# 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩的变质演化: 对南阿尔金超高压变质作用的启示

郭晶<sup>1)</sup>,李云帅<sup>2,3)</sup>,于胜尧<sup>4)</sup>,张建新<sup>3)</sup>

1) 山西大同大学建筑与测绘工程学院,山西大同,037001;

2) 天津大学地球系统科学学院,表层地球系统科学研究院,天津,300072;

3) 自然资源部深地动力学重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京,100037;

4) 中国海洋大学,山东青岛,266100

内容提要:高压/超高压变质带中的榴辉岩对于揭示造山带的热演化历史及造山过程具有重要的研究意义。 本文通过对南阿尔金巴什瓦克地区榴辉岩的详细岩相学研究,认为该榴辉岩经历了榴辉岩相的峰期变质阶段 (M1,946~1026 ℃和 2.9~3.2 GPa)、峰后退变质阶段(M2,硬玉+石英=钠长石反应线附近)以及晚期麻粒岩相-角闪岩相的变质阶段(M3,~0.8 GPa,789~841 ℃)。此外,锆石 U-Pb 年代学结果表明该榴辉岩的变质时代为 492.8±2.8 Ma (MSWD=0.77),结合锆石中的石榴子石、绿辉石、金红石和石英包裹体及前人所获得的年代学数 据,认为该变质时代记录了早古生代榴辉岩相的变质事件,进而恢复了南阿尔金榴辉岩所记录的顺时针 P-T-t 轨 迹。本研究为南阿尔金巴什瓦克地区超高压变质作用提供了有效的矿物学与岩石学证据,同时为探讨南阿尔金动 力学演化过程提供了重要的约束条件。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; P-T-t 轨迹; 榴辉岩; 超高压变质作用; 南阿尔金

榴辉岩虽然在高压/超高压变质带中占有较小的比例,但是它记录了造山带形成和演化的重要信息,是了解板块俯冲、碰撞与折返机制等复杂的动力 学演化过程必不可少的研究对象(Zhang Jianxin et al.,2001;Liu Liang et al.,2012)。其变质演化 P-T-t 轨迹的恢复与建立,不仅能够为探讨大陆碰撞 造山带根部带的构造热演化过程提供重要的信息, 而且对于揭示碰撞造山带造山过程与机制以及可能 的壳幔相互作用具有重要的研究意义(Zhang Jianxin et al.,2001;Cao Yuting et al.,2019)。

南阿尔金造山带是近二十余年来所厘定的一条 大陆碰撞造山带,带内主要出露榴辉岩、石榴橄榄 岩、麻粒岩及相关片麻岩等岩石。高压-超高压变质 岩主要分布在江尕勒萨依、巴什瓦克(英尕勒萨依) 和淡水泉等地区(Zhang Jianxin et al.,2001,2005; Liu Liang et al., 2002, 2004, 2005, 2007, 2009, 2012, 2018; Cao Yuting et al., 2009, 2019; Wang Chao et al., 2011; Li Yunshuai et al., 2013, 2015, 2020a, 2020b, 2021; Gai Yongsheng et al., 2017; Guo Jing et al., 2020, 2021),其中巴什瓦克地区以出露石榴橄榄岩、石榴辉石岩、基性麻粒岩以及长荚质麻粒岩为典型特征,前人研究结果表明这些岩石 经历了榴辉岩相的高压-超高压变质作用(Liu Liang et al., 2002, 2004, 2005, 2007, 2009; Zhang Jianxin et al., 2005; Wang Chao et al., 2011; Li Yunshua et al., 2013, 2015, 2020a, 2020b, 2021; Dong Jie et al., 2018, 2019),然而,巴什瓦克单元这些高压-超高压岩石中目前仅有一些特殊的矿物出溶特征(Liu Liang et al., 2002, 2004, 2005)和石榴子石斑晶中 绿辉石包裹体(Li Yunshuai et al., 2021)的证据,还

注:本文为国家自然科学基金(编号 41630207)和自然资源部深地动力学重点实验室自主(开放)研究课题(编号 J1901-16)联合资助的成果。

收稿日期:2020-12-20;改回日期:2021-02-14;网络发表日期:2021-11-01;责任编委:张招崇;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:郭晶,女,1989年生。矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: guojing5322@126.com。通讯作者:李云帅,男,1986年生。讲师, 博士,矿物学、岩石学、矿床学专业,研究方向为成因矿物学与岩石地球化学。E-mail:liyunshuai@tju.edu.cn。

引用本文:郭晶,李云帅,于胜尧,张建新. 2021. 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩的变质演化:对南阿尔金超高压变质作用的启示. 地质学报, 95(12): 3691~3704,doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2021086.
 Guo Jing, Li Yunshuai, Yu Shengyao, Zhang Jianxin. 2021. Metamorphic evolution of the eclogite in the Bashiwake area: implications for the ultrahigh pressure metamorphism in South Altyn Tagh. Acta Geologica Sinica, 95(12): 3691~3704.

没有新鲜榴辉岩的报道。

最近的野外地质工作中,我们在南阿尔金巴什 瓦克地区发现新鲜的榴辉岩,并对其进行详细的岩 相学研究,运用传统矿物温压计和矿物微量元素温 压计限定该榴辉岩所形成的温压条件,同时对其中 的锆石开展了 U-Pb 年代学研究,讨论该变质时代 可能代表的变质事件,反演该榴辉岩的变质演化 P-T-t 轨迹,从而为探讨南阿尔金构造热演化历史及 动力学演化过程提供重要的约束信息。

### 1 区域地质背景

阿尔金造山带坐落于青藏高原北缘,该造山带 自北到南依次为北阿尔金(红柳沟-拉配泉)俯冲增 生杂岩带、中阿尔金地块和南阿尔金俯冲碰撞杂岩 带(图 1a)。其中北阿尔金(红柳沟-拉配泉)俯冲增 生杂岩带主要由早古生代蛇绿混杂岩、弧岩浆杂岩 及高压/低温变质岩(蓝片岩和低温榴辉岩)组成 (Yang Jingsui et al., 2008)。中阿尔金地块主要由 浅变质的陆缘碎屑岩和碳酸盐岩(金雁山群或塔什 大坂群)、中高级变质杂岩(阿尔金岩群)及不同时代 的侵入岩所组成;碳酸盐岩中含有叠层石化石,并据 此认为其时代为中新元古代(Wang Chao et al., 2013);阿尔金群原被认为形成于古元古代,近年来 一些新的研究资料显示其主要形成于中元古代-新 元古代(Zhang Jianxin et al., 2011)。南阿尔金俯 冲碰撞杂岩带则以发育角闪岩相的片麻岩和榴辉 岩、石榴橄榄岩及高压麻粒岩为特征。其中榴辉岩 主要出露在南阿尔金西南部的江尕勒萨依(Liu Liang et al., 1996, 2012, 2018; Zhang Jianxin et al.,2001);而东北部的巴什瓦克则以发育石榴橄榄 岩、石榴辉石岩、(基性和长英质)高压麻粒岩以及角 闪岩相的片麻岩为特征(Liu Liang et al., 2002, 2004,2005,2007,2009; Zhang Jianxin et al., 2005; Wang Chao et al., 2011; Li Yunshuai et al., 2013, 2015,2020a,2020b,2021)。

巴什瓦克高压麻粒岩-石榴橄榄岩单元分布在 若羌以南的英吉利萨依地区,该单元以发育长英质 麻粒岩、石榴橄榄岩、石榴辉石岩、基性麻粒岩等岩 石为特征,最近我们又在该单元确定了新鲜榴辉岩 (图 2),它们共同构成了一个宽约5 km的岩石构造 单元,此岩石构造单元的南北两侧均以韧性剪切带 分别与角闪岩相的片麻岩呈构造接触(图 1b)。在 此单元中的野外关系上,可见基性麻粒岩、石榴橄榄 岩、石榴辉石岩、榴辉岩呈透镜状、条带状或似层状 分布在长英质麻粒岩中(图 2),部分长英质麻粒岩 具有片麻理,其透镜体的长轴方向平行于长英质 麻粒岩的片麻理方向,部分条带状的基性麻粒岩 呈无根褶皱(Zhang Jianxin et al., 2005)。传统矿 物温压计的计算结果显示该单元不同类型的高压 岩石组合经历了榴辉岩相的峰期变质条件(870~ 1050℃和1.9~2.7 GPa)及随后的中压麻粒岩相 变质作用(780~820℃,0.95~1.2 GPa)(Zhang Jianxin et al. , 2005; Li Yunshuai et al. , 2013) . — 些学者根据特殊的矿物出溶结构,认为这些高压 岩石组合的形成压力甚至达7 GPa 以上(Liu Liang et al., 2002, 2004, 2005, 2007; Dong Jie et al., 2018,2019)。 锆石 U-Pb 定年结果显示这一单元 不同岩石的变质时代约为 508~475 Ma(Zhang Jianxin et al., 2005; Liu Liang et al., 2009; Wang Chao et al., 2011; Li Yunshuai et al., 2015, 2020a, 2020b, 2021; Dong Jie et al., 2018, 2019; Guo Jing et al.,2020)。此外,最近的研究工作显示,基性麻粒岩 中长英质脉体的锆石 U-Pb 年代学结果表明榴辉岩 相的熔体活动时间为 491±2 Ma(Guo Jing et al., 2021).

## 2 岩相学及变质阶段的划分

榴辉岩以透镜体状分布于长英质麻粒岩中(图 2),新鲜样本呈灰黑色,具中-粗粒斑状变晶结构,岩 石主要由石榴子石、绿辉石、相对低钠的单斜辉石、 金红石、石英、斜长石、角闪石等矿物组成(图 3a、 b),其中石榴子石和绿辉石以变斑晶的形式存在于 细粒的基质中,细粒的基质则主要由单斜辉石、石 英、斜长石、角闪石和金红石等矿物所组成。石榴子 石变斑晶中可见少量的绿辉石、单斜辉石、斜长石、 角闪石、石英、金红石等矿物包裹体(图 3a、b),同时 在一些绿辉石变斑晶中可见条带状的钠长石(图 3c)。此外,在一些石榴子石边部可见明显的冠状体 结构,其矿物组成主要为指纹状的角闪石和斜长石 (图 3d)。

根据矿物共生组合关系和矿物反应结构特征, 我们将南阿尔金巴什瓦克单元榴辉岩的变质演化划 分为3个阶段:①峰期变质阶段(M1)的矿物组合 为石榴子石、绿辉石、金红石、石英;②峰后退变质 阶段(M2)以绿辉石转变为单斜辉石和富钠的斜长 石为特征;③晚期退变质阶段(M3)以石榴子石边 部出现纤维状的角闪石和斜长石冠状体为特征。



图 1 阿尔金造山带地质简图(a)和巴什瓦克石榴橄榄岩-高压麻粒岩单元地质简图(b)(据 Li Yunshuai et al.,2020b) Fig. 1 Simplified geological map of the Altyn Tagh (a) and sketch map in the Bashiwake area, South Altyn Tagh (b) (after Li Yunshuai et al., 2020b)

WKL—西昆仑;EKL—东昆仑;TRB—塔里木盆地;QL—祁连;QDB—柴达木盆地;TIBET—西藏;HMLY—喜马拉雅;INP—印度板块 WKL—West Kunlun;EKL—East Kunlun;TRB—Tarim Block;QL—Qilian;QDB—Qaidam Block; TIBET—Tibet;HMLY—Himalayan;INP—Indian Plate

- 3 分析方法
- 3.1 矿物主微量成分分析

矿物的电子探针成分分析在中国地质调查局天

津地质调查中心实验室完成,所用探针型号为日本 岛津公司出产的 EPMA-1600 型电子探针仪,加速 电压为 15 kV,束流 20 nA,束斑直径 5 μm,并采用 ZAF 校正方法。



图 2 南阿尔金巴什瓦克各类岩石的野外产出特征

Fig. 2 Field characteristics of various types of rocks in the Bashiwake area, South Altyn Tagh
 (a) 一变基性-超基性岩以透镜体产出于长英质麻粒岩中;(b) 一长英质麻粒岩;

(c)一石榴橄榄岩与石榴辉石岩互层;(d)一榴辉岩以透镜体状产出于长英质麻粒岩

(a)—Mafic-ultramafic rocks occurred as lenses in felsic granulite; (b)—felsic granulite;

(c)-garnet peridotite alternating with garnet pyroxenite; (d)-eclogite occurred as lenses in felsic granulite

矿物的微量成分分析在中国地质调查局西安地 调中心岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成,所用 的激光烧蚀系统为 Agilent 7700x。测试条件为:激 光烧蚀的条件为 7 Hz,能量为 6 J/cm<sup>2</sup>,束斑为 44  $\mu$ m,氦气速率为 0.75 L/min。测试过程中,背景值 的测试时间为 10 s,样品含量值的测试时间为 65 s。 测试所用的标样为 NIST612,监控标样为 NIST610,并运用<sup>29</sup> Si 元素作为内部监控标样。数 据处理采用 Glitter 软件,其中标样 NIST612 和 NIST610 采用的值分别为 71.8986 和 69.9786。

#### 3.2 锆石 U-Pb 定年

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试在中国地质 科学院矿产资源研究所实验室完成,锆石 U-Pb 定 年所用的 LA-ICP-MS 仪器为 Finnigan Neptune 型 号,激光剥蚀系统为 New Wave UP 213。具体测试 流程见 Hou Kejun et al. (2009)。数据处理采用 ICP-MS-DataCal 程序(Liu Yongsheng et al., 2010),测量过程中绝大多数分析点<sup>206</sup> Pb/<sup>204</sup> Pb> 1000,未进行普通铅校正,<sup>204</sup> Pb 由离子计数器检测。 需要说明的是,<sup>204</sup> Pb 含量异常高的分析点可能受普 通 Pb 与包裹体的影响,在计算时需要剔除<sup>204</sup> Pb 含 量异常高的测点。锆石年龄谐和图运用 Isoplot 3.0 (Ludwig,2003)程序计算获得。

## 4 分析结果

#### 4.1 矿物化学

南阿尔金巴什瓦克榴辉岩中石榴子石、绿辉石、 单斜辉石、斜长石、角闪石等矿物的代表性电子探针 成分分析结果见表 1。

石榴子石富含镁铝榴石、铁铝榴石和钙铝榴石 端元组分,石榴子石变斑晶的成分剖面相对平坦(图 4),但是在石榴子石边部位置表现出钙铝榴石略微 降低和镁铝榴石略微升高的趋势。其中镁铝榴石组 分为 50.31%~53.63%;铁铝榴石组分为 30.18% ~31.92%;钙铝榴石组分为 13.54%~16.60%,锰 铝榴石组分为 0.33%~0.61%。

绿辉石斑晶硬玉组分含量变化在  $20\% \sim 29\%$ 之间(图 5a),  $Cr_2O_3$ 的含量较低(<0.15%), 从核部 到边部呈现出 Na 略微降低和 Mg 略微升高的趋势 (图 5b、c)。石榴子石斑晶中绿辉石包裹体的硬玉 组分含量变化在  $20\% \sim 22\%$ 之间。

单斜辉石主要产出于细粒基质中或者以包裹体的形式存在于石榴子石变斑晶中,且不同结构位置 化学成分略有差异,基质中的单斜辉石的硬玉分子 介于9%~13%之间,以包裹体形式产出的单斜辉 石的硬玉分子含量变化在16%~19%之间。

角闪石在成分上均属于钙质角闪石,Mg/(Mg

		•		•		0				·	8
矿物	石榴子石			绿辉石			单斜	辉石	K	角闪石	
位置	核	幔	边	核	边	包裹体	包裹体	基质	条带状	冠状体	
$\mathrm{SiO}_2$	39.59	39.71	39.72	51.87	51.26	50.73	49.70	49.38	63.14	51.53	42.81
${\rm TiO}_2$	0.12	0.13	0.09	0.53	0.60	0.66	0.77	0.82	-	_	0.69
$Al_2O_3$	23.37	23.23	22.45	11.90	10.58	10.85	8.94	10.48	23.03	30.99	13.85
$Cr_2O_3$	0.24	0.28	0.26	0.09	0.11	0.14	0.07	0.08	_	_	—
FeO	15.17	15.19	15.50	4.34	4.55	4.61	6.61	5.28	0.08	0.30	9.44
MnO	0.27	0.23	0.29	0.05	0.05	0.00	0.08	0.08	—	—	0.07
MgO	14.35	14.34	14.26	10.73	11.37	11.21	11.47	11.99	0.00	_	15.98
CaO	6.68	6.47	5.72	15.82	17.36	17.67	19.41	18.40	3.62	13.48	11.43
$Na_2O$	0.02	0.03	0.02	3.75	3.60	3.62	2.37	2.84	8.93	4.24	2.38
$\mathrm{K}_2\mathrm{O}$	_	_	—	_	_	_	_	_	0.36	0.01	0.30
总量	99.81	99.61	98.31	99.08	99.48	99.49	99.42	99.35	99.20	100.55	96.95
Si	2.908	2.923	2.967	1.876	1.862	1.847	1.809	1.813	2.808	2.333	6.087
Ti	0.007	0.007	0.005	0.014	0.016	0.018	0.021	0.023	_	_	0.074
Al	2.024	2.016	1.977	0.507	0.453	0.466	0.384	0.453	1.207	1.654	2.321
Cr	0.014	0.016	0.015	0.003	0.003	0.004	0.002	0.002	_	_	—
$\mathrm{Fe}^{3+}$	0.136	0.111	0.066	0.000	0.060	0.084	0.154	0.113	_	_	1.164
$\mathrm{Fe}^{2+}$	0.795	0.824	0.903	0.131	0.078	0.056	0.048	0.049	0.003	0.011	1.123
Mn	0.017	0.014	0.018	0.002	0.002	0.000	0.002	0.002	_	_	0.008
Mg	1.571	1.573	1.588	0.578	0.616	0.608	0.622	0.656	0.000	_	3.387
Ca	0.526	0.510	0.458	0.613	0.676	0.689	0.757	0.724	0.172	0.654	1.741
Na	0.003	0.004	0.003	0.263	0.254	0.256	0.200	0.202	0.770	0.373	0.656
Κ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.001	0.054

表 1 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩 A19-4 代表性矿物成分(%)

Table 1 Representative mineral compositions (%) of eclogite A19-4 in the Bashiwake unit, South Altyn Tagh

+Fe)值变化于 0.73~0.78 之间,其中 TiO2含量变 化于 0.61%~1.01%之间。

斜长石主要存在于石榴子石边部的冠状体中和 绿辉石的退变结构中(呈条带状分布,图 3c),其成 分分别为 An<sub>58-64</sub> Ab<sub>36-40</sub> Or<sub>0-2</sub>和 An<sub>18-24</sub> Ab<sub>75-81</sub> Or<sub>0-1</sub>。

#### 4.2 矿物微量元素地球化学

南阿尔金巴什瓦克榴辉岩中石榴子石和绿辉石 的代表性稀土和微量元素成分分析结果见表 2。

石榴子石的球粒陨石和原始地幔(McDonough et al.,1995)标准化图解结果见图 6a、b。总体来 看,石榴子石呈现重稀土富集、轻稀土相对亏损的特 征。原始地幔标准化蛛网图解显示,石榴子石呈现 明显的 Th、U 正异常和 Ba、Sr、Ti 的负异常。

绿辉石的球粒陨石和原始地幔(McDonough et al.,1995)标准化图解结果见图 6c、d。绿辉石稀土 元素配分模式图显示轻稀土富集,重稀土相对亏损 的特征。原始地幔标准化蛛网图解显示,绿辉石呈 现明显的 Y 正异常和 Ba、Pb、Sr 的负异常。

#### 4.3 锆石 U-Pb 定年

南阿尔金巴什瓦克榴辉岩(A19-4)中的锆石多 呈浑圆状,粒径约为 60~100 μm。阴极发光图像 (CL)显示锆石内部结构无明显的分带,在一些锆石 中可见石榴子石、绿辉石、金红石和石英的包裹体 (图 7)。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果见表 3,
15 个谐和数据点的<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 表面年龄分布在 501 ~485 Ma 之间,相应的 Th/U 比值变化在 0.01~
0.13 之间,其加权平均年龄为 492.8±2.8 Ma (MSWD=0.77)(图 8)。

## 5 变质温压条件的限定

根据不同变质阶段的矿物共生组合关系和变质 反应结构特征,本文采用适宜的地质温压计和石榴 子石-单斜辉石微量元素温压计对南阿尔金巴什瓦 克榴辉岩不同阶段的温压条件进行估算。M1 阶 段:运用石榴子石-单斜辉石温度计(Ravna,2000)在 P=3 GPa 条件下(参考微量元素压力结果)获得 M1 阶段的温度条件为 949~1026℃。利用石榴子 石-单斜辉石稀土元素温度计(Sun Chenguang et al.,2015)获得榴辉岩 M1 阶段的温压条件为 946~ 974℃和2.9~3.2 GPa(图 9),此结果与传统温压计 的计算结果在误差范围内一致。M2阶段:通过绿 辉石的退变结构推断,该阶段的温压条件应该在该 反应线(硬玉+石英=钠长石)附近。M3 阶段:运 用斜长石-角闪石温度计(Holland et al., 1994)在 P =0.8 GPa 条件下获得 M3 阶段的温度条件为 789  $\sim$  841 °C .





textures of the representative eclogite in the Bashiwake area, South Altyn Tagh (a) 一榴辉岩的主要矿物组成:石榴子石、绿辉石、金红石、石英(左边为正交光,右边为单偏光),并在一些绿辉石边部可见纤维 状钠长石与单斜辉石交生体(intergrowth);(b)、(c) 一绿辉石的退变为条带状的钠长石和低钠-单斜辉石,(b)的左边为单偏光, 右边为正交光,(c)为背散射图像;(d) 一石榴子石边部的冠状体结构,主要由角闪石和斜长石组成(背散射图像);Grt一石榴子

石;Omp-绿辉石;Rt-金红石;Qtz-石英;Amp-角闪石;Pl-斜长石;Cpx-单斜辉石

(a)—The eclogite consists of garnet, omphacite, rutile and quartz (the left figure is cross-polarized light image, while the right one is plane-polarized light image); (b), (c)—omphacite is transformed into Na-poor clinopyroxene and Na-rich plagioclase; the left figure of (b) is plane-polarized light image, while the right one is cross-polarized light image; (c) is back-scattered electron image; (d)—a garnet grain is surrounded by kelyphitic rims of amphibole and plagioclase (back-scattered electron image); Grt garnet;Omp—omphacite;Rt—rutile; Qtz—quartz;Amp—amphibole;Pl—plagioclase; Cpx—clinopyrpxene



图 4 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩(A19-4)中石榴子石的成分剖面特征

Fig. 4 Compositional profile of garnet from eclogite in the Bashiwake area, South Altyn Tagh

(a)一石榴子石背散射照片,箭头线条指示剖面位置;(b)一石榴子石成分环带特征

(a)—A back-scattered electron image of garnet, and the line with arrow showing the location of compositional profile of garnet; (b)—the features of compositional profile of garnet



图 5 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩(A19-4)中绿辉石与辉石的 WEF-Jd-Ae 三角投图(a)和绿辉石的面扫描成分特征(b,c)

Fig. 5 Diagram of WEF-Jd-Ae (a) of omphacite and clinopyroxene and mapping photos (b, c)

of omphacite from the eclogite in the Bashiwake area, South Altyn Tagh

Omp--绿辉石;Cpx--单斜辉石;WEF-- 硅灰石(Wo)、顽火辉石(En)和铁辉石(Fs);Jd--硬玉;Ae--霓石

Omp-Omphacite; Cpx-clinopyroxene; WEF-wollastonite(Wo), enstatite(En) and ferrosilite(Fs); Jd-jadeite; Ae-aegirine to the state of th

表 2 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩(A19-4)代表性石榴子石和单斜辉石的微量元素成分(×10<sup>-6</sup>)

Table 2	Representative trace-element	compositions	$(\times 10^{-6})$	of garnet a	nd omphacite	from eclogite	(A19-4)

in the Bashiwake unit, South Altyn T	agl	h
--------------------------------------	-----	---

矿物		石榴	子石		绿辉石				
Rb	0.05	0.05	0.11	0.11	0.16	1.19	0.94	5.99	
Ba	0.38	0.50	0.29	0.19	0.50	8.76	6.57	1.52	
Th	0.01	0.01	0.03	0.04	1.35	1.34	1.54	1.14	
U	0.01	0.01	0.01	0.01	0.09	0.16	0.14	0.12	
Nb	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	
Ta	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	
La	0.04	0.01	0.01	0.02	4.78	3.56	4.17	4.34	
Ce	0.16	0.17	0.11	0.14	17.99	13.11	15.55	16.38	
Pb	0.02	0.03	0.04	0.04	0.30	0.27	0.22	0.17	
Pr	0.08	0.09	0.07	0.08	2.65	1.85	2.25	2.39	
Sr	1.07	1.33	1.26	0.99	18.32	33.85	15.58	13.69	
Nd	1.03	1.49	1.04	1.19	12.36	8.91	10.64	11.18	
Zr	35.26	44.95	48.15	40.28	160.26	167.47	153.12	121.2	
Hf	0.33	0.43	0.47	0.39	4.30	4.55	3.65	3.04	
Sm	0.91	0.87	0.72	0.84	3.12	2.04	2.58	2.77	
Eu	0.49	0.43	0.41	0.45	0.82	0.61	0.72	0.77	
Gd	2.72	1.68	1.67	2.01	2.14	1.55	1.85	2.06	
Tb	0.59	0.36	0.36	0.43	0.29	0.19	0.24	0.25	
Dy	4.63	2.76	2.61	3.27	1.19	0.83	1.01	1.07	
Ho	1.11	0.62	0.59	0.75	0.17	0.13	0.15	0.15	
Υ	70.40	21.36	23.74	35.83	10.56	7.42	8.99	9.27	
Er	3.30	1.95	1.78	2.28	0.33	0.23	0.28	0.28	
Yb	3.61	1.98	1.85	2.40	0.22	0.15	0.19	0.19	
Lu	0.53	0.31	0.28	0.36	0.03	0.02	0.03	0.02	

## 6 讨论

#### 6.1 早古生代变质事件的记录

南阿尔金巴什瓦克地区榴辉岩中的锆石呈浑圆状,并具有面状或杉树状的内部结构,且锆石 Th/U 比值较低(大部分低于 0.1),这些特征表明该榴辉 岩中的锆石应该为变质锆石(Wu Yuanbao et al., 2004)。南阿尔金巴什瓦克地区榴辉岩中的锆石 U-Pb 表面年龄介于 501~485 Ma 之间,谐和年龄为 492.8±2.8 Ma,这一年龄介于该区石榴辉石岩中 石榴石岩脉体的两组锆石年龄(~500 Ma 和~486 Ma,分别解释为榴辉岩相和麻粒岩相的变质时代, Dong Jie et al.,2020)之间,且与巴什瓦克地区各类 高压/超高压岩石组合的变质锆石 U-Pb 年龄(508

#### 表 3 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩(A19-4)的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

#### Table 3 Zircon U-Pb isotopic data of eclogite(A19-4) in the Bashiwake region, South Altyn Tagh

	含量(×10 <sup>-6</sup> )				同位素比值							年龄(Ma)			
测点	Pb	U	Th	Th/U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	$1\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> Pb	$1\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	
1	7	89	3.56	0.04	0.0791	0.0009	0.6491	0.0302	0.0595	0.0027	491	5	508	24	
2	11	143	1.43	0.01	0.0808	0.0009	0.6394	0.0366	0.0574	0.0033	501	6	502	29	
3	18	244	7.32	0.03	0.0802	0.0009	0.6216	0.0164	0.0562	0.0013	497	6	491	13	
4	10	132	3.96	0.03	0.0791	0.0008	0.6331	0.0231	0.0581	0.0021	491	5	498	18	
5	12	164	1.64	0.01	0.0803	0.0009	0.6347	0.0173	0.0573	0.0015	498	5	499	14	
6	10	129	5.16	0.04	0.0799	0.0008	0.6019	0.0252	0.0547	0.0022	495	5	478	20	
7	9	118	7.08	0.06	0.0785	0.0008	0.6283	0.0233	0.0581	0.0021	487	5	495	18	
8	22	294	38.22	0.13	0.0789	0.0008	0.6373	0.0147	0.0586	0.0013	490	5	501	12	
9	7	96	10.56	0.11	0.0791	0.0009	0.6295	0.0285	0.0577	0.0025	491	5	496	22	
10	8	101	8.08	0.08	0.0802	0.0009	0.6462	0.0258	0.0584	0.0022	497	6	506	20	
11	5	63	3.15	0.05	0.0795	0.0009	0.6357	0.0387	0.0580	0.0036	493	6	500	30	
12	12	169	3.38	0.02	0.0802	0.0009	0.6275	0.0177	0.0568	0.0015	497	5	495	14	
13	16	223	4.46	0.02	0.0782	0.0008	0.6106	0.0195	0.0566	0.0016	485	5	484	15	
14	13	177	17.7	0.1	0.0794	0.0008	0.5997	0.0169	0.0548	0.0015	492	5	477	13	
15	9	128	6.4	0.05	0.0782	0.0008	0.5827	0.0253	0.0540	0.0023	486	5	466	20	





Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of garnet (a) and omphacite (c), and primitive-mantle-normalized spider diagrams of garnet (b) and omphacite (d) (after McDonough et al., 1995) from eclogite in the Bashiwake area, South Altyn Tagh

~475 Ma)及该区基性麻粒岩中锆石年龄(491.0± 3.5 Ma; Guo Jing et al.,2020)在误差范围内一致。 Guo Jing et al.(2020)根据石榴子石和锆石的微量 元素特征,认为该基性麻粒岩的锆石年龄(491.0± 3.5 Ma)记录了峰后高压-超高温的变质事件。需要 说明的是,无论是基性麻粒岩还是本文报道的榴辉 岩,其峰后高温-超高压阶段均出现了斜长石矿物, 但是在南阿尔金巴什瓦克地区榴辉岩锆石中并没有







The red and solid circles showing the analysis location of U-Pb dating; inclusions of Grt (garnet), Omp (omphacite), Qtz (quartz) and Rt (rutile) in zircon grains

发现斜长石的包裹体,因而我们推测该锆石应该早 于高压-超高温变质事件(榴辉岩的 M2:硬玉+石英 =钠长石反应线)。结合锆石中石榴子石、绿辉石、 金红石和石英的包裹体,我们认为南阿尔金巴什瓦 克地区榴辉岩中的变质锆石年龄(492.8±2.8 Ma) 代表了早古生代榴辉岩相的变质事件记录。

#### 6.2 变质演化 P-T-t 轨迹

基于岩相学观察和温压条件估算的结果,我们 认为南阿尔金巴什瓦克榴辉岩至少经历了三个变质 演化阶段:① 峰期变质阶段(M1):石榴子石-单斜 辉石微量元素温压计所记录的峰期变质阶段的温压 条件为946~974℃和2.9~3.2 GPa,传统矿物温度 计在 P=3 GPa 条件下获得该阶段(M1)的温度条 件为:949~1026℃,二者在误差范围内一致,均处于 榴辉岩相的稳定区域;②峰后退变质阶段(M2):尽 管没有合适的矿物温压计来限定其温压条件,但是 通过绿辉石的退变结构推断,该阶段的温压条件应 该在硬玉+石英=钠长石反应线附近;③ 麻粒岩 相-角闪岩相退变质阶段(M3):在P=0.8 GPa 压力 条件下获得 M3 阶段的温度条件为 789~841℃。 此外,锆石 U-Pb 年代学结果表明,该区榴辉岩所记 录的变质时代为492.8±2.8 Ma,锆石中石榴子石、 绿辉石包裹体表明该区榴辉岩中的锆石记录了榴辉 岩相的变质阶段,基于以上研究结果,我们恢复了南 阿尔金巴什瓦克榴辉岩的 P-T-t 演化轨迹(图 10)。 结合前人的研究资料以及本文的研究结果,我们认 为南阿尔金巴什瓦克单元各类高压/超高压岩石共 同经历了早古生代榴辉岩相的变质作用、峰后退变 质阶段和中压麻粒岩相变质作用的叠加。

#### 6.3 地质意义

传统矿物温压计计算结果表明,南阿尔金巴什 瓦克单元的长英质麻粒岩、基性麻粒岩以及石榴橄 榄岩的峰期变质条件为 870~1050℃和 1.9~2.7 GPa(Zhang Jianxin et al., 2005; Li Yunshuai et al.,2013,2020b),表明它们经历了榴辉岩相的变质 作用。需要指出的是,一些学者通过矿物出溶结构 特征认为该区的高压岩石组合经历了超高压变质作 用(Liu Liang et al., 2002, 2004, 2005, 2007; Wang Chao et al., 2011; Dong Jie et al., 2018, 2019), 最 近,Guo Jing et al. (2020)通过矿物微量元素温压计 的计算结果认为巴什瓦克的基性麻粒岩可能经历了 更高压力条件下的变质作用,并认为这是由于微量 元素较低的晶内扩散系数和在温度提高情况下的均 一化速率所致(Bloch et al., 2015; Baxter et al., 2017)。本文中巴什瓦克地区榴辉岩的确认及其峰 期变质温压条件(946~1026℃和 2.9~3.2 GPa), 进一步证实了巴什瓦克的岩石组合可能经历了更高 压力条件下的变质作用(柯石英线以上),从而为解 决争议多年的问题"南阿尔金是否存在超高压变质 作用"提供了一定的矿物学和岩石学证据,但是代表 超高压变质作用的直接标型矿物学证据(如柯石英、 金刚石等)仍待进一步的研究。

目前,南阿尔金一些地区各类岩石的变质温压 条件均存在或多或少的差异,事实上,这类高压/超 高压变质带中不同岩石组合或者是在俯冲过程中俯 冲到了不同的深度,从记录了不同的变质温压条件, 并最终折返到地壳浅层次构造"混杂在一起;亦或是 其他因素的影响,如后期变质作用的改造、平衡矿物 对的选取、矿物成分的测定、传统矿物温压计的适用 范围以及热力学数据库的不确定性,矿物温压计计 算和相平衡模拟的误差甚至存在人为因素的干扰等 等,都会造成温压结果的差异。此外,高压/超高压 岩石所记录的温压条件差异也可以运用大陆俯冲隧 道模式来解释(Zheng Yongfei et al.,2012,2013), 即被俯冲板块刮削下来的大小不同的地壳和地幔碎 块在俯冲隧道中发生不同程度的变质变形和部分熔 融作用,从而产生变化显著的峰期温压条件。



图 8 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩(A19-4)的锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和误差棒(b)

Fig. 8 U-Pb concordia diagrams (a) and error bar (b) of zircons for eclogite (A19-4) in the Bashiwake area, South Altyn Tagh



图 9 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩石榴子石-单斜辉石微量元素温压计计算结果(据 Sun Chenguang et al.,2015), 其中参数 D 代表稀土元素分配系数,A 和 B 代表矿物主量元素的分配系数

Fig. 9 TREE inversion diagrams for eclogite in the Bashiwake area, South Altyn Tagh, using the REE-in-garnetclinopyroxene thermobarometer (after Sun Chenguang et al., 2015). The parameter of *D* is the partition coefficient of REE, while the parameters of *A* and *B* are coefficients that depend on mineral major element compositions

上述研究结果表明,南阿尔金巴什瓦克榴辉岩 经历了顺时针的 P-T-t 演化轨迹,榴辉岩的峰期矿 物组合所记录的温压条件为 946~1026℃和 2.9~ 3.2 GPa,表明其可能形成于巨厚的陆-陆碰撞环境 中。锆石中石榴子石、绿辉石、金红石和石英包裹体 的证据表明该锆石结晶于榴辉岩相的变质阶段,其 U-Pb 变质年龄应该代表了早古生代榴辉岩相的变 质事件记录。这一年龄结果与前人所获得的巴什瓦 克地区各类高压/超高压岩石组合的变质锆石 U-Pb 年龄(508~475 Ma, Zhang Jianxin et al., 2005; Liu Liang et al., 2009; Wang Chao et al., 2011; L Yunshuai et al., 2015, 2020a, 2020b, 2021; Dong Jie et al., 2018, 2019; Guo Jing et al., 2020)、Sm-Nd等 时线年龄(493±24 Ma; Li Yunshuai et al., 2015) 和金红石 U-Pb 年龄(~485 Ma; Zhang Jianxin et al., 2014)在误差范围内近一致,表明巴什瓦克单元







灰色点状虚线和灰色破折线均为巴什瓦克其他类岩石的 P-T 轨迹,绿色实线为本文榴辉岩的 P-T 轨迹; Coe一柯石英; Qtz一石英; Ab-钠长石; Jd+Qtz一硬玉+石英; M1一变质阶段 M1; M2一变质阶段 M2; M3一变质阶段 M3

The gray dotted line and gray broken line represent the *P*-*T* paths of other HP rocks in the Bashiwake, and the green solid line represents the *P*-*T* path of eclogite in this study; Coe—coesite; Qtz—quartz; Ab—albite; Jd+Qtz—jadeite+quartz; M1—metamorphism stage M1; M2—metamorphism stage M2; M3—metamorphism stage M3

各类高压/超高压岩石组合共同经历了榴辉岩相的 变质作用。此外,锆石 U-Pb 年代学和锆石包裹体 研究结果显示南阿尔金西南部的江尕勒萨依地区 (图1)的超高压榴辉岩的峰期变质时代亦为 500 Ma 左右(Liu Liang et al.,2012),表明南阿尔金江 尕勒萨依地区和巴什瓦克地区的各类高压-超高压 岩石可能共同经历了早古生代(508~475 Ma)陆壳 深俯冲作用。

## 7 结论

(1)南阿尔金巴什瓦克地区榴辉岩至少经历了 3个阶段的变质演化过程:峰期变质阶段(M1),以 石榴子石、绿辉石、金红石、石英为特征,所估算的温 压条件为946~1026℃和2.9~3.2 GPa;峰后退变 质阶段(M2),以绿辉石退变为单斜辉石和钠长石为 特征,其温压条件应该位于硬玉+石英=钠长石反 应线附近;晚期麻粒岩相-角闪岩相退变质阶段 (M3),以石榴子石边部出现冠状体为特征,在 P= 0.8 GPa压力条件下所记录的温度条件约为 789 ~841℃。

(2) 锆石 U-Pb 年代学结果表明其变质时代为 492.8±2.8 Ma (MSWD=0.77),并结合锆石包裹 体的证据和前人所获得的年代学数据,认为该变质 时代记录了早古生代榴辉岩相的变质事件。

**致谢:**两名匿名审稿人与编辑给出了建设性的 意见,路增龙和彭银彪在野外工作中给予了帮助,郭 虎、李艳广、靳梦琪和侯可军在测试中给予了指导和 帮助,在此一并表示感谢。

#### 2021 年

#### References

- Baxter E F, Caddick M J, Dragovic B. 2017. Garnet: a rock-forming mineral petrochronometer. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 83: 469~533.
- Bloch E, Ganguly J, Hervig R, Cheng W. 2015. <sup>176</sup>Lu-<sup>176</sup>Hf geochronology of garnet I: experimental determination of the diffusion kinetics of Lu<sup>3+</sup> and Hf<sup>4+</sup> in garnet, closure temperatures and geochronological implications. Contributions to Mineralogy and Petrology, 169: 12.
- Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, Chen Danling, Zhang Anda. 2009. P-T path of Early Paleozoic pelitic high-pressure granulite from Danshuiquan area in Altyn Tagh. Acta Petrologica Sinica, 25(9): 2260~2270 (in Chinese with English abstract).
- Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, Kang Lei, Li Di, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui. 2019. Timing and nature of the partial melting processes during the exhumation of the garnet-bearing biotite gneiss in the southern Altyn Tagh HP/UHP belt, Western China. Journal of Asian Earth Sciences, 170: 274 ~293.
- Dong Jie, Wei Chunjing, Clarke G L, Zhang Jianxin. 2018. Metamorphic evolution during deep subduction and exhumation of continental crust: insights from felsic granulites in South Altyn Tagh, West China. Journal of Petrology, 59(10): 1965 ~1990.
- Dong Jie, Wei Chunjing, Zhang Jianxin, 2019. Ultra-high temperature (UHT) metamorphism of mafic granulites from South Altyn Orogen, West China: a result from the rapid exhumation of deeply subducted continental crust. Journal of Metamorphic Geology. 37: 315~338.
- Dong Jie, Wei Chunjing, Chen Jing, Zhang Jianxin, 2020. P-T-t path of garnetites in South Altyn Tagh, West China: a complete record of the ultradeep subduction and exhumation of continental crust. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 125: 1~17.
- Gai Yongsheng, Liu Liang, Wang Chao, Yang Wenqiang, Kang Lei, Cao Yuting, Liao Xiaoying. 2017. Discovery of coesite in eclogite from keqike jianggalesayi: new evidence for ultrahighpressure metamorphism in South Altyn Tagh, northwestern China. Science Bulletin, 62(15): 1048~1051.
- Guo Jing, Li Yunshuai, Zhang Jianxin. 2020. Metamorphic P-T-t path of the mafic granulite in the Bashiwake area, South Altyn Tagh. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2698~2711(in Chinese with English abstract).
- Guo Jing, Li Yunshuai, Zhang Jianxin. 2021. Eclogite-facies melt activity in continental collisional orogen: evidence from the felsic vein in mafic granulite, South Altyn Tagh. Acta Geologica Sinica, 95(3): 723~736(in Chinese with English abstract).
- Holland T J B, Blundy J D. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Contributions to Mineralogy and Petrology, 116:  $433 \sim 447$ .
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. Mineral Deposit, 28(4): 481~492 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang D. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb datings, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51: 537~571.
- Li Yunshuai, Zhang Jianxin, Li Shengrong, Yu Shengyao, Gong Jianghua, Lin Yihui. 2013. Metamorphic evolution of the Bashiwake garnet peridotite from the South Altyn Tagh. Acta Petrologica Sinica, 29 (6): 2073 ~ 2092 (in Chinese with English abstract).
- Li Yunshuai, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Li Shengrong, Gong

Jianghua. 2015. Origin of Early Paleozoic garnet peridotite and associated garnet pyroxenite in the South Altyn Tagh, NW China: constraints from geochemistry, SHRIMP U-Pb zircon dating and Hf isotopes. Journal of Asian Earth Science, 100: 60  $\sim$ 77.

- Li Yunshuai, Zhang Jianxin, Li Yanguang, Mostofa K M, Yu Shengyao, Guo Jing, Dong Juan, Peng Yinbiao, Jin Mengqi, Zhou Guisheng, 2020a. Petrogenesis of mafic granulite in South Altyn Tagh, NW China: constraints from petrology, zircon U-Pb chronology, and geochemistry. Geological Journal, 55(2): 1431~1449.
- Li Yunshuai, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Li Yanguang, Guo Hu, Zhang Jian, Fu Changlei, Cao Hui, Jin Mengqi, Cai Zhihui. 2020b. Petrological, geochronological and geochemical potential accounting for continental subduction and exhumation: a case study on felsic granulites from South Altyn Tagh, northwestern China. Geological Society of America Bulletin, 132 (11-12): 2611~2630.
- Li Yunshuai, Santosh M, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Peng Yinbiao. 2021. Tracking a continental deep subduction and exhumation from granulitized kyanite eclogites in the South Altyn Tagh, northern Qinghai-Tibet Plateau, China. Lithos, 382-383,105954.
- Liu Liang, Che Zicheng, Luo Jinhai, Wang Yan, Gao Zhangjian. 1996. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang. Chinese Science Bulletin 41: 1485  $\sim$ 1488 (in Chinese).
- Liu Liang, Sun Yong, Xiao Peixi, Che Zicheng, Luo Jinhai, Chen Danling, Wang Yan, Zhang Anda, Chen Liang, Wang Yonghe. 2002. Discovery of ultrahigh-pressure magnesite-bearing garnet lherzolite (N>3.5 GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China. Chinese Science Bulletin, 47: 881~886.
- Liu Liang, Sun Yong, Luo Jinhai, Wang Yan, Chen Danling, Zhang Anda. 2004. Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altun Mountains, NW China. Science in China Series D: Earth Sciences, 47(4): 338~346.
- Liu Liang, Chen Danling, Zhang Anda, Sun Yong, Wang Yan, Yang Jiaxi, Luo Jinhai. 2005. Ultrahigh pressure (>7 GPa) gneissicK-feldspar (-bearing) garnet clinopyroxenite in the Altyn Tagh, NW china: evidence from clinopyroxene exsolution in garnet. Science in China Series D: Earth Sciences, 48(7): 154~164.
- Liu Liang, Zhang Junfeng, Green II W G, Jin Zhenmin, Bozhilov K N. 2007. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments, implying subduction to > 350 km. Earth and Planetary Science Letters, 263(3): 180~191.
- Liu Liang, Wang Chao, Chen Danling, Zhang Anda, Liou J G. 2009. Petrology and geochronologyof HP-UHP rocks from the South Altyn Tagh, northwestern China. Journal of Asian Earth Sciences, 35: 232~244.
- Liu Liang, Wang Chao, Cao Yuting, Chen Danling, Kang Lei, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui. 2012. Geochronology of multistage metamorphic events:constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China. Lithos, 136-139: 10~26.
- Liu Liang, Zhang Junfeng, Cao Yuting, Green II W G, Yang Wenqiang, Xu Haijun, Liao Xiaoying, Kang Lei. 2018. Evidence of former stishovite in UHP eclogite from the South Altyn Tagh, western China. Earth and Planetary Science Letters, 484: 353~362.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3. 00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel: Berkeley, California, Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 74.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. Chemical Geology, 120(3-4): 223~253.
- Ravna E K. 2000. The garnet-clinopyroxene geothermometer an updated calibration. Journal of Metamorphic Geology, 18: 211  $\sim$  219.
- Sun Chenguang, Liang Yan. 2015. A REE-in-garnet-clinopyroxene

thermobarometer for eclogites, granulites and garnet peridotites. Chemical Geology, 393-394: 79~92.

- Wang Chao, Liu Liang, Chen Danling, Cao Yuting. 2011. Petrology, geochemistry, geochronology and metamorphic evolution of garnet peridotites from South Altyn Tagh UHP terrane, NW China: records related to crustal slab subduction and exhumation history. Ultrahigh-Pressure Metamorphism,  $541 \sim 576$ .
- Wang Chao, Liu, Liang, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui, Cao Yuting, Kang Lei, Chen Shefa, Li Rongshe, He Shipping. 2013. Provenance and ages of the Altyn complex in Altyn Tagh: implications for the early Neoproterozoic evolution of northwestern China. Precambrian Research, 230: 193~208.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1554~1569.
- Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, Su Dechen, Chen Songyong, Wang Xibin, 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).
- Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Cui Junwen. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. Lithos, 56: 187~206.
- Zhang Jianxin, Mattinson C G, Meng Fancong, Wan Yusheng, 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: 491~510.
- Zhang Jianxin, Li Huaikun, Meng Fancong, Xiang Zhenquan, Yu Shengyao, Li Jinping. 2011. Polyphase tectonothermal events recorded in "metamorphic basement" from the Altyn Tagh, the southern margin of the Tarim basin, western China: constraint from U-Pb zircon gochronology. Acta Petrologica Sinica, 27 (1): 23~46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Mattinson C G, Yu Shengyao, Li Yunshuai. 2014. Combined rutile-zircon thermometry and U-Pb geochronology: new constraints on Early Paleozoic HP/UHT granulite in the

south Altyn Tagh, north Tibet, China. Lithos, 200-201: 241 $\sim\!257.$ 

- Zheng Yongfei. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chemical Geology, 328(7420): 5  $\sim$  48.
- Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Chen Yixiang. 2013. Continental subduction channel processes: plate interface interaction during continental collision. Chinese Science Bulletin, 58(33): 2233~ 2239.

#### 参考文献

- 曹玉亭,刘良,王超,陈丹玲,张安达. 2009. 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. 岩石学报,25(9):2260 ~2270.
- 郭晶,李云帅,张建新. 2020. 南阿尔金巴什瓦克基性麻粒岩的变质 演化 P-T-t 轨迹. 地质学报,94(9):2698~2711.
- 郭晶,李云帅,张建新. 2021. 大陆碰撞造山带榴辉岩相的熔体活动:来自南阿尔金基性麻粒岩中长英质脉体的证据. 地质学报, 95(3):723~736.
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 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,16(41):1485~1488.
- 李云帅,张建新,李胜荣,于胜尧,宫江华. 2013. 南阿尔金巴什瓦克 石榴橄榄岩的变质演化. 岩石学报,29(6):2073~2092.
- 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 和制约. 科学通报,49(16):1589~1604.
- 杨经绥,史仁灯,吴才来,苏德辰,陈松永,王希斌. 2008. 北阿尔金 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.
- 张建新,李怀坤,孟繁聪,相振荃,于胜尧,李金平.2011. 塔里木盆 地东南缘(阿尔金山)"变质基底"记录的多期构造热事件:锆石 U-Pb年代学的制约. 岩石学报,27(1):23~46.
- 郑永飞,赵子福,陈伊翔. 2013. 大陆俯冲隧道过程:大陆碰撞过程 中的板块界面相互作用. 科学通报,58(23):2233~2239.

## Metamorphic evolution of the eclogite in the Bashiwake area: implications for the ultrahigh pressure metamorphism in South Altyn Tagh

GUO Jing<sup>1)</sup>, LI Yunshuai<sup>\*2,3)</sup>, YU Shengyao<sup>4)</sup>, ZHANG Jianxin<sup>3)</sup>

College of Architectural and Surveying Engineering, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037001, China;
 School of Earth System Science, Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3) Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology,

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4) Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

\* Corresponding author: liyunshuai@tju.edu.cn

#### Abstract

Eclogite, a volumetrically minor component within orogenic belts, witnessed the geodynamic evolution of subduction, collision, and exhumation. Petrographic observations suggested that the eclogite in the Bashiwake area, South Altyn Tagh, experienced at least three metamorphic stages, including the eclogite-facies metamorphism (M1) (946 ~ 1026°C, 2.9 ~ 3.2 GPa), the early retrograde stage (M2) characterized by an intergrowth of clinopyroxene with albite after omphacite, and the later retrograde stage (M3) represented by the occurrence of kelyphitic rims of amphibole and plagioclase around garnet (~0.8 GPa, 789~841°C). Zircon U-Pb dating yielded the metamorphic age at 492.8±2.8 Ma, representing the eclogite-facies stage based on geochronological data and the inclusions of garnet, omphacite, rutile, and quartz in zircon grains. These results suggest a clockwise *P*-*T*-*t* path for the eclogite in the Bashiwake area, South Altyn Tagh. The *P*-*T* conditions of eclogite provide the mineralogical and petrological evidences for the issue of the South Altyn experienced the ultrahigh pressure metamorphism and the dynamic evolution process of South Altyn Tagh.

**Key words**: zircon U-Pb dating; *P-T-t* path; eclogite; ultrahigh pressure metamorphism; South Altyn Tagh