

doi: 10.12029/gc20160602

吴才来, 雷敏, 张昕, 等. 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, 2016, 43(6): 1853-1883.

Wu Cailai, Lei Min, Zhang Xin, et al. Petrogenesis and zircon Lu-Hf isotopic characteristics of the granites from the southern Altun area, Northwest China[J]. *Geology in China*, 2016, 43(6): 1853-1883(in Chinese with English abstract).

南阿尔金花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素特征及岩石成因

吴才来¹ 雷敏¹ 张昕¹ 陈红杰¹ 吴迪² 李天啸²

(1. 大陆动力学研究中心, 中国地质科学院地质所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:在以往工作的基础上, 结合本文的岩石地球化学研究, 将南阿尔金花岗岩划分为 5 期, 第 1 期花岗岩组合为石英闪长岩+花岗闪长岩+二长花岗岩, 具有 I 型花岗岩的属性, 时代 >460 Ma; 第 2 期花岗岩组合为花岗闪长岩+二长花岗岩+正长花岗岩, 也具有 I 型花岗岩的特征, 时代为 435~450 Ma; 第 3 期花岗岩组合为二长花岗岩+正长花岗岩+碱长花岗岩, 具有 A 型花岗岩的属性, 时代为 385~411 Ma; 第 4 期花岗岩组合为花岗闪长岩+二长花岗岩, 时代为 343~352 Ma, 具有 S 型花岗岩的地球化学属性; 第 5 期花岗岩组合为石英闪长岩+二长花岗岩+正长花岗岩, 具有 I 型花岗岩的地球化学特征, 时代为 265 Ma。各期花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析表明, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大多数为正值, 少数继承性锆石为负值, 反映了它们的源岩以新生地壳为主, 同时, 也混有少量的古大陆壳的成分。根据年代学和岩石地球化学研究结果, 结合区域地质特征, 我们认为第 1 期(465~469 Ma)花岗岩浆活动可能与洋壳的俯冲作用有关; 第 2 期(435~450 Ma)岩浆活动可能是碰撞后环境; 第 3 期(404~411 Ma)岩浆活动可能与板块碰撞后造山带块体均衡调整、伸展有关, 第 4 期(343~352 Ma)、第 5 期(265 Ma)岩浆活动可能与造山带深部块体的拆沉作用有关。

关键词: 锆石 Lu-Hf 同位素; 岩石成因; 南阿尔金

中图分类号: P597; P588.12⁺1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)06-1853-32

Petrogenesis and zircon Lu-Hf isotopic characteristics of the granites from the southern Altun area, Northwest China

WU Cai-lai¹, LEI Min¹, ZHANG Xin¹, CHEN Hong-jie¹, WU Di², LI Tian-xiao²

(1. *Research Center of Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*)

Abstract: On the basis of previous studies in conjunction with granite dating and geochemical study results in this paper, the South Altun granite can be divided into five episodes: episode 1, characterized by the granite association of quartz diorite + granodiorite + monzogranite, with affinities of I-type granite and an age of >460 Ma; episode 2, characterized by the granite association of

收稿日期: 2015-10-23; 改回日期: 2016-03-29

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(121201102000150005-06、12120115027001、12120114079901、1212010918007、1212010818090、1212010611803)、国家自然科学基金项目(41472063、40672049、40472034)和创新研究群体科学基金项目(40921001)联合资助。

作者简介: 吴才来, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 岩石学专业, 长期从火成岩岩石学、岩浆与成矿科研工作;
E-mail: wucailai@126.com。

granodiorite + monzogranite + syenogranite, with geochemical affinities of I-type granite and an age of 435–450 Ma; episode 3, characterized by the granite association of monzogranite + syenogranite + alkali feldspar granite, with affinities of A-type granite and an age of 385–411 Ma; episode 4, characterized by the granite association of granodiorite + monzogranite with an age of 343–352 Ma, with geochemical affinities of S-type granite; and episode 5, characterized by the granite association of quartz diorite + monzogranite + syenogranite, with geochemical affinities of I-type granite and an age of 265 Ma. Zircon Lu–Hf isotope analysis of granite in various episodes showed that $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are positive in most cases and negative for a small number of inherited zircons, indicating that their source rocks were mainly juvenile crust mixed with a minor amount of ancient continental components. Based on the results of the above studies in conjunction with regional geological characteristics, it is considered that episode-1 granitic magma activity might be related to the subduction of oceanic crust, episode-2 magma activity might belong to post-collisional magma activity, episode-3 magma activity might be related to the isostatic adjustment of orogen blocks after plate collision, and episode-4 and episode-5 magma activity might be related to the delamination of deep blocks under the southern Altun orogen.

Key words: zircon Lu–Hf isotope; petrogenesis; south Altun

About the first author: WU Cai-lai, male, born in 1960, doctor, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of igneous petrology and mineralization; E-mail: wucailai@126.com.

Fund support: Supported by Geological Survey Projects (No. 121201102000150005–06, 12120115027001, 12120114079901, 1212010918007, 1212010818090, 1212010611803) from China Geological Survey; National Natural Science Foundation of China (No. 41472063, 40672049, 40472034) and the Innovation Research Group Science Fund Project (No. 40921001).

中国地质调查局地质调查项目的实施,大大地促进了中国地质事业的飞速发展。特别是对研究程度较低的阿尔金地区,地调项目的实施不仅积累了大量的第一手地质资料,而且在高压—超高压变质岩及蛇绿岩等研究方面也取得了巨大的进展^[1–15]。相比之下,花岗岩方面的研究成果相对较少,但仍取得了一些新的进展^[16–24]。如马铁球等^[16]研究认为,南阿尔金的花岗岩类主要为石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩,其矿物学、岩石化学、微量元素、稀土元素及同位素地球化学特征表明,它们属钙碱性系列,并具有同源岩浆演化的特征,可能形成于活动大陆边缘,其中的花岗闪长岩 Rb–Sr 全岩等时线年龄为 575 Ma,属晚震旦世的产物^[16]。而早古生代花岗岩类以 A 型为主,断裂带附近 I 型增多,岩体规模较大、范围较广,总体呈北东向—北东向展布;晚古生代花岗岩类以 I 型为主,岩体规模较小^[16]。曹玉亭等^[20]对阿尔金南缘塔特勒克布拉克复式花岗质岩体西段的二长花岗岩进行了地球化学和年代学研究,获得其形成时代为 (464 ± 2) Ma,并提出其形成于碰撞造山后抬升初期。上述这些研究基本上是针对部分岩体开展的,缺少系统的整体上考虑。南阿尔金花岗质岩浆活动究竟有几期?每一期岩浆活动代表了什么构造背景?与阿尔金造山带构造演化有何成因联系?与北阿尔金、北祁连、柴北缘古生代花岗质岩浆活

动有无可比性?到目前为止,尚未见到这些方面的研究成果。本文试图通过南阿尔金地区古生代花岗岩锆石的 Lu–Hf 同位素和岩石地球化学研究,结合区域地质构造特征,对花岗岩的成因及其与构造演化的关系作一探讨。

1 地质背景

阿尔金地块是青藏高原北缘的一部分,位于塔里木、柴达木、阿拉善地块之间(图 1-a、b)。阿尔金山延绵约 1000 km,其北邻塔里木盆地,南为巨型的阿尔金左行走滑大断裂所限,经历了太古宙—古元古代陆核和结晶基底的形成阶段^[25–27]、中元古代稳定大陆边缘沉积、新元古代末期—早古生代板块扩张^[28]、加里东期板块俯冲—碰撞^[29–34]、晚古生代剥露夷平和局部浅海沉积,印支期表现伸展作用和碱性岩浆侵位^[16,35]、晚燕山期阿尔金断裂大规模的左行走滑,形成了不同构造层次、不同时期和不同构造环境的地质体所组成的复合造山带^[35–39]。根据最新的区域地质资料,阿尔金造山带由北到南分别划分为 5 个次级构造单元:阿北微地块(敦煌地块)(图 1-c-I)、北阿尔金蛇绿混杂岩带(图 1-c-II)、阿中微地块(图 1-c-III)、南阿尔金高压超高压带(图 1-c-IV)、南阿尔金早古生带蛇绿混杂岩带(图 1-c-V)^[31,39–41]。

阿北地块出露于阿尔金山北缘至敦煌西南,主要由太古代的米兰岩群和 TTG 岩系组成,主要岩石

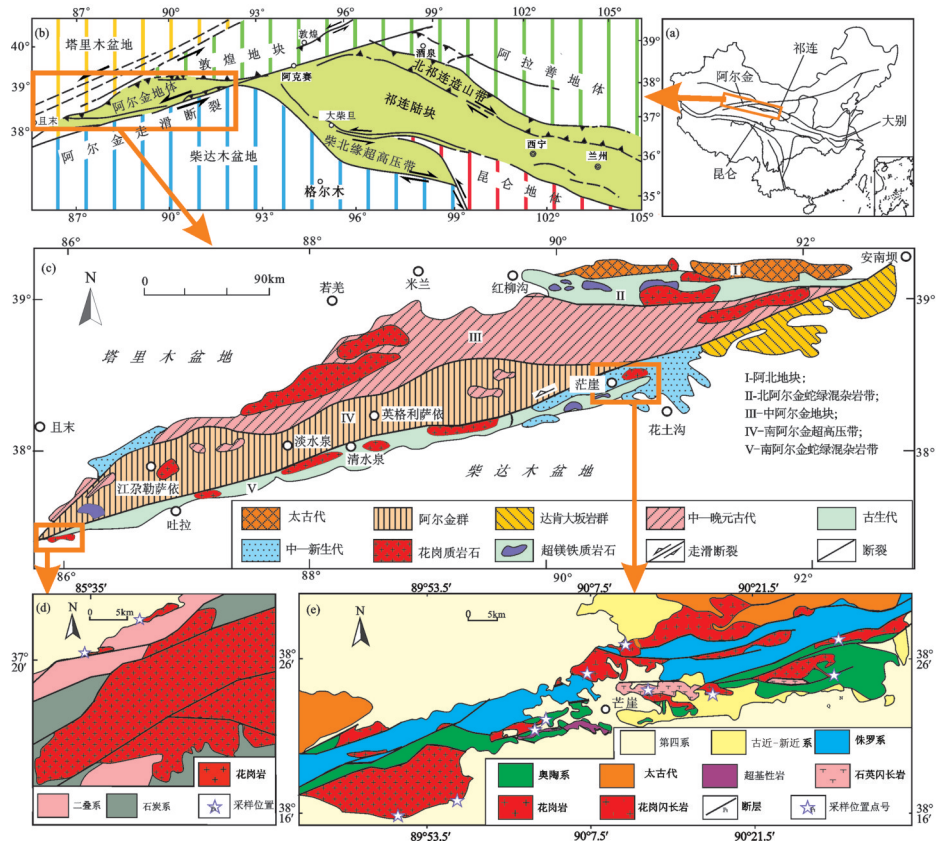


图1 南阿尔金地区花岗岩分布地质图
Fig.1 Distribution of granites in southern Altun

类型包括基性麻粒岩、紫苏斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩、石榴斜长角闪岩、黑云角闪斜长片麻岩、变粒岩、大理岩、含石墨石英片岩,原岩以中酸性火山岩和基性火山岩组成的双峰式火山岩系为主,夹少量沉积岩。米兰群麻粒岩、斜长角闪岩的Sm-Nd等时线年龄分别为(2787±151) Ma、(2677±240) Ma^[42],火山岩及英云闪长岩锆石SHRIMP年龄分别为(2592±15) Ma、(2567±32) Ma^[39],此外,还含有碎屑岩、碳酸盐岩和少量基性火山岩,而且也包括了一些未变质—弱变质的基性火山岩、硅质岩、灰岩、基性超基性侵入岩,以及高压变质泥质岩^[25,43],蛇绿岩带中的基性火山岩具有洋脊或洋岛玄武岩的特征^[26,43]。郭召杰等^[28]对阿克塞地区辉长岩和玄武岩的Sm-Nd分析,给出全岩等时线年龄为(949±62) Ma和辉长岩年龄(829±60) Ma,认为其形成时代为新元古代,属板内裂谷火山岩组合^[44];刘良^[30]获得米兰红柳沟蛇绿岩中火山岩的Sm-Nd等时线年龄为(508±41) Ma,认为是蛇绿岩的时代。

中阿尔金中新元古代构造岩片主要为中元古代长城系巴什库尔干群和蓟县系塔昔达坂群浅变质沉积岩系,在岩片南部分布少量新元古代青白口系索尔库里群,东部见少量震旦系。巴什库尔干群、塔昔达坂群和索尔库里群尽管在空间分布上不连续(以断裂构造接触),但这3个时期的沉积建造相似,均以碎屑岩、碳酸盐岩建造为主,只是在中元古代蓟县系塔昔达坂群中夹有少量基性火山岩,变质程度最高可达绿片岩相,反映了中阿尔金地块当时为塔里木古老陆块边缘的滨海—浅海环境。

南阿尔金高压超高压带分布于原阿尔金山岩群的出露部位(图1-c),是由表壳岩(斜长角闪岩、石榴黑云变粒岩、含矽线石黑云斜长片麻岩、黑云片岩、石墨大理岩、蓝晶石黑云斜长片麻岩和石榴斜长角闪岩)、花岗质岩石(英云闪长质—花岗闪长质片麻岩、弱片麻状含石榴子石花岗岩)和榴辉岩组成。其中的变质基性火山岩和变质基性岩墙的原岩成分以大洋拉斑玄武岩为主,少数为大陆拉斑玄武岩。

武岩或钙碱性、碱性玄武岩,原岩形成的构造环境主要是M型洋中脊环境,其次为岛弧环境,它们代表了岛弧背景下的一套火山岩组合^[45-47]。张建新等^[48-50]获得其中的榴辉岩锆石U-Pb年龄为(504±5) Ma,全岩-石榴子石-绿辉石Sm-Nd等时线年龄为(500±10) Ma,认为是榴辉岩的变质年龄。刘良等^[2]对江孜勒萨依的榴辉岩和围岩石榴子石黑云母片麻岩开展了锆石LA-ICP-MS微区原位测年,获得了榴辉岩原岩的形成年龄为(754±9) Ma,变质年龄为(493±4) Ma,围岩中锆石的变质年龄为(499±27) Ma。结合超高压石榴石二辉橄榄岩的发现和超高压含石榴石花岗片麻岩的研究结果^[1,51-53],证明该超高压岩石的形成是陆壳深俯冲作用的产物,而且俯冲深度可能达到>200 km的地幔深处^[52,54]。

阿尔金左型走滑断裂以南的阿帕-茫崖早古生带蛇绿混杂岩带,是分割阿尔金造山带与祁漫塔格、柴南缘的构造边界。带中产出大量的与基性火山岩伴生的基性超基性岩块及花岗岩类。超基性岩主要为蛇纹石化橄榄岩,基性岩主要为角闪辉长岩和拉斑玄武岩,玄武岩具有MORB和OIB的特征,同时,还有硅质岩、黑云斜长片麻岩、石英片岩、白云质大理岩等,构成了蛇绿岩组合^[29,61]。其中具蛇绿岩特征的镁铁-超镁铁质岩石时代为(501±2) Ma^[55],变质基性火山岩的Sm-Nd等时线年龄为(481±53) Ma^[29],角闪辉长岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(445±1) Ma^[8],说明早古生代南阿尔金存在多洋盆、多微古陆、多岛洋的古地理格局。

2 岩体地质及岩相学特征

本文研究的花岗岩体位于阿尔金左型走滑断裂以南的阿帕-茫崖早古生带蛇绿混杂岩带上(图1-c-V)。该带以发育奥陶纪海相火山-沉积岩和侏罗纪陆相碎屑岩为特征,花岗岩的围岩主要为奥陶纪的火山岩,部分岩体与奥陶系为侵入接触,部分为断层接触,而中、新生代地层覆盖在花岗岩体之上。从西到东各岩体的地质特征分述如下:

2.1 且末依干村岩体

该岩体位于阿尔金的西南端,且末县南依干村附近(图1-d)。岩体规模较大,长约70 km,宽约6~15 km,出露面积约100 km²,分别在岩体北部114、115点(坐标分别为N37°20.862', E85°35.393',

H2847 m和N37°25.142', E85°45.539', H2740 m)采集样品114-2、114-5和115-3、115-6、115-8。岩体主要由灰白色中粗粒花岗闪长岩组成,主要矿物为斜长石(60%~72%)、石英(15%~20%)、碱性长石(10%~15%)、黑云母(3%~5%),部分黑云母蚀变成绿泥石。岩体中偶见暗色微粒闪长质包体。

2.2 白干湖村北岩体

该岩体位于茫崖镇西约30 km的白干湖村北10 km处(图1-e)。岩体呈一不规则的扁豆状。岩体北侧发育宽约1~2 km的奥陶系混杂岩带,两者之间为断层接触,岩体南部被第四系覆盖。该岩体主要由似斑状花岗岩和中细粒花岗岩组成。分别在130、131点(坐标分别为N38°15.907', E89°57.5', H3662 m和N38°12.854', E89°57.892', H3427 m)采集样品130-2、130-5、130-11、130-14和131-2、131-5、131-8、131-11。岩石浅肉红色,似斑状花岗岩中的斑晶为碱性长石,1 cm×2 cm,基质为中细粒结构,主要矿物为斜长石(40%~52%)、碱性长石(25%~30%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%~5%)。岩体中偶见暗色微粒闪长质包体,包体呈次园形,大小为5 cm×8 cm。中细粒花岗岩为块状,主要矿物为斜长石(33%~45%)、碱性长石(30%~35%)、石英(20%~25%),其次为黑云母(5%~7%)。这种岩性可能为岩体的边缘相,呈不规则状分布于似斑状花岗岩的边部。

2.3 茫崖镇西岩体

岩体呈北东东向分布,呈西宽东窄的不规则长条形,长约7~8 km,宽约0.5~1 km,出露面积约5~6 km²(图1-e)。岩体北侧被侏罗系覆盖,南侧与奥陶系之间呈断层接触,岩体东西两端与奥陶系呈侵入接触。该岩体岩性主要为二长花岗岩(采样点号:128、129,坐标分别为N38°22.028', E90°4.195', H3244 m和N38°22.05', E90°4.33', H3229 m),采集样品128-3、128-7和129-2、129-5。岩石灰白色,中细粒结构,块状构造,主要造岩矿物为斜长石(35%~45%)、石英(20%~25%)、碱性长石(30%~32%),其次为黑云母(5%~8%)。岩石局部出现碎裂构造,石英具有波状消光现象。

2.4 茫崖镇北岩体

岩体位于茫崖镇以北(图1-e),呈较大的岩株状,其长轴呈近东西向分布。岩体长约10公里,宽约1~3 km,出露面积约20 km²。岩体侵入到下元古

代硅化大理岩和奥陶纪安山岩之中。岩体地表风化较严重,大多被第四系覆盖,由于修建305国道,揭示出新鲜岩石露头(采样号:110/147,坐标位置: N38°25.298', E90°7.614', H3136 m)。主要岩性为花岗闪长岩和花岗岩。花岗岩中包裹了花岗闪长岩的块体。花岗闪长岩为灰色,中细粒结构,主要矿物为斜长岩(45%~60%),其次为角闪石(10%~15%)、碱性长石(10%~15%)、石英(15%~20%)、黑云母(5%),其中的暗色造岩矿物大都蚀变成绿泥石。花岗岩为灰白色,中粒结构,主要矿物为斜长石(40%~50%)、碱性长岩(25%~30%)、石英(20%~25%),其次为黑云母(5%)。

2.5 阿卡腾龙山岩体

岩体主要出露于阿卡腾龙山主峰以西,出露面积约80 km²,呈较大的不规则状岩株(图1-e)。总体呈北东东向分布,岩体北部侵位于早元古界片岩、片麻岩、大理岩及混合岩中,岩体边部具有明显的同化混染现象。岩体南部被侏罗系覆盖,西部被第三系覆盖。该岩体主要岩性为石英闪长岩(采样号:148,坐标位置: N38°27.129', E90°10.102', H3262 m),岩石呈浅灰色,中细粒结构,主要矿物为斜长石(60%~70%),其次为角闪石(10%~15%)、碱性长石(8%~10%)、石英(7%~10%),少量的黑云母(5%)。

2.6 常春沟岩体

该岩体位于常春沟以西,呈不规则条带状岩株,长轴呈东西向分布,长约10 km,宽约1~2 km,出露面积约15 km²,主要由石英闪长岩(采样点号:112,坐标位置: N38°23.584', E90°18.100', H3358 m)和花岗岩(采样点号:145,坐标位置: N38°23.696', E90°13.141', H3398 m)组成。石英闪长岩为灰色,中细粒结构,主要矿物为斜长石(65%~75%),其次为石英(5%~10%)、碱性长石(10%)和角闪石(5%~10%)以及黑云母(5%),部分角闪石和黑云母蚀变成绿泥石。花岗岩为浅肉红色,中粒—中粗粒结构,主要矿物为碱性长石(55%~65%)和石英(20%~25%),其次为斜长石(10%~15%)、黑云母(5%)。部分碱性长石具有粘土化,部分斜长石具有绢云母化,黑云母具有绿泥石化。

2.7 柴水沟岩体

该岩体出露形态不规则(采样点号:107/143、144,坐标位置分别为: N38°26.410', E90°28.229',

H3652 m 和 N38°25.131', E90°28.445', H3549 m),在两个点分别采集样品:143-2、143-5、106-2、107-8、144-2。岩体呈北东向,围岩为奥陶系,岩体与围岩之间为断层接触(图1-e)。岩体长约9 km,宽约1~3 km,出露面积约12 km²。岩体中发育不规则状辉绿岩脉块体,辉绿岩块体大小不一,延伸较长的为曲折状,延伸较短的为团块状,与花岗岩具有明显的接触界线。花岗岩主要为红色,中粒—中粗粒粒状结构,主要矿物为钾长石(50%~65%)、石英(20%~30%),其次为斜长石(10%~15%),少量的黑云母(5%)。岩体与辉绿岩接触带附近的花岗岩具有似斑状结构,斑晶为碱性长石,大小为4~8 mm。辉绿岩为黑色,致密块体,辉绿结构,主要矿物为长条形的斜长石(65%~75%),其次为粒状的辉石(15%~20%)、磁铁矿等(10%~15%)。斜长石杂乱排列,构造近三角形的空隙,其中被粒状的辉石充填。

2.8 阿克提山岩体

该岩体位于阿尔金南缘断裂带上(采样点号:109/142,坐标位置: N38°26.948', E90°27.350', H3816 m)。岩体北东向延伸,明显地受断裂控制,呈狭窄的条带状,长约12 km,宽0.5~1.5 km,出露面积约8 km²(图1-e)。岩体南部与奥陶系呈侵入接触,北部与侏罗系之间为断层接触。岩体中发育不规则团块状的灰绿色火山岩,可能是花岗岩侵位过程中虏获的尚未同化的奥陶系围岩残留体。在岩体的东部和西部分别采集了样品(109-3、141-2、142-1、142-2、142-3)。主要岩石组合为石英闪长岩+花岗闪长岩+二长花岗岩,各类型岩石之间没有明显的穿插关系,岩性变化渐变过渡。石英闪长岩为深灰色,细粒结构,主要矿物为斜长石(60%~75%),其次为角闪石(15%~25%)、石英(5%~10%),少量的黑云母(5%),暗色矿物发生强烈的绿泥石化。花岗闪长岩为浅灰色,中粒结构,主要矿物为斜长石(55%~65%)、石英(15%~20%),其次为角闪石(10%~15%)、碱性长石(10%)。二长花岗岩为淡粉红色,中粒结构,主要矿物为斜长石(45%~55%)、钾长石(20%~25%)、石英(20%~25%),其次为黑云母(5%)。

3 分析方法

3.1 化学全分析

本研究选择了32个较新鲜的岩石样品进行

了化学全分析。分析单位是中国地质科学院测试所(国家地质实验测试中心)。氧化物用X荧光光谱仪3080E测试,执行标准分别为:Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、P₂O₅、K₂O、CaO、TiO₂、MnO、Fe₂O₃、FeO,按GB/T14506.28-1993标准;H₂O⁺按GB/T14506.2-1993标准;CO₂按GB 9835-1988标准;LOI按LY/T 1253-1999标准;稀土元素La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y和微量元素Cu、Pb、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni用等离子质谱Excell测试,执行标准为DZ/T0223-2001;微量元素Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、Zr、Ga用X荧光光谱仪2100测试,执行JY/T016-1996标准。

3.2 锆石 Hf 同位素测定

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,所用仪器为 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径采用 55 μm 或 40 μm,测定时使用国际上通用的锆石标样 GJ1 作为参考物质,分析过程中锆石标准 GJ1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282015±8(2σ, n=10)。相关仪器运行条件及详细分析流程见参考文献[56]。

4 结 果

4.1 岩石元素地球化学

共采集了32个样品进行化学全分析,结果见表1。

根据锆石 U-Pb 定年结果(另文发表),结合镜下鉴定结果,可将南阿尔金地区古生代花岗岩年龄分为5组:(1)462~469 Ma, (2)435~450 Ma, (3)405 Ma, (4)343~351 Ma, (5)265 Ma, 各组花岗岩的岩石地球化学特征分述如下:

4.1.1 主量元素

本区花岗岩类 SiO₂ 含量为 56.31%~79.06%, Na₂O+K₂O 含量为 5.00%~11.53%, 部分样品具有钾化现象,所以 K₂O 含量较高,导致 K₂O/Na₂O 比值变化较大(0.41~3.34)。从硅碱图来看(图2), 年龄为 462~469 Ma 的第一组花岗岩类 SiO₂ 含量为 58.55%~75.20%, 样品投点落入二长岩、正长岩、花岗岩区, 部分样品为碱性系列, 部分样品为亚碱性系列; 第2组年龄的花岗岩类 SiO₂ 含量为 67.37%~

79.06%, 大多数样品落入花岗岩区, 少数样品落入石英二长岩区和花岗闪长岩区, 基本为亚碱性系列; 第3组年龄的花岗岩类 SiO₂ 含量为 68.54%~76.71%, 样品主要落入花岗岩区, 为亚碱性系列; 第4组年龄的花岗岩类 SiO₂ 含量为 65.49%~70.00%, 样品主要落入花岗闪长岩区, 少数落入花岗岩区, 亚碱性系列; 第5组年龄的花岗岩类 SiO₂ 含量为 56.31%~74.07%, 大多数样品落入花岗岩区, 个别落入二长岩区, 部分样品为亚碱性系列, 部分样品为碱性系列(图2)。

所有花岗岩的铝饱和指数为 0.80~1.17, 其中第4组年龄的花岗岩类铝饱和指数均大于 1, 为 1.04~1.17(图3), 为过铝质; 第2组和第5组花岗岩类分别为 0.85~1.02 和 0.80~1.05, 为准铝质-弱铝饱和, 第1组和第3组花岗岩类均小于 1, 为准铝质, 部分为过碱质(图3)。按 Frost et al.^[57] 的分类, 本区花岗岩类主要属镁质类型, 个别为铁质类型(如样品 107-8 为二长花岗岩), 其中第1组岩石属碱性-碱钙性-钙碱性系列, 第2组为碱钙性-钙碱性-钙性系列, 第3组为碱钙性系列, 第4组主要为钙碱性系列, 少数为钙性系列, 第5组为碱性-碱钙性系列(图4)。

结合不同花岗岩类的岩相学特征, 得出5组花岗岩类的岩石组合分别为: 第1组: 石英闪长岩+花岗闪长岩+二长花岗岩; 第2组: 花岗闪长岩+二长花岗岩+正长花岗岩; 第3组: 二长花岗岩+正长花岗岩+碱长花岗岩; 第4组: 花岗闪长岩+二长花岗岩; 第5组: 石英闪长岩+二长花岗岩+正常花岗岩。

4.1.2 稀土元素

第1组花岗岩类稀土元素总量为 200.08×10⁻⁶~347.30×10⁻⁶(平均为 304.86×10⁻⁶), 其中样品 112-2 和 147-2 的稀土总量分别为最高和最低, 前者为石英闪长岩, 后者为花岗岩。本组花岗岩类的轻重稀土比值变化较大(6.49~17.76, 平均为 10.17), 其中石英闪长岩的轻重稀土元素比值高于花岗岩, 前者为 9.78~17.76, 后者为 6.49~6.64; (La/Sm)_N 和 (Gd/Yb)_N 值分别为 4.45、1.86。该组花岗岩样品的稀土配分模式相似, 为具有弱的负 Eu 异常(δEu 值为 0.39~0.81, 平均为 0.58)右倾型(图5-a), 说明轻稀土分异程度高于重稀土元素。

第2组花岗岩类的稀土总量明显地分为两类, 一类为白干湖村北花岗岩体, 稀土总量较高, 且变

表1 南阿尔金花岗岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})化学分析结果
 Table 1 Major (%) and trace element (10^{-6}) data of the granites from southern Altun

样品号	112-3	147-2	110-3	148-2	128-3	128-7	129-3	129-5	130-2	130-5	130-11
岩石名称	石英闪长岩	花岗闪长岩	花岗岩	石英闪长岩	花岗岩		花岗岩		花岗岩		
年龄	(469±3) Ma		(462±9) Ma		(444±6) Ma		(435±4) Ma				
SiO ₂	58.55	70.09	75.2	60.76	73.66	74.96	73.64	79.06	72.48	72.26	73.55
TiO ₂	0.67	0.37	0.13	0.63	0.13	0.05	0.04	0.05	0.53	0.29	0.29
Al ₂ O ₃	16.62	13.14	12.55	17.86	13.64	13.32	12.92	11.35	12.59	13.56	13.87
Fe ₂ O ₃	3.35	1.59	0.11	2.33	0.44	0.35	0.17	0.2	0.72	0.6	0.31
FeO	2.92	1.54	0.55	1.31	0.9	0.36	0.22	0.22	1.96	1.13	0.84
MnO	0.11	0.08	0.01	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01	0.05	0.03	0.03
MgO	2.78	1.2	0.43	1.42	0.36	0.19	0.17	0.17	0.96	0.51	0.39
CaO	3.82	2.19	0.6	2.49	3.14	0.84	2.24	0.94	2.45	1.69	1.73
Na ₂ O	5.23	2.55	6.66	4.63	4.22	3.7	3.45	3.76	2.76	2.5	3.2
K ₂ O	3.89	5.48	2.38	6.72	2.05	5.3	5.02	3.16	4.09	5.8	5.08
P ₂ O ₅	0.3	0.16	0.03	0.21	0.04	0.02	0.02	0.02	0.12	0.07	0.05
H ₂ O ⁺	1.25	1.4	0.52	1.08	1.14	0.44	0.55	0.49	0.77	0.86	0.36
CO ₂	0.22	0.09	0.13	0.12	0.23	0.25	0.24	0.24	0.28	0.33	0.25
LOI	1.21	1.51	0.56	1.26	1.28	0.79	1.99	0.95	1.14	1.38	0.6
Sc	9.39	6.7	6.93	5.55	2.96	2.37	1.58	1.15	6.39	3.4	3.53
Cr	50	7.43	14.1	3.6	5.36	4.83	5.02	4.88	13.38	6.47	8.02
Co	14	6.91	8	7.31	1.06	0.31	0.71	1.15	5.95	1.65	1.98
Ni	16	1.99	3.49	0.1	1.29	0.87	1.2	1.48	6.6	1.31	3.18
Cu	19	6.08	11	8.65	7.3	8.57	6.88	7.94	8.89	6.65	7.17
Zn	66	23.9	72	48.2	13.11	1.31	1.67	0.84	26.76	13.66	12.97
Ga	16	16	17	18	13.76	11.67	11.95	8.98	17.08	16.18	15.99
Rb	101	300.5	87	104	84.8	164.7	145.3	96.9	206.4	275.7	209.1
Sr	177	352	304	656	112.8	115.5	124.2	118.2	126.7	131.6	108.5
Zr	273	186	292	317	79.4	50.2	30.8	81.4	234.6	211.5	123.2
Nb	12	25	29	20	32.11	12.32	8.15	6.22	19.93	25.13	22.6
Cs	9.89	13.5	1.42	2.42	2.13	2.76	2.29	1.8	9.08	6.48	6.77
Ba	410	562	362	2469	463	593	640	769	488	608	342
Hf	1.37	5.82	1.25	7.7	2.24	2.31	1.79	3.11	7.34	6.25	4.43
Ta	2.19	3.19	2.08	1.58	3.78	1.36	0.95	0.74	1.61	1.88	3.15
Pb	19	14.5	11.5	48.3	7.57	20.11	21.73	13.75	19.92	22.1	22.54
Th	10	57.5	6	52.6	7.19	8.7	5.52	7.8	31.76	33.14	48.29
U	2.62	7.97	1.61	4.67	1.4	2.22	0.95	0.73	3.7	5.05	6.61
Y	39.74	46.3	63.79	25.9	15.54	36.19	22.58	8.63	38.99	31.4	44.22
La	43.1	87.3	65.56	102	14.9	16.96	10.06	15.91	65.5	76.91	23.66
Ce	77.26	138	128.6	150	27.09	30.69	20.98	30.32	114.6	136	55.11
Pr	9.06	17.4	14.97	15.6	3.12	3.83	2.58	3.49	14.7	16.38	7.37
Nd	34.74	59.3	58	49.9	11.06	14.23	10.03	12.62	51.31	55.28	29.65
Sm	8.15	11.3	14.2	7.62	2.74	3.57	2.68	2.5	8.96	9.28	7.43
Eu	1.58	1.77	1.72	1.86	0.42	0.65	0.72	0.81	1.39	1.1	1.02
Gd	7.62	9.73	12.38	6.28	2.6	3.88	2.58	2.29	8.03	7.91	6.54
Tb	1.16	1.51	1.99	0.94	0.55	0.91	0.6	0.37	1.32	1.19	1.37
Dy	7.18	7.93	12.29	4.54	3	5.81	3.78	1.76	7.25	6.03	8.17
Ho	1.5	1.55	2.49	0.88	0.57	1.33	0.86	0.34	1.59	1.27	1.82
Er	4.18	4.8	6.88	2.61	1.36	3.45	2.24	0.81	3.96	3.2	4.53
Tm	0.55	0.72	0.92	0.39	0.3	0.78	0.49	0.15	0.78	0.62	0.92
Yb	3.48	5.2	5.8	2.4	1.92	4.66	2.96	1.05	4.26	3.48	4.75
Lu	0.52	0.79	0.87	0.37	0.27	0.6	0.37	0.15	0.67	0.61	0.65
∑REE	200.08	347.3	326.67	345.39	69.88	91.34	60.92	72.58	284.31	319.27	152.98
LREE/HREE	6.64	9.78	6.49	17.76	5.62	3.26	3.39	9.49	9.21	12.13	4.32
Eu*	0.61	0.51	0.39	0.81	0.47	0.53	0.83	1.03	0.5	0.39	0.44
La/Sm	5.29	7.73	4.62	13.39	5.44	4.76	3.76	6.36	7.31	8.29	3.18
(La/Sm) _N	3.03	4.43	2.65	7.68	3.12	2.73	2.16	3.65	4.19	4.75	1.83
(Gd/Yb) _N	1.85	1.58	1.81	2.21	1.15	0.7	0.74	1.84	1.6	1.92	1.16
(La/Lu) _N	8.29	11.05	7.54	27.57	5.5	2.82	2.73	10.4	9.78	12.69	3.66
Sr/Y	4.45	7.6	4.77	25.33	7.26	3.19	5.5	13.7	3.25	4.19	2.45
Rb/Sr	0.57	0.85	0.29	0.16	0.75	1.43	1.17	0.82	1.63	2.09	1.93
10000×Ga/Al	1.82	2.3	2.56	1.9	1.91	1.66	1.75	1.49	2.56	2.25	2.18
刚玉(CIPW)	0	0	0	0	0.02	0	0.09	0	0	0.26	0.08

续表1

样品号	130-14	131-3	131-6	131-8	131-11	143-2	143-5	106-2	107-9	144-2	145-2
岩石名称	花岗闪长岩	花岗岩		花岗闪长岩	花岗岩	花岗岩	花岗岩	花岗闪长岩	花岗岩		
年龄	(447±4) Ma	(444±5) Ma	(448±2) Ma						(406±5) Ma		
SiO ₂	68.2	71.01	71.31	67.37	70.69	73.58	73.53	68.54	75.24	72.51	76.71
TiO ₂	0.7	0.3	0.54	0.49	0.53	0.29	0.26	0.68	0.12	0.36	0.18
Al ₂ O ₃	14.17	14.56	13.13	15.04	14.01	12.76	12.99	13.86	12.48	13.07	11.69
Fe ₂ O ₃	1.23	0.34	0.87	0.65	0.57	1.18	1	1.51	0.6	1.11	1.15
FeO	2.8	1.52	2.35	2.32	2.28	0.77	0.68	1.89	0.67	0.48	0.2
MnO	0.08	0.03	0.06	0.05	0.05	0.06	0.04	0.06	0.02	0.02	0.03
MgO	1.44	0.64	1.18	1.18	1.04	0.54	0.49	0.87	0.13	0.46	0.34
CaO	2.83	1.74	2.24	2.57	2.78	0.92	0.82	2.08	1.08	1.13	0.21
Na ₂ O	3.47	3.26	3.12	2.99	3.53	3.83	3.67	4.73	5.08	3.62	3.69
K ₂ O	3.6	5.4	3.86	5.98	3.45	5.65	5.79	3.85	3.63	5.32	5.44
P ₂ O ₅	0.18	0.12	0.13	0.13	0.12	0.06	0.05	0.16	0.01	0.07	0.03
H ₂ O ⁺	0.85	0.78	0.9	0.74	0.59	0.48	0.64	0.95	0.41	0.82	0.54
CO ₂	0.24	0.24	0.29	0.23	0.25	0.09	0.12	0.17	0.06	0.61	0.09
LOI	1.19	0.97	1.12	1.09	0.88	0.31	0.69	0.86	0.42	1.32	0.37
Sc	8.2	2.77	6.86	6.6	5.72	4.05	3.42	2.68	2.24	4.54	2.73
Cr	18.1	7.56	15.74	16.89	12.69	1.65	1.65	5.6	1.4	2.59	1.3
Co	7.78	2.46	6.47	6.14	5.42	3.42	3.1	1.84	1.87	3.68	2.08
Ni	8.72	1.45	8.62	8.39	7.09	0.1	0.1	1.5	1.72	0.1	0.1
Cu	8.95	6.02	8.28	9.8	9.01	4.72	4.61	24	12	4.79	4.94
Zn	37.01	15.08	29.23	23.71	28.91	54.3	44.4	25	37	29	47.2
Ga	18.21	14.45	17.47	15.07	17.64	21.14	20.84	20	20	19.1	18.04
Rb	202.8	218.6	194.7	188.6	168.9	327	307	309	307	237	173
Sr	114.6	111.7	113.1	154.4	121.7	52	60	32	21	54	15.4
Zr	322.9	196.3	267	224.1	238.3	249	238	171	143	235	191
Nb	30.75	10.88	22.21	13.56	22.91	47	44	49	46	32	27
Cs	7.19	6.12	8.78	6.26	8.74	12.2	7.55	4.67	5.32	3.68	2.89
Ba	422	589	370	645	232	326	350	176	177	461	160
Hf	10.26	5.88	8.39	6.86	7.98	9.23	8.8	5.19	5.75	7.41	7.13
Ta	2.43	0.52	1.91	0.85	2.62	4.29	3.97	7.71	4.25	2.63	1.45
Pb	18	25.05	19.62	22.28	17.76	29.3	23.2	17	11.2	18.8	23.6
Th	23.48	32.94	41.9	14.5	36.14	57.95	59.7	46	43	33.15	27.2
U	4.02	6.09	4.23	1.74	6.35	12	10.8	12	7	5.83	2.71
Y	58.63	14.69	43.66	31.77	53.79	66.6	68.3	69.08	76.99	54.7	54.8
La	65.08	65.67	71.45	42.45	67.82	81.1	77	57.1	63.05	46.9	68.9
Ce	120.2	111.6	125.1	90.73	125.1	164	156	102.2	110.3	95.9	147
Pr	15.6	13.79	15.67	10.4	16.35	16.2	15.9	10.7	12.09	11.2	15.4
Nd	56.12	47.47	54.24	37.63	57.35	56.9	56.8	35.97	41.07	40.1	60.2
Sm	11.02	7.22	9.54	7.19	10.43	11.2	10.9	8.98	10.09	8.22	12.7
Eu	1.38	1.14	1.12	1.32	1.52	0.81	0.88	0.64	0.58	1.01	0.75
Gd	10.01	5.51	8.47	6.38	9.39	10.8	10.9	9.39	9.21	8.52	11.6
Tb	1.83	0.67	1.44	1.11	1.61	1.94	1.86	1.71	1.7	1.46	1.97
Dy	10.45	2.8	7.9	6.15	9.2	11.4	11.4	11.08	11.88	8.71	11.3
Ho	2.33	0.6	1.76	1.35	2.11	2.37	2.33	2.45	2.67	1.81	2.24
Er	5.95	1.6	4.45	3.33	5.52	7.19	7.21	8.11	8.81	5.51	5.93
Tm	1.19	0.33	0.88	0.62	1.17	1.24	1.2	1.36	1.37	0.91	0.8
Yb	6.26	2.19	4.83	3.3	6.55	8.52	7.9	9.43	9.62	6.31	4.64
Lu	0.9	0.54	0.77	0.48	0.98	1.31	1.2	1.67	1.67	0.92	0.7
∑REE	308.31	261.14	307.6	212.43	315.11	374.98	361.48	260.79	284.11	237.48	344.13
LREE/HREE	6.92	17.33	9.09	8.35	7.63	7.38	7.22	4.77	5.05	5.95	7.78
Eu*	0.4	0.54	0.38	0.59	0.47	0.22	0.25	0.21	0.18	0.37	0.19
La/Sm	5.91	9.1	7.49	5.91	6.5	7.24	7.06	6.36	6.25	5.71	5.43
(La/Sm) _N	3.39	5.22	4.3	3.39	3.73	4.15	4.05	3.65	3.58	3.27	3.11
(Gd/Yb) _N	1.35	2.13	1.49	1.64	1.21	1.07	1.17	0.84	0.81	1.14	2.12
(La/Lu) _N	7.26	12.21	9.34	8.86	6.9	6.19	6.42	3.42	3.78	5.1	9.84
Sr/Y	1.95	7.6	2.59	4.86	2.26	0.78	0.88	0.46	0.27	0.99	0.28
Rb/Sr	1.77	1.96	1.72	1.22	1.39	6.29	5.12	9.66	14.62	4.39	11.23
10000×Ga/Al	2.43	1.88	2.51	1.89	2.38	3.13	3.03	2.73	3.03	2.76	2.91
刚玉(CIPW)	0	0.47	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0

续表1

样品号	114-3	114-6	115-3	115-6	115-8	141-2	142-1	142-2	109-3	142-3
岩石名称	花岗闪长岩		花岗闪长岩			花岗岩	石英闪长岩	花岗岩		
年龄	(352±4) Ma	(349±2) Ma	(343±3) Ma			(265±2) Ma				
SiO ₂	66.73	68	65.49	65.96	70	74.07	56.31	71.04	71	72.96
TiO ₂	0.69	0.57	0.82	0.58	0.49	0.32	1.45	0.29	0.27	0.21
Al ₂ O ₃	14.79	14.41	14.9	15.41	14.58	11.6	16.07	14.69	14.19	13.47
Fe ₂ O ₃	0.5	0.32	0.82	1.18	0.21	0.7	1.75	0.38	0.53	0.71
FeO	3.78	2.47	4.24	3.5	2.56	1.28	4.9	1.72	1.46	0.74
MnO	0.08	0.04	0.08	0.08	0.04	0.02	0.1	0.05	0.03	0.02
MgO	1.84	1.34	2.06	1.69	0.94	0.81	3.87	0.76	1.32	0.52
CaO	2.6	3.87	2.67	3.77	1.81	0.72	5.85	0.77	1.16	0.76
Na ₂ O	2.82	2.96	2.97	3.18	3.05	2.44	4.69	4.52	3.99	3.94
K ₂ O	3.42	1.84	3.41	2.65	4.07	6.77	1.92	5.32	4.57	5.82
P ₂ O ₅	0.18	0.17	0.18	0.15	0.16	0.05	0.32	0.08	0.08	0.05
H ₂ O ⁺	2.03	1.98	1.61	1.35	1.45	0.86	2.96	0.76	0.93	0.48
CO ₂	0.38	0.17	0.3	0.25	0.33	0.17	0.12	0.12	0.21	0.09
LOI	2.41	3.9	2.19	1.77	1.96	1.03	2.59	0.58	0.78	0.38
Sc	12.4	7.35	13.9	16.72	7.53	5.07	14.3	3.24	2.76	2.45
Cr	39.35	32.54	50.42	18.51	26.03	2.32	25	4.84	6.8	1.29
Co	10.98	7.59	11.85	9.49	5.93	3.5	25.5	4.46	3.97	3.55
Ni	16.43	16.63	19.58	6.24	10.55	0.1	23.5	1.01	1.9	0.1
Cu	19.67	7.6	24.54	17.24	15.56	4.11	17.9	3.84	21	3.54
Zn	53.86	12.32	50.61	43.16	33.37	25.9	71	38.6	65	20.4
Ga	18.95	15.24	18.53	17.1	19.28	15	19.06	18.96	21	15.47
Rb	116.8	58.2	117.9	105.2	142.2	229	47	135	230	137
Sr	196.6	189.1	204.6	160.1	185.6	82	326	183	102	118
Zr	216.2	208.6	274.1	189.5	194.1	352	244	255	137	168
Nb	15.34	10.09	14.3	18.28	13.98	40	14	11.6	13	7
Cs	2.64	0.6	2.85	3.24	2.64	2.96	2.76	1.81	5.5	1.08
Ba	642	619	876	268	723	938	528	691	835	495
Hf	9.62	12.02	17.35	10.98	12.72	10.9	5.54	6.5	0.82	4.34
Ta	1	0.73	0.84	0.9	0.93	2.35	1.07	0.81	4.27	0.54
Pb	26.22	4.63	20.85	15.46	29.46	22.9	8.88	23.3	42	17.7
Th	12.68	12.82	14.27	22.22	14.26	19.75	6.45	11.05	12	35.4
U	2.54	2.32	1.7	1.68	3.26	5.64	1.87	1.79	4.25	1.78
Y	27.05	27.23	27.34	28.05	28.96	35.8	32.2	21	38.58	13.6
La	34	39.21	45.28	57.32	37.67	64.3	38.1	24.7	46.52	51.1
Ce	69.61	79.97	95.11	115.1	78.38	136	77.8	41.2	85.58	87.5
Pr	8.64	9.68	11.72	13.5	9.67	14.7	9.17	4.78	9.65	8.75
Nd	33.12	36.93	44.95	49.63	36.53	55.1	34.9	18	33.94	28.1
Sm	6.66	7.07	8.73	9.12	7.29	11.3	7.18	3.78	8.97	4.23
Eu	1.16	1.37	1.66	1.13	1.33	1.73	2.02	1.08	1.99	0.87
Gd	5.75	6.13	7.2	7.49	6.29	9.78	7.07	3.99	8.54	3.52
Tb	0.99	1.02	1.15	1.14	1.08	1.52	1.06	0.65	1.39	0.5
Dy	5.28	5.44	5.74	5.73	5.77	7.75	5.8	3.76	7.9	2.42
Ho	1.12	1.17	1.17	1.18	1.21	1.43	1.1	0.75	1.48	0.46
Er	2.68	2.73	2.7	2.86	2.85	3.88	3.14	2.11	3.95	1.39
Tm	0.5	0.49	0.47	0.56	0.51	0.57	0.46	0.31	0.47	0.19
Yb	2.7	2.56	2.64	3.12	2.59	3.73	2.9	2.11	2.89	1.15
Lu	0.36	0.32	0.32	0.37	0.33	0.56	0.42	0.3	0.46	0.18
∑REE	172.54	194.09	228.84	268.26	191.51	312.35	191.12	107.52	213.73	190.36
LREE/HREE	7.91	8.77	9.69	10.94	8.28	9.69	7.71	6.69	6.89	18.4
Eu*	0.56	0.63	0.63	0.41	0.59	0.5	0.86	0.85	0.69	0.68
La/Sm	5.11	5.55	5.19	6.29	5.17	5.69	5.31	6.53	5.19	12.08
(La/Sm) _N	2.93	3.18	2.98	3.61	2.96	3.26	3.04	3.75	2.97	6.93
(Gd/Yb) _N	1.81	2.03	2.31	2.03	2.05	2.22	2.06	1.6	2.5	2.59
(La/Lu) _N	9.5	12.25	13.98	15.33	11.52	11.48	9.07	8.23	10.11	28.39
Sr/Y	7.27	6.94	7.48	5.71	6.41	2.29	10.12	8.71	2.64	8.68
Rb/Sr	0.59	0.31	0.58	0.66	0.77	2.79	0.14	0.74	2.25	1.16
10000×Ga/Al	2.42	2	2.35	2.1	2	2.44	2.24	2.44	2.53	2.17
刚玉(CIPW)	2.2	0.94	1.94	0.84	2.31	0	0	0.29	0.77	0

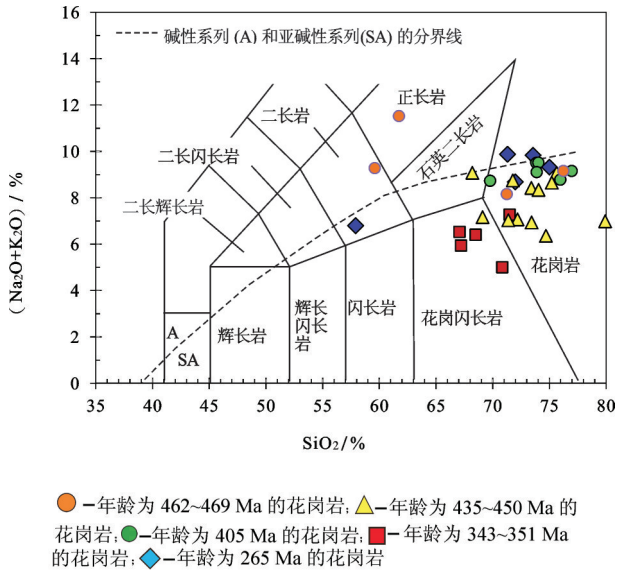


图2 花岗岩类的 SiO_2 -($K_2O + Na_2O$)图解(据文献[58,59])
Fig. 2 Diagram of SiO_2 -(Na_2O+K_2O) for southern Altun (after references [58,59])

化也较大,为 $152.98 \times 10^{-6} \sim 319.27 \times 10^{-6}$ (平均为 270.14×10^{-6}),轻重稀土元素比值为 4.32~17.33(平均为 9.37), $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 值分别为 3.85、1.56。各样品的稀土配分模式相似,均为轻稀土分异明显、重稀土分异不明显、具有弱的负Eu异常(两类花岗岩的 δEu 分别为 0.46、0.72)右倾斜曲线(图 5-b);

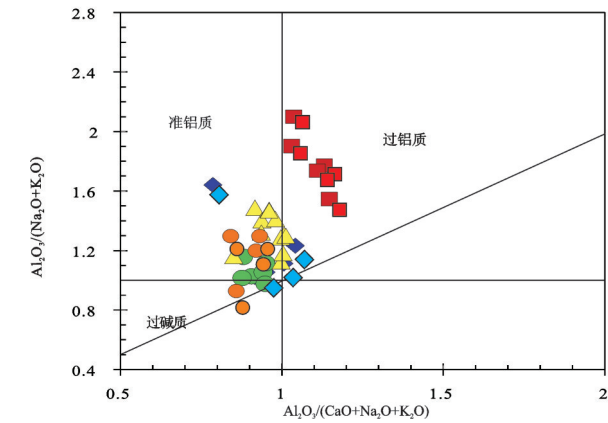
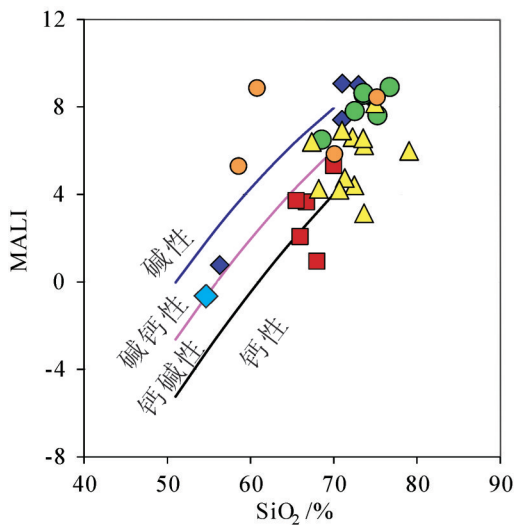


图3 花岗岩类的 A/CNK-A/NK 图解(据文献[60])(图例同图2)
Fig. 3 Diagram of A/CNK-A/NK for the granites from the southern Altun (after reference [60]) (symbols as for Fig. 2)

另一类为茫崖镇西花岗岩体,具有非常低的稀土总量,为 $60.92 \times 10^{-6} \sim 91.34 \times 10^{-6}$ (平均为 73.68×10^{-6}),轻重稀土元素比值较低,为 3.26~9.49(平均为 5.44), $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 值分别为 2.91、1.11。两个采样点的稀土配分模式稍有差别,128点的样品具有弱的负Eu异常(δEu 为 0.47~0.53),而 129点的样品无明显的正、负Eu异常(δEu 为 0.83~1.03)(图 5-c),这一类花岗岩的轻稀土、重稀土元素分馏均小于前一类。

第3组花岗岩类稀土总量较高,为 $260.79 \times 10^{-6} \sim$

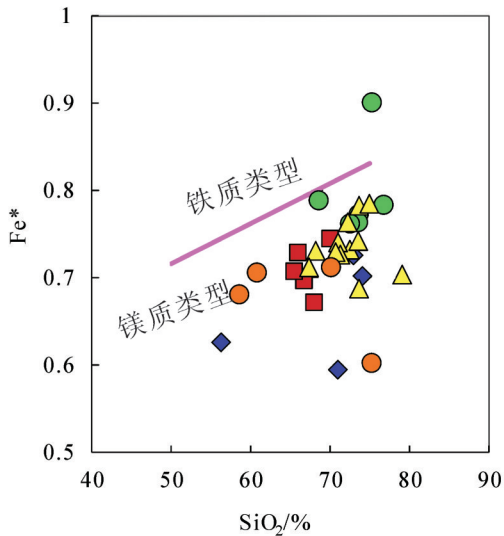


图4 花岗岩类 SiO_2 -MALI 和 SiO_2 - Fe^* 图解(据文献[57,61])(图例同图2)
 $Fe^* = FeO^T / (FeO^T + MgO)$, $MALI = Na_2O + K_2O - CaO$

Fig. 4 Diagram of SiO_2 -MALI and SiO_2 - Fe^* for the granites from southern Altun (after references [57,61])(symbols as for Fig.2)

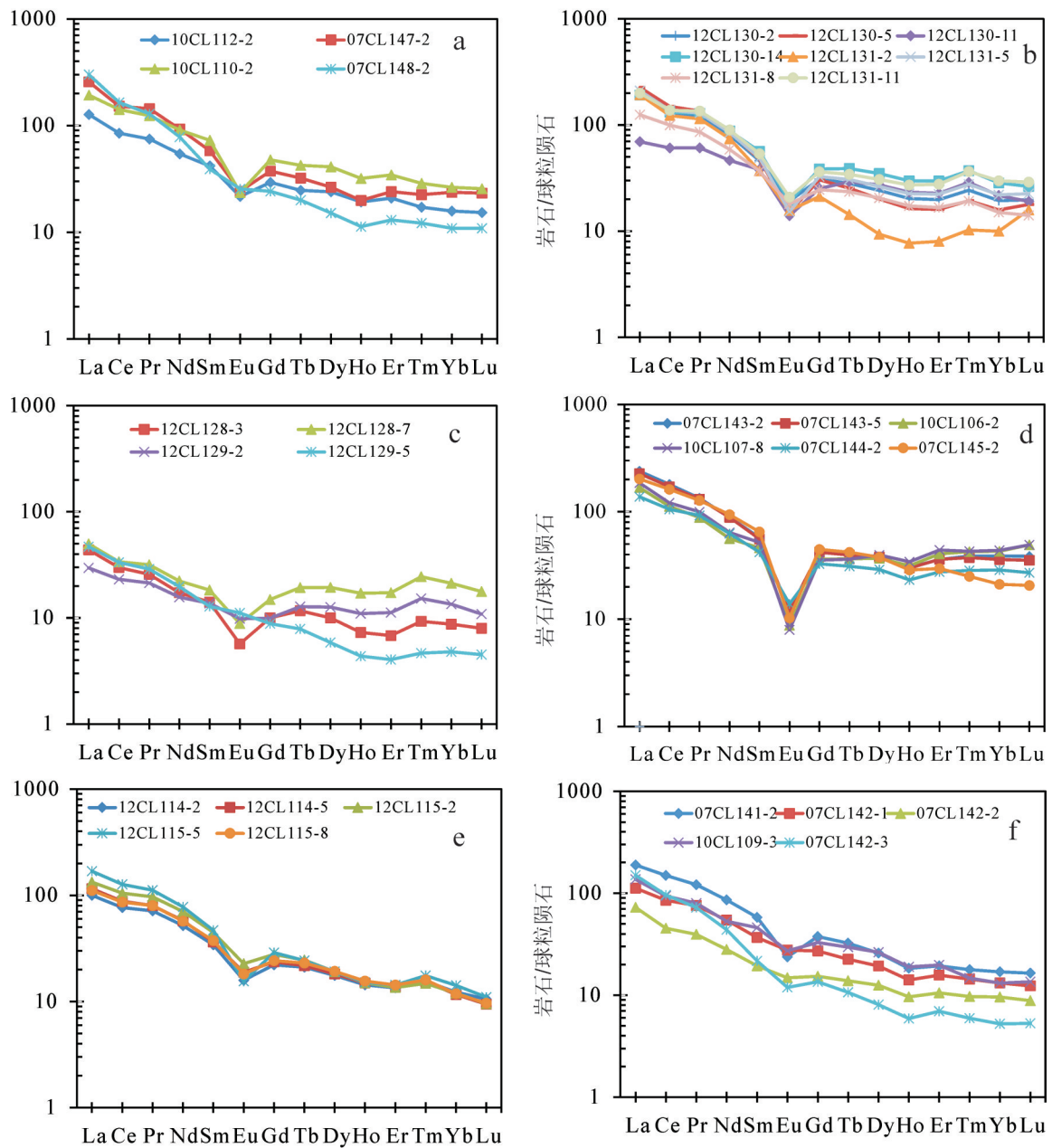


图5 花岗岩类稀土元素球粒陨石标准化曲线(球粒陨石值据参考文献[62])

Fig. 5 Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns for the granites from southern Altun (normalizing values after reference [62])

374.98×10^{-6} (平均为 310.5×10^{-6}), 轻重稀土元素比值比较稳定, 为 $5.05 \sim 7.78$ (平均为 6.36), 但 $(La/Sm)_N$ 值 (3.64) 高于 $(Gd/Yb)_N$ 值 (1.19), 说明轻稀土元素分馏程度高于重稀土元素。各样品均具有明显的负Eu异常 (δEu 为 $0.18 \sim 0.37$, 平均为 0.24) (图5-d)。

第4组花岗岩的稀土总量为 $172.54 \times 10^{-6} \sim 268.26 \times 10^{-6}$ (平均为 211.05×10^{-6}), 轻重稀土元素比

值也比较稳定, 为 $7.91 \sim 10.94$ (平均为 9.12), $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 值分别为 3.13 、 2.04 , 稀土配分曲线为具有弱的负Eu异常 (δEu 为 $0.41 \sim 0.63$, 平均为 0.56) 的右倾型(图5-e)。

第5组花岗岩的稀土元素总量变化较大, 为 $107.52 \times 10^{-6} \sim 312.35 \times 10^{-6}$ (平均为 203.02×10^{-6}), 轻重稀土元素比值为 $6.69 \sim 18.40$ (平均为 9.88), $(La/Sm)_N$

和 $(Gd/Yb)_n$ 值分别为3.99、2.19, δEu 为0.50~0.86(平均为0.72), 稀土元素配分曲线为具有弱的负Eu异常的右倾型(图5-f)。

可见, 花岗岩类稀土总量以第3组为最高, 以第2组中的茫崖镇西花岗岩体为最低, 但 δEu 值却以第3组的为最低, 以第5组的为最高。

4.1.3 微量元素

各样品均富含大离子亲石元素, 亏损部分高场强元素, 但不同样品各元素含量稍有差别。微量元

素蛛网图上, 第1组花岗岩类具有明显的Nb、Ti负异常和弱的Sr、P负异常(图6-a), 第2组花岗岩的白干湖村花岗岩体各样品具有相似的微量元素原始地幔岩标准化曲线, 具有Ba、Nb、Sr、P、Ti负异常(图6-b), 但茫崖镇西花岗岩体具有明显的P、Ti负异常和弱的Nb、Sr负异常(图6-c); 第3组花岗岩类具有非常明显的Ba、Sr、P、Ti负异常和弱的Nb负异常, 且各样品曲线相似(图7-d), 第4组花岗岩具有中等程度的Nb、Sr、P、Ti负异常和不明显的Ba负异常

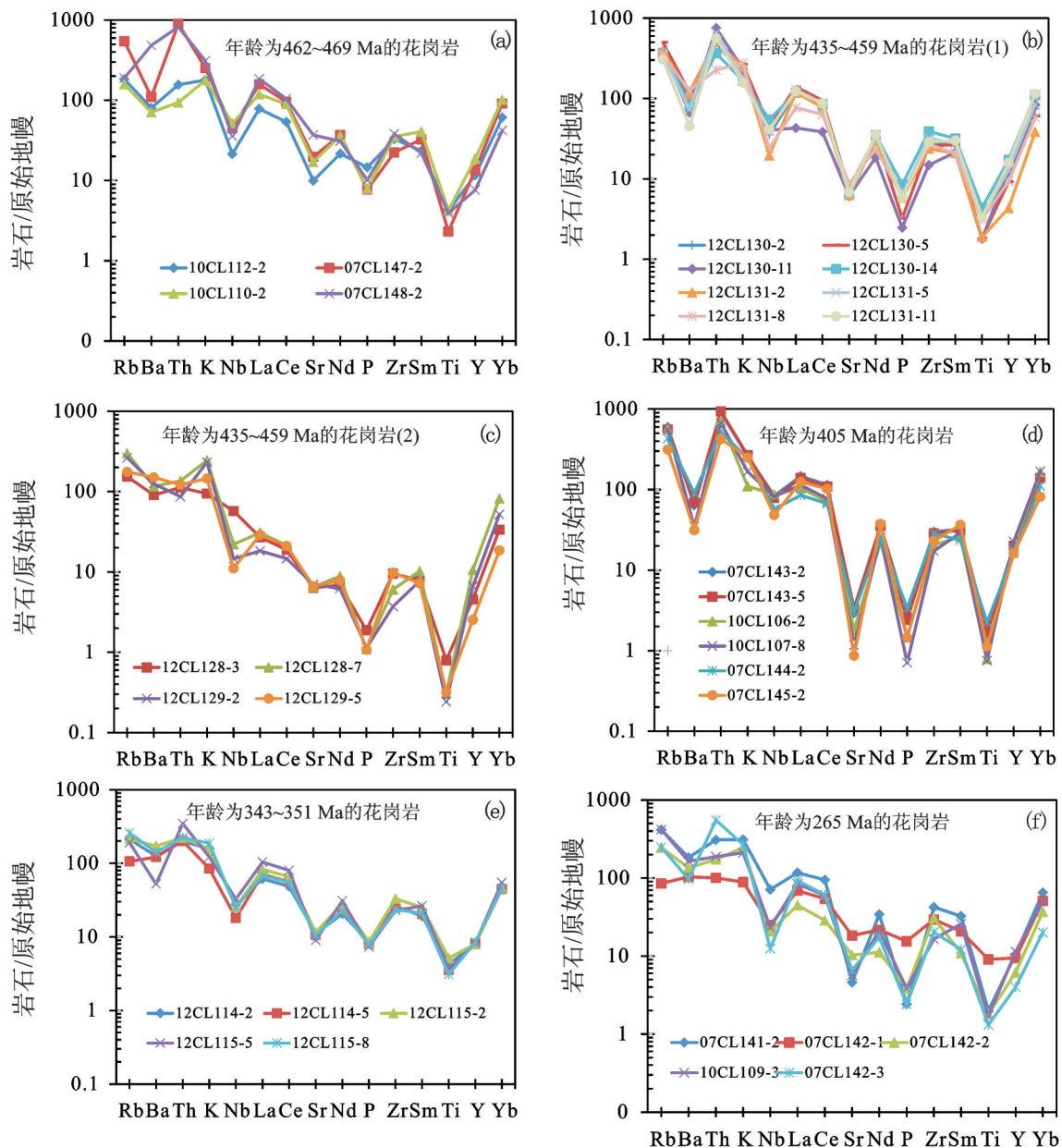


图6 花岗岩类微量元素蛛网图(原始地幔值据文献[63])

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace-element spider diagrams (normalizing values after reference [63])

(图 6-e), 第 5 组花岗岩类大部分样品具有不同程度的 Ba、Nb、Sr、P、Ti 负异常, 少数样品具有不明显的 Ba、Sr、P、Ti 负异常(图 6-f)。所有花岗岩样品中, 除第 3 组花岗岩类 Sr/Y 比值小于 1 外(0.27~0.88), 其余各组的花岗岩类样品的 Sr/Y 比值均大于 1, 其中第 1 组花岗岩类样品为 4.45~25.33(平均为 10.54); 第 2 组花岗岩中白干村花岗岩类为 1.95~7.60(平均为 3.65), 低于茫崖镇西花岗岩体(3.19~13.70, 平均为 7.41); 第 4 组花岗岩类为 5.71~7.48(平均为 6.76); 第 5 组花岗岩类为 2.29~10.12(平均为 6.49)。

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素

花岗岩锆石 Lu-Hf 分析结果见表 2。其中, 第 1 组花岗岩的样品为 112、147、148, 第 2 组花岗岩的样品为 129、131, 第 3 组花岗岩的样品为 107、143、144, 第 4 组花岗岩的样品为 114-3、114-6 和第 5 组花岗岩的样品为 109、142。

由表 2 可见, 大多数样品的锆石中 Lu/Hf 比值很低(小于 0.002), 说明由 ^{176}Lu 衰变生成的 ^{176}Hf 极少。因此, 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的比值可以代表该锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的比值^[64]。部分样品的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(147 Ma、148 Ma、143 Ma、144 Ma、142 Ma)已另文发表^[24]。

样品 112 取自常春沟岩体, 岩性为石英闪长岩。25 颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.002083~0.000637, 除 2 个锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值大于 0.002 外, 其余均小于 0.002, 总的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 平均为 0.001263(表 2)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282370~0.282513(表 2, 图 7-a), 平均为 0.282439。该样品的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除 12-3-6、21 为正值外(分别为 +0.6、+1.9), 其余的均为负值, 变化于 -5.8~-0.2, 总平均值为 -1.8(表 2, 图 8-a), 二阶段模式年龄(t_{DM2})变化于 1373~1813 Ma(表 2, 图 9-a), 平均为 1559 Ma。

样品 147 取自茫崖镇北花岗闪长岩体, 25 颗锆石中, 除少数锆石的(如 147-8、15、17) $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值大于 0.002 外, 其余锆石的均小于 0.002, 样品总的平均值为 0.001306(表 2)。所有锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282524~0.282607(表 2, 图 7-b), 平均为 0.28256, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 变化于 +0.6~+4.0, 平均为 +2.4(表 2, 图 8-b), 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1191~1390 Ma(表 2, 图 9-b), 平均为 1291 Ma。

样品 148 取自阿卡腾龙山石英闪长岩岩体, 19 颗

石中, 仅 6 颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值小于 0.002 (0.000555~0.001571, 平均为 0.001199), 其余锆石的均大于 0.002 (0.002054~0.004947, 平均为 0.003002), 样品总的平均值为 0.002416(表 2)。所有锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282247~0.282652(图 7-c), 平均为 0.282473, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大(-4.7~+11.4), 平均为 +2.8(表 2, 图 8-c), 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1107~1744 Ma(表 2, 图 9-c), 平均为 1411 Ma。其中老的继承性锆石核 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 为 +3.0~+11.4(表 2), 平均为 +8.1, 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1203~1669 Ma(表 2), 平均为 1380 Ma; 而岩浆结晶锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -4.7~+5.3(表 2), 平均为 +0.3, 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1107~1744 Ma(表 2), 平均为 1425 Ma。

样品 129 取自茫崖镇西花岗岩体, 28 颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值除 6 个大于 0.002 以外(0.002222~0.004635, 平均为 0.0028575), 其余的小于 0.002, 为 0.000216~0.001861(表 2), 平均为 0.001025, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282386~0.282681(表 2, 图 7-d), 平均为 0.282588。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除 129-3-20 点为负值(-0.4)外, 其余的均为正值, 为 +0.2~+6.0, 平均为 +3.4(表 2, 图 8-d); 二阶段模式年龄(t_{DM2})变化于 1033~1520 Ma(表 2, 图 9-d), 平均为 1231 Ma。

样品 131 取自白干湖村北中细粒花岗岩体, 27 颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 变化于 0.000298~0.001528(表 2), 平均为 0.000630, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282147~0.282628(表 2, 图 7-e), 平均为 0.282588。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值有 12 个为正值(+0.2~+5.0, 平均为 +1.9), 15 个为负值(-3.5~-12.4, 平均为 -5.9), 总的平均为 -2.4(表 2, 图 8-e); 二阶段模式年龄(t_{DM2})变化于 1158~2211 Ma 之间(表 2, 图 9-e), 平均为 1588 Ma。

样品 107 取自柴水沟岩体, 岩性为二长花岗岩。21 颗锆石中, 除 6 个锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值小于 0.002 外(0.001183~0.001879, 平均为 0.001470), 其余 15 颗锆石的均大于 0.002(0.002012~0.005575, 平均为 0.003098), 该样品总的平均为 0.002633(表 2)。该样品锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为变化于 0.282545~0.282774, (表 2, 图 7-f), 平均为 0.282672。所有锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 变化于 +1.1~+8.4, 平均为 +5.3(表 2, 图 8-f), 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 871~1341 Ma(表 2, 图 9-f), 平均为 1078 Ma。

表2 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic data of granites from southern Altun

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{LuHf}}(S)$
测点编号 (石英闪长岩, (469±3)Ma)													
112-3-1	476	0.056903	0.000787	0.001373	0.000034	0.282382	0.000024	-13.8	-3.7	0.8	1241	1686	-0.96
112-3-2	434	0.034722	0.000742	0.000811	0.000029	0.282382	0.000019	-13.8	-4.5	0.7	1223	1701	-0.98
112-3-3	473	0.052407	0.001323	0.001118	0.000020	0.282438	0.000020	-11.8	-1.7	0.7	1154	1557	-0.97
112-3-4	477	0.063294	0.001336	0.001453	0.000039	0.282483	0.000022	-10.2	-0.2	0.8	1101	1462	-0.96
112-3-5	474	0.055433	0.000571	0.001185	0.000007	0.282445	0.000017	-11.6	-1.5	0.6	1147	1544	-0.96
112-3-6	397	0.034422	0.000360	0.000765	0.000004	0.282458	0.000021	-11.1	-2.6	0.7	1115	1552	-0.98
112-3-7	469	0.044570	0.001042	0.000973	0.000017	0.282455	0.000018	-11.2	-1.2	0.7	1125	1519	-0.97
112-3-8	469	0.039678	0.000185	0.000866	0.000003	0.282442	0.000019	-11.7	-1.6	0.7	1141	1548	-0.97
112-3-9	469	0.045099	0.002585	0.000976	0.000045	0.282324	0.000014	-15.8	-5.8	0.5	1309	1813	-0.97
112-3-10	448	0.059399	0.001344	0.001290	0.000024	0.282440	0.000021	-11.8	-2.3	0.8	1157	1573	-0.96
112-3-11	476	0.082984	0.000518	0.001749	0.000018	0.282464	0.000020	-10.9	-1.0	0.7	1136	1510	-0.95
112-3-12	483	0.069513	0.000904	0.001522	0.000013	0.282459	0.000021	-11.1	-0.9	0.7	1136	1512	-0.95
112-3-13	463	0.044359	0.000452	0.000992	0.000006	0.282470	0.000018	-10.7	-0.8	0.6	1106	1491	-0.97
112-3-14	468	0.069490	0.000808	0.001483	0.000014	0.282421	0.000019	-12.4	-2.6	0.7	1190	1607	-0.96
112-3-15	543	0.090952	0.001268	0.001945	0.000021	0.282439	0.000019	-11.8	-0.5	0.7	1178	1532	-0.94
112-3-16	469	0.086877	0.000409	0.001872	0.000008	0.282513	0.000023	-9.1	0.6	0.8	1069	1406	-0.94
112-3-17	487	0.029399	0.000679	0.000637	0.000016	0.282413	0.000018	-12.7	-2.2	0.7	1174	1596	-0.98
112-3-18	464	0.043590	0.000295	0.000980	0.000004	0.282444	0.000015	-11.6	-1.7	0.5	1141	1546	-0.97
112-3-19	466	0.032158	0.000101	0.000720	0.000002	0.282438	0.000016	-11.8	-1.8	0.6	1142	1555	-0.98
112-3-20	469	0.035546	0.000387	0.000814	0.000012	0.282433	0.000018	-12.0	-1.9	0.7	1152	1565	-0.98
112-3-21	536	0.103875	0.001561	0.002079	0.000024	0.282513	0.000016	-9.1	1.9	0.6	1075	1373	-0.94
112-3-22	493	0.093661	0.003692	0.001994	0.000066	0.282409	0.000020	-12.9	-2.7	0.7	1224	1630	-0.94
112-3-23	502	0.044735	0.000457	0.000972	0.000009	0.282370	0.000019	-14.2	-3.5	0.7	1245	1690	-0.97
112-3-24	469	0.041466	0.000356	0.000911	0.000008	0.282437	0.000017	-11.9	-1.8	0.6	1149	1559	-0.97
112-3-25	469	0.099958	0.001724	0.002083	0.000040	0.282491	0.000020	-9.9	-0.2	0.7	1107	1460	-0.94
测点编号 (石英闪长岩, (466±5) Ma)													
147-3-1	465	0.071425	0.002574	0.001523	0.000054	0.282585	0.000021	-6.6	3.2	0.7	957	1238	-0.95
147-3-2	446	0.079235	0.005025	0.001591	0.000083	0.282524	0.000018	-8.8	0.6	0.6	1046	1390	-0.95
147-3-3	453	0.060911	0.000492	0.001340	0.000007	0.282576	0.000018	-6.9	2.6	0.6	965	1264	-0.96
147-3-4	466	0.046221	0.000503	0.001104	0.000018	0.282528	0.000017	-8.6	1.3	0.6	1027	1360	-0.97
147-3-5	465	0.050120	0.000987	0.001135	0.000016	0.282527	0.000017	-8.7	1.2	0.6	1029	1364	-0.97
147-3-6	465	0.049126	0.000720	0.001187	0.000022	0.282537	0.000017	-8.3	1.6	0.6	1017	1343	-0.96
147-3-7	472	0.071942	0.001744	0.001630	0.000034	0.282537	0.000017	-8.3	1.6	0.6	1029	1347	-0.95
147-3-8	463	0.095877	0.001701	0.002124	0.000025	0.282590	0.000021	-6.4	3.1	0.7	965	1241	-0.94
147-3-9	483	0.046870	0.000702	0.001068	0.000021	0.282555	0.000018	-7.7	2.6	0.6	988	1288	-0.97
147-3-10	469	0.045185	0.001151	0.001082	0.000014	0.282576	0.000016	-6.9	3.0	0.6	959	1251	-0.97
147-3-11	469	0.048977	0.000197	0.001134	0.000008	0.282561	0.000016	-7.5	2.5	0.6	981	1284	-0.97
147-3-12	469	0.032218	0.000664	0.000830	0.000023	0.282588	0.000013	-6.5	3.6	0.5	936	1218	-0.97
147-3-13	469	0.039131	0.000882	0.000903	0.000024	0.282559	0.000017	-7.5	2.5	0.6	978	1285	-0.97
147-3-14	469	0.070171	0.001402	0.001490	0.000022	0.282542	0.000018	-8.1	1.7	0.6	1017	1334	-0.96
147-3-15	469	0.092954	0.000452	0.002143	0.000038	0.282528	0.000023	-8.6	1.0	0.8	1055	1378	-0.94
147-3-16	469	0.067688	0.000531	0.001461	0.000006	0.282583	0.000018	-6.7	3.2	0.6	959	1243	-0.96
147-3-17	469	0.100633	0.000545	0.002278	0.000022	0.282558	0.000019	-7.6	2.0	0.7	1017	1315	-0.93
147-3-18	469	0.034139	0.000810	0.000742	0.000013	0.282556	0.000018	-7.6	2.5	0.6	978	1288	-0.98
147-3-19	469	0.045202	0.001085	0.001000	0.000024	0.282601	0.000019	-6.1	4.0	0.7	922	1193	-0.97
147-3-20	469	0.074268	0.001594	0.001527	0.000025	0.282581	0.000020	-6.7	3.1	0.7	962	1246	-0.95
147-3-21	469	0.042809	0.000104	0.000911	0.000003	0.282536	0.000015	-8.4	1.7	0.5	1011	1337	-0.97
147-3-22	469	0.084608	0.001502	0.001661	0.000022	0.282607	0.000019	-5.8	4.0	0.7	929	1191	-0.95
147-3-23	469	0.031922	0.000246	0.000687	0.000007	0.282554	0.000018	-7.7	2.4	0.6	979	1292	-0.98
147-3-24	469	0.053018	0.000300	0.001201	0.000026	0.282538	0.000017	-8.3	1.7	0.6	1016	1339	-0.96
147-3-25	469	0.043475	0.000483	0.000897	0.000008	0.282578	0.000018	-6.9	3.2	0.6	951	1241	-0.97
测点编号 (石英闪长岩, (469±6) Ma)													
148-01	1121	0.102803	0.001164	0.002054	0.000018	0.282422	0.000019	-12.4	11.0	0.7	1206	1253	-0.94
148-02	469	0.070818	0.000865	0.001449	0.000041	0.282520	0.000019	-8.9	1.0	0.7	1047	1382	-0.96
148-03	1042	0.184711	0.003845	0.004387	0.000171	0.282510	0.000022	-9.3	10.8	0.8	1153	1203	-0.87
148-04	468	0.098422	0.001194	0.002461	0.000058	0.282652	0.000021	-4.2	5.3	0.8	884	1107	-0.93
148-05	458	0.041970	0.000301	0.001024	0.000012	0.282596	0.000015	-6.2	3.6	0.5	929	1211	-0.97
148-06	1156	0.146347	0.000830	0.003127	0.000028	0.282438	0.000017	-11.8	11.4	0.6	1219	1250	-0.91
148-08	470	0.026845	0.000656	0.000555	0.000021	0.282515	0.000016	-9.1	1.1	0.6	1031	1377	-0.98
148-09	726	0.087686	0.002001	0.002088	0.000081	0.282432	0.000021	-12.0	3.0	0.7	1193	1451	-0.94
148-10	1159	0.080865	0.000471	0.001571	0.000006	0.282314	0.000020	-16.2	8.3	0.7	1345	1451	-0.95
148-11	471	0.060225	0.000751	0.001353	0.000023	0.282570	0.000021	-7.1	2.8	0.7	974	1268	-0.96
148-12	472	0.060255	0.000568	0.001238	0.000018	0.282576	0.000016	-6.9	3.1	0.6	962	1251	-0.96
148-13	1118	0.113748	0.001563	0.002543	0.000076	0.282247	0.000023	-18.6	4.3	0.8	1478	1669	-0.92

续表2

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}(S)$
148-14	469	0.158082	0.001119	0.003661	0.000061	0.282627	0.000019	-5.1	4.1	0.7	953	1187	-0.89
148-15	469	0.150470	0.003622	0.003132	0.000062	0.282477	0.000020	-10.4	-1.1	0.7	1161	1511	-0.91
148-16	469	0.208739	0.003946	0.004947	0.000159	0.282431	0.000022	-12.1	-3.3	0.8	1296	1651	-0.85
148-17	469	0.130022	0.001897	0.002535	0.000030	0.282368	0.000022	-14.3	-4.7	0.8	1301	1744	-0.92
148-18	469	0.136751	0.001972	0.002797	0.000040	0.282480	0.000017	-10.3	-0.9	0.6	1146	1499	-0.92
148-19	469	0.164841	0.005674	0.003127	0.000086	0.282432	0.000021	-12.0	-2.7	0.8	1228	1614	-0.91
148-20	469	0.113456	0.000313	0.002170	0.000007	0.282373	0.000018	-14.1	-4.5	0.6	1281	1727	-0.93
测点编号 (花岗岩, (435±4) Ma)													
129-3-1	429	0.036865	0.000404	0.001311	0.000009	0.282616	0.000016	-5.5	3.6	0.6	908	1188	-0.96
129-3-2	432	0.013521	0.000318	0.000423	0.000009	0.282663	0.000017	-3.9	5.5	0.6	821	1064	-0.99
129-3-3	416	0.034012	0.000675	0.00119	0.000023	0.282621	0.000017	-5.4	3.5	0.6	899	1183	-0.96
129-3-4	428	0.034082	0.001114	0.001068	0.000031	0.282630	0.000018	-5.0	4.1	0.6	882	1153	-0.97
129-3-5	431	0.016094	0.000042	0.000557	0.000005	0.282615	0.000017	-5.5	3.8	0.6	891	1175	-0.98
129-3-6	437	0.033558	0.001425	0.001107	0.000053	0.282652	0.000015	-4.2	5.1	0.5	852	1098	-0.97
129-3-7	437	0.025125	0.00027	0.000757	0.000004	0.282586	0.000016	-6.6	2.8	0.6	937	1241	-0.98
129-3-8	432	0.022218	0.000292	0.000752	0.000005	0.282676	0.000020	-3.4	5.9	0.7	810	1041	-0.98
129-3-9	770	0.052737	0.000282	0.0018	0.00001	0.282386	0.000017	-13.6	2.4	0.6	1249	1519	-0.95
129-3-10	441	0.123222	0.004333	0.003159	0.000118	0.282528	0.000014	-8.6	0.2	0.5	1086	1413	-0.90
129-3-11	444	0.177806	0.006904	0.004635	0.000183	0.282618	0.000024	-5.4	3.0	0.8	993	1237	-0.86
129-3-12	436	0.084385	0.002636	0.002597	0.000122	0.282658	0.000017	-4.0	4.8	0.6	878	1112	-0.92
129-3-13	442	0.057861	0.001274	0.001665	0.000029	0.282613	0.000019	-5.6	3.6	0.7	921	1195	-0.95
129-3-14	442	0.06611	0.000162	0.002059	0.000006	0.282588	0.000021	-6.5	2.6	0.7	966	1256	-0.94
129-3-15	771	0.072466	0.000218	0.002222	0.00001	0.282407	0.000016	-12.9	3.0	0.6	1234	1487	-0.93
129-3-16	432	0.075057	0.001887	0.002473	0.000091	0.282601	0.000019	-6.1	2.7	0.7	959	1242	-0.93
129-3-17	427	0.057923	0.000852	0.001861	0.000023	0.282595	0.000015	-6.2	2.6	0.5	951	1246	-0.94
129-3-18	430	0.019307	0.000188	0.000581	0.000003	0.282603	0.000017	-6.0	3.3	0.6	909	1205	-0.98
129-3-19	437	0.020003	0.000293	0.000622	0.000009	0.282529	0.000016	-8.6	0.8	0.6	1013	1367	-0.98
129-3-20	450	0.034683	0.000916	0.001173	0.000041	0.282491	0.000038	-9.9	-0.4	1.3	1081	1454	-0.96
129-3-21	702	0.023296	0.000785	0.000715	0.000017	0.282389	0.000015	-13.5	1.6	0.5	1210	1520	-0.98
129-3-22	427	0.032602	0.000489	0.001103	0.000032	0.282673	0.000018	-3.5	5.6	0.7	823	1058	-0.97
129-3-23	442	0.037046	0.000672	0.001164	0.000013	0.282608	0.000016	-5.8	3.6	0.6	916	1197	-0.96
129-3-24	435	0.060579	0.001967	0.001774	0.000036	0.282601	0.000016	-6.1	3.0	0.6	941	1227	-0.95
129-3-25	442	0.008316	0.000247	0.000216	0.000005	0.282584	0.000016	-6.7	3.0	0.6	927	1233	-0.99
129-3-26	428	0.036066	0.000417	0.001212	0.000031	0.282620	0.000017	-5.4	3.7	0.6	900	1178	-0.96
129-3-27	473	0.018975	0.000177	0.000536	0.000008	0.282621	0.000017	-5.3	4.9	0.6	882	1135	-0.98
129-3-28	433	0.031753	0.000522	0.000956	0.000011	0.282681	0.000015	-3.2	6.0	0.5	808	1033	-0.97
测点编号 (花岗岩, (444±5) Ma)													
131-3-1	442	0.027905	0.000089	0.000416	0.000002	0.282557	0.000016	-7.6	2.0	0.6	968	1296	-0.99
131-3-2	444	0.026431	0.000102	0.000374	0.000001	0.282147	0.000059	-22.1	-12.4	2.1	1531	2211	-0.99
131-3-3	479	0.048596	0.000155	0.000739	0.000004	0.282332	0.000015	-15.6	-5.3	0.5	1290	1784	-0.98
131-3-4	442	0.032829	0.000150	0.000494	0.000002	0.282402	0.000042	-13.1	-3.5	1.5	1185	1646	-0.99
131-3-5	444	0.026173	0.000225	0.000373	0.000001	0.282518	0.000021	-9.0	0.7	0.8	1021	1382	-0.99
131-3-6	445	0.032083	0.000103	0.000505	0.000004	0.282358	0.000017	-14.6	-5.0	0.6	1246	1742	-0.98
131-3-7	444	0.026897	0.000146	0.000408	0.000001	0.282517	0.000017	-9.0	0.6	0.6	1024	1386	-0.99
131-3-8	448	0.067898	0.002179	0.000998	0.000025	0.282515	0.000015	-9.1	0.5	0.5	1043	1399	-0.97
131-3-9	742	0.028053	0.000267	0.000459	0.000002	0.282455	0.000017	-11.2	5.0	0.6	1110	1339	-0.99
131-3-10	448	0.046355	0.000408	0.000711	0.000008	0.282595	0.000021	-6.2	3.4	0.7	922	1212	-0.98
131-3-13	441	0.023280	0.000215	0.000369	0.000001	0.282306	0.000017	-16.5	-6.9	0.6	1313	1858	-0.99
131-3-14	441	0.036481	0.000515	0.000575	0.000008	0.282545	0.000017	-8.0	1.5	0.6	988	1326	-0.98
131-3-15	465	0.049867	0.000700	0.000764	0.000008	0.282536	0.000017	-8.4	1.6	0.6	1007	1337	-0.98
131-3-16	487	0.054017	0.000690	0.000898	0.000012	0.282347	0.000034	-15.0	-4.6	1.2	1274	1748	-0.97
131-3-17	418	0.025907	0.000335	0.000420	0.000003	0.282345	0.000031	-15.1	-6.0	1.1	1261	1786	-0.99
131-3-18	382	0.022152	0.000040	0.000370	0.000001	0.282600	0.000018	-6.1	2.2	0.6	908	1237	-0.99
131-3-19	447	0.026590	0.000122	0.000424	0.000001	0.282366	0.000016	-14.4	-4.6	0.6	1232	1722	-0.99
131-3-20	444	0.026605	0.000349	0.000455	0.000003	0.282267	0.000034	-17.8	-8.2	1.2	1369	1945	-0.99
131-3-21	442	0.048011	0.001315	0.000779	0.000017	0.282337	0.000017	-15.4	-5.9	0.6	1284	1796	-0.98
131-3-22	451	0.023742	0.000228	0.000416	0.000002	0.282499	0.000016	-9.6	0.2	0.6	1048	1420	-0.99
131-3-23	416	0.041322	0.000862	0.000683	0.000010	0.282628	0.000017	-5.1	3.9	0.6	876	1158	-0.98
131-3-24	447	0.020740	0.000117	0.000349	0.000001	0.282360	0.000026	-14.6	-4.9	0.9	1239	1735	-0.99
131-3-25	486	0.031061	0.000156	0.000525	0.000001	0.282323	0.000030	-15.9	-5.4	1.1	1295	1796	-0.98
131-3-26	477	0.132363	0.002599	0.002283	0.000028	0.282335	0.000021	-15.5	-5.7	0.8	1340	1810	-0.93
131-3-27	445	0.021015	0.000433	0.000387	0.000006	0.282380	0.000030	-13.9	-4.2	1.1	1212	1691	-0.99
131-3-29	425	0.084990	0.000600	0.001528	0.000012	0.282345	0.000014	-15.1	-6.2	0.5	1299	1802	-0.95
131-3-30	442	0.018355	0.000093	0.000298	0.000001	0.282547	0.000016	-8.0	1.7	0.6	980	1318	-0.99

续表2

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}(S)$
测点编号 (花岗岩, (409±6) Ma)													
107-9-01	442	0.085528	0.001618	0.001760	0.000028	0.282675	0.000016	-3.4	5.8	0.6	834	1056	-0.95
107-9-03	395	0.114268	0.001795	0.002481	0.000070	0.282698	0.000017	-2.6	5.4	0.6	816	1042	-0.93
107-9-04	408	0.131503	0.006488	0.002941	0.000172	0.282733	0.000018	-1.4	6.8	0.6	775	964	-0.91
107-9-05	523	0.199757	0.010305	0.003895	0.000158	0.282624	0.000019	-5.2	5.0	0.7	963	1171	-0.88
107-9-06	448	0.053521	0.001008	0.001183	0.000036	0.282671	0.000015	-3.6	6.0	0.5	826	1050	-0.96
107-9-07	421	0.156803	0.003064	0.003261	0.000044	0.282774	0.000022	0.1	8.4	0.8	720	871	-0.90
107-9-09	396	0.120473	0.002622	0.002491	0.000046	0.282653	0.000019	-4.2	3.8	0.7	884	1145	-0.92
107-9-11	401	0.103848	0.001077	0.002012	0.000028	0.282669	0.000019	-3.6	4.6	0.7	849	1097	-0.94
107-9-13	500	0.063651	0.000539	0.001267	0.000009	0.282691	0.000017	-2.9	7.7	0.6	801	978	-0.96
107-9-14	407	0.121766	0.002387	0.002545	0.000055	0.282545	0.000025	-8.0	0.3	0.9	1043	1381	-0.92
107-9-15	410	0.125893	0.004700	0.002661	0.000080	0.282642	0.000017	-4.6	3.7	0.6	904	1164	-0.92
107-9-16	422	0.139375	0.007627	0.002829	0.000181	0.282724	0.000022	-1.7	6.8	0.8	786	975	-0.91
107-9-17	414	0.099417	0.004950	0.002305	0.000148	0.282701	0.000017	-2.5	6.0	0.6	808	1021	-0.93
107-9-18	411	0.108826	0.000982	0.002107	0.000009	0.282696	0.000016	-2.7	5.8	0.6	811	1031	-0.94
107-9-19	422	0.064653	0.001376	0.001213	0.000022	0.282549	0.000018	-7.9	1.1	0.6	1000	1341	-0.96
107-9-20	414	0.263912	0.003393	0.005575	0.000046	0.282741	0.000016	-1.1	6.5	0.6	824	990	-0.83
107-9-21	410	0.123670	0.005689	0.002744	0.000165	0.282717	0.000018	-1.9	6.3	0.6	795	996	-0.92
107-9-22	436	0.095722	0.001899	0.001879	0.000028	0.282685	0.000017	-3.1	6.0	0.6	823	1040	-0.94
107-9-23	451	0.230166	0.001483	0.005039	0.000130	0.282705	0.000022	-2.4	6.0	0.8	869	1046	-0.85
107-9-24	407	0.073165	0.000494	0.001515	0.000017	0.282622	0.000014	-5.3	3.3	0.5	904	1190	-0.95
107-9-25	435	0.184877	0.003368	0.003591	0.000053	0.282678	0.000011	-3.3	5.2	0.4	873	1087	-0.89
测点编号 (花岗岩, (404±5) Ma)													
143-6-1	409	0.075198	0.001266	0.001543	0.000021	0.282668	0.000025	-3.7	4.9	0.9	839	1087	-0.95
143-6-2	406	0.055327	0.000367	0.001134	0.000009	0.282642	0.000024	-4.6	4.0	0.9	867	1140	-0.97
143-6-3	405	0.045331	0.001301	0.000921	0.000023	0.282470	0.000025	-10.7	-2.0	0.9	1103	1523	-0.97
143-6-4	406	0.088709	0.001456	0.001761	0.000041	0.282659	0.000017	-4.0	4.5	0.6	857	1112	-0.95
143-6-5	403	0.088051	0.001204	0.001760	0.000029	0.282560	0.000021	-7.5	0.9	0.7	1000	1337	-0.95
143-6-6	408	0.088406	0.004267	0.001807	0.000075	0.282517	0.000025	-9.0	-0.5	0.9	1062	1431	-0.95
143-6-7	408	0.166129	0.001941	0.003569	0.000062	0.282671	0.000021	-3.6	4.4	0.7	883	1116	-0.89
143-6-8	401	0.046244	0.000339	0.001021	0.000005	0.282545	0.000022	-8.0	0.5	0.8	1001	1360	-0.97
143-6-9	411	0.074999	0.000653	0.001604	0.000007	0.282617	0.000021	-5.5	3.1	0.8	913	1201	-0.95
143-6-10	398	0.109507	0.002609	0.002383	0.000092	0.282632	0.000024	-5.0	3.2	0.9	912	1189	-0.93
143-6-11	402	0.135786	0.006038	0.002892	0.000099	0.282674	0.000021	-3.5	4.6	0.8	862	1099	-0.91
143-6-12	408	0.239149	0.002744	0.004909	0.000038	0.282605	0.000023	-5.9	1.7	0.8	1022	1286	-0.85
143-6-13	408	0.088866	0.000668	0.001769	0.000010	0.282649	0.000020	-4.4	4.1	0.7	872	1134	-0.95
143-6-14	408	0.063933	0.000937	0.001341	0.000023	0.282557	0.000019	-7.6	1.0	0.7	993	1334	-0.96
143-6-15	408	0.071882	0.002442	0.001516	0.000049	0.282616	0.000018	-5.5	3.1	0.6	913	1204	-0.95
143-6-16	408	0.407550	0.008921	0.008365	0.000151	0.282761	0.000026	-0.4	6.3	0.9	865	995	-0.75
143-6-17	408	0.062600	0.000583	0.001350	0.000022	0.282554	0.000018	-7.7	0.9	0.6	997	1341	-0.96
143-6-18	408	0.222495	0.011003	0.004231	0.000163	0.282608	0.000025	-5.8	2.1	0.9	996	1267	-0.87
143-6-19	408	0.091443	0.003701	0.002184	0.000128	0.282675	0.000020	-3.4	5.0	0.7	843	1081	-0.93
143-6-20	408	0.056545	0.000755	0.001223	0.000019	0.282646	0.000022	-4.5	4.2	0.8	864	1132	-0.96
143-6-21	408	0.071348	0.001039	0.001464	0.000019	0.282663	0.000017	-3.8	4.7	0.6	844	1096	-0.96
143-6-22	408	0.233122	0.002988	0.004487	0.000039	0.282824	0.000023	1.8	9.6	0.8	669	786	-0.86
143-6-23	408	0.086836	0.000434	0.001702	0.000002	0.282653	0.000019	-4.2	4.3	0.7	864	1123	-0.95
143-6-24	408	0.055519	0.002439	0.001144	0.000056	0.282561	0.000022	-7.5	1.2	0.8	982	1322	-0.97
143-6-25	408	0.090264	0.004202	0.001843	0.000097	0.282659	0.000022	-4.0	4.5	0.8	859	1112	-0.94
测点编号 (花岗岩, (406±4) Ma)													
144-01	296	0.085216	0.000726	0.001726	0.000011	0.282682	0.000016	-3.2	3.0	0.6	824	1123	-0.95
144-02	335	0.108297	0.001819	0.002110	0.000025	0.282667	0.000019	-3.7	3.2	0.7	853	1139	-0.94
144-03	359	0.122792	0.003292	0.002463	0.000045	0.282661	0.000020	-3.9	3.4	0.7	870	1144	-0.93
144-04	384	0.135701	0.001763	0.002656	0.000030	0.282612	0.000020	-5.6	2.1	0.7	947	1244	-0.92
144-05	388	0.083225	0.000944	0.001781	0.000017	0.282672	0.000021	-3.5	4.5	0.7	839	1094	-0.95
144-06	400	0.105042	0.001498	0.002211	0.000023	0.282652	0.000020	-4.2	4.0	0.7	878	1139	-0.93
144-07	408	0.096387	0.000979	0.001968	0.000013	0.282663	0.000018	-3.9	4.6	0.6	856	1106	-0.94
144-08	406	0.061344	0.000314	0.001245	0.000010	0.282614	0.000015	-5.6	3.0	0.5	909	1205	-0.96
144-09	411	0.137513	0.002671	0.002861	0.000063	0.282689	0.000020	-2.9	5.3	0.7	838	1060	-0.91
144-10	396	0.095320	0.000884	0.002011	0.000025	0.282667	0.000018	-3.7	4.5	0.6	851	1104	-0.94
144-11	407	0.080638	0.000964	0.001899	0.000047	0.282672	0.000019	-3.5	4.9	0.7	842	1085	-0.94
144-12	396	0.079078	0.000926	0.001735	0.000020	0.282672	0.000019	-3.5	4.7	0.7	838	1088	-0.95
144-13	405	0.056162	0.000166	0.001246	0.000004	0.282689	0.000017	-2.9	5.6	0.6	803	1036	-0.96

续表2

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}(S)$
144-14	455	0.064653	0.001643	0.001475	0.000064	0.282333	0.000018	-15.5	-6.0	0.6	1314	1811	-0.96
144-15	406	0.201010	0.006609	0.003864	0.000094	0.282718	0.000020	-1.9	6.0	0.7	819	1015	-0.88
144-16	406	0.085303	0.000827	0.001695	0.000024	0.282619	0.000020	-5.4	3.1	0.7	913	1202	-0.95
144-17	406	0.178450	0.002712	0.004297	0.000138	0.282617	0.000026	-5.5	2.3	0.9	985	1250	-0.87
144-18	406	0.107407	0.001072	0.002336	0.000047	0.282630	0.000021	-5.0	3.3	0.8	914	1188	-0.93
144-19	406	0.092048	0.001956	0.001794	0.000030	0.282632	0.000020	-4.9	3.5	0.7	896	1173	-0.95
144-20	406	0.077032	0.001475	0.001766	0.000041	0.282611	0.000023	-5.7	2.8	0.8	926	1220	-0.95
测点编号 (花岗岩长岩, (352±3) Ma)													
114-3-1	418	0.000187	0.000006	0.000187	0.000006	0.282320	0.000022	-16.0	-6.8	0.8	1282	1836	-1.00
114-3-13	353	0.010607	0.000224	0.010607	0.000224	0.282511	0.000030	-9.2	-1.5	1.1	1026	1452	-0.99
114-3-14	405	0.000205	0.000004	0.000205	0.000004	0.282482	0.000018	-10.3	-1.3	0.6	1061	1481	-1.00
114-3-15	1031	0.000205	0.000009	0.000205	0.000009	0.282101	0.000018	-23.7	-0.9	0.6	1579	1930	-1.00
114-3-16	353	0.000347	0.000006	0.000347	0.000006	0.282435	0.000021	-11.9	-4.2	0.7	1125	1619	-1.00
114-3-17	451	0.011323	0.000022	0.011323	0.000022	0.282320	0.000019	-16.0	-6.1	0.7	1290	1819	-0.99
114-3-18	347	0.008305	0.000232	0.008305	0.000232	0.282475	0.000021	-10.5	-2.9	0.7	1076	1537	-1.00
114-3-19	347	0.015689	0.000227	0.015689	0.000227	0.282529	0.000028	-8.6	-1.0	1.0	1005	1417	-0.99
114-3-20	639	0.011428	0.000117	0.011428	0.000117	0.282489	0.000022	-10.0	4.0	0.8	1057	1321	-0.99
114-3-21	684	0.005232	0.000031	0.005232	0.000031	0.282404	0.000017	-13.0	2.0	0.6	1170	1479	-1.00
114-3-22	351	0.010568	0.000130	0.010568	0.000130	0.282434	0.000018	-11.9	-4.3	0.6	1132	1625	-0.99
114-3-23	357	0.049428	0.000316	0.049428	0.000316	0.282547	0.000031	-8.0	-0.4	1.1	1007	1386	-0.96
114-3-24	617	0.015813	0.000038	0.015813	0.000038	0.282446	0.000018	-11.5	1.9	0.7	1120	1435	-0.99
114-3-25	343	0.041701	0.000746	0.041701	0.000746	0.282445	0.000017	-11.6	-4.3	0.6	1145	1621	-0.97
114-3-26	359	0.023219	0.000492	0.023219	0.000492	0.282421	0.000016	-12.4	-4.6	0.6	1160	1655	-0.98
114-3-27	350	0.011464	0.000125	0.011464	0.000125	0.282476	0.000023	-10.5	-2.8	0.8	1077	1534	-0.99
114-3-28	626	0.018522	0.000069	0.018522	0.000069	0.282422	0.000025	-12.4	1.2	0.9	1156	1486	-0.99
114-3-30	502	0.012304	0.000073	0.012304	0.000073	0.282432	0.000016	-12.0	-1.1	0.6	1137	1536	-0.99
114-3-31	360	0.010353	0.000064	0.010353	0.000064	0.282442	0.000018	-11.7	-3.8	0.6	1121	1603	-0.99
114-3-32	1823	0.010732	0.000341	0.010732	0.000341	0.281248	0.000019	-53.9	-13.5	0.7	2736	3313	-0.99
114-3-33	466	0.012403	0.000043	0.012403	0.000043	0.282421	0.000018	-12.4	-2.2	0.6	1152	1584	-0.99
114-3-34	501	0.015914	0.000044	0.015914	0.000044	0.282380	0.000016	-13.9	-2.9	0.6	1210	1654	-0.99
测点编号 (花岗岩长岩, (349±2) Ma)													
114-6-1	588	0.017517	0.000243	0.000682	0.000004	0.281718	0.000016	-37.3	-24.6	0.6	2132	3078	-0.98
114-6-2	347	0.044027	0.000514	0.001465	0.000033	0.282484	0.000014	-10.2	-2.9	0.5	1100	1536	-0.96
114-6-3	353	0.025716	0.000468	0.000950	0.000009	0.282582	0.000017	-6.7	0.8	0.6	947	1304	-0.97
114-6-4	344	0.027428	0.000550	0.001008	0.000011	0.282423	0.000016	-12.4	-5.0	0.6	1172	1667	-0.97
114-6-5	467	0.024054	0.000294	0.000959	0.000004	0.282439	0.000016	-11.8	-1.8	0.6	1148	1557	-0.97
114-6-6	346	0.030096	0.000351	0.001181	0.000019	0.282490	0.000016	-10.0	-2.6	0.6	1083	1518	-0.96
114-6-8	352	0.029360	0.000545	0.001086	0.000015	0.282369	0.000013	-14.2	-6.8	0.5	1249	1783	-0.97
114-6-9	345	0.024784	0.000133	0.001015	0.000009	0.282470	0.000015	-10.7	-3.3	0.5	1106	1561	-0.97
114-6-10	350	0.021925	0.000549	0.000945	0.000017	0.282457	0.000016	-11.1	-3.7	0.6	1123	1587	-0.97
114-6-11	344	0.022205	0.000148	0.000902	0.000004	0.282472	0.000015	-10.6	-3.2	0.5	1100	1555	-0.97
114-6-12	413	0.026825	0.000198	0.001097	0.000015	0.282500	0.000023	-9.6	-0.8	0.8	1066	1453	-0.97
114-6-13	441	0.033056	0.000545	0.001350	0.000013	0.282515	0.000016	-9.1	0.2	0.6	1052	1409	-0.96
114-6-14	342	0.031072	0.000381	0.001095	0.000019	0.282486	0.000016	-10.1	-2.9	0.6	1086	1529	-0.97
114-6-15	351	0.016768	0.000203	0.000714	0.000009	0.282519	0.000014	-9.0	-1.4	0.5	1029	1443	-0.98
114-6-16	375	0.022691	0.000361	0.000917	0.000012	0.282268	0.000014	-17.8	-9.8	0.5	1385	1993	-0.97
114-6-17	347	0.0183	0.00058	0.00074	0.00003	0.282476	0.000017	-10.5	-3.0	0.6	1090	1543	-0.98
114-6-18	679	0.051728	0.002509	0.001791	0.000113	0.282311	0.000016	-16.3	-2.2	0.6	1357	1740	-0.95
114-6-19	660	0.056126	0.000871	0.002050	0.000058	0.282437	0.000015	-11.9	1.8	0.5	1185	1476	-0.94
114-6-20	348	0.057284	0.001030	0.001933	0.000054	0.282478	0.000015	-10.4	-3.2	0.5	1123	1555	-0.94
114-6-21	346	0.082953	0.002512	0.003153	0.000107	0.282466	0.000018	-10.8	-3.9	0.6	1178	1600	-0.91
114-6-22	500	0.054775	0.001109	0.002135	0.000024	0.282428	0.000014	-12.2	-1.9	0.5	1201	1586	-0.94
114-6-23	347	0.044138	0.000846	0.001633	0.000026	0.282452	0.000015	-11.3	-4.1	0.5	1150	1609	-0.95
114-6-24	356	0.006271	0.000343	0.000227	0.000009	0.282452	0.000015	-11.3	-3.5	0.5	1108	1582	-0.99
114-6-25	352	0.018628	0.001135	0.000646	0.000038	0.282429	0.000012	-12.1	-4.5	0.4	1152	1642	-0.98
114-6-26	469	0.007737	0.000626	0.000335	0.000022	0.282428	0.000016	-12.2	-2.0	0.6	1145	1568	-0.99
114-6-27	651	0.026010	0.000749	0.000927	0.000024	0.282683	0.000015	-3.1	10.8	0.5	804	897	-0.97
114-6-28	353	0.013663	0.000494	0.000540	0.000020	0.282485	0.000015	-10.1	-2.5	0.5	1071	1515	-0.98
114-6-29	346	0.008068	0.000539	0.000260	0.000017	0.282512	0.000017	-9.2	-1.6	0.6	1026	1454	-0.99
测点编号 (石英闪长岩, (265±2) Ma)													
109-3-1	256	0.095887	0.002856	0.002043	0.000049	0.282753	0.000024	-0.7	4.6	0.8	728	989	-0.94
109-3-2	267	0.064269	0.002029	0.001454	0.000058	0.282744	0.000018	-1.0	4.6	0.6	728	995	-0.96
109-3-3	263	0.101505	0.000871	0.002183	0.000015	0.282833	0.000023	2.2	7.6	0.8	613	804	-0.93

续表2

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}(s)$
109-3-4	266	0.149588	0.001513	0.003140	0.000025	0.282845	0.000025	2.6	7.9	0.9	611	786	-0.91
109-3-5	270	0.102127	0.001772	0.002180	0.000035	0.282763	0.000022	-0.3	5.2	0.8	716	960	-0.93
109-3-6	260	0.108785	0.000594	0.002319	0.000019	0.282775	0.000023	0.1	5.4	0.8	701	940	-0.93
109-3-7	263	0.118303	0.001361	0.002420	0.000032	0.282851	0.000023	2.8	8.1	0.8	591	767	-0.93
109-3-8	266	0.120156	0.002898	0.002447	0.000063	0.282752	0.000021	-0.7	4.7	0.8	737	990	-0.93
109-3-9	269	0.101906	0.000808	0.002149	0.000014	0.282836	0.000024	2.3	7.8	0.9	608	795	-0.94
109-3-10	270	0.102988	0.002401	0.002033	0.000041	0.282758	0.000022	-0.5	5.1	0.8	720	969	-0.94
109-3-11	273	0.110936	0.002660	0.002251	0.000048	0.282796	0.000020	0.8	6.4	0.7	669	885	-0.93
109-3-12	259	0.082079	0.001549	0.001738	0.000028	0.282734	0.000024	-1.4	4.0	0.9	749	1027	-0.95
109-3-13	266	0.101953	0.002948	0.002182	0.000092	0.282822	0.000024	1.8	7.2	0.9	629	827	-0.93
109-3-14	263	0.136652	0.004246	0.002672	0.000076	0.282769	0.000025	-0.1	5.2	0.9	716	954	-0.92
109-3-15	267	0.158051	0.002141	0.003073	0.000038	0.282836	0.000025	2.3	7.6	0.9	624	806	-0.91
109-3-16	271	0.085427	0.001110	0.001696	0.000023	0.282768	0.000023	-0.2	5.5	0.8	699	943	-0.95
109-3-17	255	0.102056	0.000630	0.002031	0.000010	0.282772	0.000022	0.0	5.3	0.8	700	946	-0.94
109-3-18	258	0.153860	0.003058	0.003383	0.000113	0.282792	0.000026	0.7	5.8	0.9	696	913	-0.90
109-3-19	272	0.091146	0.000805	0.001890	0.000025	0.282748	0.000024	-0.9	4.8	0.8	732	990	-0.94
109-3-20	257	0.128684	0.002669	0.002483	0.000044	0.282766	0.000024	-0.2	5.0	0.8	717	964	-0.93
109-3-21	263	0.092920	0.000923	0.001867	0.000020	0.282818	0.000025	1.6	7.1	0.9	629	835	-0.94
109-3-22	255	0.097136	0.001787	0.001972	0.000031	0.282739	0.000024	-1.2	4.1	0.9	746	1019	-0.94
109-3-23	263	0.078773	0.000700	0.001590	0.000015	0.282710	0.000028	-2.2	3.3	1.0	780	1077	-0.95
109-3-25	279	0.093930	0.000706	0.001932	0.000009	0.282791	0.000029	0.7	6.5	1.0	669	887	-0.94
测点编号(花岗岩, (264±2) Ma)													
142-2-1	263	0.08899	0.003680	0.001778	0.000064	0.282699	0.000030	-2.6	2.9	1.1	799	1102	-0.95
142-2-2	267	0.206361	0.004557	0.004385	0.000093	0.282810	0.000025	1.3	6.4	0.9	689	881	-0.87
142-2-3	268	0.106852	0.002024	0.002234	0.000042	0.282684	0.000028	-3.1	2.4	1.0	831	1139	-0.93
142-2-4	259	0.094625	0.002687	0.001981	0.000053	0.282655	0.000031	-4.1	1.2	1.1	868	1207	-0.94
142-2-5	226	0.232904	0.004358	0.004664	0.000072	0.282863	0.000035	3.2	7.5	1.2	611	782	-0.86
142-2-6	260	0.084189	0.002749	0.001848	0.000065	0.282744	0.000023	-1.0	4.4	0.8	736	1004	-0.94
142-2-7	273	0.262933	0.004391	0.005475	0.000075	0.282928	0.000025	5.5	10.5	0.9	522	623	-0.84
142-2-8	261	0.178092	0.006832	0.003818	0.000157	0.282777	0.000026	0.2	5.3	0.9	728	951	-0.88
142-2-9	266	0.041783	0.002409	0.000884	0.000045	0.282763	0.000020	-0.3	5.4	0.7	690	946	-0.97
142-2-10	264	0.120162	0.004577	0.002413	0.000075	0.282753	0.000026	-0.7	4.7	0.9	735	989	-0.93
142-2-11	263	0.128139	0.002422	0.002662	0.000049	0.282654	0.000025	-4.2	1.2	0.9	885	1214	-0.92
142-2-12	265	0.107568	0.002043	0.002202	0.000038	0.282735	0.000023	-1.3	4.1	0.8	756	1025	-0.93
142-2-13	265	0.424132	0.005747	0.009000	0.000216	0.283072	0.000030	10.6	14.9	1.1	323	338	-0.73
142-2-14	265	0.123861	0.001261	0.002522	0.000017	0.282694	0.000025	-2.8	2.6	0.9	823	1121	-0.92
142-2-15	265	0.091744	0.001649	0.001836	0.000023	0.282815	0.000023	1.5	7.0	0.8	634	842	-0.94
142-2-16	265	0.133796	0.001129	0.002672	0.000025	0.282733	0.000028	-1.4	4.0	1.0	770	1036	-0.92
142-2-17	265	0.254147	0.001815	0.004909	0.000058	0.282933	0.000017	5.7	10.6	0.6	505	609	-0.85
142-2-18	265	0.141192	0.001271	0.002889	0.000024	0.283007	0.000029	8.3	13.6	1.0	365	417	-0.91
142-2-19	265	0.062586	0.000800	0.001322	0.000020	0.282763	0.000020	-0.3	5.3	0.7	699	952	-0.96
142-2-20	265	0.288672	0.008832	0.005765	0.000167	0.283046	0.000019	9.7	14.5	0.7	333	361	-0.83
142-2-21	265	0.118258	0.002036	0.002532	0.000045	0.282701	0.000023	-2.5	2.9	0.8	814	1107	-0.92
142-2-22	265	0.172899	0.003327	0.003684	0.000058	0.282827	0.000025	1.9	7.1	0.9	649	835	-0.89
142-2-23	265	0.304585	0.002644	0.006096	0.000047	0.283029	0.000022	9.1	13.8	0.8	365	404	-0.82
142-2-24	265	0.061322	0.002385	0.001284	0.000043	0.282697	0.000022	-2.7	2.9	0.8	792	1101	-0.96

样品143也取自柴水沟岩体,岩性为正长花岗岩。25颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化较大,为0.000921~0.008365,其中有8个锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值大于0.002(0.002382~0.008365,平均为0.004128),其余17颗锆石的均小于0.002(0.000921~0.001843),平均为0.001116(表2)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于0.282470~0.282824(表2,图7-g),平均为0.282627。除143-3、6锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值外(分别为-2.0、-0.5),其余锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值,变化于0.5~9.6,平均为+3.2(表2,图8-g),二阶段模式年龄(t_{DM2})变化于

786~1523 Ma(表2,图9-g),平均为1192 Ma。

样品144也取自柴水沟岩体,岩性为二长花岗岩。20颗锆石有9个锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值大于0.002外(0.002011~0.004297,平均为0.002757),其余锆石的均小于0.002(0.001245~0.001968,平均为0.001666),样品总的平均值为0.002157(表2)。除了一颗老的锆石(年龄为455 Ma,可能为捕获锆石)144-14的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.282333外,其余锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于0.282611~0.282718(图7-h),平均为0.282639。除一颗老的锆石144-14(年龄为

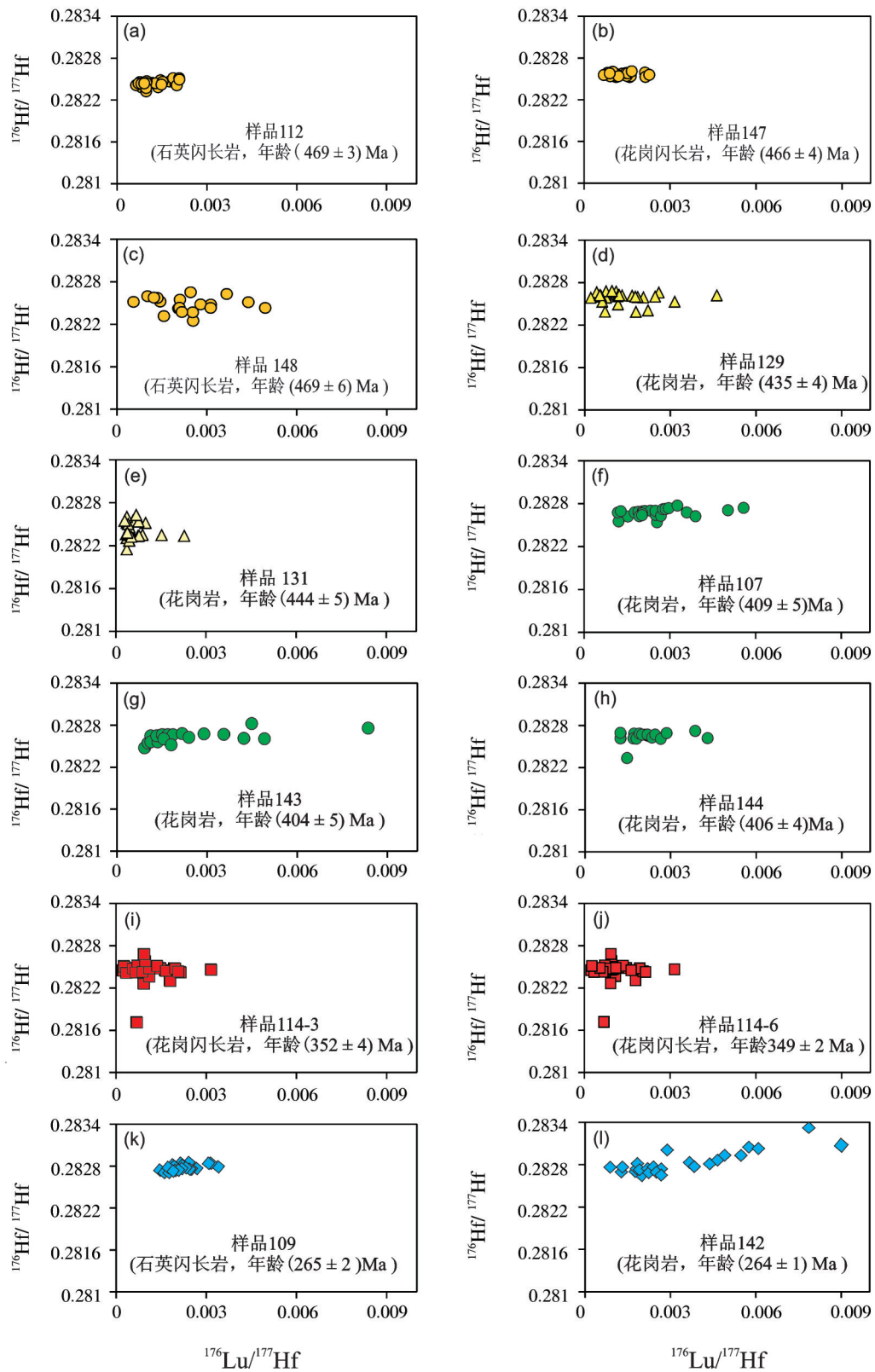
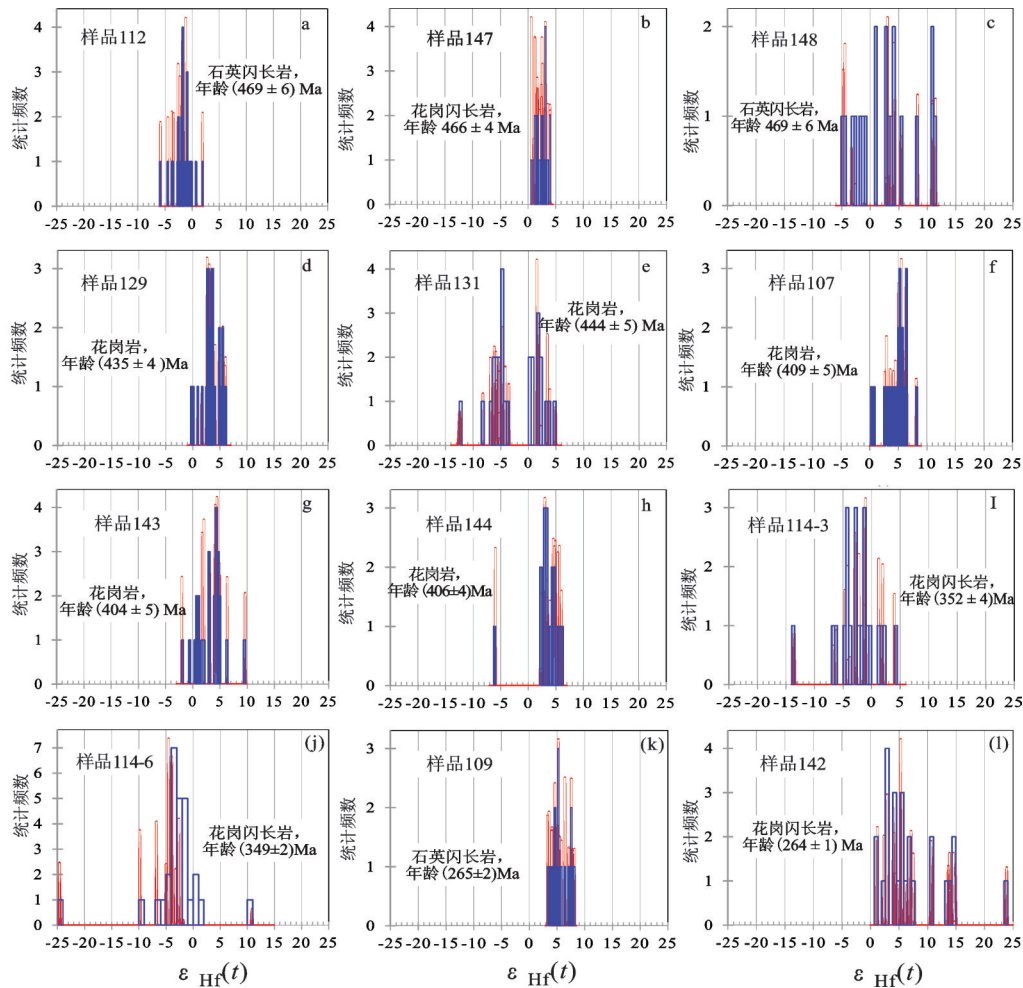


图7 锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ - $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 关系图(图例同图2)

Fig. 7 Plot of $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ versus $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ of zircon from the granites of southern Altun (symbols as for Fig. 2)

图8 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 统计直方图

图中蓝色代表算术统计频率,红色代表概率统计频率

Fig. 8 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ histogram of the granites from southern Altun

455 Ma) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值外(-6.0),其余年龄的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值,变化于2.1~6.0,平均为+3.7(表2,图8-h),二阶段模式年龄(t_{DM2})除老的锆石外($t_{\text{DM2}}=1811$ Ma),其余的锆石为1191~1250 Ma(表2,图9-h),平均为1138 Ma。

样品114-3取自末县南依干村附近的花岗闪长岩体。选择该定年样品中的22颗锆石开展Lu-Hf同位素分析。结果表明,该样品仅4颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值小于0.002(0.000187~0.00034,平均为0.000236),其余16颗锆石的均大于0.002(0.005232~0.049428,平均为0.018438),样品总的平均值为0.013452(表2)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于0.281248~0.282547(表2,图7-i),平均为0.282372。除4颗年龄分别为639 Ma、684 Ma、617 Ma和636 Ma的老的继

承性核外,其余锆石无论是结晶的锆石还是其他老的锆石核, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值(-0.4~-13.5,平均为-3.6),这4颗大于600 Ma锆石的 t_{DM2} 值变化于+1.2~+4.0,平均为+2.3(表2,图8-i)。二阶段模式年龄(t_{DM2})为1386~3313 Ma(表2,图9-i),平均为1651 Ma。

样品114-6也是取自末县南依干村附近的花岗闪长岩体。28颗锆石测点中,除3个(114-6-19、21、22)锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值大于于0.002(分别为0.002050、0.003153和0.002135,平均值为0.002446),其余25颗锆石的均小于0.002(0.000227~0.001933,平均为0.000976),样品总的平均值为0.001134(表2)。所有锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于0.281718~0.282683,(表2,图7-j),平均为0.282437。除4颗锆石(年龄分别为353 Ma、441 Ma、660 Ma、651 Ma)的

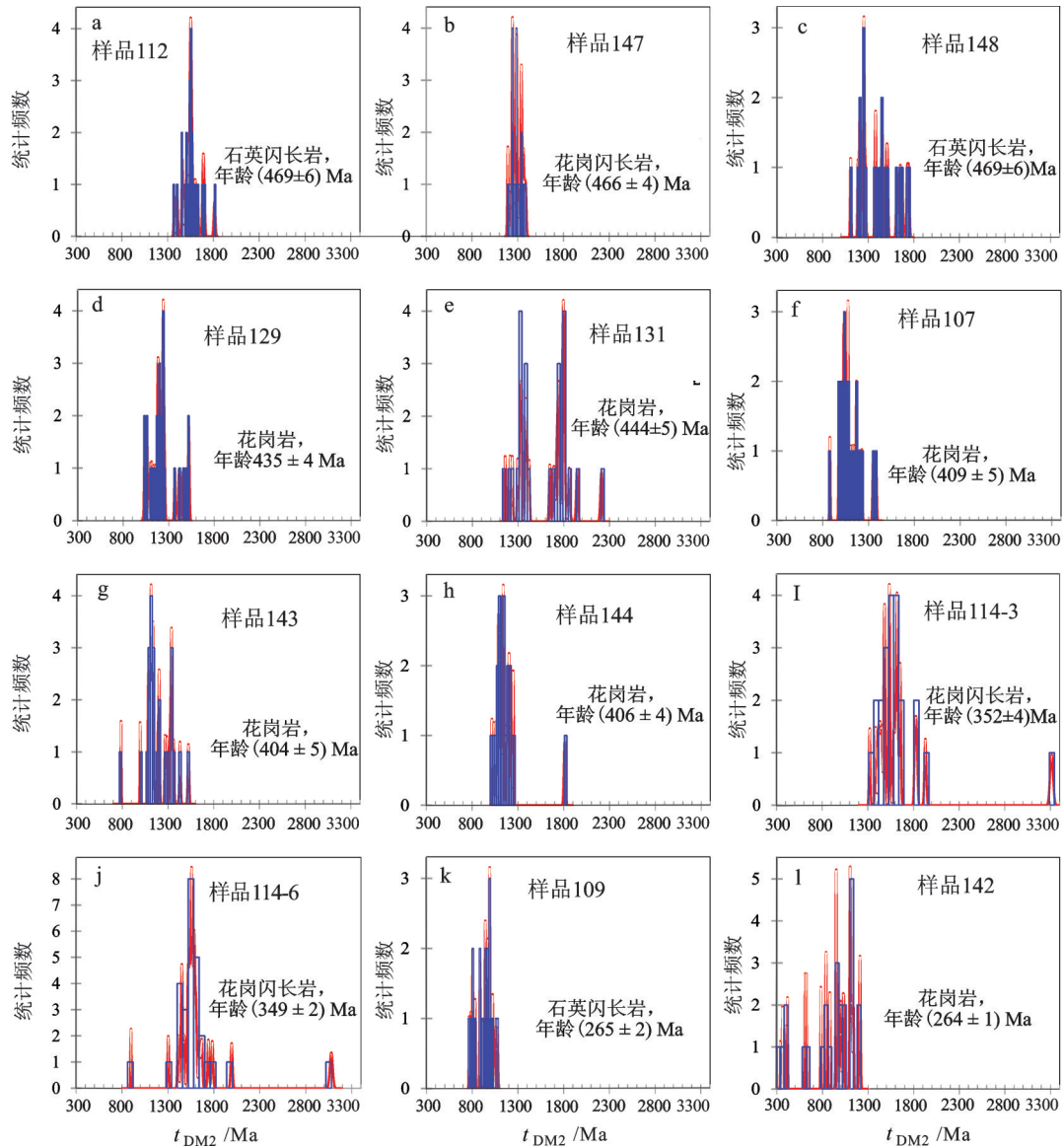


图9 锆石 t_{DM2} 统计直方图

Fig. 9 Zircon t_{DM2} histogram of the granites from southern Altun

图中红色、蓝色代表的意义同图8

$\epsilon_{Hf}(t)$ 值为正值外(分别为+0.8、+0.2、+1.8、+10.8, 平均为+3.4), 其余的均为负值, 变化于-24.6~-0.8(表2, 图8-j), 平均为-4.2。二阶段模式年龄(t_{DM2})为897~3078 Ma(表2, 图9-j), 平均为1598 Ma。其中二阶段模式年龄最小的和最大的均为老的继承性锆石(年龄分别为588 Ma、651 Ma)。

样品109-3取自阿克提山岩体, 岩性为石英闪长岩。24颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值除8颗小于0.002以外(0.001454~0.001972, 平均为0.001767), 其余16颗的均大于0.002(0.002031~0.003383, 平均为

0.002437)(表2)。所有锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于0.282710~0.282851, (表2, 图7-k), 平均为0.282782。所有锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值均为正值, 变化于+3.3~+8.1(表2, 图8-k), 平均为+5.8。二阶段模式年龄(t_{DM2})变化于767~1077 Ma(表2, 图9-k), 平均为920 Ma。

样品142也是取自阿克提山岩体, 岩性为花岗岩。25颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化较大, 为0.000884~0.009000, 平均为0.003469, 其中17个锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值大于0.002(0.002202~0.009000, 平均为0.003995), 其余7颗锆石的均小于0.002

(0.001284~0.001981, 平均为 0.001562)(表 2)。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282654~0.283072(表 2, 图 7-1), 平均为 0.282808。所有锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 变化于 1.2~14.9, 平均为 +6.5(表 2, 图 8-1), 二阶段模式年龄($t_{\text{DM}2}$)变化于 338~1214 Ma(表 2, 图 9-1), 平均为 874 Ma。

5 讨 论

5.1 不同期次花岗岩类的源岩

实验岩石学证明, 在非常宽的温度、压力条件下, 多种源岩的部分熔融均可以产生花岗质熔体^[65-71], 熔体成分的变化取决于初始熔融物质的成分、熔融的温度和压力、初始物质的含水量^[72], 如泥质的沉积岩部分熔融可以产生强烈富铝和富钾的熔体, 硬砂岩的部分熔融可以产生中等到强烈富铝的花岗闪长岩/花岗岩熔体, 玄武质岩石的部分熔融可以产生云英质-奥长-花岗闪长质熔体^[67-70,73]。可见, 只要源岩含水或存在含水相的矿物, 部分熔融就可以产生花岗质熔体^[67-70,73]。研究表明, 南阿尔金地区第 1 期花岗岩类(年龄 462~469 Ma)的 $\text{ASI}<1$, 为准铝质, 与其主要造岩矿物组成为斜长石、钾长石、石英、角闪石和少量的黑云母以及不出现富铝矿物相吻合。岩石的元素地球化学以富集大离子亲石元素、亏损高场强元素为特征(图 6-a), 稀土元素以富集轻稀土、且轻稀土分异明显重稀土分异不明显、不具有或具有弱的负 Eu 异常为特征(图 5-a), 表现出岛弧 I 型花岗岩类地球化学属性。不同样品锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值不同, 分别为 -1.8、+2.4、+2.5(表 2), 反映了源区成分具有不同的来源, 即源岩既有新生地壳, 也有古老地壳成分。具正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值锆石, 其二阶段模式年龄为 1107~1669 Ma, 平均为 1303 Ma(表 2, 图 10); 具负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的锆石, 其二阶段模式年龄为 1422~1813 Ma, 平均为 1579 Ma; 反映了晚古元古代~早中元古代地壳和中元古代新生地壳在早奥陶世发生了部分熔融, 形成了这一期的花岗岩浆。

第 2 期花岗岩类(年龄为 435~450 Ma)的 $\text{ASI}<1.05$, 变化于 0.85~1.02, 岩石为准铝质。其中白干湖村北花岗岩体与茫崖西花岗岩体具有类似的配分模型(表 2, 图 5), 说明它们具有相似的源岩; 但它们的微量元素蛛网图存在一些差异(图 6), 白干湖村北花岗岩体具有 Ba、Nb、Sr、P、Ti 负异常, 而茫崖西花

岗岩 Ba、Nb、Sr 负异常不明显, P、Ti 负异常比较明显, 可能反映了两者的岩浆分异演化程度不同; 此外, 两者的 SiO_2 与 P_2O_5 之间具有负相关性, 说明它们属 I 型花岗岩类。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以正值为主, 负值少量, 正值为 +0.2~+6.0(表 2, 图 10), 平均为 +3.0, 二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 1033~1742 Ma, 平均为 1296 Ma; 负值为 -12.4~-0.4, 平均为 -5.6, 二阶段模式年龄为 11454~2211 Ma(表 2, 图 10), 平均为 1783 Ma, 可能反映了花岗岩的源岩仍以晚古元古代地壳物质和中元古代新生地壳成分为主。

第 3 期花岗岩类(年龄为 385~411 Ma)不仅富集大离子亲石元素, 而且还富集部分高场强元素(Zr、Y、Nb 等), 稀土元素配分曲线以明显的负 Eu 异常为特征(图 5-d), 具有 A 型花岗岩的地球化学特征, 类似于华南以低 Sr 高 Yb 为特征的 A 型花岗岩^[74]。本期花岗岩类具有较高的 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ (>2.6 , 2.73~3.13, 平均为 2.93)、Zr 和 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ ($>350 \times 10^{-6}$, $304\text{--}449 \times 10^{-6}$, 平均为 374×10^{-6}) 值和较低的 MgO、 Al_2O_3 、Ba 和 Sr 的含量, 还具有明显的 Eu 负异常^[75]和明显的 Ba、Sr、P、Eu、Ti 亏损, 这些都是 A 型花岗岩的特征。岩石中没有碱性暗色矿物和岩石的 $\text{A}/\text{CNK}=0.88\text{--}0.96$, 表明该期花岗岩为准铝质 A 型花岗岩^[76]。负的 Ti、P、Eu 异常可能与含 Ti 矿物相(如钛铁矿和金红石)、磷灰石、斜长石和/或钾长石的分异有关。钾长石的分馏还可能产生 Eu、Ba 的同时负异常^[77]。实验岩石学和锆石饱和温度证明^[67-70,73], A 型花岗岩不可能由 I 型花岗岩分异产生, 因为 A 型花岗岩需要非常高的温度^[78]。通常认为 A 型花岗岩在地壳伸展期间, 伴随着地幔源岩浆为地壳深熔作用提供热源, 壳源物质部分熔融形成的^[75-76,79]。因此, King^[76]认为准铝质 A 型花岗岩是壳内部分熔融形成的。结合本区第 3 期花岗岩的特点和发育大量的基性岩脉以及区域地质背景, 我们认为, 本区在泥盆纪期间, 地幔上拱产生大量的基性岩浆引发地壳部分熔融形成第 3 期 A 型花岗岩。该期花岗岩仅 3 颗锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值(-2、-0.5、-6), 其余的均为正值, +0.3~+9.6(表 2, 图 10), 平均为 +4.2, 二阶段模式年龄为 786~1381 Ma(表 2, 图 10), 平均为 1129 Ma, 反映了该组花岗岩的源岩主要以新生地壳为主, 混有极少量的古老地壳成分。

第 4 期花岗岩类(年龄为 343~351 Ma)岩石以过

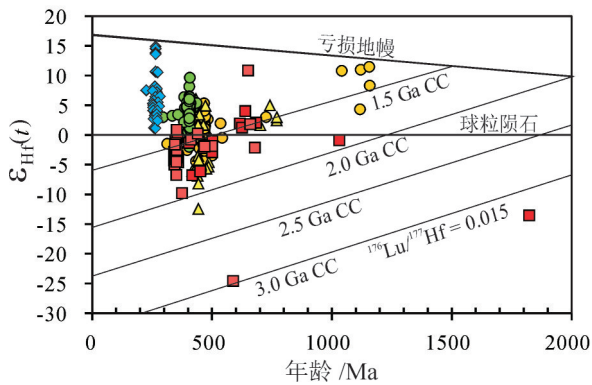


图10 花岗岩类锆石 Hf 同位素演化图(图例同图2)
Fig. 10 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values versus age (Ma) diagram of the granites from southern Altun (symbols as for Fig. 2)

铝质为特征, ASI 为 1.04~1.17, CIPW 标准矿物计算得出刚玉(AC)的含量为 0.84~2.31, 平均为 1.64, SiO_2 与 P_2O_5 之间不具有负相关性(表 1), 岩石稀土元素配分曲线具有弱的负 Eu 异常, 这些特征均显示了 S 型花岗岩的特征, 反映其源岩可能含量有较多的泥质沉积岩。该组花岗岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要为负值, 变化为 -24.6~-0.4, 平均为 -3(表 2, 图 10), 二阶段模式年龄为 1386~3313 Ma, 平均为 1673 Ma; 该期花岗岩仅有 8 颗锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值(+0.2~+10.8, 平均为 +2.9), 二阶段模式年龄为 1351 Ma(表 2, 图 10), 说明该期花岗岩的源岩以晚古元古代地壳为主, 含有少量的新生地壳成分。

第 5 期花岗岩类(年龄为 264~265 Ma)岩石地球化学特征与第 1 期花岗岩类和第 2 期花岗岩类的白干湖村北岩体的类似, 富集大离子亲石元素, 具有 Ba、Nb、Sr、P、Ti 负异常(图 6); 稀土元素配分曲线为右倾型, 不明显或弱的负 Eu 异常(图 5), 说明它们具有相似的源岩。该期花岗岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 变化于 +1.2~+14.9, 平均为 +6.1(表 2, 图 10), 二阶段模式年龄为 338~1214 Ma(表 2, 图 10), 平均为 897 Ma, 反映源岩主要为新生地壳。

由上可见, 各期花岗岩锆石的 Lu-Hf 同位素分析表明, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大多数为正值, 少数继承性锆石为负值, 反映了它们的源岩以新生地壳为主, 同时, 也混有少量的古大陆壳的成分。结合年龄分布(图 10), 我们认为, 本区地壳增生事件至少发生过 3 次, 第一次为中元古代末期, 第二次为新元古代中期, 第三次为早古生代。

5.2 岩浆活动的构造环境

研究表明, 早古生代南阿尔金存在多洋盆、微古陆、多古陆、多岛洋的古地理面貌^[6,8,29,31,45-47]。中阿尔金地块和南阿尔金地块之间的江孜勒萨依—巴什瓦克高压超高压带(结合带)的存在, 说明曾发生过大陆的深俯冲作用^[1,51-54]。而阿尔金断裂以南的阿帕—茫崖早古生带蛇绿混杂岩带(结合带)则以奥陶纪海相火山岩及沉积岩为主^[40], 其中存在大量的基性超基性岩块, 在空间上构成了蛇绿岩组合。此外, 奥陶系中分布有大量的早古生代花岗岩。本文研究得出, 第 1 期花岗岩类具有岛弧火成岩的地球化学属性, 暗示本区早古生代存在洋壳的俯冲。众所周知, 俯冲带岩浆岩化学成分反映了多种成分的贡献, 如地幔楔、洋壳、沉积岩和俯冲产生的流体加入到岩浆等^[80-86]。大多数源于弧的岩石比源于其他构造背景的岩石具有更高的 LREE/HFSE 和 LILE/HFSE 比值^[81], 主要是因为俯冲作用形成的流体^[87]进入地幔楔形区后对地幔楔进行交代^[81,88-89]。一般来说, HFSE 和 HREE 仍保留在俯冲板块的副矿物中或不受流体活动的影响, 而 LILE 和 LREE 通过熔融或脱水作用进入俯冲作用产生的岩浆中^[84]。然而, 也有例外情况, 如 Th 是 HFSE 元素, 但它在弧环境中的行为表现出较强的活动性^[84], 且 Th 的增加与弧岩浆中 Ta 的含量有关^[80]。因此, 弧岩浆比板内火成岩具有更高的 Th/Ta 比值。Gorton and Schandl^[90]收集了世界上 26 个不同地方的花岗岩和中酸性火山岩的地球化学资料, 利用不相容元素 Ta、Th 和 Yb 的丰度和比值, 有效地区分出大洋岛弧、活动大陆边缘和板内火山岩带 3 种不同的构造环境。其中板内火山岩带的资料来自冰岛、埃塞俄比亚和新墨西哥的瓦勒斯火山, 大陆活动边缘的有希腊、智利、阿根廷、日本、墨西哥、阿拉斯加和汤加—克马德克及伊豆小笠原弧, 大洋岛弧的有吕宋岛。三种构造环境中火成岩的 Th 逐步富集主要归因于弧的成分增加, Th/Ta 比值 1~6 是板内火山岩带, 6~20 是活动大陆边缘, >20~90 的是大洋岛弧^[90]。本区第 1 期花岗岩类的 Th/Ta 比值为 4.6~35.0, 平均为 22.7, 第 2 期的变化较大, 1.9~19.8, 平均为 10.49, 其中茫崖镇西花岗岩为 1.9~10.6, 平均为 5.6, 而白干湖村北花岗岩为 9.7~19.8, 平均为 16.4; 第 3 期花岗岩类为 2.9~15.4, 平均为 10.0; 第 4 期花岗岩类的为 15.4~24.6, 平均为

17.5;第5期花岗岩类的变化较大,为2.8~65.6,平均为19.3,可能反映了源岩成分变化大的特点。总体来看,本区5期花岗岩的Th/Ta比值特征反映了岩浆活动的构造环境具有从岛弧到活动大陆边缘的变化特点。此外,本区花岗岩类富集Cs、K、Rb和Th,也表明花岗岩的形成与俯冲作用有关^[91-92]。根据Muller and Groves^[93]的Y-Zr和Zr/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃图解,本区不同期次花岗岩类的样品投点落入与弧相关的大陆和碰撞后区域(图11-a, b);在Gorton and Schandl^[90]图解中,各期花岗岩投点均落入大洋弧和活动大陆边缘区域(图11-c),反映了本区岩浆活动的构造环境从大洋岛弧到活动大陆边缘再到碰撞后的演化过程。

5.3 花岗岩形成的动力学过程

从南阿尔金不同期次花岗岩类锆石Lu-Hf分析结果看,无论是岩浆结晶的锆石还是老的继承性锆石,它们的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都落入亏损地幔线以下,且大多数 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值(图10),表明花岗岩类的源岩以新生地壳物质的部分熔融为主^[64],而加入到大陆地壳中的新生组分可能主要为来自亏损地幔的玄武质岩浆,这种情况主要发生在俯冲增生带^[91]。

一般来说,在俯冲增生带背景下的花岗岩成因有两种模式。一种是起源于玄武质岩浆,通过AFC作用形成^[94-96],二是熔融、同化、储藏和均一化作用(MASH)^[97]。MASH模式适用于整个谱系的岩浆产生的过程。接近幔-壳边界的地幔与地壳岩浆混合,建立了熔融阶段岩浆特有的化学特征,而AFC作用基本上改变了上升岩浆的成分,导致均一化岩浆^[97]。在第二个模式中,玄武质岩浆为地壳岩石的

部分熔融提供了热^[98-99],如基性岩浆的底侵作用,产生的热量足以使地壳发生部分熔融,同时,地幔的物质直接加入地壳^[100-103]。Wiebe^[104]通过实验和计算得出,1 g 1200℃玄武质岩浆冷却到775℃时产生的热量足以形成含熔体80%的3.5 g花岗质岩浆。因此,我们认为,早古生代南阿尔金存在大洋板块的俯冲,产生的流体直接诱发岛弧区火成岩发生部分熔融,形成了第1期花岗岩类,该期花岗质岩浆作用与北祁连、柴北缘和北阿尔金第1期花岗质岩浆作用类似^[105-117]。南阿尔金第2期花岗质岩浆作用可能形成于洋盆闭合之后的活动大陆边缘环境,与北祁连、柴北缘和北阿尔金的第2期花岗质岩浆作用相似^[105-113,115-116];但花岗岩的地球化学属性不同。柴北缘第2期花岗岩类以S型花岗岩为主,少量的I型花岗岩类;而北祁连、北阿尔金第2期花岗岩类既有I型,也有S型。南阿尔金第3期花岗岩类主要为A型,形成于造山带伸展、减薄阶段,但北祁连、北阿尔金第3期花岗岩类仍形成于碰撞后环境^[115-116],而柴北缘第3期花岗岩类的形成与经历过超高压变质作用的块体折返有关^[111-112,118];南阿尔金第4期、第5期花岗质岩浆活动可能与南阿尔金造山带根部拆沉作用有关,幔源岩浆的加入,先后导致中上地壳的部分熔融形成这两期花岗岩类。但南阿尔金第4期花岗岩类比柴北缘第4期的时代^[118](370~382 Ma)晚约20~30 Ma,可能说明了不同地方的深部拆沉作用时间不同。

结合区域地质特征,我们认为,460 Ma之前,南阿尔金地块和柴达木地块之间存在南阿尔金洋,洋壳向南俯冲,形成岛弧火山岩,同时形成奥陶纪沉

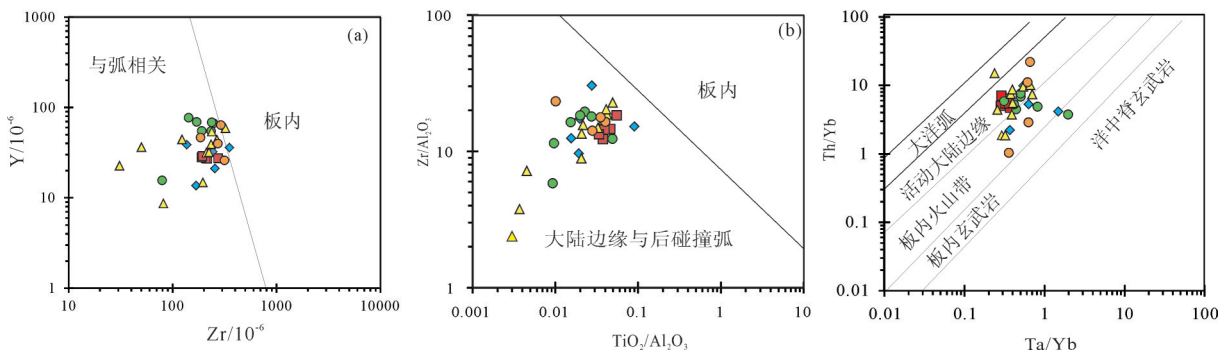


图11 Y-Zr, Zr/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃和Ta/Yb-Th/Yb图解(a, b据文献[93]; c据文献[90])(图例同图2)
Fig. 11 Y versus Zr and Zr/Al₂O₃ versus TiO₂/Al₂O₃ geotectonic discrimination diagrams (after reference [93], Th/Yb-Ta/Yb discrimination diagrams after reference [90]) (symbols as for Fig. 2)

积物。由于俯冲的大洋板块脱水作用,形成富含活动性元素的流体,流体对地幔楔进行交代,并诱发地幔楔部分熔融,形成玄武质岩浆喷发,产生大量的岛弧火山岩。同时,深部来源的岩浆、流体和热能促使岛弧根部的岩石发生部分熔融,形成第1期花岗岩类。随着俯冲的持续,岛弧火山喷发作用逐渐减弱,洋盆闭合,柴达木板块与早期形成的弧岛、南阿尔金陆块对接、挤压、碰撞,形成第2期花岗岩类。随着碰撞作用的持续,南阿尔金造山带上不同块体之间相互均衡、调整、伸展,形成第3期A型花岗岩类,标志着南阿尔金地区进入板内环境。由于造山带根部发生拆沉作用,幔源岩浆以底侵的方式在岛弧的根部逐渐聚集,形成深位岩浆房,岩浆房提供的热量使得中上地壳低熔点的组分发生部分熔融,先后形成第4期和第5期花岗岩类,反映了两次岩浆热事件。

6 结 论

(1)研究表明,第1期花岗岩类为准铝质钙碱性系列岩石,岩石组合为石英闪长岩+花岗闪长岩+二长花岗岩,具有岛弧I型火成岩的地球化学属性,第2期花岗岩类也具有I型花岗岩的地球化学属性,第3期花岗岩类岩石组合为二长花岗岩+正长花岗岩+碱长花岗岩,具有A型花岗岩的特点,第4期花岗岩类具有S型花岗岩的地球化学特征,岩石组合为花岗闪长岩+花岗岩,第5期花岗岩类岩石组合为石英闪长岩+二长花岗岩+正长花岗岩,也属I型。

(2)锆石 Lu-Hf 同位素研究表明,第1期花岗岩类锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值既有正值,也有负值,对应的二阶段模式年龄分别为 1303 Ma、1579 Ma,反映了晚古元古代—早中元古代地壳和中元古代新生地壳在早奥陶世发生了部分熔融,形成了第一期花岗岩浆。与第1期花岗岩类相似,第2期花岗岩类锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以正值为主,对应的二阶段模式年龄为 1296 Ma; 负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值对应的二阶段模式为 1783 Ma,可能反映了花岗岩的源岩仍以晚古元古代地壳物质和中元古代新生地壳成分为主。第1、2期花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值反映了 1300 Ma 南阿尔金地区发生过一次地壳增生事件。第3期花岗岩的源岩以新生地壳成分为主,混有少量的古老地壳成分;第4期花岗岩类锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化较大,年龄变化也大,反映了源岩成分为多来

源,和第2期花岗岩类一起揭示了在 650~750 Ma 南阿尔金地区又发生过一次地壳增生事件;第5期花岗岩类源岩几乎全为新生地壳部分熔融形成,反映了古生代的一次地壳增生事件。

(3)根据不同期次花岗岩类时空分布特征,结合不同期次花岗岩类岩石地球化学特征及锆石 Lu-Hf 同位素特征,我们认为,本区早古生代花岗岩类形成的构造环境具有从大洋岛弧到活动大陆边缘再到碰撞后的变化特征。即 460 Ma 以前,南阿尔金洋壳向南俯冲,形成岛弧I型花岗岩类(第1期);随着俯冲的继续,南阿尔金洋闭合,形成活动大陆边缘的高钾钙碱性I型花岗岩类(第2期);随着造山带不同块体之间的均衡调整、垮塌,应力处于松弛环境,形成A型花岗岩类(第3期);由于造山带深部块体的拆沉作用,先后引起中上地壳部分熔融形成S型花岗岩类(第4期)和I型花岗岩类(第5期)。

参考文献(References):

- [1] 刘良, 孙勇, 肖培喜, 等. 阿尔金发现超高压(>3.8 GPa)石榴石-二辉橄榄岩[J]. 科学通报, 2002, 47(9): 657-662.
Liu Liang, Sun Yong, Xiao Peixi, et al. Discovery of ultra high-pressure magnesite-bearing garnet lherzolite (>3.8 GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(11): 881-886 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 阿尔金江孜勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 98-107.
Liu Liang, Zhang Anda, Chen Danling, et al. Implications based on LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(1): 98-107 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张建新, 孟繁聪, Mattinson C G. 南阿尔金—柴北缘高压-超高压变质带研究进展、问题及挑战[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 526-545.
Meng Fancong, Zhang Jianxin, Mattinson C G. Progress, controversies and challenge of studies on South Altyn Tagh-North Qaidam HP/UHPmetamorphic belt [J]. Geological Journal of Chinese Universities, 2007, 13: 526-545 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李向民, 马中平, 孙吉明, 等. 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, 2009, 25(4): 862-872.
Li Xiangmin, Ma Zhongping, Sun Jiming, et al. Characteristics and age study about the Yuemakeqi maficultramagmatic rock in the southern Altyn Fault [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(4): 862-872 (in Chinese with English abstract).

- [5] 杨经绥,许志琴,张建新,等.中国主要高压—超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨[J]. 岩石学报, 2009, 25(7): 1529–1560.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, et al. Tectonic setting of main high- and ultrahigh- pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(7): 1529–1560 (in Chinese with English abstract).
- [6] 马中平,孙吉明,唐卓,等.阿尔金山南缘长沙沟—清水泉—带镁铁—超镁质杂岩体Cu–Ni–PGE含矿性讨论[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 18–24.
Ma Zhongping, Sun Jiming, Tang Zhuo, et al. Discussions on the magmatic Cu–Ni–PGE sulfides mineralization potential of the Changshagou–Qingshuiquan layered mafic–ultramafic intrusions, Altyn Tagh [J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(4): 18–24 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘永顺,于海峰,修群业,等.南阿尔金地区榴辉岩特征及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(2): 166–174.
Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xiu Qunye, et al. Characteristics and tectonic implications of eclogites in southern Altun area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(2): 166–174 (in Chinese with English abstract).
- [8] 董增产,校培喜,奚仁刚,等.阿尔金山南缘构造混杂岩带中角闪辉长岩地球化学特征及同位素测年[J]. 地质论评, 2011, 57(2): 207–216.
Dong Zengchan, Xiao Peixi, Xi Rengang, et al. Geochemical Characteristics and Isotopic Dating of Bojites in the Tectonic Melange Belt on South Margin of Altun [J]. *Geological Review*, 2011, 57(2): 207–216 (in Chinese with English abstract).
- [9] 于胜尧,张建新,宫江华.南阿尔金山巴什瓦克高压/超高温麻粒岩中金红石 Zr 温度计及其地质意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 140–150.
Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Gong Jianghua. Zr–in–rutile thermometry in HP/ UHT granulite in the Bashiwake area of the South Altun and its geological implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 140–150 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李云帅,张建新,李胜荣,等.南阿尔金山巴什瓦克石榴橄榄岩的变质演化[J]. 岩石学报, 2013, 29(6): 2073–2092.
Li Yunshuai, Zhang Jianxin, Li Shengrong, et al. Metamorphic evolution of the Bashiwake garnet peridotite from the South Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 2073–2092 (in Chinese with English abstract).
- [11] 曹福根,董富荣.阿尔金山北缘沟口泉古元古代蛇绿混杂岩(绿岩)地质特征及意义[J]. 西北地质, 2014, 47(4): 47–60.
Cao Fugen, Dong Furon. Geology and tectonic significance of the Paleoproterozoic ophiolitic melange in Goukouquan, Northern margin of Altun [J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(4): 47–60 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhang J, Meng F, Yang J. A new HP/LT metamorphic terrane in the northern Altyn Tagh, western China [J]. *Int Geol Rev*, 2005, 47: 371–386.
- [13] Mattinson C G, Menold C A, Zhang J X, et al. High- and Ultrahigh- Pressure Metamorphism in the North Qaidam and South Altyn Terranes, Western China [J]. *International Geology Review*, 2007, 49: 969–995.
- [14] Liu L, Chen D L, Wang C, Zhang C L. New progress on geochronology of high- pressure/ ultrahigh- pressure metamorphic rocks from the South Altyn Tagh, the North Qaidam and the North Qinling orogenic, NW China and their geological significance [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2009, 39(3): 472–479.
- [15] Liu Y S, Yu H F, Xiu Q Y. Characteristics and tectonic implications of eclogites in southern Altun area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29: 166–174.
- [16] 马铁球,王先辉,孟德保.阿尔金地块南西缘钙碱性侵入岩带特征及其地质意义[J]. 湖南地质, 2002, 21(1): 12–16.
Ma Tieqiu, Wang Xianhui, Meng Debao. Characteristic and geology meaning of alkaline calcium invade–rock zone at the SW fringe of altun massif [J]. *Hunan Geology*, 2002, 21(1): 12–16 (in Chinese with English abstract).
- [17] 伍跃中,王战,过磊,等.阿尔金山西南段花岗岩类的时空变化与构造作用——来自钾钠含量变化的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(4): 573–587.
Wu Yuezhong, Wang Zhan, Guo Lei, et al. Tectonic Control for Temporal and Spatial Variation of Granitoids in Southwest Sector of Altyn Mountains—Evidence from Changes of Potassium and Sodium in Granitoids [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33 (4): 573–587 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王超,刘良,张安达,等.阿尔金山南缘岩浆混合作用: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, 2008, 24 (12): 2809–2819.
Wang Chao, Liu Liang, Zhang Anda, et al. Geochemistry and petrography of Early Paleozoic Yusupuleke Taghrapakivi–textured granite complex, South Altyn: An example for magma mixing [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(12):2809–2819 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王超,刘良,车自成,等.塔里木南缘铁克里克构造带东段前寒武纪地层时代的新限定和新元古代地壳再造:锆石定年和 Hf 同位素的约束[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1647–1656.
Wang Chao, Liu Liang, Che Zicheng, et al. Zircon U–Pb and Hf Isotopic from the East Segment of Tiekelike Tectonic Belt: Constrains on the Timing of Precambrian Basement at the Southwestern Margin of Tarim, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(11): 1647–1656 (in Chinese with English abstract).
- [20] 曹玉亭,刘良,王超,等.阿尔金山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, 2010, 26(11): 3259–3271.
Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, et al. Geochemical zircon U–

- Pb dating and Hf isotope compositions studies for Tatelekebulake granite in South Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (11): 3259–3271 (in Chinese with English abstract).
- [21] 孙吉明, 马中平, 唐卓, 等. 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*, 2012, 86(2): 247–257.
- Sun Jiming, Ma Zhongping, Tang Zhuo, et al. LA-ICP-MS Zircon Dating of the Yumuquan Magma Mixing Granite in the Southern Altyn Tagh and Its Tectonic Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(2): 247–257 (in Chinese with English abstract).
- [22] 康磊, 刘良, 曹玉亭, 等. 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*, 2013, 29(9): 3039–3048.
- Kang Lei, Liu Liang, Cao Yuting, et al. 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 Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3039–304 (in Chinese with English abstract).
- [23] 杨文强, 刘良, 丁海波, 等. 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*, 2012, 28(12): 4139–4150.
- Yang Wenqiang, Liu Liang, Ding Haibo, et al. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunlike granite in South Altyn Tagn and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(12): 4139–4150 (in Chinese with English abstract).
- [24] 吴才来, 郜源红, 雷敏, 等. 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*, 2014, 30(8): 2297–2323.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Lei Min, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating, Lu-Hf isotopic characteristics and petrogenesis of the Palaeozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China [J]. *Acta petrologica Sinica*, 2014, 30: 2297–2323 (in Chinese with English abstract).
- [25] 车自成, 刘良, 刘洪福, 等. 阿尔金山地区高压变泥质岩石的发现及其产出环境[J]. *科学通报*, 1995, 40 (14): 1298–1300.
- Che Zicheng, Liu Liang, Liu Hongfu, et al. Discovery and occurrence of high-pressure metapelitic rocks from Altun Mountain Areas [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40: 1988–1991.
- [26] 崔军文, 唐哲明, 邓晋福, 等. 阿尔金断裂系[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1–249.
- Cui Junwen, Tang Zheming, Deng Jinfu, et al. Altun Fault System [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1–249 (in Chinese with English abstract).
- [27] 陆松年, 袁桂邦. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(1): 61–68.
- Lu Songnian, Yuan Guibang. Geochronology of early Precambrian magmatic activities in Aketashitage, eastern Altyn Tagh [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(1): 61–68 (in Chinese with English abstract).
- [28] 郭召杰, 张志诚, 王建君. 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*, 1998, 43(18): 1981–1984.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wang Jianjun. Sm-Nd isochron age of ophiolite zone in northern margin of Altun Mountains and its tectonic significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 44 (5): 456–458 (in Chinese).
- [29] 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄证据[J]. *科学通报*, 1998, 43 (8): 880–882.
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, et al. The evidence of Sm-Nd isochron age for the Early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(9): 754–756.
- [30] 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 1999, 15 (1): 57–63.
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, et al. The metrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(1): 57–63(in Chinese with English abstract).
- [31] 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 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*, 1999, 73 (3): 193–205.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike fault and the mechanism of lithospheric shearing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(3): 193–205 (in Chinese with English abstract).
- [32] 周勇, 潘裕生. 阿尔金断裂早期走滑运动方向及其活动时间探讨[J]. *地质论评*, 1999, 45(1): 1–9.
- Pan Yusheng, Zhou Yong. The initial shear sense of the Altun fault and its timing [J]. *Geological Review*, 1999, 45(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- [33] Sobel E R, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China [J]. *Tectonics*, 1999, 18: 64–74.
- [34] Yin A, Graic E M, Oscar L, et al. Early Paleozoic tectonic and thermomechanical evolution of ultrahigh-pressure (UHP) amorphous rocks in the northern Tibetan Plateau, Northwest China [J]. *Internationa Geology Review*, 2007, 49: 681–716.
- [35] 尹安. 喜马拉雅—青藏高原造山带构造演化—显生宙亚洲大陆生长[J]. *地球学报*, 2001, 22(3): 193–230.
- Yin An. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen-phanerozoic growth of aisa continental [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(3): 193–230 (in Chinese with English abstract).
- [36] Liu L, Che Z C, Wang Y. The metrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(1): 57–64 (in Chinese with English abstract).

- [37] 崔军文. 南阿尔金断裂的韧性剪切作用时代及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3422–3434.
Cui Junwen. Ductile shearing age of the south Altun fault and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3422–3434 (in Chinese with English abstract).
- [38] 郭召杰, 张志诚. 塔里木基底构造格架与演化[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 94.
Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng. Framework and evolution of the Tarim basement [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 94.
- [39] 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等. 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, 2009, 28 (10): 1430–1438.
Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xin Houtian, et al. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28 (10): 1430–1438 (in Chinese with English abstract).
- [40] 赵恒乐, 曹福根, 李佳, 等. 阿尔金红柳沟北南华纪火山岩地质特征及锆石 U–Pb SHRIMP 定年[J]. 西部探矿工程, 2011, 9: 107–111.
Zhao Hengle, Cao Fugen, Li Jia, et al. Geological characteristics and zircon SHRIMP U–Pb dating of Nanhua volcanic rocks from the northern Hongliugou in Altun area [J]. *Exploration Engineering*, 2011, 9: 107–111.
- [41] 曹玉亭, 刘良, 王超, 等. 南阿尔金木纳布拉克地区高压泥质麻粒岩的确定及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1727–1739.
Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, et al. Determination and implication of the HP pelitic granulite from the Munabulake area in the South Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(5): 1727–1739 (in Chinese with English abstract).
- [42] 车自成, 刘良, 孙勇. 阿尔金麻粒岩相杂岩的时代及塔里木盆地的基底[J]. 中国区域地质, 1996, 1: 51–57.
Che Zicheng, Liu Liang, Sun Yong. The ages of Altun granulite facies complex and the basement of Tarim Basin [J]. *China Regional Geology*, 1996, (1): 51–57 (in Chinese with English abstract).
- [43] 吴峻, 李继亮, 兰朝利, 等. 阿尔金红柳沟蛇绿岩研究进展[J]. 地质科学, 2001, (3): 342–349.
Wu Jun, Li Jiliang, Lan Chaoli, et al. New Knowledges On Hongliugou Ophiolite along Altun Fault, Nw China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, (3): 342–349 (in Chinese with English abstract).
- [44] 孙勇, 刘池阳. 阿尔金山拉配泉地区元古宙裂谷火山岩系及其构造意义[J]. 地质论评, 1997, 43(1): 17–24.
Sun Yong, Liu Chiyang and Che Zicheng. The Proterozoic rift volcanic series in the Lapeiquan area, the Altun Mountains and its tectonic significance [J]. *Geological Review*, 1997, 43(1): 17–24 (in Chinese with English abstract).
- [45] 覃小锋, 李江, 陆济璞, 等. 阿尔金碰撞造山带西段的构造特征[J]. 地质通报, 2006, 25(1–2): 104–112.
Qin Xiaofeng, Li Jiang, Lu Jipu, et al. Tectonic evolution of the western segment of the Altyn Tagh collisional orogen, Northwest China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1–2): 104–112 (in Chinese with English abstract).
- [46] 覃小锋, 夏斌, 李江, 等. 阿尔金南缘构造带西段早古生代绿片岩的地球化学特征及构造环境[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 799–807.
Qin Xiaofeng, Xia Bin, Li Jiang, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of the Early Paleozoic greenschist in the western segment of the southern Altyn Tagh marginal tectonic belt [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (5): 799–807 (in Chinese with English abstract).
- [47] 覃小锋, 夏斌, 李江, 等. 阿尔金南缘构造带西段辉绿岩墙群的地球化学特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(1): 14–22.
Qin Xiaofeng, Xia Bin, Li Jiang, et al. Geochemical characteristics and tectonic settings of the diabase dyke swarms in the western segment of the southern Altun tectonic belt [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27 (1): 14–22 (in Chinese with English abstract).
- [48] 张建新, 张泽明, 许志琴, 等. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm–Nd 及 U–Pb 年龄——阿尔金构造带中加里东期山根存在的证据[J]. 科学通报, 1999, 44(10): 1109–1112.
Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, et al. The age of U–Pb and Sm–Nd for eclogite from the western segment of the Altyn Tagh tectonic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(10): 2256–2259.
- [49] 张建新, 许志琴, 杨经绥, 等. 阿尔金西段榴辉岩岩石学、地球化学和同位素年代学研究及其构造意义[J]. 地质学报, 2001, 75 (2): 186–197.
Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, et al. Petrology, Geochemistry and Geochronology of Eclogites from the Western Segment of the Altun Tectonic Belt, Northwestern China [J]. *Acta geology Sinica*. 2001, 75 (2): 186–197 (in Chinese with English abstract).
- [50] 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 231–234.
Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Zhang Zeming, et al. Evidence for UHP metamorphism of eclogites from the Altun Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(9): 751–755.
- [51] 刘良, 孙勇, 罗金海, 等. 阿尔金英格利萨依花岗岩质片麻岩超高压变质[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(12): 1184–1192.
Liu Liang, Sun Yong, Luo Jinhai, et al. Ultra–high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altun Mountains, NW China [J]. *Science in China (SeriesD)*, 2003, 33 (12): 1184–1192 (in Chinese).
- [52] 刘良, 陈丹玲, 张安达, 等. 阿尔金超高压(>7 GPa) 片麻状(含) 钾长石榴辉石岩—石榴子石出溶单斜辉石的证据[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35 (2): 105–114.

- Liu Liang, Chen Danling, Zhang Anda, et al. Ultrahigh pressure gneissic K-feldspar garnet clinopyroxenite in the Altyn Tagh, NW China: evidence from clinopyroxene exsolution in garnet [J]. *Science in China: Series D*, 2005, 48(7): 1000-1010.
- [53] 王超, 刘良, 车自成, 等. 阿尔金南缘榴辉岩带中花岗片麻岩的时代及构造环境探讨[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(1): 74-82.
- Wang Chao, Liu Liang, Cheng Che, et al. U-Pb geochronology and tectonic setting of the granitic gneiss in Jianggaleisayi eclogite belt, the southern edge of Altyn Tagh [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(1): 74-82 (in Chinese with English abstract).
- [54] 张安达, 刘良, 孙勇, 等. 阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(22): 2335-2341.
- Zhang Anda, Liu Liang, Sun Yong, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons and its geological significance from UHP granitoid gneiss in Altyn Tagh [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (23): 2527-2532.
- [55] Li X M, Ma Z P, Sun J M, et al. Characteristics and age study about the Yumakeqi mafic ultramafic rock in the southern Altyn Fault [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 862-872 (in Chinese with English abstract).
- [56] 侯可军, 李延河, 邹天人. LA-MS-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2595-2604.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren. Laser ablation- MC- ICP- MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. *Acta Petrol. Sinica.*, 2007, 23 (10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- [57] Middlemost E A K. Naming materials in magma/igneous rock system [J]. *Earth- Science Reviews*, 1994, 37: 215-224. doi: 10.1016/0012-8252(94)90029-9.
- [58] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523-548.
- [59] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *GSA Bulletin*, 1989, 101: 635-643.
- [60] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42 (11): 2033-2048.
- [61] Frost B R, Frost C D. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks [J]. *Journal of Petrology*, 2008, 49: 1955-1969.
- [62] Taylor S R, McLennan S. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford, Blackwell, 1985:1-312.
- [63] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D and Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [64] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract).
- [65] Patino Douce A E, Beard J S. Effects of P, fo₂ and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37: 999-1024.
- [66] Patino Douce A E, McCarthy T C. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction[C]//Hacker B R, Liou J G. (Eds), *When Continents collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh- Pressure Rocks*. Petrology and Structural Geology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998, 10: 27-55.
- [67] Rapp R P, Watson E B and Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and origin of Archean trondhjemites and tonalities [J]. *Precambria Research*, 1991, 51:1-25.
- [68] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 891-931.
- [69] Wolf M B, Wyllie J P. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 115: 369-383.
- [70] Winther K T. An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts [J]. *Chemical Geology*, 1996, 127: 43-59.
- [71] Skjerlie K P, Patiño Douce A E. The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa; implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes [J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43: 291-314.
- [72] Jogvan O, Muntener O, Burg J P, et al. Lower continental crust formation through focused flow in km-scale melt conduits: the zoned ultramafic bodies of the Chilas complex in the Kohistan island arc (NW Pakistan) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242(3/4): 320-342.
- [73] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 117: 394-409.
- [74] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 985-1015.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, et al. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 985-1015.
- [75] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407-419.
- [76] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and

- origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38: 371–391.
- [77] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic [J]. *Lithos*, 2003, 67: 191–204.
- [78] Wu F Y, Sun D Y, Li X H, et al. A-type granites in Northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187: 143–173.
- [79] Clemens J D, Holloway J R, White A J R. Origin of an A-type granite: experimental constraints [J]. *American Mineralogist*, 1986, 71: 317–324.
- [80] Hawkesworth C J, Hergt J M, Mcdermott F, et al. Destructive margin magmatism and the contributions from the mantle wedge and subducted crust [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1991, 38: 577–594.
- [81] Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, et al. Mantle slab contributions in arc magmas [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21, 175–204.
- [82] Hawkesworth C J, Turner S P, Mcdermott F, et al. U–Th isotopes in arc magmas: implications for element transfer from the subducted crust [J]. *Science*, 1997, 276: 551–555.
- [83] Pearce J A P & arkinson I J. Trace Element Models for Mantle Melting: Application to Volcanic Arc Petrogenesis[C]//Prichard H M, Alabaster T, N B W Harris & Neary C R, (eds.). *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Nantwich, U. K. Shiva Press, 1993: 373–403.
- [84] Pearce J A Peate & D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1995, 23: 251–285.
- [85] Pitcher W S. *The Nature and Origin of Granite* [M]. London, 1997.
- [86] Bartoli O, Cesare B, Poli S, et al. Recovering the composition of melt and the fluid regime at the onset of crustal anatexis and S-type granite formation [J]. *Geology*, 2013, 41(2): 115–118.
- [87] Tatsumi Y, Kosligo T & Nohda S. Formation of a third volcanic chain in Kamchatka; generation of unusual subduction-related magmas [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, 120, 117–128.
- [88] Le Be L, Cocherie A, Baubron J C, et al. A high-K, mantle-derived plutonic suite ‘Linga’, near Arequipa (Peru) [J]. *Journal of Petrology*, 1985, 26: 124–148.
- [89] Arculus R J & Powell R. Source component mixing in the regions of arc magma generation [J]. *Journal of Geophysics*, 1986, 91: 5913–5926.
- [90] Gorton M P, Schandl E S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonics setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2000, 38: 1065–1073.
- [91] Foley, Wheller. Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: the role of residual titanites [J]. *Chemical Geology*, 1990, 85:1–18.
- [92] Sajona F G, Maury R C, Bellon H, et al. High field strength elements of Pliocene–Pleistocene island-arc basalts Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines) [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37: 693–726.
- [93] Muller D, Groves D I. Potassic igneous rocks and associated gold–copper mineralization [J]. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 1994, 56.
- [94] Bacon C R, Druitt T H. Compositional evolution of the zoned calcalkaline magma chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98: 224–256.
- [95] Mingram B, Trumbull R B, Littman S, et al. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components [J]. *Lithos*, 2000, 54: 1–22.
- [96] Peccerillo A, Barberio M R, Yirgu G, et al. Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: a petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa Volcano, central Ethiopian rift [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44: 2003–2032.
- [97] Hildreth M. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98: 455–489.
- [98] Kay R, Mahlburg Kay S. Creation and destruction of lower continental crust [J]. *Geologische Rundschau*, 1991, 80: 259–278.
- [99] Lustrino M. How the delamination and detachment of lower crust can influence basaltic magmatism [J]. *Earth–Science Reviews*, 2005, 72: 21–38.
- [100] Collins W J. S- and I-type granitoids of the eastern Lachlan Fold Belt: Products of Three-Component Mixing [M]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1996, 88: 171–179.
- [101] Keay S, Collins W J, McCulloch M T. A three-component Sr/Nd isotopic mixing model for granitoid genesis, Lachlan fold belt, eastern Australia [J]. *Geology*, 1997, 25: 307–310.
- [102] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, et al. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf/O isotopes in zircon [J]. *Science*, 2007, 315: 980–983.
- [103] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Collins W J, et al. Isotopic evidence for rapid continental growth in an extensional accretionary orogen: The Tasmanides, eastern Australia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284: 455–466.
- [104] Wiebe R A, Manon M R, Hawkins D P. Late-Stage Mafic Injection and Thermal Rejuvenation of the Vinalhaven Granite, Coastal Maine [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(11): 2133–2153.

- [105] 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 等. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 846-858.
Wu Cailai, Yang Jingsui, Yao Shangzhi, et al. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 849-858 (in Chinese with English abstract).
- [106] 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 等. 北祁连早古生代洋壳双向俯冲的花岗岩证据[J]. 中国地质, 2006, 6: 1197-1208.
Wu Cailai, Yao Sunzhi, Zeng Lingsen, et al. Double subduction of the Early Paleozoic North Qilian oceanic plate: Evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China [J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1197-1208 (in Chinese with English abstract).
- [107] 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 等. 北阿尔金巴什考供—斯米尔布拉克花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(1): 10-26.
Wu Cailai, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, et al. Characteristics of the granitoid complex its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin—Simierbulake, North Altun, NW [J]. Science in China (Series D), 2007, 37(1): 10-26 (in Chinese).
- [108] 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 柴北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2007b, 23(8): 1861-1875.
Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Souping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam Basin, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1861-1875 (in Chinese with English abstract).
- [109] 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(8): 930-949.
Wu Cailai, Gao Yunhong, Wu Suoping, et al. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids from the west segment of the North Qaidam [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 38(8): 930-949 (in Chinese).
- [110] 吴才来, 徐学义, 高前明, 等. 北祁连早古生代花岗岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1027-1044.
Xu Xueyi, Wu Cailai, Gao Qianming, et al. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1027-1044 (in Chinese with English abstract).
- [111] Wu C L, Wooden J L, Yang J S, et al. Granitic magmatism in the North Qaidam Early Paleozoic Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, Northwest China [J]. International Geology Review, 2006, 48: 223-240.
- [112] Wu C L, Yang J S, Robinson P T, et al. Geochemistry, age and tectonic significance of granitic rocks in North Altun, Northwest China [J]. Lithos, 2009, 113: 423-436.
- [113] Wu C L, Wooden J L, Robinson P T, et al. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids from the west segment of the North Qaidam [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 38(8): 930-949.
- [114] Wu C L, Yg J S, Wooden J L, et al. An Early Paleozoic double-subduction model for the North Qilian oceanic plate: evidence from zircon SHRIMP dating of granites [J]. International Geology Review, 2011, 53(2): 157-181.
- [115] 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 等. 北阿尔金恰什坎萨依花岗岩闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 2005, 50(6): 570-575.
Qi Xuexiang, Li Haibing, Wu Cailai, et al. The zircon SHRIMP U-Pb dating of the Qiashikayi granodiorite in Northern Altun [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(6): 570-575 (in Chinese).
- [116] 戚学祥, 吴才来, 李海兵. 北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2005, 1(3): 859-866.
Qi Xuexiang, Wu Cailai, Li Haibing. SHRIMP U-Pb age of zircons from Kazisayi granite in the northern Altyn Tagh mountains and its significations [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 859-866 (in Chinese with English abstract).
- [117] 陈宣华, Gehrels G E, 王小凤, 等. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4): 294-298.
Chen Xuanhua, Gehrels G E, Wang Xiaofeng, et al. Granite from north Altyn Tagh, NW China: U-Pb geochronology and tectonic setting [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(4): 294-298 (in Chinese with English abstract).
- [118] Wu C L, Frost B R, Wooden J L, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from Dulan and the chronological framework of the North Qaidam UHP belt [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2014, 57: 2945-2965.