

doi:10.3799/dqkx.2012.100

# 北阿尔金南华纪双峰式火山岩的发现及构造意义

刘 函<sup>1,2</sup>, 王国灿<sup>1\*</sup>, 曹树钊<sup>1</sup>, 罗彦军<sup>1</sup>, 高 睿<sup>1</sup>, 黄文星<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 成都地质调查中心, 四川成都 610081

**摘要:** 北阿尔金恰什坎萨伊沟南口火山岩显双峰式特征, 由变玄武岩和变流纹岩组成。地球化学分析表明变玄武岩源自富集地幔, 上侵过程中遭受地壳混染, 形成于大陆裂谷环境; 而变流纹岩与铝质 A 型花岗岩特征类似, 为幔源岩浆底侵下地壳部分熔融成因。变流纹岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $749.8 \pm 4.6$  Ma, 代表火山岩的喷发年龄, 为北阿尔金洋的初始裂解事件提供了时代证据; 与北祁连洋初始裂解时代相近, 从洋盆的初始裂解时间证明北阿尔金与北祁连同为一个带。“西域板块”新元古代中期岩浆活动与 Rodinia 超大陆裂解事件密切相关, 与扬子板块周缘岩浆活动有相似性, 可划分为裂解初期与峰期两个阶段。所发现北阿尔金南华纪双峰式火山岩正是 Rodinia 超大陆裂解峰期岩浆活动的产物。

**关键词:** 双峰式火山岩; 大陆裂解; 地球化学; 地质年代学; 北阿尔金。

中图分类号: P541

文章编号: 1000-2383(2012)05-0917-12

收稿日期: 2011-10-12

## Discovery of Nanhuaian Bimodal Volcanics in Northern Altyn Tagh and Its Tectonic Significance

LIU Han<sup>1,2</sup>, WANG Guo-can<sup>1\*</sup>, CAO Shu-zhao<sup>1</sup>, LUO Yan-jun<sup>1</sup>, GAO Rui<sup>1</sup>, HUANG Wen-xing<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

**Abstract:** The early Paleozoic ophiolite section of Qiashikansayi hollow is located at the segment of Hongliuguo-Lapeiquan ophiolite belt in the North Altyn Tagh Mountains, striking from south to north. The volcanics from the south entrance of the hollow consist of meta-basalts and meta-rhyolites, with typical “double peaks”. The geochemistry data show that meta-basalts derived from enriched mantle have suffered from contamination of crust, and were formed in a continental rift setting; Meta-rhyolites are similar to the A-type granite in the composition, resulted from the partial melt of lower crust due to the underplating of mantle-derived magma. Zircon LA-ICP-MS dating of rhyolite yields a U-Pb age of  $749.8 \pm 4.6$  Ma, representing the time of crystallization of the bimodal volcanics, and providing time evidence for the initial breakup of North Altyn Ocean together with the published regional geological reports. There are similar time of initial breakup between North Altyn Ocean and North Qilian Ocean. We suggest that this volcanic action is closely related with the breakup of Rodinia supercontinent.

**Key words:** bimodal volcanics; continental rift; geochemistry; geochronology; northern Altyn Tagh.

阿尔金造山带位于青藏高原西北缘, 以发育巨型的阿尔金走滑断裂著称于世; 并发育南北两条早古生代蛇绿构造混杂岩带(许志琴等, 1999; Liu *et al.*, 2009)。北阿尔金蛇绿构造混杂岩带沿阿尔金北缘断裂分布, 其内的深水沉积、基性火山岩、蛇绿岩套表明该带为早古生代洋壳俯冲杂岩带。现有

资料表明北阿尔金洋至少存在于寒武纪—奥陶纪(刘良等, 1999; 修群业等, 2007; 杨经绥等, 2008)。

近年来, 北阿尔金蛇绿混杂岩带南北两侧花岗岩体的研究为该洋盆的闭合时限提供了新资料(戚学祥等, 2005a, 2005b; 吴才来等, 2005, 2007; 郝杰等, 2006); 然而, 对于该洋盆初始裂解时限尚没有

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. 1212011121261, 1212010610103)。

作者简介: 刘函(1986—), 男, 硕士, 构造地质学专业, 主要从事青藏高原及造山带地质学方面工作。E-mail: liuhan\_cug@163.com

\* 通讯作者: 王国灿, E-mail: wgcan@cug.edu.cn

确切的报道. 郭召杰等(1998)曾获得半鄂博图辉长岩的 Sm-Nd 等时线年龄  $829 \pm 60$  Ma, 认为其代表北阿尔金蛇绿岩的形成时代, 但张旗和周庆国(2001)认为其所测并非蛇绿岩; 伍跃中等(2007)等认为该带在早古生代可能属于陆缘裂谷性质; 但张建新等(2007b)获得恰什坎萨伊沟红柳泉 HP/LT 变质带中榴辉岩多硅白云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄  $512 \pm 3$  Ma, 表明该洋盆在中寒武世已开始俯冲, 暗示该洋盆在中寒武世以前已经形成; 因此北阿尔金洋的初始裂解证据有待进一步发现. 笔者在恰什坎萨伊沟南口发现南华纪双峰式火山岩, 为北阿尔金早古生代洋的初始裂解提供了新的年代学约束.

### 1 地质背景

北阿尔金蛇绿构造混杂岩带位于阿尔金造山带北缘, 根据前人的构造单元划分方案(许志琴等, 1999; 于海峰等, 2002; Liu *et al.*, 2009), 其北为阿北—敦煌陆块, 主要由太古宇米兰群和敦煌群角闪岩相—麻粒岩相变质杂岩组成, 为北塔里木古老变质基底的一部分; 其南为阿中陆块, 主体由中—上元古界厚层状灰岩和下元古界的阿尔金岩群变质岩系以及呈透镜体状断续产出在该变质岩系中的高压—

超高压变质岩组成(图 1).

恰什坎萨伊沟在巴什考贡东约 40 km 处, 近南北向, 距沟南口约 2 km 处为侏罗系复成分砾岩, 以此为界, 其北为早古生代蛇绿混杂岩组合, 主要由片理化变质碎屑岩、薄层状硅质岩、无根团块状碳酸盐岩、变中酸性火山岩、枕状玄武岩、蛇纹石化超基性岩等组成; 其南为一套变火山岩组合, 为本文的主要研究对象. 该套变火山岩组合已轻度角闪岩化, 在 1:20 万巴什考贡地质图上将其划归蓟县系, 为塔肯达坂群斯米尔布拉克组, 野外考察发现其显示变双峰式火山岩特征, 由变基性火山岩与变酸性火山岩组成.

### 2 剖面描述

实地草测剖面见图 2. 剖面中主要岩性由北(1)往南(7)依次为:

- (7) 奥陶系灰—灰黄色片理化变质砂岩.
- (6) 更新统洪冲积物, 由松散堆积的砾石、砂土组成.
- ~~~~~角度不整合接触~~~~~
- (5) 灰绿色变玄武岩夹少量变流纹岩. 172 m
- (4) 黄白色变流纹岩夹深灰色变玄武岩, 往南基性组分增加. 64 m
- (3) 灰绿色变玄武岩夹变流纹岩, 往南酸性组分增多. 195 m
- (2) 黑绿色变玄武岩, 一小型灰白色花岗岩脉侵入其中. 往南玄

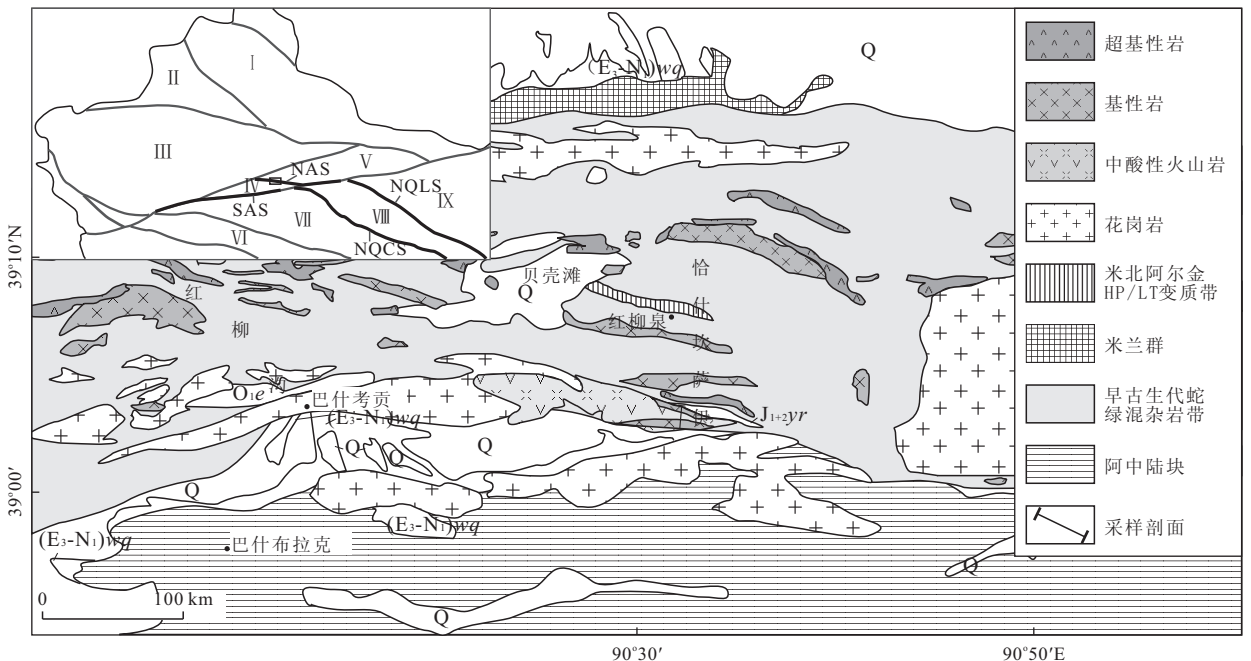


图 1 研究区地质简图(据 1:20 万巴什考贡幅地质图修编)

Fig. 1 Region geological map for this study area

I. 准葛尔—吐哈陆块; II. 伊利陆块; III. 塔里木陆块; IV. 阿中陆块; V. 敦煌陆块; VI. 巴颜喀拉山陆块; VII. 柴达木陆块; VIII. 祁连陆块; IX. 阿拉善陆块; NAS. 北阿尔金蛇绿混杂岩带; SAS. 南阿尔金蛇绿混杂岩带; NQCS. 柴北缘蛇绿混杂岩带; NQLS. 北祁连蛇绿混杂岩带

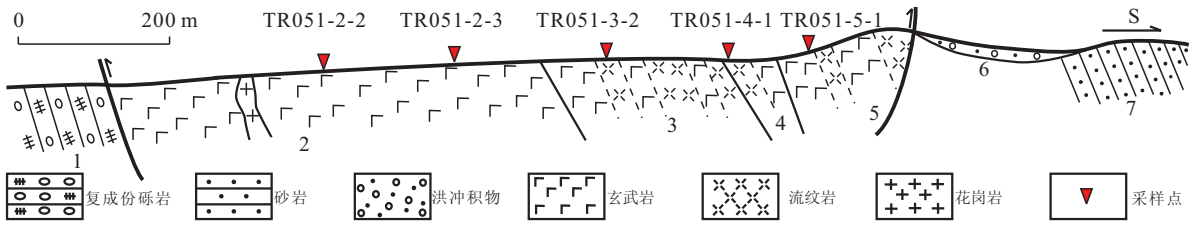


图 2 恰什坎萨伊沟双峰式火山岩剖面及采样点

Fig. 2 Geological section of Qishikansayi bimodal volcanic rocks and samples locations

武岩劈理化加强,顺劈理发育石英脉。  
—————断层接触————— 487 m

(1)侏罗系复成分砾岩,砾石大小 5~10 cm,呈浑圆状,砾石成分有玄武岩、变质砂岩、结晶灰岩等。 147 m

总体看来,剖面上变玄武岩与变流纹岩互层,没有明显的界限,呈现出双峰式火山岩套特点。该套岩石后期普遍遭受较强的变形变质,变玄武岩变质矿物组合为普通角闪石、斜长石、黑云母、绿帘石和石英,表现为绿帘角闪岩相—低角闪岩相变质;劈理化强烈,劈理整体南倾,顺劈理发育石英脉,见较强的剪切揉皱。另外偶见小型灰白色中粒花岗岩脉侵入。

### 3 分析方法

选择变流纹岩样品 TR051-3-2(90°32'38.6"E; 39°02'43.9"N)作锆石 U-Pb 定年分析,样品破碎和锆石挑选由河北省廊坊区域地质调查研究院地质实验室完成,锆石阴极发光照相和 LA-ICP-MS 定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,使用标准锆石 91500 进行分馏校正,激光束直径 24 μm,分析方法参见 Zong *et al.* (2010)。分别对 3 个变玄武岩和 2 个变流纹岩样品做地球化学分析,主量元素采用 X 射线荧光光谱分析法(XRF)在中国科学院广州地球化学研究所元素与同位素地球化学研究室完成,分析误差 < 1%;微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析,分析精度优于 5%~10%。

### 4 分析结果

#### 4.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

阴极发光图像显示,样品 TR051-3-2 的锆石无色透明,颗粒粒度变化于 30~150 μm 之间,锆石晶体形态有浑圆状、短柱状、长柱状,总体上自形到半自形(图 3)。柱状锆石的长宽比为 2:1~3:1,锆石

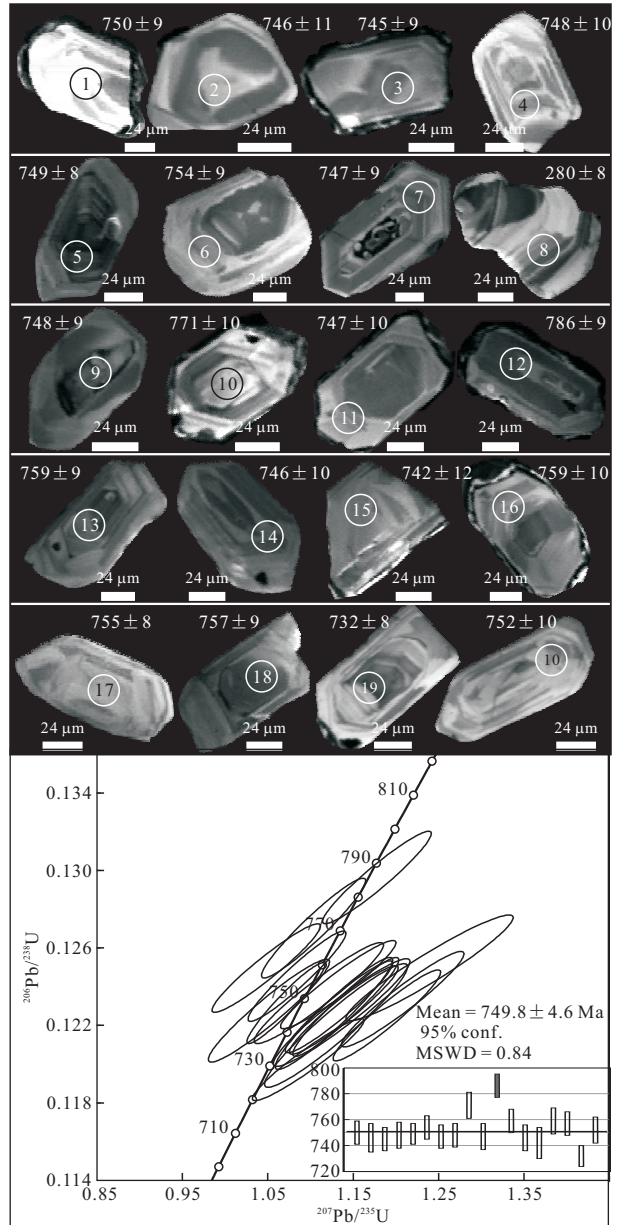


图 3 样品 TR051-3-2 锆石阴极发光图像与 LA-ICP-MS U-Pb 年龄协和图

Fig. 3 CL images and LA-ICP-MS U-Pb Concordia diagram of zircons from Sample TR051-3-2

表 1 恰什坎萨伊沟变流纹岩 (TR051-3-2) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-P isotopic dates of metarhyolite (TR051-3-2) at the Qiashikansayi

Spot	Th( $10^{-6}$ )	U( $10^{-6}$ )	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	err 1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	err 1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	err 1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	err 1 $\sigma$
1	95	174	0.50	0.071 1	0.28	1.208 5	4.72	0.123 4	0.16	750	9
2	65	129	0.45	0.067 2	0.28	1.128 3	4.51	0.122 6	0.19	746	11
3	112	171	0.59	0.070 5	0.25	1.189 7	4.12	0.122 5	0.15	745	9
4	110	183	0.53	0.067 2	0.23	1.142 2	4.06	0.123 0	0.17	748	10
5	402	390	0.92	0.062 8	0.17	1.072 8	2.99	0.123 2	0.14	749	8
6	79	151	0.49	0.066 2	0.26	1.133 5	4.43	0.124 1	0.15	754	9
7	82	171	0.44	0.067 8	0.26	1.140 0	4.18	0.122 8	0.15	747	9
8	111	42	2.38	0.106 7	0.85	0.613 3	4.86	0.044 5	0.14	280	8
9	69	142	0.44	0.067 3	0.26	1.134 3	4.12	0.123 0	0.16	748	9
10	125	203	0.52	0.063 0	0.22	1.104 7	4.01	0.127 0	0.17	771	10
11	75	153	0.42	0.062 3	0.28	1.053 2	4.66	0.122 8	0.17	747	10
12	102	169	0.55	0.065 7	0.23	1.178 5	4.18	0.129 6	0.16	786	9
13	92	165	0.51	0.060 8	0.25	1.049 8	4.16	0.125 0	0.15	759	9
14	62	118	0.52	0.061 7	0.27	1.137 3	5.23	0.122 7	0.18	746	10
15	39	99	0.35	0.067 9	0.34	1.130 7	5.48	0.122 0	0.21	742	12
16	141	206	0.59	0.072 0	0.39	1.239 8	6.42	0.125 0	0.18	759	10
17	87	158	0.50	0.136 8	7.05	2.350 6	121.60	0.124 3	0.14	755	8
18	125	227	0.49	0.062 9	0.22	1.085 7	3.77	0.124 6	0.15	757	9
19	195	262	0.61	0.065 9	0.26	1.098 4	4.30	0.120 3	0.14	732	8
20	73	132	0.49	0.064 9	0.30	1.111 0	4.96	0.123 7	0.17	752	10

具有明显的岩浆振荡环结构,为岩浆锆石特点,部分锆石边部出现约几微米的亮色镶嵌边,为后期变质作用改造所致。

该样品 20 颗锆石 20 个测点的分析结果见表 1,其中 18 颗锆石的年龄都非常集中,位于谐和线上及其附近(除 8 号和 17 锆石);剔除偏差较大的最老年龄 786 Ma(12 号点),17 个测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的年龄变化于 732~771 Ma 之间,获得加权平均年龄为  $749.8 \pm 4.6$  Ma(图 3);相应测点的 Th、U 分别变化于  $38.88 \times 10^{-6} \sim 401.85 \times 10^{-6}$  和  $99.37 \times 10^{-6} \sim 389.75 \times 10^{-6}$  之间, Th/U 值主体在 0.4~0.6 之间,变化范围较小(表 1),二者之间的相关性良好,与典型的岩浆锆石一致,因此变流纹岩的 U-Pb 年龄  $749.8 \pm 4.6$  Ma 代表该剖面双峰式火山岩的喷发时间。

4.2 地球化学分析结果

4.2.1 岩石地球化学分类 由于火山岩的结晶程度差,尤其是经过一定变质作用,无法根据野外露头和岩相学观察准确分类。Nb 和 Y 均为不活泼微量元素,受蚀变作用的影响很小,因此利用 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解分类。从图 4 可以看出,酸性火山岩落入钠闪碱流岩区,属碱性岩类,此判断与岩相学观察一致,即长石斑晶以碱性长石为主;基性火山岩落入玄武岩区,为安山玄武岩和亚碱性玄武岩,总体显示双

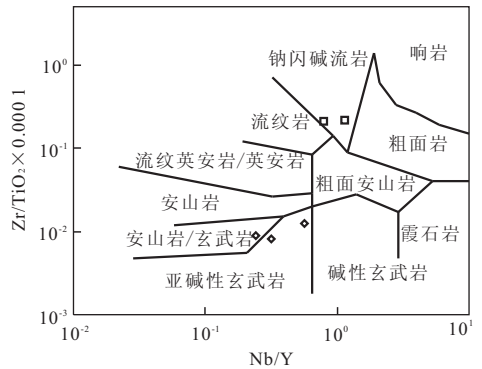


图 4 恰什坎萨伊沟南华纪火山岩 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 分类图解(底图据 Winchester and Floyd,1977)

Fig. 4 Diagram of Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> of bimodal volcanic rocks from Qiashikansayi

峰式火山岩特征。

4.2.2 主量元素 恰什坎萨伊早南华世双峰式火山岩的地球化学分析见表 2。从主量元素的分析可知,玄武岩样品 SiO<sub>2</sub> 含量变化不大(49.96%~52.62%),TiO<sub>2</sub> 含量变化明显(0.7%~2.28%);MgO 含量相对较低(3.27%~6.67%),Mg<sup>#</sup> 在 17~42 之间。随 Mg<sup>#</sup> 降低,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量逐步增加,而 CaO、K<sub>2</sub>O 则呈下降趋势(表 2),体现较好的线性关系;CaO 含量逐步降低,全碱(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)含量逐步降低且由富 K 向富 Na 过

表 2 恰什坎萨伊沟双峰式火山岩主量(%)及微量元素(10<sup>-6</sup>)分析结果

Table 2 Chemical compositions of bimodal volcanic rocks at the Qiashikansayi

样品	TR051-2-2	TR051-2-3	TR051-5-1	TR051-3-2	TR051-4-1
岩性	玄武岩	玄武岩	玄武岩	流纹岩	流纹岩
SiO <sub>2</sub>	49.96	51.11	52.62	75.46	77.88
TiO <sub>2</sub>	0.7	1.91	2.28	0.24	0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.35	12.73	11.23	12.45	10.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.26	16.24	18.13	1.37	2.12
MnO	0.19	0.16	0.14	0.02	0.01
MgO	6.67	4.73	3.27	0.67	0.24
CaO	5.95	5.08	3.93	0.91	0.35
Na <sub>2</sub> O	3.3	2.85	2.93	2.51	0.16
K <sub>2</sub> O	3.96	2.06	1.47	4.05	6.11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.16	0.22	0.03	0.02
LOI	3.34	2.73	3.62	1.89	1.59
Total	99.74	99.78	99.86	99.59	99.61
Mg <sup>#</sup>	57	37	27	49	18
Ba	1004	449	285	1259	1798
Rb	105	71.61	58.03	126	162
Sr	361	145	93.92	54.82	61.6
Y	23.15	42.86	46.82	57.49	51.7
Zr	85.62	166	183	495	366
Nb	12.99	10.42	14.79	45.19	58.14
Th	3.13	6.56	5.54	12.89	15.08
Ga	18.86	19.56	20.64	18.86	17.24
Ni	76.1	18.35	12.33	2.95	10.37
Hf	2.3	4.37	4.86	12.35	9.85
Ta	0.53	0.78	0.95	3.16	4.19
U	0.94	1.68	1.79	2.19	2.07
La	13.04	17.11	21.23	63.5	58.68
Ce	26.97	39.69	46.46	128	120
Pr	3.21	5.27	6.06	15.89	15.3
Nd	12.57	22.18	25.43	59.53	58.44
Sm	2.97	5.72	6.44	10.91	11.63
Eu	0.74	1.59	1.88	2.22	2.6
Gd	3.26	6.62	7.6	9.58	10.16
Tb	0.54	1.08	1.21	1.41	1.53
Dy	3.72	7.35	7.87	9.41	9.48
Ho	0.86	1.63	1.76	2.12	2.02
Er	2.47	4.34	4.99	5.96	5.62
Tm	0.38	0.67	0.74	0.93	0.86
Yb	2.54	4.36	4.89	6.27	5.69
Lu	0.41	0.69	0.77	1	0.9

注: Mg<sup>#</sup> = [Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + Fe<sup>2+</sup> (total))] × 100.

渡,反映了玄武岩由钙碱性向拉斑玄武岩演化的趋势.

两个变流纹岩样品的 SiO<sub>2</sub> 含量较高(75.46%和 77.88%), TiO<sub>2</sub> 含量极低(0.24%~0.17%); (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) 含量高(6.56%和 7.27%), K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 1; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量中等(12.45%和 10.97%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高(1.37和 2.12), CaO 含量 < 1%

(0.91%和 0.35%), MgO 含量相对较低(0.67%和 0.24%), Mg<sup>#</sup> 变化范围大(31和 11). A/CNK 值 > 1(1.22和 1.46), 过铝质, 与 S 型花岗岩特征类似; 但是 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量极低(0.03%和 0.02%), 与富铝的 S 型花岗岩明显不同(King *et al.*, 1997). 变流纹岩总体表现出富 Si、富碱、富 Fe, 贫 CaO、MgO、TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 与铝质 A 型花岗岩特征非常接近.

**4.2.3 微量元素** 玄武岩的 REE 总量相对较低(73.67 × 10<sup>-6</sup> ~ 137.33 × 10<sup>-6</sup>), 但呈逐步增加趋势; 稀土元素标准化曲线(图 5c)显示 LREE 富集特点; δEu 为 0.72~0.82, 表明玄武质岩浆上涌过程中曾发生过斜长石结晶分异作用. 在微量元素蛛网图中(图 5d), 强不相容元素相对富集, 但富集程度不明显; P、Ti 显示轻微亏损, 微弱的 Nb 和 Ta 亏损, 与 Ethiopia 大陆溢流玄武岩的微量元素蛛网图相似.

流纹岩的 REE 总量较高(302.57 × 10<sup>-6</sup> ~ 316.77 × 10<sup>-6</sup>), 球粒陨石标准化曲线(图 5a)呈 LREE 富集特征, Eu 呈中等负异常(0.65~0.71). 从微量元素蛛网图(图 5b)上可以看出, 流纹岩富集 Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素; 10 000Ga/Al(2.62与 2.86) > 2.6, Nb、Zr、Y 等高场强元素含量也较高, 具有典型 A 型花岗岩特征(Whalen *et al.*, 1987); Sr、P、Ti 则表现为强烈的负异常, 与世界典型流纹岩特征相近. 两个流纹岩都有很高的 La/Sm 值(分别为 5.82和 5.04), 可能与地壳物质混染或者与玄武岩不同的源区性质有关.

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

Mg<sup>#</sup> 与氧化物关系(表 2)显示 3 个玄武岩样品都表现出很好的线性关系, 指示结晶分异对玄武岩岩浆演化的控制作用. 该剖面玄武岩表现出 Nb、Ta 等 HFSE 亏损特征, La/Sm 的变化范围较大(2.99~4.39)暗示了地壳物质混染对玄武岩的影响. 在 Ta/Yb-Th/Yb 图解(图 6)中, 该剖面玄武岩落入岛弧玄武岩区, 但由于地壳混染会使 Ta 浓度降低, 从而导致投影位置左移(夏林圻等, 2007), 因此其正确的投影位置应当在 OIB 源区, 反映玄武岩熔体来自富集的软流圈(或地幔柱)源区.

与大陆溢流玄武岩伴生的流纹岩一般有 3 种成因解释: (1) 幔源玄武质母岩岩浆结晶分异, 一般有地壳混染; (2) 底侵的基性火成岩的部分熔融; (3) 大



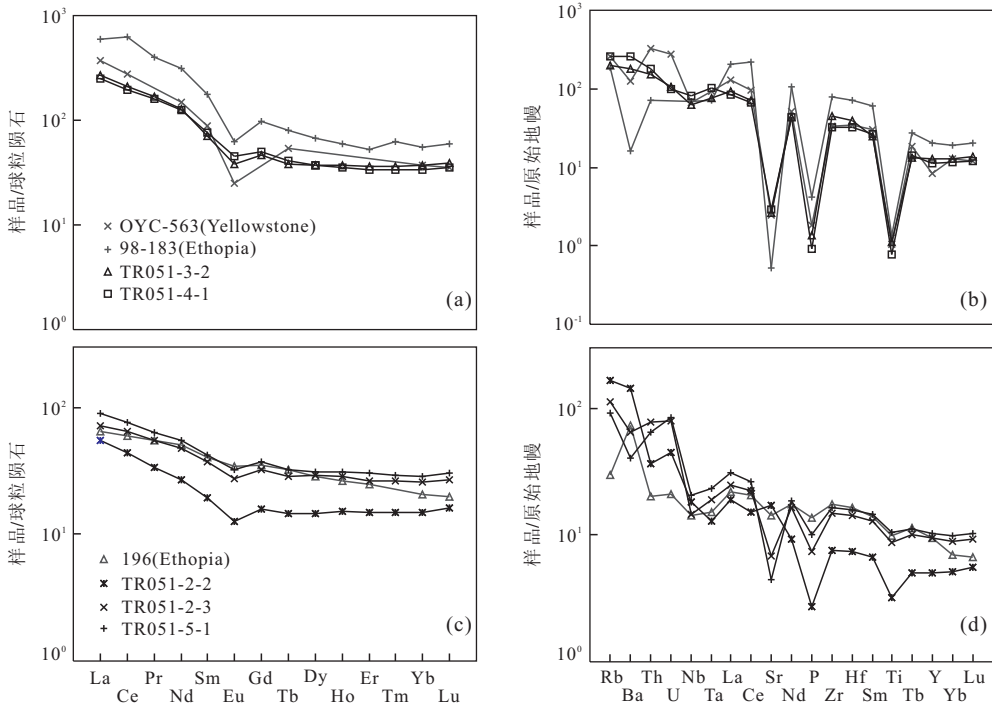


图 5 恰什坎萨伊沟双峰式火山岩稀土元素分配形式图与微量元素蛛网图

Fig. 5 Primitive mantle normalized trace elements pattern and chondrite normalized rare earth elements pattern for bimodal volcanic rocks

a, b 为流纹岩, c, d 为玄武岩; OYC-563 (Yellowstone) 和 98-183 (Ethiopia) 流纹岩数据引自 Hildreth *et al.* (1991) 和 Ayalew and Yirgu (2003); 196 (Ethiopia) 玄武岩数据引自 Kieffer *et al.* (2004); 球粒陨石、原始地幔数据引自 Sun and McDonough (1989)

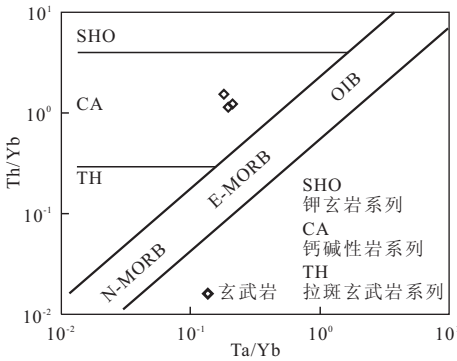


图 6 玄武岩 Ta/Yb-Th/Yb 图解(底图据夏林圻等, 2007)

Fig. 6 Diagram of Th/Yb-Ta/Yb for basalts

陆地壳的部分熔融 (Ayalew and Yirgu, 2003). 该剖面流纹岩与玄武岩就  $Mg^{\#}$  与氧化物没有相关性 (表 2), 暗示其不可能是玄武岩直接结晶分异成因; 而 Ti、P、Sr 的强烈亏损则表现出地壳物质属性. 地壳岩石部分熔融往往表现较高的 Rb/Nb、La/Nb 值和极低的  $TiO_2$  含量 (Pearce *et al.*, 1984), 比如美国 Yellowstone 地壳熔融成因流纹岩的 Rb/Nb 值为 2~5, La/Nb 值为 0.8~2.3 (Hildreth *et al.*, 1991); 而该剖面流纹岩 Rb/Nb 值为 2.79, La/Nb

值为 1.01~1.41,  $TiO_2$  含量低至 0.17%~0.24%, 与美国 Yellowstone 地壳熔融成因流纹岩一致; 流纹岩的 REE 分配形式图与微量元素蛛网图也反映与 Yellowstone 流纹岩更相似, 与玄武岩岩浆结晶分异并遭受陆壳混染的 Ethiopia 流纹岩有一定区别. 如前所述, 流纹岩与铝质 A 型花岗岩特征相似, 而后者源区一般处于下地壳位置 (King *et al.*, 1997); 因此, 流纹岩可能如纳米比亚 Parisis 碱流岩一样来源于古老的下地壳 (Mingram *et al.*, 2000). 综上所述, 该剖面流纹岩为大陆地壳部分熔融成因, 可能为软流圈上涌导致幔源岩浆底侵中、下地壳并诱发其重熔所致 (可能有少量地幔物质的加入), 其具体形成机制有待进一步研究. Sr、Eu、P、Ti 的强烈负异常指示斜长石、磷灰石、钛铁矿在部分熔融中为残留相形式存在.

### 5.2 构造环境

由于地壳混入对 Zr、Y 的含量没有多大影响, Zr-Zr/Y 图解可以较真实地反映玄武岩的形成环境 (夏林圻等, 2007). 图 7a 中, 3 个玄武岩样品都落入板内玄武岩区; 较高的 Zr 含量 ( $85.62 \sim 183.21$ )  $\times 10^{-6}$  与较高的 Zr/Y 比值 ( $>3$ ) 则体现大陆玄武岩

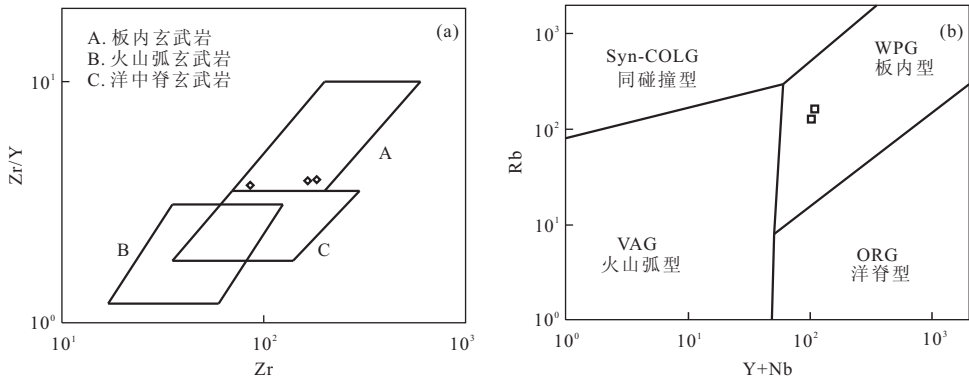


图 7 恰什坎萨伊沟双峰式火山岩构造判别图解(底图据夏林圻等,2007;Förster *et al.*, 1997)  
 Fig. 7 Diagram of Zr-Zr/Y (a) for basalts and Rb-(Y+Nb) (b) for rhyolites

特征,上述表明该剖面玄武岩为大陆板内玄武岩. 该剖面玄武岩的(Th/Nb)<sub>n</sub>比值>1(2.02~3.14), La/Nb比值>1(1.00~1.43), Nb、Ta、Ti表现出明显负异常,反映了大陆板内玄武岩在上侵过程中遭受了强烈的地壳混染作用(Saunders *et al.*, 1992); 微量元素蛛网图上显示该剖面玄武岩与 Ethiopia 大陆溢流玄武岩相似,表明该剖面玄武岩形成于大陆裂谷环境. 玄武岩由钙碱性向拉斑玄武岩演化的趋势反映了裂谷不断扩展的过程.

Y+Nb-Rb 图解(Förster *et al.*, 1997)显示流纹岩形成于板内环境(图 7b),较低的 Th/Ta 比值(3.60~4.09)也反映了板内火山岩特性,同时暗示该剖面流纹岩的熔融源区没有或者很少受到俯冲作用的影响(Schandl and Gorton, 2002). 因此,该剖面流纹岩与玄武岩组合为一套典型的大陆裂谷型双峰式火山岩.

## 6 地质意义

目前发现的比较可靠的北阿尔金蛇绿岩带最老年龄为 524.4 Ma(刘良等, 1999),表明在中寒武世已经存在洋盆;贝壳滩-红柳泉 HP/LT 变质带中高压变质泥质岩多硅白云母的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄达 574.7±2.5 Ma(车自成等, 1995),暗示北阿尔金洋的形成时间应当更早. 本文获得双峰式火山岩中流纹岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 749.8±4.6 Ma,具大陆裂谷性质;西安地质矿产研究所也报道过在该区索拉克一带玄武岩锆石中获得 SHRIMP U-Pb 年龄 763±17 Ma 和 754±17 Ma(来自西安地质矿产研究所网站),二者为北阿尔金洋的初始裂解事件提供了时代证据. 另外,拉配泉西

侧拉配泉断裂与阿尔金北缘断裂之间夹持一套火山岩也具双峰式特征,可能形成于大陆裂谷演化后期,部分演化到初始大洋环境(孙勇等, 1997),表明北阿尔金蛇绿混杂岩带至今仍保留了多处新元古代裂谷火山岩残片.

近年来的研究表明北阿尔金为北祁连的西延段,并被后期的阿尔金断裂左行错移了 350~400 km(许志琴等, 1999),主要依据为两条蛇绿混杂岩带的形成时间相近、都发育高压低温变质带,都产出与俯冲碰撞有关的花岗岩、有相同的沟弧盆俯冲体系(杜远生等, 2006; 张建新等, 2007b; 吴才来等, 2007; 杨经绥等, 2008; 刘晓煌等, 2010),但缺少初始裂解的证据支撑. 曾建元等(2006)获得北祁连牛心山片麻状花岗岩和雷公山片麻状石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 776±10 Ma、774±23 Ma; 陆松年等(2009)测得吊大坂花岗岩片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 757±8 Ma,可能代表了古祁连洋开始张裂时期的岩浆活动,记录了北祁连在早南华世的裂解事件,而北阿尔金一直缺少相关时代的岩浆活动报道. 本次发现北阿尔金早南华世(749.8±4.6 Ma)的双峰式火山岩记录,暗示北祁连与北阿尔金初始裂解时代相近,从洋盆的初始演化阶段证明二者为同一个带,表明二者从裂解到最终闭合经历了相似的构造演化过程. 1:5 万石门湾及老龙湾幅区调获得北祁连东段上吊吊坡地区拉斑玄武岩 Sm-Nd 年龄为 723.1±25 Ma(于福生等, 2001),可能为裂谷进一步伸展的结果.

随着地质工作不断深入,阿尔金与祁连山地区有更多的新元古代裂解信息被挖掘出来. 如上所述,北阿尔金与北祁连的初始裂解事件可以对比;资料显示,南阿尔金与柴北缘初始裂解事件同样存在可比性. 柴北缘是新元古代裂解事件记录较多的地区,

锡铁山榴辉岩的锆石核部年龄在 800~750 Ma 之间(Zhang *et al.*, 2006b),甚至已经厘定出该时间段的蛇绿岩套组合(768±39 Ma, Rb-Sr 法)(杨经绥等, 2004);南阿尔金超高压变质岩锆石微区 LA-ICP-MS 定年揭示其核部年龄 754±9 Ma(刘良等, 2007),并且其原岩也已具有洋壳性质,暗示南阿尔金及与柴北缘在 800~750 Ma 可能已经有洋壳出现,而北阿尔金与北祁连一线在 750 Ma 左右可能仍处于大陆裂谷发展阶段,暗示南带较北带更早裂解出洋盆。

Rodinia 超大陆在 800~700 Ma 的裂解是新元古代最重要的地质事件之一(Meert and Torsvik, 2003),地幔柱活动被认为是此次裂解的主要驱动因素(Li *et al.*, 1999),上述阿尔金、祁连地区的新元古代裂解事件是 Rodinia 超大陆裂解的重要组成部分,其分离了阿中、敦煌、阿拉善、柴达木、祁连、欧龙布鲁克这些微陆块。而这些微陆块表现亲塔里木陆块特征(陆松年等, 2002),共同的新元古代早期构造热事件指示它们与塔里木陆块因格林威尔运动克拉通化,形成一个“西域板块”(葛肖虹和刘俊来, 1999)。因此,我国西北地区新元古代中期裂解记录无论是对“西域板块”自身构造演化的完善,还是对 Rodinia 超大陆恢复重建都有直接意义。

近年来在塔里木盆地及周缘发现了多处 Rodinia 超大陆裂解事件的物质记录,如塔里木西北缘阿克苏基性岩墙群在 759±7 Ma(SHRIMP U-Pb)侵入蓝片岩之中(Zhang *et al.*, 2009a);塔中塔参 1 井前寒武花岗岩年龄数据显示也存在此期岩浆活动(790~744 Ma,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法)(Guo *et al.*, 2005);北缘的库鲁克塔格兴地花岗闪长岩及太阳岛花岗岩锆石 U-Pb 年龄在 820~795 之间(Zhang *et al.*, 2007a; 邓兴梁等, 2008),基性岩墙群年龄有 823.8±8.7 Ma(SHRIMP U-Pb), 816±15 Ma(LA-ICP-MS U-Pb), 776.8±8.9 Ma(SHRIMP U-Pb)(邓兴梁等, 2008; Zhang *et al.*, 2009b),后期贝义西组底部裂谷型火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 740±7 Ma(Xu *et al.*, 2009);西昆仑双峰式侵入杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 783±10 Ma(Zhang *et al.*, 2006a),铁克里克凝灰岩(787±1 Ma, LA-ICP-MS U-Pb)及共生大陆溢流玄武岩则形成于大陆裂谷环境(王超等, 2009)。上述表明“西域板块”在新元古代中期伴随 Rodinia 超大陆裂解发生了广泛的裂解,并在早古生代演化出库地洋、南天山洋、北阿尔金—祁连洋、南阿尔金—柴北缘洋等;而塔里木盆地内部

(阿克苏、塔中)虽然也有 Rodinia 超大陆裂解的物质记录,但并没有进一步裂解为洋盆,体现裂解强度的不均一性,可能与地幔枝的强弱有关。

如上所述,“西域板块”(塔里木陆块及周缘微陆块)新元古代中期(830~720 Ma)岩浆活动频繁,与 Rodinia 超大陆裂解密切相关。Zhang *et al.* (2011)将塔里木周缘新元古代中期岩浆活动划分为 825~800 Ma 和 780~745 Ma 两个阶段;不难看出,前期以基性与酸性侵入体为特征,后期开始出现裂谷型火山岩,反应后期岩浆活动更为强烈。这与扬子板块周缘新元古代中期岩浆活动期具有相似性,扬子板块周缘新元古代中期(850~740 Ma)普遍发育两期较强的岩浆活动(Li *et al.*, 1999, 2003; Zheng *et al.*, 2008; 李献华等, 2008; 谢士稳等, 2009),大致划为两个时段(830~795 Ma, 780~745 Ma)(Li *et al.*, 1999):前期形成于 Rodinia 超大陆在超级地幔柱上升过程中开始转向伸展环境阶段;后期则形成于裂谷发育峰期阶段(李献华等, 2008)。另外,新元古代“西域板块”与扬子板块最终克拉通化时间、南华纪—震旦纪地层序列、标志层层位及时代有极大相似性,古地磁资料也揭示当时二者纬度相近(陆松年等, 2004)。如上总结,新元古代中期二者可能经历了相同的裂解阶段;因此“西域板块”新元古代中期裂解岩浆事件可以参照扬子板块划分为两个阶段,即裂解初期与裂解峰期。

就上述而言,本文报道的北阿尔金双峰式火山岩(749.8±4.6 Ma)是 Rodinia 超大陆裂解峰期的岩浆记录;郭召杰等(1998)获得的北阿尔金东段半鄂博图辉长岩(Sm-Nd 等时线年龄 829±60 Ma)可能形成于初始裂解阶段。总之,北阿尔金仍残留了 Rodinia 超大陆裂解的岩浆记录,将是西北地区研究 Rodinia 超大陆聚合与裂解的重要场所。

致谢:衷心感谢审稿人提出的宝贵意见以及陈生生对野外工作的协助!

## References

- Ayalew, D., Yirgu, G., 2003. Crustal contribution to the genesis of Ethiopian plateau rhyolitic ignimbrites: basalt and rhyolite geochemical provinciality. *Journal of the Geological Society, London*, 160(1): 47–56. doi: 10.1144/0016-764901-169
- Che, Z. C., Liu, L., Liu, H. F., et al., 1995. Discovery and occurrence of high-pressure metapelitic rock in Altun mountain area. *Chinese Science Bulletin*, 40(14): 1298–1301(in Chinese).



- Deng, X. L., Shu, L. S., Zhu, W. B., et al., 2008. Precambrian tectonism, magmatism, deformation and geochronology of igneous rocks in the Xingdi fault zone, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2800—2808 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. S., Zhu, J., Gu, S. Z., 2006. Sedimentary geochemistry and tectonic significance of Ordovician cherts in Sunan, North Qilian Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 101—109 (in Chinese with English abstract).
- Förster, H. J., Tischendorf, G., Trumbull, R. B., 1997. An evaluation of the Rb vs. (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40(2—4): 261—293. doi: 10. 1016/S0024—4937(97)00032—7
- Ge, X. H., Liu, J. L., 1999. Formation and tectonic background of the northern Qilian orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 222—229 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. J., Yin, A., Alexander, R., et al., 2005. Geochronology and geochemistry of deep-drill-core samples from the basement of the central Tarim basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25: 45—56. doi: 10. 1016/j. jseaes. 2004. 01. 016
- Guo, Z. J., Zhang, Z. C., Wang, J. J., 1998. Sm-Nd isochron age of the ophiolite belt at the margin of the Altyn Tagh mountains and its tectonic significance. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 1981—1984 (in Chinese).
- Hao, J., Wang, E. Q., Liu, X. H., et al., 2006. Jinyanshan collisional orogenic belt of the early Paleozoic in the Altyn mountains; evidence from single zircon U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isotopic dating for the arc magmatite and ophiolitic mélange. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2743—2752 (in Chinese with English abstract).
- Hildreth, W., Halliday, A. N., Christiansen, R. L., 1991. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone plateau volcanic field. *Journal of Petrology*, 32(1): 63—138. doi: 10. 1093/etrology/32. 1. 63
- Kieffer, B., Arndt, N., Lapierre, H., et al., 2004. Flood and shield basalts from Ethiopia: magmas from the African superswell. *Journal of Petrology*, 45(4): 793—834. doi: 10. 1093/etrology/egg112
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., et al., 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371—391. doi: 10. 1093/etroj/38. 3. 371
- Li, X. H., Wang, X. C., Li, W. X., et al., 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: from orogenesis to intracontinental rifting. *Geochimica*, 37(4): 382—398 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Li, X. H., Kinny, P. D., et al., 1999. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 171—181. doi: 10. 1016/S0012—821X(99)00240—X
- Li, Z. X., Li, X. H., Kinny, P. D., et al., 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(1—4): 85—109. doi: 10. 1016/S0301—9268(02)00208—5
- Liu, L., Che, Z. C., Wang, Y., et al., 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., Chen, D. L., et al., 2009. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the South Altyn Tagh, northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 232—244. doi: 10. 1016/j. jseaes. 2008. 10. 007
- Liu, L., Zhang, A. D., Chen, D. L., et al., 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, X. H., Deng, J., Sun, X. L., et al., 2010. Geochemistry and tectonic setting of lavas from Shijihe area in western North Qilian Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(6): 959—968 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3799/dqkx. 2010. 110
- Lu, S. N., Li, H. K., Chen, Z. H., et al., 2004. Relationship between Neoproterozoic cratons of China and the Rodinia. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 515—523 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Yu, H. F., Jin, W., et al., 2002. Microcontinents on the eastern margin of Tarim paleocontinent. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(4): 317—326 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Yu, H. F., Li, H. K., et al., 2009. Precambrian geology in the Central China Orogen (western part). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

- Meert, J. G., Torsvik, T. H., 2003. The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. *Tectonophysics*, 375(1-4): 261-288. doi:10.1016/S0040-1951(03)00342-1
- Mingram, B., Trumbull, R. B., Littman, S., et al., 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos*, 54(1-2): 1-22. doi:10.1016/S0024-4937(00)00033-5
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983. doi:10.1093/petrology/25.4.956
- Qi, X. X., Li, H. B., Wu, C. L., et al., 2005a. SHRIMP U-Pb age of zircons from Qashikansayi granodiorite in the northern Altay Tagh mountains and its significations. *Chinese Science Bulletin*, 50(6): 571-576 (in Chinese).
- Qi, X. X., Wu, C. L., Li, H. B., 2005b. SHRIMP U-Pb age of zircons from Kazisayi granite in the northern Altay Tagh mountains and its significations. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 859-866 (in Chinese with English abstract).
- Saunders, A. D., Storey, M., Kent, R. W., et al., 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: Storey, B. C., Alabaster, T., Pankhurst, R. J., eds., *Magmatism and the causes of continental break-up. Geological Society Special Publication*, 68: 41-60.
- Schandl, E. S., Gorton, M. P., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97(3): 629-642. doi:10.2113/gsecongeo.97.3.629
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 42: 313-345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Sun, Y., Liu, C. Y., Che, Z. C., 1997. The Proterozoic rift volcanic series in the Lapeiquan area, the Altun mountains and its tectonic significance. *Geological Review*, 43(1): 17-24 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Liu, L., Che, Z. C., et al., 2009. Zircon U-Pb and Hf isotopic from the east segment of Tiekelike tectonic belt: constrains on the timing of Precambrian basement at the southwestern margin of Tarim, China. *Acta Geological Sinica*, 83(11): 1647-1656 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419. doi:10.1007/BF00402202
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343. doi:10.1016/0009-2541(77)90057-2
- Wu, C. L., Yang, J. S., Yao, S. Z., et al., 2005. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 846-858 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Yao, S. Z., Zeng, L. S., et al., 2007. Bashikaogong-Simierbulake granitic complex, North Altun, NW China: geochemistry and zircon SHRIMP ages. *Science in China (Series D)*, 37(1): 10-26 (in Chinese).
- Wu, Y. Z., Li, R. S., Wang, Z., et al., 2007. The attribution of Altyn marginal faults. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 662-670 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77-89 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. W., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2009. U-Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons of Nanhua sedimentary rocks from the Yangtze gorges: implications for genesis of Neoproterozoic magmatism in South China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 117-126 (in Chinese with English abstract).
- Xiu, Q. Y., Yu, H. F., Liu, Y. S., et al., 2007. Geology and zircon U-Pb age of pillow basalt at Qashikansoy in northern Altun Tagh, W China. *Acta Geological Sinica*, 81(6): 886-893 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Xiao, S. H., Zou, H. B., et al., 2009. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China. *Precambrian Research*, 168(3-4): 247-258. doi:10.1016/j.precamres.2008.10.008
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Zhang, J. X., et al., 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 Geological Sinica*, 73(3): 193-205 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Shi, R. D., Wu, C. L., et al., 2004. Recognition

- of Neoproterozoic ophiolite on the northern margin of the Qiandam basin; evidence of the breakup of Rodinia? *Geological Bulletin of China*, 23(9-10): 892-898 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Shi, R. D., Wu, C. L., et al., 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).
- Yu, F. S., Qi, J. F., Wang, C. Y., et al., 2001. Features of the late Proterozoic metamorphic volcanic rocks in the eastern part of the northern Qilian mountains and their tectonic setting. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(1): 74-82 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H. F., Lu, S. N., Liu, Y. S., et al., 2002. Composing of the Altyn Tagh formation-complex and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 21(12): 834-840 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, J. Y., Yang, H. Y., Wan, Y. S., et al., 2006. Finding of Neoproterozoic (~775 Ma) magmatism recorded in metamorphic complexes from the North Qilian orogen; evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 51(5): 575-581 (in Chinese).
- Zhang, C. L., Li, Z. X., Li, X. H., et al., 2006a. Neoproterozoic bimodal intrusive complex in the southwestern Tarim block, NW China; age, geochemistry and implications for the rifting of Rodinia. *International Geology Review*, 48(2): 112-128. doi: 10.2747/0020-6814.48.2.112
- Zhang, J. X., Yang, J. S., Meng, F. C., et al., 2006b. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China; new evidence for an early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(2-3): 143-150. doi: 10.1016/j.jseas.2005.09.017
- Zhang, C. L., Li, X. H., Li, Z. X., et al., 2007a. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Quruqtagh of northeastern Tarim block, western China; geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Precambrian Research*, 152: 149-169. doi: 10.1016/j.precamres.2006.11.003
- Zhang, J. X., Meng, F. C., Yu, S. Y., et al., 2007b.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology of high-pressure/low-temperature blueschist and eclogite in the North Altyn Tagh and their tectonic implications. *Geology in China*, 34(4): 558-564 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. L., Li, Z. X., Li, X. H., et al., 2009a. Neoproterozoic mafic dyke swarms at the northern margin of the Tarim block, NW China; age, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(2): 167-179. doi: 10.1016/j.jseas.2009.02.003
- Zhang, Z. Y., Zhu, W. B., Shu, L. S., et al., 2009b. Neoproterozoic ages of the Kuluketage diabase dyke swarm in Tarim, NW China, and its relationship to the breakup of Rodinia. *Geological Magazine*, 146(1): 150-154. doi: 10.1017/S0016756808005839
- Zhang, C. L., Yang, D. S., Wang, H. Y., et al., 2011. Neoproterozoic mafic-ultramafic layered intrusion in Quruqtagh of northeastern Tarim block, NW China; two phases of mafic igneous activity with different mantle sources. *Gondwana Research*, 19(1): 177-190. doi: 10.1016/j.gr.2010.03.012
- Zhang, Q., Zhou, Q. G., 2001. Ophiolite in China. Scientific Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zheng, Y. F., Wu, R. X., Wu, Y. B., et al., 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust; geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan orogen, South China. *Precambrian Research*, 163(3-4): 351-383. doi: 10.1016/j.precamres.2008.01.004
- Zong, K. Q., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2010. In situ U-Pb dating and trace element analysis of zircons in thin sections of eclogite; refining constants on the ultra high-pressure metamorphism of the Sulu terrane, China. *Chemical Geology*, 269: 237-251. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.09.021

## 附中文参考文献

- 车自成, 刘良, 刘洪福, 等, 1995. 阿尔金山地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境. *科学通报*, 40(14): 1298-1301.
- 邓兴梁, 舒良树, 朱文斌, 等, 2008. 新疆兴地断裂带前寒武纪构造-岩浆-变形作用特征及其年龄. *岩石学报*, 24(11): 2800-2808.
- 杜远生, 朱杰, 顾松竹, 2006. 北祁连山一带奥陶纪硅质岩沉积地球化学特征及其多岛洋构造意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(1): 101-109.
- 葛肖虹, 刘俊来, 1999. 北祁连山带的形成与背景. *地学前缘*, 6(4): 222-229.
- 郭召杰, 张志诚, 王建君, 1998. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义. *科学通报*, 43(18): 1981-1984.
- 郝杰, 王二七, 刘小汉, 等, 2006. 阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带: 弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇

- 绿混杂岩<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代学研究的证据. 岩石学报, 22(11):2743—2752.
- 李献华, 王选策, 李武显, 等, 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷. 地球化学, 37(4):382—398.
- 刘良, 车自成, 王焰, 等, 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, 张安达, 陈丹玲, 等, 2007. 阿尔金江孜勒萨石榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义. 地学前缘, 14(1):98—107.
- 刘晓煌, 邓军, 孙兴丽, 等, 2010. 北祁连西段石鸡河地区火山岩地球化学特征及其动力学意义. 地球科学——中国地质大学学报, 35(6):959—968.
- 陆松年, 李怀坤, 陈宏志, 等, 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系. 地学前缘, 11(2):515—523.
- 陆松年, 于海峰, 金巍, 等, 2002. 塔里木古大陆东缘的微大陆块体群. 岩石矿物学杂志, 21(4):317—326.
- 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等, 2009. 中央造山带(中—西部)前寒武纪地质. 北京:地质出版社.
- 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 等, 2005a. 北阿尔金恰什坎萨依花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 50(6):571—576.
- 戚学祥, 吴才来, 李海兵, 2005b. 北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 21(3):859—866.
- 孙勇, 刘池阳, 车自成, 1997. 阿尔金山拉配泉地区元古宙裂谷火山岩系及其构造意义. 地质论评, 43(1):17—24.
- 王超, 刘良, 车自成, 等, 2009. 塔里木南缘铁克里克构造带东段前寒武纪地层时代的新限定和新元古代地壳再造: 锆石定年和 Hf 同位素的约束. 地质学报, 83(11):1647—1656.
- 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 等, 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 21(3):846—858.
- 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 等, 2007. 北阿尔金巴什考供—斯米尔布拉克花岗杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 中国科学(D辑), 37(1):10—26.
- 伍跃中, 李荣社, 王战, 等, 2007. 阿尔金山各边界断裂的归属性. 地球科学——中国地质大学学报, 32(5):662—670.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等, 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩. 岩石矿物学杂志, 26(1):77—89.
- 谢士稳, 高山, 柳小明, 等, 2009. 扬子克拉通南华纪碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素对华南新元古代岩浆事件的指示. 地球科学——中国地质大学学报, 34(1):117—126.
- 修群业, 于海峰, 刘永顺, 等, 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):886—893.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等, 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, 史仁灯, 吴才来, 等, 2004. 柴达木盆地北缘新元古代蛇绿岩的厘定——罗迪尼亚大陆裂解的证据? 地质通报, 23(9—10):892—898.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等, 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.
- 于福生, 漆家福, 王春英, 等, 2001. 北祁连东段新元古代火山岩的发现及其特征和形成环境. 大地构造与成矿学, 25(1):74—82.
- 于海峰, 陆松年, 刘永顺, 等, 2002. “阿尔金山岩群”的组成及其构造意义. 地质通报, 21(12):834—840.
- 曾建元, 杨宏仪, 万渝生, 等, 2006. 北祁连山变质杂岩中新元古代(~775 Ma)岩浆活动纪录的发现: 来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的证据. 科学通报, 51(5):575—581.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等, 2007b. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义. 中国地质, 34(4):558—564.
- 张旗, 周庆国, 2001. 中国蛇绿岩. 北京:科学出版社.