

文章编号: 1006-6616 (2010) 01-0096-12

# 阿尔金山东段喀腊大湾中基性火山岩 岩石地球化学特征及成因探讨

崔玲玲<sup>1</sup>, 陈柏林<sup>1</sup>, 杨 农<sup>1</sup>, 陈正乐<sup>1</sup>, 丁文君<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘 要:** 新疆阿尔金山东段喀腊大湾地区位于北东向阿尔金走滑断裂北侧与东西向阿尔金北缘断裂所夹持的区域, 区内发育一套火山沉积岩系。对其中中基性火山岩进行较为系统的岩石地球化学研究, 结果显示为 LREE 微弱富集型和部分平坦型两种稀土配分曲线型式, 为岛弧型火山岩; 微量元素的 Zr/Nb、Nb/Ta 以及 Zr/Hf 比值分析等地球化学特征表明本区经受了地壳物质的混染作用, 火山岩的 La-La/Sm 投影显示为部分熔融和分离结晶共同作用产生的; Hf-Tu-Ta 和 TFeO-Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O - Mg 的构造环境投图显示本区火山岩主要为拉斑系列的火山弧玄武岩, 推测本区早古生代为板块俯冲带上盘的岛弧环境, 玄武岩类以幔源为主。

**关键词:** 喀腊大湾; 火山岩; 岩石地球化学; 构造环境

中图分类号: P588

文献标识码: A

阿尔金断裂为青藏高原北缘一条大型左行走滑断裂, 随着中外地质学者对中国西部地区研究的深入, 阿尔金断裂带和阿尔金山及其周缘地区的构造演化已经成为近十几年来的研究热点<sup>[1-11]</sup>。前人研究表明, 阿尔金山北缘地区发育红柳沟—拉配泉蛇绿岩套和中基性火山岩, 其形成的构造环境有洋中脊 (MORB) 和洋岛环境 (OIB)<sup>[12-14]</sup>。本文以岩石地球化学分析数据为基础, 全面分析了阿尔金山东段喀腊大湾地区中基性火山岩的地球化学特征, 结合前人研究的相关资料和有关的年代学测试结果, 进一步探讨了研究区中基性火山岩形成时的构造环境, 认为该地区也存在早古生代岛弧型火山岩。

## 1 地质背景

本文研究区为阿尔金山东段喀腊大湾地区, 位于北东向阿尔金走滑断裂北侧与东西向阿尔金北缘断裂所夹持的索尔库里走廊北侧区域, 属于阿尔金山山脉之金雁山的西段。研究区地层属于塔里木地层区中塔南地层分区的阿尔金山地层小区, 由老到新依次出露太古宇达格拉格布拉克组 (Ardg), 下古生界寒武系上统塔昔达坂群斯米尔布拉克组 ( $\epsilon_3s$ ) 和卓阿布拉克组 ( $\epsilon_3zh$ ) (原 1:200 000 区域地质调查资料显示为上元古界蓟县系, 本项目研究根据

收稿日期: 2009-12-27

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目 (编号: 2006BAB07B02-04) 资助。

作者简介: 崔玲玲 (1985-), 女, 硕士, 主要从事构造地质学研究。E-mail: bachelorzemail@126.com。

玄武岩锆石 U-Pb 测年修正, 另文报道), 石炭系上石炭统因格布拉克组 ( $C_3y$ ), 古近系渐新统下干柴沟组 ( $E_3g$ )、新近系中新统上干柴沟组 ( $N_1g$ )、中新统下油砂山组 ( $N_1y$ ) 和第四系 (Q)。研究区深成岩浆活动以早古生代中—酸性深成岩为主, 并零星分布有早元古代花岗闪长岩与花岗岩等侵入岩。

研究区所在的阿尔金山北缘地区发育红柳沟—拉配泉蛇绿岩带。前人认为该蛇绿混杂岩中的枕状熔岩和高压变质岩是消减掉的古生代洋壳的残片<sup>[7]</sup>, 基性岩墙群为古海底扩张的产物<sup>[15]</sup>, 前人给出其中的 8 个火山岩岩石样品 Rb-Sr 等时线年龄为  $424.28 \pm 8.07$  Ma<sup>[16]</sup>, 玄武岩 Sm-Nd 等时线年龄为  $508.3 \pm 41$  Ma (MORB) 至  $524.4 \pm 44$  Ma (OIB)<sup>[12]</sup>, 玄武岩锆石 U-Pb 年龄为  $448.6 \pm 3.3$  Ma<sup>[13]</sup>, 为早古生代蛇绿岩套。前人认为, 红柳沟蛇绿岩中变基性火山岩分为来自亏损地幔的 MORB 和来自原始地幔或略富集地幔的 OIB 两种<sup>[14]</sup>。早古生代火山活动与区域矿产的形成具有密切的关系<sup>[9, 17, 18]</sup>。

此外, 在研究区西边较远的阿尔金山南缘构造带西段也发育蛇绿岩套, 其中的玄武岩 (部分已变质为绿片岩) 存在洋中脊、洋岛和火山弧 3 种构造环境类型, 辉绿岩岩墙形成于大陆裂谷向 MORB 环境过渡的构造环境<sup>[19~23]</sup>。

## 2 样品采集与特征描述

本次研究的采样点范围较为集中: 采样层位为寒武系上统卓阿布拉克组 ( $\epsilon_3zh$ ), 主要分布于八八铁矿—4337 高地区域<sup>[24]</sup>, 另有 4 个样品分别采集于该带北侧约 2 km 和南侧约 5 km 处 (见图 1)。其中, 卓阿布拉克组为一套火山碎屑岩建造, 主要岩性以玄武岩为主, 部分为略偏中性的安山质玄武岩和安山岩, 夹少量中酸性火山岩; 局部地区尚有红柱石片岩、大理岩等。

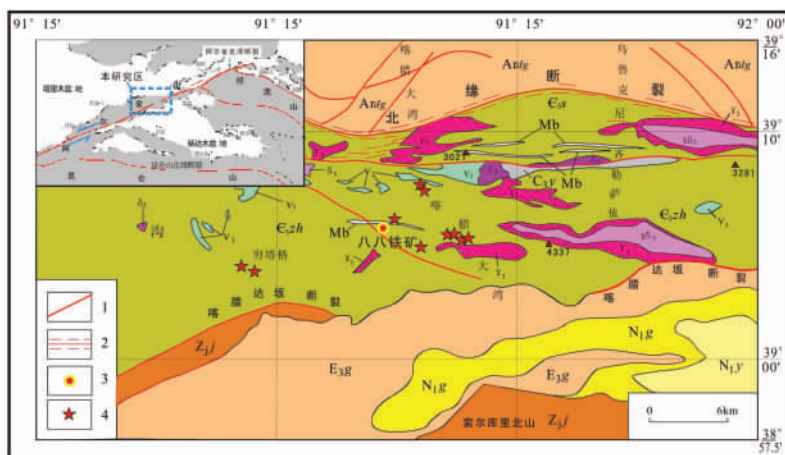


图 1 新疆阿尔金山喀腊大湾地区区域地质及采样位置图 (据文献 [24] 修改)

Fig. 1 A map showing the regional geology and sampling location of Kaladawan in Altun, Xinjiang  
 $N_1y$ -中新世下油砂山组;  $N_1g$ -中新世上干柴沟组;  $E_3g$ -渐新统下干柴沟组;  $C_3y$ -石炭系上统因格布拉克组;  
 $Z_{ij}$ -金雁山组;  $\epsilon_3zh$ -上寒武统卓阿布拉克组;  $\epsilon_3s$ -上寒武统斯米尔布拉克组;  $Ar_{dg}$ -太古代达格拉克布拉克组;  
 $\gamma_{d2}^2 \delta$ -元古代花岗闪长岩;  $\delta_3$ -早元古代闪长岩;  $\gamma_{d3}$ -早元古代花岗闪长岩;  $\gamma_3$ -早元古代花岗岩;  $v_3$ -辉长岩;  
 1-断裂; 2-韧性变形带; 3-铁矿; 4-采样位置

本文选择 15 件火山岩样品用于岩石地球化学和微量稀土元素地球化学的测试分析。用于测试的样品外表新鲜,颜色以黑色、灰黑色夹深绿色为主,镜下为微晶等粒结构;薄片观察发现,玄武岩主要分 2 种:结晶程度稍好与隐晶质。结晶程度稍好的玄武岩中发育有斜长石、辉石、云母及黄铁矿。斜长石晶体较小,颗粒大小不一,条纹构造可见,多数呈短柱状,少数为长柱状,无一定排列规律,可见斜长石的聚片双晶、正长石的卡氏双晶及格子双晶。隐晶质的玄武岩微晶之间有玻璃质或隐晶质及不透明矿物等填充。

由于后期变质变形作用,喀腊大湾地区火山岩有遭受蚀变作用现象的产生。本次测试样品选择了蚀变作用弱或者是几乎无蚀变矿化的岩石,基本上能代表原来的岩浆成分,野外定名为玄武岩,镜下观察有微晶等粒结构。

### 3 岩石地球化学测试与特征分析

#### 3.1 分析方法

主量元素和微量元素分析是在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成:全岩主量元素在 X 荧光光谱仪(2100)上测定,检测方法依据 GB/T 14506.28-1993;微量元素和稀土元素分析采用等离子质谱进行测定(X-Series),检测方法依据 DZ/T 0223-2001。其中,FeO、 $H_2O^+$ 、 $CO_2$ 、LOI 的检测方法依据分别为:GB/T 14506.14-1993、GB/T 14506.2-1993、GB 9835-1988、LY/T 1253-1999。

#### 3.2 测试结果

喀腊大湾地区火山岩主量元素和微量元素测试结果见表 1—表 3。

表 1 喀腊大湾地区火山岩主量元素分析结果

Table 1 Major element contents in volcanic rock samples from Kaladawan area

主量元素	H41-1	H52-1	H52-6	H54-1	H267-2	H41-4	H41-8	H42-2	H41-6	H53-1	H53-4	H100-1	H100-3	H102-2	H102-4
SiO <sub>2</sub> / %	50.07	54.27	46.47	47.42	45.83	48.79	48.95	47.47	53.42	49.98	51.69	45.10	49.77	53.39	50.02
TiO <sub>2</sub> / %	2.62	2.37	0.60	2.55	0.97	3.56	2.69	1.41	2.04	0.61	1.97	1.09	2.32	2.22	1.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / %	13.90	13.63	13.40	14.67	9.69	13.81	13.94	15.06	15.11	15.62	13.53	16.59	15.01	13.91	14.92
TF <sub>2</sub> O / %	13.83	13.49	18.35	14.72	11.14	14.95	13.65	9.55	10.78	9.18	13.21	8.88	11.20	12.68	9.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / %	6.12	5.28	5.79	3.24	6.04	5.66	4.46	2.81	2.61	0.86	2.52	1.84	3.49	4.97	1.36
FeO / %	7.71	8.21	12.56	11.48	5.10	9.29	9.19	6.74	8.17	8.32	10.69	7.04	7.71	7.71	8.60
MnO / %	0.24	0.26	0.21	0.22	0.36	0.24	0.23	0.19	0.22	0.18	0.29	0.21	0.24	0.22	0.23
MgO / %	4.03	2.68	8.14	7.14	11.03	3.51	4.70	6.69	2.81	8.51	5.70	8.46	5.03	2.88	7.80
CaO / %	6.40	5.42	6.86	7.90	16.84	6.74	7.41	9.45	3.19	11.85	7.16	10.92	7.54	6.51	7.35
Na <sub>2</sub> O / %	3.56	3.73	2.04	2.19	0.32	3.53	3.72	4.02	5.17	1.52	1.88	2.18	2.78	2.48	3.30
K <sub>2</sub> O / %	1.78	0.65	0.38	0.14	0.14	2.11	1.28	0.11	3.30	0.36	1.21	0.99	1.75	2.90	2.16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / %	0.43	0.60	0.06	0.27	0.17	0.73	0.38	0.19	0.52	0.09	0.20	0.12	0.53	0.60	0.20
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> / %	2.12	2.06	3.24	2.02	1.40	1.88	2.08	3.06	1.58	1.16	2.38	3.32	3.06	1.60	2.28
CO <sub>2</sub> / %	0.70	0.61	0.26	0.35	1.59	0.44	0.35	2.44	1.39	0.61	0.78	2.18	0.70	0.26	0.44
合计	99.68	99.77	100.01	99.59	99.46	100.29	99.38	99.64	99.53	99.67	100.00	100.04	99.93	99.65	100.28
Mg <sup>#</sup> / %	0.29	0.20	0.33	0.32	0.63	0.23	0.28	0.43	0.21	0.44	0.29	0.48	0.33	0.22	0.41

注:实验数据由中国地质科学院国家地质实验测试中心测定;  $Mg^{\#} = Mg / (Mg + Fe) \times 100$

表 2 喀腊大湾地区火山岩样品稀土元素分析结果

Table 2 Rare earth element contents of volcanic rocks in Kaladawan

稀土元素	H41-1	H52-1	H52-6	H54-1	H267-2	H41-4	H41-8	H42-2	H41-6	H53-1	H53-4	H100-1	H100-3	H102-2	H102-4
La/ $10^{-6}$	20.40	33.80	4.59	17.80	19.60	38.20	22.90	6.88	30.50	8.49	28.80	4.45	23.20	36.30	10.40
Ce/ $10^{-6}$	49.40	77.20	9.89	43.20	39.90	89.40	52.40	17.40	68.00	19.80	67.60	11.60	52.90	84.10	25.70
Pr/ $10^{-6}$	6.39	9.79	1.30	5.67	4.67	11.60	6.93	2.52	8.96	2.52	9.08	1.69	6.70	10.90	3.52
Nd/ $10^{-6}$	29.90	42.00	5.72	25.10	19.80	51.50	31.10	12.30	39.60	10.60	38.10	8.56	29.70	48.00	16.10
Sm/ $10^{-6}$	7.81	10.50	1.69	6.36	4.97	13.00	8.19	3.62	10.10	2.56	8.88	2.61	7.70	12.40	4.50
Eu/ $10^{-6}$	2.46	2.66	0.63	1.95	1.94	3.59	2.49	1.38	3.00	0.79	2.58	1.04	2.53	3.59	1.37
Gd/ $10^{-6}$	9.54	11.70	2.28	6.76	5.73	14.80	9.95	4.50	11.50	3.13	9.53	3.82	9.09	14.60	5.78
Tb/ $10^{-6}$	1.56	1.89	0.42	1.05	0.88	2.44	1.59	0.78	1.91	0.55	1.47	0.62	1.42	2.34	0.92
Dy/ $10^{-6}$	10.10	12.00	3.01	6.52	5.52	15.60	10.60	5.12	12.70	3.74	9.01	4.00	9.27	15.10	6.05
Ho/ $10^{-6}$	2.10	2.39	0.66	1.26	1.09	3.21	2.12	1.06	2.63	0.80	1.73	0.84	1.88	3.09	1.22
Er/ $10^{-6}$	6.01	6.70	2.02	3.38	3.15	9.10	6.11	2.94	7.65	2.37	4.62	2.30	5.29	8.68	3.51
Tm/ $10^{-6}$	0.85	0.96	0.31	0.48	0.41	1.32	0.88	0.44	1.10	0.35	0.63	0.33	0.76	1.28	0.49
Yb/ $10^{-6}$	5.81	6.53	2.15	3.13	2.76	8.82	5.76	2.86	7.35	2.43	3.92	2.30	4.99	8.56	3.28
Lu/ $10^{-6}$	0.83	0.92	0.30	0.43	0.38	1.26	0.79	0.39	1.04	0.36	0.54	0.33	0.71	1.18	0.46
$\Sigma$ REE/ $10^{-6}$	153.16	219.04	34.97	123.09	110.77	263.84	161.81	62.19	206.04	58.49	186.49	44.49	156.14	250.12	83.30
LREE/ $10^{-6}$	116.36	175.95	23.82	100.08	90.86	207.29	124.01	44.10	160.16	44.76	155.04	29.95	122.73	195.29	61.59
HREE/ $10^{-6}$	36.80	43.09	11.15	23.01	19.91	56.55	37.80	18.09	45.88	13.73	31.45	14.54	33.41	54.83	21.71
LREE/HREE	3.16	4.08	2.14	4.35	4.56	3.67	3.28	2.44	3.49	3.26	4.93	2.06	3.67	3.56	2.84
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	2.52	3.71	1.53	4.08	5.09	3.11	2.85	1.73	2.98	2.51	5.27	1.39	3.33	3.04	2.27
Y/ $10^{-6}$	62.00	72.10	20.30	36.00	29.10	97.00	63.40	30.30	79.20	24.50	54.20	23.90	54.70	91.50	36.00

注：实验数据由中国地质科学院国家地质实验测试中心测定

表 3 喀腊大湾地区火山岩样品微量元素分析结果

Table 3 Trace element contents of volcanic rocks in Kaladawan

微量元素	H41-1	H52-1	H52-6	H54-1	H267-2	H41-4	H41-8	H42-2	H41-6	H53-1	H53-4	H100-1	H100-3	H102-2	H102-4
Rb/ $10^{-6}$	63.50	26.80	12.90	9.82	6.66	75.60	36.60	6.49	81.00	16.10	48.20	34.90	91.90	149.00	105.00
Sr/ $10^{-6}$	322.00	355.00	252.00	341.00	397.00	299.00	397.00	471.00	196.00	179.00	219.00	247.00	449.00	315.00	275.00
Ba/ $10^{-6}$	752.00	597.00	127.00	58.50	35.40	596.00	946.00	87.50	775.00	150.00	587.00	661.00	605.00	590.00	680.00
Th/ $10^{-6}$	4.71	12.30	1.75	5.24	6.05	11.50	5.23	1.27	10.10	1.68	6.96	0.79	7.75	12.70	2.62
U/ $10^{-6}$	1.41	3.61	0.61	1.49	1.96	3.16	1.55	0.40	2.91	0.40	1.05	0.24	2.00	3.77	0.78
Nb/ $10^{-6}$	29.90	42.00	5.72	25.10	19.80	51.50	31.10	12.30	39.60	10.60	38.10	8.56	29.70	48.00	16.10
Ta/ $10^{-6}$	0.71	1.22	0.24	0.90	0.33	1.36	0.73	0.28	1.13	0.27	0.81	0.19	0.59	1.21	0.41
Zr/ $10^{-6}$	284.00	285.00	46.20	170.00	83.10	413.00	183.00	89.30	396.00	34.50	126.00	72.80	180.00	416.00	137.00
Hf/ $10^{-6}$	5.99	6.30	1.24	3.92	2.34	8.76	4.15	2.18	8.35	0.97	3.12	1.75	4.18	8.95	2.96
Co/ $10^{-6}$	35.10	24.30	46.70	51.20	40.10	27.60	38.60	42.50	22.80	38.60	43.90	37.90	27.40	23.00	33.80
Ni/ $10^{-6}$	10.10	4.40	72.80	52.60	57.00	7.16	27.00	65.80	1.69	4.99	63.60	120.00	7.77	10.80	19.30
Cr/ $10^{-6}$	15.30	15.10	237.00	157.00	312.00	14.00	62.30	211.00	4.67	726.00	122.00	277.00	47.00	30.20	180.00
$\delta$ Eu/ $10^{-6}$	0.87	0.73	0.98	1.16	1.11	0.79	0.84	1.04	0.85	0.85	0.85	1.01	0.92	0.81	0.82

注：实验数据由中国地质科学院国家地质实验测试中心测定

### 3.2.1 岩石地球化学特征

本次测试的玄武岩样品主量元素数据见表1。火山岩主量元素分析表明,玄武岩  $\text{SiO}_2$  含量主要集中在 45% ~ 54% 之间,平均为 48.12%;  $\text{TiO}_2$  含量为 36.73% ~ 54.27% 之间,平均为 48.12%;  $\text{MgO}$  含量为 2.68% ~ 11.03%,平均为 6.07%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量浮动较大,较高者为 17.64%,低者为 1.5%,平均为 13.25%;  $\text{K}_2\text{O}$  的含量为 0.03% ~ 3.30%,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  的含量为 0.16% ~ 8.47%,平均为 3.49%;  $\text{Mg}$  值按照  $\text{Mg}^\# = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}) \times 100$  计算,其范围是 0.201 ~ 0.625,平均值为 0.352。

TAS (Total Alkali Silica) 分类法为国际通用的火山岩岩石分类法<sup>[25]</sup>,该方法根据化学成分及含量进行分类,其基本的分类依据是以  $\text{SiO}_2$  含量为横坐标,碱度(即  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )为纵坐标,根据它们的比例关系进行酸碱度划分。根据国际地科联(IUGS)推荐的  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$  化学分类图解进行投图(即 TAS),结果见图2。将分析的火山岩样品投点到 TAS 图上,发现所测试分析的 15 个样品的投点在 Ir-Irvine 分界线的两侧均有分布,落在碱性和亚碱性区域的样品分别为 7 个和 8 个;岩性上,大多数样品落在玄武岩和粗面玄武岩区域,少量处在苦橄玄武岩与玄武岩过渡的范围内,并且具有从亚碱性到碱性过渡的趋势。 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  图解(见图3)显示,本区低钾拉斑系列与钙碱性系列、高钾钙碱性系列、钾玄岩系列玄武岩共存,具有钾含量分布范围大、且较为分散的特点。

### 3.2.2 稀土和微量元素地球化学特征

#### 3.2.2.1 稀土元素地球化学特征

喀腊大湾火山岩稀土元素丰度测试结果见表2。稀土元素总量主要集中在  $22.56 \times 10^{-6} \sim 263.84 \times 10^{-6}$  区间,轻稀土元素的分馏系数  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  为 1.07 ~ 4.10 之间,

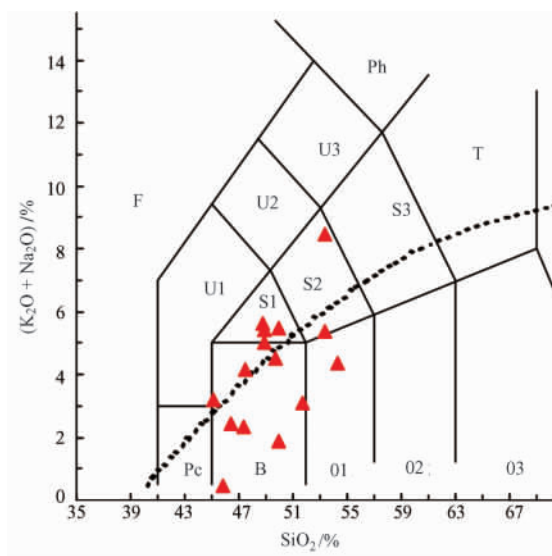


图2 喀腊大湾火山岩样品 TAS 分类<sup>[26]</sup>

Fig. 2 TAS diagram of volcanic rocks in Kaladawan

Pc-苦橄玄武岩; B-玄武岩; O1-玄武安山岩;

O2-安山岩; O3-英安岩; R-流纹岩;

S1-粗面玄武岩; S2-玄武质粗面安山岩;

S3-粗面安山岩; T-粗面岩、粗面英安岩;

F-副长石岩; U1-碱玄岩、碧玄岩;

U2-响岩质碱玄岩; U3-碱玄质响岩; Ph-响岩;

Ir-Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性

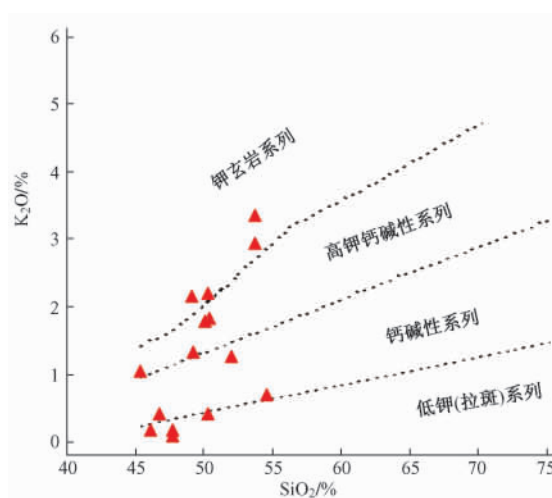


图3 喀腊大湾火山岩样品  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  图解<sup>[27]</sup>

Fig. 3  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  diagram of volcanic rocks in Kaladawan<sup>[27]</sup>

重稀土元素的分馏系数  $(\text{Gd/Yb})_N$  为 0.86 ~ 1.96 之间。在 REE 球粒陨石标准化模式图 (见图 4) 上, 所选样品稀土曲线可以分为 2 种: REE 元素配分曲线右倾型和平缓型, 其中样品 H42-2、H52-6、H100-1 为平缓型, 其他样品显示为较一致的右倾型。这种较为简单且一致性较好的配分曲线说明其物质来源较简单, 为 2 种来源, 符合岛弧玄武岩稀土元素配分曲线的特点。Eu 异常按照公式  $\delta\text{Eu} = 2\text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$  进行计算, 除了样品 H267-2 和 H54-1 的  $\delta\text{Eu}$  值为 1.11 和 1.16 以外, 另外有 2 个样品  $\delta\text{Eu}$  值在 1 附近, 其他样品  $\delta\text{Eu}$  值一般在 0.73 ~ 0.92 之间变动 (见表 3), 即 Eu 异常不明显, 整体显示为微弱的负异常, 可能与岩浆结晶作用过程中斜长石发生分离有关。

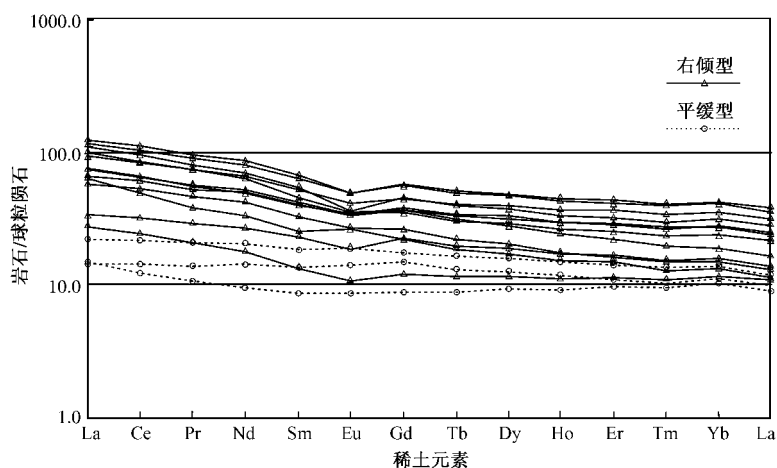


图 4 喀腊大湾火山岩样品 REE 图解

Fig. 4 REE diagram of volcanic rocks in Kaldawan

### 3.2.2.2 微量元素地球化学特征

喀腊大湾火山岩微量元素分析数据显示  $\text{Zr/Nb}$  比值为 11.31 ~ 39.57,  $\text{Sm/Zr}$  比值为 0.026 ~ 0.074; 蛛网图 (见图 5) 中则表现为 Nb、Ta 较为亏损, Pb 呈明显富集; 由于 Sm 在角闪石中的分配系数远大于 Zr, 据此推测之所以火山岩中 Sm 较 Zr 的含量高, 可能是由于源区残留有角闪石的缘故。整体上, 蛛网图中高场强元素与 MORB 均较为一致, 曲线变化非常平缓, 但大离子亲石元素的分布则有差异。按照 REE 元素的划分方式将微量元素蛛网图划分为 2 组, 在 REE 元素配分曲线中呈右倾型的样品在 MORB 蛛网图中间较第二组更加富集。

## 4 构造环境判别与成因

理论上当  $\text{MgO}$  含量在 6% 以下时, 可以不考虑同化混染作用的影响<sup>[28]</sup>, 而本区火山岩  $\text{MgO}$  含量为 2.68% ~ 11.03%, 分布范围较大;  $\text{Mg}^\#$  较低, 为 0.201 ~ 0.625;  $\text{TiO}_2$  的含量为 0.60% ~ 3.56%, 部分样品  $\text{TiO}_2$  含量值大于 2% 的原因同样推测为同化混染而致。相应地, 该区  $(\text{La/Sm})_N$  变化不大 (1.1 ~ 2.5), Eu 异常不明显, 整体显示为微弱的负异常。推测地壳的混染作用虽然存在, 但是在岩浆演化过程中影响不太大。

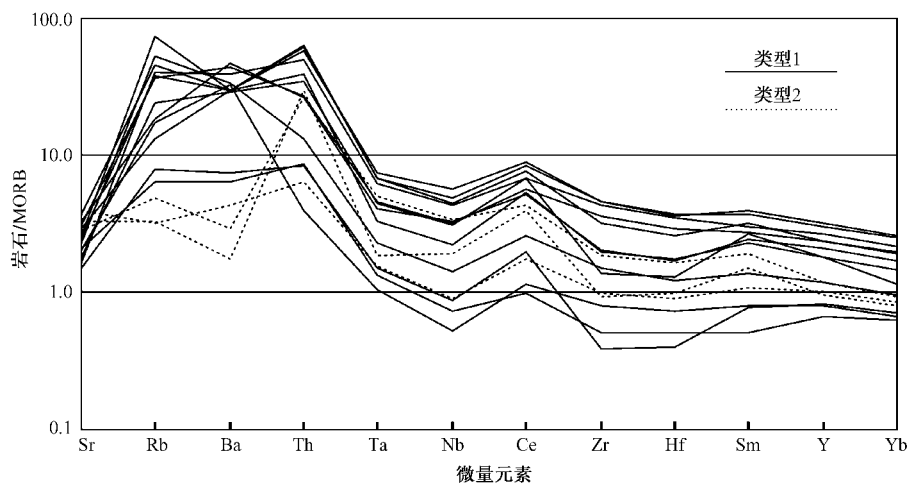


图5 喀腊大湾火山岩样品微量元素图解 (类型1、类型2 分别指 REE 图解中的右倾型和平缓型)

Fig. 5 Trace element diagram of volcanic rocks in Kaldawan

从研究区稀土元素地球化学特征来看: 轻稀土元素的分馏系数  $(La/Sm)_N$  为 1.1 ~ 2.5 之间, 显示为轻度富集; 重稀土元素的分馏系数  $(Gd/Yb)_N$  为 0.86 ~ 1.96 之间。在 REE 球粒陨石标准化模式图 (见图 4) 上, 多数样品的 REE 元素配分曲线都呈右倾的轻稀土弱富集或者平缓的趋势。以上几点说明, 本区火山岩性质为岛弧型玄武岩。而从微量元素地球化学特征来说: 在微量元素 MORB 图解 (见图 5) 中, Nb 和 Ta 显示出较强的负异常, 高场强元素 (HSFE) 与 MORB 相当, 显示为平缓的曲线, 大离子亲石元素 (LILE) 相对富集, Sm 显示为低度的正异常, 这些同样是岛弧岩浆的特点<sup>[29]</sup>。

从构造环境分析, 构造环境图 (见图 6) 和 Ta/Yb-Tu/Yb 图 (见图 7) 显示所采集样品的分布范围很集中, 显示为拉斑系列的火山弧玄武岩性质。本区火山岩 Zr/Nb 范围是 11.31 ~ 39.57, 属于 MORB 的 Zr/Nb 比值范围 (10 ~ 60), 推测该岩浆源区以 MORB 源的亏损地幔为主; 本区玄武岩中弱的 Eu 负异常可能与当时岩浆形成于加厚陆壳下部有关<sup>[30]</sup>; Nb/Ta 比值在 9.68 ~ 20.40 之间, 平均为 13.37, 低于 17, 推测岩浆的形成与大洋板块俯冲

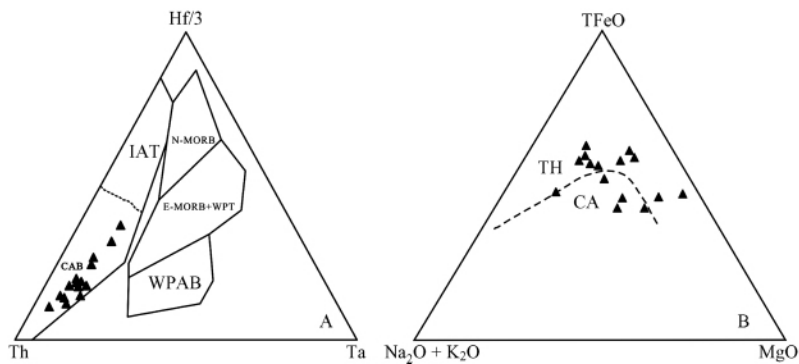


图6 喀腊大湾火山岩形成构造环境判别图<sup>[33, 34]</sup>

Fig. 6 Discriminatory diagram of tectonic settings of volcanic rocks in Kaladawan  
CAB-火山弧玄武岩; IAT-岛弧玄武岩; N-MORB-N 型 MORB; E-MORB-E 型 MORB;  
WPAB-板内碱性玄武岩; TH-拉斑玄武岩系列; CA-钙碱性系列

作用有关; 同时相应的证据还有, 相容元素 Ni、Co 和 Cr 的变化范围很大, 如 Cr 从  $4.67 \times 10^{-6} \sim 726.00 \times 10^{-6}$ , Ni 为  $1.69 \times 10^{-6} \sim 120.00 \times 10^{-6}$ , 相对较为接近电离势为 2.0 的 Co 变化相对较小, 为  $22.8 \times 10^{-6} \sim 51.2 \times 10^{-6}$ , 据此推测该区混有地壳物质, 但主要以幔源为主, 在经历了部分熔融过程后, 分离结晶也有发生, 即本区火山岩可能是部分熔融和分离结晶共同作用产生的。同时根据 Allegre 等<sup>[30]</sup>的研究, 岩浆在分离结晶作用中随着超亲岩浆元素 (Ta, Tu, La, Ce 等) 的富集, 亲岩浆元素 (如 HREE, Zr, Hf, Sm 等) 丰度也几乎同步增长。因此 La/Sm 基本上保持为一常数; 相反, 在平衡部分熔融过程中, 随着 La 的快速进入熔体, Sm 也会在熔体中富集, 但其增长速度要慢。依据该理论, 本区火山岩的 La-La/Sm 图解 (见图 8) 可以清楚地显示出本区火山岩 2 种成岩机制 (部分熔融与分离结晶) 可能是同时存在的, 其中分离结晶过程更为发育。另外, Nb 和 Ta 及 Zr 和 Hf 这 2 对元素在离子半径和电负性上性质非常接近, 进而具有相似的地化性质, 因此这 2 对元素在岩浆演化 (部分熔融和分离结晶) 过程中应该很难分开<sup>[31]</sup>, 然而本区该元素对的比值比较大 ( $9.68 \sim 20.40$  和  $35.49 \sim 47.43$ ), 推测为当时地幔源可能经历了酸性熔体的改造。在 TAS 图解中, 可见苦橄岩的存在。由于苦橄岩粘稠, 其喷出需要较为张性的环境, 少量苦橄岩的出现推测为当时火山活动时期还处于岛弧演化的早期阶段, 当板块暂停俯冲时, 出现短暂的应力松弛现象, 故而致使苦橄岩浆喷发。根据本区玄武岩 SHRIMP 测年结果显示的  $517 \pm 7$  Ma (另文报道), 结合诸多学者认为的蛇绿岩形成于 500 Ma 左右年龄的认识<sup>[12, 22]</sup>, 推测寒武纪时本区受区域性板块碰撞运动的影响, 洋壳夹带着少量陆源物质发生壳体的俯冲、岩石的熔融和分离结晶过程。在板块暂停俯冲时, 出现短暂的应力松弛现象, 故而致使苦橄岩浆喷发。

根据火山岩构造环境判别, 喀腊大湾地区主要发育火山弧玄武岩类 (CAB)。结合前人在红柳沟—拉配泉蛇绿岩带其他部位识别的 MORB 和 OIB 两种构造环境<sup>[12, 14]</sup>, 可以认为, 红柳沟—拉配泉蛇绿岩带中存在 MORB、OIB 和 CAB 三种构造环境玄武岩类。这与阿尔金山南缘构造带西段蛇绿岩套中的玄武岩存在洋中脊、洋岛和火山弧三种构造环境类型<sup>[23]</sup>相类似。由于这两条蛇绿岩带在形成时代和构造环境上都具有相似性, 因此, 它们是可以进行诸多对比的, 可能是被后期构造肢解的同一条蛇绿岩带。

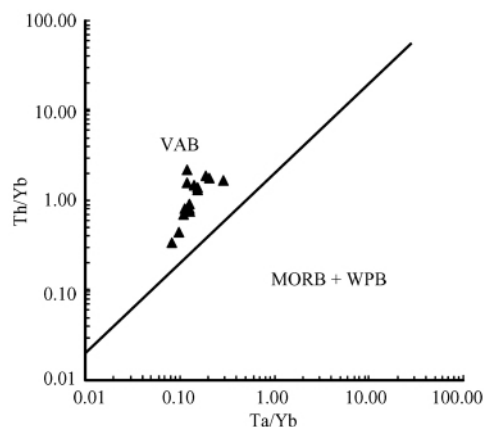


图 7 喀腊大湾火山岩的 Ta/Yb-Tu/Yb 图

Fig. 7 Ta/Yb-Tu/Yb diagram of volcanic rocks in Kaldawan

VAB-火山弧玄武岩; MORB + WPB-洋中脊板内玄武岩

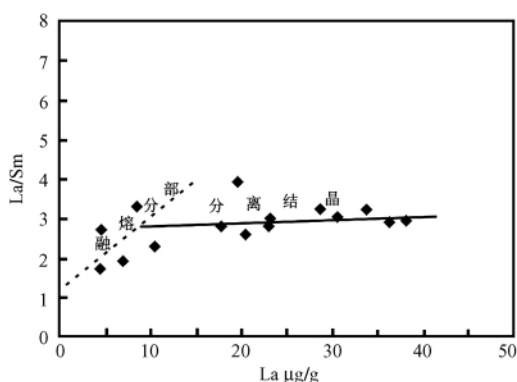


图 8 喀腊大湾火山岩的 La-La/Sm 投影

Fig. 8 La-La/Sm diagram of volcanic rocks in Kaldawan



## 5 结 论

(1) 根据火山岩微量元素地球化学数据推测阿尔金东段喀腊大湾地区玄武岩类受到地壳的混染作用,但是该作用在岩浆演化过程中影响不太大;同时,岩浆性质为岛弧型,具有拉斑系列火山弧玄武岩性质。

(2) 构造环境上,通过本区火山岩微量元素  $Zr/Nb$ 、 $Nb/Ta$  以及  $Zr/Hf$  比值分析,推测岩浆的形成与大洋板块俯冲作用有关,且当时地幔源可能经历了酸性熔体的变质改造作用。

(3) 本区玄武岩类主要以幔源为主,经历了主要为分离结晶作用的过程。

(4) 少量接近苦橄岩成分玄武岩的出现及蛇绿岩年龄数据说明,本区火山活动处于岛弧演化的早期阶段,当板块暂停俯冲,出现短暂的应力松弛现象,故而可能出现苦橄岩浆喷发的现象。

致谢:野外工作得到新疆一区调祁万修、刘荣和董丽霞高级工程师的帮助,岩石地球化学测试得到国家地质实验测试中心的大力支持,在此一并表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- [1] Yin A, Rumelhart P E, Butler R, et al. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation [J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114 (10): 1257 ~ 1295.
- [2] 崔军文,唐哲民,邓晋福,等. 阿尔金断裂系 [M]. 北京:地质出版社,1999. 1 ~ 249.  
CUI Jun-wen, TANG Zhe-min, DENG Jin-fu, et al. Altun fault system [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 1 ~ 249.
- [3] Cowgill E, Gold R D, Chen X, et al. Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet [J]. Geology, 2009, 37 (7): 647 ~ 650.
- [4] 陈正乐,宫红良,李丽,等. 阿尔金山脉新生代隆升-剥露过程 [J]. 地学前缘, 2006, 13 (4): 91 ~ 102.  
CHEN Zheng-le, GONG Hong-liang, LI Li, et al. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh mountains [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13 (4): 91 ~ 102.
- [5] 陈宣华,尹安, Gehrels G E, 等. 阿尔金山东段地质热年代学与构造演化 [J]. 地学前缘, 2009, 16 (3): 207 ~ 219.  
CHEN Xuan-hua, YIN An, Gehrels G E, et al. Geothermochronology and tectonic evolution of eastern Altyn Tagh Mountains, northwestern China [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (3): 207 ~ 219.
- [6] Yin A, Gehrels G, Chen X. Evidence for 280 km of Cenozoic left slip motion along the eastern segment of the Altyn Tagh fault system, western China [J]. Eos (Transactions, American Geophysical Union), 1999, 108, P F-4018.
- [7] Sobel E R, Arnaud N. A possible Middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China [J]. Tectonics, 1999, 18 (1): 64 ~ 74.
- [8] 尹安,党玉琪,陈宣华,等. 柴达木盆地新生代演化及其构造重建——基于地震剖面的解释 [J]. 地质力学学报, 2007, 13 (3): 193 ~ 211.  
YIN An, DANG Yu-qi, CHEN Xuan-hua, et al. Cenozoic evolution and tectonic reconstruction of the Qaidam Basin: Evidence from seismic profiles [J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13 (3): 193 ~ 211.
- [9] 李月臣,陈柏林,陈正乐,等. 阿尔金北缘红柳沟-拉配泉一带铜金矿床硫同位素特征及其意义 [J]. 地质力学学报, 2007, 13 (2): 131 ~ 140.  
LI Yue-chen, CHEN Bai-lin, CHEN Zheng-le, et al. Sulfur isotope features of Cu-Au polymetallic deposits in the Hongliugou-Lapeiquan area on the northern margin of the Altyn Tagh Mountains and their relation to the tectonic evolution

- [J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 13 (2): 131 ~ 140.
- [10] 陈宣华, 王小凤, 杨风, 等. 阿尔金山北缘早古生代岩浆活动的构造环境 [J]. *地质力学学报*, 2001, 7 (3): 193 ~ 200.  
CHEN Xuan-hua, WANG Xiao-feng, YANG Feng, et al. Tectonic environments of magmatism in Early Paleozoic in the North Altyn Tagh, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7 (3): 193 ~ 200.
- [11] 王小凤, 陈宣华, 陈正乐, 等. 阿尔金山地区铜金矿化富集规律 [J]. *地质力学学报*, 2001, 7 (3): 201 ~ 207.  
WANG Xiao-feng, CHEN Xuan-hua, CHEN Zheng-le, et al. Cu-Au environment and Mineralization in Altyn Tagh [J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7 (3): 201 ~ 207.
- [12] 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 1999, 15 (1): 57 ~ 64.  
LIU Liang, CHE Zi-cheng, WANG Yan, et al. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15 (1): 57 ~ 64.
- [13] 修群业, 于海峰, 刘永顺, 等. 阿尔金北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄 [J]. *地质学报*, 2007, 81 (6): 787 ~ 794.  
XIU Qun-ye, YU Hai-feng, LIU Yong-shun, et al. Geology and zircon U-Pb age of pillow basalt at Qiashikansoy in northern Altun Tagh, NW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81 (6): 787 ~ 794.
- [14] 吴峻, 李继亮, 兰朝利, 等. 阿尔金红柳沟蛇绿岩研究进展 [J]. *地质科学*, 2001, 36 (3): 342 ~ 349.  
WU Jun, LI Ji-liang, LAN Chao-li, et al. New knowledges on Hongliugou ophiolite along Altun Fault, NW China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2001, 36 (3): 342 ~ 349.
- [15] 杨经绥, 吴才来, 史仁灯. 阿尔金山米兰红柳沟的席状岩墙群: 海底扩张的重要证据 [J]. *地质通报*, 2002, 21 (2): 69 ~ 74.  
YANG Jing-sui, WU Cai-lai, SHI Ren-deng. Sheeted dike swarm in Hongliugou, northwest of the Altun region: Evidence for seafloor spreading [J]. *Regional Geology of China*, 2002, 21 (2): 69 ~ 74.
- [16] 车自成, 刘良, 孙勇. 阿尔金铅、钨、铋、钼、氧、同位素研究及其早期演化 [J]. *地球学报*, 1995, 16 (3): 334 ~ 337.  
CHE Zi-cheng, LIU Liang, SUN Yong, et al. U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, 40Ar/39Ar and 18O/16O isotopic studies for early evolution of the structural belt in Altun area [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1995, 16 (3): 334 ~ 337.
- [17] 陈正乐, 陈宣华, 王小凤, 等. 新疆阿尔金山拉配泉铜矿矿区地质特征及成因初析 [J]. *地质力学学报*, 2002, 8 (1): 71 ~ 78.  
CHEN Zheng-le, CHEN Xuan-hua, WANG Xiao feng, et al. Geological features of the Lapeiquan copper deposit in the Altun Tagh, Xinjiang and its ore-genesis [J]. *Journal of Geomechanics*, 2002, 8 (1): 71 ~ 78.
- [18] 陈柏林, 王小凤, 杨风, 等. 阿尔金北缘索库里北山铜银矿床控矿构造分析 [J]. *地质力学学报*, 2003, 9 (3): 232 ~ 240.  
CHEN Bai-lin, WANG Xiao-feng, YANG Feng, et al. Analysis of ore-controlling structure of the Xorkol Beishan Cu-Ag deposit in the northern Altun marginal area, northwestern China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 9 (3): 232 ~ 240.
- [19] 覃小锋, 李江, 陆济璞, 等. 阿尔金碰撞造山带西段的构造特征 [J]. *地质通报*, 2006, 25 (1 ~ 2): 104 ~ 112.  
QIN Xiao-feng, LI Jiang, LU Ji-pu, et al. Tectonic evolution of the western segment of the Altyn Tagh collisional orogen, Northwest China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25 (1 ~ 2): 104 ~ 112.
- [20] 覃小锋, 夏斌, 李江, 等. 阿尔金南缘构造带西段新元古代-早古生代变质岩系的变质作用 [J]. *吉林大学学报*, 2007, 37 (5): 856 ~ 867.  
QIN Xiao-feng, XIA Bin, LI Jiang, et al. Metamorphism of the Neoproterozoic-Early Paleozoic metamorphic series in the western segment of the southern Altyn Tagh tectonic belt [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37 (5): 856 ~ 867.
- [21] 覃小锋, 夏斌, 李江, 等. 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 [J]. *中国地质*, 2007, 34 (5): 799 ~ 807.  
QIN Xiao-feng, XIA Bin, LI Jiang, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of the Early Paleozoic greenschist in the western segment of the southern Altyn Tagh marginal tectonic belt [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (5): 799 ~

807.

- [22] 覃小锋, 夏斌, 李江, 等. 阿尔金南缘构造带西段辉绿岩墙群的地球化学特征及构造环境 [J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27 (1): 14 ~ 22.  
QIN Xiao-feng, XIA Bin, LI Jiang, et al. Geochemical characteristics and tectonic settings of the diabase dyke swarms in the western segment of the southern Altun tectonic belt [J]. Acta Petrologica ET Mineralogica, 2008, 27 (1): 14 ~ 22.
- [23] 王焰, 刘良, 车自成, 等. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的地球化学特征 [J]. 地质论评, 1999, 45 (增刊): 1010 ~ 1014.  
WANG Yan, LIU Liang, CHE Zi-cheng, et al. Geochemical characteristics of Early Paleozoic ophiolite in Mang'ai area, Altun Mountains [J]. Geological Review, 1999, 45 (Supp.): 1010 ~ 1014.
- [24] 陈柏林, 蒋荣宝, 李丽, 等. 阿尔金山东段喀腊大湾地区铁矿带的发现及其意义 [J]. 地球学报, 2009, 30 (2): 143 ~ 154.  
CHEN Bai-lin, JIANG Rong-bao, LI Li, et al. Discovery of iron ore zones in the Kaladawan area within the eastern part of the Altun Mountains and its significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30 (2): 143 ~ 154.
- [25] 刘传平, 郑建东, 杨景强. 徐深气田深层火山岩测井岩性识别方法 [J]. 石油学报, 2006, 27 (12): 62 ~ 65.  
LIU Chuan-ping, ZHENG Jian-dong, YANG Jing-qiang. Lithology identification of well logging for deep volcanic reservoir in Xushen gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27 (12): 62 ~ 65.
- [26] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Oxford: Blackwell. 1989.
- [27] Ewart A. The mineralogy of Tertiary-recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic-basaltic compositional range [A]. In: Thorpe R S. Andesites [C]. Chichester: Wiley, 1982. 25 ~ 87.
- [28] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1995, 23: 251 ~ 285.
- [29] 邓晋福, 赵海岭, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. 20 ~ 21.  
DENG Jin-fu, ZHAO Hai-ling, MO Xuan-xue, et al. Archean and proterozoic crustal evolution: Evidence from crustal seismology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 20 ~ 21.
- [30] Allègre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38 (1): 1 ~ 25.
- [31] Jochum K P, McDonough W F, Palme H, et al. Compositional constraints on the conditinal lithospheric mantle from trace element in spinel peridotite xenoliths [J]. Nature, 1989, 340: 548 ~ 550.
- [32] 李海兵, 许志琴, 杨经绥, 等. 阿尔金断裂带最大累积走滑位移量——900 km? [J]. 地质通报, 2007, 26 (10): 1288 ~ 1298.  
LI Hai-bing, XU Zhi-qin, YANG Jing-sui, et al. The maximum cumulative strike-slip displacement of the Altyn Tagh Fault: 900 km? [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26 (10): 1288 ~ 1298.
- [33] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50 (1): 11 ~ 30.
- [34] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8 (5): 523 ~ 548.

## GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF BASIC-INTERMEDIATE VOLCANIC ROCKS FROM KALADAWAN , EAST ALTUN TAGH MOUNTAINS

CUI Ling-ling<sup>1</sup> , CHEN Bai-lin<sup>1</sup> , YANG Nong<sup>1</sup> , CHEN Zheng-le<sup>1</sup> , DING Wen-jun<sup>1 2</sup>

(1. *Institute of Geomechanics , Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100081 , China ;*

2. *School of Earth Science and Resource , China University of Geosciences , Beijing 100083 , China*)

**Abstract:** The Kaladawan area at eastern part of the Altyn Tagh Mountain is tectonically situated between the NE-trending Altyn Tagh strike-slip fault and the W-E-trending Northern Altyn Tagh margin fault. In the area , there appears a set of volcanic-sedimentary rocks. A geochemical study has been made on the basic-intermediate volcanic rocks. The results show two REE patterns: slight LREE-enrichment pattern and a partly flat pattern , indicating an island-arc origin. The Zr/Nb , Nb/Ta and Zr/Hf values indicates that the volcanic rocks have withstood a contamination with the crustal materials. The La-La/Sm diagram of the volcanic rocks displays a coexistence of partial melting and fractional crystallization. In the Hf-Tu-Ta and FeO-Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O-Mg diagrams , it can be seen that the volcanic rocks of the study area belong to tholeiite-series volcanic-arc basalts. It is suggested that the volcanic rocks were formed in an island-arc environment in the upper wall of subduction zone in the early Paleozoic , with the basalts mainly derived from the mantle.

**Key words:** Kaladawan; volcanic rock; geochemistry; tectonic setting