

南阿尔金木纳布拉克地区长城系巴什库尔干岩群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义

曹玉亭^{1,2}, 刘良², 王超³, 康磊², 杨文强², 梁莎⁴, 廖小莹², 王亚伟²
CAO Yuting¹, LIU Liang², WANG Chao³, KANG Lei², YANG Wenqiang²,
LIANG Sha⁴, LIAO Xiaoying², WANG Yawei²

1. 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室/山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;

3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

4. 西安地质矿产勘查开发院, 陕西 西安 710100

1. *Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, College of Earth Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;*

2. *State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;*

3. *Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

4. *Xi'an Exploration and Development Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710100, Shaanxi, China*

摘要:采用 LA-ICP-MS 微区原位锆石 U-Pb 同位素测定技术, 测得木纳布拉克地区原划长城系巴什库尔干岩群红柳泉组的二云二长片麻岩和扎斯勒河组二云石英片岩的原岩形成年龄分别介于 498~840Ma 和 500~647Ma 之间, 表明这 2 种岩石原岩的形成时代均为新元古代, 而不是之前认为的中元古代。另外, 红柳泉组二云二长片麻岩边部锆石表现为重稀土元素相对富集型稀土配分模式, 其 Th/U 值大部分小于 0.1, 为变质锆石, 测得其变质时代为 498±4Ma, 与该地区高压麻粒岩的峰期变质时代 (486±5Ma) 一致, 且与南阿尔金阿尔金岩群中的高压-超高压岩石的峰期变质时代一致, 推断其为阿尔金俯冲碰撞引发的高压-超高压变质作用的产物, 属于南阿尔金高压-超高压变质带的一部分。通过原岩残留碎屑锆石的年代学对比, 发现研究区内这 2 种岩石及已发现的高压麻粒岩均具有与阿尔金岩群相似的锆石年龄信息, 表明本区红柳泉组和扎斯勒河组的这 3 种岩石不应再划归为中元古代的长城系巴什库尔干岩群, 将其归属为阿尔金岩群更为合适。

关键词:南阿尔金; 高压-超高压岩石; 长城系; 巴什库尔干岩群; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

中图分类号: P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2015)08-1447-13

Cao Y, Liu L, Wang C, Kang L, Yang W Q, Liang S, Liao X Y, Wang Y W. Implication of geochronological data for the para-metamorphic rocks from Bashkurgan Group of Changcheng System in Munabulake area, South Altyn Tagh. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(8):1447-1459

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded the protolith ages of 498~840Ma and 500~647Ma respectively for the two-mica monzonitic gneiss in Hongliuquan Formation and the mica quartz schist in Zhasikansayi Formation from Bashikourgan rock group in Munabulake area, southern Altyn Mountains, indicating that the formation ages of the two rocks are Neoproterozoic rather than Mesoproterozoic. The zircon rims of the two-mica monzonitic gneiss exhibit HREE enrichment pattern, with Th/U ratios less than

收稿日期: 2014-11-12; 修订日期: 2015-01-28

资助项目: 国家重点研究发展规划“973”项目 (编号: 2015CB856103)、国家自然科学基金项目 (批准号: 41402045、41430209)、山东科技大学人才引进科研启动基金资助项目 (编号: 2014RCJJ008)

作者简介: 曹玉亭 (1985-), 女, 博士, 讲师, 从事岩石学研究。E-mail: 619ting@163.com

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

0.1, showing the characteristics of metamorphic zircon. Zircon U-Pb dating yielded the metamorphic age of 498 ± 4 Ma, which is identical to the peak metamorphic age of the HP granulite in this area and that of the HP-UHP metamorphic rocks in southern Altyn Mountains, suggesting that the rock should be the product of the deep subduction of southern Altyn Mountains. The two-mica monzonitic gneiss and two-mica quartz schist in this study and the HP granulite in Munabulake area recorded similar age information to the Altyn complex, implying that the three rocks belong to the Altyn complex rather than to the Bashikourgan rock group. Therefore, the Bashikourgan rock group should be disintegrated, and some of this rock group should be assigned to the southwest part of the Altyn complex. The reason for the disintegration of the Altyn complex was that the south Altyn subducted slab was exhumed and broken up at ca. 450 Ma, which resulted in the mantle magma upwelling. The upwelling mafic magma formed the present Munabulake mafic-ultramafic rock and separated the Altyn complex into two parts.

Key words: southern Altyn Mountains; HP-UHP rock; Changcheng System; Bashikourgan rock group; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating

大量研究认为,南阿尔金俯冲碰撞杂岩带为一条早古生代高压-超高压变质岩带,为陆壳深俯冲折返的产物,已发现的高压-超高压岩石主要分布于江孜勒萨依、淡水泉和英格丽萨伊3个地区的阿尔金岩群^[1-13]。最近,在南阿尔金俯冲碰撞杂岩带西侧的木纳布拉克地区,原划为长城系巴什库尔干岩群的红柳泉组发现一套高压泥质麻粒岩,北东方向镁铁-超镁铁质杂岩带将巴什库尔干岩群与阿尔金岩群所分割。锆石U-Pb定年研究获得该麻粒岩的峰期变质时代为 485 ± 5 Ma^[14],与南阿尔金已发现的高压-超高压岩石的峰期变质年龄一致^[5-13],因此推断其应是南阿尔金陆壳深俯冲作用引发的高压-超高压变质事件的产物,与南阿尔金其他地区高压-超高压岩石共同构成南阿尔金高压-超高压变质带。另外,测得其原岩形成的年龄上限为579 Ma,为新元古代晚期,与南阿尔金高压-超高压岩石的原岩形成时代基本一致或稍晚^[5-8, 11-13],因此,推断该岩石不应再作为岩石地层单元划归为长城系巴什库尔干岩群,而应归属南阿尔金高压-超高压变质带的一部分。该结果对木纳布拉克地区长城系的时代归属问题提出质疑。除此之外,目前对木纳布拉克地区广泛出露的长城系年代学研究比较薄弱,其地层主要依靠与北阿尔金扎斯勒赛河地区原划为长城系地层对比确定的,缺乏精确的年代学数据。区内这些长城系原岩形成时代如何?其中是否还存在其他阿尔金岩群的地层?如果存在,其区内的分布如何?与南阿尔金板块俯冲碰撞折返运动有何联系?这些问题的存在都制约了木纳布拉克地区长城系巴什库尔干岩群的属性及划分。针对这些问题,本文对该地区原划为长城系巴什库尔

干岩群红柳泉组的二云二长片麻岩及扎斯勒赛河岩组的二云石英片岩进行详细的年代学研究,主要目的是:①利用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年方法确定这些岩石的原岩时代及可能的变质时代;②通过对比前人已获得的南阿尔金俯冲碰撞杂岩带阿尔金岩群高压-超高压变质岩石的原岩、峰期变质年龄及区内的岩浆活动期次,探讨二者的地层属性及构造背景,为该区长城系地层的划分提供依据。

1 区域地质背景

阿尔金山地处青藏高原北缘,介于塔里木板块、柴达木微板块及祁连-昆仑造山带之间,是一个早期经历古板块或地块相互俯冲-碰撞作用,在中、新生代又被走滑断裂所切断,由不同构造层次、不同时期和形成于不同构造环境的地质体所组成的复合造山带(图1)^[15-22]。阿尔金造山带自北向南可划分为北阿尔金太古宙混杂岩带、北阿尔金俯冲碰撞杂岩带、米兰河-金雁山地块、南阿尔金俯冲碰撞杂岩带^[6](图1)。其中南阿尔金俯冲碰撞杂岩带进一步划分为南阿尔金高压-超高压变质带^[1-14, 23]和南阿尔金蛇绿构造混杂岩带^[24-28]两部分。南阿尔金高压-超高压变质带为早古生代的陆壳深俯冲作用的产物,目前发现的高压-超高压变质岩石主要产于阿尔金岩群,其中超高压岩石有江孜勒萨依地区的榴辉岩和含蓝晶石石榴子石泥质片麻岩,以及英格丽萨伊地区的含菱镁矿的石榴二辉橄榄岩、含钾长石的石榴子石辉石岩和含石榴子石花岗质片麻岩;高压岩石主要为淡水泉和木纳布拉克地区的高压泥质麻粒岩^[1-14],均呈透镜体状分布在区域花岗质片麻岩或副变质片麻

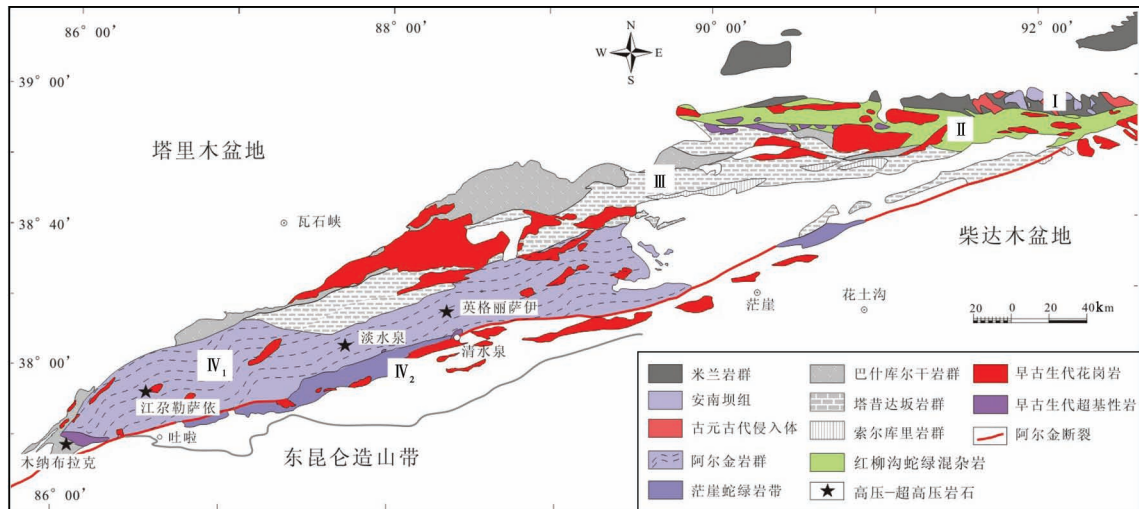


图1 阿尔金造山带地质构造图 (据参考文献[1],[12]修改)

Fig. 1 Geological and tectonic map of the Altyn orogen

I—北阿尔金太古宙混杂岩带; II—北阿尔金俯冲碰撞杂岩带; III—米兰河-金雁山地块; IV—南阿尔金俯冲碰撞杂岩带; IV₁—南阿尔金高压-超高压变质带; IV₂—南阿尔金蛇绿构造混杂岩带

岩或大理岩中。近年同位素年龄测定南阿尔金地区不同类型的高压-超高压岩石峰期变质时代为 486~509Ma^[9-14,23],退变质年龄为 448~455Ma^[8,23],原岩的形成时代多为 719~1000Ma^[5-9,11,13,18,23]。

本次研究的二云二长片麻岩和二云石英片岩主要分布于南阿尔金俯冲碰撞杂岩带南缘的木纳布拉克地区原划为长城系巴什库尔干岩群的红柳泉组和扎斯勘赛河岩组。其中红柳泉组二云二长片麻岩的采样地点为 N37°37'9.4"、E86°13'2.1",扎斯勘赛河组二云石英片岩的采样地点为 N37°40'47.4"、E85°59'44.6"。该区巴什库尔干岩群出露较全,出露面积约 300km²,北东方向被镁铁-超镁铁质杂岩带将其与阿尔金岩群所分割(图 2-a)。主要为一套陆源碎屑岩-碳酸盐岩建造夹火山岩系经区域变质作用形成的绿片岩相变质岩系,由变质表壳岩系、变质侵入体、变质基性火山岩系组成。经历了多期复杂的变形变质作用,其物态、形态、位态和序态均发生了明显的变化,总体上表现为断裂带所围限的不同规模的岩片组成。根据该岩群中变质岩石组合、构造变形样式、原岩建造特征,将表壳岩系划分为 3 个岩组,由老至新依次为:扎斯勘赛河岩组(Chz)、红柳泉岩组(Chh)、贝克滩岩组(Chb)。出露的红柳泉组的高压泥质麻粒岩与二云二长片麻岩呈互层状产出(图 2-b),地层

变形较弱,高压麻粒岩的地层厚度约 30cm,二云二长片麻岩地层较厚,最厚达 1m。

2 岩相学特征

红柳泉组的二云二长片麻岩具有鳞片粒状变晶结构,主要组成矿物有钾长石(35%~40%)、斜长石(25%~30%)、石英(15%~20%)、黑云母(约 5%)和白云母(约 5%),其中黑云母和白云母具有弱的定向排列,形成片麻理(图 3-a、b)。

扎斯勘赛河岩组的二云石英片岩变形强烈,具有明显的片理构造,主要由黑云母(25%~35%)、白云母(20%~25%)和石英(35%~40%)组成。黑云母和白云母定向排列,石英颗粒被拉长,平行于片麻理方向(图 3-c、d)。

3 分析方法

对分离出来的锆石在双目镜下挑选出结晶好、透明度好、无裂隙、无包体的颗粒,用环氧树脂固定并抛光至锆石颗粒中心露出。锆石样品在测定之前用浓度 3%的稀 HNO₃清洗样品表面,以除去样品表面的污染。锆石的 CL 图像分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的电子显微扫描电镜上完成。锆石的微量元素分析和 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室进

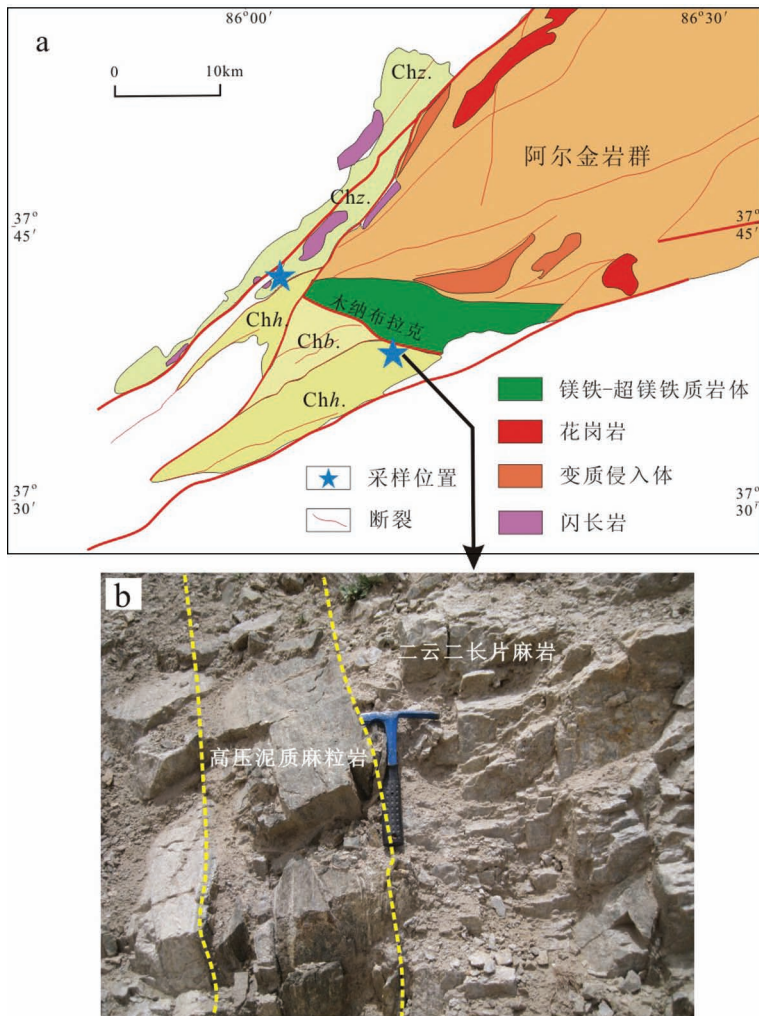


图2 木纳布拉克地区地质简图(据参考文献①修改)与红柳泉组高压泥质麻粒岩与二云二长麻岩的野外露头照片

Fig. 2 Geological map of the Munabulake area and outcrop photographs of the HP pelitic granulite and two-mica monzonitic gneiss
Chz—扎斯勒赛河组; Chb—贝壳滩组; Chh—红柳泉组

行, LA-ICP-MS 设备使用 Agilent 7500a, U-Pb 同位素测定采用 GeoLas 200M 193nm 激光发生器, 微量元素和 U-Th-Pb 同位素的测定在一个点上同时获得。激光束斑直径为 $25\ \mu\text{m}$, 激光剥蚀样品的深度为 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ 。实验中采用氦作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化, 采样方式为单点剥蚀, 数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式 (peak jumping), 每完成 4~5 个测点的样品测定, 加测标样一次。在所测锆石样品分析点前后各测 2 次 NIST SRM610。锆石 U-Pb 年龄

采用标准锆石 91500 来校正, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标。样品的同位素比值及元素含量计算采用 Glitter (ver4.0, Macquarie University) 程序, 加权平均计算及 U-Pb 谐和图绘制用 Isoplot 完成。详细分析步骤和数据处理方法见参考文献 [30]。

4 锆石 U-Pb 同位素和稀土元素测定结果

4.1 二云二长片麻岩

该岩石的锆石形状多为浑圆状或卵圆状, 颗粒大小 $100\ \mu\text{m}$ 左右。锆石 CL 图像显示明显的核边结构, 核部锆石结构和形态复杂多样, 或显示明显的岩浆环带特征, 或显示均匀的面状结构, 应为原岩残留的碎屑锆石; 边部锆石发光性较弱, 部分显示出弱的环带结构 (图 4), 可能为后期变质重结晶的锆石^[31]。

利用 LA-ICP-MS 锆石原位微量元素分析方法对锆石核部和边部共进行了 46 个点的测试, 分析结果见图 5-a 和表 1。锆石核部测点的稀土元素总量和重稀土元素含量分别为 $229.3\times 10^{-6}\sim 1554\times 10^{-6}$ 和 $215.8\times 10^{-6}\sim 1463\times 10^{-6}$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值较高, 为 $0.012\sim 0.146$, 表现为重稀土元素相对富集型稀土元素配分模式。锆石的边部测点稀土元素总量为 $1136\times 10^{-6}\sim 1888\times 10^{-6}$, 重稀土元素含量为 $1129\times 10^{-6}\sim 1881\times 10^{-6}$, 轻、重稀土元素分馏明显, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值较高, 为 $0.003\sim 0.019$, 在稀土元素配分图上表现为重稀土元素明显富集型。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见图 5-b 和表 2。核部锆石 31 个测试点测出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化范围较大, 在 $835\sim 1830\text{Ma}$ 之间, 其中在 840Ma 左右有一个集中区, 年龄加权平均值为 $840\pm 5\text{Ma}$, Th/U 值均大于 0.1, 且变化范围较大, 在 $0.15\sim 1.74$ 之间。根据锆石 CL 图像特征和稀土元素特征, 推断该年龄限定了原岩形成时代的上限, 即该岩石原岩的形成年龄应小于 840Ma (图 5-b); 边部锆石 15 个测点的年龄值较为集中, 介于 $489\sim 506\text{Ma}$ 之间, 年龄加权平均值为 $498\pm 4\text{Ma}$, 其 Th/U

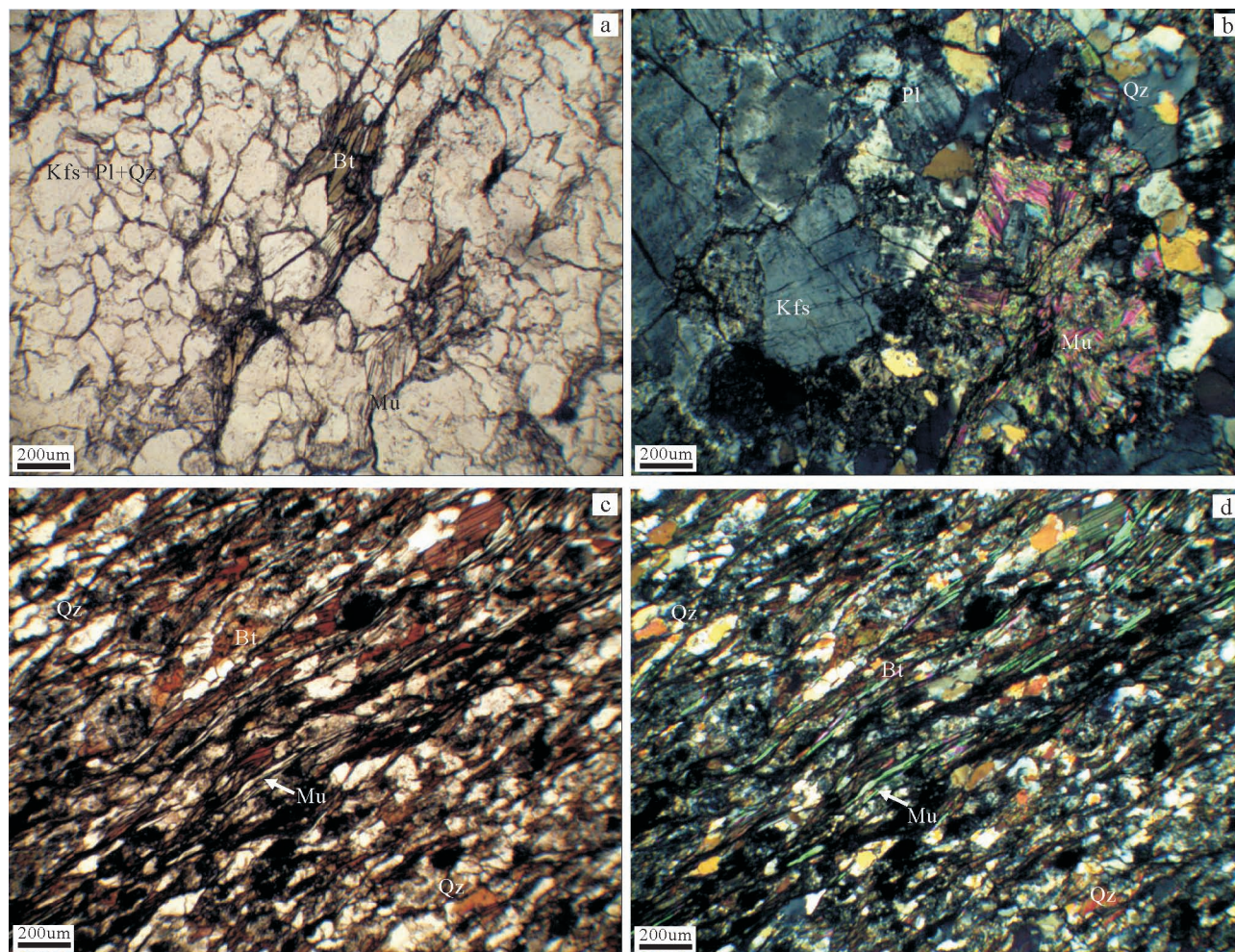


图3 南阿尔金木纳布拉克地区巴什库尔干岩群二云二长片麻岩和二云石英片岩的显微结构照片^[29]
(a、c 单偏光, b、d 正交偏光)

Fig. 3 Microstructures of the two-mica monzonitic gneiss and two-mica quartz schist from Bashikourgan complex in Munabulake area, southern Altyn Mountains
Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qz—石英; Bt—黑云母; Mu—白云母^[29]

值大部分小于 0.1, 变化于 0.01~0.25 之间。该年龄值与前人已获得的阿尔金地区其他高压-超高压岩石峰期变质年龄 (486~509Ma)^[5-14]一致。

4.2 二云石英片岩

该岩石的锆石形态复杂, 具有短柱状、长柱状和浑圆状等多种形态, 颗粒粒度较小, 在 30~60 μm 之间。CL 图像显示锆石的结构不均一, 其中部分锆石具有明显的岩浆振荡环带, 有的显示均匀的面状结构, 总体具有碎屑锆石的特征 (图 6)。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见图 7 和表 2。大多数测点位于 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图的谐和线上或其附近, 少数点沿不一致线分布 (图 7),

年龄范围变化在 647~1572Ma 之间。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值最小的 7 个点 (点 1、2、3、14、15、16、18) 的年龄加权平均值 $647 \pm 8\text{Ma}$ (MSWD=0.001) 作为岩石原岩形成年龄的最大估计值。结合典型的岩浆锆石特征, 该年龄限定了岩石原岩形成年龄的上限, 表明该岩石的形成时代应小于 647Ma。

5 讨论

5.1 地层形成时代的限定

南阿尔金南侧木纳布拉克地区长城系巴什库尔干岩群的形成时代至今没有进行详细地研究, 虽然前人在南阿尔金南侧巴什库尔干岩群的扎斯

表1 木纳布拉克地区二云二长片麻岩(10A-92)中锆石的稀土元素含量

Table 1 REE compositions of representative zircons from the mica monzonitic gneiss in Munabulake area

测点	10 ⁻⁶															
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣHREE
1	0.47	33.77	0.19	2.04	3.01	0.59	15.25	5.15	65.46	23.66	113.1	29.09	349.6	45.50	686.9	646.8
2	0.05	17.31	0.06	0.62	1.99	0.65	9.64	3.95	57.36	26.42	160.2	50.14	654.1	114.7	1097	1077
3	0.07	10.18	0.03	0.99	1.21	0.76	7.10	3.84	62.38	29.23	168.1	54.62	761.1	100.7	1200	1187
4	0.03	12.54	0.08	2.05	4.23	1.11	23.68	8.47	114.5	44.64	214.9	52.77	593.3	81.87	1154	1134
5	8.29	32.31	2.81	15.32	7.39	0.83	26.20	8.92	112.1	40.45	182.3	43.22	474.9	61.44	1017	949.6
6	0.01	10.79	0.03	0.20	0.70	0.43	8.03	4.39	84.90	44.01	276.8	86.95	1139	193.9	1850	1838
7	0.00	6.40	0.12	2.53	3.53	1.39	12.15	3.33	39.59	14.21	67.30	17.33	218.6	33.24	419.7	405.8
8	0.02	4.52	0.01	0.42	0.57	0.37	3.51	1.04	12.42	4.91	24.81	7.06	95.6	14.10	169.4	163.4
9	0.03	4.22	0.02	0.66	1.86	0.48	8.14	3.83	55.19	24.72	148.5	50.14	726.5	111.8	1136	1129
10	0.02	4.29	0.23	3.59	7.42	1.64	40.35	13.08	159.9	55.34	244.0	56.53	599.2	75.41	1261	1244
11	0.08	6.81	0.10	1.64	3.57	0.47	20.31	6.99	85.01	30.18	131.4	31.17	346.7	42.99	707.4	694.7
12	0.00	8.46	0.03	0.33	1.10	0.50	7.84	4.20	74.23	34.98	219.3	71.17	975.9	152.0	1550	1540
13	0.15	14.34	0.22	4.16	7.24	0.56	36.51	12.34	152.5	55.90	246.6	56.50	601.8	83.27	1272	1245
14	0.01	4.00	0.12	2.35	5.99	0.61	26.18	8.22	96.92	34.39	145.4	32.05	327.4	43.75	727.4	714.4
15	0.12	69.33	0.86	13.60	20.45	5.52	56.10	14.26	133.0	38.26	147.4	31.40	317.1	37.77	885.1	775.3
16	0.04	33.93	0.17	2.91	4.87	1.47	19.32	6.11	84.11	34.85	200.4	63.78	835.3	127.6	1415	1372
17	0.00	10.35	0.02	0.27	1.10	0.57	6.06	2.97	52.28	24.57	156.8	54.30	777.3	118.3	1205	1193
18	0.07	13.88	0.09	1.54	4.01	0.57	25.35	8.99	117.6	43.03	192.9	42.60	444.7	60.60	956.0	935.8
19	0.36	7.13	0.15	2.41	3.43	0.92	21.00	6.69	95.90	38.48	199.4	49.86	545.3	106.1	1077	1063
20	15.09	47.47	3.44	15.66	7.57	1.35	29.43	10.97	143.3	51.76	252.1	66.49	806.2	103.1	1554	1463
21	0.27	11.32	0.58	3.72	5.10	1.33	23.56	7.62	86.21	30.11	142.9	35.80	430.7	63.22	842.4	820.1
22	0.50	6.84	0.26	0.23	0.83	0.36	7.20	4.04	81.40	39.28	251.4	82.38	1058	189.1	1722	1713
23	0.81	13.64	0.14	1.07	1.26	0.73	8.47	3.95	69.59	31.88	196.8	65.74	941.6	128.3	1464	1446
24	0.54	9.36	0.15	0.55	0.57	0.31	4.81	2.88	55.05	27.13	176.0	59.91	824.1	123.3	1285	1273
25	0.59	46.02	0.11	1.67	3.98	0.77	16.34	5.79	75.06	27.11	129.1	32.03	367.5	51.06	757.1	704.0
26	0.09	8.63	0.04	0.40	0.77	0.33	5.25	3.12	64.84	34.79	240.5	84.11	1130	179.2	1752	1742
27	0.02	12.16	0.01	0.22	0.80	0.26	3.58	1.36	17.30	7.01	36.04	9.88	122.0	18.65	229.3	215.8
28	0.18	14.08	0.59	8.48	13.42	1.79	55.94	15.62	178.9	56.57	230.2	52.70	564.6	69.64	1263	1224
29	3.34	16.32	0.70	5.99	5.59	1.47	19.13	6.06	68.03	22.10	99.30	24.61	286.0	33.47	592.1	558.7
30	0.26	6.63	0.55	6.46	9.13	3.36	35.47	11.22	127.5	42.72	207.8	60.53	811.1	107.8	1431	1404
31	0.05	10.22	0.16	2.17	5.00	1.25	23.43	8.05	98.58	34.84	168.8	44.24	535.9	78.07	1011	992
32	0.00	7.48	0.04	0.62	1.41	0.20	9.12	3.31	42.69	16.17	75.55	18.33	210.0	27.61	412.5	402.8
33	0.03	8.04	0.01	0.35	1.09	0.65	6.76	3.51	64.34	29.70	186.7	63.49	897.6	125.8	1388	1378
34	0.02	7.86	0.04	0.78	1.87	0.18	9.13	3.06	36.53	13.35	61.79	14.71	167.6	23.03	339.9	329.2
35	0.09	11.84	0.48	6.94	10.59	1.16	34.92	9.80	102.8	31.28	123.9	26.50	267.9	32.53	660.7	629.6
36	0.02	6.42	0.01	0.30	0.54	0.27	4.44	3.29	66.05	37.25	266.8	90.36	1198	214.4	1888	1881
37	0.03	20.99	0.09	1.47	3.38	0.72	16.83	5.90	74.51	27.70	129.6	31.81	361.3	48.05	722.3	695.7
38	1.33	17.68	0.63	5.63	9.42	2.27	39.92	13.39	159.7	57.09	261.5	65.73	769.2	110.5	1514	1477
39	7.12	24.59	2.05	9.92	8.66	2.45	28.00	8.89	108.8	40.37	195.1	50.62	605.9	87.14	1180	1125
40	0.05	10.64	0.08	1.41	2.93	0.58	17.16	5.84	72.04	26.37	120.0	28.25	313.4	42.51	641.2	625.5
41	0.02	7.67	0.02	0.39	0.69	0.36	8.01	4.84	82.80	34.97	194.2	58.85	752.9	131.2	1277	1268
42	0.02	18.82	0.03	0.64	1.35	0.51	8.42	3.32	48.94	20.55	112.4	32.75	430.9	66.55	745.2	723.8
43	0.03	9.29	0.01	0.15	0.91	0.47	7.37	4.28	77.97	37.25	226.8	73.42	1020	158.9	1617	1606
44	0.00	1.26	0.04	0.81	1.53	0.28	7.90	2.64	31.42	11.11	49.37	11.39	130.6	18.23	266.6	262.7
45	0.02	10.41	0.06	1.61	3.85	0.38	20.78	6.96	83.62	29.15	122.1	26.34	260.5	31.44	597.3	581.0
46	0.28	15.57	0.90	12.37	21.77	9.99	106.7	30.42	298.3	80.48	284.4	57.62	547.7	65.73	1532	1471

表 2 木纳布拉克地区红柳泉组二云二长片麻岩(10A-92)和扎斯勒赛河组二云石英片岩(10A-101)的锆石 U-Th-Pb 同位素数据

Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of representative zircons from mica monzonitic gneiss (10A-92) and the mica quartz schist (10A-101) in Munabulake area

测点	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	同位素比值						年龄 /Ma					
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
二云二长片麻岩(10A-92)																
1	47.25	73.55	151.2	0.49	0.0917	0.0007	3.1793	0.0444	0.2509	0.0025	1461	10	1452	11	1443	13
2	61.84	88.84	374.3	0.24	0.0836	0.0009	1.6318	0.0586	0.1402	0.0043	1283	22	983	23	846	24
3	40.88	14.51	464.5	0.03	0.0627	0.0009	0.7101	0.0169	0.0817	0.0013	698	3	545	10	506	7
4	47.70	117.3	166.5	0.70	0.0857	0.0008	2.6195	0.0265	0.2211	0.0011	1332	18	1306	7	1288	6
5	43.87	67.19	179.0	0.38	0.0819	0.0008	2.3217	0.0326	0.2049	0.0019	1243	14	1219	10	1201	10
6	23.99	7.07	278.3	0.03	0.0617	0.0010	0.6941	0.0142	0.0813	0.0010	661	33	535	9	504	6
7	26.80	35.49	91.17	0.39	0.0889	0.0011	2.9580	0.0394	0.2410	0.0017	1403	19	1397	10	1392	9
8	23.51	25.07	122.9	0.20	0.0817	0.0012	1.8958	0.0421	0.1680	0.0029	1239	29	1080	15	1001	16
9	28.06	42.80	310.6	0.14	0.0627	0.0011	0.7027	0.0201	0.0807	0.0013	698	44	540	12	501	8
10	40.16	78.21	157.8	0.50	0.0811	0.0009	2.2872	0.0286	0.2045	0.0015	1233	6	1208	9	1200	8
11	31.87	35.70	136.2	0.26	0.0863	0.0011	2.3970	0.0502	0.2006	0.0029	1346	24	1242	15	1178	16
12	28.73	8.59	334.6	0.03	0.0542	0.0009	0.5996	0.0119	0.0800	0.0006	376	37	477	8	496	3
13	61.01	72.86	197.3	0.37	0.0899	0.0007	3.1511	0.0341	0.2536	0.0013	1433	15	1445	8	1457	7
14	59.07	96.52	205.6	0.47	0.0839	0.0007	2.6956	0.0307	0.2323	0.0015	1291	15	1327	8	1347	8
15	50.66	310.3	179.0	1.73	0.0735	0.0007	1.7348	0.0204	0.1707	0.0009	1028	19	1022	8	1016	5
16	49.68	126.2	512.2	0.25	0.0614	0.0007	0.6906	0.0144	0.0811	0.0011	650	22	533	9	502	6
17	48.56	16.64	563.8	0.03	0.0563	0.0006	0.6137	0.0083	0.0788	0.0005	465	31	486	5	489	3
18	45.57	73.26	192.8	0.38	0.0798	0.0010	2.1425	0.0298	0.1945	0.0014	1192	24	1163	10	1145	7
19	38.25	66.23	226.2	0.29	0.0782	0.0017	1.5185	0.0496	0.1401	0.0028	1151	44	938	20	845	16
20	96.95	116.9	588.5	0.20	0.0795	0.0009	1.5256	0.0258	0.1391	0.0021	1185	24	941	10	839	12
21	55.26	49.96	338.3	0.15	0.0748	0.0013	1.4488	0.0419	0.1400	0.0031	1065	35	909	17	845	17
22	33.90	5.91	389.3	0.02	0.0522	0.0017	0.5818	0.0188	0.0808	0.0010	295	74	466	12	501	6
23	37.45	51.85	402.3	0.13	0.0621	0.0013	0.6905	0.0174	0.0805	0.0012	677	44	533	10	499	7
24	19.74	15.69	210.0	0.07	0.0674	0.0012	0.7517	0.0154	0.0807	0.0007	852	44	569	9	500	4
25	34.99	71.04	112.0	0.63	0.0845	0.0010	2.8609	0.0453	0.2450	0.0024	1306	24	1372	12	1413	12
26	17.33	14.18	194.8	0.07	0.0636	0.0011	0.7154	0.0147	0.0815	0.0008	728	32	548	9	505	5
27	43.25	39.90	108.9	0.37	0.0989	0.0009	4.4802	0.0522	0.3283	0.0027	1606	17	1727	10	1830	13
28	36.04	83.42	214.8	0.39	0.0703	0.0012	1.3487	0.0264	0.1387	0.0011	939	34	867	11	837	6
29	62.36	74.33	394.7	0.19	0.0720	0.0012	1.3836	0.0236	0.1392	0.0011	987	33	882	10	840	6
30	34.40	21.23	372.7	0.06	0.0793	0.0019	0.8845	0.0222	0.0811	0.0012	1189	48	643	12	503	7
31	52.32	75.27	316.3	0.24	0.0749	0.0010	1.4637	0.0194	0.1418	0.0013	1066	28	916	8	855	7
32	14.80	17.85	45.50	0.39	0.0961	0.0016	3.5615	0.0570	0.2702	0.0027	1550	31	1541	13	1542	14
33	17.15	11.05	195.0	0.06	0.0603	0.0012	0.6744	0.0146	0.0809	0.0008	617	43	523	9	502	5
34	12.84	20.22	47.50	0.43	0.0856	0.0015	2.6190	0.0478	0.2228	0.0019	1328	34	1306	13	1296	10
35	78.87	89.42	194.0	0.46	0.1134	0.0006	5.1338	0.0529	0.3280	0.0029	1855	5	1842	9	1829	14
36	28.80	11.97	333.6	0.04	0.0595	0.0010	0.6654	0.0137	0.0810	0.0011	587	35	518	8	502	6
37	33.17	67.41	146.1	0.46	0.0792	0.0009	2.0672	0.0293	0.1890	0.0015	1177	22	1138	10	1116	8
38	86.39	198.9	492.7	0.40	0.0771	0.0006	1.4812	0.0271	0.1382	0.0019	1124	15	923	11	835	11

续表2

测点	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Th/ U	同位素比值						年龄/Ma					
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
39	76.88	106.0	482.6	0.22	0.0747	0.0007	1.4251	0.0149	0.1382	0.0009	1061	17	900	6	835	5
40	22.99	31.45	77.21	0.41	0.0928	0.0013	3.1409	0.0483	0.2474	0.0030	1484	27	1443	12	1425	15
41	52.45	4.30	628.1	0.01	0.0603	0.0009	0.6795	0.0147	0.0814	0.0010	617	32	526	9	505	6
42	28.16	36.48	193.1	0.19	0.0704	0.0011	1.3654	0.0423	0.1387	0.0033	943	31	874	18	837	19
43	36.97	7.22	434.7	0.02	0.0563	0.0006	0.6256	0.0085	0.0807	0.0009	465	24	493	5	500	5
44	11.03	10.55	56.78	0.19	0.0751	0.0013	1.7719	0.0312	0.1724	0.0021	1072	35	1035	11	1026	11
45	32.67	36.10	113.3	0.32	0.0857	0.0009	2.9308	0.0360	0.2479	0.0019	1332	15	1390	9	1428	10
46	101.8	132.1	371.7	0.36	0.0888	0.0006	2.7831	0.0289	0.2269	0.0014	1400	13	1351	8	1318	8
二云石英片岩(10A-101)																
1	74.10	134.9	594.8	0.23	0.0582	0.0006	0.8528	0.0149	0.1056	0.0019	600	22	626	8	647	11
2	65.12	194.8	480.9	0.41	0.0610	0.0016	0.8907	0.0182	0.1056	0.0017	639	56	647	10	647	10
3	63.35	59.99	504.0	0.12	0.0639	0.0021	0.9370	0.0309	0.1056	0.0011	739	36	671	16	647	7
4	122.2	155.5	572.6	0.27	0.0977	0.0022	2.2678	0.0988	0.1658	0.0042	1581	42	1202	31	989	23
5	42.18	62.90	148.5	0.42	0.0974	0.0014	2.8226	0.0772	0.2079	0.0036	1576	26	1362	21	1218	19
6	103.8	137.4	415.2	0.33	0.0972	0.0016	2.5712	0.1025	0.1902	0.0071	1572	32	1292	29	1123	39
7	76.17	69.08	283.9	0.24	0.0840	0.0014	2.4991	0.0391	0.2146	0.0034	1294	32	1272	11	1253	18
8	33.81	45.18	167.6	0.27	0.0837	0.0018	1.8019	0.0567	0.1553	0.0036	1285	41	1046	21	930	20
9	51.39	92.98	248.0	0.37	0.0841	0.0014	2.3112	0.0964	0.1975	0.0076	1295	33	1216	30	1162	41
10	72.50	90.41	291.8	0.31	0.0848	0.0009	2.3603	0.0645	0.2002	0.0049	1322	16	1231	20	1176	26
11	117.0	236.8	602.0	0.39	0.0847	0.0008	1.7219	0.0226	0.1471	0.0014	1309	14	1017	8	885	8
12	213.2	262.4	864.2	0.30	0.0904	0.0008	2.4316	0.0575	0.1953	0.0052	1435	18	1252	17	1150	28
13	71.37	216.0	346.2	0.62	0.0906	0.0011	1.8883	0.0366	0.1514	0.0026	1439	23	1077	13	909	15
14	69.16	78.00	564.0	0.14	0.0652	0.0015	0.9428	0.0305	0.1056	0.0033	789	48	674	16	647	19
15	51.16	70.42	394.9	0.18	0.0683	0.0027	0.9919	0.0382	0.1056	0.0027	880	86	700	19	647	16
16	61.61	66.88	488.1	0.14	0.0623	0.0009	0.9097	0.0212	0.1057	0.0021	683	34	657	11	648	12
17	49.04	105.3	303.5	0.35	0.0794	0.0016	1.3927	0.0732	0.1234	0.0046	1183	45	886	31	750	27
18	116.7	189.0	895.0	0.21	0.0636	0.0011	0.9327	0.0229	0.1058	0.0019	728	32	669	12	648	11
19	78.52	70.38	218.7	0.32	0.0976	0.0009	3.7267	0.0439	0.2761	0.0039	1589	17	1577	9	1572	20
20	59.39	168.6	200.4	0.84	0.0982	0.0013	2.7837	0.0597	0.2047	0.0043	1591	25	1351	16	1201	23
21	161.6	139.4	1101	0.13	0.0650	0.0007	1.1065	0.0193	0.1230	0.0020	774	24	756	9	748	12

勘赛河岩组中采得微古植物化石,如粗面球形藻(*Trachysphaeridium* sp.)和贝克滩岩组中获得的叠层石(*Kussiella* F.),二者都不具确切可靠的年代意义。另外,木纳布拉克地区该岩石地层单元的时代归属是前人依靠地层对比确定的,目前还没有准确的年龄数据支持^①。本文利用高精度的LA-ICP-MS微区原位锆石U-Pb同位素定年方法对木纳布拉克地区原划长城系红柳泉组的二云二长片麻岩和扎斯勘赛河组的二云石英片岩进行了锆石U-Pb年龄研究,很好地限定了原岩的形成年龄。

红柳泉组二云二长片麻岩的锆石具有明显的核边结构,核部显示原岩残留的碎屑锆石特征(图4),12个测点获得的年龄值变化范围较大,在839~1830Ma之间,最小的一组年龄为840±5Ma(图5-b),Th/U值大部分大于0.1(表2)。根据锆石结构和稀土元素特征,推断该年龄限定了原岩形成时代的上限,即原岩形成年龄小于840Ma。锆石边部为变质重结晶锆石,Th/U值均小于0.1,稀土元素配分模式与核部锆石不同,显示明显的重稀土元素(HREE)富集型(图5-a),这可能是由于变质过程中没有类似石榴子石等富集HREE的矿物

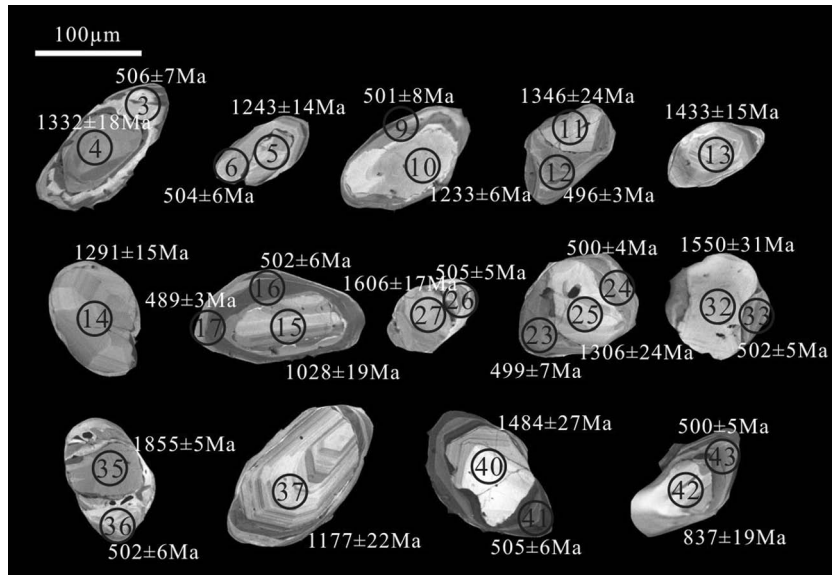


图 4 木纳布拉克地区红柳泉组二云二长片麻岩(10A-92)的锆石 CL 图像
 Fig. 4 CL images of the two-mica monzonitic gneiss of Hongliuquan Formation in Munabulake area

产生的原因^[33-36],定年测试获得其变质年龄为 498 ± 4 Ma,进而限定其原岩形成时代应介于 $498 \sim 840$ Ma 之间。而扎斯勒赛河组二云石英片岩锆石的形态结构复杂,整体显示碎屑锆石的特征(图 6),锆石 U-Pb 定年获得年龄介于 $647 \sim 1572$ Ma 之间,在谐和图底部集中区的年龄加权平均值为 647 ± 8 Ma (图 7),结合碎屑锆石特征,限定了该岩石原岩形成年龄上限为 647 Ma。曹玉亭等^[14]通过详细的锆

石 U-Pb 定年研究获得区内红柳泉组产出的高压麻粒岩的峰期变质时代为 485 ± 5 Ma,结合该组中新获得的二云二长片麻岩的变质年龄(498 Ma),推测该地区岩石在约 500 Ma 时经历了变质作用,由此间接地限定了二云石英片岩的形成时代应介于 $500 \sim 647$ Ma 之间。

综合上述岩石样品之间的野外关系、岩相学特征、锆石特征及定年结果,可以确定,阿尔金南侧木

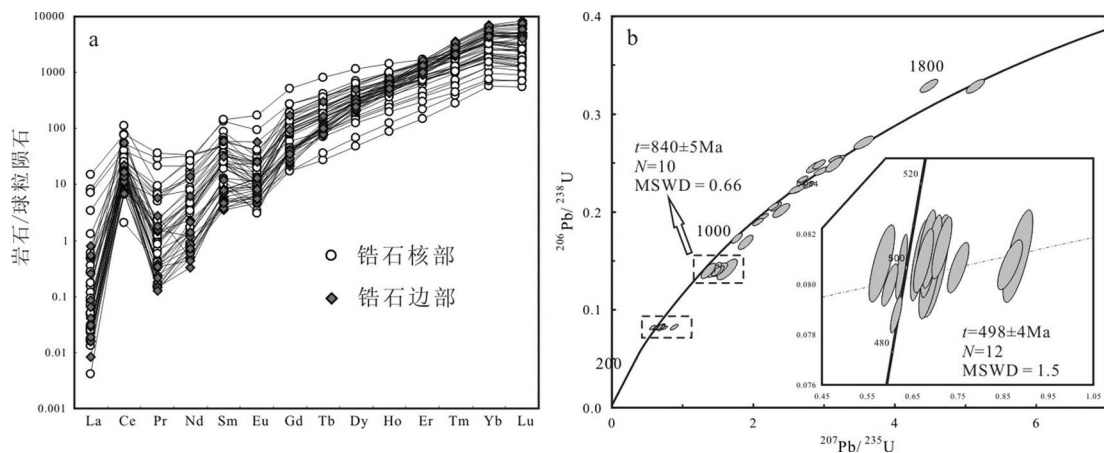


图 5 木纳布拉克地区二云二长片麻岩(10A-92)的锆石球粒陨石
 标准化稀土元素配分图 (a)和锆石 U-Pb 谐和图 (b)^[32]
 Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and concordia
 diagram (b) of the zircons from two mica monzonitic gneiss
 in Munabulake area, southern Altyn Mountains

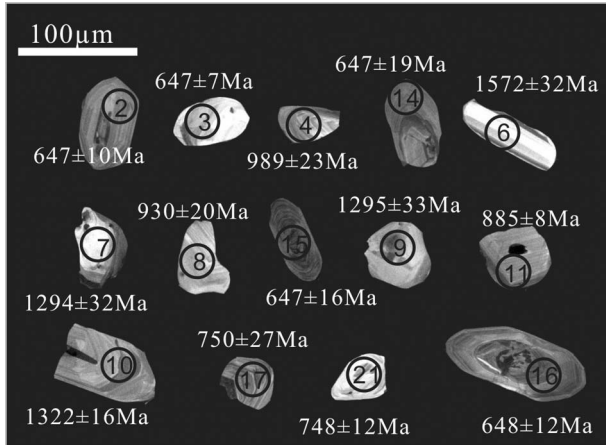


图6 木纳布拉克地区扎斯勘赛河组二云石英片岩(10A-101)的锆石CL图像

Fig. 6 CL images of the two-mica quartz schist of Zhasikansasihe Formation in Munabulake area

纳布拉克地区红柳泉组二云二长片麻岩和扎斯勘赛河组二云石英片岩的形成时代分别为498~840Ma和500~647Ma,均为新元古代,而不是之前认为的中元古代。

5.2 地层属性

上述结果表明,红柳泉组二云二长片麻岩和扎斯勘赛河组二云石英片岩的原岩形成时代均不是中元古代,而是新元古代,即这2种岩石不应属于长城系,那么其地层归属如何?通过野外调查及区域

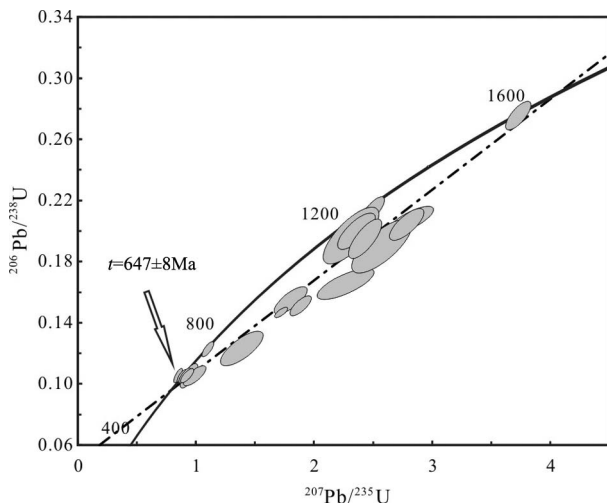


图7 木纳布拉克地区二云石英片岩(10A-101)的锆石U-Pb年龄谱和图

Fig. 7 Concordia diagram of zircons from the two-mica quartz schist in Munabulake area, southern Altyn Mountains

地质背景分析发现,木纳布拉克地区的长城系巴什库尔干岩群与阿尔金岩群之间被木纳布拉克镁铁-超镁铁岩体所分割^①,其是否与阿尔金岩群具有一定的联系性?通过对红柳泉组二云二长片麻岩锆石详细的CL图像分析(图4)、稀土元素分析(图5-a)及U-Pb定年(图5-b)测试,获得其变质年龄为 $498\pm 4\text{Ma}$,该年龄与其互层的高压麻粒岩的峰期变质时代一致^[14],且与南阿尔金高压-超高压变质带中高压-超高压变质岩的峰期变质时代一致^[5-9,11,13]。另外,曹玉亭等^[14]通过对区内高压麻粒岩详细的岩相学、年代学及变质作用演化的研究认为,其形成是南阿尔金陆壳深俯冲作用引发的高压-超高压变质事件的产物,应归属南阿尔金高压-超高压变质带的一部分。因此,结合野外地质关系及定年结果,认为红柳泉组二云二长片麻岩也应属于南阿尔金高压-超高压变质事件的产物,与南阿尔金其他地区高压-超高压岩石共同构成南阿尔金高压-超高压变质带。

目前,南阿尔金高压-超高压变质带中已发现的高压-超高压变质岩石主要分布在阿尔金岩群,其原岩时代为719~1000Ma^[5-9,11-13,18]。阿尔金岩群以往一直被认为是塔里木盆地的太古宙-古元古代的结晶基底,最近Wang等^[12]对阿尔金岩群各类岩石进行了大量的年代学分析和统计,认为其主要由中元古代-新元古代的花岗质片麻岩和变碎屑沉积岩组成。本文对阿尔金岩群各类岩石的年代学数据与新获得的木纳布拉克地区的岩石形成时代进行了对比(图8)。阿尔金岩群主要年龄峰值为500Ma、711Ma、913Ma、1400Ma和1542Ma^[12],本文研究的木纳布拉克地区原划为长城系巴什库尔干岩群红柳泉组二云二长片麻岩和扎斯勘赛河组二云石英片岩,以及与二云二长片麻岩互层的高压麻粒岩,均具有与阿尔金岩群相似的锆石年龄信息(图8-b),变质时代也基本一致,总体反映具有阿尔金岩群的物源特征。因此木纳布拉克地区的这3种岩石不应再划归为长城系巴什库尔干岩群,将其归属为阿尔金岩群更为合适,而区内出露的长城系巴什库尔干岩群应进行相应解体,其中红柳泉组二云二长片麻岩和高压麻粒岩应属于南阿尔金高压-超高压变质带的一部分,为北部阿尔金岩群向西南方向的延伸。

5.3 构造地质意义

近年,前人对南阿尔金地区出露的不同类型的

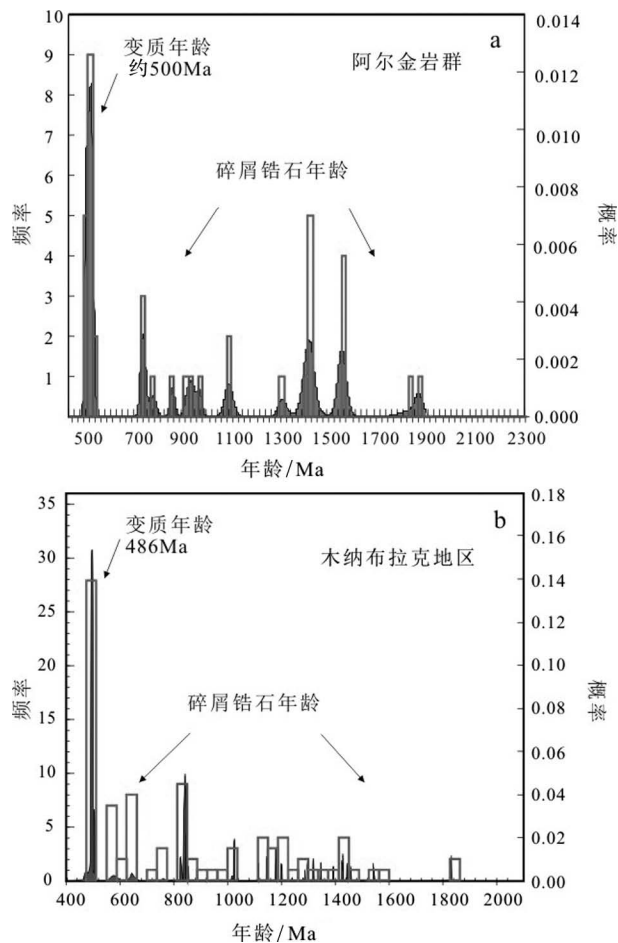


图 8 阿尔金岩群中高压-超高压变质岩(a)^[12]与木纳布拉克地区(b)岩石的年龄频谱

Fig. 8 Age spectrogram of HP-UHP rocks in Altyn complex(a)and Munabulake area(b)

高压-超高压岩石进行了准确的 U-Pb 同位素测定, 获得了其峰期变质时代为 486~509Ma^[5-14,23], 退变质年龄为 448~455Ma^[8,23], 原岩的形成时代为 719~1000Ma^[5-9,11-13,18]。结合变质期次的研究, 认为这些高压-超高压岩石是由新元古代的大陆地壳或地质体经历了约 500Ma 陆壳俯冲-深俯冲, 以及后期约 450Ma 时经历了陆壳抬升的构造演化过程^[37]。另外, 结合南阿尔金俯冲碰撞杂岩带花岗岩的研究成果, 将早古生代南阿尔金构造带中花岗质岩浆活动划分为 500Ma、466~451Ma、424~385Ma 三期^[25, 27, 38-40]。地球化学特征及同位素年代学研究认为, 其中 466~451Ma 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^[25, 27, 38-39], 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, 均显示为沉积杂砂岩部分熔融的产物, 表明在约 460Ma 时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, 从而形成本期花岗岩。

区域地质调查发现, 区内巴什库尔干岩群和阿尔金岩群被木纳布拉克镁铁质-超镁铁质岩体所分割^①(图 2)。上述结果表明, 阿尔金南侧木纳布拉克地区原巴什库尔干岩群还存在少量阿尔金岩群, 是北部阿尔金岩群向西南方向的延伸。康磊等^[41]获得该岩体的主体形成时代为 450Ma, 该年龄值与东部长沙沟一带的镁铁质-超镁铁质岩的形成时代一致^[29], 与南阿尔金超高压榴辉岩的退变质时代(450Ma)和江孜勒萨依等地约 450Ma 的花岗质岩石^[27, 38-39]的形成时代一致。结合其地球化学特征、形成时代及区域地质对比, 推断该岩体的形成也是由于深俯冲板片断离作用, 导致俯冲板片的快速折返, 并在伸展背景下诱发大规模软流圈地幔岩浆上涌, 岩浆在上升过程中与中下地壳相互作用的结果。前已述及, 南阿尔金南侧木纳布拉克地区原划为长城系巴什库尔干岩群红柳泉组二云二长片麻岩与高压麻粒岩和扎斯勘赛河组二云石英片岩的形成时代均属于新元古代, 根据地层对比认为, 将其划归为阿尔金岩群更为合适, 是阿尔金岩群向西南方向的延伸。因此, 可能正是由于木纳布拉克镁铁-超镁铁质岩体的侵入造成了阿尔金岩群的分割。但是, 目前对区内阿尔金岩群的分布还不清楚, 是零星分布在长城系中, 还是与其有一定的接触关系? 查明二者的关系还需要更系统的分析。

6 结 论

(1) 精细的锆石年龄研究获得木纳布拉克地区原划为长城系巴什库尔干岩群红柳泉组的二云二长片麻岩原岩形成年龄的上限为 498~840Ma, 扎斯勘赛河岩组的二云石英片岩的原岩形成时代介于 500~647Ma 之间, 表明这 2 种岩石原岩的形成时代均为新元古代, 而不是古元古代。

(2) 红柳泉组二云二长片麻岩的变质年龄为 498 ± 4 Ma, 与其互层的高压麻粒岩的峰期变质时代一致, 与南阿尔金高压-超高压变质带中产在阿尔金岩群高压-超高压变质岩中的峰期变质时代一致, 推断该岩石应是南阿尔金高压-超高压变质事

件的产物,与南阿尔金其他地区高压-超高压岩石共同构成南阿尔金高压-超高压变质带。

另外,区内的这2种岩石与已发现的高压麻粒岩的原岩碎屑锆石均具有与阿尔金岩群相似的锆石年龄信息,总体反映出阿尔金岩群的物源特征。因此木纳布拉克地区的这些岩石不应再划归为长城系巴什库尔干岩群,将其归属为阿尔金岩群更为合适。

(3)造成阿尔金岩群分割的原因可能是由于陆壳由深俯冲阶段转换为俯冲碰撞后,在约450Ma时处于伸展拉张阶段,此时区内深俯冲陆壳发生板片断离作用,导致俯冲板片快速折返并诱发大规模软流圈地幔岩浆上涌,上涌的地幔岩浆形成木纳布拉克镁铁-超镁铁质岩体,并将阿尔金岩群分割成两部分。

致谢:样品测试过程中得到西北大学大陆动力学国家重点实验室相关人员的帮助,审稿人在审稿过程中提出很多建设性的意见和建议,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]Liu L, Sun Y, Xiao P X, et al. Discovery of ultrahigh-pressure magnesite-bearing garnet Iherzolite (>3.8GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47: 881-886.
- [2]Liu L, Sun Y, Luo J H, et al. Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altun Mountains, NW China [J]. Science in China, 2004, 47(4): 338-346.
- [3]Liu L, Chen D L, Zhang A D, 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, 2005, 48: 1000-1010.
- [4]Liu L, Zhang J F, Green II H W, et al. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments: Exhumation from >350km[J]. Earth and Planetary Science Letter, 2007, 263: 180-191.
- [5]Liu L, Zhang A D, Chen D L, 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: 98-107.
- [6]Liu L, Wang C, Chen D L, et al. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the south Altyn Tagh, northwestern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 35: 232-244.
- [7]Liu L, Yang J X, Chen D L, et al. Progress and Controversy in the Study of HP-UHP Metamorphic Terranes in the West and Middle Central China Orogen[J]. Journal of Earth Science, 2010, 21: 581-597.
- [8]Liu L, Wang C, Cao Y T, et al. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China[J]. Lithos, 2012, 136/139: 10-26.
- [9]Zhang A D, Liu L, Sun Y, 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: 2527-2532.
- [10]Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China: T history and U-Pb geochronology[J]. Journal Metamorphic Geology, 2005, 23: 491-510.
- [11]Wang C, Liu L, Chen D L, et al. Petrology, geochemistry, geochronology and metamorphic evolution of garnet peridotites from South Altyn UHP terrane, NW China: Records related to crustal slab subduction and exhumation history[C]// Dobrzhinetskaya L, Cuthbert S, Faryad W, et al. UHPM: 25 Years After Discovery of Coesite and Diamond. Elsevier, 2011: 541-577.
- [12]Wang C, Liu L, Yang W Q, et al. Provenance and ages of the Altyn Complex in Altyn Tagh: Implications for the early Neoproterozoic evolution of northwestern China[J]. Precambrian Research, 2013, 230: 193-208.
- [13]曹玉亭,刘良,王超,等. 阿尔金淡水泉早古生代泥质高压麻粒岩及其P-T演化轨迹[J]. 岩石学报,2009,25(9): 2260-2270.
- [14]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.
- [15]车自成,刘良,刘洪福,等. 阿尔金山地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境[J]. 科学通报,1995,40(14): 1298-1300.
- [16]车自成,刘良,刘洪福,等. 阿尔金断裂系的组成及相关中生代含油气盆地的成因特征[J]. 中国区域地质,1998,17(4): 377-384.
- [17]刘良,车自成,罗金海,等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 科学通报,1996,41(16): 1485-1488.
- [18]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): 57-64.
- [19]Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. The Sm-Nd and U-Pb ages of eclogite[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44: 1109-1112.
- [20]Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogite from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China[J]. Lithos, 2001, 56: 187-206.
- [21]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.
- [22]崔军文,唐哲民,邓晋福,等. 阿尔金断裂系[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [23]曹玉亭. 南阿尔金造山带和柴北缘胜利口地区高压-超高压变质作用演化及其熔体活动[D]. 西北大学博士学位论文,2013.
- [24]Liu L, Che Z C, Wang Y, 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: 754-756.
- [25]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.
- [26]马中平,李向民,孙吉明,等. 阿尔金南缘长沙沟镁铁-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[J]. 岩石学报, 2009, 25(4): 793-804.
- [27] 马中平, 李向民, 徐学义, 等. 阿尔金南缘清水泉镁铁超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 1071-1078.
- [28] 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.
- [29] Whitney D L, Evans B W. Abbreviations for names of rock-forming minerals[J]. American Mineralogist, 2010, 95: 185-187.
- [30] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 11: 357-370.
- [31] Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of Zircon Textures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 469-500.
- [32] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [33] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 2002, 184: 123-138.
- [34] Rubatto D, Liati A, Gebauer D. Dating UHP metamorphism[J]. EMU Notes in Mineralogy, 2003, 5: 341-363.
- [35] Whitehouse M J, Platt J P. Dating high-grade metamorphism-constraints from rare-earth elements in zircons and garnet[J]. Contrib. Mineral Petrol., 2003, 145: 61-74.
- [36] 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等. 大别山黄镇榴辉岩锆石的微区微量元素分析: 榴辉岩相变质锆石的微量元素特征[J]. 科学通报, 2002, 47(11): 859-863.
- [37] 刘良, 曹玉亭, 陈丹玲, 等. 南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质作用研究新进展[J]. 科学通报, 2013, 58: 2113-2123.
- [38] 曹玉亭, 刘良, 王超, 等. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3257-3271.
- [39] 康磊, 刘良, 曹玉亭, 等. 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[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3039-3048.
- [40] Wang C, Liu L, Xiao P X, et al. Geochemical and geochronologic constraints for Paleozoic magmatism related to the orogenic collapse in the Qimantagh-South Altyn region, northwestern China [J]. Lithos, 2014, 202/203: 1-20.
- [41] 康磊, 刘良, 曹玉亭, 等. 南阿尔金西段镁铁-超镁铁质岩石的成因: 来自岩石地球化学特征和锆石 U-Pb 定年的约束[C]//2012 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 2012, 9: 376-377.
- ① 湖南省地质调查院基础地质调查所. 且末县一级水电站 1:25 万区域地质调查报告. 2003.