

负杰, 高晓峰, 校培喜, 等. 西昆仑下石炭统乌鲁阿特组火山岩地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 587-600.

Yun Jie, Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, et al. Geochemical characteristics of the Lower Carboniferous volcanic rocks of the Wuluat Formation in the Western Kunlun Mountains and their geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 587-600(in Chinese with English abstract).

西昆仑下石炭统乌鲁阿特组火山岩地球化学特征 及地质意义

负 杰^{1,2,3} 高晓峰^{1,2} 校培喜^{1,2} 康 磊^{1,2} 李 平^{1,2}

(1. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:西昆仑下石炭统乌鲁阿特组为一套火山-沉积岩系, 主要由灰绿色枕状玄武岩、浅灰白色流纹岩组成, 空间上与厚层碳酸盐岩及薄层大理岩相伴产出。地球化学特征表明: 玄武岩 SiO₂ 含量集中在 52.10%~54.42%, Na₂O/K₂O > 1, TiO₂ 为 0.50%~2.03%, Mg[#] 介于 52~70 之间, 与拉班玄武岩的平均值较为相似。玄武岩 ΣREE=14.46×10⁻⁶~91.83×10⁻⁶, LREE/HREE 为 1.12~2.55, (La/Yb)_N 为 0.46~1.69, 稀土元素球粒陨石标准化图解呈现出较为平坦的曲线, 类似于 E-BABB, 而明显不同于 N-MORB 和 OIB。微量元素中有明显的 Rb 负异常, 可能与岩浆过程中下地壳的混染作用有关。流纹岩主体为钙碱性系列, 稀土元素总量较高, 介于 73.46×10⁻⁶~316.80×10⁻⁶ 之间, (La/Yb)_N 为 1.30~11.99, (La/Sm)_N 为 1.15~4.07, 稀土元素配分曲线有较明显的右倾趋势, 轻稀土分馏较强。稀土、微量元素配分曲线类似于地壳特征。玄武岩与流纹岩表现出不同的稀土微量元素特征, 并缺乏连续演化的趋势, 暗示二者有不同的来源和成因。微量元素图解及区域地质特征指示乌鲁阿特组形成于弧后拉张的伸展环境。岩石成因特征研究表明, 玄武岩由亏损地幔尖晶石二辉橄榄岩 5%~10% 部分熔融形成, 并在底侵上升途中受到下地壳物质微弱的混染贡献。地幔物质上升, 所携带的热量累积并加热下地壳, 下地壳基性物质部分熔融从而形成流纹岩。综合认为, 西昆仑北带在早石炭世处于一个伸展拉张环境(可能为弧后盆地), 乌鲁阿特组火山岩正是此次构造事件的岩浆产物。

关键词:西昆仑; 乌鲁阿特组; 火山岩; 岩石成因; 地球化学

中图分类号: P588.14

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2015)03-0587-14

Geochemical characteristics of the Lower Carboniferous volcanic rocks of the Wuluat Formation in the Western Kunlun Mountains and their geological significance

YUN Jie^{1,2,3}, GAO Xiao-feng^{1,2}, XIAO Pei-xi^{1,2}, KANG Lei^{1,2}, LI Ping^{1,2}

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xian Center of Geological Survey, CGS, Xi'

收稿日期: 2015-02-02; 改回日期: 2015-04-07

基金项目: 陕西省自然科学基金(2013KJXX-68)和中国地质调查局项目(12120114020501)联合资助。

作者简介: 负杰, 男, 1988 年生, 硕士生, 地质工程专业; E-mail: shanxiyunjie@163.com。

通讯作者: 高晓峰, 男, 副研究员, 从事岩石学和岩石地球化学研究; E-mail: xfgao2000@163.com。

an 710054, Shaanxi, China ;2. Research Center for Orogenic Geology, Xian Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;3. China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: The Wuluat Formation of Lower Carboniferous is distributed in the northern part of Western Kunlun Mountains. Associated with thick carbonate rock and thin marble, it is a set of volcano-sedimentary rocks mainly composed of grayish green pillow basalts and grayish white rhyolite. Based on the study of the chemistry of lavas, the authors hold that the major element values of the basalts are similar to the average values of tholeiite: SiO_2 values vary between 52.10% and 54.42%, $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) > 1$, TiO_2 (0.50%~2.03%), and $\text{Mg}^\#$ values are in the range of 52~70. The ΣREE values of the samples range from 14.46×10^{-6} to 91.83×10^{-6} , whereas $(\text{La}/\text{Yb})_N$ values vary between 0.46 and 1.69, respectively. All these characteristics are extremely similar to things of the E-BABB and different from features of OIB and N-MORB. The basalts show depletion of Rb, suggesting that the lower crust contamination existed in the magma processing. Rhyolite belongs to both calc-alkaline and high-K calc-alkaline volcanic rock series. Concentrations of REE are higher than those of basalts, the $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ratios are between 1.30 and 11.99, and $(\text{La}/\text{Sm})_N$ ratios are from 1.15 to 4.07. All these features are similar to features of the lower crust. Different REE patterns and trace element features between the two rock types and the absence of trend from the basalts to the rhyolite imply that the rhyolite and basalt had different sources and origins. Trace element diagrams and regional geological characteristics indicate that the Wuluat Formation formed in an extension environment of the back-arc pull-apart condition. The study of the genetic characteristics of rocks suggest that the basalts resulted from 5% - 10% partial melting of spinel lherzolite in the depleted mantle, and were contaminated by the lower crust later. The heat carried by the mantle material led to the partial melting of the lower crust, and then the rhyolite was produced. Comprehensive studies show that the northern part of Western Kunlun Mountains was in a stretch tension environment (back - arc extensional environment) in the early Carboniferous, and the Wuluat Formation was the magmatic product of the tectonic event.

Key words: Western Kunlun Mountains; Wuluat Formation; volcanic rocks; petrogeochemistry

About the first author: YUN Jie, male, born in 1988, master candidate, majors in geological engineering; E-mail: shanxiyunjie@163.com.

西昆仑造山带位于青藏高原北缘,是中国中央造山带的重要组成部分。西昆仑造山带主要经历了原特提斯和古特提斯两个重要的演化阶段^[1-7]。岩浆活动是构造运动过程中的重要产物,也是恢复造山带演化历史的重要依据。近年来众多学者围绕西昆仑的两大缝合带做了大量研究^[8-24]:(1)20世纪90年代,潘裕生^[4]提出库地蛇绿岩为劳亚大陆裂解形成的原特提斯洋的残留,后人通过对西昆仑岩浆岩的大量研究,认为原特提斯洋闭合于早古生代晚期^[8,10-17]或晚古生代早期^[18]。(2)加里东造山运动结束后,西昆仑进入晚古生代演化,即古特提斯的演化过程。多数学者^[4-6,9,23,24]通过对麻扎-康西瓦一带分布的大量侵入岩研究,对于西昆仑中生代花岗岩的成因及其与古特提斯洋演化关系的研究取得了很大进展和共识:古特提斯洋在晚三叠世已经闭合,自此进入造山作用向板内构造演化的转换阶段。

从石炭纪开始,西昆仑处于拉张构造背景,形成一系列类似于红海型小洋盆^[25]的深水盆地,出现库尔良裂陷盆地^[5,6,21]、昆盖山裂陷盆地^[5,6,22]。西昆仑

石炭-二叠纪南北两带普遍发育一套基性-中酸性-酸性的钙碱性火山岩。南带火山岩出露于苏巴什、麻扎、瓦恰地区,并形成于岛弧构造环境^[16,26]。北带火山岩主要分布在奥依塔格、阿羌、库地北区域。目前对北带石炭-二叠纪火山岩研究较少并存在不同的认识:(1)盖孜-奥依塔格一带火山岩形成于短暂扩张的洋盆或弧后盆地^[9,10];(2)于田甫鲁-阿羌地区火山岩形成于裂谷环境^[9];(3)库地北石炭纪依莎克群火山岩为成熟洋盆^[9]、大洋岛弧^[18,17]。由于西昆仑所处地理位置海拔高,交通条件差,以及研究重点不同,前人对西昆仑地区的研究主要依托公路沿线(新藏线、中-巴公路)进行,而缺少详细区域地质资料的支撑。单一岩体分析、同一个岩体多期次侵入以及单一火山岩地层分析的复杂性和不确定性,为西昆仑北带古特提斯发生阶段的研究提供了不确定性。本文对西昆仑北带奥依塔格地区乌鲁阿特组火山岩进行详细研究,试图通过火山岩石学、地球化学特征分析该地区岩浆岩的源区特征、岩石成因和构造背景,为西昆仑北带的构造属

性提供依据。

1 地质背景与岩石学特征

研究区位于中巴公路西侧奥依塔格乡阿合奇村西南,行政区划隶属于新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州阿克陶县。其大地构造位置,姜春发等^[5]称之为北昆仑—帕米尔洋之西昆仑北蛇绿岩带,潘裕生^[2]称之为奥依塔格—库地缝合带,而丁道桂等^[26]则称之为西昆仑造山带北带库地南—盖孜西韧性剪切带。李荣社等^①以库地—其曼于特结合带和昆中断裂带进一步将西昆仑分为西昆北、西昆中和西昆南3个单元。西昆北带为塔里木陆块南部的大陆边缘,地层隶属昆仑山—宗务隆—秦岭地层大区、西昆仑地层区、乌依塔格地层小区(图1)。

新疆地矿局第一区调大队(1985)^②将该小区的石炭系划分为下一中石炭统和上石炭统;新疆地矿局第二地质大队(1985)^③则将其划归下石炭统库山河群、中上石炭统盖孜群和下二叠统阿克塞巴什组;新疆地矿局第二区调大队(1995)^④在进行1:5万奥依塔格幅区调时将该套地层由下而上划分为下石炭统库山河组、乌鲁阿特组(新建)、中石炭统卡拉乌依组。下石炭统乌鲁阿特组与中二叠统棋盘组、长城系赛图拉岩群均呈断层接触关系。地层中部见有酸性岩体侵入,前人研究表明^[27,28],该岩体侵入时代为早石炭晚期,年龄为330~337 Ma。孙宝生^[29]通过对塔里木南缘喀什凹陷研究认为,该区域构造样式为逆冲推覆构造,长城系赛图拉岩群(Chst)于前锋带呈飞来峰形式产出(图1)。

乌鲁阿特组出露总厚度约1953 m,据岩石组合可分为三部分:下部为灰绿色变质玄武岩、杏仁状玄武岩夹浅灰色安山岩,厚约1269 m;中部在塔西克西沟为紫灰色中—厚层炭质泥质灰岩,夹浅灰绿、灰绿色薄层大理岩,厚约128 m,在阿牙克库索依南中部主要为灰色薄板状结晶灰岩及薄层硅质岩,厚约113.5 m;上部主要为变质安山岩夹紫灰色英安岩,厚约556 m。新疆地矿局第二区调大队(1995)^④在乌鲁阿特组采获Pb—Pb同位素年龄343 Ma,因

此,乌鲁阿特组时代确定为早石炭世。棋盘组为碎屑岩与灰岩互层,主要岩性为灰褐色薄层细粒岩屑石英砂岩、灰黑色钙质石英粉砂岩、灰黑色表—中层生物屑泥晶灰岩,少量(钙质)细粒石英砂岩、细粒长石石英砂岩及含生物屑砂屑灰岩,含腕足类 *Avonia echidniformis* Grabaw, *A.sp.*, *Richthofenia sp.*, *Eomarginifera sp.*, *Orthotetes sp.*, *Orthotichia sp.*, *Martinia orbicularis* Gemmellaro, *Phricodothyris sp.*, *Liraplecta aspera*, 厚约231 m。

奥依塔格西北地区主要为一套酸性火山岩,宏观以浅灰白色英安岩、灰绿色流纹岩致密块状构造为主要特征;奥依塔格地区为中基性火山岩建造,多见灰绿色枕状球状玄武岩、枕状玄武岩和灰黑色玻古安山岩。大部分岩石均受到后期动力变质作用影响,为低绿片岩相变质。

蚀变球状玄武岩:为奥依塔格地区乌鲁阿特组火山岩主体的组成岩石,呈灰绿色,块状构造,球状结构。主要矿物由斜长石和辉石组成,球状直径1~3 mm,斜长石呈细小纤维状,双晶不发育,部分斜长石晶体破碎,粒径1.2~2.0 mm,破碎晶体被方解石交代。辉石已发生蚀变,但仍保持柱状,短柱状晶型。集合体呈放射状、蒿状、束状等形成岩石的球状结构。岩石次生蚀变较强,普遍发生钠黝帘石化与绢云母化。

杏仁状流纹岩:为奥依塔格西北地区乌鲁阿特组火山岩主要成分。杏仁构造,显微微粒结构。矿物成分由细小长石和石英组成。岩石中气孔含量>50%,气孔形态不规则,大小不一,孔径为0.5~3.5 mm。气孔充填物主要为石英。岩石中长英质矿物细小,呈显微微粒结构。岩石中裂隙发育,少量裂隙充填物为碳酸盐矿物。

2 岩石地球化学特征

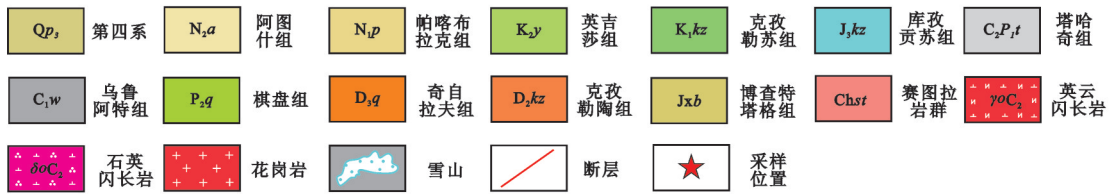
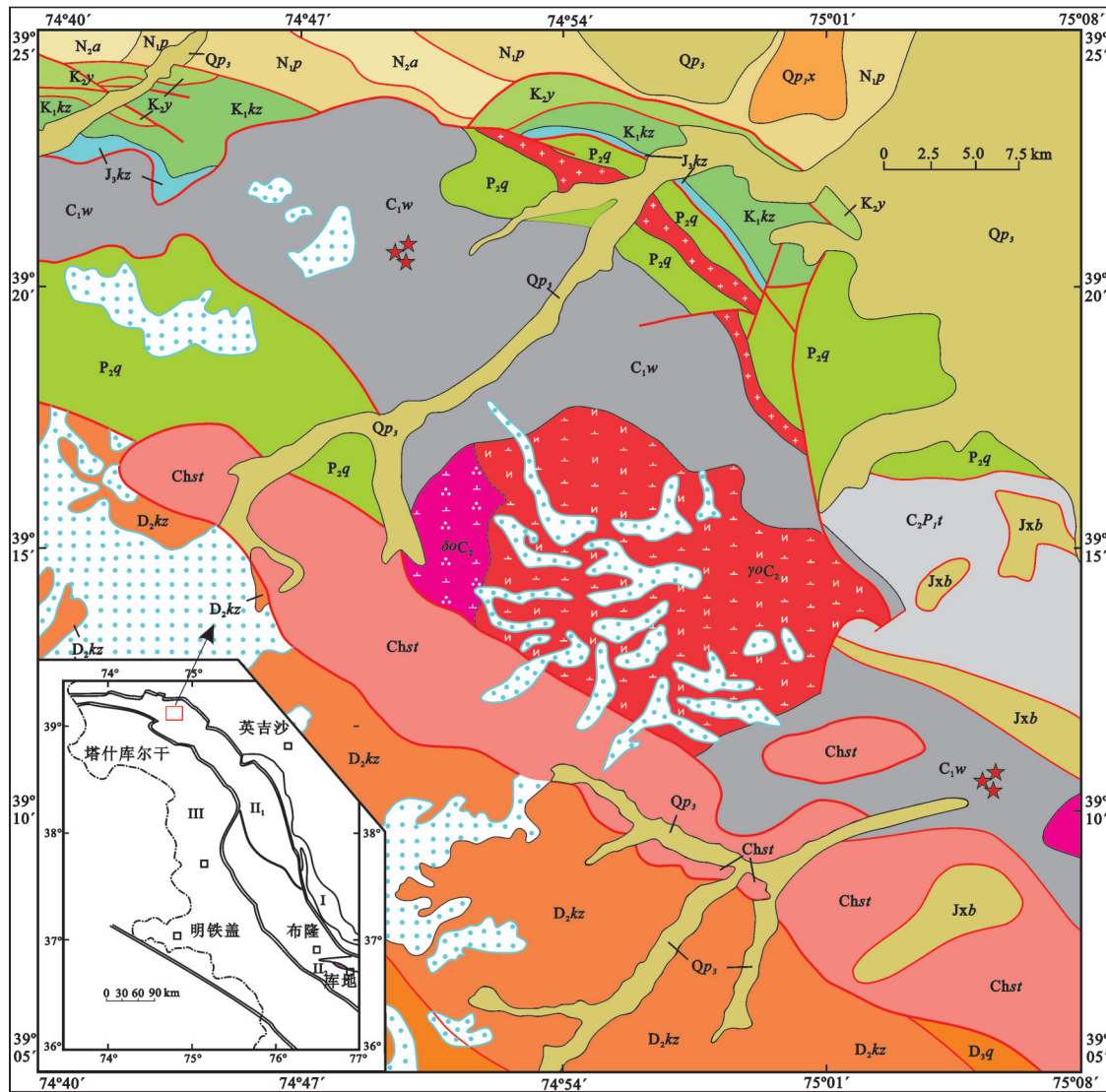
主、微量元素在西安地质矿产研究所实验测试中心X荧光光谱(XRF)和等离子光谱质谱法(ICP-MS)测定,主量元素的分析测试误差小于1%,其中FeO含量通过湿化学方法测定,微量元素的分析测

①西安地质矿产研究所.昆仑山及邻区1:100万地质图,2008.

②新疆地矿局第一区调大队.1:100万地质矿产调查成果内部资料,1985.

③新疆地矿局第二区调大队.1:50万新疆西部地质填图内部资料,1985.

④新疆地矿局第二区调大队.1:5万奥依塔格幅区域地质调查报告,1995.



I-铁克里克断隆带;II-西昆北岩浆弧;III-西昆中微陆块;塔什库尔干-甜水海陆块

图1 西昆仑乌鲁木齐组火山岩地质分布图

Fig.1 Geological map showing distribution of the volcanic rocks of Wuluat Formation in Western Kunlun Mountains

试误差在5%左右。乌鲁木齐组共采集火山岩16件样品,其中酸性火山岩11件,中基性火山岩5件。分析结果见表1。

2.1 主量元素

乌鲁木齐组火山岩主量元素有很小的变化范围,玄武岩的SiO₂含量集中在52.10%~54.42%,平均

值为53.49%;(Na₂O/K₂O)>1,表现为钠质;TiO₂为0.50%~2.03%,平均值为1.44%;MgO含量为4.25%~9.35%,平均值为5.78%;Mg[#]介于52~70,类似于拉班玄武岩的地球化学特征。流纹岩SiO₂含量为63.07%~72.75%,Na₂O含量为1.14%~3.65%,K₂O含量为0.57%~3.06%,TiO₂含量为0.47%~0.64%,MgO

表1 乌鲁阿特组火山岩主量(%)、微量元素(10^{-6})分析结果
Table 1 Major element and trace element compositions of the volcanic rocks of Wuluat Formation

位置 岩性	奥依塔格地区乌鲁阿特组火山岩(12X07)											奥依塔格地区乌鲁阿特组火山岩(12X08)					
	杏仁流纹岩						蚀变球帘玄武岩										
样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	6	
SiO ₂	71.05	67.44	72.21	67.39	68.17	64.09	73.42	66.24	63.07	72.75	67.25	54.42	53.35	53.78	52.1	53.82	
Al ₂ O ₃	13.21	15.11	12.85	15.59	15.23	16.56	13.34	14.95	14.27	13.69	13.86	16.73	15.97	15.78	14.87	16.01	
Fe ₂ O ₃	1.25	1.34	0.85	1.52	1.5	1.85	1.3	1.88	1.45	1.45	1.33	4.57	5.35	4.72	7.34	3.56	
FeO	3.95	4.16	2.63	3.91	3.55	4.65	3.04	4.16	4.36	2.75	3.57	4.09	5.21	5.66	5.03	5.76	
CaO	3.23	3.92	4.47	2.81	3.12	5.15	1.84	5.99	9.27	3.28	5.96	8.58	9.55	8.6	13.24	6.29	
MgO	2.25	2.58	1.61	2.35	2.34	2.95	2.02	2.75	3.18	1.77	2.28	5.8	4.25	4.65	4.84	9.35	
K ₂ O	3.06	3.37	2.78	2.14	2.73	0.57	2.91	1.2	1.21	0.82	2.45	0.04	0.04	0.05	0.01	0.04	
Na ₂ O	1.14	1.27	1.84	3.65	2.6	3.43	1.33	2.19	2.41	2.94	2.59	3.99	4.23	4.75	0.07	4.46	
TiO ₂	0.63	0.57	0.55	0.47	0.59	0.59	0.59	0.53	0.64	0.48	0.55	1.31	1.7	1.65	2.03	0.5	
P ₂ O ₅	0.17	0.15	0.14	0.11	0.11	0.06	0.14	0.06	0.06	0.05	0.07	0.26	0.21	0.21	0.26	0.04	
MnO	0.07	0.08	0.06	0.06	0.05	0.08	0.06	0.05	0.08	0.03	0.09	0.21	0.13	0.14	0.19	0.17	
LOI	4.52	5.65	5.72	2.75	3.34	3.48	3.22	4.67	7.18	2.06	5.18	3.73	2.34	2.17	5.64	3.51	
Total	100	100.01	100.03	100.01	99.99	100.01	100.02	100.01	99.98	100	100.01	99.97	100.02	99.95	100	99.99	
Mg [#]	47.65	49.62	49.39	48.37	50.31	49.59	50.56	50.11	53.6	48.82	49.92	63.71	50.89	52.53	52.12	70.03	
La	46.8	9.01	18.6	27.5	32.8	4.52	71.3	12.8	14.8	13.1	16	8.95	6.93	7.15	9.11	0.8	
Ce	97.1	20.1	37.8	57.9	66.6	11.2	138	27.6	30.3	28.6	33.8	25.6	18.6	19.5	25	2.43	
Pr	11.4	2.64	4.53	6.68	7.82	1.7	15	3.53	3.89	3.56	4.24	3.99	2.9	2.92	3.95	0.45	
Nd	41.5	10.7	17.9	24.2	28.2	8.04	53.3	14.6	16.5	13.2	17.4	19.2	14.1	14.3	19.2	2.65	
Sm	7.42	2.89	3.59	4.53	5.66	2.54	8.88	3.42	3.99	2.8	3.91	5.28	4.32	4.41	5.53	0.97	
Eu	1.43	0.77	0.75	0.87	1.2	0.78	1.78	0.75	0.96	0.67	0.98	1.65	1.39	1.48	1.98	0.34	
Gd	6.17	3.56	2.88	4.45	5.32	3.25	8.61	3.75	4.24	2.84	4.12	6.6	5.27	5.35	6.45	1.4	
Tb	0.96	0.62	0.43	0.75	0.85	0.58	1.45	0.65	0.73	0.47	0.68	1.09	0.88	0.93	1.1	0.26	
Dy	5.36	3.87	2.65	4.6	4.85	3.68	8.61	3.96	4.85	2.99	4.25	7.68	6.49	6.28	7.16	1.88	
Ho	1.08	0.82	0.56	0.96	0.97	0.82	1.6	0.84	1.05	0.67	0.86	1.57	1.35	1.36	1.5	0.42	
Er	2.93	2.35	1.59	2.66	2.74	2.42	4.07	2.45	2.98	1.95	2.38	4.49	3.85	3.72	4.13	1.22	
Tm	0.43	0.36	0.26	0.39	0.42	0.37	0.54	0.38	0.47	0.31	0.36	0.69	0.57	0.56	0.61	0.19	
Yb	2.8	2.46	1.66	2.55	2.75	2.49	3.23	2.56	3.11	2.01	2.28	4.36	3.67	3.55	3.87	1.25	
Lu	0.4	0.36	0.26	0.4	0.43	0.38	0.43	0.39	0.48	0.29	0.35	0.68	0.56	0.55	0.58	0.2	
Y	25.2	20.3	12.6	23.8	23.4	18.6	37.2	19.4	26.3	15.8	24.8	40.4	34.6	32.7	37.6	10.9	
ΣREE	225.78	60.51	93.46	138.44	160.61	42.77	316.8	77.68	88.35	73.46	91.61	91.83	70.88	72.06	90.17	14.46	
δEu	0.63	0.73	0.69	0.59	0.66	0.83	0.61	0.64	0.71	0.72	0.74	0.85	0.89	0.93	1.01	0.89	

续表 1

位置 岩性	奥依塔格地区西部乌鲁阿特组火山岩(12X07)										奥依塔格地区乌鲁阿特组火山岩(12X08)					
	杏仁流纹岩										蚀变球帘玄武岩					
样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	6
LREE	10.22	3.2	8.08	7.26	7.76	2.06	10.1	4.19	3.93	5.37	5	2.38	2.13	2.23	2.55	1.12
/HREE																
(La/Yb) _N	11.99	2.63	8.04	7.74	8.56	1.3	15.83	3.59	3.41	4.67	5.03	1.47	1.35	1.44	1.69	0.46
(La/Sm) _N	4.07	2.01	3.34	3.92	3.74	1.15	5.18	2.42	2.39	3.02	2.64	1.09	1.04	1.05	1.06	0.53
(Sm/Yb) _N	1.82	1.2	1.44	1.44	1.6	1.08	2.21	1.21	1.13	1.17	1.49	1.25	1.19	1.25	1.38	0.93
Rb	112	119	97	83.3	92.1	13.7	103	30.2	27	26	84.3	2.42	0.94	0.64	0.1	0.54
Ba	618	670	743	544	715	213	576	280	526	117	597	95.3	42.1	41.9	10.7	16.7
Th	11.4	10.8	9.8	9.41	10.7	2.25	11.4	3.1	2.25	2.86	7.04	1.8	1.28	1.13	1.12	0.09
Nb	11.7	11.9	9.11	9.87	9.79	2.57	10.8	4.09	3	4.48	7.29	6.05	3.98	4.05	4.6	0.39
Ta	0.96	0.94	0.72	0.76	0.76	0.21	0.89	0.31	0.22	0.4	0.64	0.54	0.35	0.37	0.45	0.04
Sr	294	322	497	354	420	1890	309	513	541	314	488	224	223	181	304	84.2
Nd	41.5	10.7	17.9	24.2	28.2	8.04	53.3	14.6	16.5	13.2	17.4	19.2	14.1	14.3	19.2	2.65
P	731.4	647.57	601.63	493.63	496.75	271.29	631.24	274.68	282.19	222.82	322.18	1091.15	916.57	916.57	1091.15	174.58
Zr	130	143	121	145	161	82.8	142	81.8	79.3	73.3	133	198	128	125	144	18.4
Hf	4.05	4.36	3.65	4.5	4.83	2.77	4.53	2.63	2.49	2.2	3.88	4.78	3.51	3.62	3.92	0.66
Ti	3767.28	3430.8	3305.48	2835.39	3535.59	3539.99	3530.11	3206.89	3811.48	2876.91	3287.36	7553.7	9951.7	9651.95	11510.4	2877.6
Y	25.2	20.3	12.6	23.8	23.4	18.6	37.2	19.4	26.3	15.8	24.8	40.4	34.6	32.7	37.6	10.9
Cr	69.3	73.5	64.1	47.2	69	59.8	64	54.7	125	30.9	77.2	134	17.8	17.4	7.07	455
Ni	40.3	47.4	26.5	19.1	32.4	28.9	42.2	27.2	42.4	14.9	32.9	49.5	25.2	18.8	12.5	99.2
La/Nb												0.14	0.03	0.04	0.07	0.07
Ba/Nb												2.49	2.01	1.21	1.39	1.18
La/Ba												0.06	0.02	0.03	0.05	0.06
(Th/Nb) _{PM}												0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
(Nb/La) _{PM}												144.04	162.84	252.77	114.79	145.58
Zr/Nb												32.73	32.16	30.86	31.3	47.18
Ce/Th												14.22	14.53	17.26	22.32	26.7
Ba/Th												52.94	32.89	37.08	9.55	183.52

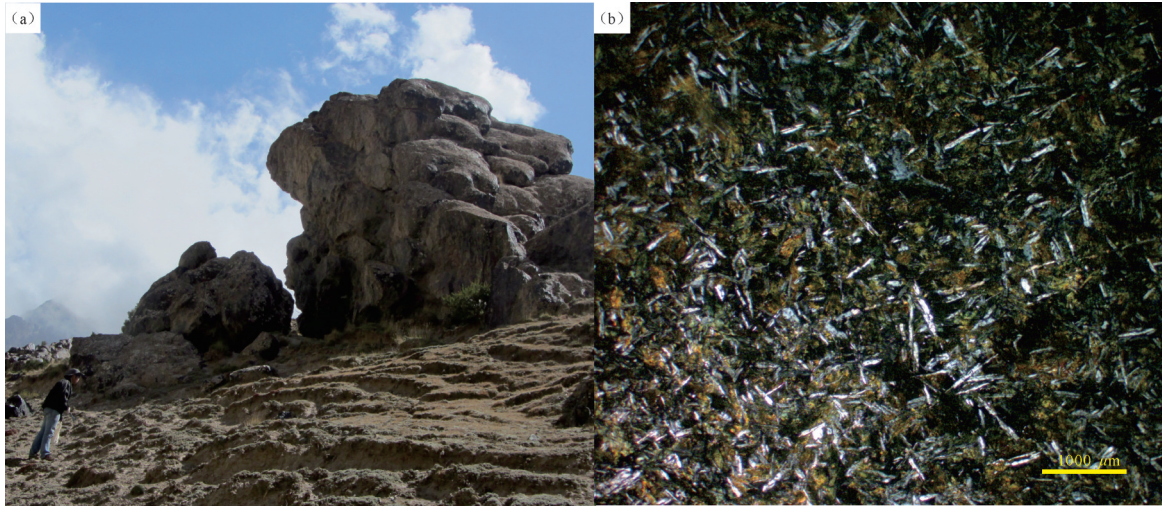


图2 玄武岩宏观特征及显微照片

Fig.2 Macroscopic (a) and microscopic (b) photographs of the basalt

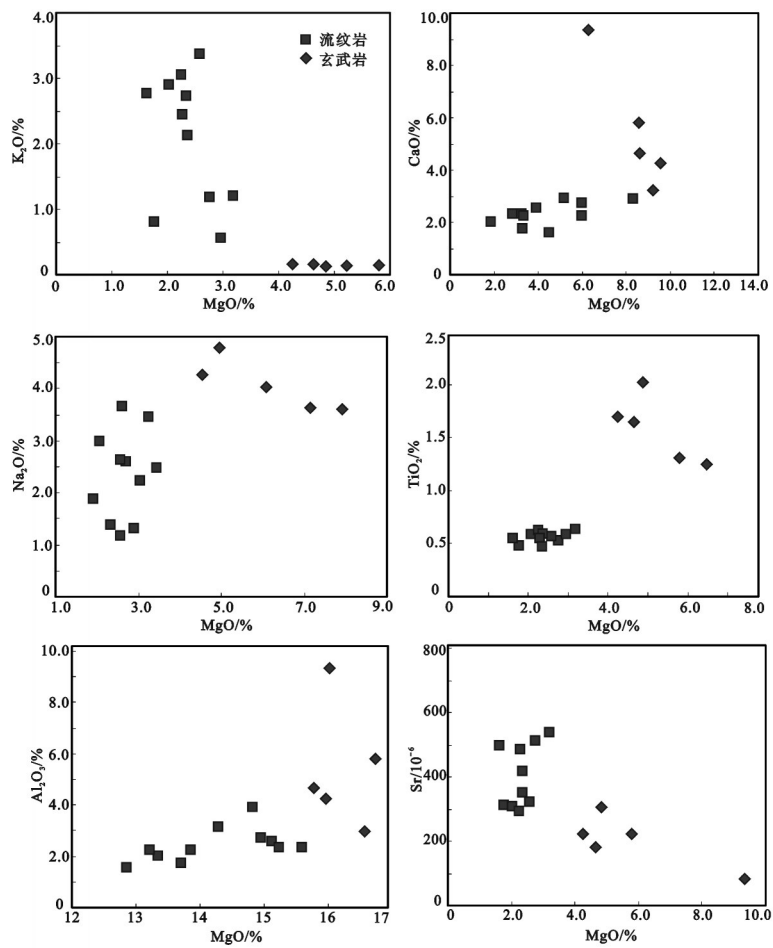


图3 乌鲁阿特组火山岩 hark 图解

Fig.3 Harker diagram for the volcanic rocks of Wuluat Formation

含量为1.61%~2.95%, $Mg^{\#}$ 介于48~54。整体而言,玄武岩和流纹岩在Hark(图3)图解中,随着MgO值变化,其余元素并没有表现出线性演化特征,暗示二者不具有同源演化特征。

在全碱-SiO₂图解(图略)上,玄武岩投影点多数落在玄武安山岩的范围,流纹岩则落在英安岩范围。火山岩的烧失量为2.17%~7.18%,考虑到火山岩经历较强的蚀变作用,使用TAS图解可能会使判定结果产生误差,故本文采用在蚀变过程中不活泼的元素Ti、Zr、Nb、Y进一步判定。在Nb/Y-Zr/Y图解中(图4-a),基性熔岩落入玄武岩范围,酸性端员横跨安山岩与流纹岩之间。SiO₂-K₂O图(图4-b)中,玄武岩为拉斑玄武系列,流纹岩横跨拉斑-钙碱性-高钾钙碱性系列,主体为钙碱性系列。

2.2 稀土、微量元素

乌鲁阿特组玄武岩和流纹岩稀土组成有不同的配分曲线特征。在球粒陨石标准化图解中(图5)前者稀土总量较低,且曲线形态近似平坦,轻重稀土分馏较弱;后者轻稀土较为富集,呈右倾型配分趋势,轻稀土元素分馏较强。暗示二者有不同的岩浆源区。但各个系列岩石配分曲线相互平行,只显示位置高低不同,说明稀土分异程度相当,具有同源岩浆演化特征。

玄武岩稀土总量(ΣREE)集中在 14.46×10^{-6} ~ 91.83×10^{-6} ,整体稀土曲线呈平坦型, $(La/Yb)_N=0.46$ ~ 1.69 ;轻、重稀土元素各自分馏不明显, $(La/Sm)_N=0.53$ ~ 1.09 , $(Sm/Yb)_N=0.93$ ~ 1.38 ;无明显的Eu异常($\delta Eu=0.89$ ~ 1.01)。在稀土元素标准化图解上,配分

型式明显不同于N-MORB、E-MORB,类似于East Scotia Ridge^[30]玄武岩E-BABB特征。

流纹岩 $\Sigma REE=42.77 \times 10^{-6}$ ~ 316.80×10^{-6} (平均值为 124.5×10^{-6}), $(La/Yb)_N=1.30$ ~ 11.99 , $(La/Sm)_N=1.09$ ~ 5.18 , $(Sm/Yb)_N=1.20$ ~ 2.21 ,有微弱的Eu异常, δEu 介于0.59~0.85,类似于LCC^[31]特征。

在微量元素蛛网图中,玄武岩相对富集高场强元素Th、Zr、Hf,亏损Rb、Ba、Nb-Ta。强不相容元素具有类似N-MORB分布形态,但含量高于后者。Nb-Ta异常暗示岩浆可能曾经遭受地壳混染或者是俯冲带流体的交代作用。玄武岩受地壳物质混染后,Nb至Hf各元素皆增。因上地壳富Rb-Th,当玄武岩受到上地壳混染,呈Rb-Th峰,Nb-Ta槽;因下地壳贫Rb-Th^[34],如受下地壳混染,则Rb-Th和Nb-Ta皆呈槽,暗示玄武岩熔体在上升过程中可能受到下地壳的混染作用。流纹岩类似于下地壳微量元素特征,P和Ti有明显的负异常,暗示岩浆演化过程中有较为明显的磷灰石、钛铁矿物的堆晶作用。

3 讨 论

3.1 构造环境

在地球化学图解上玄武岩落入陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区、板内拉斑玄武岩区(6-a,b)。富集大离子亲石元素Rb、Ba、Th等,亏损高场强元素Nb、Ta、Ti,为消减带火山岩的标志性特征,但上述特征同样可以出现在与地壳混染作用相关的造山后伸展环境^[31,37,38],这种特征有可能是经历了古板

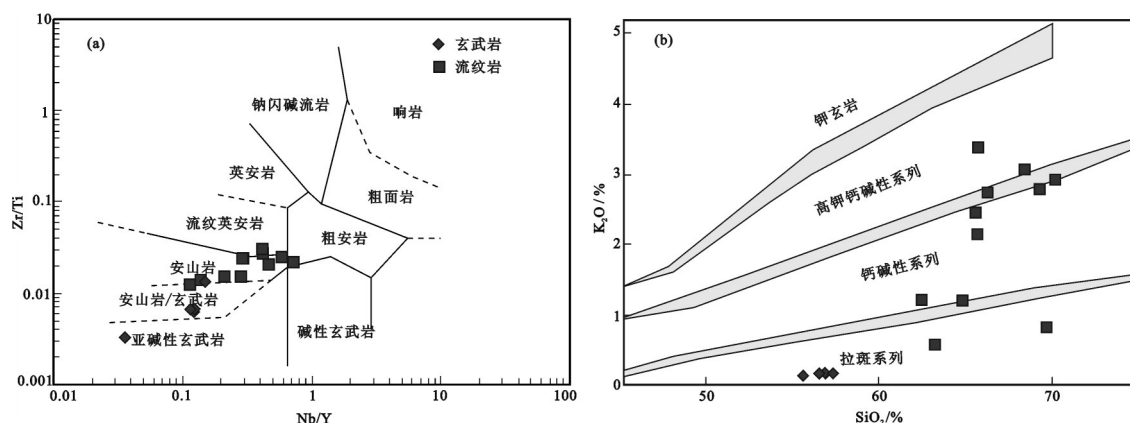


图4 乌鲁阿特组火山岩岩石分类判别图

Fig.4 Classification of types and series of Wuluat Formation volcanic rocks

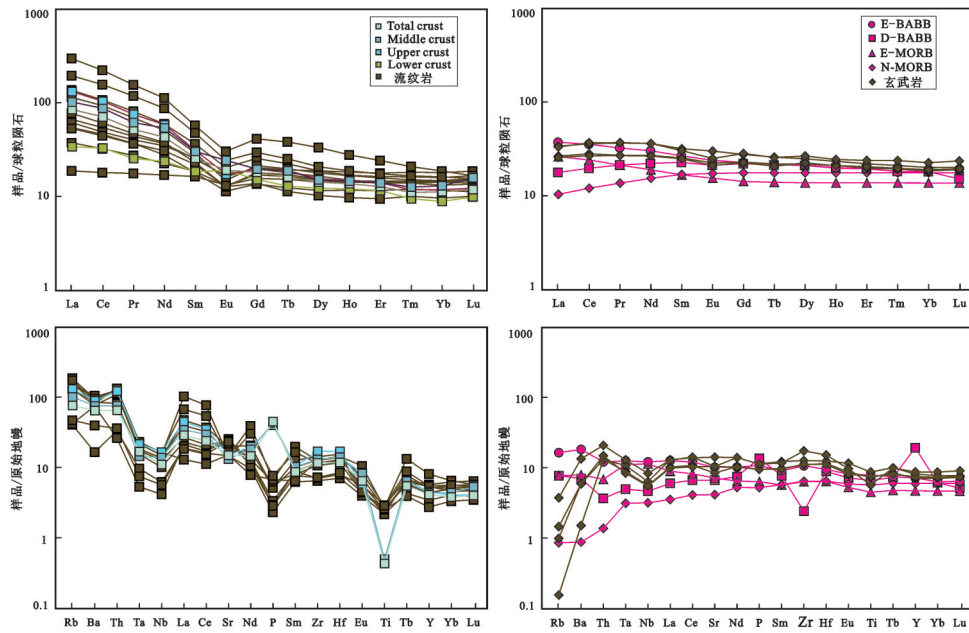


图5 乌鲁阿特组火山岩稀土元素和微量元素配分图解

(球粒陨石、原始地幔、N-MORB、E-MORB数据自文献[35];E-BABB、D-BABB数据自文献[30,36];Total crust、Middle crust、Upper crust数据自文献[31])

Fig.5 Chondrite-normalized REE and primitive mantle-normalized trace elements distribution patterns for the Wuluat Formation volcanic rocks

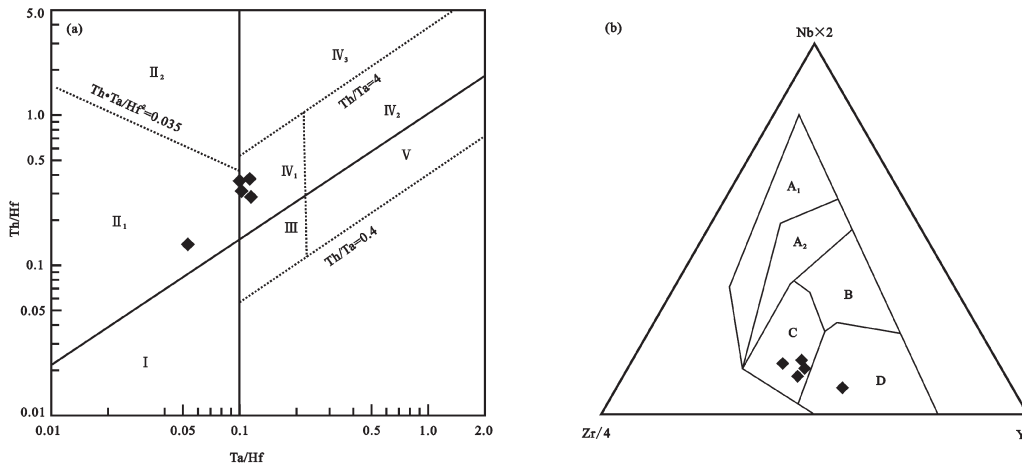


图6 乌鲁阿特组基性熔岩构造环境判别图解(a据文献[43],b据文献[44])

I—板块发散边缘N—MORB区;II—板块汇聚边缘玄武岩区(II₁—大洋岛弧玄武岩,II₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区);III—大洋板内玄武岩区(洋岛、海山玄武岩区及T—MORB、E—MORB);IV—大陆板内玄武岩区(IV₁—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区,IV₂—陆内裂谷碱性玄武岩区,IV₃—大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区);V—地幔热柱玄武岩区;A₁—板内碱性玄武岩;A₂—板内碱性玄武岩+板内拉斑玄武岩区;B—E—MORB;C—板内拉斑玄武岩区+火山弧玄武岩;D—火山弧玄武岩+N—MORB

Fig.6 Discrimination diagram of the Wuluat Formation basalts

I—Divergence plate boundary N—MORB; II—Convergence plate boundary basalts (II₁—Oceanic island arc basalts, II₂—Continental margin island arc and volcanic arc basalts); III—Oceanic intraplates (oceanic island and seamounts basalts, and T—MORB and E—MORB); IV—Continental intraplate basalts (IV₁—Intracontinental and continental margin rift tholeiites, IV₂—Intracontinental rift alkaline basalts, IV₃—Continental extensional zone or initial rift); V—Mantle plume basalts; A₁—Intraplate alkaline basalts; A₂—Intraplate alkaline basalts + intraplate tholeiite; B—Intraplate tholeiite + volcanic arc basalts; D—Volcanic arc basalts + N—MORB

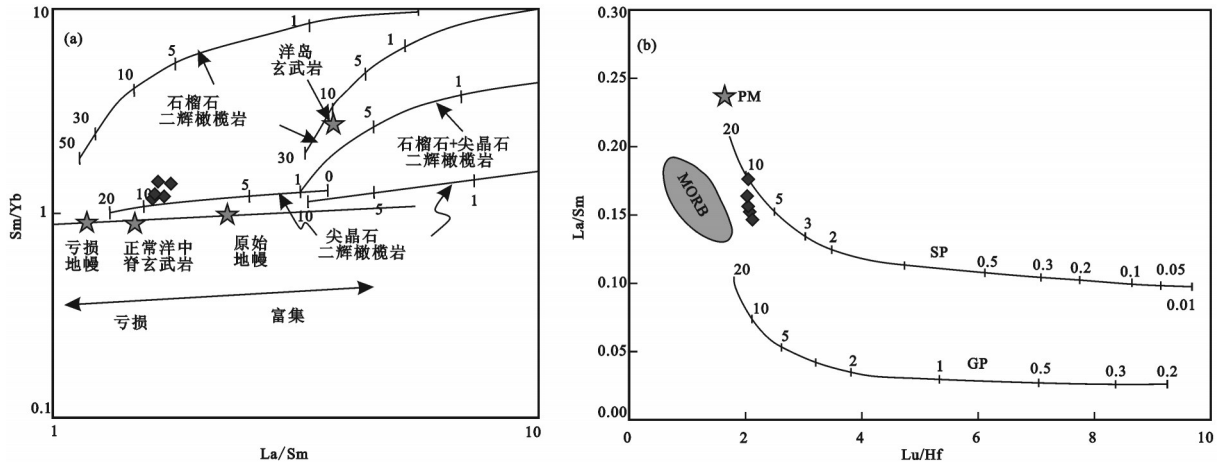


图7 乌鲁阿特组基性熔岩源区判别图解(a底图据文献[57], b据文献[58])

SP—原始尖晶石二辉橄榄岩; GP—原始石榴石二辉橄榄岩; 图中数字指示部分熔融的程度

Fig.7 Discrimination diagram for the Wuluat Formation basalts

(a after reference [57], b after reference [58]; SP—Primitive spinel lherzolite; GP—Primitive garnet lherzolite)

块俯冲改造的岩石圈地幔参与了岩浆的形成^[39]。玄武岩地球化学特征与典型的弧后扩张区熔岩(Y 大于 20×10^{-6} , $TiO_2 > 1.0\%$, $Th/Yb < 0.60$)吻合^[40]。岛弧和弧后盆地环境的区别在与高场强元素Gd—Yb的配分形态,前者右倾形式较为明显,后者则多为平坦型分布。野外地质特征研究区一带乌鲁阿特组火山岩为细碧角斑岩系。下部为杏仁状细碧岩、蚀变细碧岩、变细碧岩、蚀变玄武岩、角斑岩、石英角斑岩等;中部中、厚层含炭泥质灰岩夹浅灰色薄层大理岩,为一套斜坡扇亚相滨浅海碳酸盐岩组合;上部灰绿色变安山岩、蚀变玄武安山岩、蚀变安山岩夹紫灰色石英角斑岩,总厚约1953 m,不整合于库山河组之上。区域上与上述火山岩相伴的还有碎屑岩、碳酸盐岩地层。奥依塔格西北的特给乃奇克达坂组和哈尔隆一带石炭系、下中二叠统为一套深色薄层状碳质泥岩、粉砂岩组合。因此,根据上述地球化学图解信息与区域地质特征综合判定,乌鲁阿特组不同与大洋盆地特征,为一套俯冲带消减作用相关的弧后盆地火山岩建造。

3.2 地壳混染与分离结晶

地壳通常具有高的La/Nb、Ba/Nb和低的La/Ba值^[41,42],如果受到地壳混染作用,不相容元素La、Ba会相对于Nb明显升高,从而导致有La/Nb值升高,La/Ba值降低。玄武岩La/Nb、Ba/Nb、La/Ba平均值分别为:1.80、16.36、0.27。而地壳La/Nb(介于

1.77~2.90)、Ba/Nb(34.11~64.59)、La/Ba(0.04~0.06)。较高的 $(Th/Nb)_{PM}$ 和低的 $(Nb/La)_{PM}$ ($(Th/Nb)_{PM}$ 远大于1, $(Nb/La)_{PM}$ 小于1)^[45,46]是判定玄武岩受到地壳混染作用的重要指标。玄武岩的 $(Th/Nb)_{PM}$ 介于1.96~2.70, $(Nb/La)_{PM}$ 介于0.47~0.65,综合判定玄武岩受到微弱的地壳混染作用。La—La/Sm图解中,若La/Sm随着La值升高而升高,指示岩浆过程主要为部分熔融;当La/Sm随着La升高而不变时,主要过程为分离结晶作用^[47]。玄武岩投影点暗示玄武岩经历了明显的分离结晶过程。玄武岩的 $Mg^\#$ 值51~70, Cr为 7.07×10^{-6} ~ 455×10^{-6} , Ni为 12.5×10^{-6} ~ 99.2×10^{-6} ,远小于原始岩浆值($Mg^\#$ 介于68~75, Cr= 300×10^{-6} ~ 500×10^{-6} , Ni= 300×10^{-6} ~ 400×10^{-6})^[48,49],暗示该玄武岩浆经历较为明显的橄榄石、辉石的分离结晶作用。玄武岩 Al_2O_3 、CaO与 $Mg^\#$ 并没有很好的线性关系(图略), $\delta Eu=0.85$ ~1.01,暗示没有经历很明显的斜长石的分离结晶作用。而CaO、 TiO_2 与 SiO_2 的负相关性,可能与单斜辉石、钛铁矿物的结晶有关。

3.3 玄武岩源区特征

强不相容元素的比值LILE/HFSE、LREE/HFSE在一定规模的地幔部分熔融过程中不易变化而且在岩浆有限程度的低压分离结晶作用过程中也无较大变化^[50],因此能有效追踪源区的化学性质。原始地幔Zr/Nb比值(18)可以有效区分源区为亏损地幔、过渡型地幔或富集地幔。富集地幔和过渡型地

幔 $Zr/Nb < 18$, 亏损地幔 $Zr/Nb > 18$ ^[51]。基性熔岩 Zr/Nb 介于 30.9~32.8, 暗示基性熔岩由亏损地幔部分熔融形成。前述显示, 该套火山岩形成于与俯冲带消减作用相关的弧后盆地环境, 岩浆源区亏损地幔就会受到俯冲洋壳、地壳物质及相关流体在内的多种组分的贡献。前人研究表明, 洋壳沉积物有较高的 Th 含量, 低的 $Ce/Th(8)$ 、 $Ba/Th(111)$ 值^[52]。乌鲁阿特组基性熔岩 Ce/Th 为 14.2~26.7, Ba/Th 为 32.9~183.5 以及没有明显的 Ce 异常, 排除俯冲沉积物的参与贡献^[53]。而俯冲板块部分熔融产生的玄武质火山岩 Nb 值 $> 7.6 \times 10^{-6}$ ^[54], 与基性熔岩 Nb 值 $(0.39 \times 10^{-6} \sim 6.05 \times 10^{-6})$ 差距甚远。La/Yb-Ba/La 图解用来判定火山岩在形成过程中是否有俯冲洋壳和沉积物的加入^[55,56]。样品(图略)远离沉积物和俯冲带板片熔体, 排除基性熔岩中有俯冲洋壳与沉积物的影响。因此, 所有样品所表现出的岛弧火山岩地球化学特征, 可能暗示了它的成因与古板块俯冲改造的岩石圈地幔部分熔融有关。

Ta/Yb-Th/Yb 图解(图略)常用来判定地幔源区和岩浆上升中途流体或熔体对微量元素的贡献^[51], 样品落入地幔序列与活动陆缘的交界处, 说明基性熔岩有受到后期过程影响。HREE 平坦型分配型式, 表明源区部分熔融不与残留石榴子石相伴, 标志部分熔融可能发生于较石榴子石二辉橄榄岩稳定区更浅的深部(即尖晶石二辉橄榄岩稳定区域)。在图 La/Sm-Sm/Yb(7-a) 和 La/Sm-Lu/Hf(7-b) 图解中^[58], 样品落入尖晶石二辉橄榄岩附近, 并远离石榴子石二辉橄榄岩区域。因此推断基性熔岩可能来自于亏损地幔尖晶石二辉橄榄岩的部分熔融, 是较高熔融程度(5%~10%)的产物。

3.4 酸性熔岩的成因

西昆仑晚泥盆一早石炭世普遍发育一套基性-中酸性-酸性的钙碱性火山岩, 目前认为这套火山岩并非岛弧型火山岩, 而是后碰撞的岩浆岩, 为碰撞后俯冲板片脱落或岩石圈地幔拆沉, 软流圈上涌形成^[25]。基性熔岩来自于亏损地幔部分熔融形成。酸性熔岩可能与玄武岩同源, 为玄武岩后期演化产物; 也可能与玄武岩有不同的源区, 由于玄武岩上升途中加热地壳, 地壳深融形成; 亦可能为地壳物质与玄武岩混合作用的产物。酸性熔岩稀土、微量元素完全不同于基性熔岩, 二者氧化物随 MgO(图

4) 演化线并非连续的演化曲线, 以及二者明显不同的 La/Sm、Nb/La 比值, 暗示酸性熔岩并非由基性熔岩分离结晶作用或地壳物质混染形成^[59]。酸性熔岩地球化学不具有从玄武岩和向地壳物质的过渡特征, 暗示酸性熔岩并非地壳和基性岩浆混合的产物。酸性熔岩微量和稀土元素类似于下地壳特征, $Mg^\#$ 值介于 47.62~53.60, 类似于下地壳值 ($Mg^\# = 53.4$ ^[60], 51.4^[42], 46.1^[31])。下地壳镁铁质岩石在压力(如 $P=1.0$ Gpa) 条件下熔融出的中酸性熔体主要为富钠特征^[59]。所以推断酸性熔岩为基性幔源物质上升, 底侵加热从而导致下地壳物质在低压条件下部分熔融作用形成。

4 结 论

奥依塔格地区乌鲁阿特组火山岩组合和岩石地球化学特征, 证实了西昆仑北带在石炭纪处于伸展构造背景下, 结合区域上侵入岩特征, 笔者推断在晚古生代有一次大的构造岩浆事件。枕状球状玄武岩为拉张背景下, 亏损地幔源区尖晶石二辉橄榄岩较高级度的部分熔融形成, 并在上升途中受到了下地壳的混染。流纹岩是基性幔源岩浆上升过程中携带热量, 使加热的下地壳物质在低压环境下部分熔融形成。

致谢: 赵力颖、梁维新、崔方磊在室内整理和研究中给予帮助, 王超副研究员、匿名审稿专家和编辑部李亚萍老师提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 潘裕生. 昆仑山区构造区划初探[J]. 自然资源学报, 1989, 4(3): 196-203.
Pan Yusheng. Tectonic division of Kunlun mountain[J]. Journal of Natural Resources, 1989, 4(3): 196-203(in Chinese with English abstract).
- [2] 潘裕生. 青藏高原第五缝合带的发现与论证[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 184-192.
Pan Yusheng. The discovery and demonstration of the fifth suture zone in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(2): 184-192(in Chinese with English abstract).
- [3] 潘裕生, 周伟明, 许荣华等. 昆仑山早古生代地质特征与演化[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(4): 302-307.
Pan Yusheng, Zhou Weiming, Xu Ronghua et al. Early Paleozoic geological features and evolution of the Kunlun Mountains[J]. Science in China(Ser.D), 1996, 26(4): 302-307(in Chinese).

- [4] 潘裕生. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 153–163.
Pan Yusheng. The formation and uplifting of the Qinghai Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 153–163(in Chinese with English abstract).
- [5] 姜春发, 朱松年. 构造迁移论概述[J]. 中国地质科学院院报, 1992, 25(00): 1–14.
Jiang Chunfa, Zhu Songnian. Introduction to tectonic migration theory[J]. Acta Geoscientica Sinica. 1992, 25(00): 1–14(in Chinese with English abstract).
- [6] 姜春发. 中央造山带几个重要地质问题及其研究进展(代序)[J]. 地质通报, 2002, 21(Z2): 453–455.
Jiang Chunfa. Important geological problems and the research progress of the Central Orogenic Belt[J]. Regional Geology of China, 2002, 21(Z2): 453–455(in Chinese with English abstract).
- [7] Ph Matte, P Tapponnier. Geology Along the Line from Yecheng to Shiquanhe and Tectonic Evolution of the Region Involved[J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 8(2): 119–133.
- [8] 袁超, 孙敏, 肖文交, 等. 原特提斯的消减极性: 西昆仑 128 公里岩体的启示[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 399–408.
Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, et al. Subduction polarity of the prototethys: insights from the Yirba pluton of the western Kunlun range, NW China.[J] Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 399–408(in Chinese with English abstract).
- [9] 邓万明. 喀喇昆仑—西昆仑地区蛇绿岩的地质特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1995, 11(S1): 98–111.
Deng Wanming. Geological features and tectonic significance of ophiolite in the West KunLun area [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(S1): 98–111(in Chinese with English abstract).
- [10] 周辉, 李继亮. 西昆仑库地煌斑岩的年代学及地球化学特征[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 380–384.
Zhou Hui, Li Jiliang. Geochronology and geochemistry of lamprophyres in the West Kunlun Kudi[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(3): 380–384 (in Chinese with English abstract).
- [11] Xiao W J, Windley B F. Arc–ophiolite obduction? in the Western Kunlun Range (China): implications for the Palaeozoic evolution of central Asia[J]. Journal of the Geological Society, London, 2002, 159(4), 517–28.
- [12] Xiao WJ, Windley B F, Paleozoic accretionary tectonics of the Western Kunlun Range, China: new SHRIMP zircon ages from the Kudi ophiolite and associated granites, and implications for the crustal growth of Central Asia[J]. Journal of Geology, 2005, 113(3), 687–705.
- [13] 黄建国, 杨瑞东, 杨剑等. 西昆仑北缘库斯拉甫一带寒武纪中酸性岩浆活动及地质意义[J]. 地球化学, 2013, 42(5): 454–466.
Huang Jianguo, Yang Ruidong, Yang Jiang. et al. Cambrian intermediate– acid magmatic activity and its geological significance in the Kusilafu region at the north margin of the Western Kunlun[J]. Geochimica, 2013, 42(5): 454– 466 (in Chinese with English abstract).
- [14] Matte Ph, Tapponnier P. Geology Along the Line from Yecheng to Shiquanhe and Tectonic Evolution of the Region Involved[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 1995, 8(2): 119–133.
- [15] 廖世勇, 姜耀辉, 杨万志. 西昆仑大同岩体岩浆成因绿帘石矿物学研究及其对岩体形成构造环境的制约[J]. 矿物学报, 2009, 29(1): 49–55.
Liao Shiyong, Jiang Yaohui, Yang Wangli. Mineralogical study on magmatic apedote from datong pluton, and its implication for tectonic setting of western Kunlun region [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(1): 49–55(in Chinese with English abstract).
- [16] 计文化, 周辉, 李荣社等. 西昆仑新藏公路北段古—中生代多期次构造—热事件年龄确定[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32(5): 671–680
Ji Wenhua, Zhou Hui, Li Rongshe. et al. Earth Science[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(5): 671–680(in Chinese with English abstract).
- [17] 周辉, 储著银, 李继亮, 等. 西昆仑库地韧性剪切带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄[J]. 地质科学, 2000, 35(2): 233–239.
Zhou Hui, Chu Zhuyin, Li Jiliang, et al. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the ductile shear zone in western Kunlun[J]. 2000, 35(2): 233–239 (in Chinese with English abstract).
- [18] Mattem F, Schneider W. Suturing of the Proto–and Paleo–Tethys oceans in the western Kunlun(Xijiang, China) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(6), 637–650.
- [19] 高晓峰, 校培喜, 康磊, 等. 西昆仑大同西岩体成因: 矿物学、地球化学和锆石 U–Pb 年代学制约[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3065–3079.
Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Kang Lei. et al. Origin of Datongxi pluton in the West Kunlun orogen: Constraints from mineralogy, elemental geochemistry and zircon U– Pb age[J]. Acta Petrological Sinica, 2013, 29(9): 3065– 3079 (in Chinese with English abstract).
- [20] 贾儒雅. 西昆仑造山带丘克苏花岗岩与暗色微粒包体岩石成因及其构造意义[D]. 南京大学, 2013.
Jia Ruya. Petrogenesis and Tectonic Implications of Qiuksu Granite Pluton and Its Enclaves in the Western Kunlun Orogen Belt, NW China [D]. Nanjing University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [21] 计文化. 西昆仑—喀喇昆仑晚古生代—早中生代构造格局[D]. 中国地质大学(北京)2005.
Ji Wenhua. The Late Paleozoic– Early Mesozoic Tectonic Frame in the Western Kunlun–Karakorum Area[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2005 (in Chinese with English abstract).
- [22] 贾群子, 杜玉良, 赵子基, 等. 柴达木盆地北缘滩间山金矿区斜长花岗斑岩锆石 LA–MC–ICPMS 测年及其岩石地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 87–93.
Jia Qunzi, Du Yuliang, Zhao Ziji et al. Zircon LA–MC–ICPMS U–Pb dating and geochemical characteristics of the plagiogranite

- porphyry from Tanjianshan gold ore district in North Margin of Qaidam Basin. [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1):87- 93 (in Chinese with English abstract).
- [23] 姜耀辉, 芮行健, 贺菊瑞, 等. 西昆仑山加里东期花岗岩类构造的类型及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1999, 12(1): 106-116.
Jiang Yaohui, Rui Xingjian, He Jurui, et al. Tectonic type of Caledonian granitoids and tectonic significance in the West Kunlun Mts.[J]. Acta Petrological Sinica, 1999, 12(1): 106-116 (in Chinese with English abstract).
- [24] 姜耀辉, 芮行健, 郭坤一, 等. 西昆仑造山带花岗岩形成的构造环境[J]. 地球学报, 2000, 12(01): 23-25.
Jiang Yaohui, Rui Xingjian, Guo Kunyi, et al. Tectonic environment of granite of Western KunLun orogenic belt [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2000, 21(01): 23- 25 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李兴振, 尹福光. 东昆仑与西昆仑地质构造对比研究之刍议[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 777-783.
Li Xingzhen, Yin Fuguang. Comparative study of the geological structure of the Eastern and West Kunlun Mountains[J]. Geological Bulletin of China., 2002, 21(11):777-783 (in Chinese with English abstract).
- [26] 丁道桂, 刘伟新, 王道轩, 等. 喀喇昆仑地区早二叠世弧后盆地[J]. 中国区域地质, 1998, 17(1): 74-79.
Ding Daogui, Liu Weixin, Wang Daoxuan. et al. Eerly Permian back arc basin in the Karakorum Mountains [J]. Regional Geology of China, 1998, 17(1): 74-79 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张传林, 于海峰, 叶海敏, 等. 塔里木西部奥依塔克斜长花岗岩: 年龄、地球化学特征、成岩作用及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(10): 881-893.
Zhang Chuanlin, Yu Haifeng, Ye Haimin, et al. Age, geochemistry and its tectonic significance of Aoyitake plagioclase granite in Western Tarim[J]. Science in China(Series D), 2006, 36(10): 881-893.(in Chinese).
- [28] 李广伟, 方爱民, 吴福元, 等. 塔里木西部奥依塔克斜长花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 166-172.
Li Guangwei, Fang Aimin, Wu Fuyuan, et al. Studies on the U-Pb ages Hf isotopes of zircon in the Aoyitake plagioclase granite, west Tarim[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(1): 166-172 (in Chinese with English abstract).
- [29] 孙宝生, 刘增仁, 王招明. 塔里木西南喀什凹陷几个地质问题的新认识[J]. 新疆地质, 2003, 21(1): 78-84.
Sun Baosheng, Liu Zenreng, Wang Zhaoming. New knowledge on geology of Kashi depression in southwest Tarim[J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(1): 78-84.(in Chinese with English abstract).
- [30] Leat P T, Livermore R A, Millar I L, et al. Magma supply in backarc spreading centre segment E2, East Scotia Ridge[J]. Journal of Petrology, 2000,41(6): 845-866.
- [31] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 2(3): 1-64.
- [32] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[J]. Geological Society of London Special Publication, 1983, 15(9): 230-249.
- [33] 黄德志, 高俊, 戴塔根. 俯冲带流体作用的地球化学示踪[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 131-140.
Huang Dezhi, Gao Jun, Dai Taigen. Geochemical tracing of the fluids in subduction zones[J]. Earth Science frontiers, 2001, 8(3): 131-140(in Chinese with English abstract).
- [34] Wilson M. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 466.
- [35] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for the mantle composition and process[C]// Saunder A D, Norry M J(eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London Special Publication, London, 1989, 42(2): 313-345.
- [36] Fretzdorff S, Livermore, R A Devey, et al. Petrogenesis of the back-arc east Scotia Ridge, South Atlantic Ocean[J]. Petrology, 2002, 43(8): 1435-1467.
- [37] 邓晋福, 冯艳芳, 刘翠, 等. 太行-燕辽地区燕山期造山过程、岩浆源区与成矿作用[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 623-633.
Deng Jinfu, Feng Yanfang, Liu Cui, et al. Yanshanian (Jurassic-Cretaceous) orogenic processes, magma sources and metallogenesis as well as coal formation in the Taihangshan-Yanshan-West Liaoning region[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 623-633(in Chinese with English abstract).
- [38] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 77-89.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(1): 77-89(in Chinese with English abstract).
- [39] 徐义刚. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(1): 3-7.
Xu Yigang. Roles of thermo-mechanic and chemical erosion in continental lithospheric thinning[J]. Bulletin of Mineralogy Petrogy and Geochemistry, 1999, 18(1): 3-7(in Chinese with English abstract).
- [40] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩浆成因[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 48-60.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu xueyi. Magma genesis of Ordovician back-arc basins in the Northern Qilian Mountains[J] Geology in China, 2003, 30(1): 48-60(in Chinese with English abstract).
- [41] Weaver B L, Tarney J. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust [J]. Nature, 1984, 31(1): 310-575.
- [42] Wedepohl K Hans. The composition of the continental crust[J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59 (7): 1217–1232.
- [43] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 2001, 17(03): 413–421.
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. Acta Petrological Sinica, 2001, 17(03): 413–421(in Chinese with English abstract).
- [44] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. Chemical Geology, 1986, 56(86): 207–218.
- [45] Saunders A D, Storey M, Kent RW, et al. Consequences of plume-lithosphere interaction[C]//Storey B C, Alabaster T, Pankhurst R J (eds.). Magmatism and the Causes of Continental Break-up. Geol. Soc. Spec. Publ. London, 1992, 130(5): 68.
- [46] Kieffer B, Arndt N, Lapierre H, et al. Flood and shield basalts from Ethiopia: Magmas from the African superswell[J]. Journal of Petrology, 2004, 45(4): 793–834.
- [47] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 33.
- Han Yinwen, Ma Zhendong. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 33 (in Chinese).
- [48] Frey F A, Green D H, Roy S D. Integrated models of basalts petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from southeastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. Journal of Petrology, 1978, 19 (3): 463–513.
- [49] Hess P C. Phase Equilibria Constraints on the Origin of Ocean Floor Basalts[J]. Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges, 1993, 29(10): 67–102.
- [50] 李海勇, 徐兆文, 陆现彩, 等. 鲁西邹平盆地中生代火山岩的演化对地幔源区的约束[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2537–2547.
- Li Haiyong, Xu Zhaowen, Lu Xiancai, et al. Evolution of Mesozoic volcanic rocks in the Zouping basin, western Shandong Province: Constraints for mantle sources[J]. Acta Petrological Sinica, 2008, 24(11): 2537–2547 (in Chinese with English abstract).
- [51] Le Roex A P, et al. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southwest Indian Ridge between the Bouvet triple junction and 11 degrees[J]. east Petrol., 1983, 92(10): 267–318.
- [52] T Plank, C H. Langmuir, An Evaluation of the Global Variations in the Major Element Chemistry of Arc Basalts [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1988, 90(4): 349–370.
- [53] Turner G, Wang S, Burgess. Argon and other noble gases in fluid inclusions[J]. Chem. Geol., 1988, 70 (1/2): 42.
- [54] Hollings P. Archean Nb-enriched basalts in the northern Superior Province[J]. Lithos, 2002, 64(14): 1–14.
- [55] Castillo P R, Newhall C G. Geochemical constraints on possible subduction components in lavas of Mayon and Taal Volcanoes, southern Luzon, Philippines[J]. Petrol., 2004, 45(6): 1089–1108.
- [56] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 662(6294): 662–665.
- [57] Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. Lithos, 2008, 100(3): 14–48.
- [58] Regelous M, Hofmann A W, Abouchami W, et al. Geochemistry of lavas from the Emperor Seamounts, and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma[J]. Petrol, 2003, 44(1): 113–140.
- [59] 高晓峰, 校培喜, 康磊, 等. 新疆塔什库尔干塔阿西一带火山岩成因及地质意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2013, 38 (06): 1169–1182.
- Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Kang Lei, et al. Origin of the volcanic rocks from the Ta' axi region, Taxkorgan, Xinjiang and its geological significance[J]. Earth Science- Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(06): 1169–1182 (in Chinese with English abstract).
- [60] Weaver B L. The origin of Ocean Island Basalt End-Member compositions—trace-element and isotopic constraints[J]. Earth Planet Sci. Lett., 1991, 104(2/4): 381–397.