可见部分中细粒含斑黑云二长花岗岩。在野外并未观察到两者之间明显的接触界线,仅通过矿物组成、结构构造及野外产出特征不同对两者进行了划分(图2)。

本文对玉苏普阿勒克塔格岩体两种花岗岩分别进行采样分析,采样位置如图2所示。

中粗粒似斑状黑云二长花岗岩(15CL149及15CL156-6):主要分布于岩体中部,呈浅红色或浅肉红色,中粗粒似斑状结构,块状构造。根据镜下观察,中粗粒似斑状黑云二长花岗岩的主要矿物组

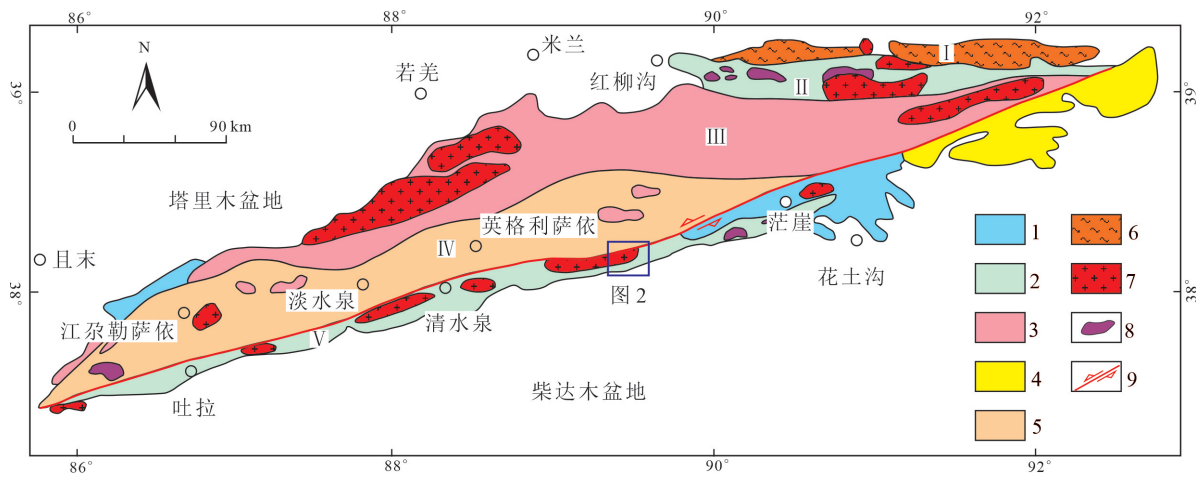


图1 阿尔金造山带构造划分(据吴才来等,2016a)

I—阿尔金北地块; II—北阿尔金蛇绿混杂岩带; III—中阿尔金地块; IV—南阿尔金超高压变质带; V—南阿尔金蛇绿混杂岩带(茫崖蛇绿混杂岩带); 1—中—新生界; 2—古生界; 3—中—新元古界; 4—达肯达坂群; 5—阿尔金群; 6—太古宇; 7—花岗岩; 8—超镁铁质岩; 9—走滑断裂

Fig.1 Tectonic subdivision of the Altun orogenic belt (after Wu et al., 2016a)

I—North Altun block; II—North Altun ophiolitic mélange zone; III—Central Altun block; IV—South Altun ultrahigh pressure belt; V—South Altun ophiolitic mélange zone (Mangya ophiolitic mélange zone); 1—Meso-Cenozoic Eonothem; 2—Paleozoic Eonothem; 3—Middle-late Proterozoic Eonothem; 4—Dakendaban Group; 5—Altun Group; 6—Archean Eonothem; 7—Granites; 8—Ultramafic rocks; 9—Strike-slip fault

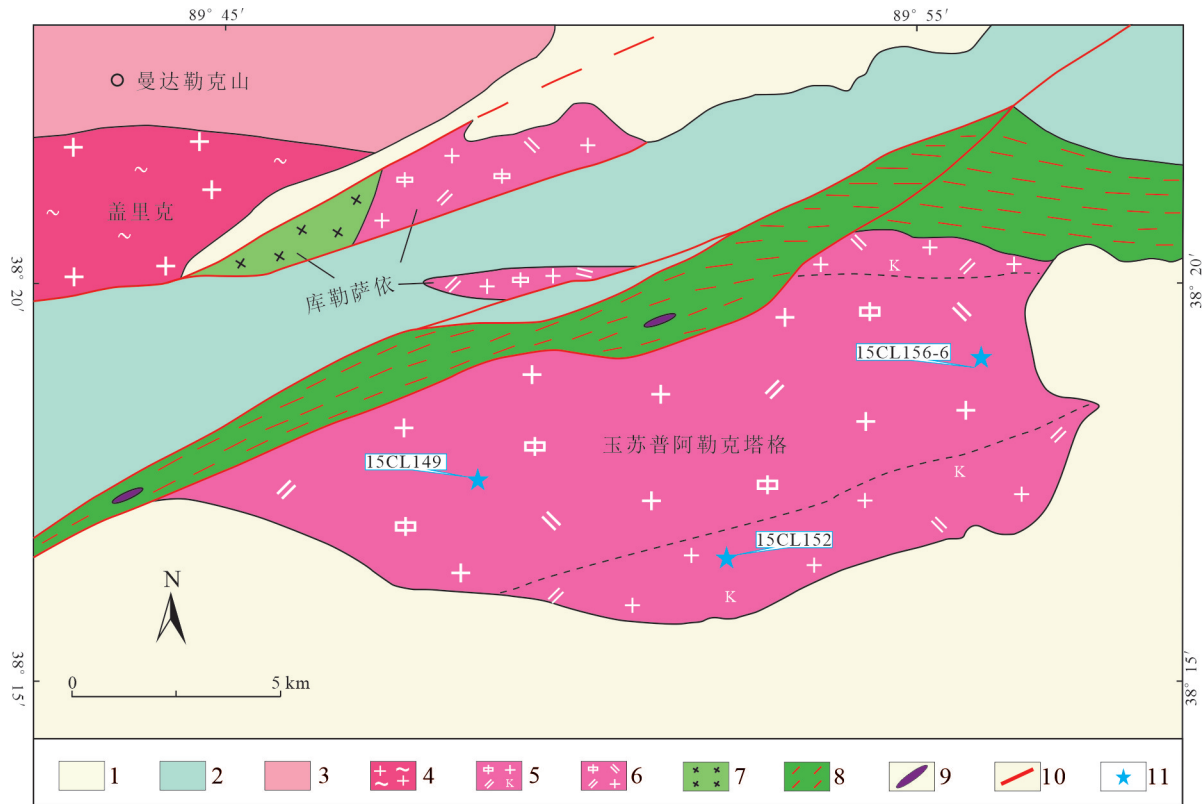


图2 玉苏普阿勒克塔格岩体地质简图

1—第四系;2—侏罗系;3—阿尔金群;4—眼球状花岗片麻岩;5—中细粒含斑黑云二长花岗岩;6—中粗粒似斑状黑云二长花岗岩;7—细粒辉长岩;8—南阿尔金蛇绿混杂岩带;9—基性—超基性岩脉;10—断层;11—采样位置

Fig.2 Simplified geological map of the Yusupualeke Tagh pluton

1—Quaternary Eonothem; 2—Jurassic Eonothem; 3—Altun Group; 4—Granitic augen gneiss; 5—Medium-fine grained phenocryst-bearing biotite monzonitic granite; 6—Medium-coarse grained porphyritic biotite monzonitic granite; 7—Fine grained gabbro; 8—South Altun ophiolitic mélange zone; 9—Mafic-ultramafic dike; 10—Fault; 11—Sample location

成为钾长石(35%~45%),以微斜长石为主,含有少量条纹长石;斜长石(25%~30%),具环带结构;石英(15%~20%)(图3a)。暗色矿物以黑云母为主(5%),副矿物主要为磁铁矿(图3d)。

中细粒含斑黑云二长花岗岩(15CL152):主要分布于岩体南北两侧,呈灰白色或浅红色,中细粒结构,块状构造。含有钾长石斑晶,斑晶可见卡式双晶。主要矿物组成为钾长石(30%~35%),以微斜长石为主,含有条纹长石;斜长石(30%~35%),蚀变程度较高;石英(20%~25%)(图3b)。暗色矿物(5%)以黑云母为主,偶见角闪石,副矿物主要为磁铁矿及磷灰石(图3e)。

包体:属闪长质包体,呈灰黑色、中细粒结构。主要分布于岩体边部,寄主岩石主要为中细粒含斑黑云二长花岗岩。包体与寄主花岗岩之间接触界

线清晰,在包体内部及包体与寄主花岗岩的接触部位可见钾长石斑晶(图3c),在包体周围寄主花岗岩中可见针状磷灰石(图3f)。

3 样品采集及分析方法

本文对玉苏普阿勒克塔格花岗岩体中形成年龄仍存分歧的中粗粒似斑状黑云二长花岗岩进行了锆石U-Pb年代学研究。在此基础上对中粗粒似斑状黑云二长花岗岩(15CL149, 15CL156-6)及中细粒含斑黑云二长花岗岩(15CL152)进行了系统的黑云母电子探针分析及锆石Hf同位素组成分析,相关分析方法简述如下:

锆石U-Pb年龄分析:在野外分别采集新鲜花岗岩样品约2 kg,在室内将样品破碎至40~80目后用清水淘洗干净,用磁铁除去磁铁矿等磁性矿物,

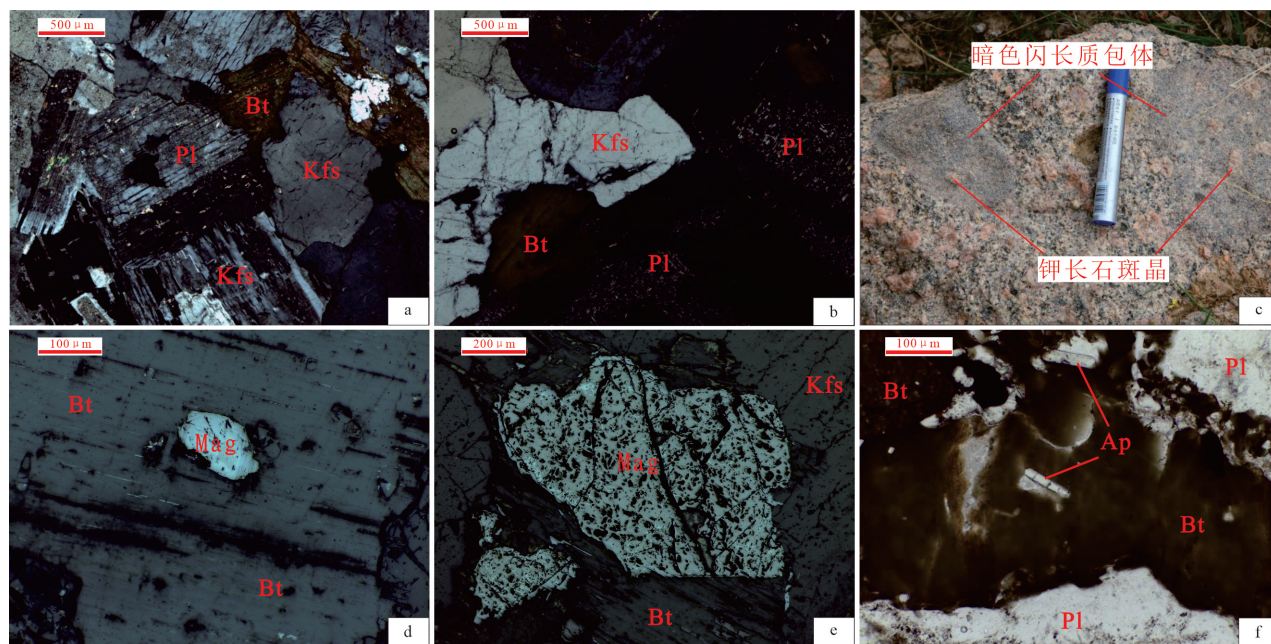


图3 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩野外及镜下照片

a, d—中粗粒似斑状黑云二长花岗岩显微照片(正交偏光); b, e—中细粒含斑黑云二长花岗岩显微照片(正交偏光); c, f—暗色包体野外照片及其寄主花岗岩显微照片(单偏光); Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母; Mag—磁铁矿; Ap—磷灰石

Fig.3 Field picture and microphotograph of granitoids in the Yusupualeke Tagh pluton

a, d—Microphotograph of medium-coarse grained porphyritic biotite monzonitic granite (under crossed polarizer); b, e—Microphotograph of medium-fine grained phenocryst-bearing biotite monzonitic granite (under crossed polarizer); c, f—Field picture of enclaves and microphotograph of its host granite (under plane polarizer); Pl—Plagioclase; Kfs—K-feldspar; Bt—Biotite; Mag—Magnetite; Ap—Apatite

用重液选出锆石。在双目镜下挑出结晶较好的锆石黏在玻璃板上,用环氧树脂浇铸,制成薄片、抛光。最后拍摄正交偏光和阴极发光照片。上述锆石分选工作在河北省区域地质调查院完成。锆石阴极发光照片拍摄及U-Pb同位素组成分析工作在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学实验室完成。所用仪器为GeoLasPro 193 nm激光剥蚀系统及Neptune Plus型等离子质谱仪(LA-ICP-MS)。测试条件为:激光剥蚀束斑直径32 μm , 频率8 Hz, He为剥蚀物质载气。采用国际通用标准锆石91500为外部标样、GJ-1为辅助标样对锆石U-Pb年龄数据准确性进行验证。数据处理使用ICPMSDataCal程序获得(Liu et al., 2010), 锆石年龄谐和图用Isoplot 3.0程序获得(Ludwig, 2003)。

锆石Hf同位素组成分析:在完成锆石U-Pb定年测试的基础上,选择测试结果中谐和度较高的锆石颗粒在其U-Pb同位素测点附近位置进行Hf同位素组成分析。锆石Hf同位素组成测试在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学实验室完

成,所用仪器为Compex Pro 193 nm激光剥蚀系统及Neptune Plus型等离子质谱仪(LA-ICP-MS)。测试条件为:激光剥蚀束斑直径44 μm , He为剥蚀物质载气,使用国际通用锆石标样GJ-1作为参考物质。锆石标准GJ-1的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282007 \pm 0.000025 (2\sigma)$ 。初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 计算采用的Lu衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Scherer et al., 2001)。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 时采用的球粒陨石Hf同位素 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.0336, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282785 (Bouvier et al., 2008)。计算Hf一阶段模式年龄(T_{DM})时采用的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.28325 (Scherer et al., 2001), 计算Hf二阶段模式年龄(T_{DM2})时采用的亏损地幔 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.015 (Griffin et al., 2000)。

电子探针分析:首先使用偏光显微镜对样品电子探针薄片进行详细的镜下观察,确定主要矿物组成及结构构造,然后圈定相对新鲜的黑云母进行电子探针背散射观察与元素定量分析。电子探针光薄片在河北省区域地质调查院制作完成,探针片喷

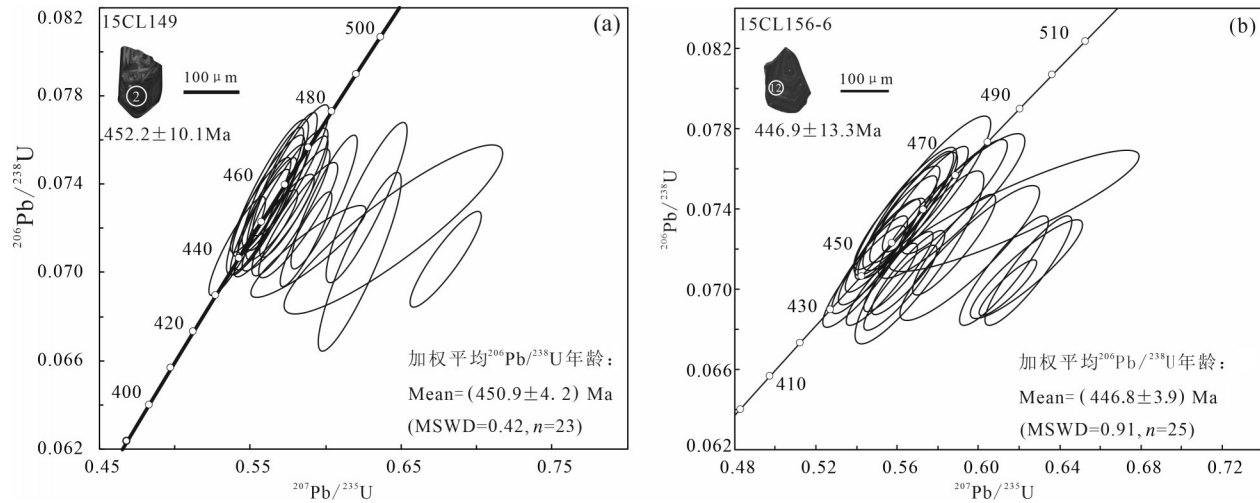


图4 中粗粒似斑状黑云二长花岗岩锆石阴极发光图像和锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.4 Cathodoluminescence images of representative zircon grains and zircon U-Pb concordance diagrams of medium-coarse grained porphyritic biotite monzonitic granite

碳及测试工作在中国地质科学院地质研究所电子探针实验室完成。所用仪器型号为JXA-8100 (JEOL), 测试条件为: 加速电压15 kV, 束流为20 nA, 束斑大小为5 μm 。

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb定年

样品15CL149: 中粗粒似斑状黑云二长花岗岩(采样位置: $38^{\circ}17.541'N$, $89^{\circ}48.419'E$)。阴极发光照片显示, 锆石呈自形至半自形结构, 岩浆振荡环带明显(图4a)。共选取30颗锆石进行U-Pb同位素组成测试, 剔除铅丢失严重的数据点后, 其余23个测点的测试数据见表1。Th含量为 87×10^{-6} ~ 635×10^{-6} (平均含量为 292×10^{-6}), U含量为 137×10^{-6} ~ 1597×10^{-6} (平均含量为 631×10^{-6}), $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值为0.35~0.66 (平均值为0.48)。23个有效点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $(450.9 \pm 4.2)\text{Ma}$ (MSWD=0.42), 可以代表中粗粒似斑状黑云二长花岗岩的形成年龄(图4a)。

样品15CL156-6: 中粗粒似斑状黑云二长花岗岩(采样位置: $38^{\circ}19.803'N$, $89^{\circ}57.071'E$)。阴极发光照片显示, 锆石呈半自形结构, 可见岩浆振荡环带(图4b)。共选取30颗锆石进行U-Pb同位素组成测试, 剔除铅丢失严重的数据点后其余25个有效点的测试数据见表1。Th含量为 181×10^{-6} ~ 1213×10^{-6} (平均含量为 483×10^{-6}), U含量为 293×10^{-6} ~

2292×10^{-6} (平均含量为 1109×10^{-6}), $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值为0.25~0.8 (平均值为0.44)。25个有效点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $(446.8 \pm 3.9)\text{Ma}$ (MSWD=0.91), 可以代表中粗粒似斑状黑云二长花岗岩的形成年龄(图4b)。

4.2 Hf同位素组成

本文在前期工作的基础上对玉苏普阿勒克塔格岩体早期花岗岩(15CL149、15CL156-6)及晚期花岗岩(15CL152)进行了锆石Hf同位素组成分析, 结果见表2。

样品15CL149: 早期花岗岩, 共选择21个测点进行Hf同位素组成测试。除一个测点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值略大于0.002外, 其余测点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于0.002, 说明由 ^{176}Lu 衰变形成的放射成因 ^{177}Hf 含量很低, 测得Hf同位素组成可代表锆石形成时的Hf同位素组成(吴福元等, 2007a)。结果显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-0.67~3.40, 平均值为1.04, 二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)范围为1.22~1.47 Ga。

样品15CL156-6: 早期花岗岩, 共选择21个测点进行Hf同位素组成测试。所有测点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于0.002。结果显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-0.79~2.86, 平均值为0.7。二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)范围为1.24~1.48 Ga。

样品15CL152: 晚期花岗岩, 共选择13个测点进行Hf同位素组成测试。所有测点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于0.002。结果显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-0.32~3.18, 平均值为1.38, 二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)范围为1.21~1.43 Ga。

表1 玉苏普阿勒克塔格岩体中粗粒似斑状黑云二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果
 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis of the medium-coarse grained porphyritic biotite monzonitic granites in the Yusupualeke Tagh pluton

测点号	元素含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
3-01	125	144	264	0.5445	0.0559	0.0014	0.5710	0.0155	0.0741	0.0021	450.0	69.4	458.7	10.0	461.0	12.4
3-02	178	204	552	0.3703	0.0559	0.0011	0.5604	0.0133	0.0727	0.0017	450.0	44.4	451.8	8.7	452.2	10.1
3-03	377	478	879	0.5434	0.0623	0.0012	0.6273	0.0178	0.0732	0.0024	683.3	-52.8	494.4	11.2	455.3	14.4
3-04	198	197	528	0.3740	0.0645	0.0034	0.6448	0.0478	0.0719	0.0025	759.0	108.8	505.3	29.5	447.9	15.2
3-07	213	239	595	0.4021	0.0559	0.0008	0.5647	0.0151	0.0733	0.0016	455.6	33.3	454.6	9.9	456.1	9.9
3-09	304	339	774	0.4383	0.0595	0.0012	0.5989	0.0145	0.0732	0.0020	583.4	38.9	476.6	9.2	455.3	12.1
3-10	569	635	1597	0.3978	0.0571	0.0009	0.5686	0.0157	0.0723	0.0014	494.5	33.3	457.1	10.2	449.7	8.7
3-11	427	459	920	0.4987	0.0699	0.0014	0.6795	0.0156	0.0706	0.0014	924.1	25.0	526.5	9.5	439.7	8.6
3-12	180	203	582	0.3482	0.0575	0.0008	0.5769	0.0173	0.0727	0.0019	522.3	27.8	462.5	11.2	452.6	11.4
3-14	345	396	797	0.4972	0.0561	0.0006	0.5771	0.0167	0.0746	0.0019	453.8	13.9	462.6	10.8	464.0	11.7
3-15	102	120	222	0.5415	0.0554	0.0006	0.5619	0.0158	0.0735	0.0018	431.5	8.3	452.8	10.3	457.1	10.8
3-16	318	395	827	0.4775	0.0572	0.0005	0.5788	0.0149	0.0734	0.0018	498.2	8.3	463.7	9.6	456.8	10.9
3-18	183	217	553	0.3931	0.0566	0.0007	0.5743	0.0181	0.0735	0.0020	476.0	8.3	460.8	11.7	457.4	11.8
3-19	158	184	487	0.3770	0.0558	0.0005	0.5563	0.0131	0.0723	0.0016	455.6	16.7	449.1	8.6	449.9	9.5
3-20	86	101	185	0.5485	0.0555	0.0005	0.5614	0.0178	0.0734	0.0023	431.5	8.3	452.4	11.6	456.7	13.9
3-21	72	87	137	0.6311	0.0555	0.0005	0.5652	0.0135	0.0739	0.0018	431.5	8.3	454.9	8.8	459.5	10.7
3-23	283	420	660	0.6369	0.0642	0.0011	0.6224	0.0182	0.0705	0.0027	750.0	36.6	491.3	11.4	439.1	16.1
3-24	432	534	1032	0.5177	0.0601	0.0021	0.5884	0.0252	0.0709	0.0014	605.6	63.9	469.8	16.1	441.8	8.3
3-26	300	345	875	0.3937	0.0566	0.0010	0.5607	0.0138	0.0718	0.0013	476.0	52.8	452.0	9.0	446.9	7.8
3-27	271	313	718	0.4354	0.0596	0.0005	0.5871	0.0113	0.0715	0.0014	587.1	16.7	469.0	7.3	445.2	8.6
3-28	317	404	717	0.5628	0.0582	0.0006	0.5816	0.0173	0.0724	0.0017	538.9	22.2	465.5	11.1	450.5	10.4
3-29	136	152	367	0.4144	0.0553	0.0005	0.5569	0.0134	0.0731	0.0014	433.4	22.2	449.5	8.8	454.6	8.5
3-30	132	159	243	0.6545	0.0552	0.0005	0.5415	0.0125	0.0712	0.0015	416.7	30.6	439.4	8.3	443.4	8.9
6-02	461	523	1044	0.5007	0.0603	0.0026	0.6175	0.0406	0.0739	0.0020	613.0	88.9	488.3	25.5	459.7	12.0
6-03	538	609	1275	0.4779	0.0639	0.0009	0.6245	0.0141	0.0709	0.0018	738.9	27.8	492.6	8.9	441.8	10.8
6-04	231	275	732	0.3754	0.0570	0.0004	0.5525	0.0116	0.0702	0.0014	494.5	16.7	446.7	7.7	437.6	8.2
6-06	375	463	1085	0.4262	0.0557	0.0003	0.5464	0.0123	0.0712	0.0016	438.9	11.1	442.7	8.1	443.4	9.6
6-07	556	579	1455	0.3983	0.0637	0.0007	0.6237	0.0181	0.0710	0.0016	731.5	22.2	492.1	11.4	442.1	9.8
6-08	1047	1213	1517	0.7996	0.0636	0.0005	0.6143	0.0093	0.0701	0.0009	727.8	13.4	486.3	6.0	436.5	5.5
6-09	289	318	1002	0.3169	0.0579	0.0004	0.5655	0.0119	0.0708	0.0014	527.8	16.7	455.1	7.8	441.0	8.3
6-10	615	733	1557	0.4711	0.0559	0.0004	0.5740	0.0140	0.0745	0.0017	455.6	16.7	460.6	9.1	463.1	10.5
6-11	196	229	516	0.4442	0.0557	0.0004	0.5746	0.0207	0.0748	0.0025	438.9	30.6	461.0	13.4	464.8	15.2
6-12	310	363	798	0.4555	0.0601	0.0008	0.5958	0.0227	0.0718	0.0022	605.6	27.8	474.5	14.5	446.9	13.3
6-13	597	561	2292	0.2447	0.0591	0.0004	0.5881	0.0134	0.0722	0.0017	568.6	16.7	469.6	8.6	449.4	10.0
6-14	579	714	1603	0.4453	0.0579	0.0005	0.5710	0.0210	0.0716	0.0028	527.8	16.7	458.7	13.6	445.7	17.1
6-16	405	465	1029	0.4518	0.0555	0.0003	0.5671	0.0138	0.0741	0.0018	431.5	16.7	456.1	9.0	460.7	11.0
6-17	290	325	870	0.3740	0.0571	0.0005	0.5881	0.0171	0.0746	0.0019	498.2	8.3	469.6	11.0	463.7	11.3
6-18	639	677	1443	0.4690	0.0627	0.0006	0.6126	0.0145	0.0709	0.0018	698.2	8.3	485.2	9.2	441.6	10.8
6-20	265	300	840	0.3570	0.0556	0.0005	0.5652	0.0163	0.0737	0.0021	438.9	16.7	454.9	10.6	458.3	12.4
6-21	387	452	1148	0.3940	0.0554	0.0004	0.5639	0.0167	0.0739	0.0021	427.8	16.7	454.0	10.9	459.5	12.7
6-22	289	343	845	0.4060	0.0558	0.0007	0.5524	0.0142	0.0719	0.0017	442.6	27.8	446.6	9.3	447.4	10.5
6-23	155	181	293	0.6175	0.0574	0.0014	0.5870	0.0238	0.0741	0.0024	509.3	36.1	468.9	15.3	461.0	14.2
6-24	299	351	887	0.3964	0.0556	0.0007	0.5530	0.0121	0.0722	0.0015	435.2	41.7	446.9	8.0	449.1	9.2
6-25	545	652	1462	0.4461	0.0556	0.0007	0.5595	0.0134	0.0730	0.0017	435.2	13.9	451.2	8.7	454.5	10.3
6-27	511	593	1208	0.4911	0.0574	0.0009	0.5607	0.0113	0.0709	0.0013	505.6	33.3	452.0	7.4	441.5	8.0
6-28	278	322	774	0.4165	0.0553	0.0011	0.5600	0.0140	0.0735	0.0017	433.4	44.4	451.5	9.1	457.5	10.3
6-29	559	642	1553	0.4133	0.0582	0.0011	0.5616	0.0120	0.0701	0.0014	600.0	44.4	452.5	7.8	436.6	8.5
6-30	165	197	492	0.4008	0.0559	0.0012	0.5438	0.0135	0.0706	0.0017	455.6	50.0	440.9	8.9	439.9	10.0

注:3-01~3-30为样品15CL149-3测试数据,6-02~6-30为样品15CL156-6测试数据。

表2 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩锆石 LA-ICP-MS Hf 同位素组成

Table 2 LA-ICP-MS zircon Hf isotopic composition of granitoids in the Yusupualeke Tagh pluton

测点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM}/Ma	T_{DM2}/Ma	f_s
2-02	419.3	0.282541	0.000015	0.001288	0.000015	0.058843	0.000544	-8.17	0.7	0.54	1014	1362	-0.96
2-05	433.1	0.282599	0.00002	0.000817	0.000012	0.038839	0.000304	-6.12	3.18	0.71	920	1215	-0.98
2-07	432.2	0.282559	0.000019	0.001272	0.000018	0.062027	0.001121	-7.52	1.63	0.66	987	1313	-0.96
2-08	425.8	0.282562	0.00002	0.001899	0.000052	0.088866	0.00208	-7.44	1.39	0.7	1001	1323	-0.94
2-10	416.8	0.282526	0.000019	0.001903	0.000026	0.085257	0.001163	-8.71	-0.07	0.68	1053	1409	-0.94
2-12	422.6	0.282589	0.00002	0.001242	0.00001	0.054042	0.000283	-6.48	2.47	0.69	945	1252	-0.96
2-13	427.1	0.282535	0.000016	0.001497	0.00001	0.06543	0.000347	-8.38	0.6	0.58	1028	1374	-0.95
2-18	426.9	0.282508	0.000022	0.001355	0.000026	0.061235	0.00109	-9.33	-0.32	0.79	1062	1433	-0.96
2-20	420.9	0.282606	0.00002	0.001861	0.000023	0.08636	0.000822	-5.87	2.87	0.7	936	1225	-0.94
2-22	418.9	0.282599	0.000016	0.001057	0.000021	0.051981	0.000949	-6.1	2.82	0.57	925	1227	-0.97
2-25	416.3	0.282576	0.000022	0.00149	0.000082	0.065887	0.003402	-6.92	1.83	0.77	969	1288	-0.96
2-28	427.5	0.282529	0.000017	0.001658	0.000042	0.076652	0.002428	-8.58	0.36	0.6	1040	1390	-0.95
2-30	425.2	0.282533	0.000018	0.001414	0.000009	0.063045	0.000502	-8.45	0.51	0.65	1028	1378	-0.96
3-01	461.0	0.282529	0.000022	0.001072	0.00001	0.048032	0.000571	-8.6	1.22	0.77	1025	1361	-0.97
3-02	452.2	0.282479	0.000018	0.000914	0.000003	0.041636	0.000192	-10.35	-0.67	0.64	1090	1474	-0.97
3-03	455.3	0.28253	0.00002	0.001088	0.000015	0.046213	0.000836	-8.55	1.14	0.7	1024	1361	-0.97
3-04	447.9	0.282521	0.000019	0.000859	0.000011	0.03699	0.000605	-8.86	0.74	0.68	1030	1381	-0.97
3-09	455.3	0.282521	0.000019	0.001164	0.000006	0.052435	0.000434	-8.87	0.81	0.67	1038	1383	-0.96
3-10	449.7	0.282487	0.000017	0.001565	0.000025	0.071466	0.001039	-10.09	-0.66	0.62	1098	1471	-0.95
3-11	439.7	0.282514	0.00002	0.001505	0.000031	0.067746	0.001359	-9.12	0.12	0.7	1058	1414	-0.95
3-12	452.6	0.282569	0.000021	0.001084	0.000017	0.048131	0.000702	-7.18	2.47	0.73	969	1275	-0.97
3-14	464.0	0.282514	0.000019	0.001563	0.000011	0.069414	0.000307	-9.13	0.6	0.68	1060	1402	-0.95
3-15	457.1	0.282594	0.000021	0.001236	0.000012	0.056291	0.000781	-6.29	3.4	0.73	937	1219	-0.96
3-16	456.8	0.282506	0.00002	0.001041	0.000007	0.044436	0.000433	-9.4	0.34	0.72	1056	1413	-0.97
3-18	457.4	0.282514	0.000019	0.000681	0.000003	0.028429	0.000286	-9.14	0.73	0.66	1036	1389	-0.98
3-20	456.7	0.282591	0.000026	0.000938	0.00001	0.039788	0.000275	-6.39	3.38	0.91	934	1220	-0.97
3-21	459.5	0.282501	0.000021	0.000808	0.000012	0.034547	0.000439	-9.59	0.28	0.75	1057	1419	-0.98
3-23	439.1	0.282543	0.000022	0.001369	0.000013	0.057422	0.00039	-8.1	1.17	0.77	1013	1347	-0.96
3-24	441.8	0.282538	0.000018	0.001087	0.00001	0.047007	0.000635	-8.26	1.15	0.62	1012	1351	-0.97
3-26	446.9	0.282516	0.000017	0.001235	0.000032	0.051047	0.001275	-9.04	0.43	0.59	1047	1400	-0.96
3-27	445.2	0.282503	0.000019	0.001262	0.00002	0.053702	0.000612	-9.53	-0.1	0.67	1067	1432	-0.96
3-28	450.5	0.282551	0.00002	0.00122	0.000007	0.052393	0.000578	-7.81	1.74	0.71	998	1320	-0.96
3-29	454.6	0.282546	0.000021	0.000885	0.000017	0.039155	0.00085	-8	1.74	0.75	996	1323	-0.97
3-30	443.4	0.282562	0.000024	0.002003	0.000028	0.090348	0.001256	-7.44	1.73	0.86	1004	1315	-0.94
6-02	459.7	0.282547	0.000019	0.001561	0.000002	0.06365	0.00021	-7.97	1.68	0.67	1013	1331	-0.95
6-03	441.8	0.282588	0.000019	0.001249	0.000007	0.050756	0.000689	-6.5	2.86	0.68	946	1242	-0.96
6-04	437.6	0.282508	0.000017	0.000929	0.000006	0.037073	0.000157	-9.33	0.03	0.59	1050	1418	-0.97
6-06	443.4	0.282559	0.00002	0.001279	0.000004	0.053036	0.000371	-7.53	1.86	0.7	988	1307	-0.96
6-07	442.1	0.282486	0.000021	0.001306	0.000011	0.054371	0.000883	-10.13	-0.78	0.75	1092	1473	-0.96
6-08	436.5	0.282569	0.000019	0.001489	0.000013	0.061696	0.000309	-7.17	2.01	0.67	979	1292	-0.96
6-10	463.1	0.28253	0.000019	0.001438	0.000005	0.056373	0.000436	-8.56	1.19	0.67	1034	1364	-0.96
6-12	446.9	0.28251	0.000018	0.001201	0.000008	0.050569	0.000163	-9.27	0.22	0.65	1055	1414	-0.96
6-13	449.4	0.282515	0.000018	0.001661	0.000016	0.069328	0.001028	-9.09	0.31	0.63	1061	1410	-0.95
6-14	445.7	0.282509	0.000018	0.001929	0.000035	0.081441	0.001883	-9.29	-0.05	0.62	1077	1430	-0.94
6-16	460.7	0.282501	0.000021	0.001036	0.000004	0.041676	0.000259	-9.59	0.23	0.74	1063	1423	-0.97
6-17	463.7	0.282505	0.00002	0.001173	0.000014	0.046628	0.000267	-9.43	0.42	0.69	1061	1414	-0.96
6-20	458.3	0.282489	0.000018	0.001262	0.000013	0.053136	0.000659	-10	-0.29	0.65	1086	1455	-0.96
6-21	459.5	0.28248	0.000018	0.001127	0.000004	0.045833	0.000131	-10.33	-0.56	0.64	1095	1472	-0.97
6-23	461.0	0.282555	0.000022	0.001134	0.000014	0.048668	0.000431	-7.66	2.14	0.79	989	1302	-0.97
6-24	449.1	0.282479	0.000019	0.001035	0.000008	0.042003	0.00031	-10.37	-0.79	0.66	1094	1479	-0.97
6-25	454.5	0.282518	0.000018	0.001275	0.00001	0.052944	0.000337	-8.98	0.64	0.63	1046	1393	-0.96
6-27	441.5	0.282576	0.00002	0.001217	0.000005	0.050357	0.000159	-6.92	2.44	0.7	962	1268	-0.96
6-28	457.5	0.282528	0.000017	0.001326	0.00001	0.05559	0.000672	-8.65	1.02	0.61	1034	1371	-0.96
6-29	436.6	0.282508	0.00002	0.001269	0.000003	0.050659	0.000177	-9.33	-0.08	0.72	1059	1425	-0.96
6-30	439.9	0.282512	0.000018	0.000891	0.000012	0.03758	0.000349	-9.18	0.24	0.63	1043	1407	-0.97

注:2-02-2-30为晚期花岗岩 15CL152 测试数据,3-01-3-30为早期花岗岩 15CL149-3 测试数据,6-02-6-30为早期花岗岩 15CL156-6 测试数据。

表3 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})组成Table 3 Compositions of majorelements (%) and trace elements (10^{-6}) of granitoids in the Yusupualeke Tagh pluton

样品	15CL149-2	15CL156-5	06A-61*	06A-63*	15CL151-2	15CL152-2	06A-67(1)*
期次	早期花岗岩				晚期花岗岩		
SiO ₂	73.98	69.50	67.78	68.89	74.05	77.91	70.18
TiO ₂	0.13	0.58	0.65	0.57	0.29	0.20	0.24
Al ₂ O ₃	13.31	14.06	14.46	14.64	13.20	11.15	15.35
Fe ₂ O ₃	0.52	0.91	-	-	1.89	0.65	-
FeO	0.62	2.28	-	-	0.08	1.05	-
MnO	0.03	0.07	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04
MgO	0.21	1.24	1.39	1.28	0.45	0.22	0.91
CaO	1.12	2.42	2.79	2.30	0.93	0.97	3.01
Na ₂ O	3.15	3.23	3.60	3.01	3.63	2.64	3.61
K ₂ O	5.97	4.63	4.39	5.01	4.30	4.40	2.58
P ₂ O ₅	0.03	0.15	0.15	0.13	0.07	0.04	0.11
H ₂ O ⁺	0.36	0.66	-	-	0.84	0.46	-
LOI	0.89	0.83	0.91	0.73	1.03	0.70	0.90
Total	99.95	99.90	99.99	99.99	99.95	99.96	99.52
Fe ₂ O ₃ ^T	1.21	3.44	3.82	3.38	1.98	1.80	2.59
ALK	9.21	7.94	7.99	8.02	8.03	7.10	6.19
A/CNK	0.97	0.95	0.92	1.01	1.07	1.02	1.08
A/NK	1.14	1.36	1.35	1.41	1.24	1.22	1.76
Ga	19.30	20.10	21.45	20.19	19.30	18.20	20.29
Rb	345.00	227.00	185.10	203.80	309.00	279.00	311.20
Ba	308.00	472.00	520.10	568.30	204.00	150.00	601.30
Th	42.20	47.60	32.82	36.31	40.10	75.10	23.68
U	3.90	5.45	3.71	3.31	6.68	7.18	2.34
Ta	1.83	2.52	2.20	2.73	4.13	2.72	0.96
Nb	13.50	22.70	20.11	20.14	22.50	22.10	7.32
Sr	61.00	145.00	178.10	176.50	78.00	52.00	71.40
Zr	83.00	234.00	288.30	272.20	167.00	153.00	115.60
Hf	2.70	6.50	7.11	6.69	5.40	5.00	3.28
Y	29.80	53.00	44.51	51.19	43.20	40.00	42.41
La	36.60	59.90	69.55	53.70	43.50	60.90	34.80
Ce	72.70	121.00	137.74	113.20	81.70	116.00	73.64
Pr	9.12	14.40	14.21	12.29	9.54	13.90	8.00
Nd	32.70	54.20	52.92	48.05	33.90	50.40	30.82
Sm	6.34	10.90	9.61	9.78	6.62	10.40	6.84
Eu	0.64	1.36	1.32	1.34	0.78	0.59	0.99
Gd	5.21	9.64	8.94	9.31	6.21	8.85	6.74
Tb	0.84	1.64	1.34	1.47	1.11	1.44	1.14
Dy	4.92	9.76	7.81	8.81	6.90	7.94	7.07
Ho	1.00	1.94	1.52	1.72	1.49	1.52	1.45
Er	3.01	5.34	4.33	4.9	4.46	4.06	4.31
Tm	0.59	0.99	0.66	0.76	0.91	0.71	0.68
Yb	3.82	6.12	3.92	4.44	6.09	4.26	3.97
Lu	0.58	0.93	0.57	0.62	0.92	0.76	0.56
(La/Yb) _N	6.87	7.02	12.74	8.67	5.12	10.26	6.31
ΣREE	178.07	298.12	314.44	270.39	204.13	281.73	181.01
LREE	158.10	261.76	285.35	238.36	176.04	252.19	155.09
HREE	19.97	36.36	29.09	32.03	28.09	29.54	25.92
LREE/HREE	7.92	7.20	9.81	7.44	6.27	8.54	5.98
δEu	0.33	0.40	0.43	0.42	0.37	0.18	0.44
Rb/Sr	5.66	1.57	1.04	1.15	3.96	5.37	4.36
Rb/Ba	1.12	0.48	0.36	0.36	1.51	1.86	0.52
Zr/Y	2.79	4.42	6.48	5.32	3.87	3.83	2.73
Th/Ta	23.06	18.89	14.92	13.3	9.71	27.61	24.67

注:*样品数据来自王超等(2008)。

4.3 全岩地球化学

本文根据已有地球化学数据(王超等,2008;高栋等,2019),对玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩的地球化学组成进行了对比,具体数据见表3。

玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩均具有较高的 SiO_2 含量,全碱含量(ALK, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)以及较低的 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量和 MgO 含量。早期花岗岩的 SiO_2 含量为67.78%~73.98%,全碱含量为7.94%~9.21%。早期花岗岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量为1.21%~3.82%, MgO 含量为0.21%~1.39%。与早期花岗岩相比,玉苏普阿勒克塔格岩体晚期花岗岩具有更高的 SiO_2 含量以及较低的 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量与 MgO 含量。晚期花岗岩的 SiO_2 含量为70.18%~77.91%,全碱含量为6.19%~8.03%。晚期花岗岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量为1.81%~2.59%, MgO 含量为0.22%~0.91%。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 岩浆系列判别图解上,两期花岗岩投点主要集中在高钾钙碱性区域(Rickwood,1989)(图5a)。根据铝饱和指数(A/CNK),早期花岗岩属准铝质—弱过铝质花岗岩类(A/CNK值为0.92~1.01,平均值为0.96),晚期花岗岩属弱过铝质花岗岩类(A/CNK值为1.02~1.08,平均值为1.06)(Maniar and Piccoli, 1989)(图5b)。

玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩的稀土元素总量(ΣREE)相对较高,其中早期花岗岩的稀土元素总量平均值为 265×10^{-6} ,晚期花岗岩稀土元素总量平均值为 222×10^{-6} 。早期花岗岩的轻重稀土元素比值(LREE/HREE)平均值为8.09,晚期花岗岩的

轻重稀土元素比值平均值为6.93。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上,两期花岗岩均显示轻稀土富集重稀土亏损的右倾式分布特征,两期花岗岩均具有Eu的负异常,其中早期花岗岩的 δEu 平均值为0.39,晚期花岗岩的 δEu 平均值为0.33(图6a)。早期花岗岩的 Rb/Sr 平均值为2.35,晚期花岗岩的 Rb/Sr 平均值为4.56。早期花岗岩的 Rb/Ba 平均值为0.58,晚期花岗岩的 Rb/Ba 平均值为1.3。早期花岗岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值为8.83,晚期花岗岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值为7.23。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上,两期花岗岩均富集 Rb 、 Th 、 U 、 K 等元素,亏损 Nb 、 Ta 、 Sr 、 Ti 、 P 等元素(图6b)。

4.4 黑云母矿物化学

本文对玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩中的黑云母进行了电子探针分析。分析结果及以22个氧原子为基准计算的阳离子数如表4所示。由于云母类矿物中Fe元素有两种不同价态,电子探针分析只能给出全铁的百分含量,因此使用林文蔚和彭丽君(1994)提出的方法计算黑云母中的 Fe^{2+} 及 Fe^{3+} 含量。

分析结果表明,玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩中的黑云母具矿物化学组成有如下特征:

(1)玉苏普阿勒克塔格岩体早期花岗岩中的黑云母比晚期花岗岩中的黑云母相对贫硅、富铁镁。其中早期花岗岩中的黑云母 SiO_2 含量为25.7%~27.32%,晚期花岗岩中的黑云母 SiO_2 含量为33.91%~36.71%。早期花岗岩中的黑云母 FeO^{T} 含量为31.50%

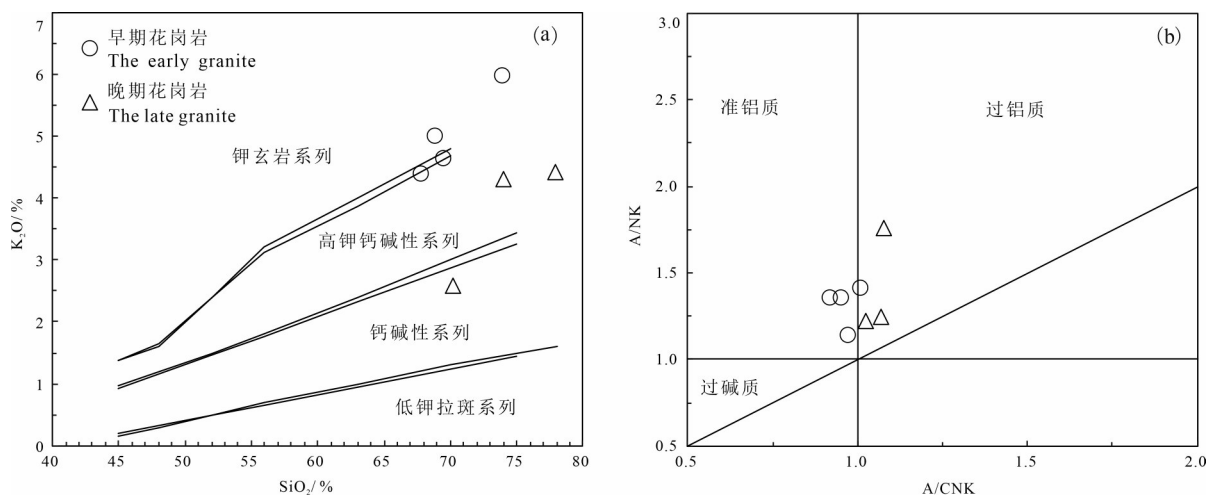


图5 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图和 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图(a底图据Rickwood,1989;b底图据Mania and Piccoli,1989)

Fig.5 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ classification diagram and $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ classification diagram (a, after Rickwood,1989; b, after Maniar and Piccoli, 1989) of granites in the Yusupualeke Tagh pluton

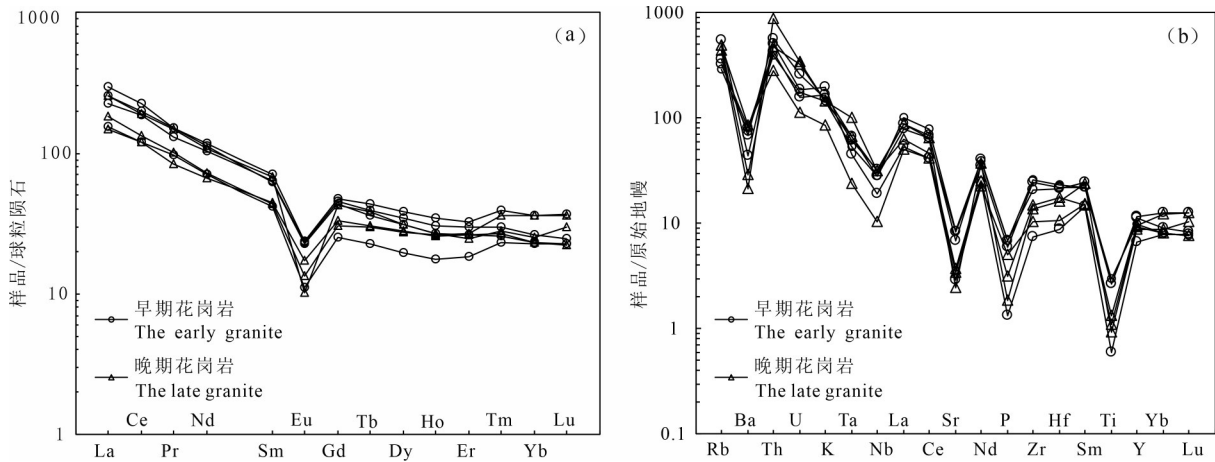


图6 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石标准化值及原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized rare earth elements distribution patterns (a) and primitive mantle normalized trace elements spider diagrams (b) of granite in the Yusupualeke Tagh pluton (chondrite-normalization values and primitive mantle normalization values after Sun and McDonough, 1989)

~34.88%，晚期花岗岩中的黑云母 FeO^T 含量为24.33%~27.35%。早期花岗岩中的黑云母MF值为0.3~0.34，晚期花岗岩中的黑云母MF值为0.19~0.20。

(2)早期花岗岩中的黑云母CaO含量相对较高，范围为0.38%~2.93%，晚期花岗岩中黑云母CaO含量大多低于检出限，个别含量极低(0.03%及0.05%)，表明玉苏普阿勒克塔格岩体早期花岗岩中部分黑云母可能受后期岩浆活动的影响发生了一定程度的改造，晚期花岗岩中的黑云母则基本不受影响(Kumar and Pathak, 2010)。

(3)根据马昌前等(1994)的研究，退变质及交代成因的黑云母中Ti离子含量小于0.02，进变质成因的黑云母中Ti离子含量变化较大且大多数 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 值大于0.55，岩浆成因的黑云母中Ti离子含量为0.2~0.55且 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 值范围为0.30~0.55。玉苏普阿勒克塔格岩体早期花岗岩中黑云母的Ti离子含量为0.07~0.39，平均含量为0.22， $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 值为0.31~0.34。晚期花岗岩中黑云母的Ti离子含量为0.3~0.41， $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 值为0.19~0.2，表明两期花岗岩中的黑云母主要为岩浆成因黑云母。在Beane(1974)提出的黑云母 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ 判别图解上，玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩中的黑云母投点均集中在原生黑云母区域内，同样说明两期花岗岩中的黑云母以原生岩浆成因黑云母为主(图7)。

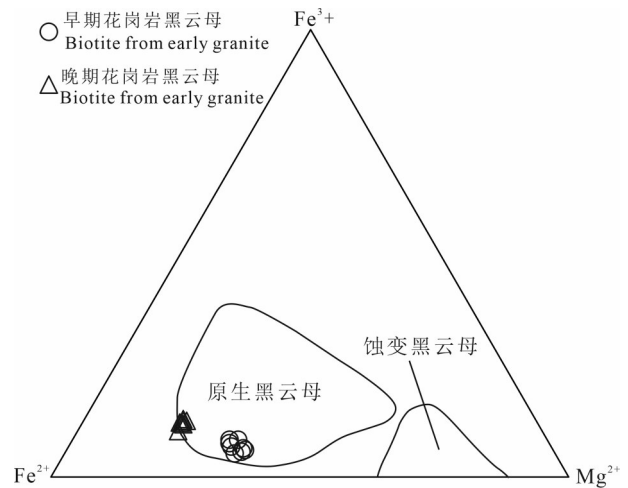


图7 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩中黑云母 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ 图解(据 Beane, 1974)

Fig.7 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ diagram of biotite from granitoids in the Yusupualeke Tagh pluton(after Beane, 1974)

5 讨论

5.1 成岩物理化学条件

黑云母是花岗岩中常见的暗色矿物之一，它的化学组成对岩浆结晶时物理化学条件的变化十分敏感。通过研究花岗岩中黑云母的化学组成，可以推测成岩过程中温度、压力及氧逸度等物理化学条件的变化，为进一步探讨岩石成因、岩浆物质来源

表4 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩中黑云母的化学成分(%)
Table 4 Chemical compositions of biotite from granitoids in the Yusupualeke Tagh pluton (%)

测点号	80	82	88	89	91	92	93	97	8	9	10	13	14	15	16	
样品号	15CL156-6				15CL149				15CL152							
SiO ₂	27.27	27.00	26.97	26.46	26.90	27.32	25.70	26.41	36.71	36.33	35.90	36.24	36.36	36.24	33.91	
Al ₂ O ₃	14.90	15.06	14.70	14.82	14.60	14.81	16.21	15.39	16.06	16.55	15.56	16.10	16.14	17.29	14.88	
TiO ₂	1.20	1.74	2.87	3.16	1.85	0.59	2.29	0.97	3.42	2.88	2.62	3.42	3.27	2.58	2.44	
FeO ^T	33.58	33.57	31.50	32.61	33.20	34.85	33.18	34.88	26.23	26.35	27.35	26.04	25.91	25.91	24.33	
MnO	0.41	0.46	0.53	0.39	0.44	0.40	0.46	0.47	0.44	0.42	0.46	0.46	0.43	0.37	0.32	
MgO	9.92	8.43	8.36	8.06	9.60	10.14	8.64	9.66	3.46	3.43	3.75	3.44	3.54	3.65	3.35	
CaO	0.87	1.28	2.93	2.86	1.58	0.38	2.20	1.01	0.03	-	0.05	-	-	-	-	
Na ₂ O	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	-	-	0.10	0.10	0.08	0.06	0.08	0.04	0.02	
K ₂ O	0.27	0.09	0.03	-	0.08	0.06	0.03	0.02	8.87	9.28	9.70	9.50	9.33	8.90	8.98	
Total	88.43	87.67	87.92	88.40	88.28	88.56	88.69	88.82	95.32	95.33	95.47	95.25	95.05	94.97	88.24	
Si	4.29	4.34	4.41	4.31	4.28	4.26	4.11	4.14	5.90	5.65	5.81	5.65	5.87	5.62	5.71	
Al ^(IV)	2.76	2.85	2.83	2.85	2.74	2.72	3.06	2.85	2.10	2.35	2.19	2.35	2.13	2.38	2.29	
Al ^(VI)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.95	0.69	0.78	0.61	0.94	0.79	0.66	
Ti	0.14	0.21	0.35	0.39	0.22	0.07	0.28	0.11	0.41	0.34	0.32	0.40	0.40	0.30	0.31	
Fe ³⁺	0.40	0.49	0.52	0.51	0.43	0.37	0.44	0.35	0.56	0.51	0.47	0.51	0.53	0.52	0.50	
Mn ²⁺	0.05	0.06	0.07	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	
Mg ²⁺	2.33	2.02	2.04	1.96	2.28	2.36	2.06	2.26	0.83	0.80	0.90	0.80	0.85	0.84	0.84	
Fe ²⁺	4.02	4.02	3.78	3.93	3.99	4.17	4.00	4.23	2.97	2.92	3.23	2.88	2.97	2.84	2.93	
Na ⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	
K ⁺	0.05	0.02	0.01	-	0.02	0.01	0.01	-	1.82	1.84	2.00	1.89	1.92	1.76	1.93	
Ca ²⁺	0.15	0.22	0.51	0.50	0.27	0.06	0.38	0.17	0.01	-	0.01	-	-	-	-	
Al ^T	2.76	2.85	2.83	2.85	2.74	2.72	3.06	2.85	3.04	3.03	2.97	2.96	3.07	3.16	2.95	
Fe/(Fe+Mg)	0.66	0.69	0.68	0.69	0.66	0.66	0.68	0.67	0.81	0.81	0.80	0.81	0.80	0.80	0.80	
Mg/(Mg+Fe)	0.34	0.31	0.32	0.31	0.34	0.34	0.32	0.33	0.19	0.19	0.20	0.19	0.20	0.20	0.20	
T/°C	596.22	655.54	733.65	742.33	672.27	389.05	698.87	544.14	-	-	-	-	-	-	-	
P/(10 ³ Pa)	1.84	2.12	2.04	2.09	1.77	1.71	2.73	2.09	2.69	2.66	2.46	2.43	2.78	3.05	2.42	
H/km	6.71	7.69	7.43	7.61	6.43	6.23	9.92	7.60	9.79	9.69	8.96	8.84	10.10	11.10	8.80	
MF	0.34	0.31	0.32	0.30	0.34	0.34	0.31	0.33	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	

注:T—温度(°C);P—压力(10³ Pa);H—深度(km);MF=Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺+Fe³⁺+Mn²⁺)。

等提供帮助(Wones and Hans, 1965; Albuquerque, 1973; Beane, 1974; 周作侠等, 1988; Burkhard, 1991; Abdel-Rahman, 1994; Selby and Nesbitt, 2000; Henry et al., 2005; Uchida et al., 2007; Sarjoughian et al., 2015; 赛胜勋等, 2016; 杨阳等, 2017)。

Wones and Hans (1965) 提出通过研究与钾长石-磁铁矿共生的黑云母中 Fe³⁺、Fe²⁺ 及 Mg²⁺ 的含量估算黑云母结晶时氧逸度的方法。根据镜下观察, 玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩中的黑云母大多具有与钾长石-磁铁矿共生的特点, 因此可以使用该方法估算黑云母结晶时的氧逸度。根据 Fe³⁺-Fe²⁺-Mg 判别图解, 早期花岗岩中的黑云母投点主

要集中在 Fe₂SiO₄-SiO₂-Fe₃O₄ 缓冲线与 Ni-NiO 缓冲线之间以及 Ni-NiO 缓冲线附近。晚期花岗岩中的黑云母主要集中在 Fe₂O₃-Fe₃O₄ 与 Ni-NiO 缓冲线之间靠近 Ni-NiO 缓冲线附近, 说明两期花岗岩中的黑云母结晶时的氧逸度均较低, 并且晚期花岗岩中的黑云母结晶时的氧逸度明显高于早期花岗岩中的黑云母(图8)。

Henry et al. (2005) 根据过铝质变泥质岩熔融产物中黑云母中 Ti 含量与温度的关系提出了 Ti 饱和温度计: $T = \{[\text{Ln}(\text{Ti}) + 2.3594 + 1.7283(X_{\text{Mg}})]/b\}^{0.333}$ 。T 代表黑云母的结晶温度(°C), Ti 是按照 22 个氧原子计算的 Ti 离子的含量, $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$, $b = 4.6482 \times$

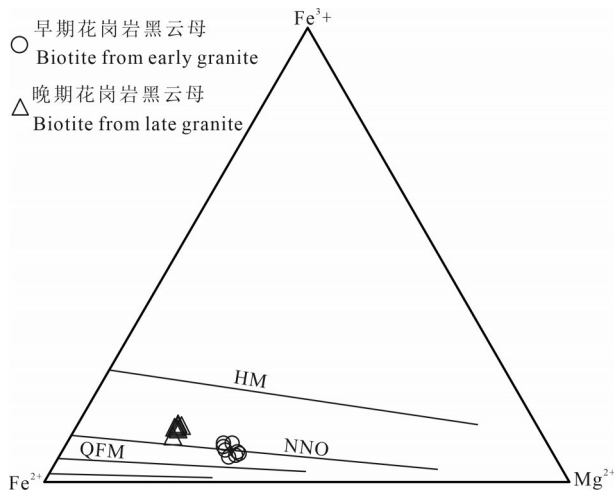


图8 玉苏普阿勒克塔格花岗岩体花岗岩中黑云母 Fe^{3+} - Fe^{2+} -Mg图解(据Wones and Hans, 1965)
HM— Fe_2O_3 - Fe_3O_4 ; NNO—Ni-NiO; QFM— Fe_2SiO_4 - SiO_2 - Fe_3O_4

Fig. 8 Fe^{3+} - Fe^{2+} -Mg diagram of biotite from granitoids in the Yusupualeke Tagh pluton (after Wones and Hans, 1965)

10^{-9} 。该温度计在 X_{Mg} 值介于0.275到1,以22个氧原子计算的Ti阳离子含量介于0.04~0.6,计算得出结晶温度在480~800℃范围内误差较小。玉苏普阿勒克塔格岩体早期花岗岩中黑云母的Ti阳离子含量为0.07~0.39, X_{Mg} 值为0.31~0.35,可以使用该公式计算黑云母的结晶温度。计算结果显示早期花岗岩中黑云母的Ti饱和温度为387~742℃。由于早期花岗岩中的黑云母可能遭受了一定程度的次生改造,Ti发生了再平衡,所以笔者认为按照该公式计算出来的两个较低温度(389℃、544℃)不能代表早期花岗岩中黑云母的结晶温度。去掉上述两个较低温度后,其余黑云母的结晶温度范围为656~742℃。晚期花岗岩中黑云母的 X_{Mg} 值为0.19~0.2,不满足该温度计使用条件,未进行计算。林景阡(1987)通过实验得出黑云母中 Al_2O_3 含量与黑云母的结晶温度呈负相关的结论。由于晚期花岗岩中黑云母的 Al_2O_3 含量(平均含量为16.08%)略高于早期花岗岩中黑云母的 Al_2O_3 含量(平均含量为15.06%),因此推测玉苏普阿勒克塔格岩体晚期花岗岩中黑云母的结晶温度应略低于早期花岗岩中黑云母的结晶温度。

Uchida et al. (2007)根据花岗岩中黑云母的全铝含量(Al^T),结合地质压力计总结出利用花岗岩中

黑云母的全铝含量估算花岗岩成岩压力的经验公式: $P(10^5 Pa)=3.03 \times Al^T - 6.53 (\pm 0.33)$ 。其中 Al^T 是以22个氧原子为基准计算的Al离子总数。根据上述压力值结合公式($P=\rho gh, \rho=2700 kg/m^3, g=9.8 m/s^2$)可以估算两期花岗岩的侵位深度。结果表明玉苏普阿勒克塔格岩体早期花岗岩的形成压力平均值为 $2.05 \times 10^5 Pa$,侵位深度平均值为7.45 km,晚期花岗岩的形成压力平均值为 $2.71 \times 10^5 Pa$,侵位深度平均值为9.85 km。因此,笔者认为玉苏普阿勒克塔格岩体早期花岗岩侵位时间较早,深度较浅,形成压力较低,晚期花岗岩开始沿着早期花岗岩边部及早期花岗岩与围岩的接触带侵位。由于侵位空间较小,晚期花岗岩侵位深度较深,形成压力较高。

5.2 形成时代及成因类型

本次研究获得玉苏普阿勒克塔格岩体中粗粒似斑状黑云二长花岗岩的形成年龄为451~447 Ma,与前期工作获得中粗粒似斑状黑云二长花岗岩的形成年龄基本一致(448~442 Ma,高栋等,2019)。结合前期工作获得玉苏普阿勒克塔格岩体中细粒含斑黑云二长花岗岩的锆石U-Pb年龄(428~423 Ma),笔者认为玉苏普阿勒克塔格岩体属于早古生代岩浆活动的产物。

目前关于玉苏普阿勒克塔格岩体的花岗岩成因类型认识仍不一致。部分学者认为该岩体花岗岩属于A型花岗岩,也有学者认为该岩体花岗岩属于I型花岗岩(王超等,2008; Wang et al., 2014; 高栋等, 2019)。一般认为A型花岗岩形成于高温低压环境,以出现碱性暗色矿物为主要特征(Clemens et al., 1986; Douce, 1997; 吴福元等, 2007b; 张晓飞等, 2019; 郭喜运等, 2019)。玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩形成于温度较低、压力较高环境。两期花岗岩均属准铝质到弱过铝质花岗岩类($A/CNK < 1.1$),主要矿物组成为钾长石、斜长石、石英及黑云母,偶见角闪石,不含碱性暗色矿物及堇青石、石榴石、白云母等矿物。在 P_2O_5 - SiO_2 判别图解上,两期花岗岩的 P_2O_5 与 SiO_2 含量之间呈明显的负相关关系(图9a)(Wolf and London, 1994)。上述研究结果表明,玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩具有典型I型花岗岩特征。

花岗岩中黑云母的化学成分也可用来判别花岗岩的成因类型。一般认为I型花岗岩中黑云母的

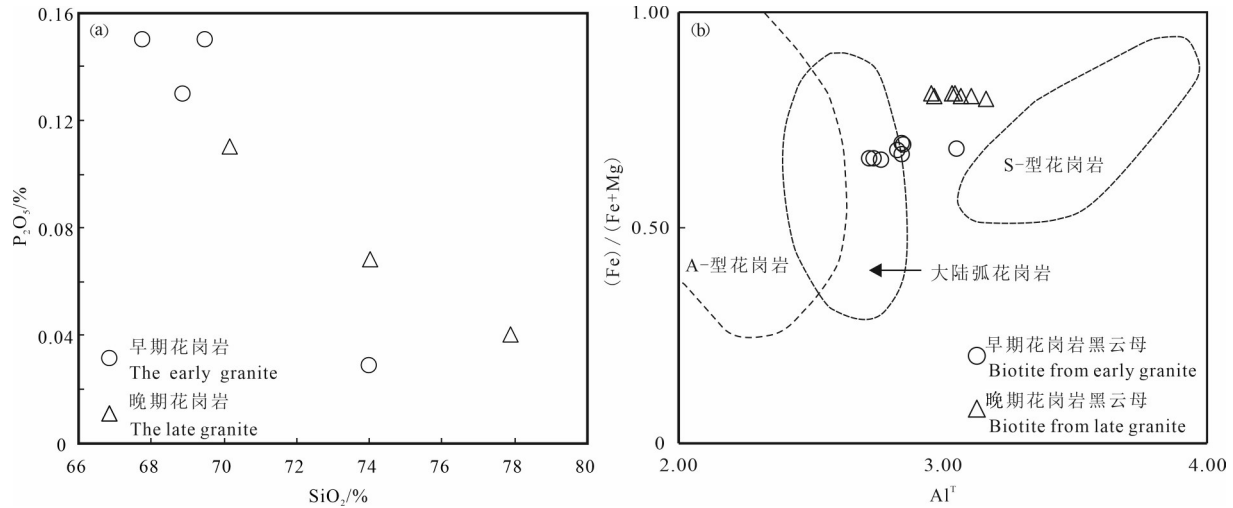


图9 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩 P₂O₅-SiO₂图解(a)及花岗岩中的黑云母 Al^{IV}-Fe/(Fe+Mg) 图解(b, 据 Shabani et al., 2003)
Fig.9 P₂O₅-SiO₂ diagram (a) of granitoids and Al^{IV}-Fe/(Fe+Mg) diagram (b, after Shabani et al., 2003) of biotite from granitoids in the Yusupualeke Tagh pluton

Al^{IV}离子含量相对较低(0.144~0.224)而S型花岗岩中黑云母的Al^{IV}离子含量相对较高(0.352~0.561)(Whalen and Chappell, 1988)。玉苏普阿勒克塔格岩体早期花岗岩中的黑云母不含Al^{IV}离子,具有典型I型花岗岩的特点,晚期花岗岩中黑云母的Al^{IV}离子含量较高(0.607~1.128),表现出了S型花岗岩的特点。在Shabani et al.(2003)提出的黑云母Al^{IV}-Fe/(Fe+Mg)判别图解上,早期花岗岩中的黑云母投点主要集中在大陆弧花岗岩区域(以I型花岗岩为主),晚期花岗岩中的黑云母投点主要集中在I型花岗岩与S型花岗岩之间的过渡区域(图9b)。由于晚期花岗岩在侵位过程中可能经历了部分古老地壳物质的混染,导致晚期花岗岩中黑云母的Al^{IV}离子含量较高从而表现出了从I型花岗岩向S型花岗岩过渡的特征。综合上述岩石学、全岩地球化学及黑云母矿物化学研究结果,笔者认为玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩均属I型花岗岩。

5.3 物质来源及构造背景

花岗岩中锆石的Hf同位素封闭温度很高并且不会随着岩浆结晶分异或部分熔融发生变化,因此花岗岩中锆石的Hf同位素组成可以记录原始岩浆的性质,为判断花岗岩的岩浆物质来源提供帮助(吴福元等,2007a; Bolhar et al., 2008)。一般认为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值代表形成花岗岩的岩浆物质来源于新生地壳的部分熔融或者是有幔源物质的加入, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 负值则代表形成花岗岩的岩浆物质来源于古老地壳(吴福元

等,2007a)。

在玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩的锆石Hf同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(图10a)及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 频数分布直方图中(图10b),两期花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值及二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)范围大致相同,暗示玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩具有相同的岩浆物质来源。根据玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩的锆石Hf同位素组成,笔者认为早期花岗岩主要来源于1.22~1.42 Ga的新生地壳的部分熔融($\epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$),同时在侵位过程中可能混入了1.42~1.48 Ga的古老地壳物质($\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$)。晚期花岗岩主要来源于1.21~1.39 Ga的新生地壳的部分熔融($\epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$),同时在侵位过程中混入了1.41~1.43 Ga的古老地壳物质($\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$)。玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩的岩石地球化学组成表明,随着SiO₂含量的增加,两期花岗岩的岩石大多数主量、微量元素含量与SiO₂含量之间都呈现出明显的线性变化关系(图略)。此外与早期花岗岩相比,玉苏普阿勒克塔格岩体晚期花岗岩具有更高的SiO₂含量、Rb/Sr值、Rb/Ba值以及更低的Fe₂O₃^T含量、MgO含量。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图6b),晚期花岗岩Ba、P、Sr、Ti、Eu等元素的亏损程度增加,上述地球化学特征说明玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩可能属于同源岩浆不同演化阶段的产物。在地壳深部深源岩浆房形成以后,在随后的演化过程中又经历了进一步的分离结晶作用(赵娇龙等,2012)。其中P的亏损

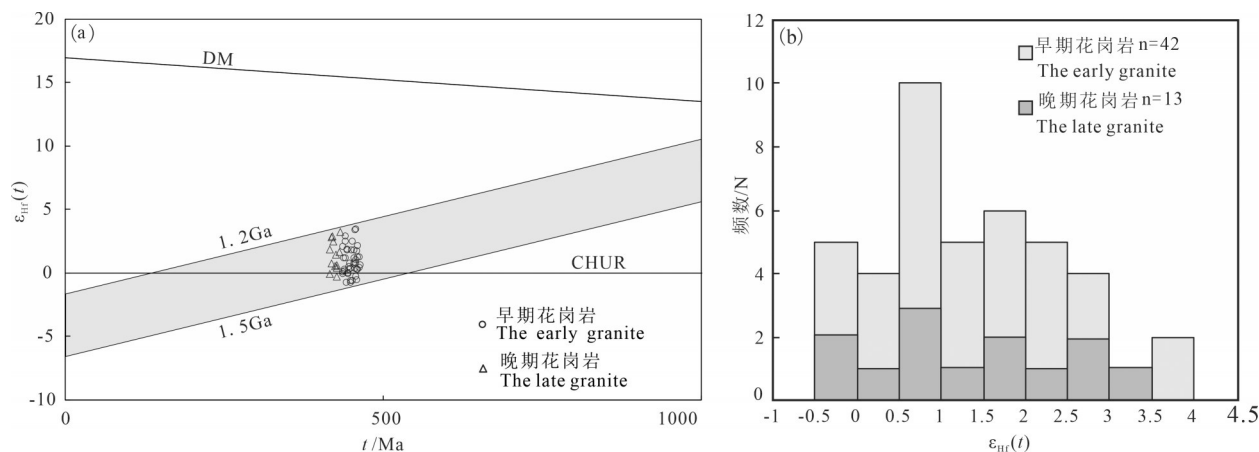


图10 玉苏普阿勒克塔格岩体花岗岩锆石 Hf 同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解(a) 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 频率分布直方图(b)
Fig.10 Zircon Hf isotopic $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. t diagram (a) and histogram of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of granite in Yusupualeke Tagh pluton

指示成岩过程中发生了磷灰石的分离结晶, Eu、Sr、Ba 的亏损指示斜长石和钾长石的分离结晶, Ti 的亏损指示含 Ti 矿物例如钛铁矿、榍石的分离结晶 (Raith, 1995; Wu et al., 2003)。

根据本次研究, 玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩均属高钾钙碱性 I 型花岗岩, 富集轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等元素, 表现出典型岛弧型岩浆岩的特征, 暗示玉苏普阿勒克塔格岩体的形成可能与俯冲碰撞有关 (Briqueu et al., 1984; Crawford et al., 1987)。两期花岗岩的 Zr/Y 比值 (平均值为 4.2) 介于活动大陆边缘安山岩的范围内 (4~12, Condie, 1989), Th/Ta 值 (平均值为 18.88) 与 Gorton and Schandl (2000) 确定的活动大陆边缘花岗岩 Th/Ta 值 (6~20) 一致, 说明玉苏普阿勒克塔格岩体可能形成于活动大陆边缘环境。

前人对南阿尔金造山带内蛇绿岩、高压变质岩、花岗岩及基性—超基性岩等开展了大量的研究工作, 为进一步探讨南阿尔金造山带古生代构造演化提供了重要帮助。李向民等 (2009) 获得约马克其蛇绿岩型镁铁—超镁铁质岩的年龄为 500 Ma, 郭金城等 (2014) 获得长沙沟地区具蛇绿岩属性的辉石橄榄岩年龄为 511 Ma, 说明南阿尔金地区洋盆存在的时限早于 500 Ma。此外, 南阿尔金洋壳俯冲型埃达克岩的形成年龄约为 517 Ma, 地壳加厚型埃达克岩的形成年龄约为 500 Ma (孙吉明等, 2012; 康磊, 2014), 南阿尔金地区高压—超高压变质岩的变

质峰期年龄为 500~485 Ma (马拓等, 2019), 说明南阿尔金地区发生洋壳深俯冲的时代应早于 500 Ma。然而在南阿尔金地区还出露大量形成时代晚于 500 Ma 的形成于活动大陆边缘环境的 I 型花岗岩以及不具蛇绿岩属性的镁铁—超镁铁质岩 (马中平等, 2011; 刘良等, 2015; 吴才来等, 2016a; 高栋等, 2019)。因此, 笔者认为 500 Ma 之后, 在南阿尔金地区除了中阿尔金洋 (位于南阿尔金陆块与中阿尔金陆块之间) 的北向俯冲作用以外, 还存在南阿尔金洋 (位于柴达木地块与南阿尔金陆块之间) 的俯冲—碰撞作用。据 Wu et al. (2018) 的研究, 南阿尔金洋从 520 Ma 开始发生向南阿尔金陆块的北向俯冲碰撞。从 450 Ma 开始南阿尔金洋闭合, 南阿尔金造山带处于碰撞后环境。从 424 Ma 开始俯冲板片断离, 南阿尔金地区进入碰撞后伸展环境。在区域上, 朱小辉等 (2015) 认为在 535~460 Ma 期间主要以柴达木板块向欧龙布鲁克地块的洋壳俯冲作用为主, 在 460~450 Ma 洋壳俯冲停止, 进入陆—陆碰撞环境, 这也与 Wu et al. (2018) 的认识基本一致。

综合玉苏普阿勒克塔格岩体的形成时代、成因类型、物质来源及构造背景, 结合南阿尔金地区区域地质背景, 笔者认为玉苏普阿勒克塔格岩体形成于与南阿尔金洋北向俯冲有关的活动大陆边缘环境。在南阿尔金洋闭合后, 构造体制从挤压向伸展转换, 随着幔源岩浆上涌, 新生地壳发生部分熔融, 最终形成玉苏普阿勒克塔格花岗岩体。

6 结 论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 玉苏普阿勒克塔格岩体中粗粒似斑状黑云二长花岗岩的形成年龄为 451~447 Ma, 属于早古生代岩浆活动的产物。

(2) 全岩地球化学及花岗岩中黑云母矿物化学研究结果表明, 玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩属高钾钙碱性 I 型花岗岩, 形成于温度相对较低, 压力相对较高环境。

(3) 锆石 Hf 同位素组成研究结果表明, 玉苏普阿勒克塔格岩体两期花岗岩具有相似的物质来源, 源岩以新生地壳的部分熔融为主, 在侵位过程中经历了部分古老地壳物质的混染。

(4) 根据玉苏普阿勒克塔格岩体的形成时代、成因类型及物质来源, 结合区域地质背景, 认为玉苏普阿勒克塔格花岗岩体形成于与南阿尔金洋北向俯冲有关的活动大陆边缘环境。

致谢: 审稿专家及编辑部老师对本文的修改提出了宝贵意见和建议, 在此表示衷心的感谢!

注释

- ① 西安地质矿产研究所. 2002. 1:25 万苏吾什杰幅地质图.

References

Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525-541.

Albuquerque C A R D. 1973. Geochemistry of biotites from granitic rocks, northern Portugal[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(7): 1779-1802.

Beane R E. 1974. Biotite stability in the porphyry copper environment[J]. *Economic Geology*, 69(2): 241-256.

Bolhar R, Weaver S D, Whitehouse M J, Palin J M, Woodhead J D, Cole J W. 2008. 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*, 268(3/4): 312-324.

Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of chur: constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1/2): 48-57.

Briqueu L, Bougault H, Joron J L. 1984. Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones: Petrogenetic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,

68: 297-308.

Burkhard D J M. 1991. Temperature and redox path of biotite-bearing intrusives: A method of estimation applied to S- and I-type granites from Australia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(1): 89-98.

Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui. 2010. Geochemical, zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions studies for Tatelekebulake granite in south Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3259-3271(in Chinese with English abstract).

Che Zicheng, Liu Liang, Liu Hongfu, Luo Jinhai. 1995. Discovery and occurrence of high-pressure metamorphic argillaceous rock from Altyn mountain areas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 40(14): 1298-300(in Chinese).

Chen Hongjie, Wu Cailai, Lei Min, Guo Wenfeng, Zhang Xin, Zheng Kun, Gao Dong, Wu Di. 2018. Petrogenesis and implications for Neoproterozoic granites in Kekesayi area, south Altyn continent[J]. *Earth Sciences*, 43(4): 1278-1295(in Chinese with English abstract).

Clemens J D, Holloway J R, White A J R. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints[J]. *American Mineralogist*, 71(3): 317-324.

Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance[J]. *Lithos*, 23(1-2): 1-18.

Crawford A J, Falloon T J, Eggins S. 1987. The origin of island arc high-alumina basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97(3): 417-430.

Douce A E P. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. *Geology*, 25(8): 743-746.

Gao Dong, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Zhang Xin, Chen Hongjie, Guo Wenfeng, Wu Di, Zheng Kun. 2019. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry of the Yusupuleke granite pluton in south Altyn and its geological implications[J]. *Earth Science*, 44(11): 3812-3828(in Chinese with English abstract).

Gorton M P, Schandl E S. 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks[J]. *Canadian Mineralogist*, 38(5): 1065-1073.

Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Achterbergh, E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133-147.

Guo Jingcheng, Xu Xuming, Chen Haiyan, Li Xian, Dong Hongkai, Ti Zhenhai. 2014. U-Pb age of zircon from ultramafic rocks in Changshagou, Altyn and its geological significance[J]. *Northwestern Geology*, 47(4): 170-177(in Chinese with English abstract).

- Guo Lei, Li Jianxing, Guo Lin, Xi Rengang, Pan Feng. 2019. Zircon U–Pb dating and petrogenesis of alkali–feldspar granite in Mangnai area, south Altun, NW China[J]. *Northwestern Geology*, 52(1): 1–13(in Chinese with English abstract).
- Guo Xiyun, Sun Huashan, Dong Aiguan, Ren Jianxun, Xu Ruiying, Gao Bo. 2019. The genesis and dating of the Early Permian granitic rock in the north of Xilin Hot, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 46(6): 1396–1409(in Chinese with English abstract).
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wang Jianjun. 1998. Sm–Nd isochron age of ophiolite zone in northern margin of Altun mountains and its tectonic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 1981–1984(in Chinese).
- Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. 2005. The Ti–saturation surface for low–to medium–pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti–substitution mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 90(2/3): 316–328.
- Jian Kunkun, Liu Xiangdong, He Yuanfang, Yuan Zhang, Zeng Zhongcheng, Zhao Duanchang, Wang Xing, Du Biao, Wang Tianyi. 2018. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Datonggou granitic plutons in the middle section of Altun Mountains[J]. *Geology in China*, 45(4): 740–752(in Chinese with English abstract).
- Kang Lei, Liu Liang, Cao Yuting, Wang Chao, Yang Wenqiang, Liang Sha. 2013. Geochemistry, zircon U–Pb age and its geological significance of the gneissic granite from the eastern segment of the Tatelekebulake composite granite in the south AltynTagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3039–3048(in Chinese with English abstract).
- Kang L, Xiao P X, Gao X F, Xi R G, Yang Z C. 2015. Age, petrogenesis and tectonic implications of Early Devonian bimodal volcanic rocks in the South Altyn, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 111(1): 733–750.
- Kang Lei, Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, Xi Rengang, Yang Zaichao. 2016. Chronology, geochemistry and petrogenesis of monzonitic granite and quartz diorite in Mangai area: Its inspiration to Early Paleozoic tectonic–magmatic evolution of the southern Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6):1731–1748(in Chinese with English abstract).
- Kang Lei. 2014. Early Paleozoic Multi–Stage Granitic Magmatism and the Geological Significance in the South Altyntagh HP–UHP Metamorphic Belt[D]. Xian: Northwest University, 1–119(in Chinese with English abstract).
- Kumar S, Pathak M. 2010. Mineralogy and geochemistry of biotites from Proterozoic granitoids of western Arunachal Himalaya: Evidence of bimodal granitogeny and tectonic affinity[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 75(5): 715–730.
- Li Xiangming, Ma Zhongping, Sun Jiming, Xu Xueyi, Lei Yongxiao, Wang Lishe, Duan Xingxing. 2009. Characteristics and age study about the Yuemakeqi mafic ultramafic rock in the southern Altyn Fault[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 862–872(in Chinese with English abstract).
- Lin Jingqian.1987. Introduction to Igneous Petrogenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–277(in Chinese).
- Lin Wenwei, Peng Lijun. 1994. The estimation of the Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in amphibole and biotite from EMPA data[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(2): 155–162(in Chinese with English abstract).
- Liu C H, Wu C L, Gao Y H, Lei M, Qin H P. 2016. Age, composition, and tectonic significance of Palaeozoic granites in the Altyn orogenic belt, China[J]. *International Geology Review*, 58(2): 131–154.
- Liu L, Che Z C, Wang Y, Luo J H, Wang J Q, Gao Z J. 1998. The evidence of Sm–Nd isochron age for the Early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(9): 754–756.
- Liu Liang, Chen Danling, Wang Chao, Zhang Chengli. 2009. New progress on geochronology of high–pressure/ultrahigh–pressure metamorphic rocks from the south Altyntagh, the north Qaidam and the north Qinling orogenic, NW China and their geological significance[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 472–479(in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Kang Lei, Cao Yuting, Yang Wenqiang. 2015. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 45(8): 1126–1137(in Chinese).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010. 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*, 51(1/2): 537–571.
- Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xin Houtian, Lu Songnian, Xiu Qunye, Li Quan. 2009. Tectonic units’ division and Precambrian significant geological events in Altyntagh mountain, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1430–1438 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User’ s Manual for Isoplot 3.00. A geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1–70.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua. 1994. Magma–Dynamic of Granitoid– Theory, Method and a Case Study of the Eastern Hubei granitoids[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 201–212(in Chinese).
- Ma Tuo, Liu Liang, Gai Yongsheng, Wang Chao, Kang Lei, Liao Xiaoying, Pak Sangwan, Zhang Kui. 2018. Discovery of the high–pressure granitic granulite in South Altyn and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3643–3657(in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongping, Li Xiangming, Xu Xueyi, Sun Jiming, Tang Zhuo, Du

- Tao. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic-ultramafic intrusion southern Altun orogeny in northwestern China and its implication[J]. *Geology in China*, 38(4): 1071-1078(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- Pan Xufeng, Jiao Jiangang, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Zheng Kun, Gao Dong, Wu Di, Guo Wenfeng, Chen Hongjie. 2019. Zircon U-Pb dating and Hf isotope characteristics of the Aketishan granite in the southern margin of the Altun and their tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 633-646(in Chinese with English abstract).
- Peng Yinbiao, Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Li Sanzhong, Sun Deyou. 2018. Timing of Early Paleozoic oceanic crust subduction in North Altun: Evidence from plagiogranite and granodiorite[J]. *Geology in China*, 45(2): 334-350(in Chinese with English abstract).
- Raith J G. 1995. Petrogenesis of the Concordia granite gneiss and its relation to W-Mo mineralization in western Namaqualand, South Africa[J]. *Precambrian Research*, 70(3/4): 303-335.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247-263.
- Sai Shengxun, Zhao Tianming, Wang Zhongliang, Huang Suoying, Zhang Liang. 2016. Petrogenesis of Linglong biotite granite: Constraints from mineralogical characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2477-2493(in Chinese with English abstract).
- Sarjoughian F, Kananian A, Ahmadian J, Murata M. 2015. Chemical composition of biotite from the Kuhe Dom pluton, Central Iran: implication for granitoid magmatism and related Cu-Au mineralization[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3): 1521-1533.
- Scherer E, Münker C, Mezger K. 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium clock[J]. *Science*, 293(5530): 683-687.
- Selby D, Nesbitt B E. 2000. Chemical composition of biotite from the Casino porphyry Cu-Au-Mo mineralization, Yukon, Canada: Evaluation of magmatic and hydrothermal fluid chemistry[J]. *Chemical Geology*, 171(1): 77-93.
- Shabani A, Lalonde A E, Whalen J B. 2003. Composition of biotite from granitic rocks of the Canadian Appalachian Orogen: A potential tectono magmatic indicator?[J]. *Canadian Mineralogist*, 41(6): 1381-1396.
- Sun Jiming, Ma Zhongping, Tang Zhuo, Li Xiangming. 2012. LA-ICP-MS zircon dating of the Yumuquan magma mixing granite in the southern Altyntagh and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 247-257(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W E. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313-345.
- Uchida E, Endo S, Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Resource Geology*, 57(1): 47-56.
- Wang C, Liu L, Xiao P X, Cao Y T, Yu H Y, Meert J G, Liang W T. 2014. Geochemical and geochronologic constraints for Paleozoic magmatism related to the orogenic collapse in the Qimantagh-South Altyn region, northwestern China[J]. *Lithos*, 202/203: 1-20.
- Wang Chao, Liu Liang, Zhang Anda, Yang Wenqiang, Cao Yuting. 2008. Geochemistry and petrography of Early Paleozoic Yusupuleke Tagh rapakivi-textured granite complex, south Altyn: An example for magma mixing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2809-2819 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lishe, Li Zhiming, Yang Pengfei, Duan Xingxing, Zhang Yaoxuan, QiuYinjiang, Qiao Gengbiao. 2016. Isotopic age and geochemical characteristics of Qingshuiquan amphibolite in south Altyntagh[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 839-852(in Chinese with English abstract).
- Wang Yong, Wu Yu, Chen Bailin, Chen Zhengle, Wang Bin, Shi Yonghong, Tan Renwen, Gao Yun, Shen Jinghui. 2020. Geochemical characteristics and metallogenic potential of ultrabasic rocks in North Altun area, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 47(4): 1220-1240(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Chappell B W. 1988. Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I- and S-type granites of the Lachlan fold belt, Southeast Australia[J]. *American Mineralogist*, 73(3/4): 281-296.
- Wolf M B., London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127-4145.
- Wones D R, Hans P E. 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and application[J]. *American Mineralogist*, 50(9): 1228-1272.
- Wu C L, Chen H J, Wu D, Ernst W G. 2018. Paleozoic granitic magmatism and tectonic evolution of the south Altun block, NW China: Constraints from zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 168-199.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng, Liu Chunhua, Li Mingze, Frost B R, Wooden J L. 2014. Zircon SHRIMP U-Pb dating, Lu-Hf isotopic characteristics and petrogenesis of the Paleozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2297-2323(in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Lei Min, Wu Di, Zhang Xin, Chen Hongjie, Li Tianxiao. 2016a. Zircon U-Pb dating of Paleozoic granites from South Altun and response of the magmatic activity to the tectonic evolution of the Altun orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2276-2315(in Chinese with English abstract).

- Wu Cailai, Lei Min, Zhang Xin, Chen Hongjie, Wu Di, Li Tianxiao. 2016b. Petrogenesis and zircon Lu-Hf isotopic characteristics of the granites from the southern Altun area, northwest China[J]. *Geology in China*, 43(6): 1853-1883(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Jahn B, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 66(3/4): 241-273.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007b. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007a. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Suoping, Wu Cailai, Chen Qilong. 2007. Characteristics and tectonic setting of the Tula aluminous A-type granite at the south side of the Altyntagh fault, NW China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1385-1392 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Jiang Mei, Li Haibing, Cui Junwen. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193-205(in Chinese with English abstract).
- Yang Wenqiang, Liu Liang, Ding Haibo, Xiao Peixi, Cao Yuting, Kang Lei. 2012. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunalike granite in south Altyntagn and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4139-4150(in Chinese with English abstract).
- Yang Yang, Wang Xiaoxia, Yu Xiaowei, Ke Changhui, Wang Ligong, Guo Ruipeng, Wang Shunan, Li Xiaoxia. 2017. Chemical composition of biotite and amphibole from Mesozoic granites in northwestern Jiaodong Peninsula, China, and their implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3123-3136(in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhongcheng, Hong Zenglin, Liu Fangxiao, Bian Xiaowei, Li Qi, Gao Feng, He Yuanfang, Jian Kunkun. 2020. Confirmation of gneissic granite of Qingbaikou period and its constraint on the timing of the Rodinia supercontinent on the Altun orogenic belt[J]. *Geology in China*, 47(3): 569-589(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaofei, Chen Guochao, Zhou Yi, Li Yuanbai, Teng Chao, Wang Biren, Pang Zhenshan, Cao Kan, Wei Junqi. 2019. Characteristics and tectonic setting of volcanic rocks of Baiyingaolao Formation in Hanwula of Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 46(6): 1410-1432(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jiaolong, Qiu Jiansheng, Li Zhen, Liu Liang, Li Youlian. 2012. Petrogenesis of the Taiwushan granite pluton in Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3938-3950(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological meaning[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 63-73(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaohui, Chen danling, Wang Chao, Wang Hong, Liu Liang. 2015. The initiation, development and termination of the Neoproterozoic - Early Paleozoic ocean in the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Acta Geological Sinica*, 89(2): 234-251(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹玉亭, 刘良, 王超, 杨文强, 朱小辉. 2010. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 26(11): 3259-3271.
- 车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1995. 阿尔金山地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境[J]. *科学通报*, 40(14): 1298-1300.
- 陈红杰, 吴才来, 雷敏, 郭文峰, 张昕, 郑坤, 高栋, 吴迪. 2018. 南阿尔金陆块科克萨依新元古代花岗岩成因及地质意义[J]. *地球科学*, 43(4): 1278-1295.
- 高栋, 吴才来, 郜源红, 张昕, 陈红杰, 郭文峰, 吴迪, 郑坤. 2019. 南阿尔金玉苏普阿拉克塔格花岗岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *地球科学*, 44(11): 3812-3828.
- 郭金城, 徐旭明, 陈海燕, 李先, 董洪凯, 提振海. 2014. 新疆阿尔金长沙沟超镁铁质岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *西北地质*, 47(4): 170-177.
- 郭喜运, 孙华山, 董挨管, 任建勋, 徐瑞英, 高博. 2019. 内蒙古锡林浩特北早二叠世花岗岩类定年及成因[J]. *中国地质*, 46(6): 1396-1409.
- 郭召杰, 张志诚, 王建君. 1998. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义[J]. *科学通报*, 43(18): 1981-1984.
- 过磊, 李建星, 郭琳, 奚仁刚, 潘峰. 2019. 南阿尔金茫崖碱长花岗岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究[J]. *西北地质*, 52(1): 1-13.
- 菅坤坤, 刘向东, 何元方, 袁璋, 曾忠诚, 赵端昌, 王星, 杜彪, 王天毅. 2018. 阿尔金中段大通沟花岗岩体年代学、地球化学特征及其成因[J]. *中国地质*, 45(4): 740-752.
- 康磊, 刘良, 曹玉亭, 王超, 杨文强, 梁莎. 2013. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克复式花岗岩体东段片麻状花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(9): 3039-3048.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 奚仁刚, 杨再朝. 2016. 茫崖二长花岗岩、石英闪长岩的年代学、地球化学及岩石成因: 对阿尔金南缘早古生代构造-岩浆演化的启示[J]. *岩石学报*, 32(6): 1731-1748.
- 康磊. 2014. 南阿尔金高压-超高压变质带早古生代多期花岗岩质岩浆作用及其地质意义[D]. 西安: 西北大学, 1-119.
- 李向民, 马中平, 孙吉明, 徐学义, 雷永孝, 王立社, 段星星. 2009. 阿尔金断裂南缘约马克其镁铁-超镁铁岩的性质和年代学研究[J]. *岩石学报*, 25(4): 862-872.
- 林景旸. 1987. 岩浆成因导论[M]. 北京: 地质出版社, 1-277.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中

- 的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} [J]. 长春地质学院学报, 24(2): 155-162.
- 刘良, 陈丹玲, 王超, 张成立. 2009. 阿尔金、柴北缘与北秦岭高压—超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 472-479.
- 刘良, 康磊, 曹玉亭, 杨文强. 2015. 南阿尔金早古生代俯冲碰撞过程中的花岗质岩浆作用[J]. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1126-1137.
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 陆松年, 修群业, 李铨. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件[J]. 地质通报, 28(10): 1430-1438.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华. 1994. 花岗岩类岩浆动力学: 理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 210-212.
- 马拓, 刘良, 盖永升, 王超, 康磊, 廖小莹, 朴常完, 张魁. 2018. 南阿尔金尤努斯萨依花岗质高压麻粒岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 34(12): 3643-3657.
- 马中平, 李向民, 徐学义, 孙吉明, 唐卓, 杜涛. 2011. 南阿尔金山清水泉镁铁—超镁铁质侵入体LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年及其意义[J]. 中国地质, 38(4): 1071-1078.
- 潘雪峰, 焦建刚, 吴才来, 郜源红, 郑坤, 高栋, 吴迪, 郭文峰, 陈红杰. 2019. 阿尔金南缘阿克提山岩体锆石U-Pb定年、Hf同位素特征及构造意义[J]. 地质学报, 93(3): 633-646.
- 彭银彪, 于胜尧, 张建新, 李三忠, 孙德有. 2018. 北阿尔金地区早古生代洋壳俯冲时限: 来自斜长花岗岩和花岗闪长岩的证据[J]. 中国地质, 45(2): 334-350.
- 赛盛勋, 赵天明, 王中亮, 黄锁英, 张良. 2016. 玲珑黑云母花岗岩成因: 矿物学特征约束[J]. 岩石学报, 32(8): 2477-2493.
- 孙吉明, 马中平, 唐卓, 李向民. 2012. 阿尔金南缘鱼目泉岩浆混合花岗岩LA-ICP-MS测年与构造意义[J]. 地质学报, 86(2): 247-257.
- 王超, 刘良, 张安达, 杨文强, 曹玉亭. 2008. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用: 玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 24(12): 2809-2819.
- 王立社, 李智明, 杨鹏飞, 段星星, 张耀选, 仇银江, 乔耿彪. 2016. 阿尔金清水泉斜长角闪岩同位素定年及其地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 40(4): 839-852.
- 王永, 吴玉, 陈柏林, 陈正乐, 王斌, 石永红, 谭人文, 高允, 申景辉. 2020. 北阿尔金地区超基性岩地球化学特征及其成矿潜力分析[J]. 中国地质, 47(4): 1220-1240.
- 吴才来, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, Frost B R, Wooden J L. 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石SHRIMP U-Pb定年、Lu-Hf同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 30(8): 2297-2323.
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 张昕, 陈红杰, 李天啸. 2016a. 南阿尔金古生代花岗岩U-Pb定年及岩浆活动对造山带构造演化的响应[J]. 地质学报, 90(9): 2276-2315.
- 吴才来, 雷敏, 张昕, 陈红杰, 吴迪, 李天啸. 2016b. 南阿尔金花岗岩锆石Lu-Hf同位素特征及岩石成因[J]. 中国地质, 43(6): 1853-1883.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007b. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007a. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185-220.
- 吴锁平, 吴才来, 陈其龙. 2007. 阿尔金断裂南侧吐拉铝质A型花岗岩的特征及构造环境[J]. 地质通报, 26(10): 1385-1392.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. 地质学报, 73(3): 193-205.
- 杨文强, 刘良, 丁海波, 校培喜, 曹玉亭, 康磊. 2012. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学、锆石U-Pb年代学与Hf同位素特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 28(12): 4139-4150.
- 杨阳, 王晓霞, 于晓卫, 柯昌辉, 王立功, 郭瑞朋, 王顺安, 李小霞. 2017. 胶西北中生代花岗岩中黑云母和角闪石成分特征及成岩成矿意义[J]. 岩石学报, 33(10): 3123-3136.
- 曾忠诚, 洪增林, 刘芳晓, 边小卫, 李琦, 高峰, 何元方, 菅坤坤. 2020. 阿尔金造山带青白口纪片麻状花岗岩的厘定及对Rodinia超大陆汇聚时限的制约[J]. 中国地质, 47(3): 569-589.
- 张晓飞, 陈国超, 周毅, 李沅柏, 滕超, 王必任, 庞振山, 曹侃, 魏均启. 2019. 内蒙古西乌旗罕乌拉地区白音高老组火山岩特征及形成构造背景[J]. 中国地质, 46(6): 1410-1432.
- 赵娇龙, 邱检生, 李真, 刘亮, 李友连. 2012. 福建太武山花岗岩体成因: 锆石U-Pb年代学与Hf同位素制约[J]. 岩石学报, 28(12): 3938-3950.
- 周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. 岩石学报, (3): 63-73.
- 朱小辉, 陈丹玲, 王超, 王红, 刘良. 2015. 柴达木盆地北缘新元古代—早古生代大洋的形成、发展和消亡[J]. 地质学报, 89(2): 234-251.