

# 阿尔金奇克山东斜长角闪岩地球化学、年代学及其成因意义

王立社<sup>1,2)</sup>, 李智明<sup>1)</sup>, 仇银江<sup>2)</sup>, 张耀选<sup>2)</sup>, 詹小弟<sup>3)</sup>

1) 中国地质调查局西安地质调查中心, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安, 710054;  
2) 新疆地质勘查基金项目管理中心, 乌鲁木齐, 830001; 3) 长安大学地球科学与资源学院, 西安, 710054

**内容提要:**阿尔金奇克山东斜长角闪岩岩石地球化学分析显示: 岩石  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高, 分别为 46.99% ~ 51.01% 和 13.85% ~ 15.82%,  $\text{MgO}$  和  $\text{FeO}^\text{T}$  值为 7.00% ~ 7.71% 和 12.4% ~ 13.5%, 属拉斑系列岩石; 主量元素  $\text{MgO}$  对  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{FeO}^\text{T}$  关系图及微量元素  $\text{Cr-Rb}$  和  $\text{Rb}/\text{Nb-Rb}/\text{Zr}$  关系图, 显示岩石演化过程中曾发生部分熔融和分离结晶作用; 轻稀土元素微富集指示岩浆可能经历了 10% ~ 20% 部分熔融和低程度分离结晶的演化。锆石  $\text{Lu-Hf}$  同位素特征表明原岩是由较球粒陨石稍分异的地幔岩浆形成, 岩浆的液相线温度为 1175 ~ 1251°C。微区定年揭示其岩石原岩年龄为 718 ± 22 Ma, 变质年龄为 502 ± 14 Ma。综合分析认为岩石非新太古代产物, 而是形成于新元古代 Rodinia 超大陆汇聚作用之后的伸展期, 早古生代经历了阿尔金南缘峰期变质作用, 表明此时阿尔金原古特提斯洋已经闭合。

**关键词:** 地球化学; U-Pb 年龄; Lu-Hf 同位素; 成因; 基性岩; 阿尔金

阿尔金左行走滑大断裂不仅是青藏高原北部一条重要的应力释放带 (Tapponier et al., 1977; Celal Sengon et al., 1992), 还是与伊朗高原西北缘安纳托利亚断裂相连构成的特提斯北缘巨型走滑断裂带 (Liu Liang et al., 1999)。上世纪 80 年代初, 区内发现早古生代深水沉积物和基性火山岩系 (Zhang Xianting et al., 1984), 才认识到它是一条长期演化的断裂构造带。近 20 多年来, 该区地质研究取得了一系列进展, 如北缘太古代麻粒岩相杂岩的确定 (Che Zicheng et al., 1996)、岩石组构各向异性研究 (Chen Bolin et al., 2014)、红柳沟-肃北县蛇绿岩和阿帕-茫崖蛇绿岩带的提出及初步研究 (He Guoqi et al., 1994; Lai Shaocong et al., 1996; Liu Liang et al., 1998, 1999; Xiao Peixi, 2003; Xiu Qunye et al., 2007; Qin Xiaofeng et al., 2007; Yang Jiansui et al., 2008; Cui Junwen, 2011; Dong Zengchan et al., 2011; Ma Zhongping et al., 2011; Tang zuo et al., 2011; Wang Chao et al., 2014)、区内高压变泥质岩石 (Che Zicheng et al., 1995, 2002) 和榴辉岩 (Liu Liang et al., 1996;

Zhang Jianxin et al., 1999, 2002, 2010; Liu Liang et al., 2007, 2010, 2012; Yang Jingsui et al., 2009; Xu Zhiqin et al., 2010) 的发现等, 从而揭示阿尔金为与板块俯冲-碰撞有关的构造带。沿阿尔金主断裂西段阿帕到中段茫崖, 全长约 700 km 的范围内, 北东东至北东向, 断续分布着 71 个规模不等的镁铁质-超镁铁质岩体, 在阿帕地段分布基性火山岩、枕状熔岩和硅质岩, 在茫崖附近也分布基性火山岩、安山岩、辉长岩及少量硅质岩, 它们呈透镜体状赋存于复理石及碳酸盐地层, 共同构成阿帕-茫崖蛇绿混杂岩带 (Liu Liang et al., 1999; Ma Zhongping et al., 2009)。近期笔者在该带奇克山地区 25 万瓦石峡幅区调报告厘定的新太古界米兰岩群第二岩组石英岩地层中发现一套斜长角闪岩, 该套岩石地球化学特征及同位素年龄等还未见相关研究报道, 本文首次对其研究以期为阿尔金构造演化提供新的线索。

## 1 区域地质背景

阿尔金造山带位于新疆、青海、甘肃省区的交界

注: 本文由国家自然科学基金(批准号: 41103021; 41272089; 41302051)、中国地质调查局项目(项目编码: 1212011220861)和陕西省科学技术研究发展计划项目(2014JM2-4037)资助。

收稿日期: 2015-02-02; 修回日期: 2015-09-08; 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 王立社, 男, 1976 年生, 高级工程师, 岩石学、矿物学、矿床学专业。Email: 804249689@qq.com。

地带,既是青藏高原北部的自然边界,又是西北主要大地构造单元(塔里木、柴达木以及东西昆仑、天山、柴北缘、祁连和北山构造带)的衔接地带,占有重要的构造位置。现有研究表明,阿尔金造山带在经历了太古代古老地壳形成和多期岩浆活动、古元古代(2500~1800 Ma)强烈改造和中基性岩浆侵入、新元古代(1000~800 Ma)碰撞造山和大规模的岩浆活动(Liu Yongshun, 2009)的基础之上,经早古生代板块相互俯冲—碰撞形成的复杂构造带,其后遭受中新生成走滑断裂系改造。依据不同地质体地质特征以及岩石学、地球化学和同位素年代学等方面信息,该造山带由北向南依次可划分为阿北变质地体、红柳沟—拉配泉构造混杂岩带、阿中米兰河—金雁山地块、阿南茫崖构造混杂岩带等4个构造单元(Xu Zhiqin et al., 1999; Liu Liang et al., 1999)。该套斜长角闪岩位于阿南茫崖构造混杂岩带内(图1)。

## 2 样品特征

斜长角闪岩自然出露于山坡角河流转弯处,视厚度6~8m,走向110°,围岩为石英岩,沿走向层状稳定延伸,追索未发现分叉侵入地层或捕掳体,显示非侵入原岩特征(图2a)。样品采自GPS坐标(公里

网格):15629329;4245090,岩石呈黑褐色块状或似片状构造、不等粒变晶结构(图2b)。矿物组成为:①角闪石约60%~80%,短柱状、粒柱状,粒径为0.05 mm×0.1 mm~0.8 mm×1.6 mm,具筛眼变晶构造(图2c);②更长石约15%~30%,他形粒状聚晶,粒径为0.5 mm~0.3 mm×0.4 mm,稍粗粒表面绢云母化,微细晶新鲜;③石英约4%,他形不等粒状聚晶,与长石斑杂聚合,粒径为0.05 mm~0.3 mm;④钛铁矿和榍石约1%,呈细晶散布,为角闪石次生蚀变析出矿物,粒径为0.02 mm~0.1 mm;⑤锆石少许,呈次圆状和短柱状微晶。

## 3 岩石地球化学特征

岩石地球化学分析测试在西安地质矿产研究所实验测试中心完成,主量元素采用 Panalytical公司产 PW4400型X萤光光谱仪(XRF)测定,分析误差低于5%;微量元素和稀土元素采用 Thermo Fisher公司产 X-series II型电感偶合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,相对标准偏差优于5%。测试结果如表1所示。

岩石SiO<sub>2</sub>含量46.99%~51.01%,为基性岩特征;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaO分别为13.85%~15.82%和9.55%~10.88%,含量较高;MgO为7.00%~

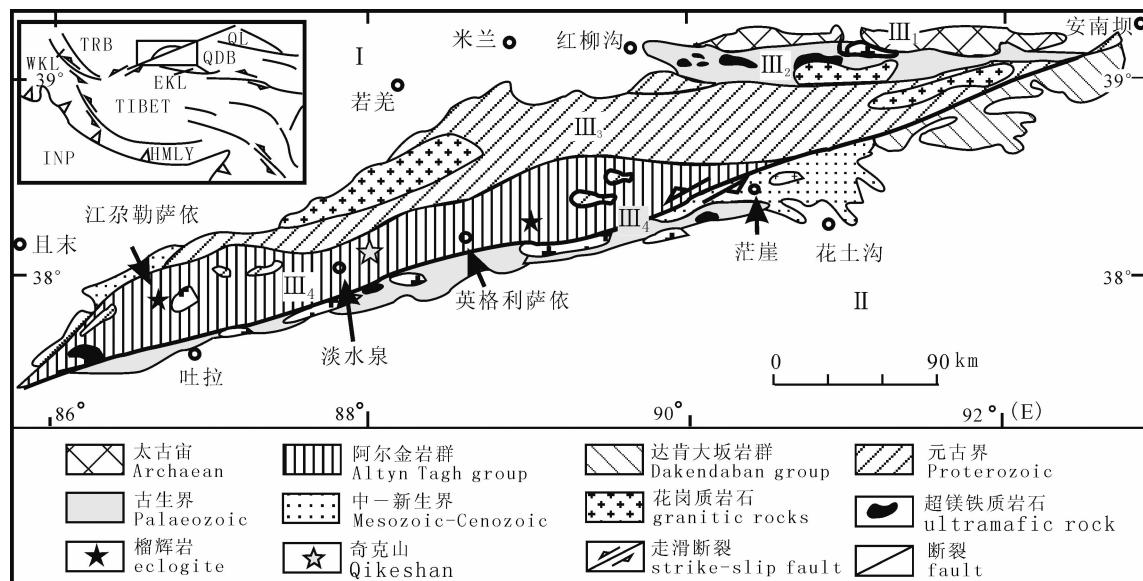


图1 阿尔金构造地质简图(据 Liu Liang et al., 2012 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Altyn Tagh (modified after Liu et al., 2012) and geological sketch map of ring mountain TRB—塔里木盆地; QL—祁连山; QDB—柴达木盆地; WKL—西昆仑; EKL—东昆仑; HMLY—喜马拉雅山; INP—印度板块; I—塔里木盆地; II—柴达木盆地; III<sub>1</sub>—阿北地块; III<sub>2</sub>—红柳沟—拉配泉蛇绿构造混杂岩带; III<sub>3</sub>—米兰河—金雁山地块; III<sub>4</sub>—阿尔金混杂岩带 TRB—Traim Basin; QL—Qilian Mountains; QDB—Qaidam Basin; WKL—Western Kunlun Mountains; EKL—Eastern Kunlun Mountains; HMLY—Himalaya; INP—Indian Plate; I—Tarim Basin; II—Qaidam Basin; III<sub>1</sub>—the north AltynArchean complex; III<sub>2</sub>—the north Altyn oceanic-type subduction complex; III<sub>3</sub>—the Milanhe-Jinyanshan block; III<sub>4</sub>—the south Altyn complex



图2 阿尔金奇克山东斜长角闪岩石及显微岩石学照片

Fig. 2 Gross feature and microstructures of amphibolites at east of Qikeshan in south Altyn Tagh

Pl—斜长石; Hbl—普通角闪石

Pl—Plagioclase; Hbl—hornblende

表1 阿尔金奇克山东斜长角闪岩主量元素(%)及微量元素( $\times 10^{-6}$ )化学组成Table 1 Major elements (%) and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) compositions of amphibolites at east of Qikeshan in south Altyn Tagh

	D04H1	D04H2	D04H3	D04H4	D04H5
SiO <sub>2</sub>	47.43	48.33	46.99	51.01	49.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.06	13.85	15.82	13.98	14.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.55	2.52	2.31	2.02	2.21
FeO	11.28	10.92	11.32	10.97	10.39
CaO	10.5	10.49	10.5	9.55	10.88
MgO	7.71	7.47	7.44	7.00	7.14
K <sub>2</sub> O	0.92	0.79	0.59	0.79	0.37
Na <sub>2</sub> O	0.97	0.99	1.23	0.97	1.49
TiO <sub>2</sub>	1.38	1.3	1.41	1.25	1.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.14	0.12	0.12	0.12
MnO	0.23	0.22	0.23	0.21	0.2
灼失*	2.8	2.93	2.00	2.07	1.74
总和	99.98	99.95	99.96	99.94	99.96
FeOT <sup>T</sup>	13.5	13.2	13.4	12.8	12.4
Mg <sup>#</sup>	50.6	50.5	50.0	49.7	51.0
DI	15.42	16.82	14.18	20.72	19.05
液相线温度	1235	1217	1251	1175	1199
SI	32.91	32.92	32.5	32.18	33.06
$\sigma_{43}$	0.65	0.49	0.69	0.35	0.46
m/f	1.01	1.00	0.98	0.97	1.02
k	7637	6558	4898	6558	3072
P	655	611	524	524	524
Ti	8271	7792	8451	7492	7732
La	9.22	8.01	7.98	8.42	7.19
Ce	21.6	18.9	19.7	19.6	17.8
Pr	2.92	2.7	2.73	2.66	2.53
Nd	12.8	12.2	12.2	12.1	11.4
Sm	3.69	3.25	3.42	3.05	3.11
Eu	1.16	1.07	1.16	0.98	1.04
Gd	4.2	3.76	4.01	3.68	3.8
Tb	0.74	0.69	0.72	0.66	0.67
Dy	4.92	4.5	4.83	4.41	4.56
Ho	1.05	0.98	1.06	0.96	0.98
Er	2.92	2.76	2.84	2.63	2.76

续表1

	D04H1	D04H2	D04H3	D04H4	D04H5
Tm	0.44	0.42	0.43	0.39	0.4
Yb	2.77	2.52	2.61	2.44	2.46
Lu	0.41	0.38	0.39	0.35	0.36
Y	23.8	21.7	21.5	19.8	20.8
$\Sigma$ REE	68.84	62.14	64.08	62.33	59.06
LREE	51.39	46.13	47.19	46.81	43.07
HREE	17.45	16.01	16.89	15.52	15.99
LREE/HREE	2.94	2.88	2.79	3.02	2.69
$\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$	2.25	2.15	2.07	2.33	1.98
$\delta\text{Eu}$	0.90	0.93	0.96	0.89	0.92
$\delta\text{Ce}$	0.97	0.95	0.99	0.97	0.98
Cu	96.6	91.9	109	121	115
Pb	312	427	30.1	42.7	53.4
Zn	355	566	115	111	199
Cr	132	132	154	114	150
Ni	79.3	81.7	91.9	73.3	84.5
Co	55.7	55.6	56.4	54	55.3
Rb	37.6	26.9	12	26.5	7.83
Cs	0.66	0.73	0.66	0.43	0.43
Sr	136	148	154	130	164
Ba	85	89.8	44.3	102	48
V	388	383	413	363	373
Sc	35.2	36.1	29	27.5	26.8
Nb	7.75	8.24	7.95	8.21	7.01
Ta	0.65	0.63	0.62	0.62	0.58
Zr	70.7	53.1	55.5	61.1	70
Hf	2.06	1.6	1.72	1.84	2.03
Ga	18.1	17.3	20.2	17.3	17.7
Ge	2.83	1.44	3.05	2.64	1.24
U	0.34	0.36	0.4	0.34	0.4
Th	1.9	1.19	1.01	1.09	0.88
$\text{Ta}/\text{Yb}$	0.235	0.25	0.238	0.254	0.236
$\text{Th}/\text{Yb}$	0.686	0.472	0.387	0.447	0.358
$\text{Th}/\text{Ta}$	2.92	1.89	1.63	1.76	1.52
$\text{Nb}/\text{La}$	0.841	1.03	0.996	0.975	0.975
$\text{Zr}/\text{Nb}$	9.12	6.44	6.98	7.44	9.99
$\text{Nb}/\text{Ta}$	11.92	13.08	12.82	13.24	12.09
$\text{Zr}/\text{Hf}$	34.32	33.19	32.27	33.21	34.48

7.71%，含量中等；全碱  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  为 1.76%~1.89%，含量低、较稳定，且  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ； $\text{TiO}_2$  为 1.25%~1.41%，含量稳定； $\text{FeO}^\text{T}$  值为 12.4%~13.5%。在火山岩石全碱-硅(TAS)分类图解上(Le Bas et al., 1986)样品落入了玄武岩区域(图 3a)，为亚碱性岩石；AFM 图解(图 3b)显示为拉斑系列玄武岩。岩石的镁铁比值  $m/f$  为 0.97~1.02<2，为富铁质基性岩石特征(Wu Liren, 1963)。岩石稀土总量  $\Sigma\text{REE}$ (不含 Y)为  $59.06 \times 10^{-6} \sim 68.84 \times 10^{-6}$ ，是球粒陨石含量的 10~30 倍。其中  $\Sigma\text{LREE}$  含量为  $51.39 \times 10^{-6} \sim 43.07 \times 10^{-6}$ ， $\Sigma\text{HREE}$  含量为  $15.99 \times 10^{-6} \sim 17.45 \times 10^{-6}$ ，轻稀土含量明显高于重稀土；稀土特征比值  $\text{LREE}/\text{HREE}$  和  $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$  分别为 2.69~2.94 及 1.98~2.33。球粒陨石标准化图解(图 4a)显示：所有样品轻稀土相对重稀

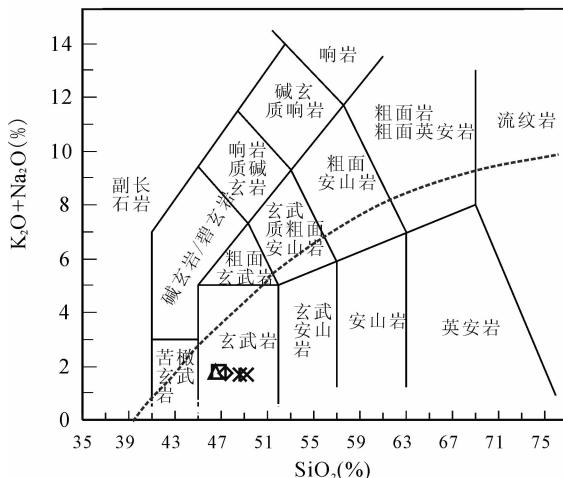


图 3 阿尔金奇克山东斜长角闪岩全碱硅分类图和岩石系列钾硅判别图

Fig. 3 Total alkali-silica diagram and  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  diagram of the amphibolites at east of Qikeshan in south Altyn Tagh

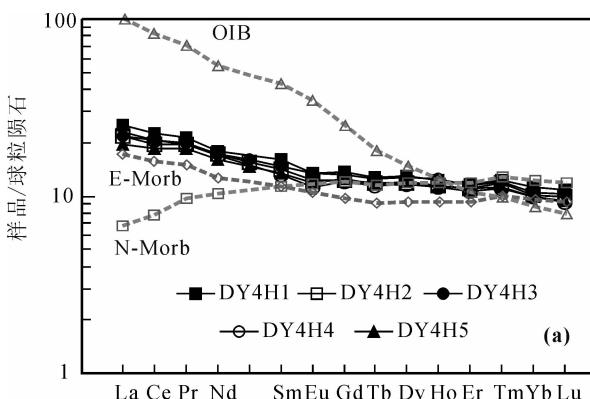


图 3 阿尔金奇克山东斜长角闪岩全碱硅分类图和岩石系列钾硅判别图  
及微量元素蛛网图解(标准化值据 Taylor et al., 1985)  
及微量元素蛛网图解(标准化值据 Sun et al., 1989)

土富集，模式曲线一致右倾，无明显分异，见有轻微的铕负异常( $\delta\text{Eu}=0.89\sim0.96$ )显示岩石演化过程中曾发生弱的斜长石分离结晶作用，显然，样品具有一致的源区和相似的演化过程。与洋岛玄武岩和 MORB 相比，岩石中稀土和重稀土与 MORB 相似，轻稀土比 MORB 略富集，但远贫于 OIB。原始地幔标准化蛛网图(图 4b)显示：岩石微量元素 Ta、Nb、La、Ce、Sr、Nd、P、Zr、Hf、Sm、Ti、Y、Yb 和 Lu 含量稳定，其 Nb、Ta 及 Th 元素没有明显异常，Sr 呈负异常。

#### 4 锆石 U-Pb 定年

锆石分选在廊坊区域地质调查研究院进行，将样品破碎至约  $100\mu\text{m}$ ，先用磁法和重液分选，然后在双目镜下手工挑选。锆石主要为淡黄色，少量黄

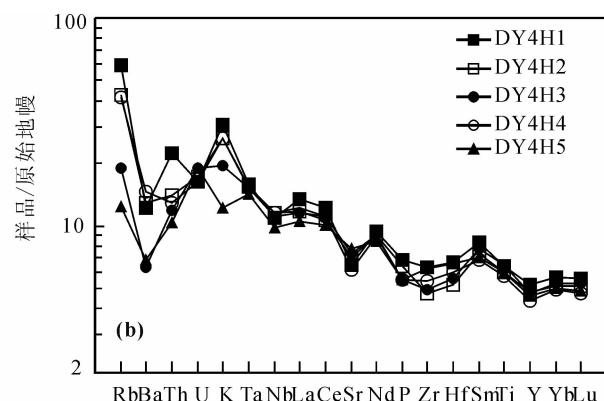
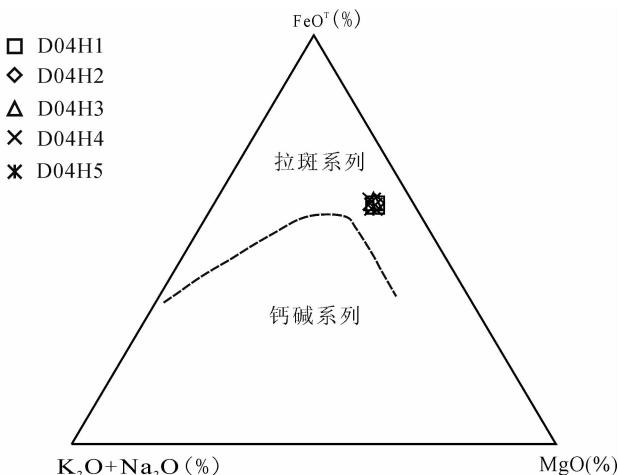
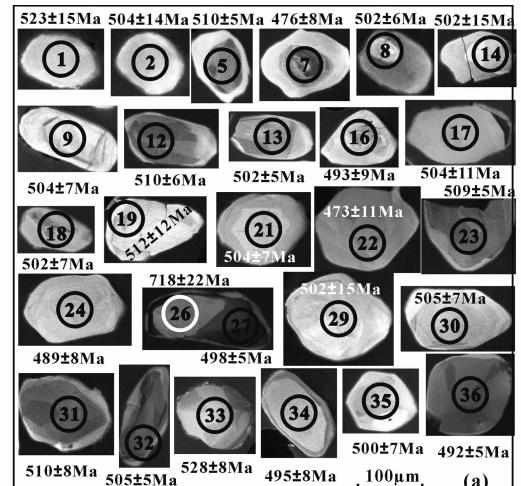


Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive-mantle normalized spider diagram for the amphibolites at east of Qikeshan in south Altyn Tagh (standard value after Taylor et al., 1985 and Sun et al., 1989)

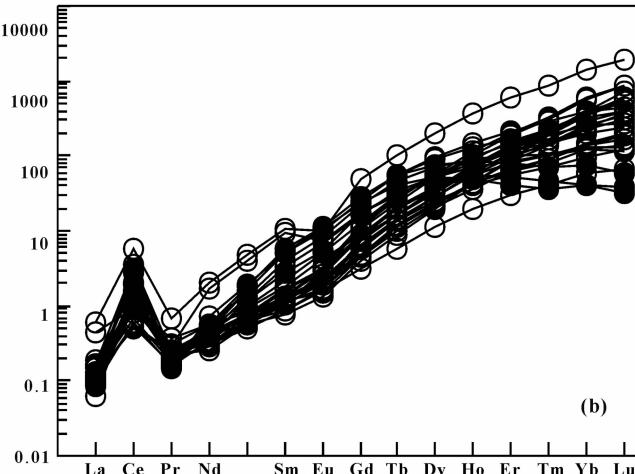
褐色、浅烟灰色,玻璃光泽。晶形以短柱状、双锥柱状为主,部分呈次圆状。

锆石 LA-ICP-MS 同位素定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行,首先用 DEVCON 环氧树脂将锆石固定,抛光至锆石核部露出,然后进行反射光和透射光以及阴极发光 CL 照相。锆石微区 U-Pb 同位素测定在 Agilent7500 型 ICPMS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193nm), 以及 MicroLa 公司的 GeoLas 200M 光学系统的联机上进行。激光束斑直径为 30 $\mu\text{m}$ , 剥蚀深度为 20~40 $\mu\text{m}$ 。年龄采用标准锆石 91500 和 GJ-1 作为外部标准物质, 元素含量采用 NIST610 作为外部标准物质。选择 29Si 作为内标来消除激光能量在点分析过程中和分析点之间的漂移。数据处理采用 Glitter (ver4.0) 程序, 年龄谐和图和加权平均年龄计算及

绘制均采用 Isoplot3(2006), 详细分析步骤和数据处理方法以及仪器工作参数等参见 Liu Xiaoming et al., (2002) 和 Yuan Honglin et al., (2003) 的文章。阴极发光图像(图 5a)显示, 锆石粒径一般小于 100 $\mu\text{m}$ , 晶体长宽比值在 1:1~2:3 之间; 锆石内部结构比较简单, 显示弱的宽缓环带或无分带, 部分具有次变质增生边缘, 如 5, 7 和 21 等。无分带及弱分带特征常是变质锆石的特征(Wu Yuanbao et al., 2004)。研究过程中对挑选出的锆石共进行了 36 次分析, 10 个测点信号较差且明显偏离谐和一致曲线, 可能与其  $^{204}\text{Pb}$  含量过高有关(Andersen, 2002), 删除后剩余 26 个锆石点 U-Pb 同位素年龄测试结果显示(表 2), 所测锆石的表面年龄除一个锆石为 718±22Ma(为继承性锆石)外, 其余为 473±11~528±8Ma 之间(图 5c), 在谐和图上集中于一处, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为 502±14Ma( $n=26$ )

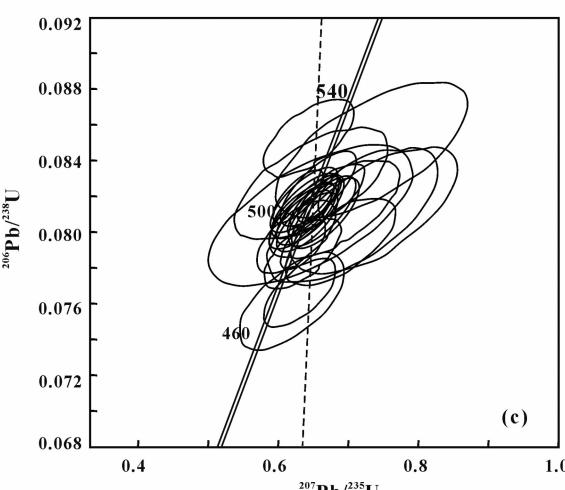


样品/球粒陨石



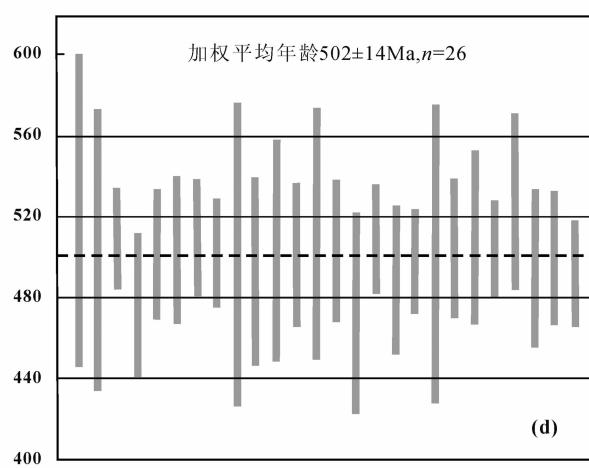
(b)

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$



(c)

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$



(d)

图 5 阿尔金奇克山东斜长角闪岩锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄和锆石球粒陨石标准化图解(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 CL images, U-Pb ages and chondrite-normalized REE pattern for zircons from the amphibolites at

east of Qikeshan in south Altyn Tagh (standard value after Sun et al., 1989)

表 2 阿尔金奇克山东斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学分析数据  
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb zircon age data for the amphibolites at east of Qikeshan in south Altyn Tagh

	同位素比值						表面年龄 (Ma)						元素含量 ( $\times 10^{-6}$ ) 及比值						$^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$\text{U}$	$\text{Th/U}$
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$\text{U}$	$\text{Th/U}$		
D003-01	0.0629	0.0079	0.7335	0.0901	0.0846	0.0025	0.0346	0.0031	704	246	559	53	523	15	687	60	3.2	3.23	10.19	0.32		
D003-02	0.0658	0.0072	0.7373	0.0785	0.0812	0.0024	0.0314	0.0023	800	214	561	46	504	14	624	45	4.23	4.56	12.78	0.36		
D003-05	0.0581	0.0019	0.6596	0.0177	0.0823	0.0009	0.0284	0.0011	534	70	514	11	510	5	566	22	36.68	12.37	115.66	0.11		
D003-07	0.0597	0.0035	0.6309	0.0347	0.0767	0.0013	0.0363	0.0045	593	122	497	22	476	8	720	88	14.41	4.68	46.28	0.10		
D003-08	0.0570	0.0027	0.6364	0.0280	0.0810	0.0011	0.0298	0.0036	491	103	500	17	502	6	593	71	13.83	3.78	33.92	0.11		
D003-09	0.0590	0.0031	0.6617	0.0322	0.0813	0.0012	0.0270	0.0016	569	111	516	20	504	7	538	31	16.82	9.73	52.04	0.19		
D003-12	0.0607	0.0022	0.6901	0.0214	0.0824	0.0009	0.0268	0.0007	630	76	533	13	510	6	535	14	33.14	29.08	97.64	0.30		
D003-13	0.0577	0.0022	0.6452	0.0207	0.0810	0.0009	0.0241	0.0012	520	80	506	13	502	5	481	24	23.31	7.86	73.65	0.11		
D003-14	0.0579	0.0087	0.6457	0.0958	0.0809	0.0026	0.0251	0.0038	525	301	506	59	502	15	501	75	2.97	1.95	9.38	0.21		
D003-16	0.0629	0.0049	0.6890	0.0519	0.0795	0.0016	0.0300	0.0019	704	158	532	31	493	9	597	38	5.82	3.92	16.53	0.24		
D003-17	0.0606	0.0057	0.6788	0.0619	0.0813	0.0018	0.0331	0.0084	624	191	526	37	504	11	658	164	3.88	1.67	11.8	0.14		
D003-18	0.0568	0.0032	0.6332	0.0328	0.0809	0.0012	0.0276	0.0015	481	119	498	20	502	7	551	30	11.79	6.7	35.41	0.19		
D003-19	0.0568	0.0065	0.6478	0.0725	0.0827	0.0021	0.0321	0.0028	483	235	507	45	512	12	639	55	3.93	3.00	11.48	0.26		
D003-21	0.0596	0.0030	0.6682	0.0312	0.0813	0.0012	0.0298	0.0025	590	106	520	19	504	7	593	48	13.36	3.45	39.99	0.09		
D003-22	0.0590	0.0050	0.6198	0.0500	0.0762	0.0018	0.0218	0.0016	568	173	490	31	473	11	436	31	12.24	8.86	40.17	0.22		
D003-23	0.0560	0.0020	0.6349	0.0197	0.0822	0.0009	0.0243	0.0013	452	79	499	12	509	5	486	25	29.83	8.38	80.84	0.10		
D003-24	0.0584	0.0036	0.6346	0.0364	0.0788	0.0013	0.0314	0.0024	545	128	499	23	489	8	626	48	8.73	3.12	26.68	0.12		
D003-26	0.0667	0.0072	1.0838	0.1139	0.1178	0.0038	0.0802	0.0061	829	210	746	56	718	22	1559	114	7.11	4.96	17.19	0.29		
D003-27	0.0593	0.0021	0.6562	0.0191	0.0803	0.0009	0.0292	0.0026	577	74	512	12	498	5	581	51	43.55	13.19	113.6	0.12		
D003-29	0.0632	0.0074	0.7059	0.0803	0.0810	0.0025	0.0320	0.0032	716	230	542	48	502	15	637	62	4.79	3.29	14.17	0.23		
D003-30	0.0577	0.0029	0.6475	0.0301	0.0815	0.0012	0.01526	0.0031	516	108	507	19	505	7	311	63	14.08	4.35	38.52	0.11		
D003-31	0.0575	0.0035	0.6526	0.0375	0.0824	0.0014	0.0261	0.0028	509	129	510	23	510	8	521	55	19.37	4.03	50.35	0.08		
D003-32	0.0570	0.0017	0.6403	0.0153	0.0815	0.0008	0.0237	0.0030	491	66	503	9	505	5	473	59	54	5.92	89.68	0.07		
D003-33	0.0547	0.0038	0.6437	0.0427	0.0853	0.0014	0.0292	0.0021	402	148	505	26	528	8	582	41	7.74	3.62	21.11	0.17		
D003-34	0.0570	0.0036	0.6263	0.0373	0.0798	0.0013	0.0288	0.0028	490	134	494	23	495	8	575	55	8.13	2.27	23.72	0.10		
D003-35	0.0576	0.0029	0.6407	0.0293	0.0806	0.0011	0.0284	0.0022	516	106	503	18	500	7	566	44	16.23	5.78	47.9	0.12		
D003-36	0.0582	0.0022	0.6362	0.0211	0.0793	0.0009	0.0218	0.0016	536	82	500	13	492	5	436	31	20.93	4.15	62.05	0.07		

表3 阿尔金奇克山东斜长角闪岩锆石原位稀土元素分析结果

Table 3 LA-ICP-MS trace element compositions of zircons from the amphibolites at east of Qikeshan in south Altyn Tagh

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LRREE/HREE	δEu	δCe
D003-01	0.02	0.73	0.02	0.19	0.18	0.14	0.46	5.99	2.48	10.58	2.09	20.43	3.49	81.47	47.78	1.28	46.50	0.03	0.78	7.82	
D003-02	0.02	0.80	0.01	0.21	0.16	0.17	1.58	0.60	8.32	3.48	16.80	3.63	37.79	7.62	115.59	81.18	1.36	79.82	0.02	0.67	11.82
D003-05	0.02	2.18	0.02	0.22	0.79	0.56	5.22	2.03	23.91	8.53	35.77	7.18	67.89	11.51	277.26	165.83	3.79	162.04	0.02	0.64	26.63
D003-07	0.03	0.94	0.02	0.18	0.52	0.40	3.45	1.28	13.33	3.94	14.48	2.58	21.84	3.25	135.22	66.24	2.08	64.15	0.03	0.67	8.98
D003-08	0.03	0.41	0.02	0.21	0.18	0.15	1.73	0.60	8.61	3.81	19.94	4.94	58.10	13.39	128.11	112.12	1.00	111.12	0.01	0.55	4.51
D003-09	0.04	0.98	0.03	0.77	1.48	0.42	3.50	1.16	13.47	5.16	25.43	5.80	62.90	13.24	168.87	134.38	3.73	130.66	0.03	0.54	6.84
D003-12	0.14	3.58	0.07	0.93	1.67	0.60	10.26	3.92	50.85	20.26	99.49	22.39	236.18	47.63	622.98	497.97	6.99	490.98	0.01	0.34	9.06
D003-13	0.02	2.14	0.02	0.21	0.63	0.49	4.61	1.71	17.97	5.11	16.52	2.63	20.97	2.95	166.51	75.98	3.51	72.47	0.05	0.64	20.56
D003-14	0.02	0.64	0.02	0.14	0.13	0.10	0.63	0.21	2.86	1.10	5.10	1.06	10.04	1.72	38.55	23.79	1.06	22.73	0.05	0.83	7.16
D003-16	0.03	1.24	0.02	0.23	0.28	0.24	1.85	0.77	9.66	4.04	20.94	5.02	59.14	13.38	133.36	116.84	2.04	114.80	0.02	0.78	11.18
D003-17	0.03	0.32	0.02	0.15	0.16	0.12	1.23	0.51	6.41	2.28	9.08	1.77	16.75	3.13	76.40	41.95	0.80	41.16	0.02	0.59	2.84
D003-18	0.03	0.76	0.02	0.17	0.25	0.19	2.28	0.99	13.83	6.39	33.85	8.48	100.86	22.63	207.83	190.72	1.42	189.31	0.01	0.50	6.64
D003-19	0.03	0.36	0.02	0.19	0.21	0.14	1.38	0.54	7.25	3.17	15.91	3.70	42.42	9.07	99.58	84.37	0.93	83.44	0.01	0.58	3.34
D003-21	0.04	0.71	0.02	0.13	0.21	0.19	2.44	1.08	13.38	4.61	19.16	3.75	34.49	6.16	149.99	86.36	1.30	85.07	0.02	0.49	6.59
D003-22	0.03	0.70	0.02	0.14	0.25	0.18	2.24	0.86	12.84	5.64	31.04	7.79	93.74	21.83	187.92	177.29	1.31	175.98	0.01	0.49	7.64
D003-23	0.04	1.93	0.01	0.33	0.76	0.65	5.71	2.08	22.52	7.30	27.43	4.94	42.58	6.83	228.72	123.11	3.72	119.39	0.03	0.68	19.69
D003-24	0.03	0.60	0.02	0.22	0.13	0.10	1.21	0.50	7.00	3.36	18.42	4.93	61.39	15.43	110.07	113.34	1.10	112.24	0.01	0.51	5.25
D003-26	0.03	0.70	0.02	0.21	0.20	0.17	1.74	0.74	9.04	3.20	13.33	2.53	23.46	4.23	104.95	59.60	1.33	58.27	0.02	0.59	6.18
D003-27	0.03	0.60	0.02	0.15	0.17	0.10	1.00	0.42	5.66	2.39	10.76	2.33	24.01	4.85	78.10	52.48	1.06	51.42	0.02	0.59	5.64
D003-29	0.02	0.38	0.01	0.17	0.27	0.18	1.86	0.72	9.32	3.89	18.80	4.35	48.59	9.98	119.93	98.53	1.03	97.51	0.01	0.58	5.12
D003-30	0.02	0.57	0.02	0.12	0.19	0.11	1.47	0.62	9.38	4.33	22.41	5.40	64.78	14.34	141.01	123.77	1.04	122.73	0.01	0.46	6.15
D003-31	0.03	1.67	0.02	0.23	0.42	0.31	3.46	1.21	11.89	3.07	8.61	1.14	7.11	0.81	99.08	39.99	2.68	37.31	0.07	0.55	18.30
D003-32	0.04	0.49	0.03	0.27	0.18	0.09	0.95	0.37	5.37	2.03	10.05	2.28	25.46	4.95	75.21	52.55	1.09	51.46	0.02	0.53	3.51
D003-33	0.11	0.57	0.03	0.26	0.18	0.12	0.91	0.41	5.65	2.53	13.66	3.46	41.22	9.37	83.08	78.49	1.28	77.21	0.02	0.75	2.31
D003-34	0.03	1.24	0.02	0.24	0.80	0.61	4.77	1.50	12.87	2.72	6.90	0.93	6.95	0.99	85.06	40.58	2.95	37.63	0.08	0.74	11.59
D003-35	0.04	1.18	0.01	0.21	0.34	0.29	2.57	1.10	13.55	5.39	24.68	5.38	55.27	10.15	177.75	120.15	2.07	118.09	0.02	0.68	12.50
D003-36	0.02	1.78	0.02	0.27	0.90	0.66	5.84	2.03	19.03	4.69	12.83	1.77	12.61	1.46	149.20	63.91	3.65	60.27	0.06	0.66	19.51

=26, MSWD=0.079, probability=1)(图 5d)。锆石微量元素分析结果显示(表 2,3):锆石的稀土含量较高  $\Sigma\text{REE}$  为  $(23.79 \sim 497.97) \times 10^{-6}$ , 重稀土富集, 稀土模式曲线向左倾( $\text{LREE}/\text{HREE} = 0.01 \sim 0.08$ );所有测点都具有明显的 Ce 正异常( $\delta\text{Ce} = 2.31 \sim 26.63$ )和 Eu 弱的负异常( $\delta\text{Eu} = 0.34 \sim 0.83$ )(图 5b)。由于  $\text{Ce}^{4+}$  离子半径与 Zr 相近, 比其它轻稀土元素更易进入到锆石晶格中, 因而所有测点都具有明显一致的 Ce 正异常。锆石 Eu 的负异常, 通常是锆石结晶同期有少量斜长石结晶造成部分 Eu 进入到长石中。样品的 Th, U 含量分别为  $(1.67 \sim 29.08) \times 10^{-6}$ ,  $(9.38 \sim 115.66) \times 10^{-6}$ , 其 Th/U 值为  $0.07 \sim 0.36$ , 平均 0.17, 与变质重结晶或变质增生锆石具有较低的 Th/U 值(Vavra et al., 1996; Rubatto et al., 1999)特征一致。因而本文所测得的锆石 U-Pb 年龄  $502 \pm 14\text{ Ma}$  应是变质成因锆石, 这与阿尔金峰期变质年龄也是一致的。 $718 \pm 22\text{ Ma}$  的表面年龄测点位于继承性锆石的核心部位(图 5a), 其 Th/U 值为 0.29, 因此该年龄应该代表了斜长角闪岩原岩形成年龄。

## 5 讨论

### 5.1 锆石 Lu-Hf 同位素特征

锆石 Hf 同位素分析是基于阴极发光图像和 U-Pb 定年测试的基础上进行的。锆石 Lu-Hf 同位素原位分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 质谱端测试仪器为 NuPlasmaHR 多接杯电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS), 激光剥蚀系统为 Geolas2005193nm 准分子激光取样系统。实验条件为:脉冲频率 8Hz, 能量 100mJ, 束斑直径为  $44\mu\text{m}$ ,

激光剥蚀频率为 10Hz, 以 He 为剥蚀物质载气。所用标样为 MON-1, 91500 和 GJ-1。用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ (De Bievre et al., 1993) 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ (Chu N C et al., 2002) 进行同量异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值。实验流程及详尽的分析技术见 Yuan H L et al. (2008)。

由于 Hf 元素与 Zr 化学性质相似, 因此锆石中 Hf 含量较高, 同时 Lu 的含量又极低, 此外, 锆石形成后通常只有较少量的放射成因 Hf 积累, 从而使得 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值非常低, 获得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值能够代表其形成时体系的 Hf 同位素组成(Wu Fuyuan et al., 2007)。一般而言, 不同地球化学储库单元锆石 Hf 同位素组成有别, 如亏损地幔和球粒陨石其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值与富集地幔和地壳相应的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值与  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值区间范围有差别(Wu Fuyuan et al., 2007), 并据此提出了重要地球化学储源库的同位素特征图(图 6), 可见锆石 Hf 同位素组成能够有效的示踪岩浆源区。本文斜长角闪岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果显示(表 4),  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值主要介于  $0.000019 \sim 0.000531$  之间(均小于 0.002), 因此所测样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值可以代表其形成时体系的 Hf 同位素特征。所测 6 个锆石点位 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值主要介于  $0.282659 \sim 0.282765$ , 平均为  $0.282689$ ;  $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$  值为  $-0.26 \sim -4.00$ , 平均为  $-2.928$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $7.43 \sim 11.83$ , 均大于 0, 且平均值为 8.938; 锆石的一阶段模式年龄  $T_{\text{DM1}}$  值和二模式阶段年龄  $T_{\text{DM2}}$  值分别为  $682 \sim 820\text{ Ma}$  和  $734 \sim 902\text{ Ma}$ 。变质锆石模式年龄、Hf 同位素特征与原岩锆石相近, 表明变质锆石继承了原岩的特征。

表 4 阿尔金奇克山东斜长角闪岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 4 Lu-Hf isotope data for zircons from the amphibolites at east of Qikeshan in south Altyn Tagh

分析点	年龄(Ma)	1s	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2SE	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2SE	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2SE	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$T_{\text{DM1}}$ (Ma)	$T_{\text{DM2}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
D003NL2-08	502	6	0.006745	0.000016	0.000262	0.000001	0.282690	0.000011	-2.89	1.10	8.09	1.11	780	866	-0.99
D003NL2-12	510	6	0.014122	0.000016	0.000531	0.000000	0.282765	0.000006	-0.26	1.05	10.80	1.06	682	734	-0.98
D003NL2-17	504	11	0.000944	0.000007	0.000025	0.000000	0.282668	0.000006	-3.67	1.05	7.43	1.08	806	902	-1.00
D003NL2-31	510	8	0.000961	0.000003	0.000019	0.000000	0.282668	0.000007	-3.68	1.06	7.56	1.07	806	900	-1.00
D003NL2-26	718	22	0.002341	0.000024	0.000076	0.000001	0.282659	0.000009	-4.00	1.07	11.83	1.18	820	852	-1.00
D003NL2-29	502	15	0.005717	0.000023	0.000214	0.000001	0.282685	0.000007	-3.07	1.05	7.92	1.11	787	875	-0.99

### 5.2 岩石成因

岩石具有较高的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 在 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  与锆石 U-Pb 年龄地球化学储源库的同位素特征图解中(图 6), 该区样品位于球粒陨石和亏损地幔两条演化线之间区域, 表明岩石由较球粒陨石

稍分异的亏损地幔岩浆演化形成。在岩浆演化过程中 Ni、Mg 等被橄榄石、辉石或尖晶石容纳, 随着岩浆的演化而变贫, 因此, 这些元素的含量和岩石固结指数  $\text{SI} = 100\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  能够反映基性岩石与原生岩浆的关系, 大

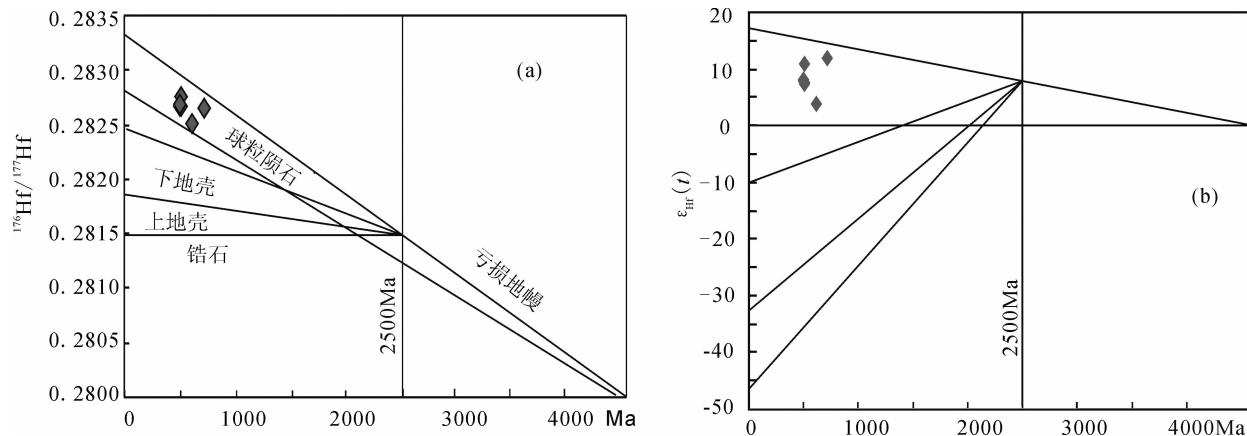
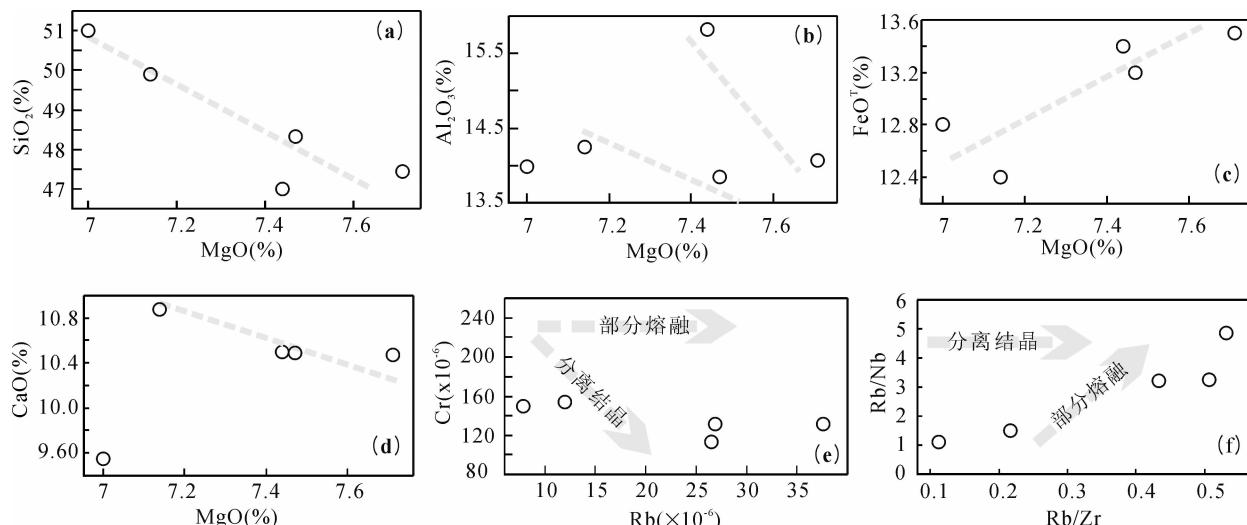


图 6 阿尔金奇克山东斜长角闪岩锆石 Hf 同位素特征

Fig. 6 Zircon Hf isotopic features for the amphibolites at east of Qikeshan in south Altyn Tagh

多数原生基性岩浆的固结指数为 40 左右或更大,当发生结晶分异时,SI 值降低。本文岩石 SI 值为 32.18~33.06,MgO(7.00%~7.71%) 及 Ni( $73.3 \times 10^{-6}$ ~ $91.9 \times 10^{-6}$ ) 含量较低,Mg<sup>#</sup> 值为 49.7~51.0 小于原始岩浆玄武岩 68~78(Wang Renjing, 1984),MgO 与 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO<sup>T</sup>、CaO(图 7a,b,c,d) 元素对具有明显负相关性或正相关性,显示岩石经历过橄榄石、辉石、斜长石等结晶分异作用。岩石分异指数 DI 为 14.18~20.72,表明岩石的分异程度不高。Cr-Rb 和 Rb/Nb-Rb/Zr 关系图(图 7e,f) 中,样品沿部分熔融演化和结晶分异作用趋势线方向分布,部分熔融作用明显。关于部分熔融的程度,研究表明亏损地幔源区的部分熔融程度低于 10 时,形成的岩浆强烈富集轻稀土和强不相容元素(Cullers et al., 1984),当部分熔融程度超过 20% 时,形成的岩浆亏损轻稀土和强不相容元素

(Haskin, 1984)。本文岩石的轻稀土较富集,因此其部分熔融程度应该是大于 10% 而小于 20% 的。锆石 Lu-Hf 同位素所测样品显示具有年轻的  $t_{\text{DM}}$  和高的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值,这说明源区未遭受过明显的古老大陆岩石圈地幔混染。那么岩石形成的过程中是否存在地壳的混染作用呢?前人研究表明,Nb 和 Ti 的低含量以及 Th/Ta>1 和 Nb/La<1 是判断地壳混染的可靠微量元素指标(Saunders et al., 1992),奇克山斜长角闪岩 Th/Ta 为 1.52~2.92>1, Nb/La 值除一个样品为 1.03 外,其余样品 0.841~0.996<1, Th/Ta 和 Nb/La 值都比较接近 1, Nb 和 Ta 没有明显亏损。由于岩石未受到围岩明显的混染作用,可以利用路远发研究员地球化学软件 Geokit 进行估算(Lu Yuanfa, 2004),结果显示岩浆的液相线温度为 1175~1251℃,处于玄武岩浆 1000~1300℃ 正常范围内。

图 7 阿尔金奇克山东斜长角闪岩 MgO-SiO<sub>2</sub>, MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO-FeO<sup>T</sup>, MgO-CaO, Cr-Rb, Rb/Nb-Rb/Zr 关系图Fig. 7 Variation diagrams for MgO-SiO<sub>2</sub>, MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO-FeO<sup>T</sup>, MgO-CaO,

## 6 结论

奇克山东斜长角闪岩呈层状,上下围岩为石英岩,岩石地球化学特征显示斜长角闪岩原岩应为玄武岩,测得的  $718 \pm 22$  Ma U-Pb 同位素年龄代表了玄武岩的年龄,从而表明斜长角闪岩及石英岩原岩形成于新元古代成冰纪,因此关于该套岩石是否属于新太古界米兰岩群第二岩组需要重新认识。前人研究认为,阿尔金地区 Rodinia 超大陆汇聚作用之后,在新元古代开始逐渐转向裂解,直至形成原古特提斯洋(Lu Songnian, 1998)。斜长角闪岩  $718 \pm 22$  Ma 原岩年龄的发现说明,在成冰纪阿尔金奇克山地区就已开始裂解,在此地质背景之下,亏损地幔岩经历  $10\% \sim 20\%$  的部分熔融(岩浆的液相线温度为  $1175 \sim 1251^\circ\text{C}$ )和程度不高的结晶分异作用后喷流形成玄武岩。随原古特提斯洋闭合、陆壳深俯冲及其折返作用的发生(Yang Jingsui et al., 2009; Xu Zhiqin et al., 2010),在阿尔金南缘形成  $487 \sim 493$  Ma 左右高压—超高压变质岩带(Che Zicheng et al., 2002; Liu Liang et al., 2007, 2012; Zhang Jianxin et al., 1999, 2010; et al., Wang Lishe 2015a, 2015b),斜长角闪岩  $502 \pm 14$  Ma 变质年龄与其一致,显示阿尔金南缘中段地区岩石在早古生代也遭受了该期变质作用。

## References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geol.*, 192(1/2): 59~79.
- Celal Sengon A M and Barka A A. 1992. Evolution of escape-related strike-slip system: implication for disruption of collisional orogens. 29th International Geological Congress, Abstracts., Volume 1: 232.
- Che Z C and Sun Y. 1996. The age of the Altun granulite facies complex and the basement of the Tarim basin. *Regional Geology of China*, (1): 51~57. (in Chinese with English abstract).
- Che Z C, Liu L and Luo J H. 2002. Regional Tectonics of China and Its Adjacent Areas. Beijing: Science Press, 354~386. (in Chinese without English abstract).
- Che Zicheng, Liu liang, Liu Hongfu and Luo Jinhai. 1995. Discovery and occurrence of high-pressure metapelitic rocks in Altun Mountain areas, Xinjiang Autonomous Region. *Chinese Science Bulletin*, 40(23): 1988~1991. (in Chinese without English abstract).
- Chen Bolin, Cui Lingling, Chen Zhengle. 2014. EBSD Fabrics Analysis of Deformed Rocks from Kaladawan Area, Altun Mountains, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 88(8): 1475~1484.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C R, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections. *J. Anal. At. Spectrom.*, 17: 1567~1574.
- Cui J W. 2011. Ductile shearing age of the south Altun fault and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3422~3434. (in Chinese with English abstract).
- Cullers R L and Graf J L. 1984. Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: predominantly basic and ultrabasic rocks. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Armsterdam: Elsevier Science Publishers, 137~274.
- De Bievre and Taylor PDP. 1993. Table of the isotopic composition of the elements. *Int J Mass Spectrom, Lon Processes*, 123: 149.
- Dong Z C, Xiao P X, Xi R G, Guo L, Gao X F. 2011. Geochemical Characteristics and Isotopic Dating of Bojites in the Tectonic Melange Belt on South Margin of Altun. *Geological Review*, 57(2): 207~216. (in Chinese with English abstract).
- Haskin L A. 1984. Petrogenetic modelling-use of rare earth elements. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Science, 115~152.
- He G Q, LI MS, LIU D Q, Tang Y L and Zhou R H. 1994. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China. Wulumuqi: The People's Publishing House of Xinjiang, 43~47. (in Chinese without English abstract).
- Lai S C, Deng J F and Zhao H L. 1996. The volcanism and tectonic evolution of the margin of Qingzang Plateau, Xi'an: The Science and Technique Publishing House of Shaanxi, 74~96. (in Chinese without English abstract).
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streiken A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745~750.
- Liu L, Che Z C, Luo J H, Wang Y, Gao J Z. 1996. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 42: 931~934. (in Chinese without English abstract).
- Liu L, Che Z C, Wang Y, Luo J H, Wang J Q, Gao Z J. 1998. The evidence of Sm-Nd isochron age for the early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 43(8): 880~883. (in Chinese without English abstract).
- Liu L, Zhang A D, Chen D L, Yang J X, Luo J H and Wang C. 2007. Implications based on LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 98~107. (in Chinese with English abstract).
- Liu L, Che Z C, Wang Y, Luo J H and Chen D L. 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, Wang C, Cao Y T, Chen D L, Kang L, Yang W Q and Zhu X H. 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.
- Liu X M, Yuan H L, Bodo Hatten, Dorf Günther, Chen Liang, Hu Shenghong. 2002. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193nm La-ICP-MS. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3):408~418. (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Yu H F, Xin H T, Lu S N, Xiu Q Y, Li Q. 2009. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China. *Geological Bulletin of China*, 28 (10): 1430 ~ 1438. (in Chinese with English abstract).
- Lu S N. 1998. A review of advance in the research on the Neoproterozoic Rodinia supercontinent. *Geological review*, 44 (5):489~495. (in Chinese with English abstract).
- Lu Y F. 2004. GeoKit- A geochemical toolkit for Microsoft Excel. *Geochimica*, 33 (5): 459 ~ 464. (in Chinese with English abstract).
- Ma Z P, Li X M, Xu X Y, Sun J M, Tang Z, Du T. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic-ulmafic intrusion southern Altun orogen, in northwestern China and its implication. *Geology In China*, 38(4):1071 ~ 1078 (in Chinese with English abstract).
- Ma Z P, Li X M, Sun J M, Xu Xueyi, Lei Yongxiao, Wang Lishe, Duan Xingxing. 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).
- Qin X F, Xia B, Li J, Lu J P, Xu H, Zhou F S, Hu G A, Li Q. 2007. Geochemical characteristics and tectonic setting of the Early Paleozoic green schist in the western segment of the southern Altyn Tagh marginal tectonic belt. *Geology in China*, 34(5):799~805(in Chinese with English abstract).
- Rubatto D, Gebauer G, Compagnoni R. 1999. Dating of eclogite-facies zircons: The age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 167: 141~158.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, Norry M J. 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: Storey BC, Al abaster T, Pankhurst RJ(eds). *Magma and the Causes of continental Break up*. London: Geological Society Special Publication, 68:41~60.
- 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.
- Tang Z, Ma Z P, Li X M, Sun J M. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of amphibolite in the southern margin of Altyn Tagh, China and its geological implication. *Geological Bulletin of China*, 30(1):51~57. (in Chinese with English abstract).
- Tapponier P and Molnar P. 1977. Active faulting and Cenozoic tectonics of China. *J. Geophys. Res.*, 82:20.
- Taylor S R, Mclellan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition of melts and Evolution*. Black well: Ox ford Press: 312.
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R, Compston W. 1996. Multiple zircon-growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib. Mineral Petrol.*, 122: 337~358.
- Wang C, Liu L, Xiao P X, Cao Y T, Yu H Y, Meert J G, Liang W T. 2014. Geochemical and geochronologic constraints for Paleozoic magmatism related to the orogenic collapse in the Qimantagh-South Altyn region, northwestern China. *Lithos*, 202~203:1~20.
- Wang L S, Li Z M, Qiu Y J, Yang P F, Jiang H B, Duan X X, Zhan X D. 2015b. Geochemistry and Geological Significance of Eclogite from Huanxingshan in Altyn Tagh. *Xinjiang Geology*, 33(2):143~151. (in Chinese with English abstract).
- Wang L S, Zhang W, Duan X X, Long X P, Ma Z P, Song Z B and Sun J M. 2015a. Isotopic age and genesis of the monzogranitic gneiss at the huanxing hill in middle altyn tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 119 ~ 132 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185~220. (in Chinese with English abstract).
- Wu L R. 1963. Minerogenetic specialization of mafic-ultramafic rocks in China. *Scientia Geologica Sinica*, (1): 29 ~ 41. (in Chinese without English abstract).
- Wu Y B, Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Sciences Bulletin*, 49(16): 1589~1604. (in Chinese without English abstract).
- Xiao P X. 2003. The geological features of Suwusgijie rock body (group) in Altyn Tagh middle-zone. *Northwestern Geology*, 36 (3): 14~23. (in Chinese with English abstract).
- Xiu Q Y, Yu H F, Liu Y S, Lu S N, Mao D B, Li HM and Li S. 2007. Geology and zircon U-Pb age of pillow basalt at Qiashikan soy in Northern Altun Tagh, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 81 (6):787~794. (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Yang J S, Ji S C, Zhang Z M, Li H B, Liu F L, Zhang J X, Wu C L, Li Z H, Liang F H. 2010. On the Continental Tectonics and Dynamics of China. *Acta Geologica Sinica*, 84 (1):1~29. (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X, Jiang M, Li H B and Cui J W. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altyn sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3):193~205. (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, Zhang Z M, Liu F L and Wu C L.

2009. Tectonic setting of main high-and ultrahigh-pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1529~1560. (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Shi R D, Wu C L, Su D C, Chen S Y, Wang X B and Wooden J. 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, north Altun, at the northern margin of the Tibetan plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (7): 1567~1584. (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Wu F Y, Gao S, Liu X M, Xu P and Sun D Y. 2003. La-ICP-MS zircon U-Pb age and REE of Cenozoic pluton in NE China. *Chinese Science Bulletin*, 48 (14): 1511 ~ 1520. (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Günther D, Fontaine G H, Liu X M and Diwu C R. 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 J X, Meng F C and Yu S Y. 2010. Two contrasting HP / LT and UHP metamorphic belts: Constraint on Early Paleozoic orogeny in Qilian-Altun orogeny. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7): 1967~1992. (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q. 2002. Evidence for the ultrahigh pressure metamorphism in Altyn eclogite. *Chinese Science Bulletin*, 47 (3): 231 ~ 234. (in Chinese without English abstract).
- Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, Yang J S, Cui J W. 1999. The age of U-Pb and Sm-Nd for eclogite from the west Altyn Mountains tectonic belt: the evidence for existence of Caledonian orogenic root. *Chinese Science Bulletin*, 44: 1109 ~ 1112. (in Chinese without English abstract).
- Zhang X T, Zheng J K, Gou J S, Liao X S, Hong Z S and Liu J M. 1984. The Discovery of late Ordovician strata of geosynclinal type in the eastern segment of the Altun Mountains and their tectonic implications. *Geological Review*, 30(2): 184~186. (in Chinese with English abstract).
- ## 参 考 文 献
- 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.
- 车自成, 孙勇. 1996. 阿尔金麻粒岩相杂岩的时代及塔里木盆地的基底. *中国区域地质*, (1): 51~57.
- 陈柏林, 崔玲玲, 陈正乐. 2014. 阿尔金山喀腊大湾地区变形岩石 EBSD 组构分析. *地质学报*, 88(8): 1475~1484.
- 崔军文. 2011. 南阿尔金断裂的韧性剪切作用时代及其构造意义. *岩石学报*, 27(11): 3422~3434.
- 董增产, 校培喜, 奚仁刚, 过磊, 高晓峰. 2011. 阿尔金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. *地质论评*, 57 (2): 207~216.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社; 43~47.
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 青藏高原北缘火山作用与构造演化. 西安: 陕西科学技术出版社; 74~96.
- 刘良, 车自成, 罗金海, 王焰, 高鉴章. 1996. 阿尔金西段榴辉岩的确定及其地质意义. *科学通报*, 41 (14): 1458~1488.
- 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.
- 刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 王建其, 高鉴章. 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*, 48(8): 880~883.
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 杨家喜, 罗金海, 王超. 2007. 阿尔金沙江尕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. *地学前缘*, 14(1): 098~107.
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 陆松年, 修群业, 李铨. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件. *地质通报*, 28(10): 1430~1438.
- 柳小明, 高山, 袁洪林, Bodo Hatten, Dorf Günther, 陈亮, 胡圣红. 2002. 193nm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析. *岩石学报*, 18(3): 408~418.
- 陆松年. 1998. 新元古时期 Rodinia 超大陆研究进展述评. *地质论评*, 44(5): 489~495.
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. *地球化学*, 33(5): 459~464.
- 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, 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.
- 覃小峰, 夏斌, 李江, 陆济璞, 许华, 周府生, 胡贵昂, 李乾. 2007. 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. *中国地质*, 34(5): 799~805.
- 唐卓, 马中平, 李向民, 孙吉明. 2011. 阿尔金山南缘清水泉地区斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及其地质意义. *地质通报*, 30(1): 51~57.
- 王立社, 李智明, 仇银江, 杨鹏飞, 姜寒冰, 段星星, 詹小弟. 2015b. 阿尔金环形山榴辉岩岩石地球化学及地质意义. *新疆地质*, 33 (2): 143~151.
- 王立社, 张巍, 段星星, 龙小平, 马中平, 宋忠宝, 孙吉明. 2015a. 阿尔金环形山花岗片麻岩同位素年龄及成因研究. *岩石学报*, 31 (1): 119~132.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185~220.
- 吴利仁. 1963. 论中国基性、超基性岩的成矿专属性. *地质科学*, (1): 29~411.
- 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.
- 校培喜. 2003. 阿尔金山中段清水泉—茫崖蛇绿构造混杂岩带地质特征. *西北地质*, 36(3): 14~23.
- 修群业, 于海峰, 刘永江, 陆松年, 毛德宝, 李惠民, 李铨. 2007. 阿尔金北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄. *地质学报*, 81(6): 787~794.

许志琴,杨经绥,嵇少丞,张泽明,李海兵,刘福来,张建新,吴才来,李忠海,梁凤华. 2010. 中国大陆构造及动力学若干问题的认  
识. 地质学报, 84(1):1~29.

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.

杨经绥,许志琴,张建新,张泽明,刘福来,吴才来. 2009. 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. 岩石学报, 25(7):1529~1560.

杨经绥,史仁灯,吴才来,苏德辰,陈松永,王希斌, Wooden J.  
2008. 阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP  
定年. 岩石学报, 24(7):1567~1584.

袁洪林,吴福元,高山,柳小明,徐平,孙德有. 2003. 东北地区新生

代侵入岩的激光锆石探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分  
析. 科学通报, 48(4): 1511~1520.

张建新,孟繁聪,于胜尧. 2010. 两条不同类型的 HP/LT 和 UHP 变  
质带对祁连—阿尔金早古生代造山作用的制约. 岩石学报, 26  
(7):1967~1992.

张建新,杨经绥,许志琴. 2002. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证  
据. 科学通报, 47(3):231~234.

张建新,张泽明,许志琴,崔军文. 1999. 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. 科学通报, 44(10):1109~1112.

张显庭,郑建康,苟金,廖秀深,洪哲生,刘健民. 1984. 阿尔金山东段  
槽型晚奥陶世地层的发现及其构造意义. 地质论评, 30(2):184  
~186.

## Geochemistry and Geochronology of Amphibolite in the East of Qikeshan in South Altyn Tagh and Their Genetic Significance

WANG Lishe<sup>1,2)</sup>, LI Zhiming<sup>1)</sup>, QIU Yinjiang<sup>2)</sup>, ZHANG Yaoxuan<sup>2)</sup>, ZHAN Xiaodi<sup>3)</sup>

1) Xi'an Center, China Geological Survey, Key Laboratory for the Study of Focused  
Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an 710054;

2) Geological Exploration Fund Project Management Center, Urumqi, 830001;

3) School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, 710054

### Abstract

The geochemical analysis of the amphibolite in the east of Qikeshan indicates it belongs to tholeiitic series with high  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents of 46.99%~51.01% and 13.85%~15.82%,  $\text{MgO}$  and  $\text{FeOT}$  contents of 7.00%~7.71% and 12.4%~13.5%. Diagrams of  $\text{MgO}$  vs.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{FeOT}$ ,  $\text{Cr}$  vs.  $\text{Rb}$  and  $\text{Rb}/\text{Nb}$  vs.  $\text{Rb}/\text{Zr}$  exhibit that partial melting and fractional crystallization has occurred in the magma evolution. And the slightly enrichment of light rare earth element (LREE) implies the magma has experienced a 10% to 20% of partial melting and low fractional crystallization. Zircon Lu-Hf isotopic data reveal that the protolith was from the mantle-derived magma which was slightly differentiated from the chondrite, and the liquid temperature of the magma was 1175~1251°C. Microanalytical dating shows the protolith has an age of  $718 \pm 22$  Ma with a metamorphic age of  $502 \pm 14$  Ma. The new data and previous studies indicate that the protolith was not the product of the Neoarchean Era, but formed in the expansion period after the assembly of the Neoproterozoic Rodinia supercontinent, and experienced the peak metamorphism of early Paleozoic South Altyn, revealing that the original ancient Tethys was closed in 502 ± 14 Ma.

**Key words:** geochemistry; U-Pb age; Lu-Hf isotope; genesis; amphibolite; Altyn Tagh