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*

杨文强[1] 刘良[1**] 丁海波[2] 校培喜[3] 曹玉亭[1] 康磊[1]

YANG WenQiang[1], LIU Liang[1**], DING HaiBo[2], XIAO PeiXi[3], CAO YuTing[1] and KANG Lei[1]

1. 大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质学系, 西安 710069
2. 新疆地矿局第三地质大队, 库尔勒 841000
3. 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 西安 710054

1. *State Key Laboratory of Continental Dynamics*, *Department of Geology*, *Northwest University*, *Xi'an* 710069, *China*
2. *The Third Geological Branch*, *Xinjiang Geological and Mineral Burean*, *Kuerle* 841000, *China*
3. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources*, *China Geological Survey*, *Xi'an* 710054, *China*

2012-08-17 收稿, 2012-09-28 改回.

Yang WQ, Liu L, Ding HB, Xiao PX, Cao YT and Kang L. 2012. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunalike granite in South Altyn Tagn and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12):4139 – 4150

Abstract The Dimunalike moyite intruded the Dimunalike shallow marine sedimentary strata in the South Altyn Tagh. Geochemical data shows that, this granite is high in SiO_2, K_2O and Al_2O_3, enriched in Rb, Th, K, La, Zr, depleted in Ba, Ta, Nb, Sr, P, Ti, and belongs to weakly peraluminous high-K calc-alkaline series. The Dimunalike moyite has characteristics of S-type granite. The magma of this granite might be derived from melting of greywacke under the temperature of >800℃ and pressure ~10kbar. Variations of $\varepsilon_{Hf}(t)$ are −3.52 ~ 0.95. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yields a weighted average age of 452.8 ± 3.1Ma. The crystallization age of the Dimunalike granite was consistent with the retrograde metamorphic age of the UHP rocks and significantly younger than the peak metamorphic age of the HP-UHP rocks. The Dimunalike granite occurred associated with the Changshagou-Qingshuiquan rifting-related banded mafic-ultramafic intrusion. A possibly reason for this is that, after break-off of the Altyn deep subducted continantal slab, the upwelling material and heat from the deep mantle triggered partial melting of the greywacke unit in the crust. The genesis of the Dimunalike granite displays characteristics of syn-exhumation magmatism. Combined with previous studies, tectonic setting evolution process of the Early Paleozoic granite plutons of the South Altyn continental subduction-collision complex can be subdivided into three stages: I) ~500Ma, this period was dominated by continent-continent collision and crustal thickening, and the age constraint is consistent with the peak age of the HP-UHP metamorphism; II) 462 ~ 451Ma, the study area was within an extensional tectonic setting caused by break-off of deep subducted continental slab as indicated by the retrograde metamorphic age of the UHP rocks; III) 426 ~ 406Ma, the tectonic setting of this stage is dominated by post-collisional extension and crustal thinning.

Key words LA-ICP-MS U-Pb zircon dating; S-type granite; Syn-exhumation; Dimunalike; South Altyn Tagn

摘 要 迪木那里克花岗岩侵入到南阿尔金迪木那里克浅海相沉积地层中,岩性为钾长花岗岩。地球化学数据显示该花岗岩具有高 SiO_2、高钾、高铝的特征,富集 Rb、Th、K、La、Zr,亏损 Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti,属于弱过铝质高钾钙碱性系列,具有 S 型花岗岩的特征;其源岩为杂砂岩,熔融温度和压力约为 >800℃与 ~10kbar。锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$介于 −3.52 ~ 0.95,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年确定其形成时代为 452.8 ± 3.1Ma。迪木那里克花岗岩的形成时代明显晚于南阿尔金高压-超高压变质岩的峰期变质时代(486 ~ 504Ma),而与超高压岩石的退变质时代(455Ma)基本一致,又与形成时代为 467Ma 的长沙沟-清水泉一带裂谷

* 本文受国家重点基础研究发展规划"973"项目(2009CB825003)、中国地质调查局项目(1212011085034)、国家自然科学基金项目(40972128)和西北大学大陆动力学国家重点实验室创新基金项目(10DZSY021)联合资助.

第一作者简介: 杨文强, 男, 1983 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: yangwenqiang07@163.com

** **通讯作者**: 刘良, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 从事矿物学、岩石学研究, E-mail: liuliang@nwu.edu.cn

型层状镁铁质-超镁铁质杂岩体伴生,其成因可能是阿尔金深俯冲陆壳板片发生断离后,深部地幔物质上涌导致地壳杂砂岩熔融的产物,具有同折返岩浆作用的特点。结合以往研究,南阿尔金俯冲碰撞杂岩带中早古生代花岗岩的演化期次可初步划分为:1)约 500Ma,与高压-超高压变质岩的峰期变质时代一致,形成于陆-陆碰撞造山作用过程中的陆壳相互叠置加厚阶段;2)为 466~451Ma,与超高压岩石的退变质时代大致相当,形成于深俯冲陆壳断离后的伸展构造背景;3)为 426~385Ma,形成于碰撞造山作用结束后的伸展减薄阶段。

关键词 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄;S 型花岗岩;同折返岩浆作用;迪木那里克;南阿尔金

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

近十多年来,南阿尔金江尕勒萨依、淡水泉和英格利萨依等地陆续发现了具有陆壳属性的多种类型的高压-超高压变质岩石(刘良等, 1996; Liu *et al.*, 2002, 2004, 2005, 2007; Zhang *et al.*, 2001, 2002, 2004, 2005),并确定这些高压-超高压岩石的峰期变质时代为 486~504Ma(Liu *et al.*, 2009, 2010 及其参考文献),退变质时代为 455Ma(Liu *et al.*, 2012)。这些研究揭示南阿尔金构造带在早古生代经历了陆壳深俯冲及其后抬升折返的构造演化过程。大规模陆壳深俯冲作用及其折返的过程中,必然会引发幔源岩浆与壳源岩浆发生混合作用或(和)大陆地壳的重熔,形成各类花岗岩体(Pitcher, 1983; Miller *et al.*, 1999)。南阿尔金地区出露大量花岗岩岩体,它们作为南阿尔金造山带构造演化的岩浆响应,记录着壳幔相互作用、岩石圈演化的大量信息(Barbarin, 1999; Jahn *et al.*, 1999),是研究揭示南阿尔金陆壳深俯冲作用及折返演化过程的重要窗口。但由于该区海拔高、自然条件恶劣、交通不便,花岗岩的研究程度总体较低,很多花岗岩岩体的精细研究还是空白,仅有的一些相关研究主要着重于部分单个岩体,如:阿尔金南缘断裂带的玉苏普阿勒克塔格 406~424Ma 的花岗岩(王超等, 2008)、塔特勒克布拉克 451~462Ma 复式花岗岩体(曹玉亭等, 2010; 康磊等, 2012)和鱼目泉 497Ma 花岗岩(孙吉明等, 2012)。那么,南阿尔金早古生代花岗质岩浆活动究竟有几期?不同期次花岗质岩浆作用的构造背景及其与超高压变质作用之间的构造成因联系是什么?目前尚缺乏系统深入的研究。为此,本文重点研究了南阿尔金迪木那里克花岗岩体的地球化学特征、年代学和锆石 Hf 同位素特征及其成因,并在此基础上,结合区内花岗岩体和超高压变质岩等前人的研究成果,初步探讨了南阿尔金早古生代花岗质岩浆活动期次及其与超高压变质作用之间的构造成因联系。

2 区域地质背景

阿尔金造山带从北至南划分为四个构造单元(图 1),依次为:阿北地块、红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带、米兰河-金雁山地块、南阿尔金俯冲碰撞杂岩带(许志琴等, 1999; 刘良等, 1999; Zhang *et al.*, 2001; 车自成等, 2002)。其中,南阿尔金俯冲碰撞杂岩带大致可进一步划分为南阿尔金高压-超高压变质带和南阿尔金蛇绿构造混杂岩带两部分。迪木那里克花岗岩出露于南阿尔金蛇绿构造混杂岩带中的绢云千枚岩地层之中,该地层已被初步确定为浅海相(火山)沉积地层(杨文强等, 2012)。

沿阿尔金南缘断裂带南侧,东起青海-新疆交界的茫崖,西至阿帕,长约 700km 的狭长范围内,分布有规模不等上百个镁铁-超镁铁质岩体。以往多数学者认为它们均具有蛇绿岩性质,将其称为阿帕-茫崖蛇绿岩带(董显扬等, 1995; 刘良等, 1998; 张旗和周国庆, 2001; 李向民等, 2009)。根据以下几方面的资料,该蛇绿岩带的形成时代应≥500Ma:茫崖地区 8 件具有 MORB 或 OIB 特征的基性火山岩 Sm-Nd 年龄为 481±53Ma(刘良等, 1998)、区内鱼目泉加厚地壳背景下形成的混合花岗岩的时代为 496.9±1.9Ma(孙吉明等, 2012)、约马克其具蛇绿岩特征的镁铁-超镁铁质岩石时代为 500.7±1.9Ma(李向民等, 2009)。但最近,马中平等(2009)在这条镁铁-超镁铁质岩带中的长沙沟-清水泉一带识别出一套非蛇绿岩组成单元的镁铁-超镁铁质层状侵入岩,其形成时代为 467.4±1.4Ma,并结合地球化学特征认为其形成于南阿尔金后碰撞伸展背景(马中平等, 2009, 2010)。因此,分布于阿尔金南缘断裂带附近的镁铁-超镁铁质岩体可分为两类:一类形成时代≥500Ma,具有蛇绿岩性质;另一类形成时代约为 465Ma,不具有蛇绿岩性质。

3 岩相学特征

迪木那里克花岗岩的岩石类型为钾长花岗岩。主要矿物有碱性长石(40%~45%),斜长石(10%~15%)和石英(40%),次要矿物有黑云母(5%),副矿物有榍石,帘石(图 2)。碱性长石较大,粒径 2~5mm 不等,分为条纹长石和微斜长石,条纹长石具有细脉状的条纹结构,客晶纳长石脉状条纹延长方向基本一致,具有一致的消光位(图 2a);微斜长石具有特有的格子双晶(图 2b)。斜长石大小不一,粒径 0.2~5mm,斜长石普遍发生了蚀变,主要蚀变为细粒的高岭石,还保留了斜长石的晶形,个别未蚀变的斜长石颗粒具有特征的钠长石双晶。黑云母一组极完全解理特征明显,近平行消光,多数黑云母已蚀变为绿泥石,绿泥石仍然保持了黑云母的晶形轮廓(图 2b)。

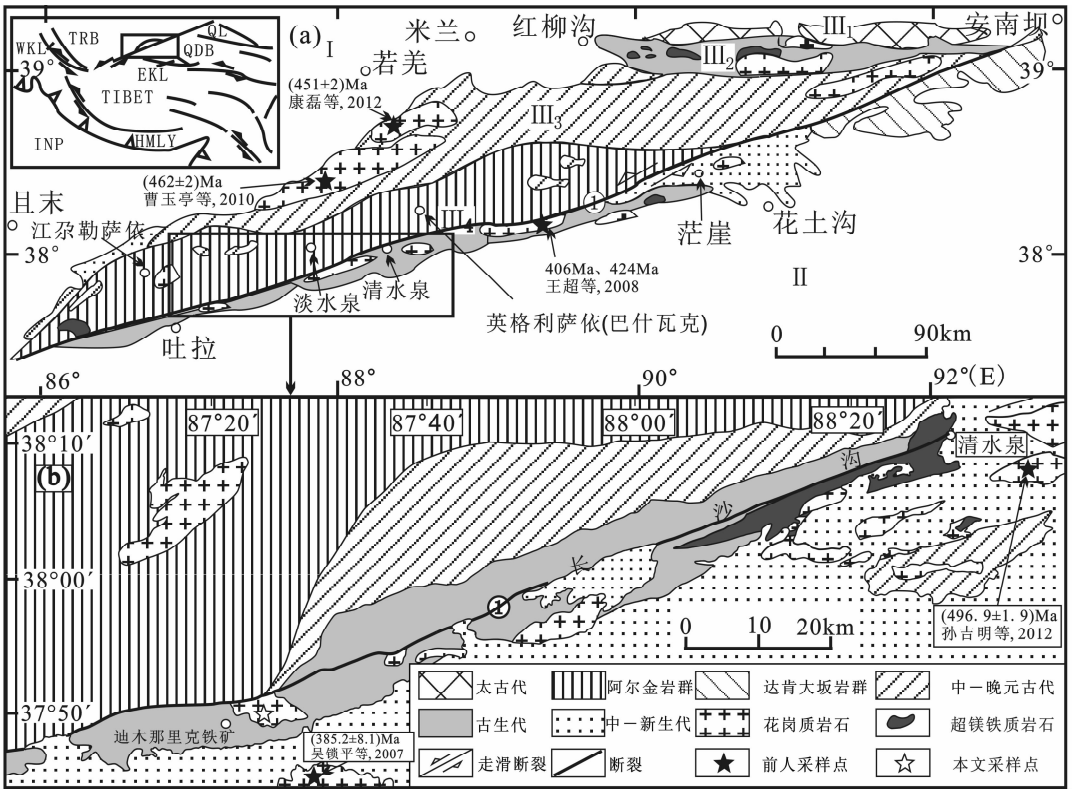


图 1　阿尔金构造地质简图(a，据 Liu *et al.* ，2012 修改)和南阿尔金迪木那里克地质图(b，据广西壮族自治区地质调查研究院，2003a①，b②修改)

Ⅰ-塔里木盆地；Ⅱ-柴达木盆地；$Ⅲ_1$-阿北地块；$Ⅲ_2$-红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带；$Ⅲ_3$-米兰河-金雁山地块；$Ⅲ_4$-南阿尔金俯冲碰撞杂岩带；1-阿尔金南缘断裂带

Fig. 1　Geological sketch map of Altyn Tagh (a, modified after Liu *et al.* , 2012) and geological sketch map of Dimunalike in South Altyn Tagh (b)

Ⅰ-Tarim Basin; Ⅱ-Qaidam Basin; $Ⅲ_1$-the north Altyn Archean complex; $Ⅲ_2$-the north Altyn oceanic-type subduction complex; $Ⅲ_3$-the Milanhe-Jinyanshan block; $Ⅲ_4$-the south Altyn continental-type subduction-collision complex; 1-the southern marginal fault zone of Altyn

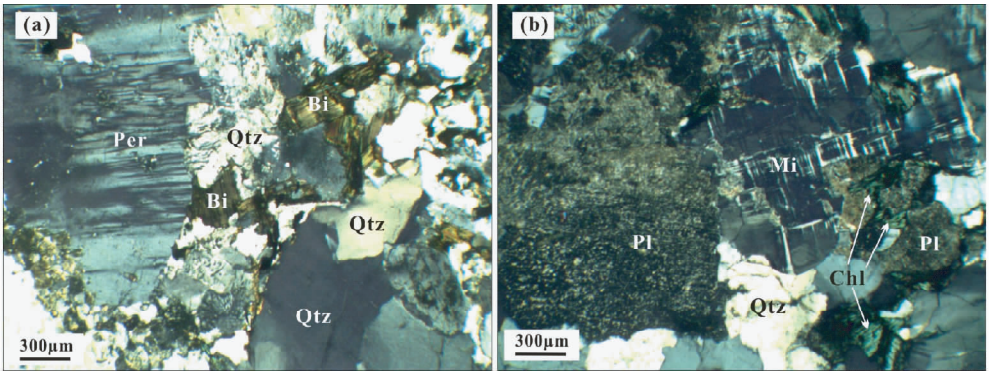


图 2　迪木那里克花岗岩显微岩石学照片

Per-条纹长石；Mi-微斜长石；Bi-黑云母；Qtz-石英；Chl-绿泥石

Fig. 2　Microstructures of moyite

Per-perthite; Mi-microcline; Bi-biotite; Qtz-quartz; Chl-chlorite

① 广西壮族自治区地质调查研究院. 2003a. 瓦石峡幅(J45C002003) 1∶25 万区域地质图

② 广西壮族自治区地质调查研究院. 2003b. 阿尔金山幅(J45C003003) 1∶25 万区域地质图

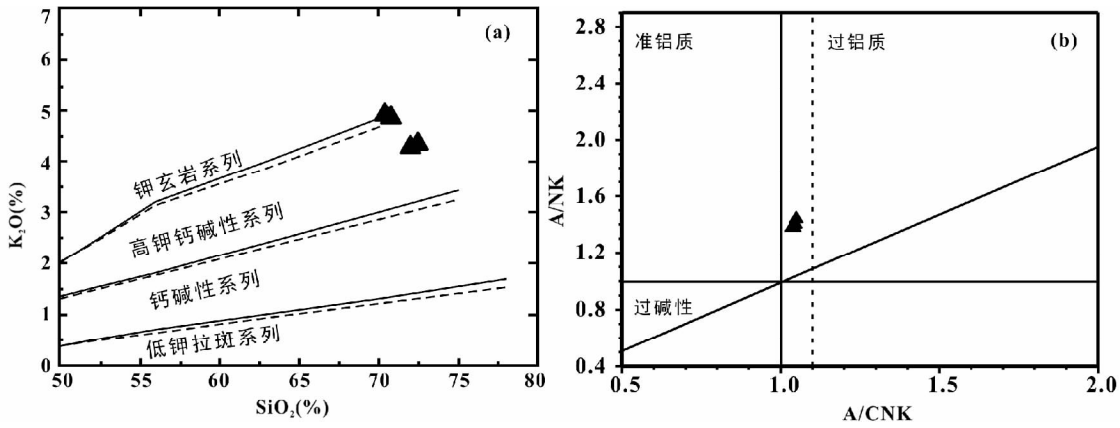


图 3 迪木那里克花岗岩的 SiO_2-K_2O 图解(a,据 Rickwood, 1989)和 A/CNK-A/NK 图解(b,据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 3 SiO_2-K_2O diagram (a, after Rickwood, 1989) and A/CNK-A/NK diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) for moyite

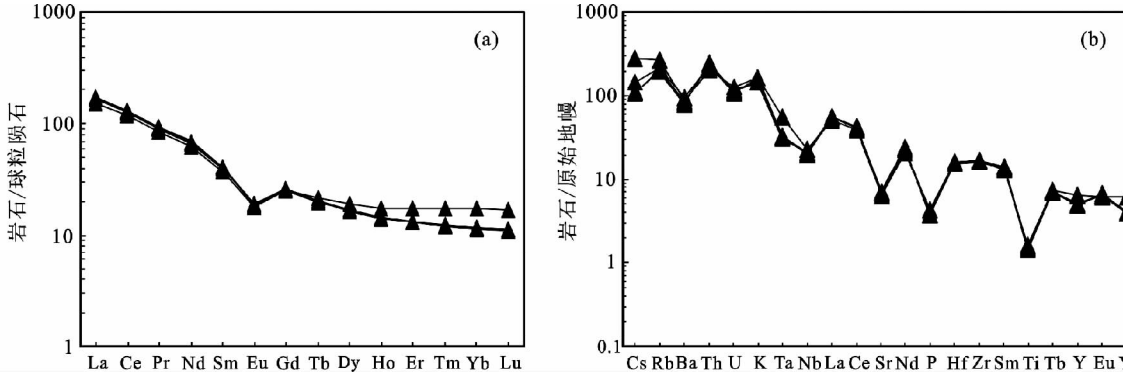


图 4 迪木那里克花岗岩稀土模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(球粒陨石值据 Boynton, 1984; 原始地幔值据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE-pattern (a) and primitive-mantle normalized spider diagram (b) for moyite (normalization values after Boynton, 1984; Sun and McDonough, 1989)

4 分析方法

除锆石由河北廊坊诚信地质服务有限公司挑选外,其它所有测试分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。全岩主量元素分析在日本理学 Rigaku RIX 2100 型 XRF 仪上测定;全岩微量和稀土元素测试在美国 Perkin Elmer 公司 Elan 6100 DRC 型电感耦合等离子质谱(ICP-MS)仪上完成,样品测试中以 AVG-1、BHVO-1 和 BCR-2 标样监控;锆石的 CL 图像分析在装有英国 Gatan 公司生产的 Mono CL3 + 阴极发光装置系统的电子显微扫描电镜上完成;锆石的微量元素分析和 U-Pb 年龄测定是在连接 Geolas 2005 紫外激光剥蚀系统(193nm 深紫外 ArF 激光器)的 Agilient 7500a 型 ICP-MS 上进行的,激光剥蚀斑束直径为 30μm,采样为单点剥蚀方式,以 He 作为剥蚀物质的载气,ICP-MS 数据采集选用跳峰方式,数据处理采用 Glitter (ver 4.0)程序,年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正样品的谐和图和加权平均年龄计算及绘制均采用用 Isoplot(ver 2.49)(Ludwig, 2003);锆石原位 Lu-Hf 同位素测定是在配备了 Geolas 2005 激光剥蚀系统的 Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上完成的,激光剥蚀的脉冲频率是 10Hz,激光束斑直径为 44μm,分析中利用锆石样品 91500 和 GJ-1 作外标,详细分析步骤和数据处理方法详见 Yuan *et al.* (2008)。

5 分析结果

5.1 地球化学特征

5.1.1 主量元素

南阿尔金迪木那里克花岗岩的 SiO_2 含量为 70.46% ~ 71.99%,$Na_2O + K_2O$ 含量为 7.34% ~ 8.05%,里特曼指数 δ = 1.86 ~ 2.36,K_2O/N_2O = 1.41 ~ 1.58(表 1),属于高钾钙碱

表 1 迪木那里克花岗岩的地球化学组成(主量元素:wt%;微量元素:$\times 10^{-6}$)

Table 1 Element compositions of moyite (Major element: wt%; Trace element: $\times 10^{-6}$)

样品号	11A-21-A	11A-21-B	11A-21-C	11A-21-D
SiO_2	71.92	71.99	70.74	70.46
TiO_2	0.32	0.33	0.30	0.34
Al_2O_3	13.97	14.03	14.63	14.56
$Fe_2O_3^T$	2.41	2.43	2.36	2.52
MnO	0.04	0.04	0.04	0.04
MgO	0.62	0.63	0.61	0.64
CaO	2.04	2.06	2.02	1.96
Na_2O	3.05	3.05	3.14	3.12
K_2O	4.29	4.31	4.90	4.93
P_2O_5	0.08	0.08	0.08	0.09
烧失量	0.79	0.79	0.70	0.86
总量	99.53	99.74	99.52	99.52
Li	10.37	10.38	10.25	8.65
Be	2.99	2.92	2.89	3.85
Sc	6.34	6.21	5.72	6.50
V	24.97	23.95	23.26	25.98
Cr	6.66	6.63	6.29	7.79
Co	122.6	117.6	109.9	159.2
Ni	4.45	3.98	3.95	5.54
Cu	1.99	1.90	1.93	2.59
Zn	33.89	32.40	31.59	33.83
Ga	17.63	17.13	17.14	18.04
Ge	1.41	1.36	1.32	1.44
Rb	132	130	143	178
Sr	151	147	142	133
Y	23.58	22.56	22.80	29.66
Zr	188	187	183	188
Nb	15.05	14.87	14.21	16.62
Cs	2.50	2.46	3.39	6.68
Ba	575	561	668	617
La	40.57	40.20	39.23	36.17
Ce	80.38	80.79	77.13	72.46
Pr	8.92	8.96	8.63	8.05
Nd	32.64	32.49	31.12	28.97
Sm	6.23	6.24	6.05	5.75
Eu	1.10	1.07	1.12	1.04
Gd	5.31	5.28	5.17	5.11
Tb	0.77	0.76	0.75	0.81
Dy	4.34	4.19	4.25	4.91
Ho	0.82	0.79	0.79	0.98
Er	2.22	2.17	2.20	2.90
Tm	0.32	0.31	0.31	0.44
Yb	2.01	1.93	1.97	2.98
Lu	0.29	0.28	0.29	0.44
Hf	5.05	4.94	4.78	4.97
Ta	1.35	1.33	1.35	2.33
Pb	24.60	23.06	25.02	22.78
Th	21.56	21.64	20.66	18.07
U	2.43	2.48	2.32	2.74
∑REE	185.9	185.4	179.0	171.0
δEu	0.58	0.57	0.61	0.59
Nb/Ta	24.24	24.51	23.07	12.41
A/CNK	1.04	1.04	1.03	1.04
$(La/Yb)_N$	13.59	14.07	13.40	8.18
$(Gd/Yb)_N$	2.13	2.21	2.11	1.38
σ	1.86	1.87	2.33	2.36
Al_2O_3/TiO_2	43.66	42.52	48.77	42.82
CaO/Na_2O	0.67	0.68	0.64	0.63
K_2O/Na_2O	1.41	1.41	1.56	1.58
Rb/Ba	0.23	0.23	0.21	0.29
Sr/Ba	0.26	0.26	0.21	0.22

注:$A/CNK = Al_2O_3/(CaO + K_2O + Na_2O)$;$A/NK = Al_2O_3/(K_2O + Na_2O)$;$\delta = (K_2O + Na_2O)^2/(SiO_2 - 43)$;$\delta Eu = Eu_N/(Sm_N + Gd_N)^{1/2}$,$\delta Ce = Ce_N/(La_N + Pr_N)^{1/2}$;球粒陨石值据 Boynton, 1984;原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989

性系列岩石(图 3a)。MgO 含量低(0.61% ~ 0.64%),FeO^T = 2.12% ~ 2.27%,CaO = 1.96% ~ 2.06%,TiO_2 = 0.30% ~ 0.34%。Al_2O_3 = 13.97% ~ 14.63%,A/CNK = 1.03 ~ 1.04,为弱过铝质花岗岩(图 3b),Al_2O_3/TiO_2 = 42.52 ~ 48.77,均小于 100,CaO/Na_2O = 0.63 ~ 0.68,均大于 0.3。

5.1.2 稀土和微量元素

稀土元素总量介于 171.0×10^{-6} ~ 185.9×10^{-6}。$(La/Yb)_N$ = 8.18 ~ 14.07,LREE/HREE = 8.21 ~ 10.82,轻重稀土元素分馏明显。在稀土元素球粒陨石标准化配分图上(图 4a),各样品均为轻稀土相对富集的右倾特征,具有负铕异常(δEu = 0.57 ~ 0.61)。

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4b)显示富集大离子亲石元素 Rb、Th、K、La、Zr 等,亏损 Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti。Rb/Ba 比值小于 0.3,Sr、P 和 Ti 亏损可能分别指示斜长石、磷灰石和钛铁矿的分离结晶。

5.2 锆石 U-Pb 年龄和稀土特征

锆石形态主要为半自形长柱状,长宽比多为 2∶1(图 5)。锆石 CL 图像显示多数环带特征不明显,一些具有弱的环带特征(如图 5-2、6、9、10、11、12),可能主要是因为锆石的 U、Th、REE 含量比较高造成的(表 2),一般锆石的这些元素含量越高,锆石阴极发光的强度越弱(Hanchar and Miller, 1993; Hanchar and Rudnick, 1995; Corfu *et al.*, 2003; Rubatto and Gebauer, 2000; 吴元保和郑永飞, 2004)。对挑选出的锆石共进行了 15 次分析,其中 3 个测点的信号较差且明显偏离谐和一致曲线,可能与其 ^{204}Pb 含量过高有关(Andersen, 2002),剔除后剩余 12 个锆石点测试结果见图 5、图 6a 和表 2、表 3,测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 452.8 ± 3.1Ma。

从表 3 可以看出,锆石测点稀土元素总量较高,∑REE = 1961×10^{-6} ~ 4743×10^{-6},Th 和 U 的含量比较高,Th 的含量介于 519×10^{-6} ~ 2102×10^{-6},U 的含量介于 959×10^{-6} ~ 3019×10^{-6},从锆石的稀土元素配分图(图 6b)看出 HREE 明显富集,具有 Ce 正异常和 Eu 负异常,δCe = 1.4 ~ 5.4,δEu = 0.12 ~ 0.37。Th/U 比值介于 0.28 ~ 0.75 之间,平均值为 0.48,这些特征与典型的岩浆锆石的特征是一致的(Corfu *et al.*, 2003)。一般认为 Ce 的正异常是由于 Ce^{3+} 被氧化成 Ce^{4+} 后,离子半径与 Zr 接近,比其它轻稀土元素更容易进入到锆石晶格中。Eu 的负异常一般认为同时期有长石结晶,Eu 更易于进入到长石晶格中造成的(Hoskin and Schaltegger, 2003)。

5.3 锆石 Hf 同位素

在已准确测定锆石 U-Pb 同位素年龄的点位或其旁用较大斑束(44μm)剥蚀进行锆石 Hf 同位素测定,得到 10 个分析数据(表 4)。其中,$^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值均小于 0.002,表明锆石形成后放射性成因 Hf 积累很少,因此,$^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值基

表 2 迪木那里克花岗岩的锆石 LA-ICP-MS 定年分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb age of zircons in moyite

序号	Pb*	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄值(Ma)					
					$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
1	230.22	519.47	1383.87	0.38	0.0569	0.0007	0.5704	0.0106	0.0726	0.0004	487.1	32.4	458.3	6.8	452.1	2.4
2	257.44	493.52	1733.10	0.28	0.0567	0.0012	0.5617	0.0138	0.0718	0.0006	479.7	46.3	452.6	8.9	446.8	3.4
3	360.68	842.98	1806.35	0.47	0.0583	0.0010	0.5863	0.0109	0.0732	0.0009	542.6	35.2	468.5	7.0	455.3	5.4
4	590.48	1470.61	2859.49	0.51	0.0646	0.0006	0.6560	0.0104	0.0735	0.0007	761.1	24.2	512.1	6.4	457.4	4.5
5	533.90	1143.36	3019.48	0.38	0.0609	0.0007	0.6164	0.0082	0.0734	0.0004	635.2	24.1	487.6	5.2	456.3	2.7
6	389.05	1005.16	1878.58	0.54	0.0570	0.0008	0.5730	0.0091	0.0732	0.0008	494.5	31.5	459.9	5.9	455.2	5.1
7	349.11	917.51	1599.04	0.57	0.0605	0.0007	0.6108	0.0085	0.0733	0.0004	620.4	24.8	484.1	5.3	455.7	2.5
8	245.65	624.98	1421.16	0.44	0.0547	0.0011	0.5382	0.0127	0.0713	0.0008	398.2	50.9	437.2	8.4	444.1	4.5
9	649.37	2102.20	2821.50	0.75	0.0572	0.0007	0.5773	0.0082	0.0732	0.0006	501.9	27.8	462.7	5.3	455.5	3.8
10	647.56	1510.36	3150.73	0.48	0.0642	0.0015	0.6509	0.0179	0.0733	0.0005	750.0	49.2	509.0	11.0	455.7	3.3
11	357.35	848.08	2185.29	0.39	0.0574	0.0008	0.5781	0.0107	0.0731	0.0007	505.6	63.9	463.2	6.9	454.6	4.3
12	207.59	600.76	959.09	0.63	0.0532	0.0016	0.5259	0.0178	0.0717	0.0009	344.5	100.9	429.1	11.8	446.3	5.4

注:Pb* 放射性成因铅

表 3 迪木那里克花岗岩的锆石稀土元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 LA-ICP-MS trace element compositions of zircons in moyite ($\times 10^{-6}$)

序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	LREE	HREE
1	21.10	93.78	11.52	70.56	33.51	2.08	89.48	25.95	308.25	108.96	508.14	101.82	1049.76	181.04	232.54	2373.41
2	4.91	45.50	2.63	15.78	12.36	1.80	54.27	17.93	229.51	83.92	403.81	82.31	859.91	146.04	82.97	1877.71
3	2.62	50.21	2.22	20.58	30.24	5.49	143.55	46.59	555.84	192.19	854.90	169.34	1726.76	278.98	111.36	3968.16
4	23.77	139.06	9.51	61.98	51.31	5.69	195.41	59.11	684.23	227.76	992.49	187.50	1809.92	295.15	291.32	4451.58
5	6.28	89.02	6.25	46.11	32.69	5.19	120.80	38.32	473.88	171.81	824.84	169.07	1787.13	303.82	185.56	3889.66
6	12.13	77.28	5.78	41.68	39.03	5.71	176.39	56.03	654.32	223.53	989.23	191.86	1880.55	312.62	181.60	4484.53
7	21.00	98.09	8.90	53.25	39.25	5.41	171.11	53.79	629.15	215.66	937.78	178.08	1743.14	283.89	225.90	4212.59
8	33.98	119.22	13.02	68.54	36.24	2.89	125.16	36.88	455.89	161.70	714.32	139.15	1360.09	228.87	273.90	3222.06
9	37.57	195.69	12.15	67.23	41.11	5.52	160.08	50.68	594.07	205.69	911.41	179.55	1798.80	295.41	359.27	4195.69
10	4.20	79.77	2.98	18.69	20.33	2.91	96.79	33.36	417.50	153.18	713.93	144.45	1478.93	251.94	128.87	3290.08
11	3.04	55.33	2.45	20.06	17.24	4.85	95.51	34.20	438.97	166.33	794.33	164.13	1756.39	299.29	102.96	3749.15
12	4.79	55.84	2.28	19.12	25.34	3.01	125.94	40.20	484.29	172.27	760.97	142.56	1398.95	230.82	110.38	3356.01

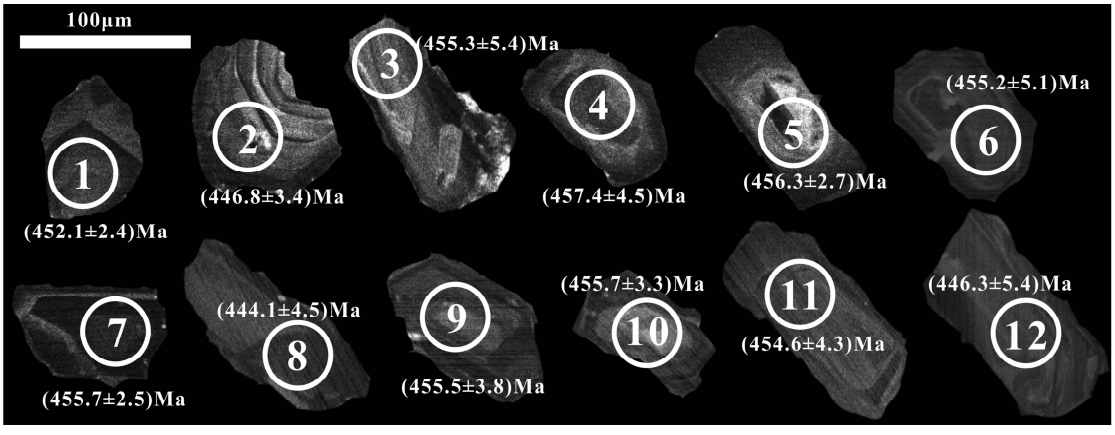


图 5 迪木那里克花岗岩锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄

Fig. 5 CL images and U-Pb ages of zircons in moyite

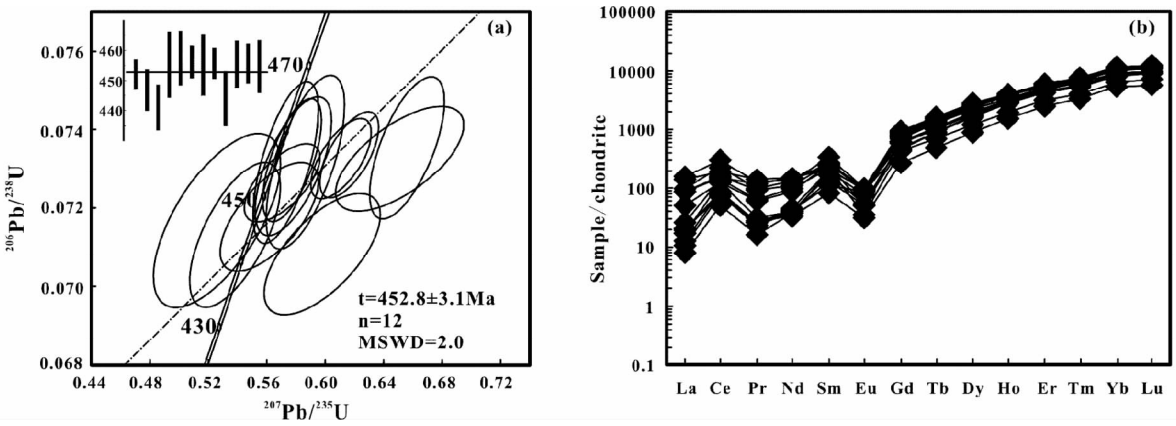


图 6　迪木那里克花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和稀土元素配分图(b)

Fig. 6　Concordia diagram showing results of LA-ICP-MS U-Pb dating (a) and chondrite-normalized REE pattern (b) of zircons in moyite

表 4　迪木那里克花岗岩中锆石的 Hf 同位素组成

Table 4　Hf isotope compositions of zircon in moyite

序号	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	2s	t_{DM}^{Hf}(Ma)	t_{DM}^{C}(Ma)
2	0.023751	0.000907	0.282442	-2.26	0.28	1154	1355
3	0.044321	0.001609	0.282516	0.26	0.38	1079	1240
4	0.036969	0.001364	0.282488	0.29	0.31	1111	1274
5	0.057604	0.002131	0.282474	-1.20	0.46	1164	1329
6	0.056616	0.002064	0.282488	-1.19	0.30	1139	1307
7	0.033871	0.001269	0.282477	-0.61	0.35	1121	1296
9	0.041317	0.001523	0.282531	0.20	0.32	1053	1217
10	0.02842	0.00107	0.28249	-0.45	0.32	1093	1271
11	0.027344	0.001033	0.282376	-3.52	0.28	1254	1465
12	0.031267	0.001189	0.282531	0.95	0.49	1040	1200

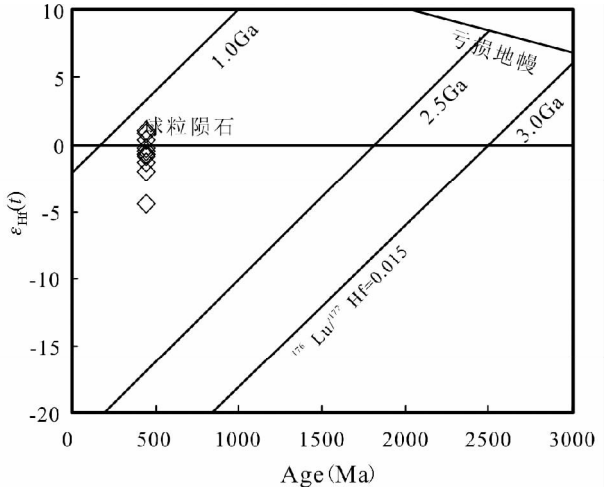


图 7　锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$-t 图解

Fig. 7　$\varepsilon_{Hf}(t)$-t diagram for zircon in moyite

本上可以代表锆石结晶时体系的 Hf 同位素组成(第五春荣等, 2008)。对于花岗岩,锆石的两阶段 Hf 模式年龄(t_{DM}^{C})不代表花岗岩和其源岩形成时代,仅代表着形成花岗岩的源岩地壳物质从亏损地幔库脱离的年龄,为重要的地壳增生期(吴福元等, 2007a)。计算 t_{DM}^{C} 采用上地壳平均值为 0.008(Taylor and McLennan, 1981),计算 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 和 t_{DM}^{C} 采用各点对应的 U-Pb 年龄。分析结果见表 4 和图 7,其 $^{176}Hf/^{177}Hf$ = 0.282376 ~ 0.282531,$\varepsilon_{Hf}(t)$ 介于 -3.52 ~ 0.95,平均值为 -0.75,暗示该花岗岩的源岩来源于陆壳物质,t_{DM}^{C} = 1200 ~ 1465Ma,表明该花岗岩源岩的组成物质从地幔储库中脱离的时间为中元古代。

6　讨论

6.1　源岩特征

迪木那里克花岗岩的主量元素 SiO_2 = 70.46% ~ 71.99%、Al_2O_3/TiO_2 = 43 ~ 49、CaO/Na_2O = 0.6 ~ 0.7、K_2O/N_2O = 1.4 ~ 1.6,与由地壳沉积岩部分熔融形成的 S 型花岗岩的地球化学特征(SiO_2 < 74%、Al_2O_3/TiO_2 < 100、CaO/Na_2O > 0.3、K_2O/N_2O > 1)完全吻合(路凤香和桑隆康, 2002),暗示其源岩为地壳沉积岩;微量元素原始地幔标准化蛛网图显示富集大离子亲石元素 Rb、Th、K、La、Zr 等,亏损 Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti, Th/U 比值为 7 ~ 9,高于地壳平均值(2.8, Taylor and McLennan, 1981),Zr/Hf 比值为 37 ~ 38,与

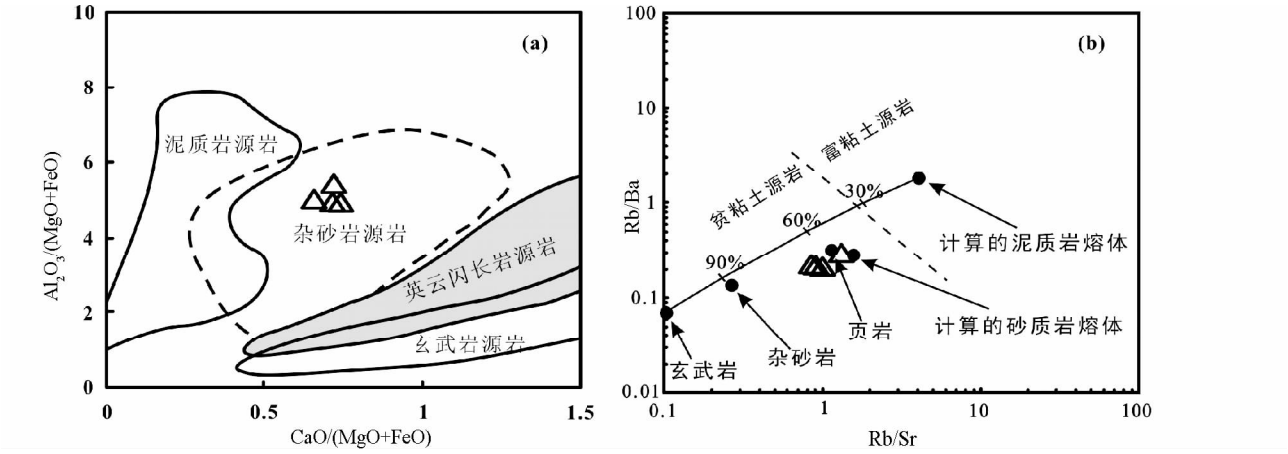


图 8 钾长花岗岩的 C/MF-A/MF 图解(a)和 Rb/Sr-Rb/Ba 图解(b)(据 Gerdes *et al.*, 2000)

Fig. 8 C/MF-A/MF diagram (a) and Rb/Sr-Rb/Ba diagram (b) of moyite (after Gerdes *et al.*, 2000)

表 5 迪木那里克花岗岩的锆石饱和温度计和锆石 Ti 温度计计算结果

Table 5 Values for moyite by zircon saturation thermometer and Ti-in-zircon thermometer

样品号/序号	锆石饱和温度计			锆石 Ti 温度计	
主微量样品号	M ($\times10^{-6}$)	D_{Zr}	T_{Zr} (℃)	Ti ($\times10^{-6}$)	T_{Ti} (℃)
11A-21-A	1.39	2638.00	801		
11A-21-B	1.40	2655.91	800		
11A-21-C	1.44	2706.85	795		
11A-21-D	1.44	2642.64	797		
锆石序号					
1				17.37	801
2				16.25	794
3				21.33	822
4				34.83	878
5				31.41	866
6				23.85	835
7				51.58	927
8				20.31	817
9				19.15	811
10				16.36	794
11				33.86	875
12				17.08	799

注:T_{Zr}(℃) = 12900/[$\ln D_{Zr}$ + 0.85M + 2.95] − 273.15, D_{Zr} 近似为 496000/全岩锆含量,M = (2Ca + K + Na)/(Si × Al) 令 Si + Al + Fe + Mg + Ca + Na + K + P = 1, 均为原子数分数(Watson and Harrison, 1983). T_{Ti}(℃) = 5080/(5.711 − lg(Ti)) − 273.15 (Ferry and Watson, 2007)

上地壳的 Zr/Hf 比值(~37)相当(Gao *et al.*, 1998),亦显示其源岩具有地壳沉积物的特征。

对于源岩由地壳沉积岩熔融形成的花岗岩, Sylvester (1998)研究表明 CaO/Na_2O 比值能够示踪源区成分,来自于富粘土而贫斜长石的泥质岩源岩熔体的 CaO/Na_2O 较低(<0.3),而来自于富斜长石而贫粘土的沙屑质源岩熔体的 CaO/Na_2O 比值较高(>0.3)。迪木那里克花岗岩具有较高的 CaO/Na_2O(大于 0.6),暗示其源岩可能为陆壳沉积的砂质岩。Harris and Inger (1992)的研究显示,由泥质类源岩水饱和熔融产生的铝长英质岩浆具有高 Sr/Ba(0.5~1.6)及附加正 Eu 异常,而该样品的 Sr/Ba 比值(0.21~0.26)很低,具有负 Eu 异常,与泥质类源岩的特征不符。在 CaO/(MgO + FeO)-Al_2O_3/(MgO + FeO)图解(图 8a)和 Rb/Sr-Rb/Ba 图解中(图 8b),样品均落于杂砂岩的部分熔融范围。因此,迪木那里克花岗岩的源岩为地壳杂砂岩沉积物。

6.2 熔融条件

温度和压力是岩浆熔融的主要条件,但是岩浆形成时的温压条件较难获取,目前对花岗岩岩浆起源时温压的认识主要基于实验岩石学的资料,但是实验岩石学资料有限,而花岗岩千差万别,因此不得不借助其它方面的手段来获取相关信息。对于温度,一般认为花岗岩大多是绝热上升就位的,在此过程中温度变化慢而压力变化较快,所以岩浆早期结晶时的温度可以近似代表岩浆起源时的温度(吴福元等, 2007b);对于压力,岩浆结晶时的压力已有较好的方法可以获得(Anderson, 1996),但对源岩发生部分熔融时的压力仍然所知甚少,目前一般根据源区残留相矿物估算源区的压力条件,如果源区残留石榴石,则岩浆起源的压力较高(>10kbar),而如果源区残留斜长石,一般认为岩浆起源的压力较低。

目前常应用于花岗岩的地质温度计有锆石饱和温度计和锆石钛温度计(Watson and Harrison, 1983; Watson *et al.*, 2006; Ferry and Watson, 2007)。本次选用这两个温度计对比分析,计算公式分别采用 Watson and Harrison (1983)和 Ferry and Watson (2007)的模拟公式。利用锆石饱和温度计和锆石钛温度计所得的平均温度分别为 798℃ 和 835℃,计算结果见表 5。从表 5 中可以看出,利用锆石 Ti 温度计所得

结果精确度较差，温度变化范围大（794～927℃），可能主要有两个原因：1）不能保证挑选出的锆石都与金红石共生；2）锆石中 Ti 含量（16.25×10^{-6}～51.58×10^{-6}）测试不够准确。因此，我们选用锆石饱和温度计约 800℃ 的计算值。而在花岗质岩浆体系中锆石是较早结晶的副矿物，一般认为锆石中 Zr 的分配系数对温度极度敏感，其它因素对其没有明显影响（Calvin *et al.*，2003；秦江锋等，2005），因此利用锆石饱和温度计计算的结果约 800℃ 可近似代表花岗岩近液相线的温度，也近似代表岩浆起源时温度的最小值。

关于该花岗岩起源时的压力条件，这里只大致根据该花岗岩的地球化学特征推测残留相，再结合实验岩石学资料，估计该花岗岩岩浆起源时的压力条件。Castillo（2006）总结一些岩石地球化学特征与残留矿物相之间的关系：高 Sr（$>300\times10^{-6}$）和无负 Eu 异常表明源区残留相中基本无斜长石；低 Y（$<15\times10^{-6}$）、高 Sr/Y（>20）、低 Yb（$<1.9\times10^{-6}$）和高 La/Yb（>20）均是源区残留相中有石榴石的特征表现。该岩石具有低 Sr（133×10^{-6}～151×10^{-6}）和负 Eu 异常，表明源区残留相中具有斜长石，高 Y（23×10^{-6}～30×10^{-6}）、低 Sr/Y（4.5～6.5）、较高 Yb（1.9×10^{-6}～2.3×10^{-6}）和低 La/Yb（12～21）都说明了源区无石榴子石残留，轻微 HREE 亏损可能是残留相中含有角闪石（Xiong *et al.*，2005）。因此，熔融残留相矿物组合为角闪石＋斜长石（不含石榴石），由此推断该岩石的形成压力较低（Defant and Drummond，1990）；Rapp *et al.*（1991）分别在 0.8GPa、1.6GPa、2.2GPa 和 3.2GPa 压力下玄武岩脱水熔融试验表明，在 0.8GPa 时，残留相中石榴石尚不出现，在 1.6GPa 时，残留相中出现石榴子石，表明源区压力应至少小于 1.6GPa。对于杂砂岩源岩，主要由黑云母脱水部分熔融形成熔体，黑云母脱水熔融实验表明，875℃、1.0GPa 条件下，熔体体积可达到 33%（Patiño Douce and Johnston，1991）。结合这些实验岩石学资料，估计形成该花岗岩源区的压力可能约为 1.0GPa。

6.3 构造背景

已有研究表明南阿尔金地区高压-超高压岩石的峰期变质时代为 486～504Ma（Liu *et al.*，2009，2010 及其参考文献），超高压岩石的退变质时代为 455Ma（Liu *et al.*，2012），揭示陆壳深俯冲板片发生断离的时间介于 486～455Ma 之间。而在深俯冲陆壳折返的过程中，易产生与折返相关的同折返岩浆作用（郑永飞，2004）。世界各地由深俯冲板片断离（breakoff）诱导的同折返岩浆活动一般具有以下特征（Davies and von Blanckenbury，1995；Sun *et al.*，2002；李曙光等，1996；高天山等，2004）：1）岩浆作用发生在地缝合线附近或造山带中；2）岩浆作用晚于峰期超高压变质时间，与高压-超高压岩石的早期折返同时；3）产生双峰式岩浆，即镁铁质岩＋花岗岩，前者由岩石圈地幔熔融形成，后者由前者侵入引起的地壳熔融形成。迪木那里克花岗岩侵位于南阿尔金蛇绿构造混杂岩带中的浅海相沉积地层，其形成时代晚于区内高压-超高压峰期变质时代（约 500Ma），而与超高压岩石的退变质时代（455Ma）基本一致；其次，沿阿尔金南缘断裂带位于迪木那里克以东的长沙沟-清水泉地区出露镁铁质-超镁铁质岩体（图 1），马中平等（2009）根据该岩体富集 LREE 和强不相容元素、高的 Zr/Y 比值、特征矿物（如云母类矿物）、特征矿化（钛-磁铁矿工业矿体、镍-硫化物矿化）及与围岩间呈侵入接触关系等，认为其不是蛇绿岩的组成部分，而是大陆裂谷环境形成的侵入体，并确定其形成时代为 467.4±1.4Ma，迪木那里克花岗岩与长沙沟-清水泉镁铁质-超镁铁质岩体在空间上密切伴生（图 1），二者可能共同构成双峰式岩浆岩。因此，迪木那里克花岗岩具有同折返岩浆作用的性质，其形成可能是南阿尔金深俯冲陆壳板片发生断离后，深部地幔物质上涌导致地壳杂砂岩熔融的产物。

6.4 早古生代花岗质岩浆活动期次及其与构造演化的关系初探

结合近年来南阿尔金俯冲碰撞杂岩带中报道的花岗岩的研究成果，可初步将南阿尔金古生代花岗质岩浆活动分为 3 期：1）约 500Ma；2）466～451Ma；3）424～385Ma。

第一期花岗质岩浆活动时代约为 500Ma，形成于陆-陆碰撞造山作用阶段地壳加厚背景。目前，这期花岗岩仅在阿尔金南缘断裂带鱼目泉有一例报道，孙吉明等（2012）对鱼目泉花岗岩研究后认为该花岗岩体含有大量暗色闪长质包体，是基性岩浆和酸性岩浆发生不均匀混合作用产生的，该花岗岩的形成时代（497Ma）与南阿尔金超高压变质时代（504～487Ma）一致，结合其高 Sr（平均 446×10^{-6}），低 Y（14.0×10^{-6}）、Yb（1.5×10^{-6}）的特征，表明这期花岗岩与陆壳的深俯冲有关，在约 500Ma 时南阿尔金造山带总体上处于地壳相互叠覆增厚的陆-陆碰撞造山作用阶段。

第二期花岗质岩浆活动时代为 466～451Ma，形成于深俯冲陆壳发生断离后的伸展背景。这期花岗岩区内分布最为广泛，在阿尔金南缘断裂带和南阿尔金碰撞杂岩带北部均有分布。本文研究的迪木那里克花岗岩和约马克其花岗岩（马中平等，2011）沿阿尔金南缘断裂带分布，形成年龄分别为 453Ma 和 466Ma；塔特勒克布拉克复式花岗岩体出露于南阿尔金俯冲碰撞杂岩带北部，形成年龄分别为 462Ma、451Ma（曹玉亭等，2010；康磊等，2012），它们的形成时代与南阿尔金超高压岩石退变质作用的时代基本一致，均显示是沉积杂砂岩部分熔融的产物，表明该阶段已发生深俯冲陆壳板片的断离，区内已由挤压背景转换为伸展背景，断离导致地幔物质上涌，对其上覆陆壳加热，引起地壳物质熔融形成这一期花岗岩。

第三期花岗质岩浆活动时代为 424～385Ma，形成于造山期后的伸展背景。这期花岗岩仅局限分布在阿尔金南缘断裂带的玉苏普阿勒克塔格地区以及阿尔金南缘断裂带以南的吐拉牧场东岩体。王超等（2008）通过对玉苏普阿勒克

塔格具环斑结构花岗岩及其暗色包体进行岩石学和地球化学研究,认为该花岗岩为 A 型花岗岩,是早古生代末期幔源岩浆发生底侵作用,引起幔源岩浆与下地壳不断相互作用的结果。吴锁平等(2007)确认吐拉牧场东花岗岩体为偏铝质 A 型花岗岩,认为其形成于造山后的伸展环境,可能与阿尔金断裂左行走滑作用有关。这些研究均表明,在早古生代末期,南阿尔金地区已进入造山后阶段,经历了地壳连续伸展减薄的过程。

7 结论

(1)南阿尔金迪木那里克花岗岩为弱过铝质高钾钙碱性系列,具有 S 型花岗岩的特征,其源岩为沉积杂砂岩,岩浆起源温压条件约为 >800℃ 和 ~10kbar。

(2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年确定迪木那里克花岗岩的形成年龄为 452.8 ± 3.1Ma,其锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 介于 -3.52 ~ 0.95,暗示该花岗岩的源岩来源于陆壳物质;两阶段模式年龄 t_{DM}^{C} = 1200 ~ 1465Ma 代表花岗岩源岩的组成物质从地幔储库中脱离的时间为中元古代。

(3)迪木那里克花岗岩可能与长沙沟-清水泉一带镁铁质-超镁铁质杂岩体构成双峰式火山岩,具有同折返岩浆作用的特征,其成因可能是阿尔金深俯冲陆壳板片发生断离后,区域构造背景由挤压已转为拉张,地幔物质上涌引起地壳杂砂岩物质熔融形成。

(4)南阿尔金俯冲碰撞杂岩带中早古生代花岗质岩浆活动可初步分为三期:第一期形成时代约为 500Ma,形成于陆壳深俯冲引起的陆-陆碰撞造山、地壳加厚阶段,与超高压变质作用同时期;第二期形成时代为 466 ~ 451Ma,形成于深俯冲陆壳断离后的伸展背景,与超高压岩石退变质作用基本同时期;第三期时代为 426 ~ 385Ma,形成于造山期后的伸展背景。

致谢 野外工作和实验工作得到梁莎、廖小莹、王亚伟同学的帮助;成文过程中得到张成立教授和第五春荣博士的建议;在此一并表示衷心的感谢!

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chemical Geology, 192(1 - 2): 59 - 79

Anderson JL. 1996. Status of thermobarometry in granitic batholiths. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 87(1 - 2): 125 - 138

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos, 46(3): 605 - 626

Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. New York: Elsevier Science Publishing Company, 63 - 114

Calvin FM, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31(6): 529 - 532

Castillo PR. 2006. An overview of adakite petrogenesis. Chinese Science Bulletin, 51(3): 257 - 268

Cao YT, Liu L, Wang C, Yang WQ and Zhu XH. 2010. Geochemical, zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions studies for Tatelekebulake granite in South Altyn Tagh. Acta Petrologica Sinica, 26(11): 3259 - 3271 (in Chinese with English abstract)

Che ZC, Liu L and Luo JH. 2002. Regional Tectonics of China and Its Adjacent Areas. Beijing: Science Press, 354 - 386 (in Chinese)

Corfu F, Hanchar JM, Hoskin PWO and Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 469 - 500

Davies JH and von Blanckenburg F. 1995. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. Earth and Planetary Science Letters, 129(1 - 4): 85 - 102

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347(6294): 662 - 665

Diwu CR, Sun Y, Yuan HL, Wang HL, Zhong XP and Liu XM. 2008. Geochronology and Hf isotopes of detrital zircons from Songshan quartzite of Dengfeng in Henan Province and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 53(16): 1923 - 1934 (in Chinese)

Dong XY, Li X and Ye LH. 1995. China Ultramafic Rocks. Beijing: Geological Publishing House, 38 - 50 (in Chinese)

Ferry JM and Watson EB. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. Contributions to Mineralogy and Petrology, 154(4): 429 - 437

Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Zhao ZD and Hu YK. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. Geochimica et Cosmochimica Acta, 62(11): 1959 - 1975

Gao TS, Chen JF, Xie Z, Yan J and Qian H. 2004. Geochemistry of Triassic igneous complex at Shidao in the Sulu UHP metamorphic belt. Acta Petrologica Sinica, 20(5): 1025 - 1038 (in Chinese with English abstract)

Gerdes A, Worner G and Henk A. 2000. Post-collisional granite generation and HT-LP metamorphism by radiogenic heating: The Variscan South Bohemian Batholith. Journal of the Geological Society, 157(3): 577 - 587

Hanchar JM and Miller CF. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories. Chemical Geology, 110(1 - 3): 1 - 13

Hanchar JM and Rudnick RL. 1995. Revealing hidden structures: The application of cathodoluminescence and back-scattered electron imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths. Lithos, 36(3 - 4): 289 - 303

Harris NBW and Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites. Contributions to Mineralogy and Petrology, 110(1): 46 - 56

Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 27 - 62

Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. Chemical Geology, 157(1 - 2): 119 - 146

Kang L, Liu L, Cao YT, Wang C, Yang WQ and Liang S. 2012. 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. Geological Bulletin of China, in press (in Chinese with English abstract)

Li SG, Sun WD, Zhang GW, Chen JY and Yang YC. 1996. Chronology

and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in the Mianlue tectonic arc, South Qinling: Observations for a Paleozoic oceanic basin and its close time. Science in China (Series D), 26(3): 223 – 230 (in Chinese)

Li XM, Ma ZP, Sun JM, Xu XY, Lei YX, Wang LS and Duan XX. 2009. Characteristics and age study about the Yuemakeqi mafic-ultramagic rock in the southern Altyn Fault. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 862 – 872 (in Chinese with English abstract)

Liu L, Che ZC, Luo JH, Wang Y and Gao ZJ. 1997. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 42(11): 931 – 934

Liu L, Che ZC, Wang Y, Luo JH, Wang JQ and Gao ZJ. 1998. The evidence of Sm-Nd isochron age for the Early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountains. Chinese Science Bulletin, 43(9): 754 – 756

Liu L, Che ZC, Wang Y, Luo JH and Chen DL. 1999. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains. Acta Petrologica Sinica, 15(1): 57 – 64 (in Chinese with English abstract)

Liu L, Sun Y, Xiao PX, Che ZC, Luo JH, Chen DL, Wang Y, Zhang AD, Chen L and Wang YH. 2002. Discovery of ultrahigh-pressure magnesite-bearing garnet lherzolite (>3.8GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China. Chinese Science Bulletin, 47(11): 881 – 886

Liu L, Sun Y, Luo JH, Chen DL, Wang Y and Zhang AD. 2004. Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altun Mountains, NW China. Science in China (Series D), 47(4): 338 – 346

Liu L, Chen DL, Zhang AD, Sun Y, Wang Y, Yang JX and Luo JH. 2005. Ultrahigh pressure (>7GPa) gneissic K-feldspar (-bearing) garnet clinopyroxenite in the Altyn Tagh, NW China: Evidence from clinopyroxene exsolution in garnet. Science in China (Series D), 48(7): 1000 – 1010

Liu L, Zhang JF, Green II HW, Jin ZM and Bozhilov KN. 2007. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments, implying subduction to >350km. Earth and Planetary Science Letters, 263(3 – 4): 180 – 191

Liu L, Wang C, Chen DL, Zhang AD and Liou JG. 2009. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the South Altyn Tagh, northwestern China. Journal of Asian Earth Sciences, 35(3 – 4): 232 – 244

Liu L, Yang JX, Chen DL, Wang C, Zhang CL, Yang WQ and Cao YT. 2010. Progress and controversy in the study of HP-UHP metamorphic terranes in the West and Middle Central China orogen. Journal of Earth Science, 21(5): 581 – 597

Liu L, Wang C, Cao YT, Chen DL, Kang L, Yang WQ and Zhu XH. 2012. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China. Lithos, 136 – 139: 10 – 26

Lu FX and Sang LK. 2002. Petrology. Beijing: Geological Publishing House, 82 – 94 (in Chinese)

Ludwig KR. 2003. Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1 – 70

Ma ZP, Li XM, Sun JM, Xu XY, Lei YX, Wang LS and Duan XX. 2009. Discovery of layered mafic-ultramafic intrusion in Changshagou, Altyn Tagh, and its geological implication: A pilot study on its petrological and geochemical characteristics. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 793 – 804 (in Chinese with English abstract)

Ma ZP, Sun JM, Tang Z, Li XM, Xu XY, Lei YX, Wang LS and Duan XX. 2010. Discussions on the magmatic Cu-Ni-PGE sulfides mineralization potential of the Changshagou-Qingshuiquan layered mafic-ultramafic intrusions, Altyn Tagh. Northwestern Geology, 43(4): 18 – 24 (in Chinese with English abstract)

Ma ZP, Li XM, Xu XY, Sun JM, Tang Z and Du T. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered maficulmafic intrusion southern Altun orogen, in northwestern China and its implication. Geology in China, 38(4): 1071 – 1078 (in Chinese with English abstract)

Miller C, Schuster R, Klötzli U, Frank W and Purtscheller. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. Journal of Petrology, 40(9): 1399 – 1424

Patiño Douce AE and Johnston AD. 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. Contributions to Mineralogy and Petrology, 107(2): 202 – 218

Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63 – 81

Pitcher WS. 1983. The nature and origin of granite. In: Pitcher WS (ed.). Granite type and Tectonic Environment. Mountain Building Processes. London: Academic Press, 19 – 40

Qin JF, Lai SC, Li YF, Bai L and Wang J. 2005. Zircon saturation temperatures of Yangba granodiorite and mafic microgranular enclaves in northern margin of Yangtze Block and its significance. Northwestern Geology, 38(3): 1 – 5 (in Chinese with English abstract)

Rapp RP, Watson EB and Miller CF. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalities. Precambrian Research, 51: 1 – 25

Rickwood PC. 1989. Boundary lines with in petrologic diagram which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22(4): 247 – 263

Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps. Cathodoluminescence in Geoscience. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 373 – 400

Sun JM, Ma ZP, Tang Z and Li XM. 2012. LA-ICP-MS zircon dating of the Yumuquan magma mixing granite in the southern Altyn Tagh and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 86(2): 247 – 257 (in Chinese with English abstract)

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345

Sun WD, Li SG, Chen YD and Li YJ. 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. Journal of Petrology, 110(4): 457 – 468

Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. Lithos, 45(1 – 4): 29 – 44

Taylor SR and Mclennan SM. 1981. The composition and evolution of the continental crust: Rare earth element evidence from sedimentary rocks. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 301(1461): 381 – 399

Wang C, Liu L, Zhang AD, Yang WQ and Cao YT. 2008. Geochemistry and petrography of Early Paleozoic Yusupuleke Tagh rapakivi-textured granite complex, South Altyn: An example for magma mixing. Acta Petrologica Sinica, 24(12): 2809 – 2819 (in Chinese with English abstract)

Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth and Planetary Science Letters, 64(2): 295 – 304

Watson EB, Wark DA and Thomas JB. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 151(4): 413 – 433

Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007a. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185 – 220 (in Chinese with English abstract)

Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007b. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217 – 1238 (in Chinese with English abstract)

Wu SP, Wu CL and Chen Q. 2007. Characteristics and tectonic setting of the Tula aluminous A-type granite at the south side of the Altyn Tagh

fault, NW China. Geological Bulletin of China, 26(10): 1385 – 1392 (in Chinese with English abstract)
Wu YB and Zheng YF. 2004. Study on genesis of zircon and its constrains on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589 – 1604 (in Chinese)
Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. Chemical Geology, 218(3 – 4): 339 – 359
Xu ZQ, Yang JS, Zhang JX, Jiang M, Li HB and Cui JW. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. Acta Geologica Sinica, 73(3): 193 – 205 (in Chinese with English abstract)
Yang WQ, Ding HB, Liu L, Xiao PX, Cao YT, Kang L, Liang S, Liao XY and Wang YW. 2012. Characteristics and formation age of ore-bearing strata of Dimunalike iron deposit in South Altyn Tagh. Geological Bulletin of China, in press (in Chinese with English abstract)
Yuan HL, Gao S, Dai MN, Zong CL, Günther D, Fontaine GH, Liu XM and Diwu CR. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. Chemical Geology, 247(1 – 2): 100 – 118
Zhang AD, Liu L, Chen DL, Wang Y and Luo JH. 2004. SHRIMP U-Pb zircon ages for the UHP metamorphosed granitoid gneiss in Altyn Tagh and their geological significance. Chinese Science Bulletin, 49(23): 2527 – 2532
Zhang JX, Zhang ZM, Xu ZQ, Yang JS and Cui JW. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. Lithos, 56(2 – 3): 187 – 206
Zhang JX, Zhang ZM, Xu ZQ, Meng FC, Li HB and Shi RD. 2002. Evidence for UHP metamorphism of eclogites from the Altun Mountains. Chinese Science Bulletin, 47(9): 751 – 755
Zhang JX, Mattinson CG, Meng FC and Wan YS. 2005. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China: *P-T* history and U-Pb geochronology. Journal of Metamorphic Geology, 23(7): 491 – 510
Zhang Q and Zhou GQ. 2001. Ophiolite of China. Beijing: Science Press, 1 – 182 (in Chinese)
Zheng YF. 2004. Fluid activity during exhumation of deep-subducted continental plate. Chinese Science Bulletin, 49(10): 985 – 998

附中文参考文献

曹玉亭, 刘良, 王超, 杨文强, 朱小辉. 2010. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成. 岩石学报, 26(11): 3259 – 3271
车自成, 刘良, 罗金海. 2002. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社, 354 – 386
第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 王洪亮, 钟兴平, 柳小明. 2008. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. 科学通报, 53(16): 1923 – 1934
董显扬, 李行, 叶良和. 1995. 中国超镁铁质岩. 北京: 地质出版社, 38 – 50
高天山, 陈江峰, 谢智, 闫峻, 钱卉. 2004. 苏鲁超高压变质带中三叠纪石岛杂岩体的地球化学研究. 岩石学报, 20(5): 1025 – 1038
康磊, 刘良, 曹玉亭, 王超, 杨文强, 梁莎. 2012. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克复式花岗质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. 地质通报, (待刊)
李曙光, 孙卫东, 张国伟, 陈家义, 杨永成. 1996. 南秦岭勉略构造带黑峡沟变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据. 中国科学(D 辑), 26(3): 223 – 230
李向民, 马中平, 孙吉明, 徐学义, 雷永孝, 王立社, 段星星. 2009. 阿尔金断裂南缘约马克其镁铁-超镁铁岩的性质和年代学研究. 岩石学报, 25(4): 862 – 872
刘良, 车自成, 罗金海, 王焰, 高章鉴. 1996. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. 科学通报, 41(16): 1458 – 1488
刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 王建其, 高章鉴. 1998. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄证据. 科学通报, 43(8): 880 – 883
刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 陈丹玲. 1999. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报, 15(1): 57 – 64
路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 82 – 94
马中平, 李向民, 孙吉明, 徐学义, 雷永孝, 王立社, 段星星. 2009. 阿尔金山南缘长沙沟镁铁-超镁铁质层状杂岩体的发现与地质意义——岩石学和地球化学初步研究. 岩石学报, 25(4): 793 – 804
马中平, 孙吉明, 唐卓, 李向民, 徐学义, 雷永孝, 王立社, 段星星. 2010. 阿尔金山南缘长沙沟-清水泉一带镁铁-超镁铁质杂岩体 Cu-Ni-PGE 含矿性讨论. 西北地质, 43(4): 18 – 24
马中平, 李向民, 徐学义, 孙吉明, 唐卓, 杜涛. 2011. 南阿尔金山清水泉镁铁-超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义. 中国地质, 38(4): 1071 – 1078
秦江锋, 赖绍聪, 李永飞, 白莉, 王娟. 2005. 扬子板块北缘阳坝岩体锆石饱和温度的计算及其意义. 西北地质, 38(3): 1 – 5
孙吉明, 马中平, 唐卓, 李向民. 2012. 阿尔金南缘鱼目泉岩浆混合花岗岩 LA-ICP-MS 测年与构造意义. 地质学报, 86(2): 247 – 257
王超, 刘良, 张安达, 杨文强, 曹玉亭. 2008. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用: 玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据. 岩石学报, 24(12): 2809 – 2819
吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007a. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185 – 220
吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007b. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217 – 1238
吴锁平, 吴才来, 陈其. 2007. 阿尔金断裂南侧吐拉铝质 A 型花岗岩的特征及构造环境. 地质通报, 26(10): 1385 – 1392
吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589 – 1604
许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 73(3): 193 – 205
杨文强, 丁海波, 刘良, 校培喜, 曹玉亭, 康磊, 梁莎, 廖小莹, 王亚伟. 2012. 阿尔金山南部迪木那里克铁矿赋矿地层特征及其形成时代. 地质通报, (待刊)
张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 1 – 182
郑永飞. 2004. 深俯冲大陆板块折返过程中的流体活动. 科学通报, 49(10): 917 – 929